

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

Муха Андрій Миколайович

УДК 629.423.1:621.314

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

05.22.09 - електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Науковий консультант
Дубинець Леонід Вікторович
доктор технічних наук, професор

Дніпропетровськ – 2011

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП

7

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ

16

1.1. Аналіз сучасного стану тягового рухомого складу залізниць України

20

1.2. Аналіз сучасного стану та перспективи розвитку системи тягового електропостачання залізниць

23

1.3. Тягові електропередачі сучасного багатосистемного електрорухомого складу

26

- 1.4. Визначення напрямків удосконалення електрорухомого складу залізниць України та постановка задач дослідження
37
- 1.5. Висновки з першого розділу
41

РОЗДІЛ 2. ВАРІАНТИ СТРУКТУР ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ 43

- 2.1. Обґрунтування вибору робочої частоти статичного перетворювача
43
- 2.2. Вплив виду тягових двигунів на перелік функцій статичного перетворювача для багатосистемних електровозів
48
- 2.3. Силовий модуль - складова частина тягового перетворювача. Класифікація та потужність силових модулів
55
- 2.4. Узагальнена структура тягової електропередачі багатосистемного електровоза
64
- 2.5. Структури тягових перетворювачів багатосистемних електровозів
70
- 2.6. Прогнозування надійності тягових перетворювачів з ланкою підвищеної частоти
77
- 2.7. Висновки з другого розділу
94

РОЗДІЛ 3. ОБґРУНТУВАННЯ СТВОРЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ З ТОЧКИ ЗОРУ УНІФІКАЦІЇ 97

- 3.1. Уніфікація перетворювальних структур тягового перетворювача багатосистемного електровоза
97
- 3.2. Визначення параметрів мережевих випрямлячів тягових перетворювачів перспективних багатосистемних електровозів
98
- 3.3. Теоретичні передумови уніфікації перетворювачів. Математична модель оптимізації параметричного ряду пристроїв
114
- 3.4. Постановка задачі оптимізації параметричних рядів
114
- 3.5. Функція попиту для задачі оптимізації параметричних рядів
117

3.6. Визначення співвідношення між вартістю та параметрами силових напівпровідникових приладів. Функція витрат для задачі оптимізації параметричних рядів.

130

3.7. Порівняльний аналіз оптимальних параметричних рядів структур статичних перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів

157

3.8. Висновки з третього розділу

174

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ БАГАТОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

176

4.1. Аналіз властивостей сучасних магнітних матеріалів

177

4.2. Вплив робочої частоти та індукції на рівень питомих втрат у магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти

181

4.3. Вплив робочої частоти на об'єм магнітопроводу та індукцію в ньому

185

4.4. Схема заміщення тягового трансформатора перетворювача

205

4.5. Параметри номінального режиму роботи тягового трансформатора підвищеної частоти.

208

4.6. Параметри схеми заміщення тягового трансформатора підвищеної частоти у режимі неробочого ходу.

222

4.7. Параметри схеми заміщення тягового трансформатора підвищеної частоти у режимі короткого замикання.

229

4.8. Дослідження взаємного зв'язку потужності та конструктивних показників перетворювачів тягової електропередачі багатосистемного електровоза

240

4.8.1. Елементна база сучасних тягових статичних перетворювачів

242

4.8.2. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів асинхронного електроприводу

248

4.8.3. Вплив рівня робочої напруги на габаритні показники статичного перетворювача асинхронного електроприводу

250

- 4.8.4. Вплив виду системи охолодження на габаритні показники статичного перетворювача асинхронного електроприводу
256
- 4.8.5. Вплив виду елементної бази на габаритні показники статичного перетворювача асинхронного електроприводу
260
- 4.9. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів тягової електропередачі з двигунами постійного струму
265
- 4.9.1. Вплив виду системи охолодження на габаритні показники статичного перетворювача електроприводу постійного струму
268
- 4.9.2. Питомий об'єм статичних перетворювачів тягового електроприводу постійного струму
272
- 4.9.3. Вплив виду елементної бази на габаритні показники статичного перетворювача електроприводу постійного струму
275
- 4.10. Висновки з четвертого розділу
277

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСІВ У ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ НА СИСТЕМИ АВТОМАТИКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНОК ЗАЛІЗНИЦЬ

- 281
- 5.1. Параметри моделей існуючих систем тягового електропостачання
284
- 5.2. Імітаційні моделі статичного перетворювача підвищеної частоти
287
- 5.3. Оцінка рівня впливу статичного перетворювача з ланкою підвищеної частоти на кола СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць
290
- 5.3. Висновки з п'ятого розділу
293

РОЗДІЛ 6. ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

- 294
- 6.1. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача в режимі живлення від контактної мережі змінного струму
294
- 6.1.1. Енергетичні показники складових частин тягового перетворювача підвищеної частоти.
295
- 6.1.2. Енергетичні показники трифазного трансформатора підвищеної частоти.

300
6.1.3. Енергетичні показники конденсаторних фільтрів-накопичувачів
301
6.1.4. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача для режиму «25 кВ, 50 Гц» при асинхронних тягових двигунах
303
6.1.5. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача для режиму «25 кВ, 50 Гц» при тягових двигунах постійного струму
308
6.2. Визначення коефіцієнту корисної дії уніфікованого перетворювача в режимі живлення від контактної мережі постійного струму.
310
6.2.1. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача для режиму «3 кВ постійного струму» при тягових двигунах постійного струму
313
6.3. Шляхи підвищення коефіцієнта корисної дії енергетичних систем електрифікованих залізниць.
315
6.4. Висновки з шостого розділу
318

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ НА ПІДВИЩЕНУ НАПРУГУ У КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

320
7.1. Висновки з сьомого розділу
330

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

331

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

335

ВСТУП

З метою підвищення конкурентоспроможності залізниць у порівнянні з іншими видами транспорту потрібно підвищувати прискорення і швидкості потягів, для чого необхідно підвищувати питому потужність електровозів у межах маси, при якій забезпечується потрібна зчїпна вага та допустима дія на колію [1].

Напруга 3 кВ контактної мережі постійного струму, яка використовується на залізницях України, не забезпечує передачу достатньої потужності при русі важковагових або швидкісних поїздів. Переведення електрифікованих ділянок з тягою на постійному струмі 3 кВ на змінний 25 кВ 50 Гц, за різними оцінками, потребує від 60 до 80% від вартості побудови нової лінії, а строк окупності перевищує 15 років, що у наш час майже неможливе з економічних міркувань [2,3,21]. Загальновідомий той факт, що підвищення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6, 12 або 24 кВ (що допустиме з точки зору запасу електроізоляції існуючої системи електропостачання постійного струму [23]) дозволить підвищити пропускну спроможність та підвищити ефективність електричної тяги постійного струму [2,3,4]. Але це вимагає впровадження принципово нового енергоефективного тягового електрорухомого складу для роботи на електрифікованих ділянках постійного струму з підвищеною напругою у контактній мережі.

Вказаній проблемі присвячені роботи відомих вчених: В. Е. Розенфельда, Г. И. Колпахчяна, В. П. Феоктистова, В. В. Литовченко, М. В. Панасенко, Н. А. Ротанова, М. П. Бадера та інш.

Одночасно з упровадженням нового електрорухомого складу для залізниць, електрифікованих на постійному струмі традиційної та підвищеної напруги у контактній мережі, доцільно провести впровадження нових енергоефективних електровозів та електропоїздів також і для ділянок, електрифікованих на змінному струмі.

Для зменшення експлуатаційних витрат на утримання електрорухомого складу необхідно максимально широко застосовувати уніфіковане електрообладнання на нових електровозах як постійного та і змінного струму, що є досить складною проблемою, оскільки вимагає використання єдиних схемних рішень для принципово різних електровозів.

Вирішити цю проблему може впровадження багатосистемного електрорухомого складу (ЕРС), під яким розуміється ЕРС, що зможе працювати як при змінному струмі з напругою 25 кВ, так і постійному при різних рівнях напруги у контактній мережі (3, 6, 12 або 24 кВ).

Використання багатосистемного ЕРС дозволить збільшити плечі роботи електровозів та електропоїздів, зменшити втрати часу для заміни електровозів на станціях стикування різних енергосистем, привести ремонтно-експлуатаційну базу усіх депо та заводів до єдиної системи, спростити підготовку ремонтно-експлуатаційного складу підприємств залізничного транспорту.

У західній Європі вже відносно давно успішно використовують багатосистемний ЕРС, що обумовлено наявністю основних чотирьох систем енергопостачання електрифікованих залізниць [25].

При традиційних підходах у проектуванні, коли частота змінного струму приймається сталою і рівною 50 Гц, з підвищенням потужності підвищується маса локомотива. Маса тягової електропередачі багатосистемних електровозів – це в

основному маса тягових двигунів, трансформатора та напівпровідникових перетворювачів.

Сучасні тенденції у проектуванні локомотивів з переходом від колекторних машин постійного струму до безколекторних дозволяє зменшити масу тягових двигунів більш, ніж у два рази при однакових потужностях, що суттєво з урахуванням того, що, наприклад, маса тягового двигуна постійного струму типу ЭД141У1 дорівнює 4,75 т [5], але при цьому збільшується маса статичного перетворювача, що можна компенсувати зменшенням маси тягового трансформатора. Суттєве зменшення маси останнього можна досягнути за рахунок збільшення частоти струму.

Актуальність теми

Тяговий електрорухомий склад, що експлуатується на залізницях України, є фізично та морально застарілим. Кількість електровозів зменшується внаслідок списування старих, а закупівля нових не достатня. Крім того, експлуатація старого тягового рухомого складу призводить до збільшення експлуатаційних витрат внаслідок об'єктивних процесів старіння обладнання. Все це призводить до зростання собівартості перевезень.

Тому підвищення конкурентоспроможності залізниць, у порівнянні з іншими видами транспорту, є головною метою яка стоїть перед науковцями транспортної галузі.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є створення багатосистемних електровозів з урахуванням систем електропостачання, які традиційно склалися на залізницях України (3 кВ постійного та 25 кВ змінного струмів) і перспективних. Розробка та виробництво нового енергоефективного тягового електрорухомого складу, зокрема електровозів, – є стратегічним завданням. Новий електрорухомий склад потребує менших експлуатаційних витрат за рахунок зменшення витрат на його ремонт та утримання.

Підвищення напруги у контактній мережі постійного струму є одним із факторів підвищення пропускнуєї спроможності залізниць.

Реально підвищити напругу у контактній мережі постійного струму з традиційного значення 3 кВ можливо тільки у декілька етапів, тому можливі різні сполучення номінальних напруг багатосистемного електровоза: 3/6 кВ, 3/12 кВ або 3/24 кВ для мережі постійного струму та 25 кВ (50 Гц) у мережі змінного струму, оскільки багатосистемний електровоз повинен забезпечити роботу на електрифікованих ділянках залізниць незалежно від роду струму та напруги у контактній мережі.

У дисертації вперше комплексно досліджено основні задачі, пов'язані зі створенням уніфікованих надійних енергоефективних електропередач багатосистемних електровозів з урахуванням специфічних умов експлуатації тягового ЕРС на процеси у колах статичного перетворювача вказаних електропередач, а також розглянуто питання взаємодії багатосистемного електровоза з системами СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць. Отримані наукові результати дозволяють надати рекомендації щодо проектування та виробництва нового енергоефективного багатосистемного електрорухомого складу, тягова електропередача якого базується на статичному перетворювачі підвищеної частоти.

Тому тема дисертаційної роботи є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Роботу виконано відповідно до головних напрямків «Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», затвердженої

Міністерством транспорту та зв'язку України (наказ від 14.10.2008 №1259), «Програми енергозбереження на залізничному транспорті на період 1996-2010 р.р.», розробленої Укрзалізницею у червні 1996 року і згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 №661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту», а також відповідно до щорічних координаційних планів науково-дослідних та конструкторських робіт Укрзалізниці.

Обраний напрямок дослідження пов'язано з планами виконання таких науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна: «Розробка та дослідження напівпровідникового перетворювача тягового електропривода для перспективних електровозів подвійного живлення» (№ДР 0105U007819); «Наукове обґрунтування принципів побудови перетворювача тягового приводу багатосистемних електровозів при двигунах постійного струму» (№ДР 0107U002524); «Наукове обґрунтування принципів побудови перетворювача тягового приводу багатосистемних електровозів при вентильних двигунах» (№ДР 0109U006764); «Дослідження параметрів статичного перетворювача тягового приводу багатосистемного електровоза» (№ДР 0110U000902). Автор був керівником третьої та провідним фахівцем при виконанні інших, серед перелічених, науково-дослідних робіт.

Мета та задачі дисертаційної роботи

Метою роботи є розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів для залізниць України, що забезпечує вирішення важливої **науково-технічної проблеми** – покращення техніко-економічних показників перевізного процесу за рахунок:

- збільшення енергоефективності електрифікованих ділянок залізниць при використанні багатосистемних електровозів з більшим коефіцієнтом корисної дії та підвищенні напруги у контактній мережі постійного струму;
- ліквідування втрат часу при заміні електрорухомого складу у місцях стикування контактних мереж з різними видами живлення;
- зменшення експлуатаційних витрат на утримання електрорухомого складу при використанні уніфікованого електрообладнання та устаткування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі першочергові **задачі**:

- 1.Провести аналіз сучасного стану та перспектив розвитку тягового електрорухомого складу й системи енергопостачання залізниць; показати доцільність створення багатосистемного ЕРС для роботи як при напрузі 3кВ, 6 кВ, 12 кВ або 24 кВ постійного струму, так і при напрузі 25 кВ, 50 Гц у контактній мережі
- 2.Визначити перелік задач, для вирішення яких потрібно провести дослідження в напрямку розвитку наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів для залізниць України.

Об'єкт досліджень - процес перевезень на залізницях України.

Предмет досліджень - тягові електропередачі багатосистемних електровозів.

Методи досліджень

Для вирішення поставлених задач у роботі використано: методи теорії електричної тяги; методи та положення теорії надійності; принципи моделювання електромеханічних систем; методи техніко-економічного аналізу; положення та методи теорії уніфікації електрообладнання; положення та методи теорії ймовірностей та математичної статистики. Теоретичні розрахунки та статистичну їх обробку проведено з

використанням прикладних програм на ПЕОМ.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які містяться в дисертації, достатньо обґрунтовані та вірогідні, оскільки:

-експериментальні дослідження коректно поставлено та кваліфіковано виконано, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує загальноприйнятих значень;

-теоретичні розрахунки виконано на ПЕОМ з похибкою $\sim 10^{-6}$, а дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів

До основних наукових результатів, отриманих автором особисто, і які виносяться на захист, відносяться.

1. Вперше запропоновано науково обґрунтовану структурну схему статичного перетворювача підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемного електровоза, яка, на відміну від існуючих схем, може бути використана при різних сполученнях напруг у контактній мережі як змінного, так і постійного струмів та при різних типах тягових двигунів, що забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії системи енергопостачання електрифікованих залізниць.

2. Розроблено склад модуля тягового перетворювача, який, на відміну від складу діючих перетворювачів, забезпечує ефективну роботу тягової електропередачі багатосистемних електровозів при будь-якому сполученні напруг з ряду 3, 6, 12 або 24 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму, при забезпеченні достатньої надійності та рівня уніфікації тягового перетворювача.

3. Вперше обґрунтовано доцільність застосування в багатосистемних електровозах тягових трифазних трансформаторів підвищеної частоти, що дозволить використання класу ізоляції тягового електрообладнання не вище того, який застосовується на даний час, що можливе за рахунок відповідного з'єднання елементів вхідного контуру перетворювача, при необхідній напрузі на первинній обмотці трансформатора.

4. Запропоновано показник «струм-клас» для силових напівпровідникових елементів при розрахунку цільової функції, що дозволяє визначити оптимальну, з точки зору реальних параметрів елементної бази, перетворювальну структуру для тягової електропередачі багатосистемних електровозів.

5. Встановлено закономірності впливу діапазону робочих напруг, виду елементної бази та системи охолодження на питомий об'єм перетворювача (об'єм на одиницю потужності), які можуть бути використані при створенні тягових перетворювачів з мінімальним об'ємом при заданій потужності.

6. Вперше обґрунтовано раціональний діапазон робочих частот (від 519 до 2076 Гц) тягового трансформатора підвищеної частоти в залежності від його потужності та матеріалу магнітопроводу, що дозволяє забезпечити мінімальні габарити трансформатора та електромагнітну сумісність з пристроями СЦБ та зв'язку у стаціонарних режимах роботи.

Практичне значення отриманих результатів

Запропоновані структурні та функціональні схеми, отримані співвідношення та інші результати досліджень можуть бути рекомендовані до використання при розробці

статичних перетворювачів підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемних електровозів, що дозволить:

- створити уніфіковані надійні статичні перетворювачі підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемних електровозів;
- підвищити енергоефективність електрифікованих залізниць;
- зменшити експлуатаційні витрати на утримання електровозів при використанні уніфікованого електрообладнання та устаткування;
- забезпечити електромагнітну сумісність обладнання тягової електропередачі багатосистемного електровозу з колами сигналізації, централізації та блокування, тобто підвищити безпеку руху поїздів.

Результати досліджень впроваджено в локомотивному господарстві Укрзалізниці, на Запорізькому електровозоремонтному заводі (ПАТ «ЗЕРЗ»), у навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна при вивченні дисципліни «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів».

Особистий внесок здобувача

Автор разом з науковим консультантом сформулював мету, задачі досліджень. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Крім того, в публікаціях, в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належать: [18] – визначення напрямків удосконалення тягових електропередач багатосистемних електровозів, [29] – ідея проведення досліджень з метою визначення видів силових напівпровідникових приладів для силових кіл електрорухомого складу, [30] – визначення методів зменшення впливу вентильних перетворювачів на тягову мережу, [31] – ідея використання трансформаторів підвищеної частоти у складі тягового перетворювача для зменшення маси електрообладнання електровоза, [32] – ідея використання дволанкового тягового перетворювача з підвищеними енергетичними показниками, [33] – метод та критерії визначення раціонального діапазону частот для покращення масо-габаритних показників електрообладнання електровозів, [34] – визначення основних показників, [35] – проведення порівняльного аналізу використання тягових двигунів різних видів на електрорухомому складі, [36] – метод обробки експериментальних результатів та розробка рекомендацій щодо вибору системи охолодження та елементної бази для тягових статичних перетворювачів, [37] – визначення раціональної структури перетворювача для багатосистемного електровоза, [38] – проведення досліджень з визначення впливу тягової мережі підвищеної напруги на рейкові кола, [39, 41] – ідея роботи, [43] – схема силової частини тягового перетворювача та відповідні співвідношення, [44] – визначення методів досліджень, [45] – визначення напрямку досліджень та запропоновані матеріали для магнітопроводів трансформаторів підвищеної частоти; [46] – визначення методів дослідження впливу підвищення напруги на зменшення величини втрат енергії, [47] – ідея роботи та перелік режимів роботи перетворювача, які досліджуються.

Роботи [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 228] написані автором самостійно.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати доповідались й отримали схвалення на таких Міжнародних науково-практичних конференціях: LXVI-й «Проблеми та перспективи

розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2006; першій «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2007; LXVII-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2007; «Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи», Дніпропетровськ, 2008 р.; II-й «Електрифікація залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2008 р.; II-й «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2009; III-й «Транселектро 2009», Дніпропетровськ, 2009; «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», Львів, 2009; IV-й «Транселектро 2010», Дніпропетровськ, 2010; III-й «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2010; 70-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2010; I-й «Енергозбереження на залізничному транспорті», Дніпропетровськ, 2010; 71-й «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2011.

Дисертація в повному обсязі доповідалась на науковому семінарі кафедри автоматизованого електропривода, міжкафедральному науковому семінарі кафедр: автоматизованого електропривода, теоретичних основ електротехніки, електрорухомого складу, електропостачання залізниць, локомотивів, вагонів Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (Дніпропетровськ, 2011 р.).

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 34 наукових працях, у тому числі: 20 – у фахових виданнях, 2 – патентах на корисну модель, 12 – тезах доповідей та матеріалах конференцій.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ

Україна має одну з найбільш розвинених у Європі мережу залізниць, експлуатаційна довжина якої становить понад 22 тис. км. За густотою вона займає провідне місце серед країн СНД і наближається за цим показником до таких європейських країн, як Франція та Італія [2,3,6].

За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись тільки залізницям Китаю, Росії та Індії. Вантажонапруженість українських залізниць (річний обсяг перевезень на 1 км) у 3 – 5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн.

Вигідне географічне положення країни посилює значимість залізничного транспорту та обумовлює наявність одного з найбільших у Європі потенціалів транзитності залізниць України, які взаємодіють із залізницями 7 сусідніх країн через 56 пунктів перетину кордону та з 13 основними морськими портами Чорного та Азовського морів і річки Дунай.

Залізниці є однією із базових галузей економіки України. На них припадає 88% вантажообігу (без урахування трубопровідного транспорту) та 50% пасажирообігу на відміну від країн ЄС, де частка залізниць становить біля 8% [6]. Вартість основних виробничих фондів залізниць становить 9% від вартості основних фондів усіх галузей економіки України [7].

Найважливішими перевагами залізничного транспорту в сучасних умовах є його економічність, доступність та екологічність. Це вид транспорту, для якого характерне широке використання електроенергії для масових перевезень. В умовах стрімко зростаючих цін на нафтопродукти це може стати вирішальним фактором для підвищення конкурентноспроможності залізничного транспорту та послаблення його залежності від зовнішньоекономічних чинників, адже єдиним джерелом енергії, яким Україна забезпечується на 100% за рахунок власного виробітку, є саме електрична енергія.

В Україні електрифіковано майже 43 % від загальної довжини залізничної мережі, а виконувана робота в електротязі становить 82,7%. Собівартість перевезень електротягою в декілька разів нижча, ніж теплотягою, що обумовлюється меншими питомими витратами умовного палива (до 2 разів), більшими ваговими нормами та швидкостями руху поїздів (в 1,2 -1,3 разу), меншими експлуатаційними витратами на утримання експлуатаційного парку електровозів [6,8, 9].

Для оцінки енергетичної ефективності будь-якої електротехнічної чи електромеханічної системи використовують, у першу чергу, коефіцієнт корисної дії (ККД). До складу системи енергопостачання електрифікованих залізниць входять: електростанції, розподільні електромережі, тягові підстанції, тягові електричні мережі та електрорухомий склад. Останні три елементи відносяться до енергетичної системи електрифікованих залізниць. Як відомо, середній ККД основних складових частин та його результуюче значення енергетичної системи електрифікованих залізниць визнають як [10]:

$$(1.1)$$

- де:
- ККД тягової підстанції;
 - ККД тягової мережі;
 - ККД електрорухомого складу (електровозів).

Відповідно до даних, представлених у [10], для вітчизняних електрифікованих на постійному струмі залізниць, з ККД тягових підстанцій та тягової мережі, при наявному електрорухомому складі з ККД, середній ККД енергетичної системи буде дорівнювати:

$$(1.2)$$

Аналогічно для залізниць, електрифікованих на змінному струмі, при та середній ККД енергетичної системи буде дорівнювати:

$$(1.3)$$

Як бачимо з (1.2) та (1.3), середні ККД енергетичних систем при змінному кращі, ніж при постійному струмі лише на. При цьому трансформаторні підстанції змінного струму, у порівнянні з підстанціями постійного струму, більш ефективні на.

Тягова мережа змінного струму, за рахунок більш високої напруги, а тому меншими втратами електричної енергії (при однаковій потужності електровозів), має, у порівнянні з системою постійного струму, на більший ККД.

Мала різниця () між ККД енергетичних систем змінного та постійного струмів визначається, в першу чергу, відносно низьким середнім ККД електрорухомого складу змінного струму, у порівнянні з електрорухомим складом постійного струму.

Тягова електропередача електровозів змінного струму українського та російського виробництва, які експлуатуються на залізницях України, складаються за класичною структурою: «трансформатор – випрямляч – тяговий двигун постійного струму – тягова зубчаста передача» або «трансформатор – випрямляч – інвертор – асинхронний тяговий двигун – тягова зубчаста передача». Втрати потужності у тяговому трансформаторі та дроселі складають приблизно 4,5 %, тобто ККД дорівнює ; при втратах у випрямлячі на рівні 1% його ККД складає ; при втратах у інверторі на рівні 3% його ККД дорівнює ; ККД тягового двигуна постійного струму складає , а змінного струму (асинхронного) ; ККД тягової зубчастої передачі дорівнює [11]. При таких значеннях ККД складових частин, сумарний ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму при тягових двигунах постійного струму буде дорівнювати:

$$(1.4)$$

(1.5)

Тут, і надалі, під терміном «тягова електропередача електровоза» розуміється сукупність його складових частин, призначених для перетворення електричної енергії, яку електровоз отримує з контактної мережі, у механічну енергію на валу приводної колісної пари.

При двигунах змінного струму (асинхронних) сумарний ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму буде дорівнювати:

(1.6)

(1.7)

Відносно низьке значення ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму з асинхронними тяговими двигунами обумовлено наявністю додаткового елемента – інвертора та відносно низьким ККД асинхронного тягового двигуна.

Тягова електропередача сучасних електровозів європейського виробництва, в яких використовуються чотирьохквADRантні перетворювачі та асинхронні тягові двигуни, мають структуру: «трансформатор – перетворювач частоти з ланкою постійного струму – асинхронний тяговий двигун – тягова зубчаста передача». Втрати потужності у тяговому трансформаторі та дроселі становлять приблизно 3% (); перетворювачі частоти з ланкою постійного струму - 7,75% (); в асинхронному тяговому двигуні - 3,5% (); втрати у тяговій зубчастій передачі - 1,25% () [11]. При таких значеннях втрат, сумарний ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму європейського виробництва з асинхронними тяговими двигунами буде дорівнювати:

(1.8)

(1.9)

Відносно високе значення ККД тягової електропередачі електровозів змінного струму європейського виробництва з асинхронними тяговими двигунами обумовлено використанням тягової зубчастої передачі, тягового двигуна та трансформатора з більш високим значенням ККД, які компенсують високе значення втрат у перетворювачі частоти. Також використання чотирьохквADRантного перетворювача дозволило отримати коефіцієнт потужності перетворювача близьким до одиниці.

Виходячи з виразу (1.1), збільшити енергоефективність електрифікованих залізниць можливо відповідним підвищенням ККД: тягових підстанцій, контактної мережі та тягової електропередачі електровозів постійного (змінного) струму.

Саме питанню побудови тягових електропередач багатосистемних електровозів із покращеними енергетичними показниками присвячено представлену дисертаційну роботу.

1.1. Аналіз сучасного стану тягового рухомого складу залізниць України

На фоні зростання обсягів перевезень особливо загострилися проблеми оновлення матеріально-технічної бази залізничного транспорту. Найбільш актуальною є проблема критичного стану активної частини основних фондів, яка за останні роки практично не оновлювалася [8].

Залізниці України до останнього часу забезпечували потреби економіки та населення у перевезеннях. Досягалось це, в основному, за рахунок надлишку технічних потужностей, створених раніше. До 2000 року темпи падіння обсягів перевезень перевищували темпи старіння та виведення з експлуатації основних фондів, особливо їх активної частини – рухомого складу. На даний час резерви залізниць у цьому напрямку вичерпані [8].

Ситуація ускладнюється тим, що знос рухомого складу, термін експлуатації якого складає 25-30 років, досягає 70%. Це призводить до збільшення витрат на його ремонт та на забезпечення безпеки руху, проти нормативних, більше ніж у 2 рази [8].

Подальше збільшення обсягів перевезень, якого потребує зростаюча економіка та попит населення, вимагає формування нового рівня транспортного забезпечення потреб суспільства, який повинен базуватися на якісно новому здійсненні всього комплексу технологічних операцій. Новий рівень транспортного забезпечення вимагає впровадження рухомого складу нового покоління з більш високим рівнем якісних, технічних та економічних показників експлуатації, збільшеними термінами служби, з його відповідністю новим сучасним вимогам, у тому числі і світовим. На сьогодні потенційні перевізні можливості залізничного транспорту по тяговому рухомому складу (ТРС) скоротилися від рівня 1992 року на 38% [8].

Стан наявного ТРС, який в основному розроблявся в 1950 – 1970 роках, підійшов до критичної межі, а його середній знос становить [8]:

- по електровозах – 90 %
- по тепловозах – 92 %
- по електропоїздах – 80 %
- по дизель-поїздах – 97%.

Прийняте рішення щодо проведення капітально-відновлювального ремонту з подовженням терміну експлуатації на 10-15 років, що дало можливість на певному етапі забезпечити утримання в експлуатації необхідного парку, проте не вирішено основної проблеми його оновлення. На сьогодні, починаючи з 2000 року, фактичне оновлення парку магістральних електровозів України йде недостатньо швидко [8,32].

Кращі технічні параметри ТРС нового покоління, більша продуктивність та збільшені міжремонтні пробіги дозволяють розширити полігон експлуатації, підняти продуктивність, відповідно зменшити кількість необхідного парку ТРС, зменшити експлуатаційні витрати на його утримання і ремонт протягом усього життєвого циклу. Так, за різними оцінками, використання сучасного ТРС, зокрема ЕРС, дозволить зменшити витрати електроенергії на 18% та на 25% зменшити витрати на ремонт та технічне обслуговування [12].

Для забезпечення на період 2008 – 2020 років зростаючих обсягів пасажирських і вантажних перевезень, забезпечення потреби в ТРС після електрифікації та ліквідації наявного дефіциту парку згідно з програмою оновлення рухомого складу на 2008-2020 роки, проект якої розроблено Міністерством транспорту і зв'язку України спільно з

Мінпромполітики України, передбачено проводити закупівлю ТРС різних типів нового покоління. Це дозволить покращити техніко-економічні показники діяльності залізничного транспорту, поліпшити безпеку та зручність перевезень, підвищити конкурентоспроможність залізниць України, зробити ривок у підвищенні ефективності роботи галузі [8,9,13,14,15,16].

Коефіцієнт корисної дії перспективних електровозів постійного струму повинен бути не менше 90%, а змінного струму – 88% [17]. Ці значення більше, ніж представлені вище середні ККД електровозів, які експлуатуються на залізницях України. Збільшення ККД електровоза постійного струму з 87% до 90%, дозволить отримати середній ККД енергетичної системи на рівні:

$$(1.10)$$

Тобто, зростання ККД енергосистеми за рахунок використання більш ефективних електровозів, становитиме

При збільшенні ККД електровозів змінного струму з 82% до 88%, ККД енергосистеми електрифікованих на змінному струмі залізниць, становитиме:

$$(1.11)$$

Відповідне зростання ККД енергосистеми, при використанні більш ефективних електровозів змінного струму, становитиме

При цьому перевага системи змінного струму, перед системою постійного струму, становитиме вже , що є досить суттєвим.

Таким чином, існуючий тяговий електрорухомий склад є морально застарілим і фізично зношеним та характеризується низьким коефіцієнтом корисної дії тягової електропередачі. При використанні сучасних електровозів постійного та змінного струму з кращими енергетичними показниками ККД енергосистеми постійного струму зросте на 4%, а змінного струму – на 5%.

1.2. Аналіз сучасного стану та перспективи розвитку системи тягового електропостачання залізниць

На долю електрифікованих залізниць України приходить 82,7% (станом на 2008 рік) від обсягу перевезень залізничним транспортом України [6]. На залізницях України застосовують дві системи електричної тяги: змінного струму 25 кВ промислової частоти та постійного струму 3 кВ. З яких 50,8 % від загальної довжини електрифікованих ділянок України працюють на постійному струмі [2,3].

Світовий досвід застосування різних систем електричної тяги постійного і змінного струмів однозначно свідчить про переважне використання системи змінного струму промислової частоти напругою 25 кВ [2,3,18,19].

Капітальні витрати на електрифікацію змінним струмом, навіть із урахуванням реконструкції ліній зв'язку, на 15 - 18 % нижче, ніж при електрифікації постійним

струмом. Число тягових підстанцій менше в 2 - 3 рази, вони істотно простіші, у результаті чого значно нижчі витрати на їхнє технічне обслуговування. Легше контактна підвіска - економія міді становить більше 2 т на 1 км. Зменшується проблема зношування контактних проводів та їхньої періодичної заміни, виключається електрокорозія опор контактної мережі й підземних споруджень [20].

Досвід російських залізниць (РЖД) показує, що електрифіковані ділянки змінного струму мають більше високу енергетичну ефективність, менші на 5...6 % сумарні втрати енергії на тягу; на них практично не обмежується вагова норма поїздів. При рівних обсягах роботи на ділянках змінного струму потрібно на 15 - 20 % менше локомотивів і локомотивних бригад. Пошкоджуваність пристроїв електропостачання й електрорухомого складу (з безколекторним приводом) також помітно нижче. У результаті собівартість перевезень на ділянках змінного струму майже на 20 % менше, ніж при електротязі постійного струму [2,3].

Система змінного струму забезпечує більші переваги в поетапному нарощуванні енергетичних можливостей електричної тяги, а за необхідності й у їхньому зниженні, наприклад, при спаді обсягів перевезень.

До недоліків системи 25 кВ промислової частоти, в першу чергу, відносять відносно малі показники якості електричної енергії, у тому числі низький

Не потребує доказів той факт, що система 3 кВ постійного струму вичерпала свої можливості, оскільки підвищення потужності локомотивів (підвищення струмового навантаження) призводить до зниження напруги у контактній мережі, що зменшує пропускну здатність завантажених ділянок.

Модернізувати систему тягового електропостачання 3 кВ постійного струму можливо двома напрямками:

- переведення електрифікованих ділянок на змінний струм напругою 25 кВ промислової частоти 50 Гц;
- підвищення напруги у контактній мережі постійного струму, що дозволить зменшити струмове навантаження та підвищити пропускну здатність цих електрифікованих ділянок.

Перший напрямок - переведення електрифікованих ділянок з тягою на постійному струмі 3 кВ на змінний 25 кВ 50 Гц, за різними оцінками, потребує від 60 до 80% вартості побудови нової лінії, а строк окупності перевищує 15 років, що у наш час майже неможливе з економічних міркувань [2,3,21]. Крім того, з досвіду РЖД відомо, що наявність відносно невеликого мобільного парку багатосистемного ЕРС значно б спростило переобладнання системи постійного 3 кВ на змінний струм 25 кВ 50 Гц (ділянка «Зима» - «Слюдянка») [22].

Другий напрямок потребує використання нетрадиційних систем постійного струму з підвищеною напругою кратною 3 кВ, а саме 6, 12 або 24 кВ. Це дозволить зменшити струмове навантаження. Так підвищення напруги з 3 до 6 кВ дозволяє зменшити втрати потужності в контактній мережі з 12% до 3% [23]. Зменшення струмового навантаження дозволить зменшити використання дефіцитного матеріалу – міді, а це є дуже важливим чинником у впровадженні енергозберігаючих технологій на залізничному транспорті [20, 24]. Крім того, система електропостачання постійного струму має низку переваг перед системами змінного струму [19]:

- рівномірне навантаження фаз живлючих ліній енергосистем;
- відсутність індуктивних складових опор у всьому колі передачі енергії;

- відсутність електромагнітного впливу на сумісні системи.

З технічної точки зору другий напрямок є можливим при відносно малих витратах, тому що розробниками закладено запас по напрузі для ізоляторів та комутуючої апаратури. Визначення раціонального рівня напруги є доволі складна науково-технічна задача і потребує проведення додаткових досліджень [2,3,4,8,18,23].

При збільшенні напруги у контактній мережі постійного струму зростає ККД тягової мережі, а тому і ККД енергосистеми електрифікованих на постійному струмі залізниць також зростає.

Реально підвищити напругу у контактній мережі постійного струму можливо тільки у декілька етапів, тому можливі сполучення напруг з ряду: 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ або 24 кВ у мережі постійного струму. Таке впровадження вимагає використання відповідного електрорухомого складу постійного струму, який би зміг працювати як при традиційних 3 кВ у контактній мережі, так і при підвищеній напрузі. Цей новий електровоз постійного струму повинен мати номінальні напруги: 3/6 кВ або 3/12 кВ або 3/24 кВ. Якщо при цьому забезпечити можливість створення уніфікованої платформи тягової електропередачі як для нових електровозів постійного струму з підвищеною напругою, так і для електровозів змінного струму напругою 25 кВ частотою 50 Гц, реально створюються умови для зменшення експлуатаційних витрат на обслуговування таких уніфікованих локомотивів, оскільки зменшиться кількість типоміналів запасних частин та буде встановлено єдину технологічну карту ремонтів для всіх депо, які будуть експлуатувати цей багатосистемний електрорухомий склад.

Таким чином, є доцільним будувати багатосистемний електрорухомий склад. Під багатосистемним мається на увазі ЕРС, який зможе працювати як при змінному струмі з напругою 25 кВ, так і постійному при різних рівнях напруги у контактній мережі. Багатосистемний електровоз повинен забезпечити роботу на електрифікованих ділянках будь-якого виду електропостачання протягом тривалого часу, оскільки провести перехід системи постійного струму на підвищену напругу справа не миттєва.

Використання багатосистемного ЕРС, зокрема електровозів, дозволить ліквідувати втрати часу при заміні електрорухомого складу у місцях стикування контактних мереж з різними видами живлення, що також позитивно вплине на конкурентоспроможність залізниць.

1.3. Тягові електропередачі сучасного багатосистемного електрорухомого складу

Створення багатосистемних електровозів з асинхронними тяговими двигунами стало можливим завдяки успіхам силової напівпровідникової техніки – створення повністю керованих потужних GTO, IGCT, IGBT приладів. Зараз у світі існує декілька потужних виробників обладнання для багатосистемних електровозів, серед яких: “ADtranz” GmbH, “Siemens Verkehrstechnik AG”, “Alstom” та низка невеликих компаній, що працюють на певній території (країні) [25,26,27,28].

Характерною рисою тягових електропередач сучасних багатосистемних електровозів є використання базових модульних конструкцій – «платформ», що дозволяє скоротити строки розробки та вартість локомотивів. Кожна фірма виробник має свою «платформу», наприклад: “Siemens” платформа “EuroSprinter” – електровози S252 (Іспанія), E402B (Італія), 127, 152, H560, EG3100, LE5600 та інші; “ADtranz”: платформа

“Lok 2000” – електровози 1822, 450, 460; платформа “Есо 2000” електровози E412, EU43 (Польща), EU11, ЭП10 (Росія) та інші.

Параметри деяких сучасних багатосистемних електровозів та особливості їх тягових електропередач представлено у додатку А [26].

Розглянемо особливості «платформ» тягових електропередач основних виробників.

Електровоз серії 14Е (розробка та виробництво консорціумом фірм під керівництвом “Siemens” для залізниць Південно-Африканської Республіки) вважають першим багатосистемним електровозом з безколекторним тяговими двигунами, електровоз призначено для роботи на електрифікованих залізницях з напругами у контактній мережі: 25 кВ, 50 Гц змінного струму та 3 кВ постійного струму (додаток А).

Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза Е14 представлена на рис. 1.1.

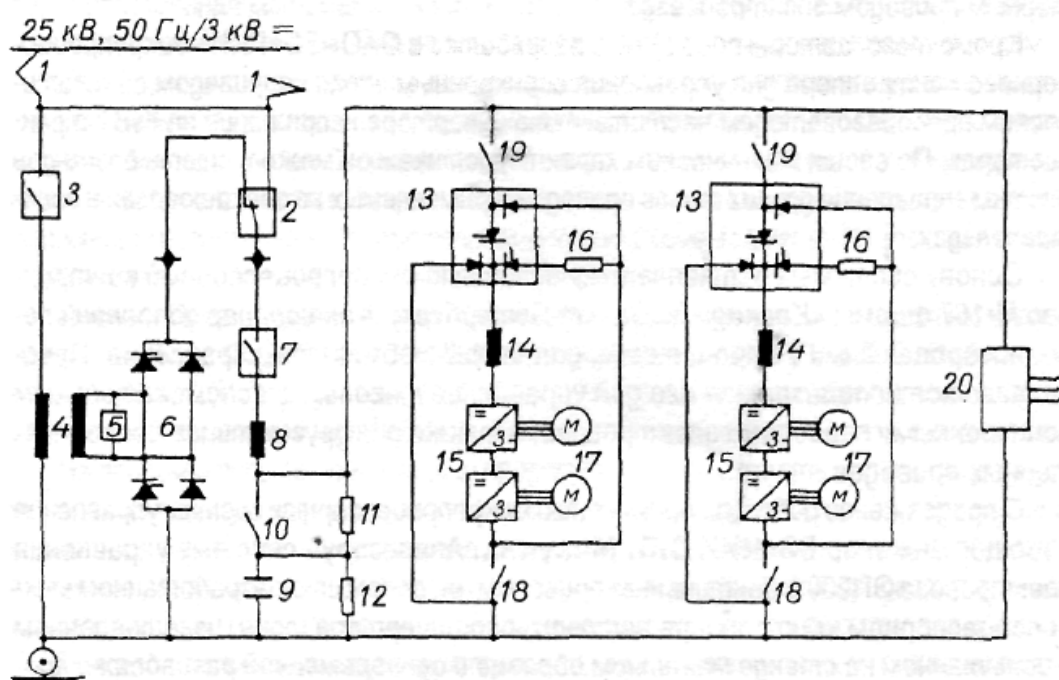


Рис. 1.1. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза Е14.

Перетворювач частоти (ПЧ) виконано з проміжною ланкою постійного струму, тобто у вихідній ланці використовується автономний інвертор струму (АІС). При живленні від контактної мережі постійного струму напруга подається через перемикач живлення 2, швидкодіючий вимикач 7 на вхідний LC фільтр, який складається з реактора 8 та конденсатора 9. При живленні від мережі змінного струму напруга подається на LC фільтр через головний трансформатор 4 та випрямляч 6.

Далі силова схема виконана роздільною для кожного візка та містить у собі: імпульсний переривач постійної напруги (ІППН) 13, котрий регулює напругу в проміжній ланці, реактори 14, АІС 15, з'єднані по два послідовно. АІС перетворюють постійний струм проміжної ланки в трифазний змінний струм, який регулюється по частоті. До кожного з АІС підключено один тяговий двигун 17.

Електровоз серії S252 (розробка та виробництво консорціумом фірм під керівництвом “Siemens” для залізниць Іспанії) призначено для роботи на електрифікованих залізницях з напругами у контактній мережі: 25 кВ, 50 Гц змінного

струму та 3 кВ постійного струму (додаток А).

Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза S252 представлена на рис. 1.2 (перемикачі А1...А7 відповідають живленню від мережі постійного струму 3 кВ).

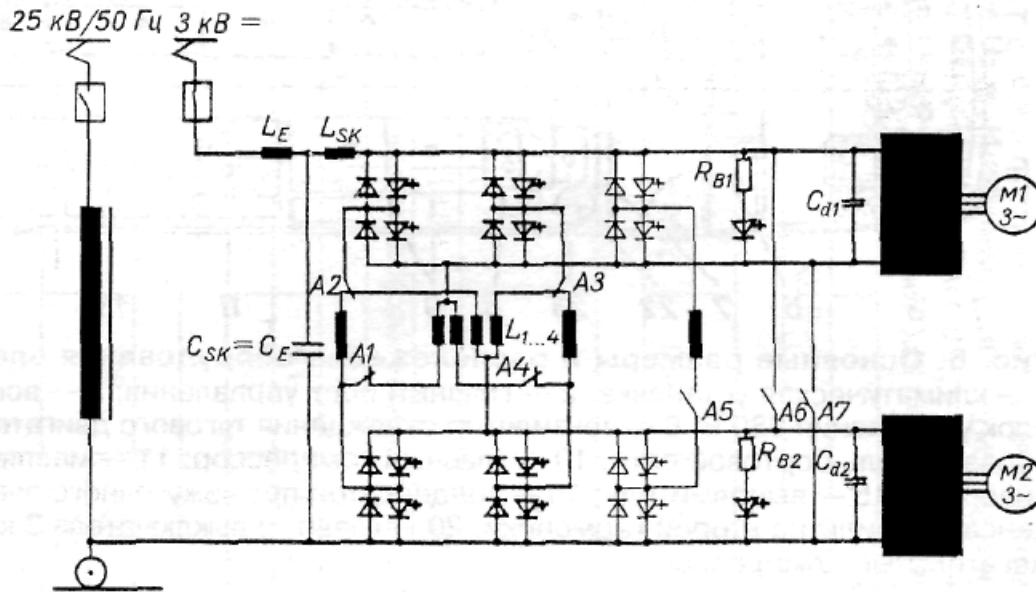


Рис. 1.2. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза S252.

При живленні від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц вхідна ланка перетворювача частоти кожного візка представляє собою три блока 4QS, які підключені паралельно до загальної проміжної ланки постійної напруги, яка складається з двох паралельно ввімкнених конденсаторів Cd1 та Cd2. До проміжної ланки підключено два автономних інвертори напруги (АІН), кожний з яких живить по одному двигуну (М1, М2) потужністю 1400 кВт.

При живленні від мережі постійного струму 3 кВ два з трьох вхідних блоків 4QS працюють як ІППН, які регулюють напругу проміжних ланок Cd1 та Cd2. В цьому випадку дві проміжні ланки не з'єднуються паралельно, а живляться окремо – кожний від свого ІППН, які з'єднуються через дроселі L1...L4, які зрівнюють струм. За допомогою спеціального метода керування можливо експлуатувати обидва інвертори з будь-яким розподіленням навантаження (двоступеневий імпульсний переривач).

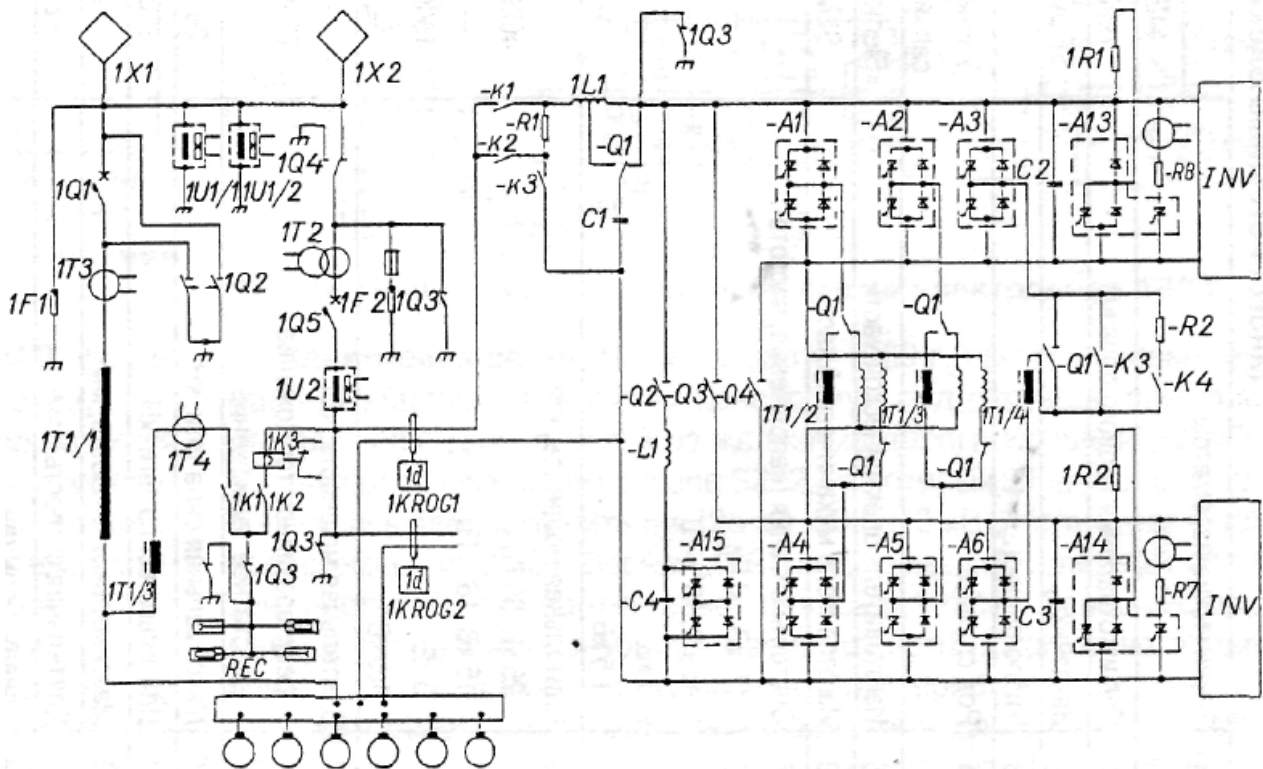


Рис. 1.3. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза E402B.

Електровоз серії E402B (розробка та виробництво фірм "Ansaldo" та "Siemens" для залізниць Італії) призначено для роботи на електрифікованих залізницях з напругами у контактній мережі: 25 кВ, 50 Гц змінного струму та 3 кВ постійного струму (додаток А).

Електровоз серії E402B зібрано на платформі "EuroSprinter" та максимально використовує напрацювання для електровоза S252.

Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза E402B представлена на рис. 1.3.

Електровоз серії 1822 (розробка та виробництво фірми "ABB" ("ADtranz") на замовлення Австрії) відноситься до сімейства "Lok 2000", в якому використовується трирівнева схема перетворювача частоти, в якій вхідна ланка (4QS) та вихідна (A1H) зібрані за схемою з середньою точкою (рис. 1.4).

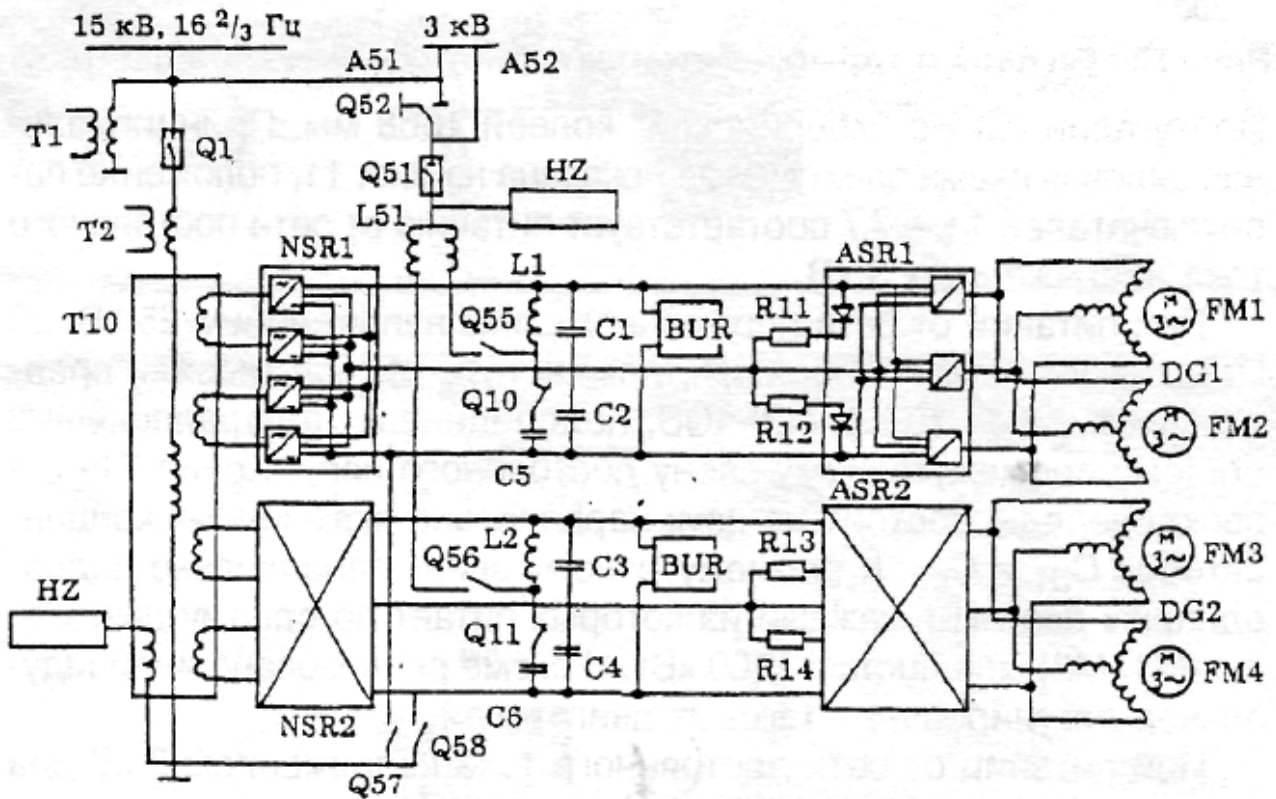


Рис. 1.4. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза 1822.

Висока напруга проміжної ланки (4200 В) дозволяє при живленні від контактної мережі постійного струму 3 кВ з'єднати її безпосередньо з контактною мережею, тобто відмовитися від вхідної ланки.

При живленні від мережі змінного струму напруга подається через головний трансформатор T10 (рис. 1.4) на вхідну ланку NSR, яка виконана за схемою трирівневого 4QS. Ця ланка стабілізує напругу на рівні 3500 В. Проміжна ланка складається з фільтруючих конденсаторів C1...C4 та LC фільтрів другої гармоніки (реактори L1, L2 та конденсатори C5, C6). Вихідна ланка ASR зібрана за схемою трирівневого автономного інвертора напруги (АІН), до якого підключено по два асинхронних тягових двигуни (АТД) паралельно (FM1, 2 та FM3, 4), тобто реалізовано групове поєднання тягових двигунів.

При живленні від мережі постійного струму 3 кВ напруга подається через реактори L51, L1, L2 безпосередньо на конденсатори проміжної ланки C1...C4. Інвертори ASR працюють у діапазоні вхідних напруг від 2400 до 4000 В.

Електровоз серії 36000 (розробка та виробництво фірми "Alsthom" на замовлення залізниць Франції) призначено для роботи на електрифікованих залізницях з напругами у контактній мережі: 25 кВ, 50 Гц змінного струму та 1,5 і 3 кВ постійного струму (додаток А) [28].

Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза 36000 представлена на рис. 1.5.

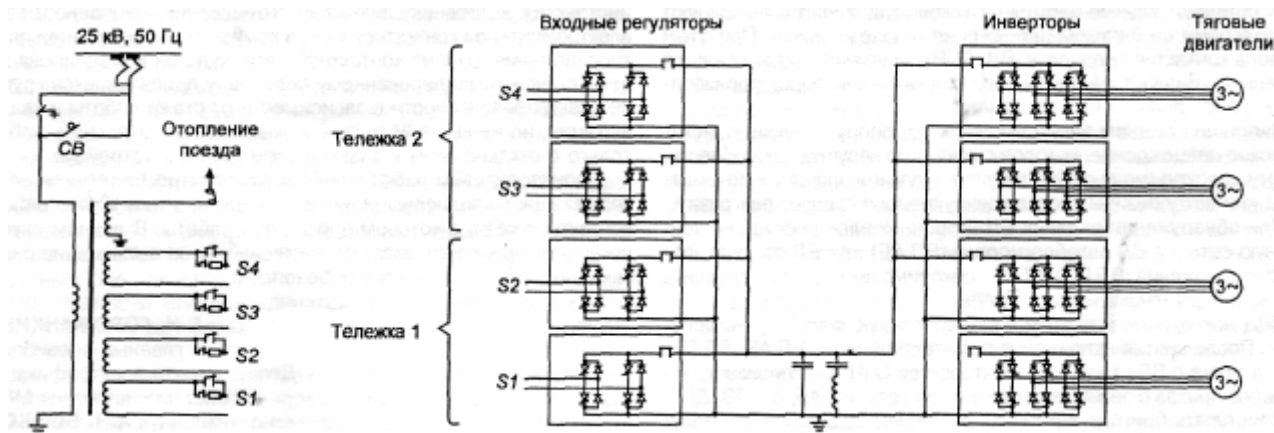


Рис. 1.5. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза 36000.

Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза 36000 базується на використанні двоступеневого ІППН при живленні від мережі постійного струму 3 кВ та класичного блоку 4QS при живленні від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц (тобто використані технічні рішення, які використовувались у перетворювачах електровозів S252 та E402B).

Електровоз серії E412 (розробка та виробництво фірми “ADtranz” на замовлення Італії) призначено для роботи на електрифікованих залізницях з напругами у контактній мережі: 15 кВ, 16 2/3 Гц змінного струму та 1,5 і 3 кВ постійного струму (додаток А) [28].

Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза E412 представлена на рис. 1.6.

Основою схеми є «Подвійна зірка», яка розроблена фірмою “ADtranz”, особливістю якої є послідовне з’єднання двох АІН при живленні від контактної мережі постійного струму 3 кВ. Для рівномірного розподілення напруги між конденсаторами проміжної ланки кожен з АТД має дві ізолювані трифазні обмотки статора, які розміщені у одному пазу і підключені до «свого» інвертора. Між обмотками відсутній гальванічний зв’язок (має місце магнітний зв’язок).

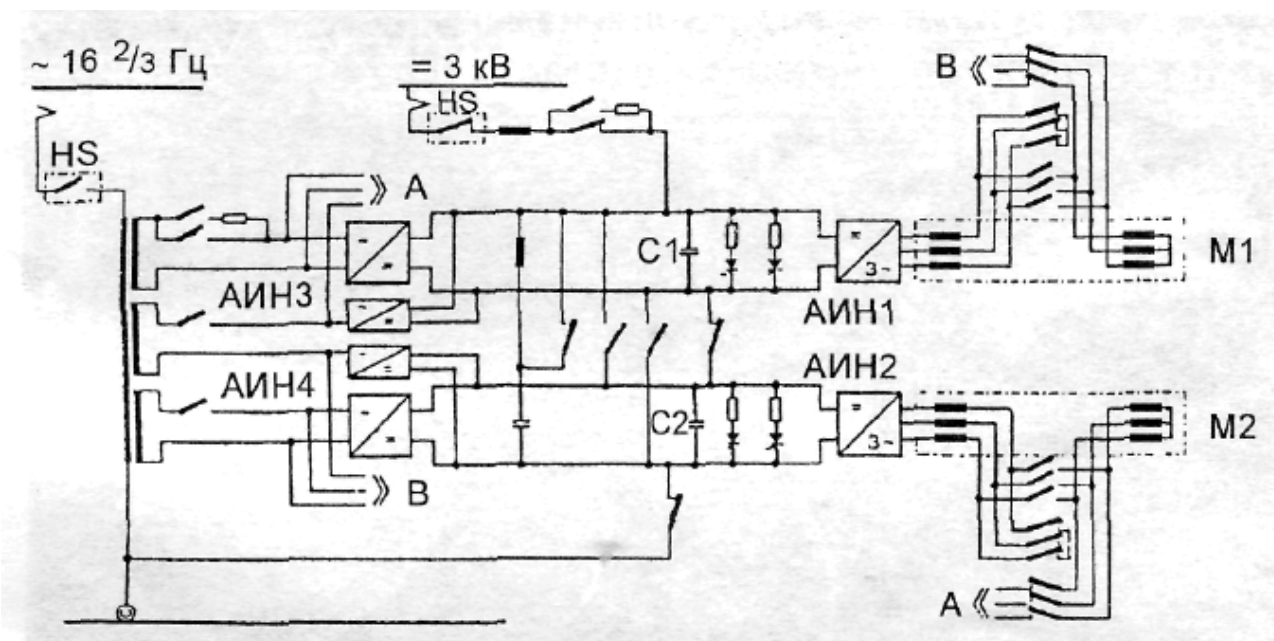


Рис. 1.6. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза E412.

При роботі на ділянках постійного струму напруга 3 кВ подається безпосередньо на проміжну ланку постійного струму, яка складається з двох послідовно з'єднаних конденсаторів С1 та С2. До них паралельно підключено дві групи послідовно з'єднаних інверторів АІН1, АІН2 (права група) та АІН3, АІН4 (ліва група). Ліва група формується перемиканням фазових модулів трьох блоків 4QS, які задіяні як вхідна ланка при живленні від мережі змінного струму.

Інвертори АІН1, АІН4 живлять двигун М1, а АІН2, АІН3 – М2. У зв'язку з розходженням характеристик напівпровідникових приладів процес зарядки конденсаторів С1 та С2 проходить нерівномірно. Рівняння напруг на конденсаторах (інверторах) при цьому забезпечується магнітним зв'язком обмоток статора АТД.

При живленні від мережі змінного струму інвертори АІН1 та АІН2 з'єднуються паралельно, а фазові модулі інверторів АІН3, АІН4 перемикаються за схемою трьох паралельних увімкнених блоків 4QS, які випрямляють та стабілізують напругу в проміжній ланці на рівні 2100...2700 В. Обмотки тягових двигунів «лівої групи» інверторів з'єднуються послідовно з обмотками які живляться від АІН1 та АІН2, що призводить до зменшення потужності електровоза.

Електропоїзд Valero (розробка та виробництво "Siemens" для РЖД) призначено для роботи на електрифікованих залізницях з напругами у контактній мережі: 25 кВ, 50 Гц змінного струму та 3 кВ постійного струму [64].

Функціональна силова схема тягової електропередачі електропоїзда Valero представлена на рис. 1.7.

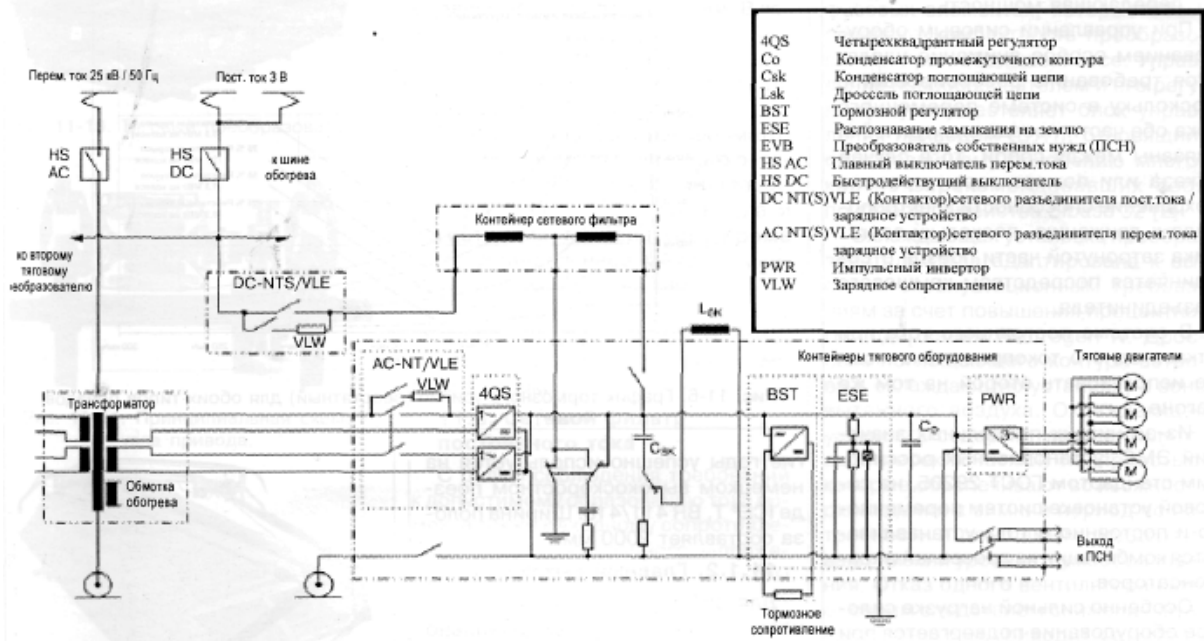


Рис. 1.7. Функціональна силова схема тягової електропередачі електропоїзда Valero.

Силова схема електропоїзда Valero побудована за відпрацьованою фірмою "Siemens" схемою (електровози S252, E4002B), яку вона успішно використовувала також на електровозі ДС3, який було розроблено та виготовлено на НВК «Електровозобудування». Функціональна силова схема тягової електропередачі

електровоза ДСЗ представлена на рис. 1.8 [65].

Основою представлених на рис. 1.7 та 1.8 систем є 4QS перетворювачі, які живляться від окремих напівобмоток тягового трансформатора та працюють із зсувом по відношенню один до одного. 4QS підтримують напругу на проміжній ланці постійної напруги, а далі напруга подається на автономні трифазні інвертори напруги, до яких підключені АТД.

Рис. 1.8. Функціональна силова схема тягової електропередачі електровоза ДСЗ.

Представлені функціональні схеми побудови тягових електропередач багатосистемних електровозів, що експлуатуються на залізницях Європи, дозволяють представити узагальнену структурну схему тягового перетворювача як складової частини тягової електропередачі, діючого ЕРС (для асинхронного тягового електропривода) (рис. 1.9).

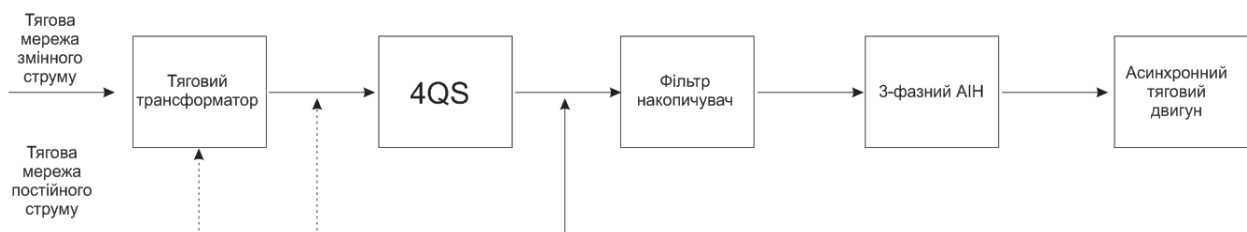


Рис. 1.9. Узагальнена структурна схема тягового перетворювача діючого багатосистемного ЕРС з АТД.

Перетворювач, структурна схема якого представлена на рис. 1.9, має у своєму складі 4QS перетворювач, що дозволяє не тільки підтримувати рівень напруги на проміжній ланці постійного струму (на рис. 1.9 - фільтр накопичувач), а ще покращити його енергетичні показники, зокрема коефіцієнт потужності [43,84,85].

Досвід експлуатації тягових статичних перетворювачів імпортного виробництва на залізницях Росії та України показав, що вони мають суттєвий вплив на режими роботи системи СЦБ та зв'язку залізниць, оскільки 4QS перетворювачі вимагають короткочасного замкнення вторинної обмотки тягового трансформатора, що призводить до появи у складі тягового струму небезпечних для залізничної автоматики гармонійних складових.

Це характерна риса всіх перетворювальних пристроїв силової електроніки, які виконані на напівпровідникових керованих вентилях, пов'язана із ключовим (дискретним) характером роботи вентилів, що визначає дискретизацію як процесу споживання енергії перетворювачем від її первинного джерела, так і процесу передачі її споживачеві (навантаженню) [30,86].

Дискретне споживання енергії перетворювачем від джерела електроенергії приводить до помітного зворотного впливу вентиляного перетворювача на якість електроенергії, наслідки чого відчуває як сам перетворювач, так і інші споживачі, що одержують живлення від того ж джерела.

Тяговий вентиляльний перетворювач електрорухомого складу, споживаючи з тягової мережі активну потужність, «виливає» у неї потужність по вищих гармоніках, що спотворює форму напруги в мережі й тим самим ускладнює роботу інших споживачів електроенергії в мережі. Для обмеження цього негативного впливу вентиляльних перетворювачів на контактну мережу можуть бути застосовані, крім обмеження співвідношення потужностей перетворювача й живлючої мережі (постійного й змінного струмів) [30,38]:

- 1) збільшення числа еквівалентних фаз перетворювача;
- 2) застосування схем перетворювачів із поліпшеною формою вхідного струму;
- 3) фільтрація вхідних струмів перетворювача, як правило, за допомогою паралельного підключення до мережі послідовних LC-фільтрів, налаштованих на домінуючі гармоніки вхідного струму;
- 4) використання схем активної фільтрації вхідного струму, що компенсують відхилення вхідного струму перетворювача від синусоїдальної форми.

З іншого боку, дискретна передача енергії з виходу перетворювача в навантаження, як правило, знижує ефективність її використання в навантаженні, де здійснюється перетворення електричної енергії в механічну.

Такий вплив, у першу чергу на електрорухомому складі змінного струму, позначається на зниженні енергетичних показників, що в деякій мірі стримує широке впровадження напівпровідникових тягових перетворювачів.

Великі швидкості зміни напруг і струмів вентилів у процесі комутації призводять до помітного електромагнітного випромінювання в навколишнє середовище, створюючи наведені перешкоди в колах пристроїв слабкострумкової електроніки, у тому числі в пристроях керування цими вентиляльними перетворювачами, що породжують зазначені перешкоди.

На електрорухомому складі такі випромінювання в першу чергу впливають на канали радіозв'язку й локомотивної сигналізації. Чітка робота цих систем визначає безпеку руху поїздів, що є головною вимогою, висунутою до будь-яких транспортних засобів залізниць.

Крім того, використання підвищеної напруги у контактній мережі постійного струму потребує суттєвого доопрацювання існуючих технічних рішень для тягових

статичних перетворювачів, що майже дорівнює створенню принципово нових перетворювачів.

1.4. Визначення напрямків удосконалення електрорухомого складу залізниць України та постановка задач дослідження

В кінці 80-х років спеціальна комісія Міжнародного союзу залізниць (МСЗ) досліджувала економічну ефективність використання багатосистемного ЕРС на дорогах Європи. Висновки комісії такі [25]:

- економічна ефективність використання багатосистемного рухомого складу досягається, в першу чергу, за рахунок зменшення кількості локомотивів у порівнянні з односистемними при виконанні однакового обсягу перевезень (виключається простій локомотивів на станціях стикування, що теоретично дорівнює 15...20 %);

- досягається значна економія за рахунок відмов від зупинок на станціях стикування. Незважаючи на те, що час стоянки для зміни локомотива сягає приблизно 15 хв. та враховуючи втрати часу на розгін, гальмування, три додаткових проби гальм при русі, прибуття під сигнал заборони, виграш в часі для пасажирських поїздів складає не менш 30 хв.

- скорочуються витрати на утримання оборотних депо (відповідно і будинків відпочинку) на станціях стикування. В окремих випадках з'являється можливість відмовитися від виконання ТО-2;

- зменшується кількість локомотивних бригад – найбільш високооплачувана категорія робітників. Водночас покращуються умови праці за рахунок надання повноцінного відпочинку.

Основний недолік використання багатосистемного ЕРС – його висока вартість. За оцінками комісії МСЗ на підставі даних, отриманих від локомотивобудівних фірм і компаній, вартість сучасного двосистемного електровоза третього покоління (з безколекторними тяговими двигунами) для систем 3 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму досягає 115% вартості односистемного. Тому залізничним адміністраціям рекомендовано суміщати введення в експлуатацію багатосистемного ЕРС з плановою зміною електровозів, що виробили свій ресурс.

Ціну нових локомотивів можливо знизити за рахунок збільшення кількості замовлених локомотивів. Так, якщо прийняти замовлення партії з 20 локомотивів за 100% , то скорочення замовлення до 10 одиниць підвищить вартість кожного на 120%, а збільшення партії до 60 одиниць знизить їх вартість на 10%.

З досвіду РЖД [21] відомо, що час руху поїздів в напрямку Москва – Вязьма (міжнародний транспортний коридор E20: Москва-Мінськ-Берлін-Західна Європа), складає 3 години, та ще 3 години витрачається на прийом-здачу локомотива та інші технологічні операції, тобто разом 6 годин, при цьому локомотив робить лише одне коло у 500 км, а 18 годин, що лишились, локомотив знаходиться в оборотному депо. Такі втрати часу при швидкісному русі зводить нанівець усі зусилля шляховиків Московської залізниці з приведення інфраструктури до нормативів швидкості 140 км/год. Все це стримує розвиток євразійських транспортних коридорів. Ці ж самі проблеми не оминають і Україну.

Вирішити проблему втрати часу на станціях стикування можна було б використовуючи багатосистемні електровози.

Аналізуючи вище представлені твердження та дані, визначимо напрямки розвитку електрорухомого складу для залізниць України, а саме електровозів, оскільки саме цей рухомий склад виконує найбільший обсяг робіт з перевезення вантажів і є найбільш зношеним.

По-перше, електровози повинні будуватися виключно з використанням мікропроцесорних систем керування та силових напівпровідникових перетворювачів, побудованих з використанням найсучасніших елементів, оскільки це дозволить використовувати енергозберігаючі режими при веденні поїздів; використовувати діагностування всіх систем електровоза та реалізувати обслуговування локомотива за станом, а не планово, що зменшить витрати на його обслуговування [12,14,16,66,68]. При цьому потрібно забезпечити необхідний рівень надійності електрообладнання та електровоза у цілому.

По-друге, електровози будь-то пасажирські або вантажні, змінного або постійного струму повинні бути максимально уніфіковані, оскільки однакове технологічне обладнання та єдина технологія обслуговування відкриває шляхи до зменшення витрат на технічне обслуговування локомотивів, з одночасним покращенням якості ремонтів. При побудові електровозів доцільно використовувати модульний принцип, тобто силове обладнання складається з декількох модулів встановленої потужності, використовуючи ці модулі можливо «набрати» необхідну потужність електровоза з певною осьовою формулою.

По-третє. Для зменшення часу прямування потягів в Україні та реалізації євразійських транспортних коридорів по території України як для пасажирів, так і вантажів, необхідно максимально виключити втрати часу на станціях стикування тягових мереж постійного та змінного струмів, які пов'язані зі змінною локомотивів, що може бути здійснено на даний час за допомогою як мінімум двосистемних локомотивів – електровозів подвійного живлення (25 кВ 50 Гц и 3 кВ постійного струму).

Четверте. Внаслідок вичерпання можливостей тягової системи 3 кВ постійного струму (з точки зору підвищення потужності локомотивів та пропускної здатності електрифікованих цією системою ділянок) необхідно будувати електровози постійного струму як пасажирські, так і вантажні, які б забезпечували прямування поїздів по ділянках з напругою 3 кВ та підвищеною до 6, 12 або 24 кВ. Підвищення напруги в контактній мережі постійного струму дозволить підвищити її енергоефективність та конкурентоспроможність у порівнянні з системою змінного струму, але одночасне переведення всієї системи на підвищену напругу майже неможливе з економічних міркувань, тому деякий час буде необхідність в існуванні двосистемного електровоза постійного струму: 3/6, 3/12 або 3/24 кВ. Рівень підвищення напруги повинен бути обґрунтований не тільки з точки зору обладнання тягової мережі, але і з точки зору раціональної побудови тягової електропередачі електровоза.

П'яте. Є доцільним за базову прийняти модульну тягову електропередачу для багатосистемних електровозів, які здатні працювати на постійному струмі напругою 3/6, 3/12 або 3/24 кВ, та змінному струмі 25 кВ 50 Гц. За необхідності побудови тільки двохсистемних електровозів постійного струму, або електровозів змінного струму, зі складу обладнання базової тягової електропередачі виключається зайве. Підвищення робочих частот – це один зі шляхів зменшення масо-габаритних показників електрообладнання, але їх використання потребує розробки рекомендацій щодо вибору відповідних магнітних матеріалів та забезпечення електромагнітної сумісності з колами

сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) електрифікованих ділянок залізниць [30, 34,38].

Шосте. Потужність багатосистемного електровоза повинна відповідати раціональному ряду потужностей електровозів, що забезпечить зменшення витрат на оновлення парку електровозів та зменшить витрати електричної енергії на тягу поїздів [67].

Представлені напрямки вдосконалення електрорухомого складу залізниць України дозволяють визначити такі задачі досліджень, метою яких є розробка та дослідження тягової електропередачі сучасних багатосистемних електровозів.

3.Обґрунтувати необхідність підвищення частоти тягового перетворювача багатосистемного електровоза для забезпечення специфічних вимог до тягового електрообладнання.

4.Дослідити вплив виду тягового двигуна на основні показники та параметри перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза.

5.Створити та науково обґрунтувати структурну схему тягової електропередачі з ланкою підвищеної частоти для багатосистемного електровозу.

6.Розробити рекомендації щодо створення тягових трансформаторів підвищеної частоти та інших ланок тягового перетворювача багатосистемного електровоза з урахуванням максимальної уніфікації обладнання, забезпечення необхідної його надійності, мінімізації габаритів, маси та інших специфічних вимог для тягового електрообладнання.

7.Дослідити взаємодію перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза з колами СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць.

8. Дослідити взаємний зв'язок між коефіцієнтом корисної дії тягової електропередачі багатосистемного електровоза та рівнем напруги у контактній мережі.

9.Визначити енергетичну ефективність запропонованої тягової електропередачі на базі перетворювача з ланкою підвищеної частоти.

1.5. Висновки з першого розділу

1.Тяговий рухомий склад залізниць України морально застарів та фізично зношений. Так у середньому знос електровозів становить 90 %, а темпи закупівлі нового рухомого складу не відповідають темпам списування старого. Локомотивний парк, що експлуатується в Україні, розроблено та побудовано у 60-70 роки 20 сторіччя. Має сенс поповнювати парк тягового рухомого складу, зокрема електровозами нового покоління, який розроблено з урахування останнього слова науки та техніки, й специфічних умов роботи залізниць України. Це дозволить зменшити експлуатаційні витрати на його утримання і ремонт у продовж усього життєвого циклу.

2.З метою покращення енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та збільшення пропускної спроможності ділянок, електрифікованих на постійному струмі напругою 3 кВ, є доцільним підвищити напругу у контактній мережі до рівня кратного 3 кВ, а саме – 6, 12 або 24 кВ поетапно. Перевід ділянок, електрифікованих на постійному струмі з напругою 3 кВ на напругу 25 кВ змінного струму частотою 50 Гц, у наш час недоцільно з економічних міркувань.

Підвищення напруги у контактній мережі постійного струму з 3 кВ на вищу в декілька разів зменшує втрати електричної енергії в ній.

3. При поетапному переході з 3 кВ на підвищену напругу доцільно використовувати багатосистемні електровози, які змогли б забезпечити роботу на електрифікованих ділянках з напругою 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму.

4. Багатосистемні електровози дозволять підвищити ефективність роботи залізниць за рахунок: зменшення кількості локомотивних бригад; скорочення витрат на утримання оборотних депо; відмов від зупинок на станціях стикування; зменшення кількості локомотивів у порівнянні з односистемними при виконанні однакового обсягу перевезень при одночасному впровадженні системи тяги на постійному струмі з підвищеним рівнем напруги.

5. Наукове обґрунтування принципів побудови тягових електропередач є однією із важливих проблем, вирішення якої необхідно для створення багатосистемних електровозів з урахуванням специфічних умов електропостачання та інших факторів залізниць України.

РОЗДІЛ 2

ВАРІАНТИ СТРУКТУР ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Проблема створення потужних тягових напівпровідникових перетворювачів для електрорухомого була сформульована, як тільки з'явилися (60-70 рр. 20 ст.) потужні діоди, а згодом і тиристри. Але з деяких причин, одна з яких недостатньо високий на той час рівень робочих струмів та напруг потужних силових приладів, не було можливості створити тягові перетворювачі, які б відповідали необхідним масогабаритним, енергетичним показникам і експлуатаційній надійності [68,69].

Номенклатура і вартість сучасної силової напівпровідникової елементної бази дозволяє ставити задачу розробки уніфікованих перетворювачів для багатосистемного електрорухомого складу. Очевидно, що при цьому виникає задача зменшення маси та габаритів тягового електрообладнання, щоб можна було розмістити на багатосистемному електровозі додаткове обладнання у порівнянні з односистемним.

2.1. Обґрунтування вибору робочої частоти статичного перетворювача

У значній мірі остання задача може бути вирішена за рахунок підвищення частоти тягового трансформатора, вага якого складає суттєву частину від маси усього електрообладнання електровоза [33,34]. За кордоном вже ведуться розробки [70,71,72], в яких використовується робочі частоти до 5000 Гц, що дозволило значно зменшити масогабаритні показники перетворювачів.

Відомо, що при підвищенні частоти при незмінних значеннях питомих магнітних втрат лінійні розміри та маса трансформатора орієнтовано визначають за такими виразами [73,74]:

$$, \quad (2.1)$$

$$, \quad (2.2)$$

де: l - лінійні розміри трансформатора; S - електромагнітна потужність трансформатора; f - частота трансформатора; m - маса трансформатора.

Наприклад, при переході від частоти f_1 Гц до f_2 Гц можна лінійні

розміри зменшити приблизно у $\sqrt{f_2/f_1}$ рази, а масу в f_2/f_1 рази.

Відповідні орієнтовні зменшення лінійних розмірів l та маси тягового трансформатора

при збільшенні частоти струму у межах до 15 кГц у порівнянні з цими параметрами при Гц наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Орієнтовні зменшення лінійних розмірів та маси тягового трансформатора у функції частоти

Частота струму, Гц	50	500	1000	5000	10000	15000
Зменшення лінійних розмірів трансформатора, разів	1,0	1,23	1,31	1,51	1,61	1,67
Зменшення маси трансформатора, разів	1,0	1,86	2,25	3,47	4,18	4,66

Для проведення дослідження впливу частоти на масу та лінійні розміри тягового трансформатора введемо поняття «відносна маса» та «відносні лінійні розміри» тягового трансформатора, які відповідно розраховуються за такими співвідношеннями:

$$, \quad (2.3)$$

$$, \quad (2.4)$$

де: l_{50} , m_{50} - лінійні розміри та маса тягового трансформатора при частоті 50 Гц;
 l , m - лінійні розміри та маса тягового трансформатора при підвищеній частоті.

На рис. 2.1. наведені залежності l та m , побудовані на базі вищевказаних розрахунків. За базові одиниці прийнято відносні масу та лінійні розміри при частоті 50 Гц.

Рис. 2.1. Залежності маси та лінійних розмірів тягового трансформатора від частоти струму

Проведемо аналіз «інтенсивності» (у %) змін та у відношенні до зміни частоти за допомогою таких співвідношень [33]:

$$, \quad (2.5)$$

$$, \quad (2.6)$$

де: , - зміна параметру при зростанні частоти у діапазоні від до , при Гц; , - відносні лінійні розміри та маса при частоті ; , - відносні лінійні розміри та маса при частоті .

Наприклад, при робочій частоті тягового трансформатора Гц відносні лінійні розміри та маса становитимуть відповідно та , при збільшенні частоти до Гц ці величині становитимуть відповідно та . У відсотковому співвідношенні інтенсивності зміни відносних маси та лінійних розмірів становитиме:

%, (2.7)

%. (2.8)

Аналогічно розрахуємо та представимо залежності , при зміні частоти з інтервалом Гц на рис. 2.2.

Як бачимо з рис. 2.2, зі збільшенням робочої частоти до 500 Гц інтенсивність відносного зменшення лінійних розмірів стає меншим за 1 % (цей рівень прийнято за достатній, з точки зору зменшення лінійних розмірів і маси, та позначено на рис. 2.2 пунктирною лінією), а інтенсивність відносного зменшення маси досягає рівня 1 % при частоті 1400 Гц.

Рис. 2.2. Залежності інтенсивності зміни відносних маси та лінійних розмірів тягового трансформатора від частоти струму.

Проте отримані результати не означають, що недоцільно збільшувати частоти вище 1400 Гц. Так, наприклад, маса тягового трансформатора ОНДЦЕД-6376-25 електровоза ДСЗ дорівнює 8370 кг [75], при застосуванні струму з частотою 10 кГц ця маса

орієнтовано дорівнювала б кг, а при 15 кГц кг.

Різниця кг є суттєвою, з точки зору обладнання електровоза іншим устаткуванням.

Таким чином, проведений аналіз впливу підвищення робочої частоти на значення габаритних розмірів та маси тягових трансформаторів дозволив визначити, що достатнім значенням, з точки зору зменшення габаритів, є підвищена частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц [33].

Реалізація отриманих робочих частот вимагає використання статичних перетворювачів підвищеної частоти, розробці та дослідженню яких присвячена значна кількість робіт, наприклад [76,77,78,79,80,81,82,83].

Головною специфікою яку мають статичні перетворювачі, призначенні для використання у складі тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів, є те, що живлення перетворювач може отримувати як від мережі змінного струму 25 кВ, 50 Гц, постійного струму традиційної напруги 3 кВ, так і підвищеної 6, 12 або 24 кВ.

Іншим фактором, який суттєво впливає на структуру тягового статичного перетворювача, є вид тягового двигуна, живлення якого забезпечується саме цим перетворювачем [35].

2.2. Вплив виду тягових двигунів на перелік функцій статичного перетворювача для багатосистемних електровозів

На сьогодні у багатьох країнах, у тому числі в Україні, найбільш перспективним видом тягового двигуна, у тому числі для високошвидкісного електрорухомого складу, вважається асинхронний двигун.

Роботи щодо застосування асинхронних тягових двигунів (АТД) як тягових двигунів асинхронних машин почалися у 70 роках 20 сторіччя [87,88,89,90].

Не перераховуючи переваги АТД у порівнянні з машинами постійного струму, які загально відомі, і не є метою досліджень у даній роботі, зазначимо недоліки електропривода з АТД, які особливо гостро можуть проявитись при застосуванні АТД у багатосистемних електровозах, для яких габарити, вага обладнання – це особливо гостра проблема, в порівнянні з односистемним електровозом. До таких недоліків можна віднести складність схеми тягового перетворювача і системи керування, відносно низький коефіцієнт потужності двигуна, особливо при низькій частоті обертання, що призводить до значних перевантажень по струму перетворювача та силового електрообладнання [35].

З точки зору тягового перетворювача, для живлення АТД необхідно використовувати трифазний автономний інвертор напруги, аналогічно до тих, що використовуються на багатосистемних електровозах європейського виробництва. Структури перетворювачів тягових електропередач таких електровозів розглянуто у першому розділі даної роботи.

При розробці багатосистемного ЕРС є сенс розглянути варіанти, альтернативні для АТД. Однією з таких альтернатив є тяговий електропривод з вентильними (синхронними) тяговими двигунами (ВТД) [47].

До переваг ВТД можна віднести:

- сприятливі для тяги регульовальні характеристики;
- менш складний тяговий перетворювач;
- можливість роботи з підвищеним коефіцієнтом потужності.

Крім того, у ВТД значно простіше реалізувати режим рекуперативного гальмування. Але досвід розробки ВТД показує, що вентильні синхронні двигуни мають більші, ніж асинхронні двигуни витрати активних матеріалів на одиницю потужності при однаковій потужності двигунів [88].

Застосування ВТД на багатосистемному ЕРС – це окрема проблема, яка не входить до даної роботи.

Нові магнітні матеріали дозволили приступити до робіт зі створення потужних тягових двигунів, які збуджуються постійними магнітами. Перші теоретичні дослідження показали значні переваги такого тягового привода в порівнянні з АТД [94,95]:

- двигун на постійних магнітах може мати набагато більшу (45 і більше) кількість пар полюсів, ніж трифазний асинхронний. Це забезпечує настільки великий момент обертання, що стає можливим використання такого двигуна без редуктора, тобто реалізується безредукторний тяговий привод;

- оскільки двигун вже має магнітне поле збудження, то він має підвищений коефіцієнт корисної дії;

- двигун на постійних магнітах забезпечує підвищені потужність й обертальний момент при меншій масі та об'ємі, ніж ДПС, АТД та ВТД традиційного виконання.

Разом з тим технологія виготовлення таких двигунів значно складніша, ніж двигунів з електромагнітним збудженням. Вона вимагає значних витрат на підготовку виробництва та високої культури праці. Такі двигуни мають у більшості випадків нерозбірну конструкцію магнітної системи.

У машині на постійних магнітах поле збудження відключити неможливо, тому в її середину можуть потрапити магнітні частки, наприклад, металевий пил від гальмівних колодок.

У результаті старіння матеріалу поле постійних магнітів може слабнути, в результаті чого зменшується обертальний момент. У зв'язку з цим потрібно обирати такий магнітний матеріал, властивості якого протягом терміну служби двигуна залишаються стабільними. На сьогодні поки що відсутній магнітний матеріал, використання якого дозволило б створити досить потужні тягові двигуни. Існує ще ціла низка особливостей двигуна з постійними магнітами. У майбутньому тягові двигуни з постійними магнітами знайдуть широке застосування.

На тяговому рухомому складі залізниць України на даний час застосовують в основному колекторні машини постійного або пульсуючого струму з електромагнітним збудженням. Питанням, пов'язаним з їх використанням на ЕРС, присвячена значна кількість робіт, наприклад [35,75,89,90,91,92,93,102].

Порівняємо, з точки зору особливостей використання, колекторні двигуни постійного струму послідовного та паралельного збудження [87]:

- на важких елементах профілю колії (круті підйоми) двигуни паралельного збудження працюють з більшим струмом, ніж двигуни послідовного збудження;

- для ведення поїздів однакової ваги двигуни паралельного збудження повинні мати більшу номінальну потужність, ніж двигун послідовного збудження;

- деяке зниження швидкості двигунів послідовного збудження на важких елементах профілю колії компенсується більш високою швидкістю руху на легких елементах профілю колії. При однакових потужностях двигунів на реальних достатньо довгих ділянках з різким профілем колії загальний час ходу по ділянці електровоза з двигунами послідовного збудження менше часу руху електровоза з двигунами

паралельного збудження;

- дуже важливо те, що двигуни послідовного збудження в експлуатації забезпечують краще використання потужності при більш рівномірному їх навантаженні; для виконання однакової поїзної роботи потрібна номінальна потужність двигунів з послідовним збудженням менша, ніж з паралельним;

- при однакових різких змінах напруги на затискачах двигунів відповідні кидки струмів при послідовному збудженні менші, ніж при паралельному;

- при однаковому розходженні швидкісних характеристик двигуни послідовного збудження мають менше розходження у струмах і тому забезпечують краще використання потужності електровоза, за умов нагрівання двигунів або зчеплення коліс із рейками.

З точки зору вимог до електрообладнання багатосистемних електровозів важливо, що усі вказані функції регулювання струму в залежності від профілю колії (краще використання потужності, менші кидки струму при різкій зміні напруги на затискачах тощо), є природними для двигунів послідовного збудження. Тому не потрібне додаткове обладнання для виконання цих функцій.

Двигуни послідовного збудження програють двигунам паралельного збудження у стійкості проти розносного боксування. Цей недолік усувається у значній мірі застосуванням різних пристроїв для автоматичного зниження сили тяги двигунів та подачі піску при боксуванні.

Відмітимо ще такий недолік ДПС будь-якої системи збудження, як обмежена за умовами струмозйому та механічній міцності колектора частота обертання, та низка інших відомих недоліків ДПС виключають можливість їх застосування для швидкісного ЕРС (зі швидкістю більше 250 км/год), оскільки максимальна колова швидкість колектора при максимальній частоті обертання не повинна перевищувати 50...55 м/с для забезпечення стійкості комутації відповідно до механічних умов [96].

Діаметр колектора у більшості сучасних двигунів постійного струму близький до 400 мм. При цьому:

$$\text{об/хв,} \quad (2.9)$$

$$\text{об/хв.} \quad (2.10)$$

У середньому:

$$\text{об/хв.} \quad (2.11)$$

Можна сказати, що обмежена по умовах струмозйому та механічній міцності колектора частота обертання дорівнює 2500 об/хв.

Для тягових двигунів електровозів характерно відношення максимальної частоти обертання до номінальної 2...2,6 [87]. Тобто орієнтовна номінальна частота обертання тягових двигунів при номінальній швидкості дорівнює: об/хв. У залежності від реальних значень діаметра бандажів коліс та передатного відношення

тягової передачі, швидкість локомотива при вказаних значеннях в середньому складає 250 км/год.

Дійшовши висновку, можна відмітити, що найбільший інтерес для багатосистемних електровозів серед ДПС із різними способами збудження являє двигун послідовного збудження, з точки зору спрощення системи керування тяговим приводом, завдяки його природним властивостям зміни швидкості у широких межах при зміні навантаження. При цьому мається на увазі, що швидкість ЕРС не перевищує 200...250 км/год. При більших швидкостях ЕРС застосування ДПС виключається. Найімовірніше у близькій перспективі при більших швидкостях застосування асинхронних або синхронних (вентильних) двигунів.

На сьогодні є можливість створити колекторні тягові двигуни пульсуючого струму потужністю до 1200 кВт [96], 1300 кВт [75]. Потужність двигунів за останні 50 років зросла більше, ніж удвічі. Тому можна сказати, що двигуни потужністю 1300 кВт – це машини граничного виконання, тобто машини, подальше завантаження яких (струмове, магнітне і механічне) у близькій перспективі обмежене фізичними властивостями активних, ізолюючих і конструктивних матеріалів. При дослідженні проблеми створення тягової електропередачі багатосистемного електровоза можна орієнтуватись на значення номінальної потужності двигуна 1300 кВт, та значення експлуатаційного коефіцієнта перевантаження 1,8.

Експлуатаційний коефіцієнт перевантаження тягового двигуна розраховується як:

$$(2.12)$$

де – найбільша потужність, яка розвивається двигуном протягом однієї хвилини ; – годинна потужність двигуна.

Звичайно [5,96]. Отримане значення коефіцієнта повинно бути забезпечене перетворювачем.

Так, для живлення 12 тягових двигунів типу НБ-514 (потужність годинного режиму 835 кВт) електровоза ВЛ85 із сумарною потужністю часового режиму кВт, використовують 6 тягових перетворювачів ВІП-4000УХЛ2, потужністю 4340 кВт [100,101]. Тобто, коефіцієнт запасу по потужності перетворювача, кожен з яких живить 2 тягових двигуни, дорівнює:

$$(2.13)$$

Отримане значення коефіцієнту запасу перетворювача є більшим за прийняте раніше значення коефіцієнту перевантаження тягового двигуна постійного струму на рівні 1,8.

З точки зору структури та функцій тягового статичного перетворювача класичної структури [97], використання двигуна постійного струму послідовного збудження як тягового вимагає використання керованого випрямляча (при живленні від мережі змінного струму), або імпульсного перетворювача при живленні від мережі постійного струму.

Використання керованого однофазного випрямляча не дозволяє отримати значення коефіцієнта потужності перетворювача більше 0,9, навіть при використанні зоно-фазового керування, та вимагає використання 4QS перетворювачів при живленні від мережі змінного струму [76,97,98]. При застосуванні трифазного керованого випрямляча для живлення тягового двигуна постійного струму коефіцієнт потужності може сягати значення 0,955 [76]. Загально відомо, що з точки зору якості випрямленої напруги трифазні випрямлячі також мають суттєві переваги у порівнянні з однофазними. Так, напруга на виході однофазного двопульсового некерованого випрямляча характеризується коефіцієнтом пульсацій на рівні 67%, а трифазна шестипульсова - 5,7% [76].

При імпульсному регулюванні тягових двигунів постійного струму виникає потреба у використанні згладжуючих реакторів з відносно великою індуктивністю або реалізації принципу розділення потоку енергії по еквівалентних фазах (багатофазні перетворювачі) [97].

Таким чином, для отримання необхідної якості живлючої напруги тягових двигунів постійного (пульсуючого) струму є доцільним будувати багатофазні перетворювачі з використання інверторів напруги, які отримали на сучасному етапі розвитку силової перетворювальної техніки найбільше застосування [76,97,99].

Як висновок відмітимо, що статичний перетворювач тягової електропередачі при тягових двигунах постійного струму повинен забезпечити:

- 1) регулювання напруги живлення тягового двигуна;
- 2) перетворення напруги у контактній мережі змінного струму в постійну напругу живлення тягового двигуна.

При асинхронних тягових двигунах тяговий статичний перетворювач повинен забезпечити:

- 1) можливість реалізації регулювання частоти та напруги живлення АТД;
- 2) перетворення напруги у контактній мережі постійного струму в змінну напругу живлення АТД.

При підвищеній напрузі у контактній мережі постійного струму, незалежно від виду тягового двигуна, статичний перетворювач повинен забезпечити необхідне регулювання напруги живлення цього двигуна.

В цілому саме тяговий статичний перетворювач забезпечує принцип багатосистемності електровоза, тому у дисертаційній роботі основну увагу приділено проблемі створення цього перетворювача, з урахуванням виду тягового двигуна та параметрів контактної мережі.

2.3. Силовий модуль - складова частина тягового перетворювача. Класифікація та потужність силових модулів

Для проведення подальших досліджень питань, пов'язаних зі створенням тягової електропередачі, введемо поняття «силовий модуль», який являє собою складову частину тягового статичного перетворювача, яка за потужністю відповідає певній кількості тягових двигунів, і яка є частиною тягової електропередачі електровоза. Тяговий статичний перетворювач може мати один або декілька силових модулів [48].

Як відомо, модульний принцип побудови складних електромеханічних та інших систем дозволяє зменшити вартість виробництва та утримання цих систем за рахунок використання уніфікованого обладнання. Використання модульного принципу при створенні тягової електропередачі електровозів дозволить створювати уніфіковані системи з можливістю нарощування потужності без суттєвих змін у схемах [241].

Пропонується така класифікація силових модулів, яка враховує співвідношення «кількість двигунів на один модуль» (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Класифікація силових модулів

Тип модуля	Кількість тягових двигунів на один модуль
М1	1
М2	2
М3	3
М4	4
М6	6

У подальших дослідженнях приймаємо, що багатосистемний електровоз виконано як односекційний, кожна з осей електровоза має свій тяговий двигун. За необхідності використання двосекційних (і більше) електровозів, для збільшення потужності локомотива, доцільно з'єднувати два або декілька односекційних електровозів за системою багатьох одиниць.

Односекційні електровози традиційно виконують у 4-вісному, або 6-вісному виконанні, виходячи з цього на 4-вісному електровозі можливо використовувати модулі типів М1, М2, М4, а на 6-вісному: М1, М2, М3, М6. Тобто, тяговий привод 4-вісного електровозу може складатися з 4 модулів М1, або 2 модулів М2, або одного М4. Аналогічно для 6-вісного електровозу: 6 модулів М1, 3 модуля М2, 2 модуля М3 або один модуль М6.

Електровози що, експлуатуються на залізницях України та інших держав СНД, мають потужність годинного режиму 6000...10000 кВт, саме тому в подальших дослідженнях приймаємо діапазон потужностей електровозів від 5000 кВт до 11000 кВт, що забезпечує покриття можливих відхилень цього параметру від діапазону потужностей діючих електровозів.

Задаючись значеннями потужностей тягового двигуна у діапазоні від 900 до 1800 кВт та приймаючи односекційний електровоз 4- або 6-вісним, визначимо яку сумарну потужність буде мати такий односекційний електровоз, як:

$$(2.14)$$

де n – кількість тягових двигунів, $P_{дв}$ – потужність тягового двигуна.

На рис. 2.3 представлена отримана залежність $P_{ев}$ при $P_{дв}$, де представлені дві зони, які відповідають 4-вісному та 6-вісному односекційному електровозу в діапазоні потужностей тягових двигунів від 900 кВт до 1800 кВт [48].

На сьогодні є можливість створити колекторні тягові двигуни пульсуючого струму потужністю до 1300 кВт, що відповідно до рис. 2.3 обмежує сфери використання колекторних тягових двигунів тільки на 6-вісних односекційних електровозах (виходячи з діапазону потужностей, який розглядається – від 5000 кВт до 11000 кВт), оскільки при чотирьох тягових двигунах такої потужності можливо реалізувати тільки 5000 кВт, а потужність шестивісного електровоза при двигунах 1300 кВт буде дорівнювати 11000 кВт [35,48].

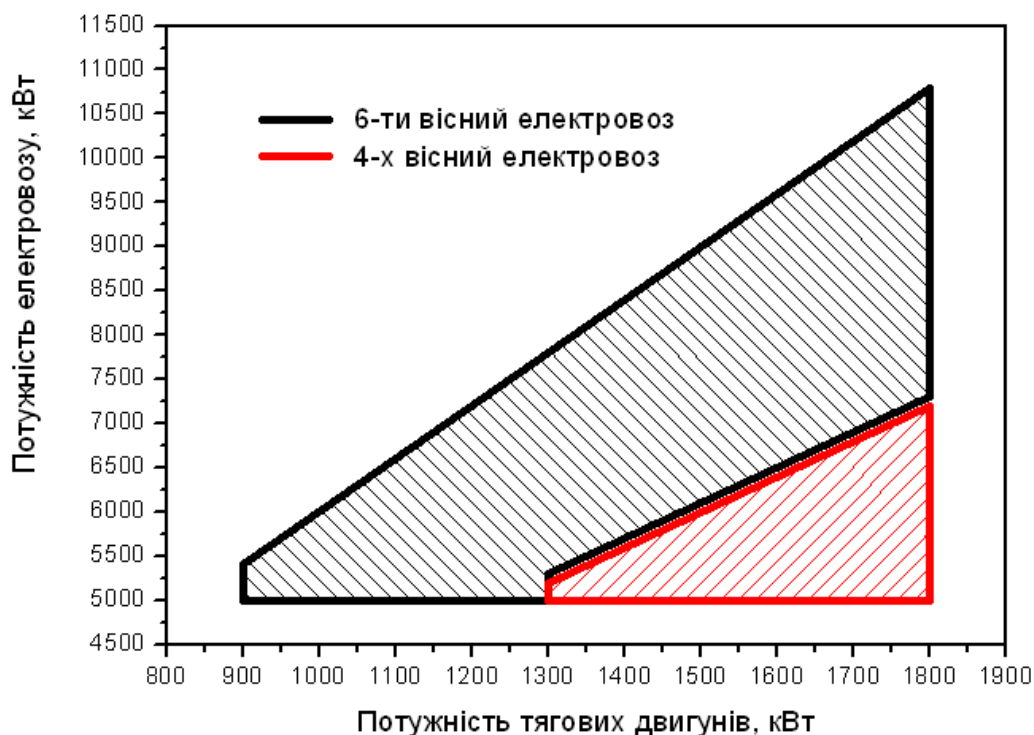


Рис. 2.3. Залежності $P_{ев}$ для потужності електровоза в діапазоні від 5000 кВт до 11000 кВт.

Як відомо, коефіцієнт запасу по потужності перетворювача $K_{зп}$ залежить від коефіцієнта перевантажувальної здатності двигуна $K_{пз}$. Враховуючи 30% запас потужності перетворювача, отримаємо:

$$(2.15)$$

Потужність силового модуля $P_{см}$ тягового перетворювача визначаємо за виразом:

(2.16)

Тоді сумарна потужність тягової електропередачі буде визначатися за таким виразом:

(2.17)

де n – кількість силових модулів у складі тягової електропередачі електровоза.

У табл. 2.3 представлені результати розрахунків потужності силових модулів та тягового перетворювача для 6-вісного електровоза з колекторними тяговими двигунами потужністю 1300 кВт за формулами (2.16), (2.17). Коефіцієнт перевантажувальної здатності колекторної електричної машини (двигун постійного (пульсуючого) струму - ДПС) знаходиться у межах [88]. При розрахунках приймали

Таблиця 2.3

Потужність силових модулів та сумарна потужність тягового перетворювача для 6-вісного електровоза з тяговими двигунами постійного струму

Тип модуля	, кВт		, кВт
M1	3380	6	20280
M2	6760	3	
M3	10140	2	
M6	20280	1	

У порівнянні з електричними машинами постійного струму потужність асинхронних і вентильних (синхронних) тягових двигунів не обмежуються щіточно-колекторним вузлом, тому 4-вісні електровози, з потужністю кожного з двигунів понад 1300 кВт, безумовно доцільно будувати з асинхронними або вентильними тяговими двигунами (далі тягові двигуни змінного струму – ТДЗС).

Коефіцієнт перевантажувальної здатності тягових асинхронного з короткозамкненим ротором та синхронного двигунів відповідно дорівнюють 1,7...1,8 і 2,0 [88].

Для дослідження питання впливу виду тягових двигунів на потужність статичного перетворювача електровоза доцільно ввести поняття «питома потужність модуля» - , яка визначається як відношення потужності модуля тягового перетворювача до потужності одного тягового двигуна , тобто:

(2.18)

Враховуючи (2.16) отримуємо:

(2.19)

Як бачимо з отриманого виразу, питома потужність силового модуля залежить від переважувальної здатності тягового двигуна, яка визначається його видом, та кількості тягових двигунів на один модуль.

Представимо у вигляді таблиці (табл. 2.4) результати розрахунку питомої потужності силових модулів з тяговими двигунами змінного (асинхронних, синхронних) та постійного струмів.

Таблиця 2.4

Питома потужність силових модулів з тяговими двигунами змінного та постійного струмів

Тип модуля	Вид тягового двигуна		
	Постійного струму	Асинхронний	Синхронний
1	2	3	4
M1	2,6	3,9	2,6
M2	5,2	6,0	5,2
M3	7,8	9,0	7,8
M4	10,4	12,0	10,4
M6	15,6	18,0	15,6

Порівнявши стовпчики 2 та 3 табл. 2.4 стає очевидним, що з точки зору питомої потужності силових модулів тягового перетворювача, доцільно використовувати тягову електропередачу з двигуном постійного струму (або вентильний), оскільки всі значення стовпчика 3 є більшими.

Зміну питомої потужності (у відсотках) силових модулів при використанні асинхронних тягових двигунів по відношенню до тягових двигунів постійного струму представлено у табл. 2.5.

Розрахунок табл. 2.5 проведено за виразом:

(2.20)

за даними табл. 2.4.

Варіант порівняння питомої потужності синхронних тягових двигунів з двигунами постійного струму не розглядаємо, оскільки виконується рівність

(2.21)

внаслідок того, що прийняті коефіцієнти перевантажувальної здатності синхронного та двигуна постійного струмів дорівнюють 2,0 (стовпчики 2 та 4 у табл. 2.4).

Таблиця 2.5

Співвідношення питомих потужностей силових модулів з різними видами тягових двигунів

Тип модуля				
1		2	3	4
1	М1	2,6	3,9	50,0
2	М2	5,2	6,0	15,4
3	М3	7,8	9,0	15,4
4	М4	10,4	12,0	15,4
5	М6	15,6	18,0	15,4

У стовпчику 4 табл. 2.5 представлено програш у питомій потужності силових модулів тягової електропередачі на базі АТД по відношенню електропередачі на базі ТДПС. Так при силовому модулі типу М1 використання АТД збільшить питому потужність силового модуля на 50,0% (стовпчик 4, рядок 1, табл. 2.5), ніж у випадку встановлення ТДПС.

Але використання силових модулів М1 є привабливим, з точки зору надійності тягової електропередачі електровоза у цілому, оскільки вихід з ладу одного модуля М1 призведе до виключення з роботи тільки одного тягового двигуна. Використання ж модулів типу М4 (для 4-вісного електровоза) або типу М6 (для 6-вісного електровоза) є недоцільним з указаної точки зору надійності тягової електропередачі у цілому.

Якщо 4-вісний вантажний електровоз () потужністю від 2800 кВт до 3100 кВт [103] побудувати з використанням двох силових модулів М2 (), тоді номінальна потужність модулів і номінальна потужність тягової електропередачі з двигунами постійного струму, відповідно до (2.19) та (2.17), буде знаходитись у межах від

$$\text{кВт,} \quad (2.22)$$

$$\text{кВт} \quad (2.23)$$

до

$$\text{кВт,} \quad (2.24)$$

$$\text{кВт.} \quad (2.25)$$

Для електровозів пасажирських, в сучасних умовах, прийнятна потужність тягового модуля (під терміном тяговий модуль розуміється односекційний електровоз) знаходиться в межах від 4800 до 6400 кВт, при кратності тяги рівній двом [104].

Тобто для реалізації односекційного електровоза потужністю 6400 кВт за формулою 2о-2о потрібні тягові двигуни потужністю:

$$(2.26)$$

кВт.

Оскільки отримана потужність понад 1300 кВт, то як вказано вище, тягову електропередачу потужних односекційних електровозів доцільно будувати на базі тягових двигунів змінного струму.

Розглянемо тяговий модуль як 4-вісний пасажирський електровоз (), побудований з використанням двох силових модулів М2 (). Тоді номінальна потужність силових модулів перетворювача і номінальна потужність тягової електропередачі з асинхронними двигунами буде знаходитись у межах від:

$$(2.27)$$

кВт,

$$(2.28)$$

кВт

до

$$(2.29)$$

кВт,

$$(2.30)$$

кВт.

У роботах [103,104] визначені раціональні значення номінальної потужності тягового модуля (однієї секції двосекційного електровоза або односекційного електровоза у цілому) та раціональні ряди потужностей тягових зчепів для полігонів тяги залізниць України. Для полігонів тяги на постійному струмі раціональна потужність тягового модуля дорівнює 2900...3100 кВт, а раціональний ряд потужностей вантажних електровозів складається з трьох градацій: 2900...3100; 5800...6200; 8400...9300 кВт. Для вантажних електровозів змінного струму ряд складається з двох градацій: 2800...3000 та 5600...6000 кВт при потужності тягового модуля 2800...3000 кВт.

Багатосистемний електровоз повинен працювати як на постійному так і змінному струмах у контактній мережі, а його потужність повинна відповідати раціональному ряду . Тому потужність тягового модуля (односекційного електровоза) для вантажних електровозів раціонально прийняти: 2800...3100 кВт (з точки зору уніфікації силових модулів тягового перетворювача), а для пасажирських електровозів 4800...6400 кВт.

Використовуючи прийнятті значення потужностей тягових модулів визначимо діапазони потужностей силових модулів тягового перетворювача різних типів, для 4- та 6-вісних вантажних і пасажирських тягових модулів, аналогічно до формули (2.22). Результати розрахунків представлені у табл. 2.6 та 2.7.

Таблиця 2.6

Потужність силових модулів для електровозів з тяговими
двигунами постійного струму

Тип силового модуля		Потужність електровоза, кВт							
		6-вісний електровоз				4-вісний електровоз			
		Вантажний		Пасажи́рський		Вантажний		Пасажи́рський	
		2800	3100	4800	6400	2800	3100	4800	6400
1		2	3	4	5	6	7	8	9
1	М1	1213	1343	2080	2773	1820	2015	3120	4160
2	М2	2427	2687	4160	5547	3640	4030	6240	8320
3	М3	3640	4030	6240	8320	-	-	-	-
4	М4	-	-	-	-	7280	8060	12480	16640
5	М6	7280	8060	12480	16640	-	-	-	-

Таблиця 2.7

Потужність силових модулів для електровозів з тяговими
асинхронними двигунами

Силовий модуль		Потужність електровоза, кВт							
		6-вісний електровоз				4-вісний електровоз			
		Вантажний		Пасажи́рський		Вантажний		Пасажи́рський	
		2800	3100	4800	6400	2800	3100	4800	6400
1		2	3	4	5	6	7	8	9
1	М1	1820	2015	3120	4160	2730	3023	4680	6240
2	М2	3640	4030	6240	8320	5460	6045	9360	12480
3	М3	5460	6045	9360	12480	-	-	-	-
4	М4	-	-	-	-	10920	12090	18720	24960
5	М6	10920	12090	18720	24960	-	-	-	-

Складені табл. 2.6 та 2.7 дозволяють визначити потужність силового модуля електровоза із заданими потужністю, кількістю осей та видом тягового двигуна. При цьому, в першому наближенні, постає питання уніфікації силових модулів як можливості використання силових модулів одного типу однакової потужності на різних тягових модулях.

Більш детально розглянемо це питання на прикладах.

Наприклад, силовий модуль типу М2 вантажного 4-вісного односекційного електровоза потужністю 3100 кВт з двигунами постійного струму з розрахунковою потужністю 4030 кВт (табл. 2.6 стовпчик 7 строчка 2) може бути застосований на пасажирських 6-вісних електровозах потужністю 4800 кВт, оскільки потрібна потужність силового модуля типу М2 складає 4160 кВт (табл. 2.6 стовпчик 4 строчка 2). Ці потужності силових модулів є близькими.

Аналогічно силовий модуль типу М1 пасажирського 4-вісного електровоза потужністю 4800 кВт із двигунами постійного струму може бути використаний на 6-вісному пасажирському електровозі потужністю 6400 кВт.

Тобто, з точки зору уніфікації обладнання багатосистемних електровозів, доцільно використовувати на електровозах модулі типів М1 або М2, оскільки їх можливо використовувати як на 4- так і 6-вісних електровозах. Це дозволить створити єдину

ремонтно-експлуатаційну базу для таких локомотивів, що дозволить зменшити експлуатаційні витрати та покращити конкурентоспроможність залізниць України. Силові модулі типів М3, М4 та М6, у сенсі уніфікації електрообладнання багатосистемних електровозів, поступаються силовим модулям типів М1 та М2. Більш детально питання уніфікації силових модулів буде розглянуто пізніше.

2.4. Узагальнена структура тягової електропередачі багатосистемного електровоза

Вище вже вказувалось, що ефективним шляхом зменшення масо-габаритних показників електрообладнання багатосистемного електровоза є підвищення робочих частот. Особливо гостро постає це питання при впровадженні уніфікованих силових модулів на багатосистемному ЕРС, оскільки уніфікація, як відомо, призводить до деякої надлишковості у складі тягової електропередачі. Для реалізації підвищеної робочої частоти перетворення електричної енергії у складі силових модулів необхідне використання інверторів напруги або струму.

Тобто до перелічених раніш (п.2.2) функцій статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза додається ще одна – підвищення робочих частот [31].

Розглянемо, які існують технічні рішення для реалізацій функцій силового модуля багатосистемного електровоза.

По-перше. Для регулювання режимами роботи тягового двигуна постійного струму необхідне впровадження керованих випрямлячів або імпульсного регулятора напруги.

По-друге. Для регулювання режимами роботи асинхронного тягового двигуна необхідно використання інвертора зі змінними частотою та напругою на виході.

Третє. Для узгодження рівня робочих напруг складових частин силового модуля з напругою контактної мережі потрібен трансформатор. А для зменшення його габаритів необхідно підвищити його робочу частоту. Тобто, тяговий трансформатор підвищеної частоти підключається не до контактної мережі, а до виходу інвертора напруги або струму, необхідною робочою частотою.

Четверте. Для реалізації багатосистемності силового модуля електровоза необхідно привести постійну або змінну напругу у контактній мережі з різними робочими напругами до одного виду. Це реалізується за допомогою випрямлячів, тобто напруга змінного струму з контактної мережі приводиться до того ж виду, що й напруга у контактній мережі постійного струму.

Враховуючи вищевикладене, автором пропонуються такі структурні схеми тягової електропередачі багатосистемного електровоза з різними видами тягових двигунів (рис. 2.4, 2.5) [31,37].

Структурні схеми (рис. 2.4, 2.5) складаються з двох контурів: мережевого та тягового (з двигунами постійного або змінного струмів).

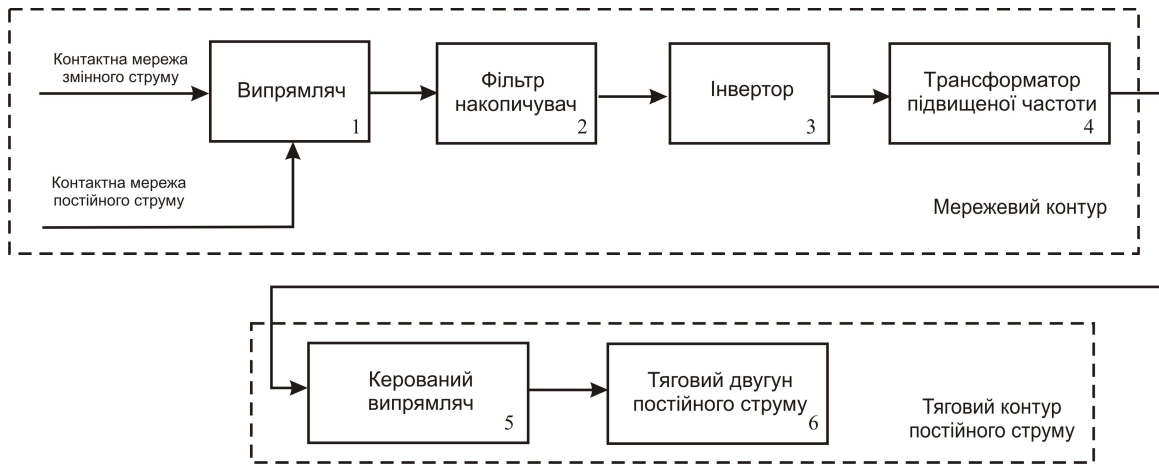


Рис. 2.4. Узагальнена структурна схема тягової електропередачі з тяговими двигунами постійного струму та ланкою підвищеної частоти.

Перший контур призначено для перетворення електричної енергії з контактної мережі в напругу змінного струму підвищеної частоти, яку знімаємо зі вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти. Тобто, цей контур виконує третю та четверту функції тягового перетворювача, і тому має відповідний склад.

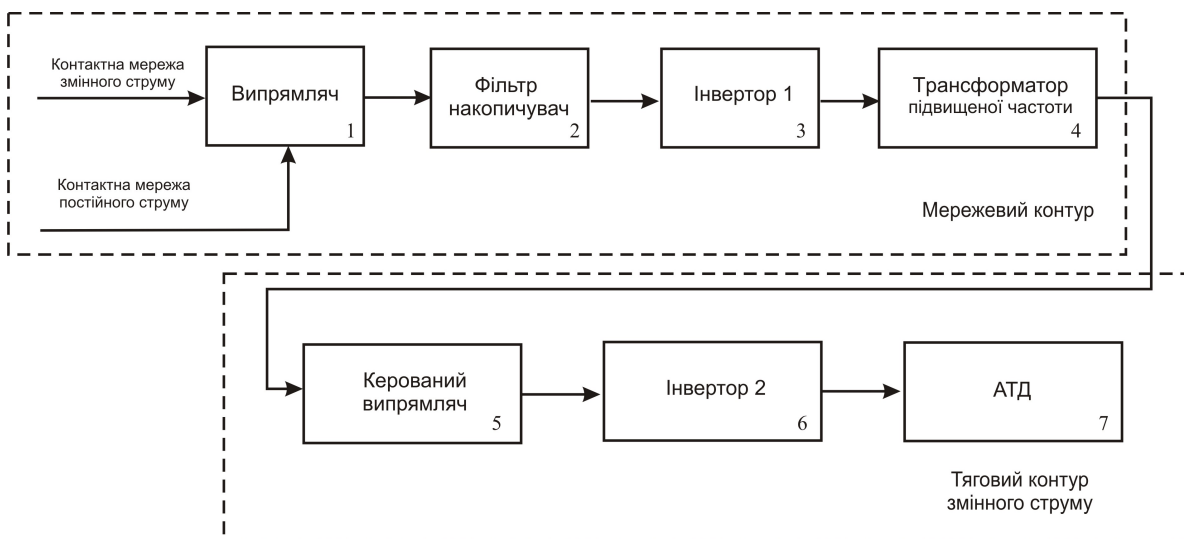


Рис. 2.5. Узагальнена структурна схема тягової електропередачі з асинхронними тяговими двигунами та ланкою підвищеної частоти.

Узгодження рівнів робочих напруг виконує саме мережевий контур. Це здійснюється за допомогою трансформатора підвищеної частоти (блок 4 на рис. 2.4 та 2.5). Первинну обмотку цього трансформатора увімкнено до виходу високовольтного інвертора 1 (блок 3 на рис. 2.4 та 2.5), вхід якого увімкнено до контактної мережі постійного струму або до виходу випрямляча (керованого або некерованого) (блок 1 на рис. 2.4 та 2.5), при змінному струмі у контактній мережі. Використання некерованого випрямляча, увімкненого до контактної мережі змінного струму, дозволить виключати вплив кута комутації ключових елементів вхідного перетворювача на енергетичні показники електровозу, що має місце при застосуванні керованого випрямляча. Використання керованого випрямляча дозволить реалізувати рекуперативне гальмування, з поверненням енергії до контактної мережі. Підтримка напруги мережевого контуру на заданому рівні здійснюється інвертором (блок 3 на рис. 2.4 та 2.5). Для стабілізації напруги на вході інвертора (блок 3 на рис. 2.4 та 2.5) використовується фільтр-

накопичувач (блок 2 на рис. 2.4 та 2.5). Як бачимо, структурні схеми, представлені на рис. 2.4 та 2.5, мають однакові мережеві контури, структура яких не залежить від виду тягового двигуна електровоза. Цей контур відповідає за реалізацію багатосистемності електровоза.

Тяговий контур представлених на рис. 2.4 та 2.5 структурних схем відповідає за першу або другу функції перетворювача, тобто за регулювання режимів роботи тягових двигунів.

При використанні тягового двигуна постійного струму (блок 6 на рис. 2.4) для його живлення можливо використовувати керований випрямляч (блок 5), підключений до вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти (блок 4). Керування режимами роботи тягового двигуна можливе за рахунок зміну режимів роботи керованого випрямляча (блок 5) та інвертора (блок 3), який визначає напругу на виході трансформатора підвищеної частоти (блок 4).

При використанні тягового двигуна змінного струму (блок 7 на рис. 2.5), наприклад, трифазного асинхронного двигуна, до складу тягового контуру змінного струму входить керований випрямляч (блок 5) та трифазний інвертор 2 (блок 6). Ці два блоки складають так званий трифазний автономний інвертор напруги, який широко застосовується у частотно-регульованих електроприводах. В цьому випадку режимами роботи тягового двигуна можливо керувати за допомогою трьох елементів структурної схеми: керованого випрямляча (блок 5) й інверторів 1 (блок 3) та 2 (блок 6).

Структурні схеми тягових електропередач які представлені на рис. 2.4 та 2.5, дозволяють реалізувати такі напрямки покращення якості споживаної електричної енергії [69,105,106]:

- використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом по фазі відносно один одного;
- використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масогабаритні показники фільтрів та трансформатора. Крім того, в подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально допустимі параметри одиночних силових елементів перетворювача.

Приймаємо запропоновані структурні схеми, представлені на рис. 2.4 та 2.5, як базові для подальших досліджень.

Вихідними даними для дослідження властивостей запропонованих статичних перетворювачів для тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів приймаємо:

- 1) Напругу у контактній мережі постійного струму 3 кВ та підвищену до рівня 6, 12 або 24 кВ.
- 2) Напругу у контактній мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц.
- 3) Кількість тягових двигунів 4 або 6, що відповідає односекційному електровозу.
- 4) Тягові електродвигуни двигуни (ТЕД): трифазний асинхронний (АТД) або постійного (пульсуючого) струму послідовного збудження (ТД ПС).

Враховуючи запропоновані вихідні дані, пропонується такий метод вибору варіантів побудови статичних перетворювачів підвищеної частоти для тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів (табл. 2.8). Розглянемо, яким чином з табл. 2.8 ідентифікувати варіанти побудови статичного перетворювача.

Таблиця 2.8

Метод вибору варіантів побудови статичних перетворювачів підвищеної частоти для тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів

Варіант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
Т Д П С	6 Т Е Д	3 кВ	.	.	.	.	.	.																
		6 кВ		.			.																							
		12 кВ			.			.																						
		24 кВ				.			.																					
		25 кВ 50 Гц																					
	4 Т Е Д	3 кВ																						
		6 кВ									.		.																	
		12 кВ										.		.																
		24 кВ											.		.															
		25 кВ 50 Гц																							
А Т Д	6 Т Е Д	3 кВ														.	.	.	.	.	.	.	.
		6 кВ															.		.	.	.	.	.
		12 кВ																.		.	.	.	.	
		24 кВ																	.		.	.	.		
		25 кВ 50 Гц														.			.	.	.	.	.
	4 Т Е Д	3 кВ																					
		6 кВ																							.	.	.	.	.
		12 кВ																							.	.	.	.	.
		24 кВ																								.	.	.	.
		25 кВ 50 Гц																						.	.	.	.	.	.

Наприклад, варіант 9 відповідає статичному перетворювачу, призначеному для встановлення на 4-вісному електровозі з тяговими двигунами постійного струму та призначеного для роботи на ділянках, електрифікованих постійним струмом традиційного рівня напруги 3 кВ та підвищеної до 6 кВ.

Як бачимо з табл. 2.8, варіанти побудови 1, 8, 15 та 22 відповідають традиційним для залізниць країн СНД електровозам подвійного живлення, інші варіанти відповідають підвищенню напруги у контактній мережі постійного струму. В будь-якому випадку електровоз повинен працювати при номінальній напрузі у контактній мережі постійного струму 3 кВ, оскільки, як вказувалось раніш, забезпечити одночасний перехід всієї мережі залізниць на будь-яку нову систему живлення є складною проблемою, вирішення якої вимагає значних витрат.

Таким чином, запропоновані структурні схеми статичного перетворювача для тягової електропередачі багатосистемного електровоза реалізують усі необхідні функції перетворювача, з урахуванням виду тягового двигуна та параметрів контактної мережі.

2.5. Структури тягових перетворювачів багатосистемних електровозів

Представлені на рис.2.4 та 2.5 узагальнені структурні схеми відображають взаємодію елементів системи між собою при реалізації необхідних функцій тягового перетворювача. Розглянемо, як реалізувати силові модулі перетворювача на базі запропонованих узагальнених структурних схем.

Параметри контактної мережі та вид тягового двигуна визначаються за варіантом представленим у табл. 2.8.

Використовуючи дані з табл. 2.8, представимо структурну схему перетворювальної структури, яка реалізує варіант «1»: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД з використанням трансформаторів підвищеної частоти (рис. 2.6).

Представлена на рис. 2.6 структурна схема реалізує силовий модуль типу М1, тобто кожен асинхронний тяговий двигун отримує живлення від окремого перетворювача. До складу такого окремого перетворювача входять усі елементи, необхідні для виконання його функцій при АТД, відповідно до узагальненої структури (рис.2.5).

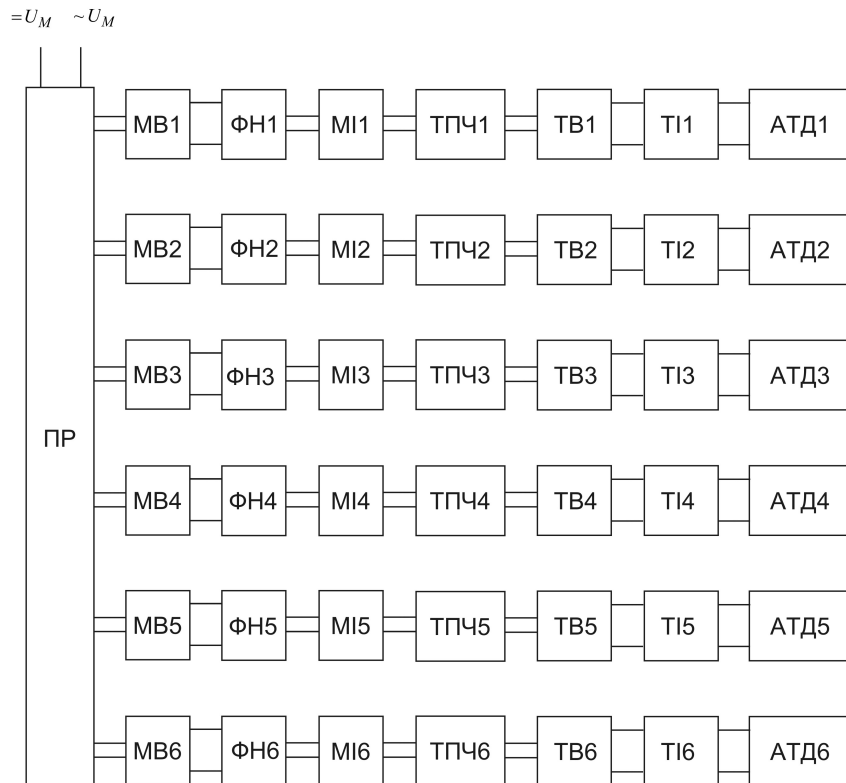


Рис. 2.6. Розгорнута структура тягового перетворювача за варіантом «1»:
25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД

На рис. 2.6: ПР – перемикач режимів (25 кВ 50 Гц або 3 кВ постійного струму); МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр накопичувач; МІ – інвертор мережевого контуру; ТПЧ – трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрямляч тягового контуру; АТД – асинхронний тяговий двигун.

Для вибору режиму роботи перетворювача «3 кВ постійного струму» або «25 кВ змінного струму» (табл. 2.8) потрібен так званий перемикач режимів (ПР), який виконує необхідні комутації силових кіл.

У режимі «3 кВ» ПР підключає МВ1...МВ6 паралельно до контактної мережі, а в режимі «25 кВ 50 Гц» - послідовно, тобто підключені у режимі дільника напруги контактної мережі. При цьому на вході кожного МВ діє напруга, яка дорівнює:

кВ змінного струму, а у режимі «3 кВ» діє 3 кВ постійного струму. Тобто робочі напруги елементів мережевого контуру є близькими як для режиму постійного, так і змінного струмів.

Розглянемо перетворення енергії в першому силовому модулі. Напруга мережі після перемикача режимів та мережевого випрямляча (для режиму «25 кВ 50 Гц») стабілізується на фільтрі-накопичувачі ФН1. Напруга з фільтра накопичувача поступає на вхід інвертора мережевого контуру МІ1, який працює на підвищеній частоті. До виходу мережевого інвертора МІ1 підключена первина обмотка трансформатора підвищеної частоти ТПЧ1.

Для регулювання режимів роботи трифазного асинхронного двигуна потрібен трифазний інвертор тягового контуру ТІ1, на вхід якого поступає напруга вторинної

обмотки ТПЧ1, але перетворена за допомогою випрямляча тягового контуру ТВ1 у пульсуючу. Тобто отримана класична структура трифазного інвертора напруги з ланкою постійного струму [76]. Для стабілізації напруги на ланці постійного струму традиційно використовують конденсатори (на структурі не представлені).

Елементи перетворювача МІ, ТПЧ та ТВ виконуються однофазними. Саме ця обставина робить схему, представлену на рис. 2.6 аналогічною по суті до класичної схеми, яку використовують на ЕРС змінного струму та подвійного живлення, на якому використовуються однофазні тяговий трансформатор та тяговий випрямляч [107,108,109, 110], тільки схема, представлена на рис. 2.6, більш складна.

Перевагою представленої на рис. 2.6 схеми є використання мережевих інверторів МІ, які працюють зі зсувом по фазі один до одного, тобто реалізується принцип багатофазного перетворювача, що, як загально відомо, дозволяє покращити енергетичні показники перетворювача в цілому. Але при цьому однофазні перетворювачі характеризуються відносно низькими енергетичними показниками, зокрема коефіцієнтом потужності. Так для однофазних мостових випрямлячів (на яких можна виконати випрямлячі мережевого та тягового контуру) встановлена потужність трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) дорівнює $\frac{1}{\sqrt{2}}$, а для трифазного мостового випрямляча $\frac{1}{\sqrt{3}}$, тобто у складі тягового перетворювача доцільно використання трифазних систем [76].

В запропонованих структурних схемах реалізувати збільшення числа фаз перетворювача, для покращення його енергетичних показників, можливо за рахунок з'єднання у трифазну систему вторинних обмоток однофазних трансформаторів підвищеної частоти ТПЧ, при одночасній реалізації зсуву напруг первинних обмоток цих трансформаторів на 120 ел. градусів, тоді схема представлена на рис. 2.6, матиме вигляд, представлений на рис. 2.7.

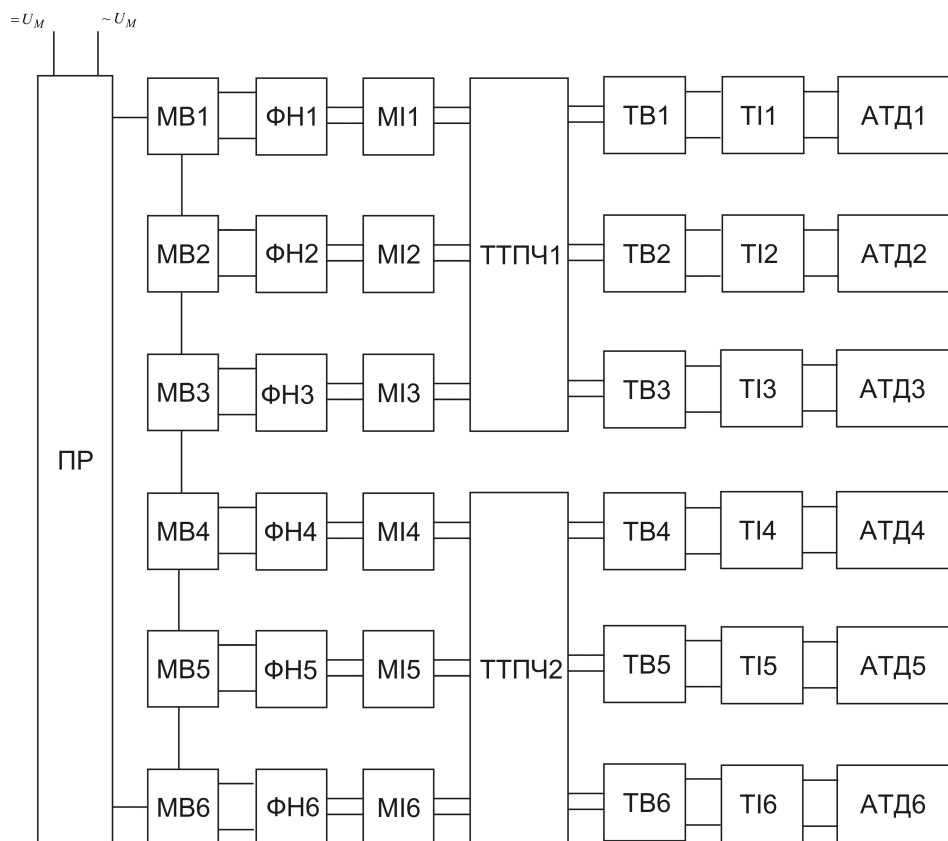


Рис. 2.7. Структура тягового перетворювача за варіантом «1»: 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД з використанням трифазного трансформатора підвищеної частоти (ТТПЧ).

Використання трифазної системи дозволить зменшити габаритну потужність

трансформаторів на

Фактично схема, представлена на рис. 2.7, реалізує перетворювач типу МЗ, тобто один силовий модуль, основна перетворююча частина якого є трифазний трансформатор підвищеної частоти ТТПЧ1 – перетворює енергію для трьох тягових двигунів АТД1, АТД2, АТД3.

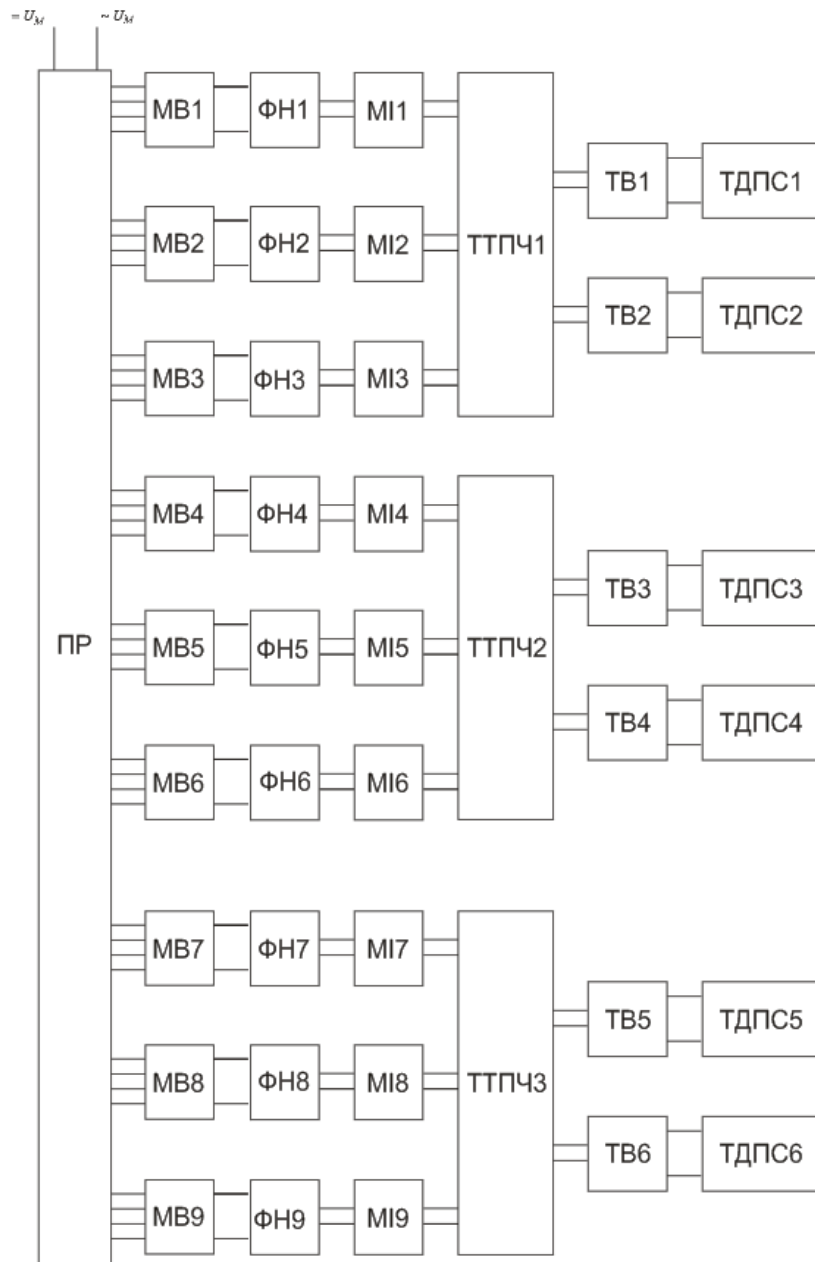


Рис. 2.8. Структура тягового перетворювача 25 кВ змінного та 3 кВ постійного струму при 6 АТД при реалізації силовими модулями типу М2.

Таким чином, тип силового модуля визначається кількістю тягових двигунів, підключених до трансформатора підвищеної частоти [52,55].

Якщо за основу перетворювача прийняти силовий модуль типу М2 структурна схема, представлена на рис. 2.6, змінюється до вигляду, представленому на рис. 2.8. У цій системі використовуються три трифазні трансформатори підвищеної частоти ТТПЧ1, ТТПЧ2, ТТПЧ3, для живлення яких необхідно використовувати дев'ять однофазних інверторів МІ1...МІ9.

До виходу кожного з трифазних ТТПЧ підключаються трифазні випрямлячі ТВ1.. ТВ6, кожен яких є складовою частиною тягових контурів для живлення асинхронних тягових двигунів АТД1...АТД6.

У представлених на рис.2.6...2.8 схемах реалізується індивідуальний привод, що досягається регулюванням режимом роботи елементів тягового контуру для кожного з АТД.

Крім того, в даному варіанті побудови тягового перетворювача на вході кожного з дев'яти мережевих випрямлячів МВ1...МВ9, підключених послідовно до мережі

змінного струму 25 кВ 50 Гц, діє напруга, яка дорівнює: кВ змінного струму, ця величина є близькою до режиму роботи «3 кВ» постійного струму, в якому усі елементи дев'яти мережевих контурів підключаються паралельно до мережі постійного струму, тобто немає необхідності використовувати напівпровідникові силові елементи більшого класу або спеціальні схеми їх увімкнення для роботи у режимі «25 кВ 50 Гц».

Вищевикладене дозволяє стверджувати, що на структуру тягового перетворювача впливає: кількість та вид тягових двигунів, напруга у контактній мережі (поєднання мережевих випрямлячів), тип силового модуля, на базі якого може бути реалізовано перетворювач та вид (однофазний або трифазний) трансформатора підвищеної частоти.

В залежності від структури перетворювача тягової електропередачі багатосистемних електровозів пропонується така їх класифікація (яка надалі представлена терміном - тип перетворювача), яка враховує:

1) кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуни (АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуни постійного струму (ТДПС); 6Т – шість ТДПС;

2) тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6;

3) тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;

4) схему з'єднання вхідних випрямлячів мережевого контуру за формулою , де – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів; - кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

Остання позиція – схема з'єднання вхідних випрямлячів забезпечує реалізацію багатосистемності електровоза. Тобто, змінюючи цю схему, є можливість підтримувати рівень робочої напруги елементів мережевого контуру перетворювача на приблизно постійному рівні при різних значеннях напруги у контактній мережі як постійного, так і змінного струмів.

Наприклад, тяговий статичний перетворювач для живлення чотирьох асинхронних тягових двигунів, побудований на базі силових модулів типу М2 (тобто два тягових двигуни на один силовий модуль) із використанням трифазних трансформаторів підвищеної частоти, в складі якого використовуються шість мережевих випрямлячів, буде класифіковано як: 4А-М2-3Ф-2м3а.

На рис. 2.6 представлено розгорнуту структуру тягового перетворювача 6А-М1-1Ф-6м1а, призначеного для живлення шести асинхронних тягових двигунів, в якому використано однофазні трансформатори підвищеної частоти.

У додатку Б представлені структурні схеми перетворювачів різних типів у відповідності до запропонованої класифікації.

Питанню розробки та дослідження структурних схем статичного перетворювача тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів присвячені роботи [39,40,41,42,51,52,55]

Таким чином, запропоновані структурні схеми перетворювачів, які побудовані з використанням силових модулів різного типу, враховують вид тягового двигуна та параметри контактної мережі, що відображається у запропонованій класифікації перетворювача.

2.6. Прогнозування надійності тягових перетворювачів з ланкою підвищеної частоти

Запропоновані структури статичного перетворювача тягової електропередачі з ланкою підвищеної частоти містять у собі відносну велику кількість функціональних елементів. Ці елементи, в залежності від параметрів контактної мережі та виду тягового двигуна, можуть по-різному з'єднатися: паралельно, послідовно, послідовно-паралельно (додаток Б). Найбільш характерні, для запропонованої класифікації силових модулів системи, представлені на рис. 2.6...2.8.

Для вибору раціональної структури статичного перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза потрібно вирішити питання, пов'язані з покращенням експлуатаційних показників перетворювача: ремонтпридатність, довговічність, безвідмовність та інші. Визначення цих показників вимагає наявності значної кількості інформації щодо відмов обладнання, умов експлуатації обладнання, якості виконання ремонтів та інші. Все це разом визначає експлуатаційну надійність тягового перетворювача, або будь-якого іншого обладнання та вимагає проведення достатньо складних досліджень. Питанням визначення та покращення основних показників експлуатаційної надійності електрообладнання, у тому числі і рухомого складу залізниць, присвячені роботи [111...118].

Серед тягових перетворювачів, які експлуатуються у даний час на електрорухомому складі залізниць України, перетворювачів, створених за структурною схемою, яка запропонована у цій роботі, немає. Ця обставина зумовлює необхідність проведення теоретичних досліджень, пов'язаних із визначенням та порівнянням структурної надійності різних запропонованих перетворювальних структур (структур перетворювача) [51,52,53,54,56,60].

Під структурною надійністю пристрою розуміємо його результуючу надійність при відомих структурній схемі та значеннях надійності елементів структурної схеми [118,119,120].

Метою представлених досліджень є визначення структури (структур) яка характеризується більш високим рівнем надійності. Виключення з числа запропонованих перетворювальних структур систем із низьким рівнем структурної надійності дозволить дати відповідь на одне з головних питань, пов'язаних з експлуатацією реальних перетворювачів на багатосистемних електровозах – який серед

запропонованих перетворювачів забезпечить процес перевезень на електрифікованих ділянках залізниць, при різних видах тягових двигунів та параметрах контактної мережі, з максимальним рівнем безвідмовної роботи, що знайшло відображення у роботах: [51,52,53].

Вибір раціональної структури, розробка схем та конструкцій статичних перетворювачів для тягової електропередачі багатосистемних електровозів не може бути виконано в повному обсязі без оцінювання різних варіантів структурних схем, з точки зору структурної надійності схем [53].

Представимо порядок розрахунку структурної надійності різних перетворювальних структур, запропонованих в даній роботі (додаток Б).

Наприклад, проаналізуємо структурну надійність перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а. (рис. Б.1). Схема для визначення структурної надійності цього перетворювача представлена на рис. 2.9.

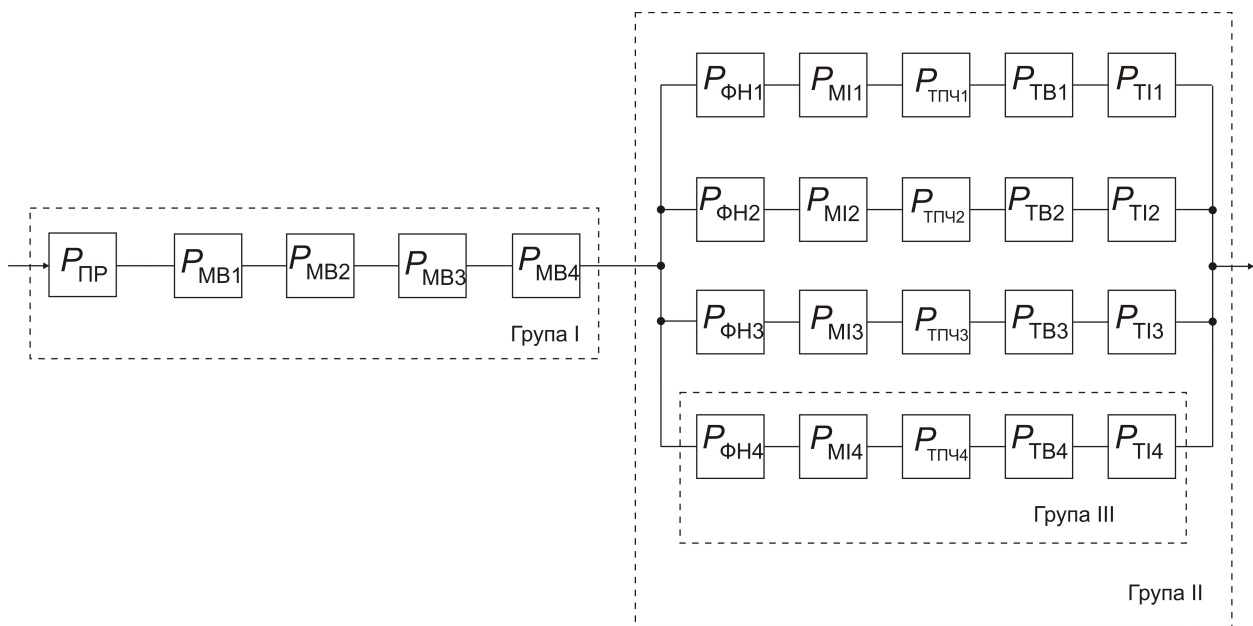


Рис. 2.9. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а.

Представлена на рис. 2.9 враховує функціональний зв'язок елементів перетворювальної схеми, яка представлена на рис. Б.1. Так перемикач режимів ПР та вхідні мережеві випрямлячі МВ1...МВ4, з точки зору надійності, ввімкнені послідовно, оскільки вихід з ладу будь-якого з цих елементів призведе до виходу з ладу усього перетворювача в цілому. Інші елементи перетворювальної структури (рис. Б.1), які забезпечують роботу кожного з чотирьох асинхронних тягових двигунів АТД1..АТД4, а саме фільтри-накопичувачі ФН1...ФН4, мережеві інвертори МІ1...МІ4, трансформатори підвищеної частоти ТПЧ1...ТПЧ4, тягові випрямлячі ТВ1...ТВ4 та тягові інвертори ТІ1...ТІ4 поєднані по групах (ФН-МІ-ТПЧ-ТВ-ТІ), призначених для живлення відповідного тягового двигуна. Кожна з чотирьох груп є незалежною по відношенню одна до одною, тому поєднані паралельно, але мають один загальний вихід, що показує працездатність перетворювача у цілому. Вплив рівня безвідмовної роботи тягового двигуна на структурну надійність перетворювача у представленій роботі не розглядаємо, це є тема окремих досліджень. Тому тяговий двигун у схемах з дослідження структурної

надійності перетворювача не позначено, тобто не враховується.

Імовірність безвідмовної роботи перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а, схема якого для дослідження структурної надійності наведена на рис. 2.9, визначається, враховуючи послідовне, паралельне та послідовно-паралельне з'єднання елементів структурної схеми, як [119]:

$$(2.31)$$

де $P_{1...4}$ – імовірність безвідмовної роботи послідовно з'єднаних елементів структурної схеми ПР-МВ1...МВ4 (група I на рис. 2.9):

$$(2.32)$$

$P_{1...3}$ – імовірність безвідмовної роботи паралельно-послідовно з'єднаних елементів структурної схеми ФН-МІ-ТПЧ-ТВ-ТІ (група III в групі II на рис. 2.9):

$$(2.33)$$

$$(2.34)$$

Приймаємо, що перетворювач пройшов період припрацювання, потік відмов є елементарним та старіння елементів відсутнє. Тоді для визначення імовірності безвідмовної роботи використаємо експоненціальний закон розподілення, оскільки його найбільш часто використовують для оцінки рівня безвідмовної роботи систем що створюються вперше, тобто [118]:

$$(2.35)$$

де λ – інтенсивність відмов функціонального вузла, або елемента перетворювача. Інтенсивність відмов будь якого елемента або функціонального вузла є зворотно пропорційною величиною до його періоду напрацювання.

Відповідно до даних наведених у [120] інтенсивність відмов кожного з функціональних вузлів запропонованих перетворювачів становитиме:

- перемикач режимів ПР: $\lambda_{\text{ПР}} = 10^{-6}$ год⁻¹ ;
- мережевий випрямляч МВ: $\lambda_{\text{МВ}} = 10^{-6}$ год⁻¹ ;
- фільтр-накопичувач ФН: $\lambda_{\text{ФН}} = 10^{-6}$ год⁻¹ ;
- мережевий інвертор МІ: $\lambda_{\text{МІ}} = 10^{-6}$ год⁻¹ ;
- трансформатор підвищеної частоти ТПЧ (ТППЧ): $\lambda_{\text{ТПЧ}} = 10^{-6}$ год⁻¹ ;
- тяговий випрямляч ТВ: $\lambda_{\text{ТВ}} = 10^{-6}$ год⁻¹ ;
- тяговий інвертор ТІ $\lambda_{\text{ТІ}} = 10^{-6}$ год⁻¹ .

Тоді ймовірність безвідмовної роботи кожного з функціональних вузлів запропонованих перетворювальних структур у першому наближенні, відповідно до формули (2.35), визначаємо як:

,	(2.36)
,	(2.37)
,	(2.37)
,	(2.38)
,	(2.39)
,	(2.40)
,	(2.41)
.	(2.42)

Тоді ймовірність безвідмовної роботи перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а з (2.31), враховуючи (2.32)...(2.34) та (2.36)...(2.42), буде визначатися як:

$$(2.43)$$

На рис. 2.10 представлено графік залежність у часі для перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а.

Щодо кількісної оцінки структурної надійності запропонованих перетворювачів, то приймаємо таке: як порівняльний критерій (розрахункового показника надійності) пропонується використовувати значення терміну часу, за який рівень ймовірності безвідмовної роботи перетворювача досягне значення 0,95 [53]. Це значення знаходиться в межах значень ймовірностей безвідмовної роботи обладнання рухомого складу залізниць 0,9...0,999 [121].

Відповідно до графіка, представленого на рис. 2.10, ймовірність безвідмовної роботи перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а досягне значення 0,95 приблизно за 8000 год. При середньому часі роботи електровоза 18 годин на добу [122] отриманий часовий

інтервал буде відповідати приблизно року експлуатації, що відповідає гарантійному терміну експлуатації цього перетворювача. Для порівняння відмітимо, що тяговий трансформатор типу ОДЦЭ-5000/25-82 (електровоз ВЛ-80Р) має гарантійний термін експлуатації 2 роки, при цьому рівень ймовірності безвідмовної роботи на кінець гарантійного терміну складає 0,98 [100]. Встановлений на електровозі ВЛ-80Р перетворювач ВИП2-2200М на кінець періоду припрацьовування має рівень ймовірності безвідмовної роботи в діапазоні від 0,95 до 0,999, у залежності від року випуску електровоза та депо приписки, приймаємо цей показник у середньому 0,97 [123].

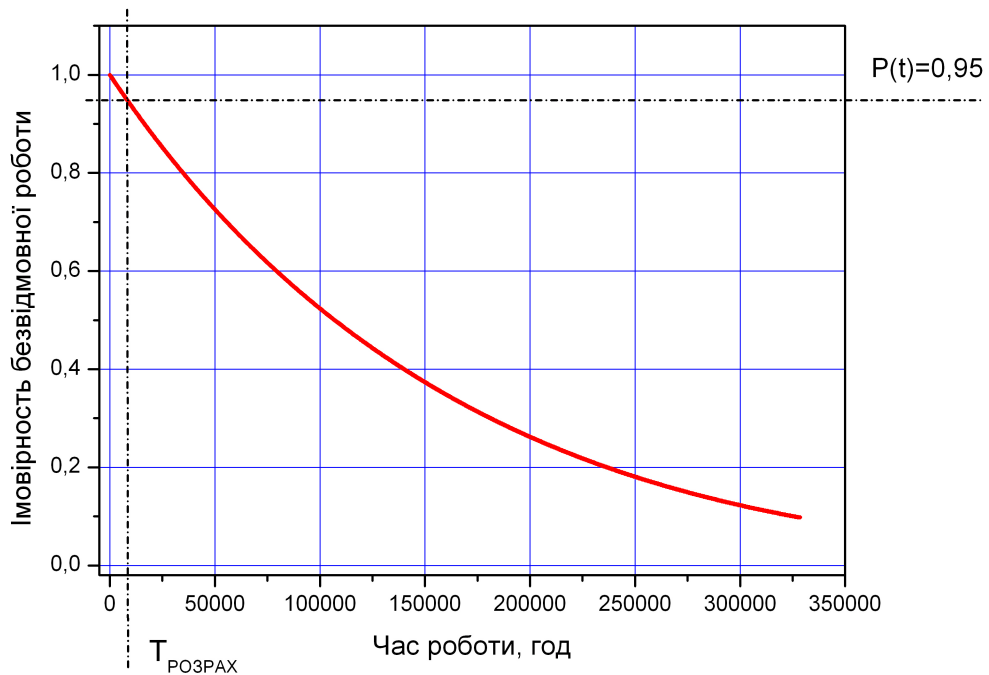


Рис. 2.10. Графік залежності $P(t)$ у часі для перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а.

Враховуючи, що запропоновані перетворювачі мають у своєму складі трансформатори підвищеної частоти, тоді для порівняння слід визначити рівень структурної надійності тягової електропередачі (трансформатора та перетворювача) електровоза ВЛ-80Р. Наприкінці гарантійного терміну сумарний рівень безвідмовної роботи буде дорівнювати $P(t) = 0,95$. Отримане значення є близьким до розрахункового рівня безвідмовної роботи запропонованих перетворювачів (0,95). Крім того, відповідно зміниться характер залежності $P(t)$, час досягнення рівня 0,95 стане меншим, ніж 2 роки експлуатації, або 17520 годин, оскільки, зі зрозумілих причин, результуюча $P(t)$ має інший, більш спадаючий характер, у порівнянні з залежностями окремих елементів (трансформатора та перетворювача).

Аналогічно до представленого вище порядку розрахунку ймовірності безвідмовної роботи запропонованого перетворювача типу 4А-М1-1Ф-1м4а, представимо схему (рис. 2.11) для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-4м1а (рис. Б.3).

Структурна схема перетворювач типу 4А-М1-1Ф-4м1а (рис. Б.3) відрізняється від перетворювальної структури 4А-М1-1Ф-1м4а (рис. Б.1) принципом поєднання мережевих випрямлячів – замість послідовного поєднання використовується паралельне, що обумовлює відповідну зміну у розрахунковій схемі, представленій на рис. 2.11 по відношенню до схеми рис. 2.9.

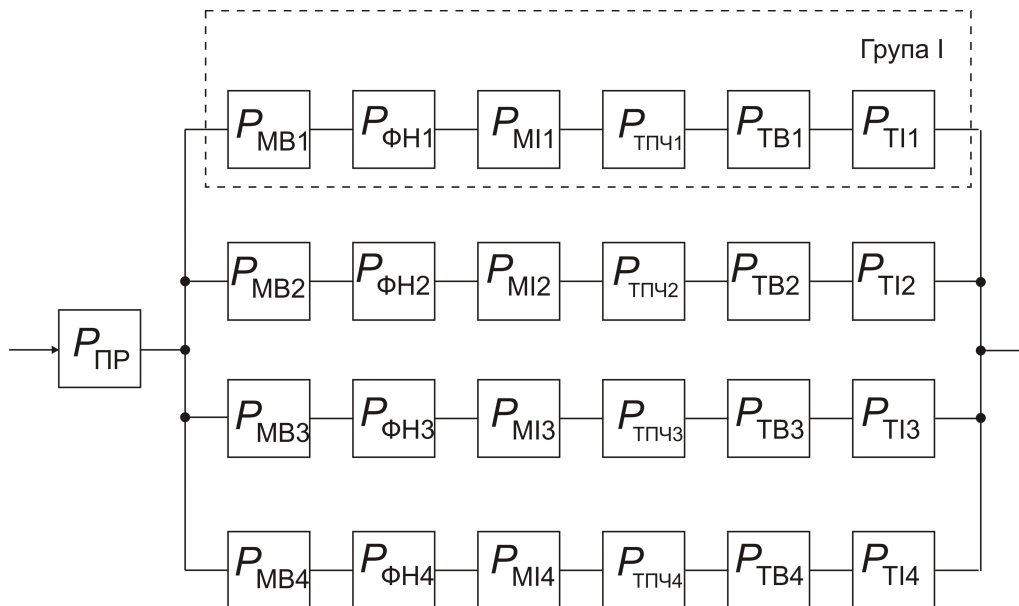


Рис. 2.11. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-4м1а.

Аналогічно до (2.31)...(2.34) імовірність безвідмовної роботи перетворювача зі структурною схемою наведеною на рис. 2.11, буде визначатися як:

$$(2.44)$$

де $P_{MB1...TI1}$ – імовірність безвідмовної роботи послідовно з'єднаних елементів структурної схеми MB1...TI1 (група I на рис. 2.11),

$$(2.45)$$

До запропонованих перетворювальних структур на базі силових модулів типу М1, з однофазними трансформаторами підвищеної частоти, які забезпечують роботи 4АТД, відноситься також перетворювач типу 4А-М1-1Ф-2м2а (рис. Б.2).

За представленим вище порядком визначення рівня безвідмовної роботи розрахункових схем (рис. 2.9, 2.11) з використанням відповідних співвідношень, для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-2м2а використаємо схему, наведену на рис. 2.12, та співвідношення (2.46)...(2.49).

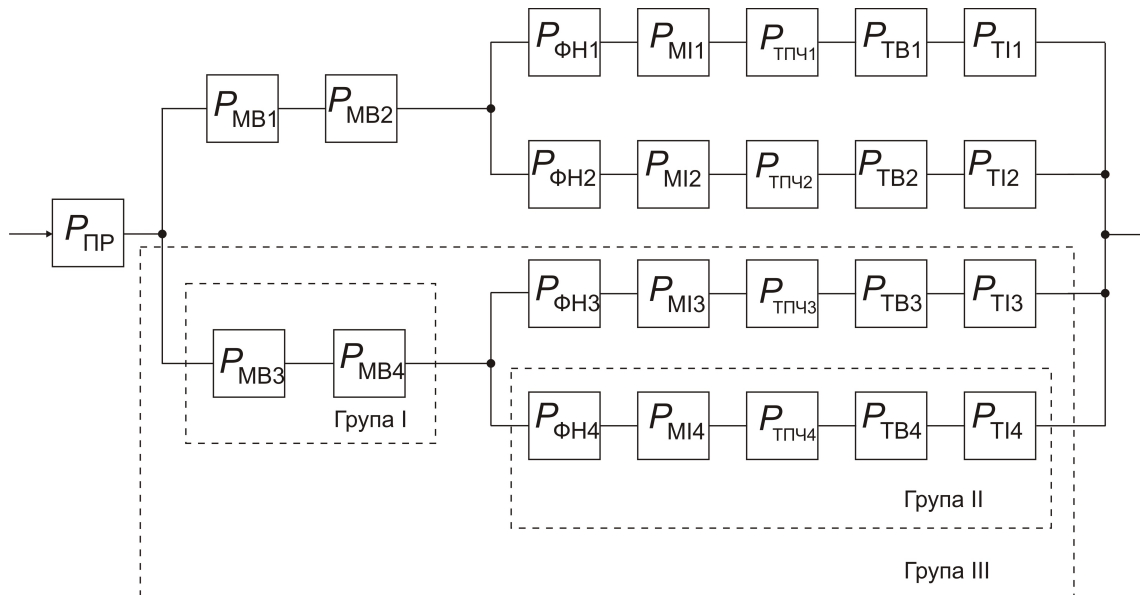


Рис. 2.12. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача типу 4А-М1-1Ф-2м2а.

Ймовірність безвідмовної роботи перетворювача зі структурною схемою, наведеною на рис. 3.1.3, буде визначатися як:

$$(2.46)$$

де ймовірність безвідмовної роботи третьої, другої та першої груп елементів перетворювача відповідно визначаються як:

$$(2.47)$$

$$(2.48)$$

$$(2.49)$$

На рис. 2.13 наведені графіки розподілення ймовірності безвідмовної роботи для структурних схем перетворювачів усіх типів бази 4А-М1-1Ф, побудовані за співвідношеннями (2.43), (2.44), (2.46).

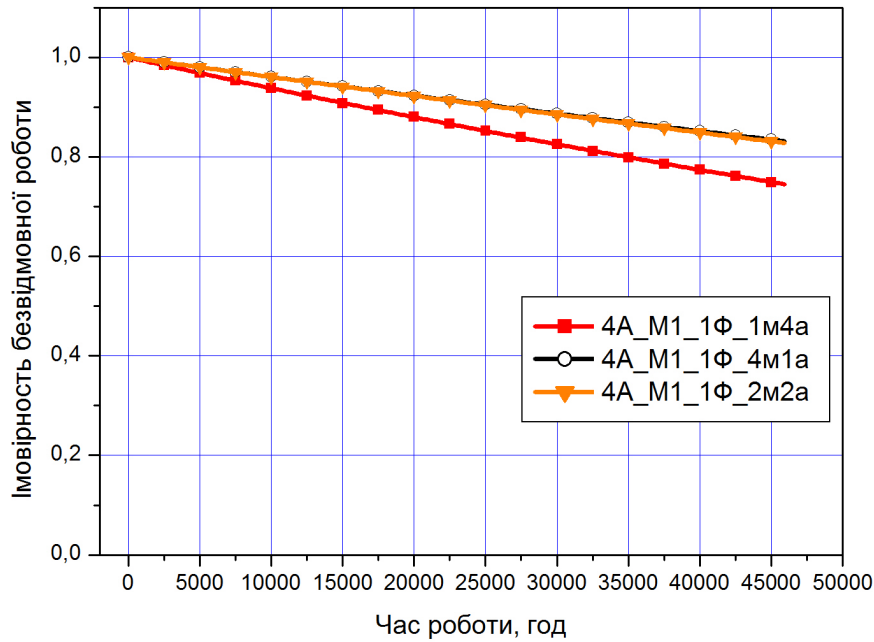


Рис. 2.13. Графік розподілення ймовірності безвідмовної роботи для структурних схем перетворювачів усіх типів на базі 4А-М1-1Ф.

Щодо прийнятої вище кількісної оцінки відмітимо, що рівень ймовірності безвідмовної роботи для перетворювальних структур бази 4А-М1-1Ф досягне значення 0,95 за такі часові інтервали (рис. 2.13): 4А-М1-1Ф-1м4а - 8000 год.; 4А-М1-1Ф-4м1а - 12800 год.; 4А-М1-1Ф-2м2а - 12650 год. Порівняємо ці значення між собою, приймаючи за базу менше значення терміну часу досягнення рівня ймовірності безвідмовної роботи 0,95.

Час, год



Рис. 2.14. Термін часу досягнення рівня при різних структурних схемах перетворювачів для живлення 4АТД.

Для перетворювальної структури 4А-М1-1Ф-4м1а, у порівнянні зі структурою 4А-М1-1Ф-1м4а, цей показник буде більшим у разі, а для 4А-М1-1Ф-2м2а в

разу. Така різниця між моментами терміну часу досягнення ймовірністю безвідмовної роботи рівня 0,95, для перетворювачів з різними схемами з'єднання мережевих випрямлячів, встановлює недоцільність використання у складі системи великої кількості послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів, оскільки досліджувані перетворювачі бази 4А-М1-1Ф відрізняються між собою тільки поєднанням мережевих випрямлячів МВ. Системи з паралельним поєднанням МВ (4м1а) мають більш високе значення розрахункового показника рівня надійності, ніж система з їх послідовним поєднанням (1м4а).

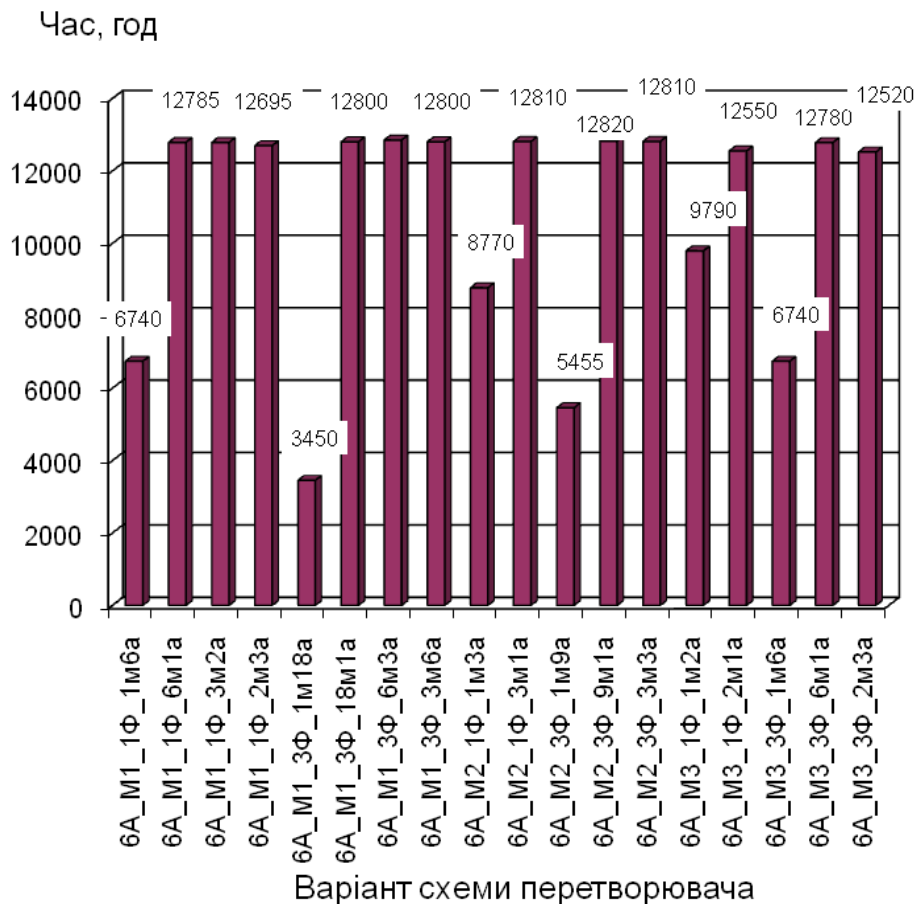


Рис. 2.15. Термін часу досягнення рівня при різних структурних схемах перетворювачів для живлення 6АТД.

Аналогічно до представленого вище порядку розрахунку структурної надійності деяких запропонованих перетворювачів, у додатку В представлено схеми для дослідження структурної надійності всіх типів перетворювачів, схеми яких представлено у додатку Б. При проведенні досліджень структурної надійності перетворювачі на базі силових модулів типів М4 (для чотирьох ТЕД) та М6 (при шести ТЕД) не розглядались, оскільки вони не забезпечують необхідного рівня експлуатаційної надійності, тобто при виході з ладу будь-якого функціонально вузла (елемента) перетворювача всі тягові двигуни будуть відключені, електровоз не зможе виконувати необхідну поїзну роботу.

Результати дослідження структурної надійності схем, представлених у додатку В, порівняємо за часом досягнення ймовірності безвідмовної роботи рівня 0,95. На рис. 2.14...2.17 представлені значення часу досягнення ймовірністю безвідмовної роботи рівня 0,95 для перетворювачів різних типів, з різними видами тягових двигунів.

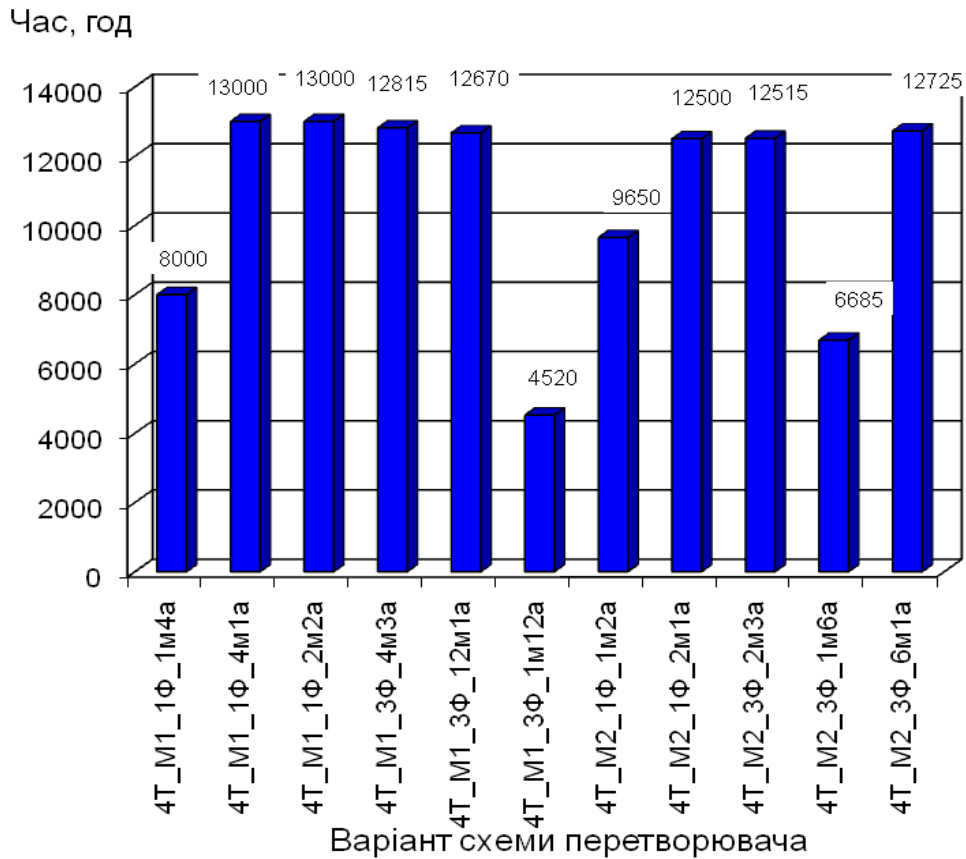


Рис. 2.16. Термін часу досягнення рівня при різних структурних схемах перетворювачів для живлення 4ТДПС.

Відокремлення перетворювальних структур 4Т, 6Т від 4А, 6А обумовлено різним якісним складом цих перетворювачів, так як до складу перетворювачів, призначених для живлення асинхронних тягових двигунів, додатково входять тягові інвертори ТІ (див. рис. додатка Б).

Для порівняння отриманих результатів досліджень використовуємо середнє значення терміну часу досягнення рівня безвідмовної роботи рівня, яке визначаємо як:

$$(2.50)$$

де $t_{\text{ср}}$ – термін часу досягнення ймовірності безвідмовної роботи $P_{\text{ср}}$ -ої схеми перетворювача рівня; n – загальна кількість схем перетворювачів.

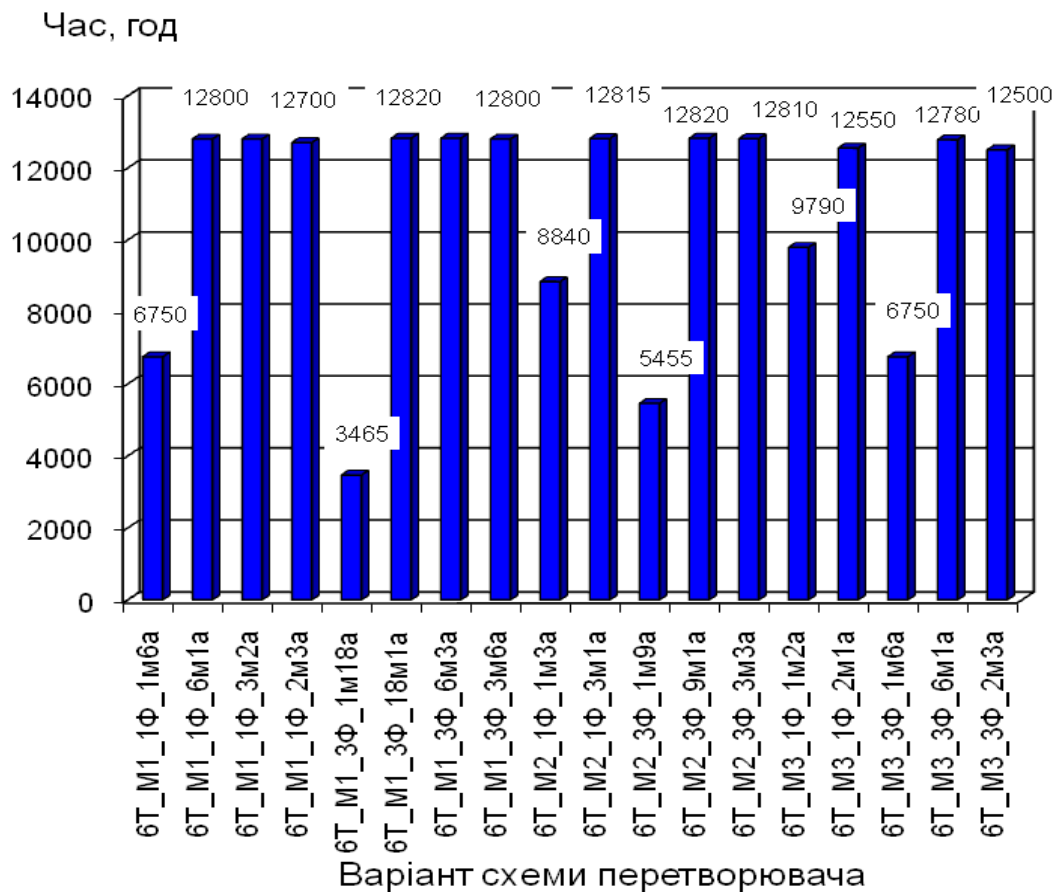


Рис. 2.17. Термін часу досягнення рівня при різних структурних схемах перетворювачів для живлення 6ТДПС.

Визначимо середнє значення терміну часу окремо для тягових перетворювачів, призначених для живлення чотирьох (4А, 4Т) та шести (6А, 6Т) ТЕД за даним рис. 2.14...2.17, результати розрахунків представимо у табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Середнє значення терміну часу досягнення рівня безвідмовної роботи

Кількість та вид ТЕД	4А	6А	4Т	6Т
, год.	10699	10775	10735	10781

Як бачимо з представлених у табл. 2.9 даних, середнє значення терміну часу досягнення рівня безвідмовної роботи рівня . Тому можливо прийняти, що середній термін часу досягнення рівня безвідмовної роботи для всіх типів перетворювачів дорівнює:

год.

Приймаємо отримане значення середнього терміну часу досягнення рівня безвідмовної роботи за нижню межу достатнього рівня розрахункового параметру структурної надійності запропонованих перетворювальних структур. Визначимо системи, які мають розрахунковий показник структурної надійності менший за середній, за допомогою гістограм, представлених на рис. 2.14...2.17.

Порівняльний аналіз структурної надійності різних варіантів побудови статичних перетворювачів для багатосистемного електровоза показав, що менший за середній

термін часу досягнення рівня мають перетворювачі типів:

- 4А(Т)-М1-1Ф-1м4а;
- 4А(Т)-М1-3Ф-1м12а;
- 4А(Т)-М2-1Ф-1м2а;
- 4А(Т)-М2-3Ф-1м6а;
- 6А(Т)-М1-1Ф-1м6а;
- 6А(Т)-М1-3Ф-1м18а;
- 6А(Т)-М2-1Ф-1м3а;
- 6А(Т)-М2-3Ф-1м9а;
- 6А(Т)-М3-1Ф-1м2а;
- 6А(Т)-М3-3Ф-1м6а,

тому будувати тягові перетворювачі за такими структурами є недоцільним.

Серед запропонованих перетворювальних структур, які мають відносно високі показники структурної надійності, слід виділити перетворювачі мережеві, випрямлячі яких складаються з одної (1а) або трьох (3а) послідовних ланок. Тому для побудови перетворювачів тягового приводу багатосистемних електровозів доцільно використовувати структури з цим поєднанням мережевих випрямлячів.

Дослідимо питання впливу на рівень безвідмовної роботи перетворювачів з АТД наявність додаткового елемента системи (тягового інвертора), у порівнянні з перетворювачами для ТДПС. Для цього порівнюємо значення розрахункового показника надійності (рис.2.14, 2.16) різних перетворювальних структур, призначених для живлення чотирьох тягових двигунів різних видів. Для зручності представимо відповідні дані у вигляді табл. 2.10 та побудуємо за ними графік - рис. 2.18.

Як бачимо з даних, представлених у табл. 2.10 та на рис. 2.18, перетворювальні структури призначені для тягової електропередачі на базі чотирьох тягових двигунів, відносне відхилення часу досягнення рівня для тягового перетворювача типу 4Т по відношенню до типу 4А не перевищує 3 %, що вказує на мінімальний вплив наявності тягового інвертора у складі перетворювача на його розрахунковий показник надійності.

Таблиця 2.10

Порівняння середніх значень часу досягнення рівня безвідмовної роботи рівня для схем 4А та 4Т.

Тип перетворювача		M1_1Ф_1м4а	M1_1Ф_4м1а	M1_1Ф_2м2а	M1_3Ф_4м3а	M1_3Ф_12м1а	M1_3Ф_1м12а	M2_1Ф_1м2а	M2_1Ф_2м1а	M2_3Ф_2м3а	M2_3Ф_1м6а	M2_3Ф_6м1а
Час досягнення $P(t)=0,95$	4А	8000	12800	12650	12800	12800	4550	9740	12450	12400	6700	12800
	4Т	8000	13000	13000	12815	12670	4520	9650	12500	12515	6685	12725
Відхилення 4Т відносно 4А		0,00%	1,56%	2,77%	0,12%	-1,02%	-0,66%	-0,92%	0,40%	0,93%	-0,22%	-0,59%

За аналогічною методикою, за даними, представленими на рис. 2.15, 2.17, розрахуємо та представимо графічно (рис. 2.19) відносну зміну терміну часу досягнення для тягового перетворювача типу 6Т по відношенню до типу 6А.

Для перетворювальних структур з шістьма тяговими двигунами відносне збільшення терміну часу досягнення рівня для тягового перетворювача типу 6Т по відношенню до типу 6А не перевищує 1 % (рис. 2.19).

Таким чином, наявність додаткового елемента (тягового інвертора) в перетворювальних структурах 4А та 6А, призводить до зменшення терміну часу досягнення ймовірності безвідмовної роботи рівня у межах 3%, що не перевищує прийняті у технічних науках допуски (10%).

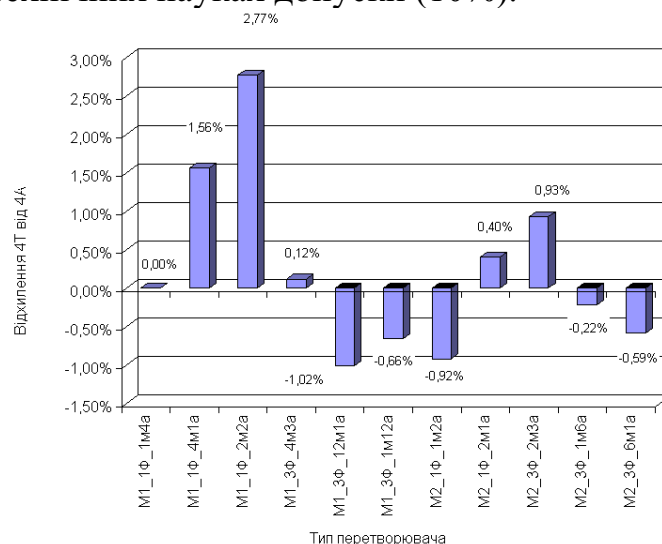


Рис. 2.18. Відносна зміна терміну часу досягнення для тягового перетворювача типу 4Т по відношенню до типу 4А.

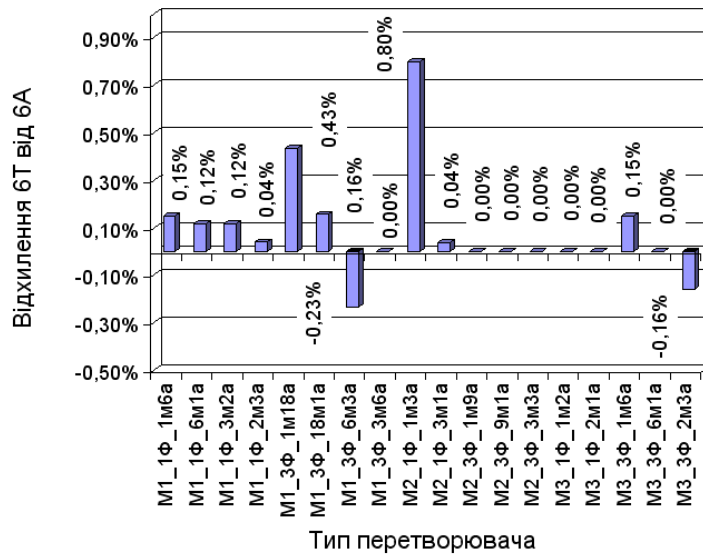


Рис. 2.19. Відносне відхилення терміну часу досягнення для тягового перетворювача типу 6Т по відношенню до типу 6А.

З огляду на вищевикладене, робимо такий висновок: на рівень безвідмовної роботи перетворювальних структур, які досліджуються, основний вплив має схема ввімкнення мережевих випрямлячів, оскільки поєднання інших елементів представлених структурних схем мало різниться одне від одного в різних структурах. Структури з максимальною кількістю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів 1м6а, 1м9а, 1м12а, 1м18а характеризуються найменшим терміном часу досягнення ймовірності безвідмовної роботи рівня . Отже, використовувати структури з таким поєднання мережевих випрямлячів недоцільно.

2.7. Висновки з другого розділу

Аналіз запропонованих структур перетворювачів для тягової електропередачі багатосистемних електровозів, з урахуванням параметрів контактної мережі та виду тягових двигунів, дозволяє зробити такі висновки:

1. При швидкостях багатосистемних електровозів до 250 км/год не виключається можливість застосування колекторних двигунів постійного струму.
2. Реальним інтервалом потужностей для одного двигуна постійного струму можна вважати 900...1200 кВт. При теоретичних дослідженнях статичного перетворювача тягового приводу при тягових двигунах постійного струму цей інтервал доцільно прийняти 900...1800 кВт.
3. Схема статичного перетворювача повинна надійно забезпечити можливе перевантаження по струму у 2...3 рази в порівнянні з номінальним тривалим режимом роботи двигуна (в основному під час пуску електровоза).
4. Побудову статичних перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів доцільно виконувати за модульним принципом. Пропонується використовувати поняття «силовий модуль». Силовий модуль – складова частина

тягового статичного перетворювача, яка за потужністю відповідає певній кількості тягових двигунів, і яка є частиною тягової електропередачі електровоза. Тяговий статичний перетворювач може мати один або декілька силових модулів.

5. Пропонується така класифікація силових модулів, яка враховує співвідношення «кількість двигунів на один статичний перетворювач» - М1, М2, М3, М4, М6. Для односекційних електровозів у 4-вісному виконанні можливо використовувати силові модулі типів: М1, М2, М4, а на 6-вісному: М1, М2, М3, М6.

6. Ланка підвищеної частоти є обов'язковим елементом запропонованого тягового статичного перетворювача для багатосистемного електровоза.

7. Пропонується узагальнена структурна схема тягової електропередачі для багатосистемного електровоза, яка складається з двох частин:

- мережевий контур, який відповідає за взаємодію з контактною мережею. Наявність цього контуру є особливістю запропонованої структури тягової електропередачі та забезпечує багатосистемність електровоза. Основними складовими частинами цього контуру є випрямляч (для режиму роботи з контактною мережею змінного струму), інвертор та трансформатор підвищеної частоти;
- тяговий контур, який живить тяговий двигун. До складу цього контуру випрямляч та інвертор (при використанні асинхронних тягових двигунів).

8. Запропоновано метод вибору варіантів статичних перетворювачів підвищеної частоти для тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів у залежності від параметрів контактної мережі та виду тягових двигунів.

9. Зважаючи на умови експлуатації (параметри контактної мережі, вид тягового двигуна) багатосистемних електровозів на залізницях України розроблено 58 варіантів побудови тягової електропередачі перспективних багатосистемних електровозів на базі статичних перетворювачів з однофазними та трифазними трансформаторами підвищеної частоти.

10. Використання у складі тягової електропередачі трифазної системи, у порівнянні з однофазною, дозволить зменшити габаритну потужність трансформаторів підвищеної частоти на 14,6 %.

11. В залежності від структури перетворювача тягової електропередачі багатосистемних електровозів пропонується їх класифікація, яка враховує:

- кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуни (АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуни постійного струму (ТДПС); 6Т – шість ТДПС;
- тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6;
- тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;
- схему з'єднання вхідних випрямлячів мережевого контуру за формулою $n \cdot m$, де n – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів; m – кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

12. Встановлено, що достатнім значенням робочої частоти ланки підвищеної частоти тягового статичного перетворювача, з точки зору зменшення габаритів обладнання, є частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц.

13. При розробці теоретичних питань щодо створення системи «перетворювач – двигун» для багатосистемних електровозів потрібно враховувати доцільність максимального використання одного і того ж обладнання при різних видах двигунів.

14. Використання структурної надійності для проведення порівняльного аналізу перетворювальних структур дозволяє порівняти між собою системи, які мають однакову функцію, але різну будову.

15. Серед запропонованих перетворювальних структур, які мають відносно високі показники структурної надійності, слід виділити перетворювачі мережеві, випрямлячі яких складаються з одної (1а) або трьох (3а) послідовних ланок. Тому для побудови перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів доцільно використовувати структури з цим поєднанням мережевих випрямлячів.

16. На рівень безвідмовної роботи перетворювальних структур, які досліджуються, основний вплив має схема ввімкнення мережевих випрямлячів, оскільки поєднання інших елементів представлених структурних схем є однотипним. Наявність додаткового елемента (тягового інвертора) в перетворювальних структурах 4А та 6А, призводить до відхилення часу досягнення ймовірності безвідмовної роботи рівня у межах 3%.

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ СТВОРЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ З ТОЧКИ ЗОРУ УНІФІКАЦІЇ

3.1. Уніфікація перетворювальних структур тягового перетворювача багатосистемного електровоза

Термін «уніфікація перетворювальних структур тягового перетворювача багатосистемного електровоза» розуміємо як раціональне скорочення кількості типів структур тягового перетворювача з різними параметрами (напругою, струмом, потужністю), але однакового функціонального призначення, тобто живлення певної кількості двигунів заданої потужності. Оскільки раніш (розділ 2) було доведено, що перетворювальні структури відрізняються, в першу чергу, схемою з'єднання мережевих випрямлячів, тому доцільно розглядати уніфікацію саме цих функціональних вузлів.

Питанням уніфікації присвячені роботи А.І. Якушева, В.Р. Верченко, Л.А. Болдіна, інших вчених та інженерів [124...132], в яких показана роль уніфікації у підвищенні якості виробів, підвищенні економічності виробництва, розглянуті методи стандартизації та уніфікації. Аналіз літературних джерел та відповідної технічної документації показує, що уніфікація тягових перетворювачів на рівні перетворювальних структур не освітлювалось, тому ця задача є актуальною. Розроблені теоретичні принципи уніфікації перетворювальних структур можуть бути застосовані для раціональної уніфікації тягових перетворювачів ще на етапі постановки та розробки технічних завдань.

Метою досліджень у даній главі є визначення перетворювальної структури, яку було б доцільною прийняти за базову для різних потужностей перетворювачів при різних напругах у контактній мережі для забезпечення високого рівня уніфікації.

Уніфікація – одна з найбільш поширених і ефективних різновидів стандартизації.

Стандартизація – встановлення та використання правил з метою упорядкування діяльності у визначеній сфері на користь та за участю всіх зацікавлених сторін, зокрема для досягнення загальної економії при дотриманні умов експлуатації та вимог безпеки [124...132].

Уніфікація складових частин статичних перетворювачів для тягової електропередачі багатосистемних електровозів дозволить зменшити витрати часу та коштів на створення нових типів перетворювачів, за рахунок використання модульності конструкції. Так, наприклад, відпрацювання схемного та конструктивного рішення модуля тягового інвертора для чотирьохвісного електровоза з АТД дозволить його використовувати в складі тягової електропередачі шестивісного електровоза з АТД.

Уніфікацію, в даному випадку, розглядаємо як задачу, метою якої є визначення функціональних вузлів перетворювача, які доцільно використовувати у складі тягового перетворювача, незалежно від виду тягового двигуна, роду струму та рівня напруги у контактній мережі [54].

3.2. Визначення параметрів мережевих випрямлячів тягових перетворювачів перспективних багатосистемних електровозів

Кожна із запропонованих перетворювальних структур (розділ 2), до складу якої входять і мережеві випрямлячі, характеризуються декількома параметрами (напруга, струм, потужність, габарити, вага і т.д.). Номенклатура параметрів, за якими планується проведення уніфікації, повинна бути мінімальною, але одночасно достатньою для оцінки можливості використання того або іншого типу мережевих випрямлячів у складі перетворювальної структури.

Параметри мережевих випрямлячів поділимо на головний та основні.

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача тягової електропередачі для багатосистемних електровозів розглядаються для ряду потужностей: 3000, 6000, 9000 та 12000 кВт. Ці значення задовольняють діапазон необхідних потужностей силових модулів типів М1, М2 або М3, визначених раніше (табл. 2.6 та 2.7).

Основні параметри перетворювача визначають його якість. До них відносимо масу, габарити, струм, тощо. Такі параметри як струм та клас вентилів визначають його вартість – чим вище клас приладу та його номінальний струм, тим вище його вартість [133...135]. Цю обставину в подальших дослідженнях автор пропонує враховувати введенням спеціального коефіцієнта $K_{\text{вент}}$, який визначається як відношення струму

приладу до його класу $K_{\text{вент}}$ [57].

Наприклад, вентиль 10 класу має номінальний струм 200 А, тоді показник

буде дорівнювати:

Запропоновані структурні схеми, які представлені в додатку Б, мають чіткі функціональні складові, які умовно відносяться до мережевого та тягового контурів (рис. 2.4, 2.5). Поєднання функціональних частин перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза, які входять до складу тягового контуру, повинне забезпечувати принцип індивідуального привода. Тобто передбачається, що кожен з тягових двигунів живиться від окремої обмотки трансформатора підвищеної частоти та окремого випрямляча тягового контуру (ТВ) при тягових двигунах постійного струму, або інвертора тягового контуру (ТІ) при асинхронних тягових двигунах. Ці принципи формування тягового контуру є однаковими для всіх запропонованих структур перетворювачів.

Найбільш суттєвий вплив на зміну структури перетворювача підвищеної частоти тягового привода багатосистемного електровоза має мережевий контур. Елементи (функціональні частини) цього контуру повинні забезпечити стабільність заданих параметрів (напруга, струм) або їх зміну у визначених межах, які є вхідними для тягового контуру при різних параметрах контактної мережі. Тобто саме мережевий контур і визначає багатосистемність електровоза. Оскільки багатосистемність визначається саме напругою та видом струму у контактній мережі, то основним вхідним параметром для тягового контуру є саме напруга.

У представленій дисертаційній роботі забезпечення необхідної вихідної напруги мережевого контуру, при зміні рівня вхідної напруги, тобто напруги контактної мережі,

пропонується реалізувати за рахунок зміни схеми поєднання мережевих випрямлячів МВ, які входять до складу мережевого контуру.

Наприклад, у структурі 6А-М1-1Ф-6м1а (рис.2.6) в режимі роботи контактної мережі «3 кВ» усі мережеві випрямлячі підключаються паралельно до контактної мережі, а в режимі «25 кВ 50 Гц» - послідовно. У разі необхідності підключення перетворювача до контактної мережі 6 кВ постійного струму доцільно використовувати групове послідовно-паралельне з'єднання мережевих випрямлячів. Тобто три паралельних групи по два послідовно ввімкнених мережевих випрямляча підключаються до контактної

мережі, при цьому на вході кожного з мережевих випрямлячів діє напруга кВ постійного струму. Виконання необхідних перемикачів здійснюється за допомогою перемикача режимів (ПР).

Для вентилів (некерованих або керованих), які входять до складу мережевих випрямлячів, визначальним фактором обрання є клас приладу, оскільки саме зворотна напруга вентиля є величиною, яка визначає кількість приладів у залежності від рівня вхідної напруги контактної мережі. Струм вентиля залежить від навантаження, і не визначає багатосистемність перетворювача (електровоза).

Саме тому пропонується як головний параметр прийняти клас вентилів, які входять до складу кожного з мережевих випрямлячів (МВ).

У залежності від режиму роботи (з'єднання) перемикача режимів ПР, типу силового модуля (М1, М2, М3, М4) та виду трансформатора (1Ф, 3Ф), з яких побудовано тягову електропередачу, є можливими такі схеми ввімкнення мережевих випрямлячів: рис. 3.1 (живлення шести тягових двигунів) та рис. 3.2 (живлення чотирьох тягових двигунів), які і визначають режим роботи МВ. Представлені на рис. 3.1 та рис. 3.2 схеми поєднання МВ взяті зі структурних схем додатка Б.

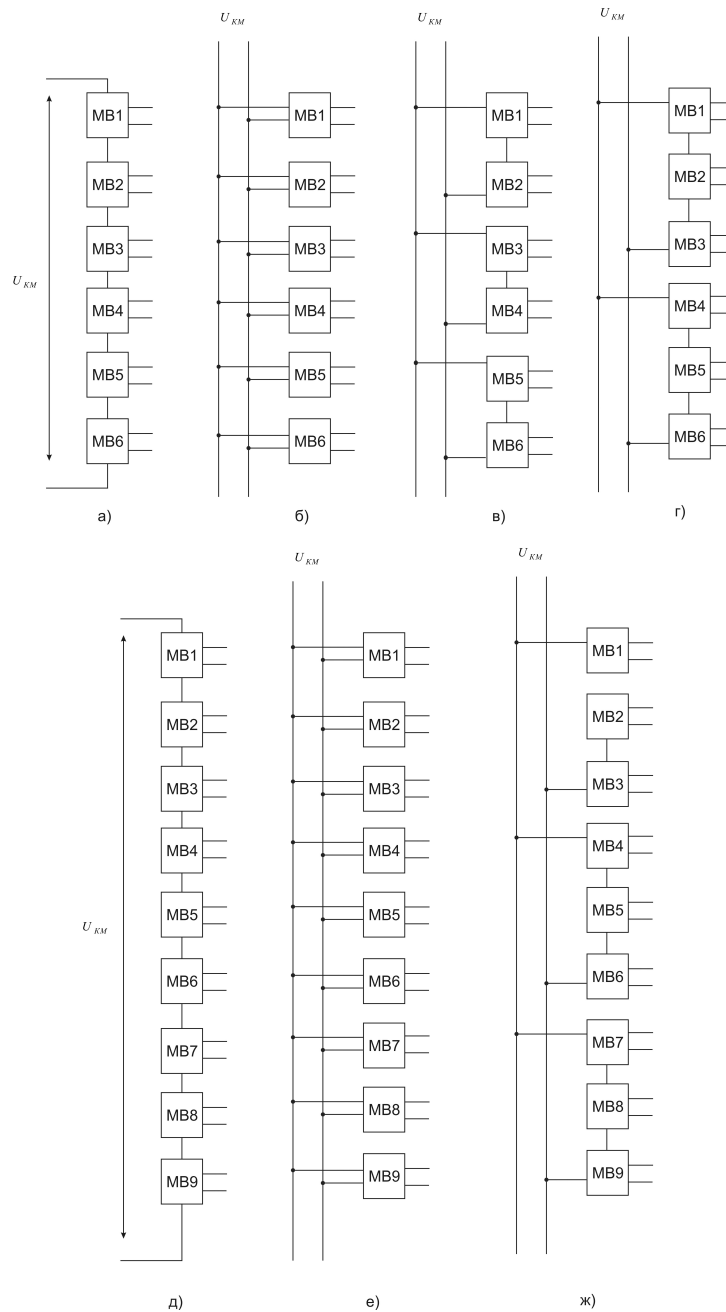


Рис. 3.1. Схеми ввімкнення мережеских випрямлячів перетворювача, призначеного для живлення шести тягових двигунів

Використовуючи представлені на рис. 3.1 та 3.2 варіанти з'єднання мережеских випрямлячів у запропонованих структурах статичних перетворювачів, нескладно визначити значення напруги контактної мережі, яка прикладена до кожного з МВ, відповідно до виразу:

$$(3.1)$$

де U_{KM} – напруга у контактній мережі;
 n – кількість послідовно з'єднаних МВ, до яких прикладена напруга контактної мережі.

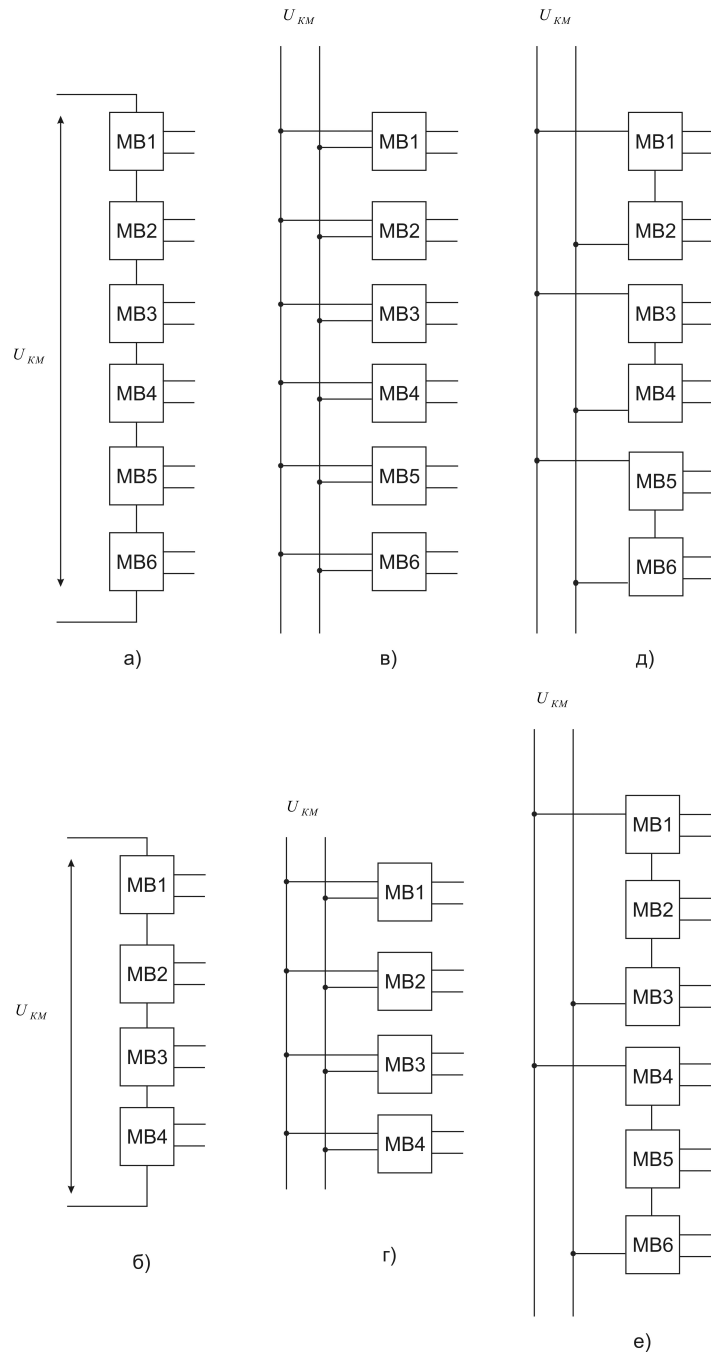


Рис. 3.2. Схеми ввімкнення мережевих випрямлячів перетворювача, призначеного для живлення чотирьох тягових двигунів

Результати розрахунків напруг, які діють на кожному з мережевих випрямлячів перетворювача, представлені відповідно у табл. 3.1 та рис. 3.3.

Наприклад, за допомогою табл. 3.1 визначимо напругу, яка діє на вході мережевих випрямлячів перетворювача типу 6А-М1-1Ф-3м2а (рис.Б.14) для режиму роботи контактної мережі «12 кВ». Ця напруга дорівнює 6 кВ (рядок 2, стовпчик 4). Для перетворювача типу 6А-М1-3Ф-6м3а (рис.Б.18), у режимі роботи контактної мережі «24 кВ», ця напруга дорівнює 6 кВ (рядок , стовпчик 5).

Таблиця 3.1

Значення напруги, що діє на вході мережевих випрямлячів запропонованих перетворювачів тягової електропередачі.

Напруга мережі, кВ		3	6	12	24	25 (50 Гц)	
1		2	3	4	5	6	
1	Кількість послідов- но з'єднаних МВ, а	1	3,00	6,00	12,00	24,00	25,00
2		2	1,50	3,00	6,00	12,00	12,50
3		3	1,00	2,00	4,00	8,00	8,33
4		4	0,75	1,50	3,00	6,00	6,25
5		6	0,50	1,00	2,00	4,00	4,17
6		9	0,33	0,67	1,33	2,67	2,78
7		12	0,25	0,50	1,00	2,00	2,08
8		18	0,17	0,33	0,67	1,33	1,39

Струм вентилів мережевих випрямлячів визначається потужністю силового модуля, до якого входять МВ відповідно до (2.16), (2.17).

Потужність мережевого випрямляча, який входить до складу силового модуля, визначається як:

$$(3.2)$$

де n – кількість мережевих випрямлячів у складі силового модуля, яка визначається його структурою.

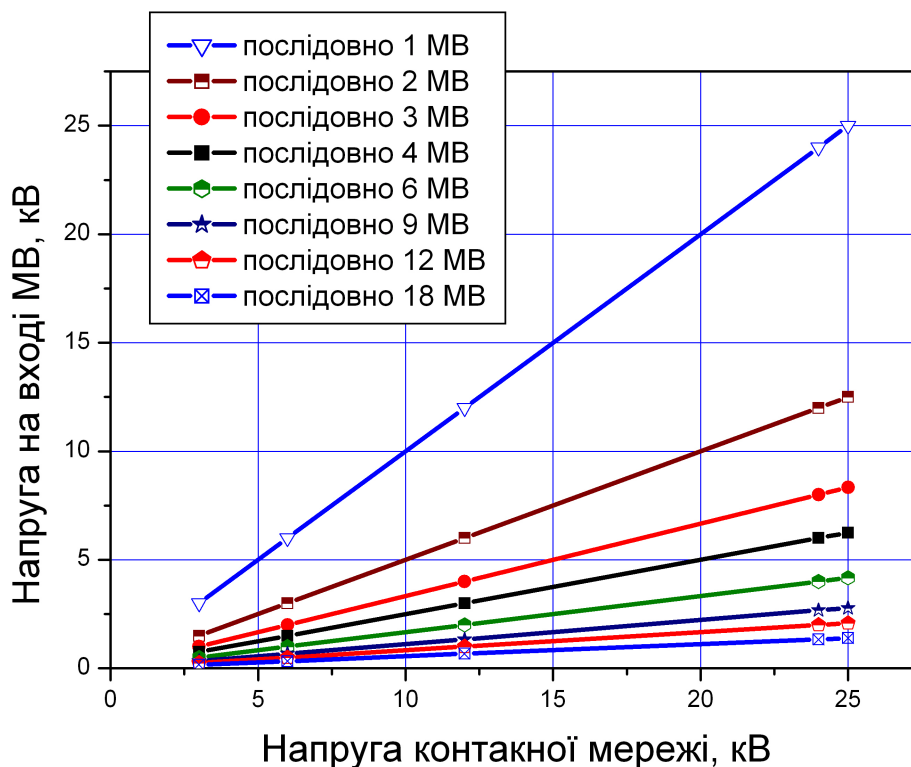


Рис. 3.3. Значення напруги, що діє на вході мережевих випрямлячів тягового перетворювача при чотирьох та шести тягових двигунах

У залежності від потужності та напруги, струм вентилів МВ визначається як:

$$(3.3)$$

Наприклад, потужність статичного перетворювача типу 6А-М1-1Ф-1мба дорівнює кВт, напруга контактної мережі – 25 кВ змінного струму, тоді потужність силового модуля , відповідно до (2.17), буде дорівнювати:

$$(3.5)$$

кВт.

$$(3.6)$$

За запропонованою автором класифікацією силових модулів (розділ 2) до складу перетворювача типу 6А-М1-1Ф-1мба входить шість силових модулів типу М1, кожен з яких живить один із шести тягових двигунів.

Потужність мережевого випрямляча, за виразом (3.2), при цьому:

$$(3.7)$$

кВт.

Для перетворювача типу 6А-М1-1Ф-6м1а кількість мережевих випрямлячів у складі силового модуля дорівнює , що й представлено у знаменнику виразу (3.7).

Таблиця 3.2

Основні показники перетворювальних структур для живлення чотирьох тягових двигунів

Структура перетворювача			
4Т(А)-М1-1Ф-1м4а	4	1	1
4Т(А)-М1-1Ф-2м2а	4	1	1
4Т(А)-М1-1Ф-4м1а	4	1	1
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	4	1	3
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	4	1	3
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	4	1	3
4Т(А)-М2-1Ф-1м2а	4	2	1
4Т(А)-М2-1Ф-2м1а	4	2	1
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	4	2	3
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	4	2	3
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	4	2	3

Тоді струм мережевого випрямляча, за формулою (3.3), буде дорівнювати:

$$(3.9)$$

А.

Для сучасних потужних напівпровідникових приладів високих класів таке значення струму в декілька раз менше номінального значення струму приладу.

В табл. 3.2. та 3.3 представлені основні розрахункові показники перетворювальних структур з чотирма та шістьма тяговими двигунами (додаток Б).

Таблиця 3.3

Основні показники перетворювальних структур для живлення шести тягових двигунів

Структура перетворювача			
6Т(А)-М1-1Ф-1м6а	6	1	1
6Т(А)-М1-1Ф-2м3а	6	1	1
6Т(А)-М1-1Ф-3м2а	6	1	1
6Т(А)-М1-1Ф-6м1а	6	1	1
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	6	1	3
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	6	1	3
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	6	1	3
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	6	1	3
6Т(А)-М2-1Ф-1м3а	6	2	1
6Т(А)-М2-1Ф-3м1а	6	2	1
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	6	2	3
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	6	2	3
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	6	2	3
6Т(А)-М3-1Ф-1м2а	6	3	1
6Т(А)-М3-1Ф-2м1а	6	3	1
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	6	3	3
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	6	3	3
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	6	3	3
6Т(А)-М1-1Ф-1м6а	6	1	1
6Т(А)-М1-1Ф-2м3а	6	1	1

Враховуючи викладені у другому розділі раціональні ряди потужностей електровозів (тягових модулів), визначимо параметри мережевих випрямлячів у діапазоні потужності перетворювачів: 3000, 6000, 9000 та 12000 кВт (що забезпечує роботу перетворювача як з ДПС, так і АТД), при різній напрузі у контактній мережі для тягових перетворювачів, призначених для живлення чотирьох (табл. 3.4) та шести (табл. 3.5) тягових двигунів, відповідно до співвідношень (3.1)...(3.9).

У табл. 3.4 та 3.5 остання колонка СК (стовпчик 7) визначає відношення струму

вентиля (приладу) (стовпчик 6) до його класу (стовпчик 5):

Таблиця 3.4

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення
чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача
3000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ)

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
1	2	3	4	5	6	7
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	750	250	3,00	30	83,33	2,78
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	750	250	0,25	3	1000,00	333,33
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	750	250	1,00	10	250,00	25,00
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	1500	500	0,50	5	1000,00	200,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	1500	500	3,00	30	166,67	5,56

Показники перетворювальних структур для інших варіантів визначені аналогічно і представлені у додатку Д.

При визначенні класу напівпровідникових приладів (табл. 3.4, 3.5 та табл. додатка Д), які входять до складу МВ, враховуємо, що зворотна напруга вентилів при живленні від контактної мережі постійного струму дорівнює напрузі . При живленні від контактної мережі однофазного змінного струму клас вентилів визначається по відношенню до амплітудного значення напруги яка прикладена до мережевого випрямляча, з'єднаного за однофазною мостовою схемою, тобто значення

Таблиця 3.5

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести
тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга
контантної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	500	167	3,00	30	55,56	1,85
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	500	167	0,17	2	1000,00	500,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	500	167	0,50	5	333,33	66,67
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	500	167	1,00	10	166,67	16,67
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	1000	333	0,33	4	1000,00	250,00
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	1000	333	1,00	10	333,33	33,33
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	1000	333	3,00	30	111,11	3,70
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	1500	500	0,50	5	1000,00	200,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	1500	500	3,00	30	166,67	5,56

Якщо потужність перетворювача прийняти однаковою для всіх типів перетворювальних структур, то із усього переліку основних параметрів залишиться струм, так як усі інші основні параметри вирішального значення при вирішенні питання про можливість застосування конкретного типу мережевого випрямляча у конкретній перетворювальній структурі не мають.

В основу розроблених принципів уніфікації МВ пропонується покласти ряди переважних чисел [125,128,131]. Закономірно побудована у відповідності з рядом переважних чисел сукупність чисельних значень головного параметра пристроїв одного функціонального призначення являє собою параметричний ряд. Система переважних чисел є основою уніфікації, її теоретичною базою.

Ряди переважних чисел найчастіше це арифметичні або геометричні прогресії. Щоб визначитись, який вид прогресії прийняти у нашому випадку, визначимо чисельні значення головних параметрів (класи вентилів) мережевих випрямлячів для кожної потужності з діапазону: 3000, 6000, 9000 та 12000 кВт.

Результати наведені у табл. 3.6 та 3.7.

Прийнятий головний параметр (клас вентиля) не залежить від потужності перетворювача, а визначається рівнем напруги у контактній мережі, тобто визначає багатосистемність перетворювача (електровоза).

Таблиця 3.6

Значення головних параметрів тягових перетворювачів, призначених для живлення 4-х ТЕД

Структура перетворювача	Головний параметр МВ при напрузі контактної мережі (кВ)				
	3	6	12	24	25 (50 Гц)
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	60	120	240	353
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	3	5	10	20	30
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	20	40	80	118
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	5	10	20	40	59
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	20	40	80	118
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	60	120	240	353

Враховуючи вищенаведені (розділ 2) результати дослідження структурної надійності перетворювальних структур, приходимо до висновку про недоцільність, з точки зору надійності, використання перетворювальних структур типів: 4А(Т)-М1-3Ф-1м12а, 4А(Т)-М2-3Ф-1м6а, 6А(Т)-М1-3Ф-1м18а, 6А(Т)-М2-3Ф-1м9а, 6А(Т)-М3-3Ф-1м6а. В подальших дослідженнях з вибору раціональної структури перетворювача тягової електропередачі для багатосистемного електровоза рекомендується розглядати структури та головні параметри перетворювачів, наведені у табл. 3.8 та 3.9.

Як бачимо з табл. 3.8, головний параметр (клас вентилів) для перетворювача типу 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а, при напрузі у контактній мережі 25 кВ (50 Гц), дорівнює 118 (рядок 2, стовпчик б). Це ж значення має головний параметр для перетворювача 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а (строчка 3, стовпчик б).

Таблиця 3.7

Значення головних параметрів тягових перетворювачів, призначених для живлення 6-ти ТЕД

Структура перетворювача	Головний параметр МВ при напрузі контактної мережі (кВ)				
	3	6	12	24	25 (50 Гц)
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	60	120	240	353
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	2	4	7	14	20
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	10	20	40	59
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	20	40	80	118
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	4	7	14	27	40
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	20	40	80	118
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	60	120	240	353
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	5	10	20	40	59
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	20	40	80	118
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	60	120	240	353

Таблиця 3.8

Відкоригований перелік структур та значення головних параметрів тягових перетворювачів, призначених для живлення 4-х ТЕД

Структура перетворювача	Головний параметр МВ при напрузі контактної мережі (кВ)					
	3	6	12	24	25 (50 Гц)	
1	2	3	4	5	6	
1	4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	60	120	240	353
2	4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	20	40	80	118
3	4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	20	40	80	118
4	4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	60	120	240	353

Після порівняння структури цих перетворювачів (додаток Б), зі схеми поєднання елементів тягових контурів представлених перетворювачів, стає зрозумілим, що фактично головний параметр (клас вентилів) визначається тільки кількістю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів до контактної мережі, тобто показником .

Теж саме відноситься і до інших типів перетворювачів, представлених у табл. 3.8 та 3.9.

Таблиця 3.9

Відкоригований перелік структур та значення головних параметрів тягових перетворювачів, призначених для живлення 6-ти ТЕД

Структура перетворювача	Головний параметр МВ при напрузі контактної мережі (кВ)				
	3	6	12	24	25 (50 Гц)
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	60	120	240	353
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	10	20	40	59
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	20	40	80	118
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	20	40	80	118
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	60	120	240	353
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	20	40	80	118

6Т(А)-МЗ-3Ф-6м1а	30	60	120	240	353
------------------	----	----	-----	-----	-----

Таким чином, представлені у табл. 3.8, 3.9 дані дозволяють зробити такий висновок: уніфікація по головному параметру не залежить від перетворювальної структури у цілому, а визначається тільки схемою поєднання мережевих випрямлячів перетворювача. Тому параметричні ряди формуються зі значень головних параметрів, які представлені у табл. 3.10.

Беручи до уваги, що клас необхідних для МВ вентилів визначається напругою у контактній мережі та кількістю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів у перетворювальній структурі (показник n), параметричні ряди пропонується формувати з відкоригованих узагальнених значень головних параметрів МВ, які представлені у табл. 3.11, де структура мережевих випрямлячів представлена кількістю послідовно з'єднаних МВ.

Перехід від табл. 3.10 до табл. 3.11 пояснюється однаковими значеннями головного параметра для структур мережевих випрямлячів. Структури, які мають декілька паралельних груп n , кожна з яких складається з одного мережевого випрямляча n - рядки 1,2,3,4 (табл. 3.10) при однакових напругах контактної мережі (стовпчики 2,3,4,5,6 у табл. 3.10), мають однакове значення головного параметра. Тобто замість декількох структур мережевих випрямлячів, а саме 6м1а, 9м1а, 12м1а, 18м1а (рядки 1,2,3,4 у табл. 3.10) доцільно використати класифікацію структур МВ за показником n , що і використано при формуванні у табл. 3.11

Таблиця 3.10

Значення головних параметрів МВ у залежності від схеми з'єднання

Структура МВ		Головний параметр МВ при напрузі контактної мережі (кВ)				
		3	6	12	24	25 (50 Гц)
1		2	3	4	5	6
1	6м1а	30	60	120	240	353
2	9м1а	30	60	120	240	353
3	12м1а	30	60	120	240	353
4	18м1а	30	60	120	240	353
5	2м3а	10	20	40	80	118
6	3м3а	10	20	40	80	118
7	4м3а	10	20	40	80	118
8	6м3а	10	20	40	80	118
9	3мба	5	10	20	40	59

Із табл. 3.11 видно, що кожній із трьох сукупностей головного параметра (строки 1, 2,3) відповідає ряд у формі геометричної прогресії зі знаменником 2 до четвертого члена ряду (стовпчики 2,3,4,5 відповідних рядків). Так для структури МВ за показником 1а ряд складається з членів: 30, 60, 120, 240 (строчка 1 табл. 3.11). Починаючи з п'ятого члена ряду (стовпчик 6 табл. 3.11), для кожної зі структур МВ діє новий діапазон зі своїм знаменником [133...135]. Тому приймаємо рішення, що в нашому випадку системою переважних чисел є геометрична прогресія. П'ятий член не відповідає

визначеній геометричній прогресії, але це заперечує, що наступні члени ряду, для інших можливих значень напруги у контактній мережі, що не розглядаються, будуть відповідати геометричній прогресії у своєму діапазоні, можливо з іншим знаменником.

Таблиця 3.11

Узагальнені значення головних параметрів МВ

Структура МВ (за показником)		Головний параметр МВ при напрузі контактної мережі (кВ)				
		3	6	12	24	25 (50 Гц)
1		2	3	4	5	6
1	1а	30	60	120	240	353
2	3а	10	20	40	80	118
3	ба	5	10	20	40	59

Сформулюємо основні ознаки уніфікації мережевих випрямлячів, які входять до складу тягового перетворювача:

- однакове конструктивне оформлення;
- функціональна завершеність;
- підпорядкування головного параметра закону переважних чисел у вигляді геометричній прогресії;
- підпорядкування основних параметрів загальним вимогам до електрообладнання тягових перетворювачів;
- можливість використання уніфікованих МВ у різних перетворювальних структурах.

3.3. Теоретичні передумови уніфікації перетворювачів.

Математична модель оптимізації параметричного ряду пристроїв

Для дослідження проблеми уніфікації МВ пропонуємо такі передумови:

1. Головним параметром є клас вентилів МВ. У нашому випадку кількість головних параметрів – один.
2. Уніфікацію пристроїв МВ кожного виду (за показником) передбачаємо для одного значення потужності (3000, 6000, 9000 або 12000 кВт).
3. Досліджувані параметричні ряди складаються при певній напрузі у контактній мережі.

Попит на МВ, які складають параметричний ряд, зумовлений тільки одним головним параметром. Такий ряд – одномірний. Оптимізація такого ряду полягає в знаходженні сукупності МВ з такими класами, при яких так звана цільова функція досягає мінімального значення за умови задоволення обмежень. Обмеженням є максимальний клас МВ даного виду (табл. 3.11).

Цільова функція є математичний опис залежності витрат на виробництво та використання даної продукції від значень параметрів, які оптимізуються, та від часових параметрів [135].

Математична модель оптимізації параметричного ряду складається із цільової функції та обмежень. Складемо цільову функцію для нашого випадку - знаходження оптимального параметричного ряду для кожного типу МВ. У цьому випадку цільова

функція являє собою залежність витрат на виробництво та експлуатацію пристроїв, які складають параметричний ряд, від головного параметра (класом за зворотною напругою) і часу. Обмеженням цільової функції є значення напруги у контактній мережі.

3.4. Постановка задачі оптимізації параметричних рядів

Нехай на множині пристроїв МВ з різним класом вентилів задана функція попиту на кожен тип, де - головний параметр. Функція попиту чисельно дорівнює кількості пристроїв певного типу у загальному об'ємі пристроїв перетворювальних структур.

Попит на пристрої повинен бути задоволений з допомогою деякої сукупності параметричних рядів пристроїв. Ці пристрої мають такі значень головного параметра:

$$(3.10)$$

Позначимо параметричний ряд

$$(3.11)$$

де – кількість типів пристроїв у ряді, який досліджується;

– значення головного параметра -го пристрою.

Значення, обираємо з деякої множини можливих значень головного параметра.

Згідно з табл. 3.11 значення, яке дорівнює п'яти та відповідає можливим значенням напруги у контактній мережі (3, 6, 12, 24 або 25 кВ), приймаємо як обмеження цільової функції, яку розглядаємо як математичну модель оптимізації параметричних рядів пристроїв МВ.

Цільова функція визначається в цілому за життєвий цикл пристрою, який називається розрахунковим періодом. Як початковий рік розрахункового періоду приймаємо рік введення параметричного ряду в експлуатацію. Кінцевий рік розрахункового періоду визначається моментом завершенням життєвого циклу пристрою. Вираз для цільової функції запишемо таким чином [136]:

$$(3.12)$$

де – постійні витрати на пристрій одного типу, які не залежать від їх кількості в експлуатації (витрати на розробку, підготовку виробництва). Тобто - вартість виробництва одного екземпляра пристрою даного типу (капітальні витрати);

– вартість виробництва усіх типів пристроїв даного виду;

– витрати на задоволення потреб у пристрої з головним параметром β з допомогою пристрою з головним параметром β_0 , який відноситься до параметричного ряду пристроїв. Тобто, $\beta = \beta_0 \cdot \alpha$ – це поточні (експлуатаційні) витрати. Співмножник

– це мінімальні витрати при задоволенні попиту на пристрій з параметром β з допомогою інших пристроїв із параметричного ряду. Поточні витрати мають місце щорічно протягом усього розрахункового періоду. За вказаних умов для поточних витрат потрібно врахувати фактор часу, що здійснюється шляхом приведення до початку розрахункового періоду щорічних поточних витрат, для чого у формулі (4.4.3) вводиться коефіцієнт приведення, який визначається за формулою: $\alpha = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{\lambda t}$, де λ – норматив приведення різночасових витрат до розрахункового року, t [137];

– функція попиту;

– порядковий номер розрахункового періоду.

– порядковий номер n -го року експлуатації параметричного ряду пристроїв, починаючи від початкового розрахункового періоду. У нашому випадку розрахунковий і початковий роки збігаються. Тому $n = t$. Відомо [138], що приведення витрат до початку розрахункового року здійснюється діленням витрат на коефіцієнт приведення, що у нашому випадку забезпечується від'ємним значенням різниці λt , так як $\lambda t < 0$.

- термін служби пристрою у роках. Приймаємо це значення – 10 років, що приблизно відповідає строку між заводськими ремонтами електровозів.

Задача оптимізації параметричного ряду пристроїв МВ полягає у мінімізації цільової функції за час розрахункового періоду. Цю задачу сформулюємо таким чином: задано деяке число β_0 , потрібно знайти члени ряду β , α із умови:

$$(3.13)$$

3.5. Функція попиту для задачі оптимізації параметричних рядів

Як бачимо з виразу (3.12), результати оптимізації параметричних рядів МВ залежать від точності визначення функцій попиту β і функції витрат α та t .

Для визначення функції попиту β пропонуємо застосувати метод обробки статистики попиту, який дає можливість визначити β найбільш наближеним до її реального виду, так як при цьому є можливість використати інформацію про потребу у пристроях з різною структурою за показником β , у загальному масиві запропонованих

структур тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів. Тобто функція попиту дорівнює такому показнику уніфікації, як «Частість використання функціонального вузла у складі перетворювальної структури» [59].

Частість використання функціонального вузла у складі перетворювальної структури визначаємо як:

$$(3.14)$$

,

де та відповідно загальна кількість функціональних вузлів у всіх розглянутих перетворювальних структурах та кількість функціональних вузлів, рівень уніфікації яких розглядається.

Частість використання функціонального вузла у складі перетворювальної структури, з урахуванням кількості типів функціональних вузлів, визнається як:

$$(3.15)$$

,

де – кількість типів функціональних вузлів.

До складу запропонованих структурних схем перетворювачів для багатосистемних електровозів з АТД та ТДПС (розділ 2, додаток Б) входять такі функціональні вузли:

- 1) тяговий інвертор ПІ;
- 2) тяговий випрямляч ТВ;
- 3) однофазний інвертор підвищеної частоти, позначимо як 1МІ;
- 4) трифазний інвертор підвищеної частоти, до складу якого входять три однакових ланки МІ, кожен з яких підключено до однієї з первинних обмоток трифазного трансформатора підвищеної частоти ТППЧ, позначимо як 3МІ;
- 5) однофазний трансформатор підвищеної частоти ТПЧ;
- 6) трифазний трансформатор підвищеної частоти ТППЧ;
- 7) фільтр-накопичувач ФН;
- 8) модуль мережевого випрямляча ММВ, до складу якого входять однакових паралельних груп з послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів МВ, тому класифікувати модуль є доцільним за кількістю послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів (наприклад, 1а; 2а; 3а і т.д.);
- 9) перемикач режимів ПР.

Показники уніфікації функціональних вузлів у складі запропонованих перетворювальних структур розраховані за формулами (3.14) та (3.15) представлені у табл. 3.12 (перетворювачі з АТД) та у табл. 3.13 (перетворювачі з ТДПС).

Показники уніфікації функціональних вузлів запропонованих перетворювальних структур для тягової електропередачі з АТД

Перетворювальна структура	Кількість функціональних вузлів															
	ПР	Модуль МВ								Ф Н	1 М І	3 М І	Т П Ч	Т Т П Ч	Т В	Т І
		1а	2а	3а	4а	6а	9а	1 2а	1 8а							
4А-М1-1Ф-1м4а	1				1					4	4		4		4	4
4А-М1-1Ф-4м1а	1	4								4	4		4		4	4
4А-М1-1Ф-2м2а	1		2							4	4		4		4	4
4А-М1-3Ф-4м3а	1			4								4		4	4	4
4А-М1-3Ф-12м1а	1	1 2										4		4	4	4
4А-М1-3Ф-1м12а	1							1				4		4	4	4
4А-М2-1Ф-1м2а	1		1							2	2		2		4	4
4А-М2-1Ф-2м1а	1	2								2	2		2		4	4
4А-М2-3Ф-2м3а	1			2						6		2		2	4	4
4А-М2-3Ф-1м6а	1					1				6		2		2	4	4
4А-М2-3Ф-6м1а	1	6								6		2		2	4	4
6А-М1-1Ф-1м6а	1					1				6	6		6		6	6
6А-М1-1Ф-6м1а	1	6								6	6		6		6	6
6А-М1-1Ф-3м2а	1		3							6	6		6		6	6
6А-М1-1Ф-2м3а	1			2						6	6		6		6	6
6А-М1-3Ф-1м18а	1								1	1 8		6		6	6	6
6А-М1-3Ф-18м1а	1	1 8								1 8		6		6	6	6
6А-М1-3Ф-3м6а	1					3				1 8		6		6	6	6
6А-М1-3Ф-6м3а	1			6						1 8		6		6	6	6
6А-М2-1Ф-1м3а	1			1						3	3		3		6	6
6А-М2-1Ф-3м1а	1	3								3	3		3		6	6
6А-М2-3Ф-1м9а	1						1			9		3		3	6	6
6А-М2-3Ф-3м3а	1			3						9		3		3	6	6
6А-М2-3Ф-9м1а	1	9								9		3		3	6	6
6А-М3-1Ф-1м2а	1		1							2	2		2		6	6
6А-М3-1Ф-2м1а	1	2								2	2		2		6	6
6А-М3-3Ф-1м6а	1					1				6		2		2	6	6
6А-М3-3Ф-2м3а	1			2						6		2		2	6	6
6А-М3-3Ф-6м1а	1	6								6		2		2	6	6
Кількість функціональних	2 9	6 8	7	2 0	1	6	1	1	1	2 2 1	5 0	5 7	5 0	5 7	1 5 2	1 5 2

вузлів,																
Загальна кількість функціональних вузлів,	873															
Частість використання функціонального вузла,	0,0322	0,0789	0,0802	0,0211	0,0685	0,0168	0,0111	0,0111	0,0111	0,2535	0,0572	0,0652	0,0572	0,0652	0,0652	0,1741

Показники уніфікації функціональних вузлів запропонованих перетворювальних структур для тягової електропередачі з двигунами постійного струму

Перетворювальна структура	Кількість функціональних вузлів														
	ПР	Модуль МВ								Ф Н	1 М І	3 М І	Т П Ч	Т Т П Ч	Т В
		1а	2а	3а	4а	6а	9а	1 2а	1 8а						
4Т-М1-1Ф-1М4а	1				1					4	4		4		4
4Т-М1-1Ф-4М1а	1	4								4	4		4		4
4Т-М1-1Ф-2М2а	1		2							4	4		4		4
4Т-М1-3Ф-4М3а	1			4						12		4		4	4
4Т-М1-3Ф-12М1а	1	1 2								12		4		4	4
4Т-М1-3Ф-1М12а	1							1		12		4		4	4
4Т-М2-1Ф-1М2а	1		1							2	2		2		4
4Т-М2-1Ф-2М1а	1	2								2	2		2		4
4Т-М2-3Ф-2М3а	1			2						6		2		2	4
4Т-М2-3Ф-1М6а	1					1				6		2		2	4
4Т-М2-3Ф-6М1а	1	6								6		2		2	4
6Т-М1-1Ф-1М6а	1					1				6	6		6		6
6Т-М1-1Ф-6М1а	1	6								6	6		6		6
6Т-М1-1Ф-3М2а	1		3							6	6		6		6
6Т-М1-1Ф-2М3а	1			2						6	6		6		6
6Т-М1-3Ф-1М18а	1								1	18		6		6	6
6Т-М1-3Ф-18М1а	1	1 8								18		6		6	6
6Т-М1-3Ф-3М6а	1					3				18		6		6	6
6Т-М1-3Ф-6М3а	1			6						18		6		6	6
6Т-М2-1Ф-1М3а	1			1						3	3		3		6
6Т-М2-1Ф-3М1а	1	3								3	3		3		6
6Т-М2-3Ф-1М9а	1						1			9		3		3	6
6Т-М2-3Ф-3М3а	1			3						9		3		3	6
6Т-М2-3Ф-9М1а	1	9								9		3		3	6
6Т-М3-1Ф-1М2а	1		1							2	2		2		6
6Т-М3-1Ф-2М1а	1	2								2	2		2		6
6Т-М3-3Ф-1М6а	1					1				6		2		2	6
6Т-М3-3Ф-2М3а	1			2						6		2		2	6
6Т-М3-3Ф-6М1а	1	6								6		2		2	6
Кількість функціональних вузлів,	2 9	6 8	7	2 0	1	6	1	1	1	2 2 1	5 0	5 7	5 0	5 7	1 5 2
Загальна кількість функціональних	721														

вузлів,															
Частість використання функціонального вузла,	0, 04 02 2	0, 0 9 3 1	0, 0 9 7 1	0, 0 7 7 4	0, 0 1 3 9	0, 0 8 3 2	0, 0 1 3 9	0, 0 1 3 9	0, 0 1 3 9	0, 0 1 3 9	0, 30 65 2	0, 06 93 5	0, 07 90 6	0, 06 93 5	0, 07 90 6

Таблиця 3.14

Середні показники уніфікації функціональних вузлів запропонованих перетворювальних структур

Функціональний вузол							
1		2	3	4	5	6	
1	ПР	58	1	1594	0,03639	1	
2	Т и п М В (за по ка зн ик о м а)	1a	136		8	0,08532	0,125
		2a	14			0,00878	
		3a	40			0,02509	
		4a	2			0,00125	
		6a	12			0,00753	
		9a	2			0,00125	
		12a	2			0,00125	
		18a	2			0,00125	
3	ФН	442	1		0,27729	1	
4	1МІ	100	2	0,06274	0,3		
5	3МІ	114		0,07152			
6	ТПЧ	100	2	0,06274	0,3		
7	ТТПЧ	114		0,07152			
8	ТВ	304	1	0,19072	1		
9	ТІ	152	1	0,09536	1		

Середні показники уніфікації функціональних вузлів запропонованих перетворювальних структур, розраховані за даними табл. 3.12 та табл. 3.13, за відповідними функціональними вузлами, представлені у табл. 3.14.

На рівень уніфікації перетворювача не впливають такі функціональні вузли, як: перемикач режимів (ПР), фільтр-накопичувач (ФН), тяговий інвертор (ТІ) та тяговий випрямляч (ТВ), оскільки ці функціональні вузли в представлених дослідженнях прийняті однотипними та вони входять до складу всіх розглянутих варіантів побудови статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза. Частість використання цих функціональних вузлів у складі досліджуваних перетворювальних структур, з урахуванням кількості типів функціональних вузлів, дорівнює (рядки 1,3,8,9 стовпчик 6 табл. 3.14).

Серед розглянутих варіантів побудови статичного перетворювача для тягової електропередачі більшість структур має у своєму складі трифазні мережеві інвертори та трифазні трансформатори підвищеної частоти (рядки 5,7 стовпчик 5

табл. 3.14), що також підтверджує прийняте рішення про виключення з подальших досліджень однофазних мережевих перетворювачів, частіть використання яких менша (рядки 4,6 стовпчик 5 табл. 3.14).

За середніми показниками уніфікації (табл. 3.14) найнижчий рівень () мають мережеві випрямлячі типів 4а, 9а, 12а та 18а. Тобто в подальших дослідженнях розглядати перетворювачі з цими модулями немає сенсу, оскільки ці варіанти є одиничними. Найвищий рівень уніфікації мають мережеві випрямлячі типів 1а () та 3а () тобто ці варіанти поєднання мережевих випрямлячів зустрічаються найчастіше, і тому перетворювальні структури, які мають у своєму складі мережеві випрямлячі цих типів, доцільно досліджувати.

Середні показники уніфікації мережевих випрямлячів типів 1а та 3а представлені у табл. 3.15.

Функція попиту на кожен тип МВ із головним параметром (клас приладу - стовпчики 2...6 у табл. 3.11), з яких складаються параметричні ряди, враховує не тільки попит на тип МВ у об'ємі відібраних перетворювальних структур (табл. 3.15), а також і можливість роботи при різних напругах контактної мережі, при заданій потужності перетворювача.

Таблиця 3.15

Середні показники уніфікації мережевих випрямлячів типів 1а та 3а

Структура модуля МВ	Кількість паралельних груп у складі модуля МВ		
	1а	3а	6а
4м3а		4	
12м1а	12		
6м1а	6		
18м1а	18		
3м6а			3
6м3а		6	
3м3а		3	
9м1а	9		
2м3а		2	
Кількість функціональних вузлів,	45	15	3
Загальна кількість функціональних вузлів,	63		
Частість використання функціонального вузла,	0,7143	0,2381	0,0476

Наприклад, для структури 4м3а сформуємо параметричні ряди (табл. 3.16), які відповідають можливим режимам роботи, за напругою у контактній мережі, перетворювача багатосистемного електровоза.

Приймаючи, що загальний попит на пристрої МВ, які формують представлені у табл. 3.16 параметричні ряди, дорівнює 100%, визначимо, чому дорівнює розрахункова функція попиту для пристрою -го класу у цих рядах.

Пропонується така методика визначення розрахункової функції попиту для пристрою -го класу:

1) Визначаємо, скільки раз використовуються вентилі заданого класу в представлених параметричних рядах. Наприклад, прилади 10 класу, можуть бути використані у параметричних рядах ... (рядки 1...8 у табл. 3.16), тобто кількість пристроїв -го класу дорівнює 8 (рядок 1 стовпчик 2 табл. 3.17). Аналогічно розраховується кількість пристроїв інших класів (рядки 2...5 стовпчик 2 табл. 3.17);

Таблиця 3.16

Параметричні ряди для пристроїв зі структурою 4м3а при різних напругах контактної мережі

Параметричний ряд	Напруга у контактній мережі, кВ
1	3
2	3; 6
3	3; 12

4		3; 24
5		3; 25 (50 Гц)
6		3; 6; 25 (50 Гц)
7		3; 12; 25 (50 Гц)
8		3; 24; 25 (50 Гц)

2) Визначається загальна кількість пристроїв з різним значенням головного параметра (стовпчик 3 табл. 3.17);

3) Розрахункова функції попиту для пристрою -го класу визначається як відношення кількості приладів заданого класу до загальної кількості приладів різних класів. Тобто значення зі стовпчика 2 (табл. 3.17) до значення зі стовпчика 3 для пристрою відповідного класу (відповідного рядка табл. 3.17). Результати представлені у стовпчику 4 табл. 3.17.

Представлені значення функцій попиту на пристрої -го класу серед параметричних рядів для перетворювальної структури 4м3а (табл. 3.17), не враховують загальний попит на пристрої такої структури серед інших структур (табл. 3.15). Враховуючи це, представимо відкориговані значення функцій попиту пристрої -го класу для перетворювальної структури 4м3а (табл. 3.18).

Таблиця 3.17

Розрахункова функція попиту для пристрою -го класу серед параметричних рядів для перетворювальної структури 4м3а

Головний параметр	Кількість пристроїв -го класу	Загальна кількість пристроїв з різним значенням головного параметра	Розрахункова функція попиту
1	2	3	4
1	10	18	
2	20		
3	40		
4	80		
5	118		

Так, структура типу 4м3а з головним параметром (мережеві випрямлячі, побудовані на вентилях 10-класу) має розрахункову функцію попиту (табл. 3.17), при цьому частість використання функціонального вузла типу 3а (табл. 3.15) дорівнює 0,2381. Тоді відкориговане значення функцій попиту пристроїв 10-класу для перетворювальних структур типів 4м3а, 6м3а, 3м3а, 2м3а дорівнює (табл. 3.18).

Аналогічно (за даними табл. 3.15 та 3.17) отримаємо відкориговані значення функцій попиту пристроїв інших класів для перетворювальних структур типів 4м3а, 6м3а, 3м3а, 2м3а (табл. 3.18).

Таблиця 3.18

Відкориговані значення функцій попиту пристроїв -го класу для перетворювальних структур типів 4м3а, 6м3а, 3м3а, 2м3а

Головний параметр	Функція попиту

Враховуючи табл. 3.17, 3.18, параметричні ряди для пристроїв зі структурою 4м3а, 6м3а, 3м3а, 2м3а при різній напрузі у контактній мережі приймають вигляд:

Аналогічно до вищевикладеного методу формування параметричних рядів для пристрою зі структурою 4м3а, представимо функції попиту та параметричних рядів інших відібраних пристроїв (табл. 3.15). Складемо параметричні ряди для груп пристроїв з типами МВ 1а (12м1а, 6м1а, 18м1а, 9м1а) та 6а (3м6а).

Результати представимо у табл. 3.19...3.24.

Таблиця 3.19

Параметричні ряди для пристроїв зі структурою 12м1а, 6м1а, 18м1а, 9м1а при різній напрузі у контактній мережі

Параметричний ряд	Напруга у контактній мережі, кВ
	3
	3; 6
	3; 12
	3; 24
	3; 25 (50 Гц)
	3; 6; 25 (50 Гц)
	3; 12; 25 (50 Гц)
	3; 24; 25 (50 Гц)

Враховуючи табл. 3.20, 3.21, параметричні ряди для пристроїв зі структурою 12м1а, 6м1а, 18м1а, 9м1а при різній напрузі у контактній мережі приймають вигляд:

Таблиця 3.20

Розрахункова функція попиту для пристрою -го класу серед параметричних рядів для перетворювальної структури 12м1а, 6м1а, 18м1а, 9м1а

Головний параметр	Кількість пристроїв -го класу	Загальна кількість пристроїв з різним значенням головного параметру	Розрахункова функція попиту
30	8		
60	2		
120	2		

240	2	18	
353	4		

Враховуючи табл. 3.23, 3.24, параметричні ряди для пристроїв зі структурою 3мба при різній напрузі у контактній мережі приймають вигляд:

Таблиця 3.21

Відкориговані значення функцій попиту пристроїв -го класу для перетворювальної структури 12м1а, 6м1а, 18м1а, 9м1а.

Проведемо перевірку отриманих значень функцій попиту (табл. 3.18, 3.21, 3.24) додаванням одне до одного значень функцій попиту різних перетворювальних структур (за показником γ):

$$(3.16)$$

Таким чином, загальна функція попиту на пристрої різних класів у запропонованих перетворювальних структурах дорівнює 100%, тобто функції попиту визначені правильно. У відсотковому співвідношенні (3.16) представимо графічно (рис. 3.4), що і буде відображенням функції попиту на кожен із типів пристроїв МВ.

Таблиця 3.22

Параметричні ряди для пристроїв зі структурою Змба при різній напрузі у контактній мережі

Параметричний ряд	Напруга у контактній мережі, кВ
	3
	3; 6
	3; 12
	3; 24
	3; 25 (50 Гц)
	3; 6; 25 (50 Гц)
	3; 12; 25 (50 Гц)
	3; 24; 25 (50 Гц)

3.6. Визначення співвідношення між вартістю та параметрами силових напівпровідникових приладів. Функції витрат для задачі оптимізації параметричних рядів

Для визначення функцій витрат та умовно приймаємо, що вартість пристрою МВ пропорційна вартості усіх напівпровідникових вентилів мережевого випрямляча. Абсолютна вартість пристрою не має значення, так як для визначення оптимального параметричного ряду пристроїв потрібно знайти мінімальне відносне значення цільової функції за виразом (3.13) [57].

До складу виразу цільової функції входять капітальні витрати на закупівлю напівпровідникових приладів та інших компонентів перетворювача. Аналіз технічної літератури та інших джерел показав, що вартість напівпровідникових перетворювачів залежить насамперед від виду та типу силових напівпровідникових приладів, які є основою будь-якого перетворювача. Тому в даних дослідженнях приймаємо, що функція капітальних витрат на виробництво складових частин перетворювача визначається саме вартістю силових напівпровідникових приладів (СНП).

Таблиця 3.23

Розрахункова функція попиту для пристрою -го класу серед параметричних рядів для перетворювальної структури Змба

Головний параметр	Кількість пристроїв -го класу	Загальна кількість пристроїв з різним значенням головного параметру	Розрахункова функція попиту
5	8		

		18	
10	2		
20	2		
40	2		
59	4		

На вартість СНП впливають об'єктивні (вид, тип приладу та його технічні параметри та характеристики) та суб'єктивні фактори (розвинення ринку, наявність конкуренції та інш.), які в дослідженнях намагалися виключити за рахунок дослідження ринку Росії, як більш розвиненого, але такого, що пропонує такі ж самі прилади, що і в Україні.

Таблиця 3.24

Відкориговані значення функцій попиту пристрої -го класу для
перетворювальної структури Змба.

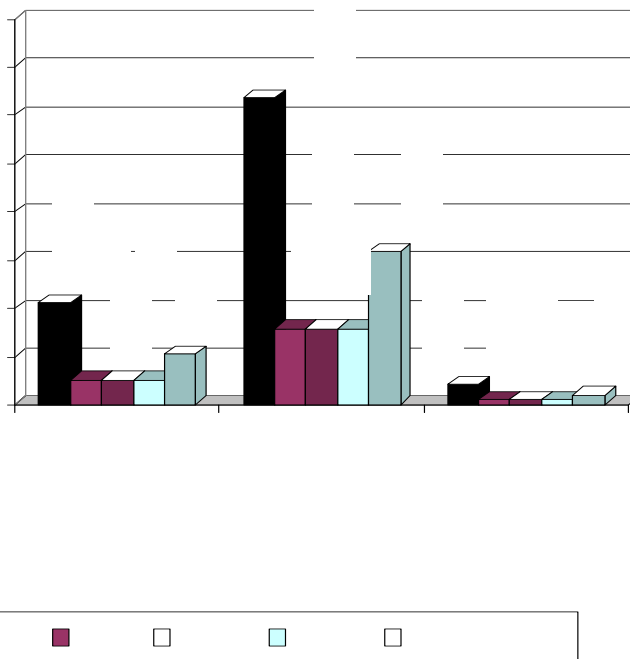


Рис. 3.4. Функції попиту на кожен з типів пристроїв МВ.

У додатку Е представлено витяг з прайс-листів по силових напівпровідникових приладах російського виробництва [139, 140, 141].

Представлені у додатку Е дані (станом на 2007 рік), дозволяють визначити залежність вартості СНП від класу приладу та його номінального струму, тобто від параметрів напівпровідникових приладів. Як відомо, саме параметри СНП визначають можливість технічної реалізації будь-якої структури напівпровідникового перетворювача.

Метою представлених досліджень є визначення залежності між вартості СНП від його основних параметрів. Для спрощення пропонується використовувати залежність

відносної вартості приладу від відношення , тобто досліджувана функція має вигляд .

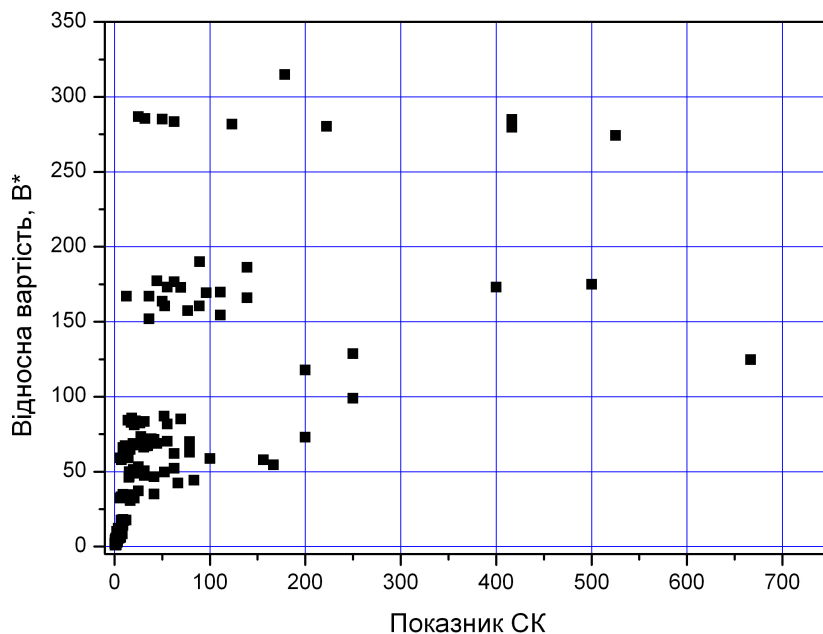


Рис. 3.5. Експериментальна залежність для випрямних діодів всіх класів

Вартість силового напівпровідникового приладу визначено у відносних одиницях, тобто вартість кожної позиції у загальному переліку СНП, який складено за прайс-листами (додаток Е), розраховується як:

$$(3.17)$$

де вартість одного СНП, – найменша вартість серед усього переліку СНП даного виду.

За «видом» силові напівпровідникові прилади, які розглядаються у дисертації, розподілено на: діоди випрямні (найменша вартість 39,26 руб.), діоди лавинні (найменша вартість 81,6 руб.), тиристори низькочастотні (найменша вартість 42,83 руб) (додаток Е).

На рис. 3.5 представлена експериментальна залежність для випрямних діодів. Показник розраховано для кожного з приладів табл. Е.1, відносно мінімальної вартості випрямного діода Д 106Х - 39,26 руб. (рядок 24 у табл. Е.1). Показник розраховано як відношення струму та класу приладу, за даними додатка Е. Наприклад, відповідно до табл. Е.1, силовий випрямний діод 6 класу (рядок 2 стовпчик 2) типу Д 253-4000 (рядок 2 табл. Е.1) має номінальний струм 4000 А (

рядок 2 стовпчик 3), тобто . Вартість цього приладу (строчка 2 стовпчик 5) становить 4899,43 руб, тоді відносна вартість дорівнює

На рис. 3.5 виділяються характерні зони експериментальних точок. Наприклад, сімейство точок у діапазоні $[0;10)$, побудовано за паспортними даними випрямних діодів 10 класу. Аналогічно за класом приладів виділяються інші зони на рис. 3.5.

Саме тому пропонується провести апроксимацію залежності y для приладів, які згруповано по класах, а саме в діапазонах: $[0;10)$, $[10;20)$; $[20;30)$; $[30;40)$; $[40;50)$. Аналітичний вираз цієї залежності дозволить визначити відносну вартість для будь-якого випрямного діода зі значенням СК, відмінним від експериментального.

Після проведення групування СНП за класом представимо на рис. 3.6 експериментальну залежність y для випрямних діодів до 10 класу.

Апроксимація залежності y проводилась за таким виразом (у загальному вигляді): $y = a \cdot x^b$ (експоненціальна залежність першого порядку).

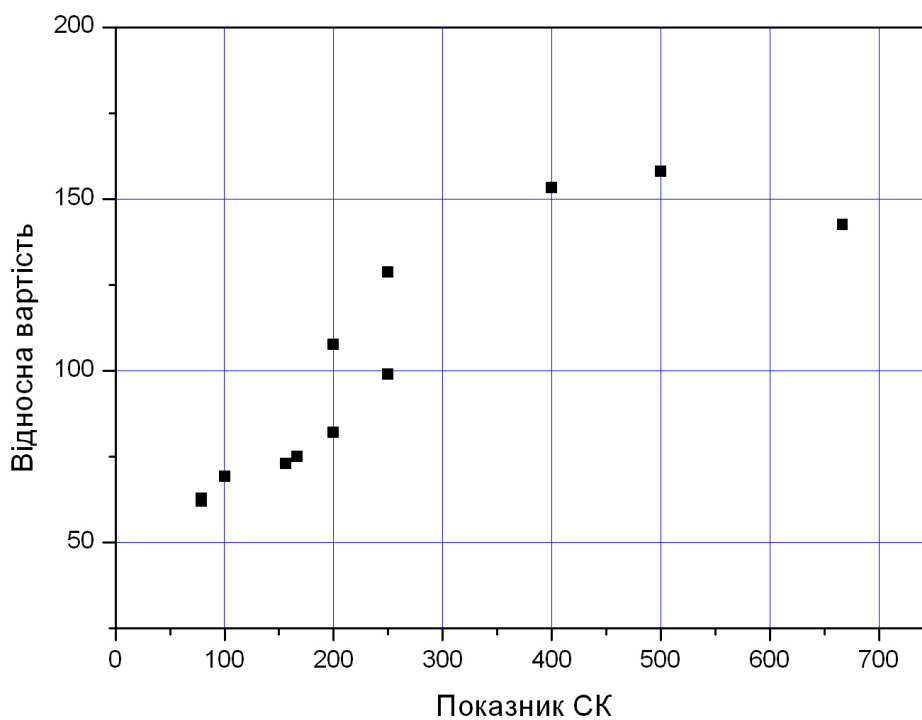


Рис. 3.6. Експериментальна залежність y для випрямних діодів до 10 класу.

Для розглянутої залежності $y = a \cdot x^b$ СНП коефіцієнти апроксимації мають такі значення: $a = 0.0001$, $b = 1.05$. Тоді вираз для апроксимованої залежності y , представленої на рис.3.6, має вигляд:

Для порівняння на рис. 3.7 представлені експериментальна та апроксимована залежність для випрямних діодів діапазону класів

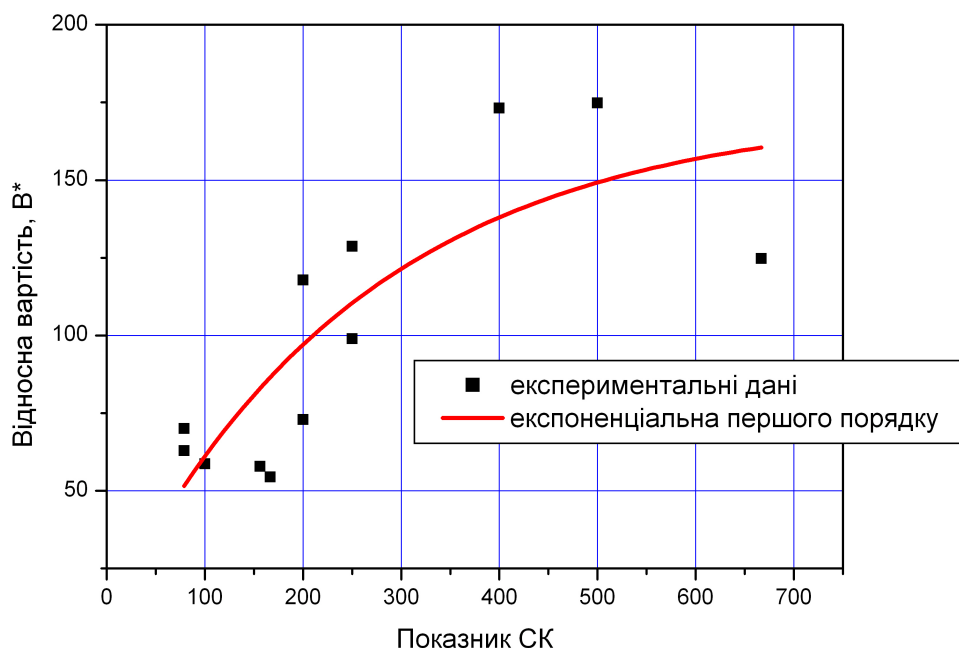


Рис. 3.7. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів

Для перевірки узгодженості теоретичних значень функції з експериментальним використаємо (хі- квадрат) Пірсона [142,143].

Критерій узгодженості у нашому випадку запишеться:

$$(3.18)$$

- де
- критерій узгодженості, що спостерігається;
 - емпірична відносна вартість СНП, яка визначається за експериментальними даними;
 - теоретичне значення відносної вартості СНП, яка визначається за допомогою апроксимованої функції.
 - кількість інтервалів групування відносної вартості СНП.

Теоретична узгоджується з експериментальним значенням якщо:

(3.19)

де: – критерій Пірсона, який визначається за спеціальними таблицями, для цього потрібно визначити кількість ступенів свободи розподілення ; кількість незалежних умов розподілення.

В нашому випадку при визначенні ступеня узгодженості теоретичних та експериментальних значень задано дві умови: середні значення розподілення значень повинні співпадати; дисперсії розподілення значень також повинні співпадати, тобто .

Рівень значимості приймаємо [143].

Представимо результати перевірки узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей для випрямних діодів (діапазон класів [0;10)) за форм. (3.18) у табличному вигляді (табл. 3.25).

Кількість інтервалів групування визначається за показником СК (стовпчик 2 табл. 3.25) та дорівнює , тоді кількість ступенів свободи .

За спеціальними таблицями [143]:

За табл. 3.25 (стовпчик 8) визначаємо розрахункове значення та перевіряємо його за табличним .

вказує на те, що емпірична та теоретична залежності

для випрямних діодів (діапазон класів [0;10)) є узгодженими, тобто відрізняються несуттєво.

Для випрямних діодів інших класів (табл. Е.1 стовпчик 4) проводимо сортування по діапазонах: [10;20); [20;30); [30;40); [40;50]. Після цього будемо експериментальні залежності за даними табл. Е.1 (стовпчики 3,4,5). Потім виконується процедура апроксимування експериментальних значень кожного з діапазонів класів, як і для діапазону класів випрямних діодів .

На рис. 3.8...3.11 представлені експериментальні дані та результати апроксимації залежностей для випрямних діодів інших діапазонів класів, що розглядаються. В табл. 3.25...3.29 представлені результати перевірки узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей для випрямних діодів діапазонів класів, що розглядаються (за середніми показниками в інтервалі СК).

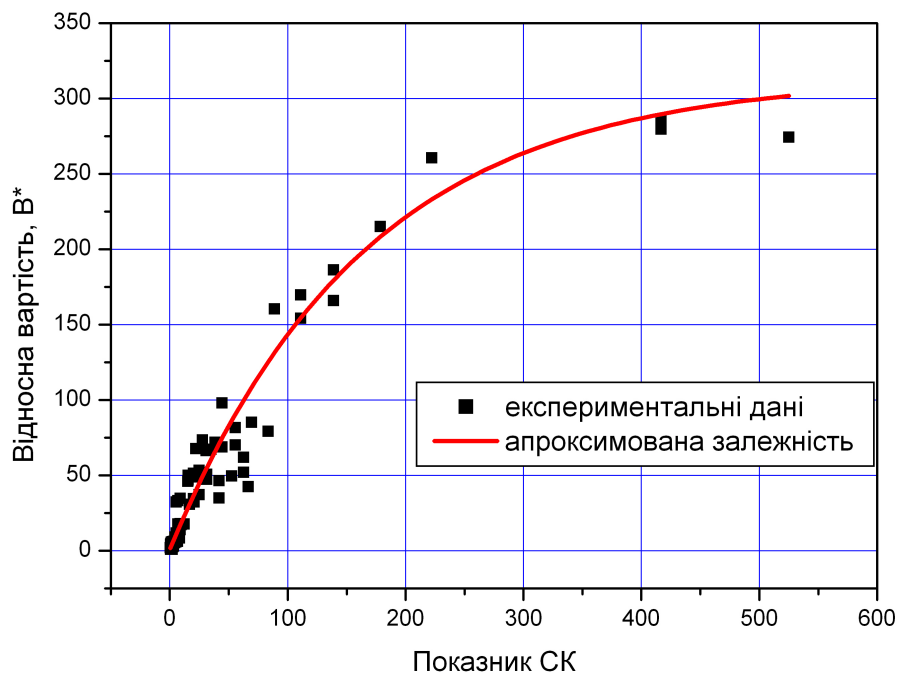


Рис. 3.8. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів)

Узгодженість експериментальних та теоретичних залежностей для випрямних діодів всіх діапазонів класів, що розглядаються представлені у табл. 3.30. Таблиця 3.30

Результати перевірки узгодженості експериментальних та теоретичних залежностей

для випрямних діодів

Діапазон класів	Кількість інтервалів групування	Кількість ступенів свободи	Табличне значення	Розрахункове значення
1	2	3	4	5
[0;10)	7		11,1	6,85
	11			
	13		19,7	16,59
[30;40)	6		9,5	0,62
[40;50]	7		11,1	10,33

Порівняння значень стовпчиків 4 та 5 табл. 3.30, для кожного з діапазонів класів випрямних діодів, підтверджує, що виконується умова (3.19), тобто теоретичні та експериментальні залежності є узгодженими.

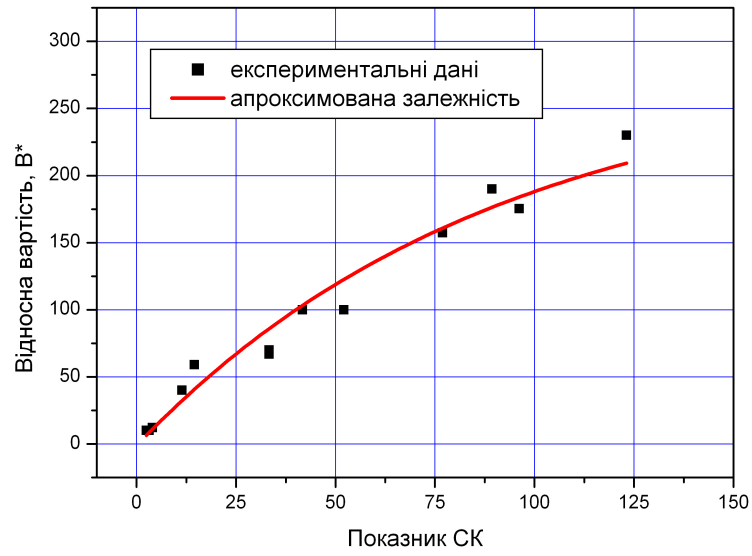


Рис. 3.9. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів .

Таблиця 3.25

Перевірка узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей
10))

для випрямних діодів (діапазон класів [0;

Емпіричне значення	Інтервал групування СК	Середній показник СК інтервалу групування	Емпіричне значення	Середнє емпіричне значення	Теоретичне значення				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
78,75	[0..100)	78,75	62,87	62,435	51,53	10,90	118,91	2,31	6,85
78,75			62						
100	[100200)	140,97	69,3	72,4	77,55	-5,15	26,55	0,34	
156,25			72,9						
166,67			75						
200	[200300)	225,00	82,1	104,34	104,07	0,27	0,07	0,001	
200			107,6						
250			98,95						
250			128,71						
-	[300400)	-	-	-	-	-	-	-	
400	[400500)	400,00	153,2	153,2	137,99	15,21	231,45	1,68	
500	[500600)	500,00	158,1	158,1	149,21	8,89	78,98	0,53	
666,67	[600...700]	666,67	142,6	142,6	160,49	-17,89	320,20	2,00	
-	S = 7	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблиця 3.26

Перевірка узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей
(діапазон класів [10;20))

для випрямних діодів

Інтервал групування СК	Середній показник СК інтервалу групування	Середнє емпіричне значення	Теоретичне значення				
1	2	3	4	5	6	7	8
[050)	11,72	22,72	22,21	0,50	0,25	0,01	14,07
[50100)	66,33	75,91	104,69	-28,78	828,53	7,91	
[100150)	125,00	169,09	167,60	1,50	2,24	0,01	
[150200)	178,57	215,10	208,42	6,68	44,56	0,21	
[200250)	222,22	260,60	233,16	27,44	752,87	3,23	
[250300)	-	-	-	-	-	-	
[300350)	-	-	-	-	-	-	
[350400)	-	-	-	-	-	-	
[400450)	416,67	282,28	289,68	-7,41	54,88	0,19	
[450500)	-	-	-	-	-	-	
[500550]	525,00	274,31	301,77	-27,46	754,05	2,50	
-	S = 11	-	-	-	-	-	-
Таблиця 3.27 Перевірка узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей для випрямних діодів (діапазон класів [20;30))	Середній показник СК інтервалу групування	Середнє емпіричне значення	Теоретичне значення				

Інтервал групування СК							
1	2	3	4	5	6	7	8
[0..10)	3,22	10,90	8,61	2,29	5,24	0,61	16,59
[10..20)	12,99	49,55	36,58	12,96	168,00	4,59	
[20..30)	-	-	-	-	-	-	
[30..40)	33,33	68,59	85,95	-17,37	301,71	3,51	
[40..50)	41,67	100,00	103,20	-3,20	10,25	0,10	
[50..60)	52,08	100,00	122,61	-22,61	511,39	4,17	
[60..70)	-	-	-	-	-	-	
[70..80)	76,92	157,45	160,84	-3,39	11,47	0,07	
[80..90)	89,29	189,95	176,30	13,65	186,41	1,06	
[90..100)	96,15	175,36	184,00	-8,64	74,68	0,41	
[100..110)	-	-	-	-	-	-	
[110..120)	-	-	-	-	-	-	
[120..130)	123,08	230,00	209,19	20,81	433,24	2,07	
-	S = 13	-	-	-	-	-	

Таблиця 3.28

Перевірка узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей
(діапазон класів [30;40))

для випрямних діодів

Інтервал групування СК	Середній показник СК інтервалу групування	Середнє емпіричне значення	Теоретичне значення				
1	2	3	4	5	6	7	8
[10..20)	14,76	79,14	79,75	-0,61	0,37	0,005	
[20..30)	23,30	120,98	123,52	-2,55	6,48	0,05	
[30..40)	31,25	148,00	156,37	-8,37	70,12	0,45	

[40..50)	-	-	-	-	-	-	0,62
[50..60)	52,73	218,56	217,45	1,11	1,23	0,01	
[60..70]	65,97	246,30	241,17	5,13	26,28	0,11	
-	S = 6	-	-	-	-	-	-

Перевірка узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей
(діапазон класів [40;50])

для випрямних діодів

Інтервал групування СК	Середній показник СК інтервалу групування	Середнє емпіричне значення	Теоретичне значення				
1	2	3	4	5	6	7	8
[0..10)	7,39	62,59	59,42	3,17	10,02	0,169	10,33
[10..20)	14,12	101,08	120,83	-19,75	390,17	3,229	
[20..30)	25,00	166,00	187,06	-21,06	443,71	2,372	
[30..40)	34,91	213,21	224,07	-10,86	117,98	0,527	
[40..50)	-	-	-	-	-	-	
[50..60)	50,00	285,05	255,86	29,19	851,87	3,329	
[60..70]	62,50	283,36	269,59	13,77	189,69	0,704	
-	S = 7	-	-	-	-	-	-

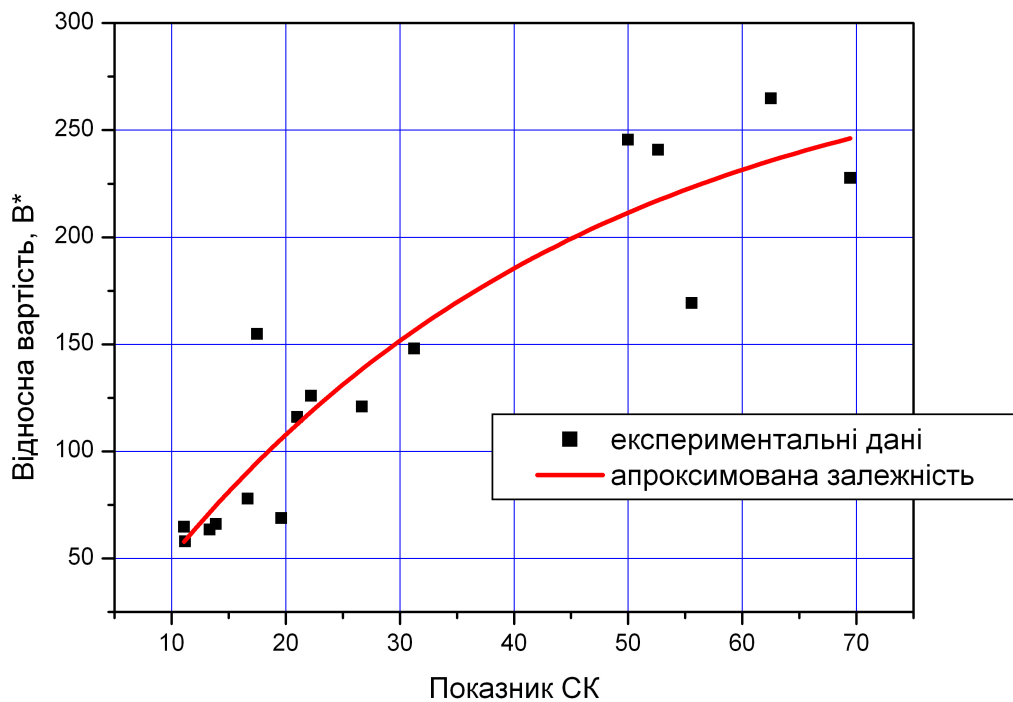


Рис. 3.10. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів .

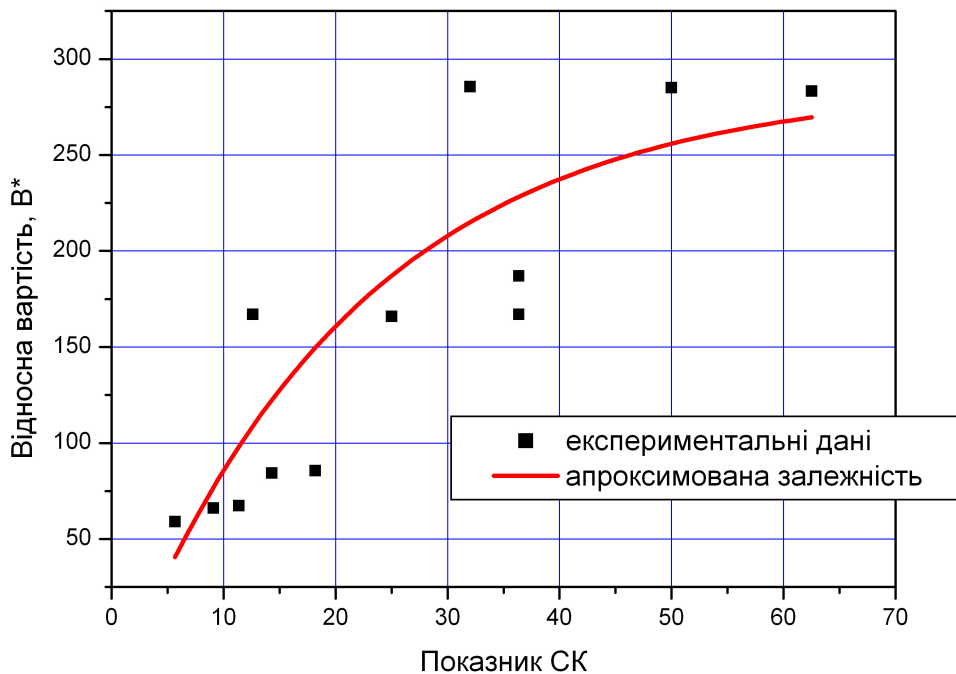


Рис. 3.11. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів .

Отримана аналітична залежність для випрямних діодів всіх діапазонів класів, що розглядаються, запишеться як:

(3.20)

На рис. 3.12 представлені апроксимовані залежності класів випрямних діодів

для всіх діапазонів

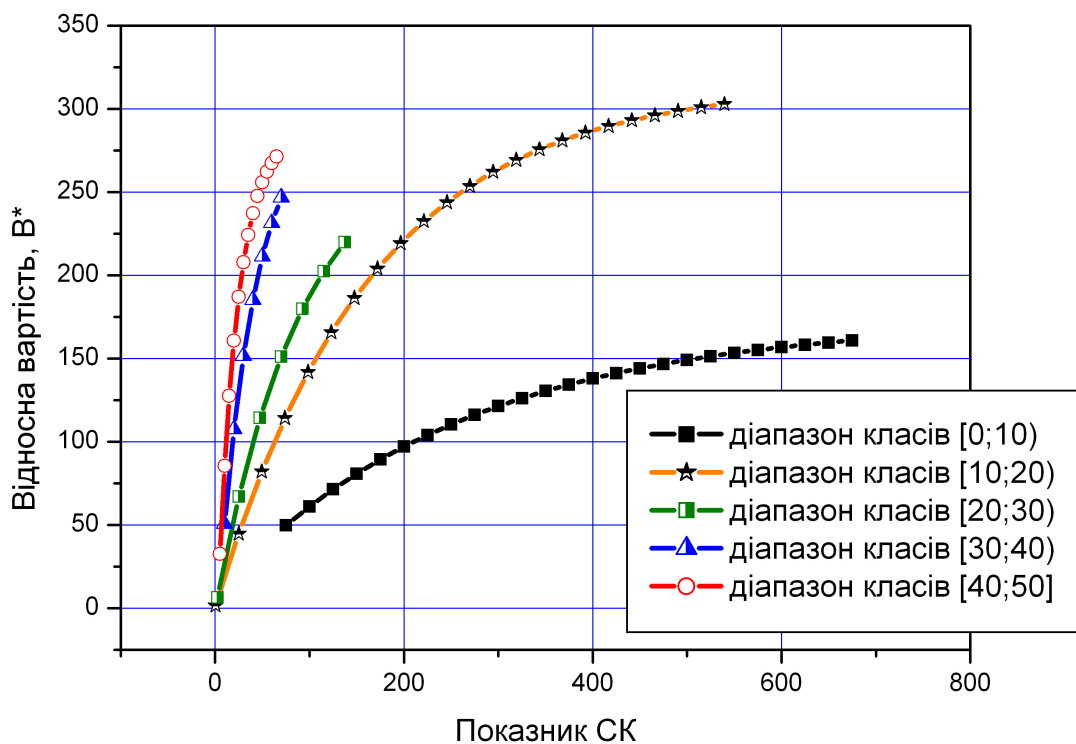


Рис. 3.12. Апроксимовані залежності для всіх діапазонів класів випрямних діодів

Аналогічно, на підставі експериментальних значень, можливо визначити аналітичні вирази для відносну вартість будь-якого силового напівпровідникового приладу.

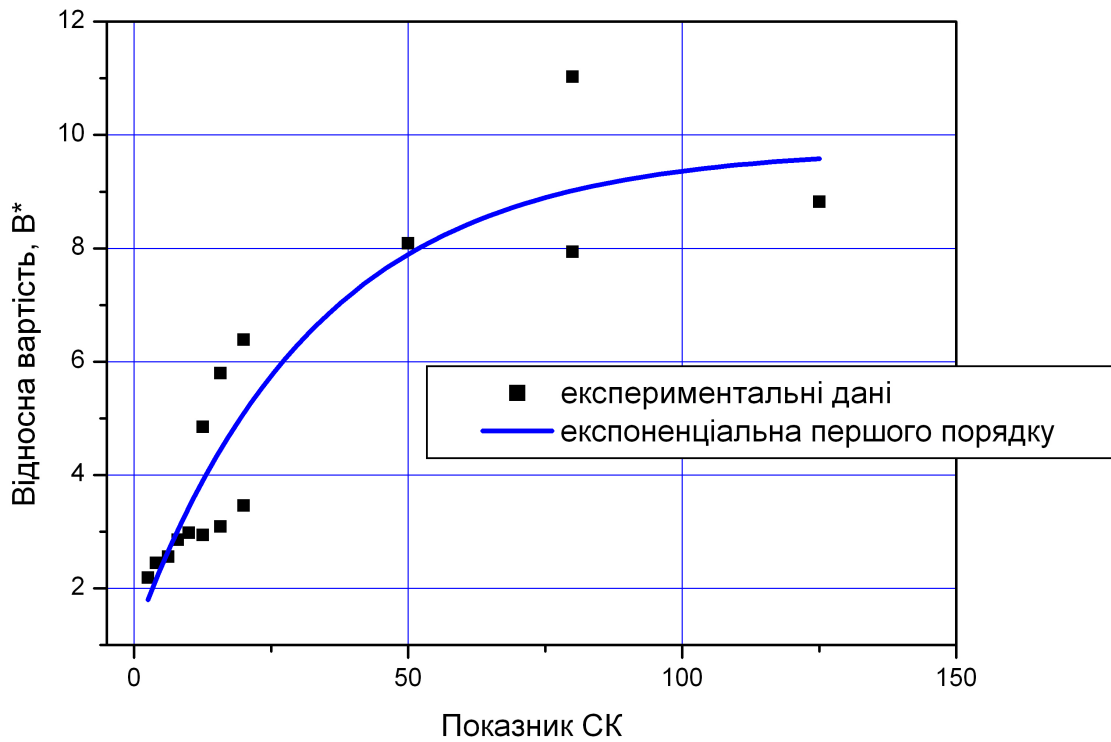


Рис. 3.13. Апроксимована залежність для лавинних діодів,
діапазон класів

Представимо результати дослідження залежності для лавинних діодів (
рис. 3.13...3.17) та тиристорів низькочастотних (рис. 3.18...3.22) по аналогії з
дослідженнями відносної вартості силових випрямних діодів. Експериментальними (
вихідними) є дані наведені у відповідних таблицях додатку Е, для цих видів силових
напівпровідникових приладів.

Результати перевірки узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей

для лавинних діодів та тиристорів низькочастотних представлені у таблиці 3

.31.

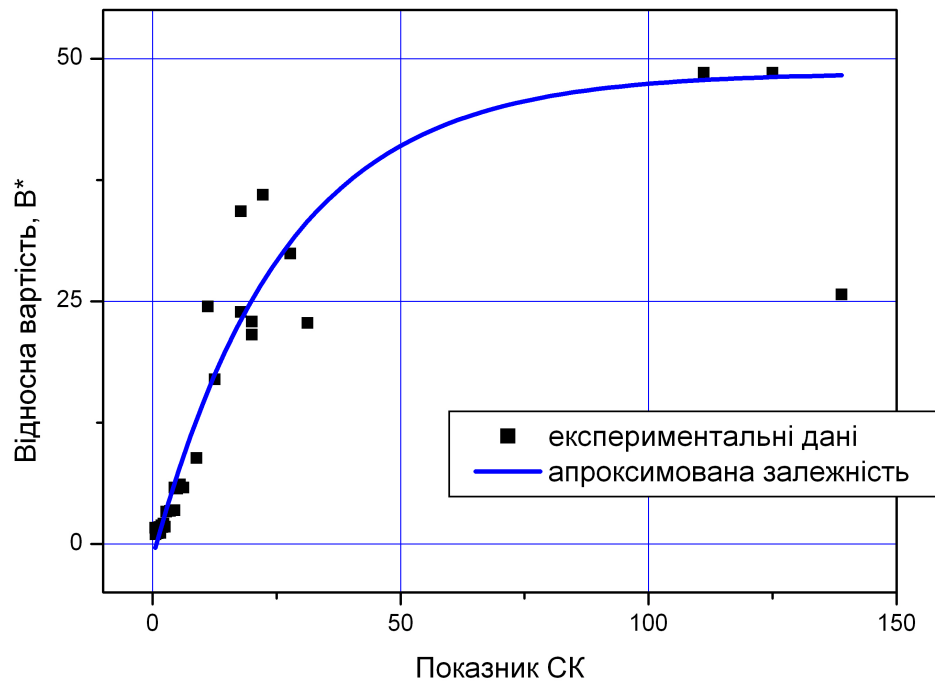


Рис. 3.14. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів

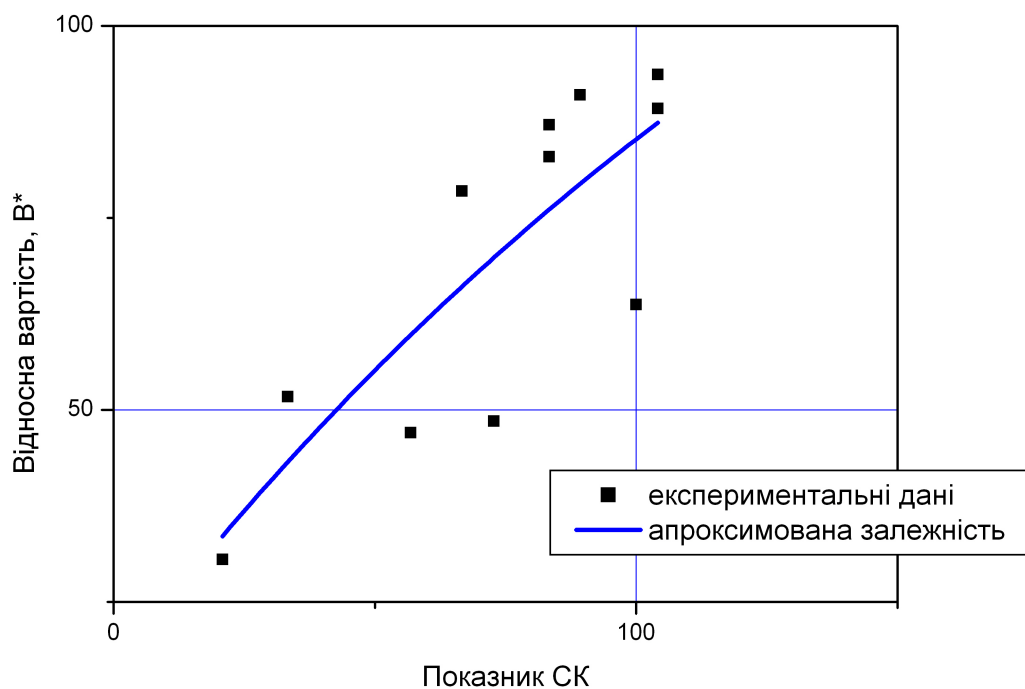


Рис. 3.15. Апроксимована залежність для випрямних діодів, діапазон класів

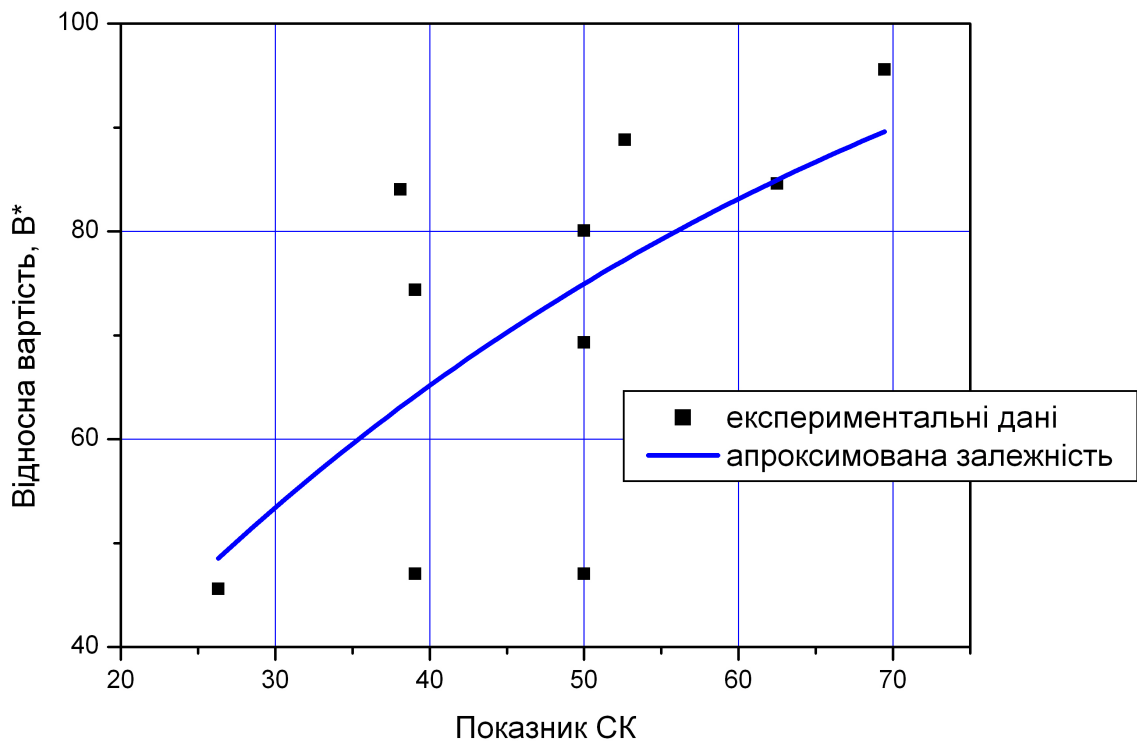


Рис. 3.16. Апроксимована залежність
діапазон класів

для випрямних діодів,

Отримана аналітична залежність
класів, що розглядаються, запишеться як:

для лавинних діодів всіх діапазонів

(3.21)

На рис. 3.17 представлені апроксимовані залежності
класів лавинних діодів

для всіх діапазонів

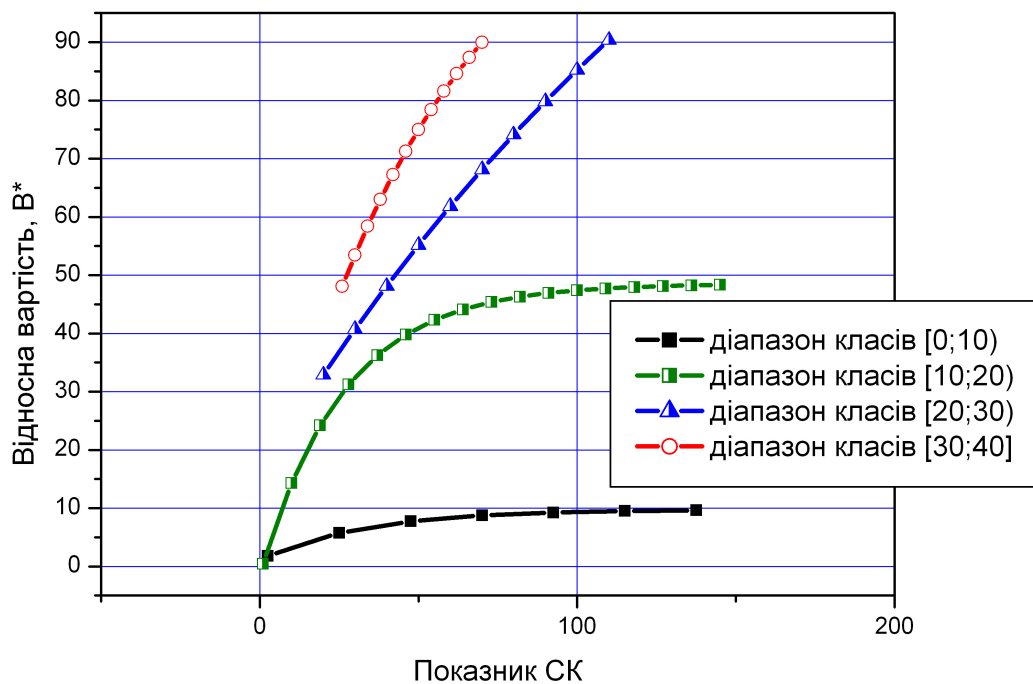


Рис. 3.17. Апроксимовані залежності для всіх діапазонів класів лавинних діодів

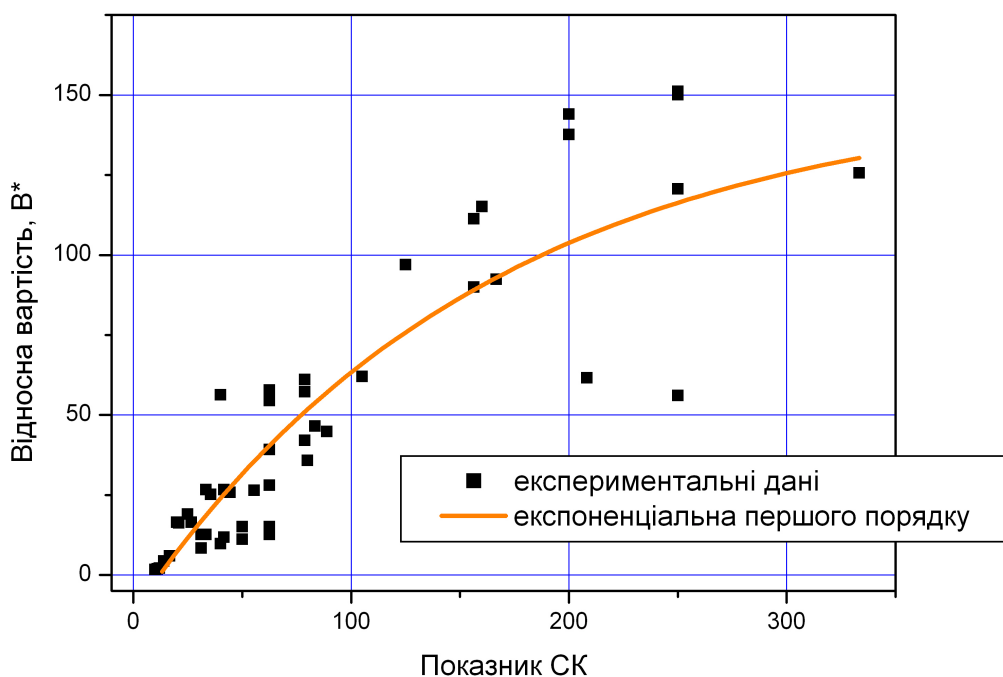


Рис. 3.18. Апроксимована залежність для низькочастотних тиристорів, діапазон класів

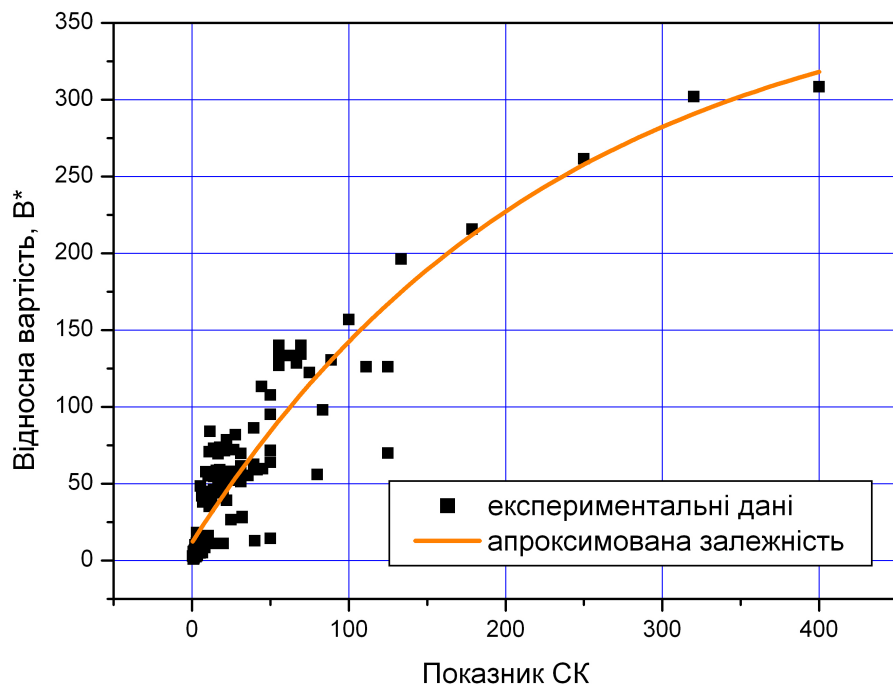


Рис. 3.19. Апроксимована залежність для низькочастотних тиристорів, діапазон класів

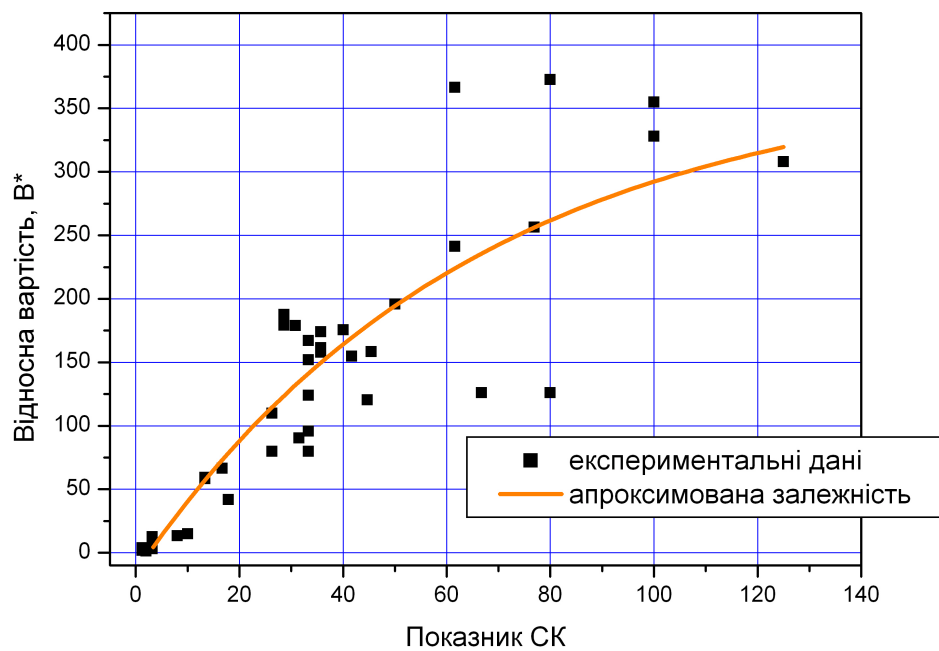


Рис. 3.20. Апроксимована залежність для низькочастотних тиристорів, діапазон класів

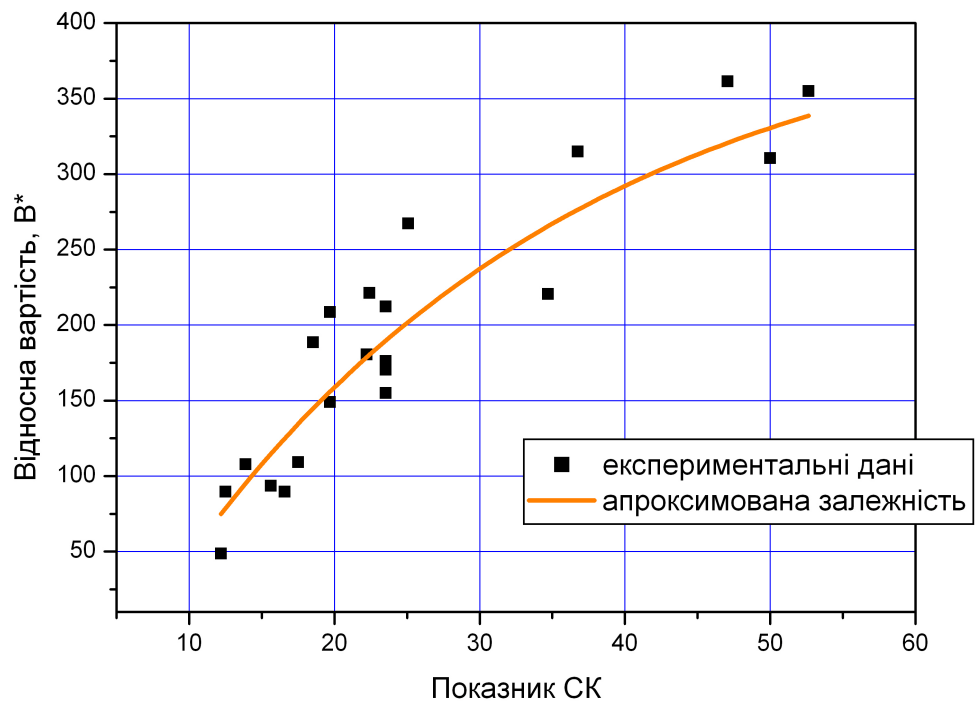


Рис. 3.21. Апроксимована залежність для низькочастотних тиристорів, діапазон класів

Отримана аналітична залежність для низькочастотних тиристорів всіх діапазонів класів, що розглядаються, запишеться як:

(3.22)

На рис. 3.22 представлені апроксимовані залежності для всіх діапазонів класів низькочастотних тиристорів

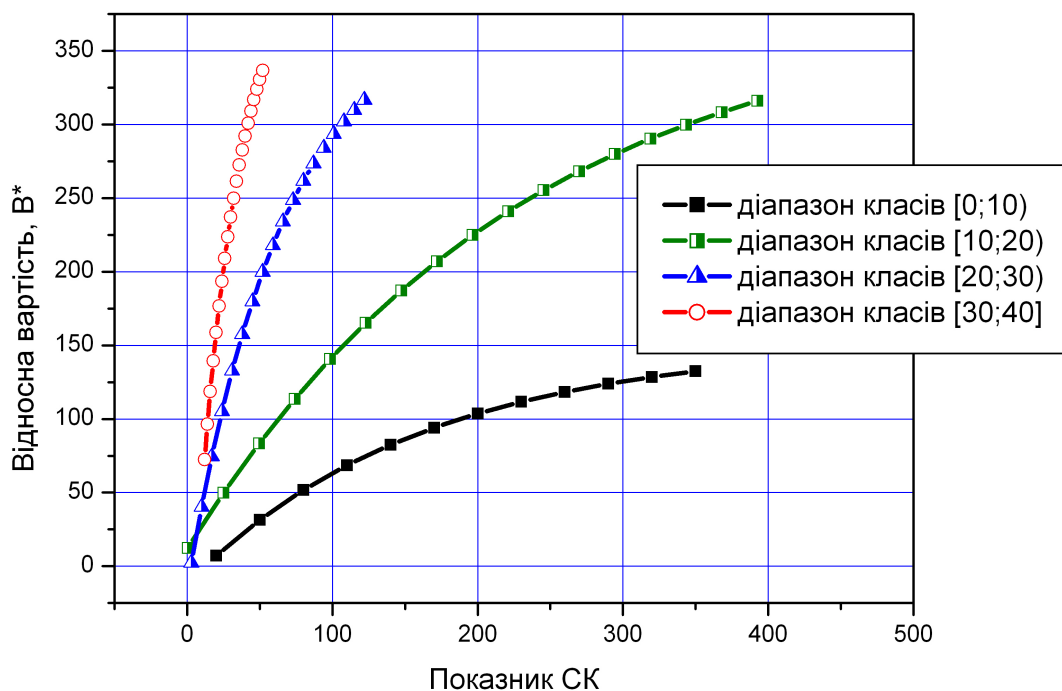


Рис. 3.22. Апроксимовані залежності для всіх діапазонів класів низькочастотних тиристорів

Таблиця 3.31

Результати перевірки узгодженості емпіричних та теоретичних залежностей для лавинних діодів та тиристорів низькочастотних

СНП	Діапазон класів				
Лавинні діоди	[0...10)		0,101	19,7	Так
	[10...20)		15,25	21,0	Так
	[20...30)		13,25	14,1	Так
	[30...40]		1,006	7,8	Так
Тиристори низькочастотні	[0...10)		24,289	25,0	Так
	[10...20)		23,26	28,9	Так
	[20...30)		18,142	19,7	Так
	[30...40]		1,595	7,8	Так

Допустима похибка при апроксимації залежності представлених об'ємів репрезентативних вибірок (додаток Е) по кожному з видів СНП (випрямні діоди, лавинні діоди та низькочастотні тиристори), при умові обмеженої генеральної сукупності (загальна кількість СНП) та забезпечені рівня довірчої вірогідності 0,95, може бути визначена з такого виразу [144]:

$$(3.23)$$

Звідки:

(3.24)

Результати розрахунку допустимої похибки при апроксимації залежності представлених об'ємів репрезентативних вибірок представлені у табл. 3.32.

Таблиця 3.32

Результати розрахунку допустимої похибки об'ємів репрезентативних вибірок по кожному з видів СНП

Вид СНП	Репрезентативна вибірка,	Допустима похибка,
Випрямні діоди	143	7,00%
Лавинні діоди	65	11,53%
Тиристори низькочастотні	270	4,01%
Генеральна сукупність	478	-

Оскільки допустима похибка репрезентативної вибірки «лавинні діоди» перевищує 10% (що є нормальним показником в галузі технічних наук), тому використовувати отримані співвідношення в даному розділі при апроксимації експериментальних значень за цим видом напівпровідникових приладів (табл. 3.32), є недоцільним.

Таким чином, при визначенні цільової функції для параметричного ряду, в разі використання некерованих мережевих випрямлячів, капітальні витрати визначаємо враховуючи форм. (3.20), у випадку використання керованих мережевих випрямлячів – співвідношення (3.22).

Функція витрат, яка входить до складу цільової функції, залежить від класу приладу та запропонованого у роботі показника СК, тобто визначається не тільки головним параметром (класом), але й струмом силового напівпровідникового приладу (

показник), який було визначено як основний параметр.

Струм пристрою МВ, як вказувалось раніш, визначається потужністю перетворювача. Оскільки в дослідженнях прийнято чотири діапазони потужностей перетворювачів (3000, 6000, 900 та 12000 кВт), то і мінімум цільової функції слід визначати для кожного з параметричних рядів у різних діапазонах потужностей. Для цього визначимо показник СК для кожного з членів параметричних рядів, за даними, які представлені у табл. 3.4, 3.5 та у таблицях додатка Д, для перетворювальних структур, наведених у табл. 3.8 та 3.9.

Наприклад, тягова електропередача потужністю 3000 кВт базується на перетворювальній структурі типу 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а та призначена для роботи під контактною мережею 3 кВ постійного струму. Розрахункове значення показника СК для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а, з МВ на базі випрямних діодів, при потужності перетворювача 3000 кВт та напрузі у контактній мережі 3 кВ постійного струму, складає 2,78 (рядок 1 стовпчик 7 табл. 3.4), а нижня границя СК для випрямних

діодів у діапазоні класів з (3.20) складає 11,11.
 Функцію витрат розрахуємо, виходячи зі значення . Для цього в (3.20)
 підставляємо значення для діапазону класів :
 (3.25)

З точки зору практики, це відповідає відсутності серед проаналізованої вибірки напівпровідникового випрямного діода 30 класу та струмом 83,33 А. При цьому у вибірці (додаток Е) є силовий напівпровідниковий випрямний діод зі струмом, який приблизно

дорівнює: А.

За показником СК, використовуючи значення функції та вирази (3.20) або (3.22), визначається функція витрат для запропонованих перетворювальних структур різної потужності при роботі з розрахунковими напругами контактної мережі на базі різних видів силових напівпровідникових та відповідному головному параметрі.

При визначенні функції витрат вводимо такі обмеження.

1) Отриманні раніш значення функції є дійсними тільки в межах проаналізованих діапазонів показника – див. співвідношення (3.20), (3.22).

2) Якщо показник будь-якої з перетворювальних структур, які розглядаються, для будь-якого зі значень потужності є меншим ніж нижня границя прийнятого діапазону показника СК, то його слід приймати рівним значенню нижньої границі діапазону показника СК.

3) Якщо необхідний для побудови МВ клас вентилів є більшим, ніж у приладів, які увійшли до розглянутої вибірки (додаток Е), то для визначення функції витрат використовуємо так званий розрахунковий клас вентилів, який визначається за умови практичної реалізації вентиля необхідного класу з декількох послідовно з'єднаних вентилів максимального класу. В свою чергу максимальний клас визначається за умови мінімальної кількості послідовно з'єднаних приладів. При цьому показник СК та функція затрат розраховується для приладів з розрахунковим класом.

Наприклад, у складі перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а потужністю 3000 кВт, при напрузі у контактній мережі 6 кВ постійного струму, необхідно використовувати вентиля 60 класу, показник СК дорівнює (табл. Д.1).

Прилади 60 класу до репрезентативної вибірки не входили (додаток Е), тому доцільно встановити два послідовно з'єднаних прилади 30 класу. При зменшенні класу приладів у два рази (з 60-го до 30-го) показник СК збільшиться у два рази відповідно до значення . Отримане значення є меншим, ніж нижня границя в

діапазоні (співвідношення (3.20)), тому затратна функція

приймається пропорційно нижній границі, тобто (див. вираз (3.25)), але враховуючи, що приладів 30 класу потрібно два, то і затратна функція збільшиться у два

рази та складатиме

Враховуючи вищевказане, результати визначення показника СК та функції витрат представимо у табличному вигляді - табл. 3.33 та у таблицях додатка Ж (для некерованих та керованих МВ).

3.7. Порівняльний аналіз оптимальних параметричних рядів структур статичних перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів

Отримані вище співвідношення функцій попиту (п.3.5) та витрат (п.3.6) залежать від потужності перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза та напруги у контактній мережі. Це обумовлює необхідність визначення цільової функції (3.12) для кожної з перетворювальних структур, а також для різних значень потужності перетворювача та напруги у контактній мережі.

Значення функції витрат перетворювальних структур при потужності перетворювача 3000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання некерованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	83,33	2,78	57,865
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	250,00	25,00	44,846
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	500,00	50,00	82,823
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	166,67	5,56	57,865
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	55,56	1,85	57,865
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	333,33	66,67	51,541
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	166,67	16,67	30,859
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	333,33	33,33	58,145
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	111,11	3,70	57,865
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	500,00	50,00	82,823
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	166,67	5,56	57,865
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	41,67	1,38	115,73
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	125,00	6,25	17,619
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	250,00	12,50	35,252
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	83,33	1,39	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	27,78	0,46	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	166,67	16,67	30,859
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	83,33	4,17	11,475
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	20	20	1	166,67	8,33	23,623
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	60	30	2	55,56	0,93	115,73
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	20	20	1	250,00	12,50	35,252

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	60	30	2	83,33	1,39	115,73
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	120	40	3	20,83	0,17	121,647
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	40	40	1	62,50	1,56	40,549
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	40	40	1	125,00	3,13	40,549
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	120	40	3	41,67	0,35	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	120	40	3	13,89	0,12	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	20	20	1	83,33	4,17	11,475
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	40	40	1	41,67	1,04	40,549
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	40	40	1	83,33	2,08	40,549
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	120	40	3	27,78	0,23	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	40	40	1	125,00	3,13	40,549
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	120	40	3	41,67	0,35	121,647
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	240	40	6	10,42	0,04	243,294
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	80	40	2	31,25	0,39	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	80	40	2	62,50	0,78	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	240	40	6	20,83	0,09	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	240	40	6	6,94	0,03	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	40	40	1	41,67	1,04	40,549
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	80	40	2	20,83	0,26	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	80	40	2	41,67	0,52	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	240	40	6	13,89	0,06	243,294
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	80	40	2	62,50	0,78	81,098
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	240	40	6	20,83	0,09	243,294
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	353	40	9	7,09	0,02	364,941
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	118	40	3	21,28	0,18	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	118	40	3	42,55	0,36	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	14,18	0,04	364,941

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	4,73	0,01	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	28,37	0,48	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	14,18	0,12	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	28,37	0,24	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	9,46	0,03	364,941
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	42,55	0,36	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	14,18	0,04	364,941

Для розрахунків значень цільових функцій різних параметричних рядів розроблена програма у середовищі MathCad (додаток З, на прикладі розрахунку цільових функцій для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-2м3а). Для розробки програми використовувався алгоритм та його реалізація, запропоновані в роботах [136,145].

Визначені у п.3.5 параметричні ряди та функції попиту, для різних перетворювальних структур, доповнюються відповідними витратними функціями за табл. 3.3 та додатком Ж.

Наприклад, для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а, на базі некерованих МВ, потужністю перетворювача 3000 кВт та напругою у контактній мережі 3 кВ при витратній функції, яка визначається за табл.3.33, параметричні ряди (за даними п.3.5) записуємо таким чином:

Наприклад, цільова функція (3.12) для першого параметричного ряду (при та) перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а з некерованим МВ, для терміну служби пристрою – 10 років, дорівнює:

$$(3.26)$$

Результати розрахунків цільових функцій різних перетворювальних структур (табл . 3.8 та 3.9) потужністю 3000 кВт при напрузі у контактній мережі 3 кВ () представлені на рис.3.23.

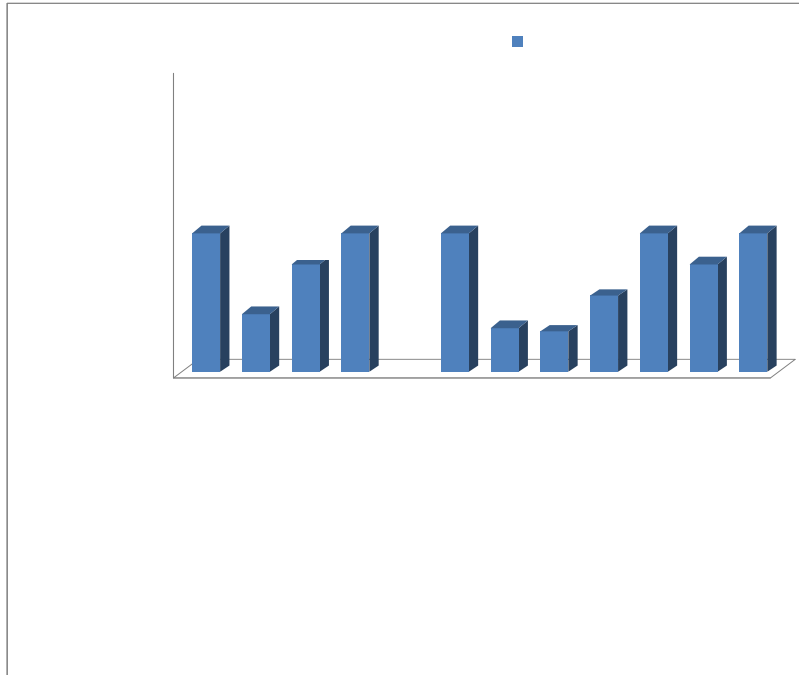


Рис.3.23. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 3000 кВт та напрузі у контактній мережі 3 кВ.

Аналогічно визначимо цільові функції для різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 3000 кВт та різних напругах у контактній мережі та їх сполученнях, що визначають багатосистемність електровоза. Результати представимо на рис. 3.24 для перетворювальних структур з некерованим МВ, та на рис.3.25 для перетворювальних структур з керованим МВ.

Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим та некерованими МВ, при різних потужностях перетворювача та різних напругах у контактній мережі та їх сполучень представлені у додатку К.

Метою досліджень цього розділу є знаходження мінімальних значень цільової функції для кожного параметричного ряду, різних перетворювальних структур. Структура, яка при заданих потужності перетворювача та напрузі (або сполученні декількох значень) у контактній мережі, буде мати мінімальне значення цільової функції, є оптимальною для заданих умов.

Мінімальне значення визначається з порівняння представлених на рис.3.24, 3.25 та у додатку К значень цільової функції, для кожного параметричного ряду.

Наприклад, мінімальна цільова функція для першого параметричного ряду різних перетворювальних структур з некерованим МВ (рис. 3.23) для тягової електропередачі з чотирма ТЕД дорівнює 76,98 (перетворювальна структура 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а. При шести ТЕД мінімальне значення цільової функції 52,97, відноситься до структури 6Т(А)-М1-3Ф-6м3а (рис.3.23).

Аналогічно проводиться аналіз представлених на рис. 3.24 та у додатку М гістограм, що дозволяє визначити перетворювальні структури, які мають мінімальні значення цільової функції при різних напругах у контактній мережі та різних потужностях перетворювача з некерованим МВ.

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, при різних потужностях перетворювача, представлені у таблицях 3.34 та 3.35 (структура з мінімальним значенням цільової функції позначена як «●» окремо для структур з силовими модулями типів M1, M2 та M3).

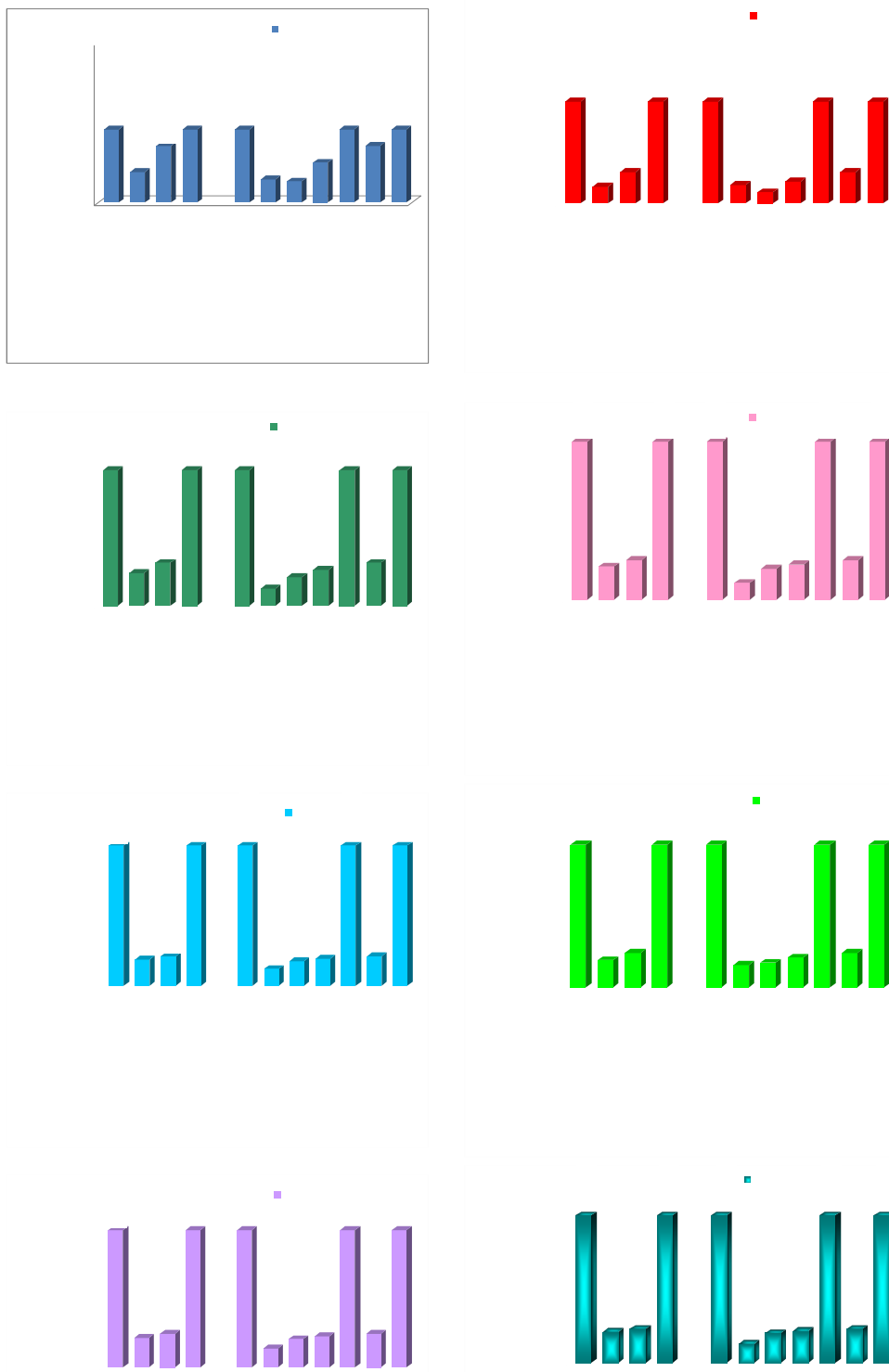


Рис.3.24. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 3000 кВт та різних напругах у контактній мережі

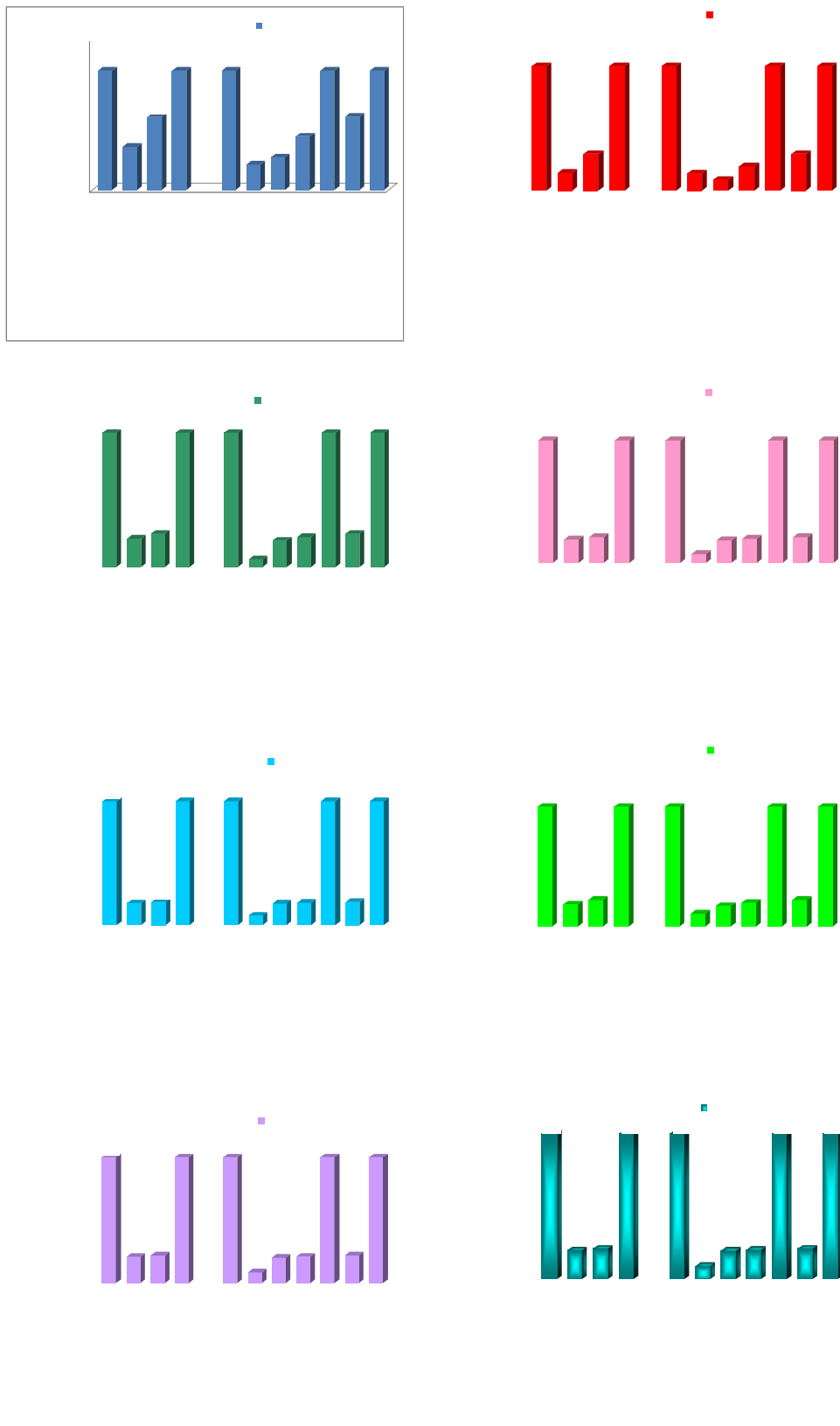


Рис.3.25. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керуванням МВ , при потужності перетворювача 3000 кВт та різних напругах у контактній мережі

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 4 ТЕД

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	Напруга контактної мережі							
		3 к В	3 / 6 к В	3 / 1 2 к В	3 / 2 4 к В	3 / 2 5 к В	3 / 6 / 2 5 к В	3 / 1 2 / 2 5 к В	3 / 2 4 / 2 5 к В
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000								
	6000								
	9000	●							
	12000	●							
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	●	●	●	●	●	●	●	●
	6000	●	●	●	●	●	●	●	●
	9000		●	●	●	●	●	●	●
	12000		●	●	●	●	●	●	●
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	●	●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000		●	●	●	●	●	●	●
	12000		●	●	●	●	●	●	●
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000								
	6000	●							
	9000	●							
	12000	●							

Аналіз представлених у табл. 3.34 даних дозволяє стверджувати, що для побудови статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза з чотирма тяговими двигунами доцільно, з точки зору мінімального значення цільової функції, використовувати структури з мережевими випрямлячами за схемою типу 3а, а саме 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а (силовий модуль М1) та 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а (силовий модуль М2). Відповідні схеми перетворювальних структур представлені на рис. Б.5 та Б.10.

З точки зору рівня структурної надійності, обрані перетворювальні структури мають відносно високе значення часу досягнення імовірністю безвідмовної роботи рівня 0,95 (рис.2.14, 2.16), а саме: для структури 4А-М1-3Ф-4м3а – 12800 год., 4А-М2-3Ф-2м3а – 12400 год., 4Т-М1-3Ф-4м3а – 12815 год., 4А-М2-3Ф-2м3а – 12515 год.

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 6 ТЕД

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	Напруга контактної мережі							
		3 к В	3 / 6 к В	3 / 1 2 к В	3 / 2 4 к В	3 / 2 5 к В	3 / 6 / 2 5 к В	3 / 1 2 / 2 5 к В	3 / 2 4 / 2 5 к В
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	3000								
	6000								
	9000								
	12000								
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	3000			•	•	•	•	•	•
	6000	•		•	•	•	•	•	•
	9000	•	•	•	•	•	•	•	•
	12000	•		•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	3000	•	•						
	6000		•						
	9000								
	12000		•						
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000	•	•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000								
	6000								
	9000	•							
	12000	•							
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000								
	6000	•							
	9000	•							
	12000	•							

Згідно табл. 3.35 відзначаємо, що для побудови статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза з шістьма тяговими двигунами доцільно, з точки зору мінімального значення цільової функції, використовувати структури: 6Т(А)-М1-3Ф-3м6а (силовий модуль М1), 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а (силовий модуль М2) та 6Т(А)-

МЗ-3Ф-2м3а (силовий модуль МЗ). Відповідні схеми перетворювальних структур представлені на рис. Б.17, Б.23 та Б.29.

За рівнем структурної надійності обрані перетворювальні структури мають відносно високе значення часу досягнення імовірністю безвідмовної роботи рівня 0,95 (рис.2.15, 2.17), а саме: для структури 6А-М1-3Ф-3м6а – 12800 год., 6Т-М1-3Ф-3м6а – 12820 год., 6А-М2-3Ф-3м3а – 12810 год., 6Т-М2-3Ф-3м3а – 12810 год., 6А-М3-3Ф-2м3а – 12520 год., 6Т-М3-3Ф-2м3а – 12500 год.

Таким чином, серед п'яти визначених оптимальних перетворювальних структур чотири ґрунтуються на поєднанні мережевих випрямлячів за схемою типу 3а (6Т(А)-МЗ-3Ф-2м3а, 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а, 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а, 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а), і лише один – типу 6а (6Т(А)-М1-3Ф-3м6а), тобто рівень уніфікації перетворювальних структур, за схемою мережевого контуру не є 100%.

Проведені вище дослідження рівня уніфікації модуля мережевих випрямлячів дозволяють прийняти таке: в подальших дослідженнях перетворювальні структури будемо за допомогою модулів мережевих випрямлячів типу 3а, тобто використовуємо чотири структури:

- 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а;
- 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а;
- 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а;
- 6Т(А)-М3-3Ф-2м3а.

Згідно з представленими у додатку Б схемами, обрані перетворювачі мають однакову структуру мережевого контуру, незалежно від виду тягового двигуна (рис.3.26).

Також слід відмітити, що в декількох випадках при роботі з напругою контактної мережі 3 кВ постійного струму мінімальну цільову функцію мають структури з поєднанням мережевих випрямлячів типу 1а (табл.3.34 та 3.35), тобто з безпосереднім підключенням МВ до контактної мережі (рис. 3.27).

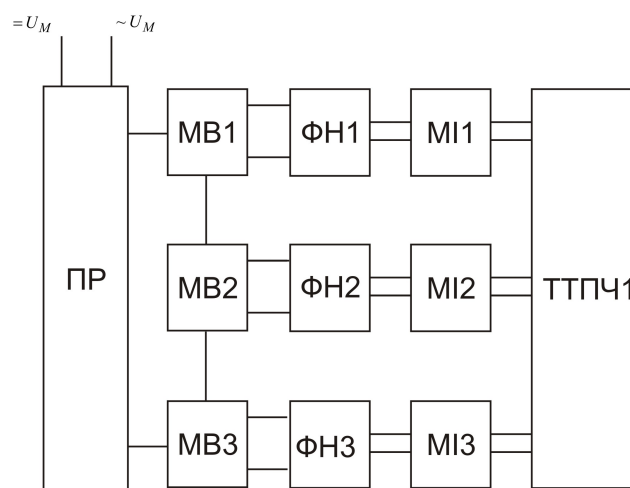


Рис.3.26. Схема мережевого контуру обраних перетворювальних структур

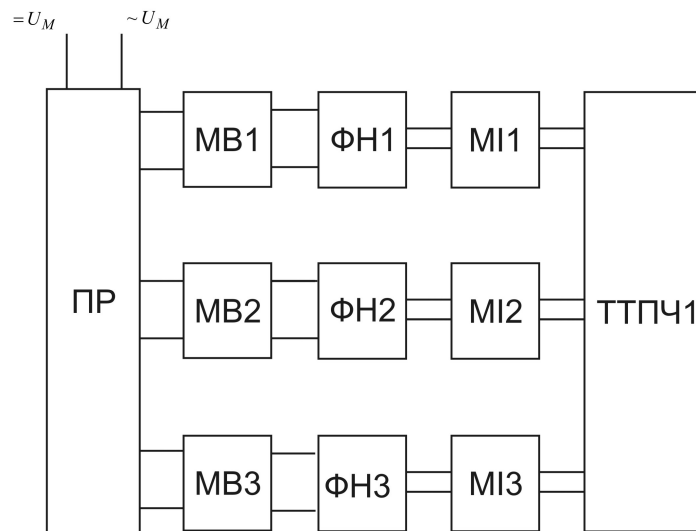


Рис.3.27. Мережевий контур деяких обраних перетворювальних структур в режимі «3 кВ» постійного струму

Таким чином, є доцільною робота обраних перетворювальних структур в режимі поєднання мережевих випрямлячів за схемою типу 1а при напрузі у контактній мережі 3 кВ постійного струму, що забезпечується відповідною роботою перемикача режимів ПР.

Проведені вище дослідження цільових функцій проводились на підставі визначення функції попиту в загальному об'ємі перетворювальних структур, що розглядаються, тобто серед всіх можливих варіантів (додаток Б).

Якщо прийняти, що попит на одинадцять попередньої відібраних структур (табл. 3.8 та 3.9) є однаковим, функція попиту для кожної буде дорівнювати:

$$(3.27)$$

Виходячи з цієї умови, зміняться параметричні ряди, наприклад, для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12м1а потужністю 3000 кВт вони запишуться як:

Значення відповідних цільових функцій показані на рис.3.28 для перетворювальних структур з некерованим МВ, та на рис.3.29 для перетворювальних структур з керованим МВ, при однакових значеннях функції попиту на рівні 0,091 та потужності 3000 кВт. Для інших значень потужностей перетворювальних структур результати представлені у вигляді гістограм у додатку М.

Аналіз представлених на рис. 3.28, 3.29 та М.7...М.12 гістограм дозволяє визначити перетворювальні структури, які мають мінімальні значення цільової функції при різних напругах у контактній мережі та різних потужностях перетворювача з некерованим та керованим МВ при однаковій функції попиту.

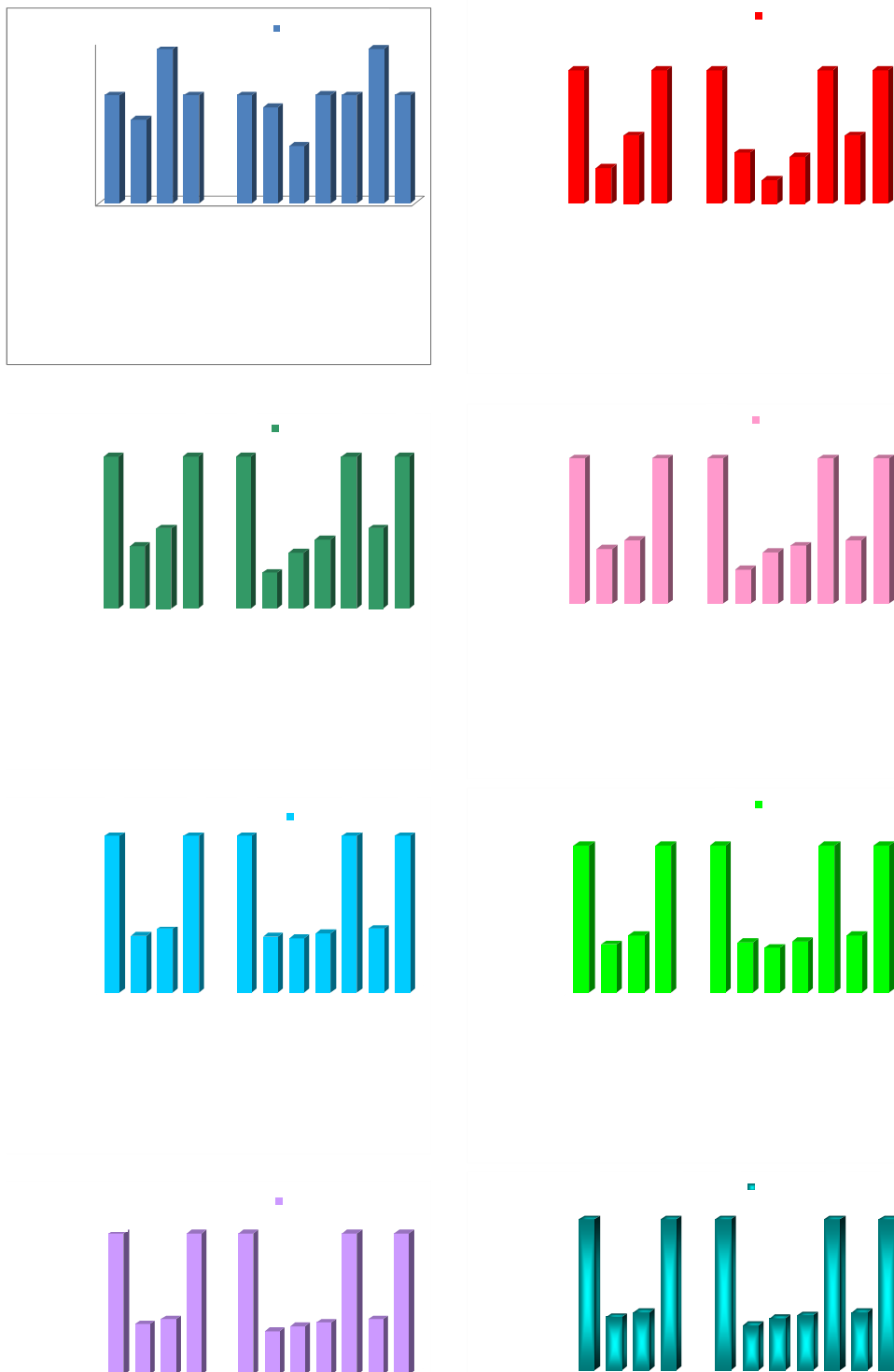


Рис.3.28. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ при потужності перетворювача 3000 кВт та різних напругах у контактній мережі та

однаковому попиту

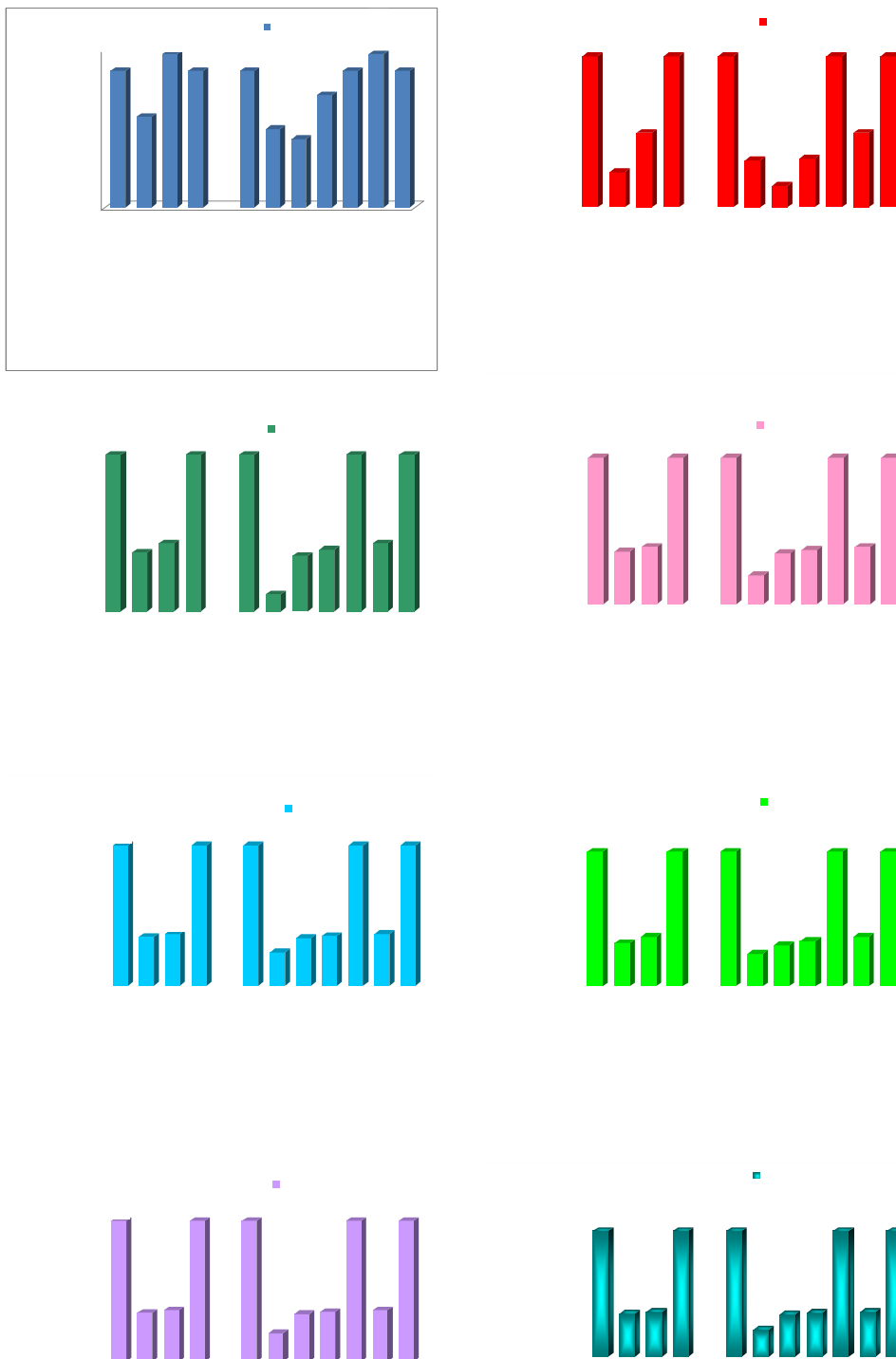


Рис.3.29. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ при потужності перетворювача 3000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиту

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, при різних потужностях перетворювача, представлені у таблицях 3.36

та 3.37 (структура з мінімальним значенням цільової функції позначена як «●» окремо для структур з силовими модулями М1, М2 та М3), які призначено для живлення чотирьох та шести тягових двигунів відповідно.

Представлені у табл. 3.36 та 3.37 результати в цілому не впливають на обрані вище (за даними табл. 3.34 та 3.35, при різних значеннях функції попиту) оптимальні перетворювальні структури, оскільки отримані дані співпадають у цілому.

Таблиця 3.36

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 4 ТЕД при однаковому попиті

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	Напруга контактної мережі							
		3 к В	3 / 6 к В	3 / 1 2 к В	3 / 2 4 к В	3 / 2 5 к В	3 / 6 / 2 5 к В	3 / 1 2 / 2 5 к В	3 / 2 4 / 2 5 к В
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000								
	6000	●							
	9000	●							
	12000	●							
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	●	●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000		●	●	●	●	●	●	●
	12000		●	●	●	●	●	●	●
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000		●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000				●	●	●	●	●
	12000				●	●	●	●	●
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	●							
	6000								
	9000	●	●	●					
	12000	●	●	●					

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 6 ТЕД при однаковому попиті

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	Напруга контактної мережі							
		3 к В	3 / 6 к В	3 / 1 2 к В	3 / 2 4 к В	3 / 2 5 к В	3 / 6 / 2 5 к В	3 / 1 2 / 2 5 к В	3 / 2 4 / 2 5 к В
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	3000								
	6000	•							
	9000	•							
	12000	•							
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	3000			•	•	•	•	•	•
	6000			•	•	•	•	•	•
	9000			•	•	•	•	•	•
	12000			•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	3000	•	•						
	6000		•						
	9000		•						
	12000		•						
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000		•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000			•	•	•	•	•	•
	12000			•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000	•							
	6000	•							
	9000	•	•						
	12000	•	•						
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000		•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000				•	•	•	•	•
	12000				•	•	•	•	•
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	•							
	6000	•							
	9000	•	•	•					
	12000	•	•	•					

Так за табл. 3.34, з точки зору мінімального значення цільової функції, обрано структури: 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а (силовий модуль М1) та 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а (силовий модуль М2). Саме ці структури є оптимальними і за даними табл. 3.36.

За табл. 3.35, з точки зору мінімального значення цільової функції, доцільно використовувати структури: 6Т(А)-М1-3Ф-3м6а (силовий модуль М1), 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а (силовий модуль М2) та 6Т(А)-М3-3Ф-2м3а (силовий модуль М3). Саме ці структури є оптимальними і за даними табл. 3.37.

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення чотирьох та шести ТЕД з керованими МВ, представлені у табл. Л.1 та Л.2 при різному попиті, та однаковому попиту табл. Л.3 та Л.4.

З табл. 3.38...3.41 бачимо, що визначені оптимальні, за мінімальним значенням цільової функції, є структури аналогічні до обраних раніш, для випадків використання некерованих мережевих випрямлячів, тобто будувати статичний перетворювач для тягової електропередачі багатосистемного електровоза доцільно з використанням модулів мережевих випрямлячів типу 3а [61].

3.8. Висновки з третього розділу

За результатами представлених у третьому розділі досліджень за визначенням оптимальної структури статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза впливають таке висновки:

1. Знайшли подальший розвиток теоретичні положення з уніфікації електрообладнання у застосуванні до запропонованих перетворювальних структур тягової електропередачі багатосистемних електровозів. На базі цих положень розроблена математична модель, з допомогою якої визначені оптимальні параметричні ряди вказаних пристроїв. Функції попиту, які необхідні для визначення оптимального параметричного ряду вказаних пристроїв за принципом знаходження мінімальної цільової функції, знайдені шляхом аналізу реальних статистичних даних. Теоретичні дослідження з уніфікації функціональних частин перетворювачів підвищеної частоти для багатосистемних електровозів проведені вперше.

2. При проведенні оптимізації функція витрат визначена як залежність вартості силових напівпровідникових приладів від їх основних параметрів. Для спрощення пропонується використовувати залежність відносно вартості приладу від

відношення $\frac{U_{\text{к}}}{U_{\text{н}}}$, тобто запропонована функція має вигляд $C_{\text{к}} \cdot \left(\frac{U_{\text{к}}}{U_{\text{н}}}\right)^{\alpha}$.

Отримані аналітичні залежності $C_{\text{к}} \cdot \left(\frac{U_{\text{к}}}{U_{\text{н}}}\right)^{\alpha}$ узгоджується з експериментальним значенням. Аналітичні вирази цієї залежності для різних видів силових напівпровідникових приладів дозволяють визначити відносну вартість цього приладу зі значенням СК, відмінним від експериментального.

3. Визначені оптимальні параметричні ряди, з точки зору значення цільової функції. Для статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза доцільно використовувати модулі мережевих випрямлячів типу 3а. Оптимальними є структури: 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а; 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а; 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а; 6Т(А)-М3-3Ф-

2м3а.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІДВИЩЕНОЇ ЧАСТОТИ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ БАГАТОСИСТЕМНОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

Визначені попередніми дослідженнями структури перетворювача підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемного електровоза (розділ 2), мають у своєму складі трансформатор підвищеної частоти. Це є одною з головних особливостей запропонованих систем, оскільки дозволяє зменшити масогабаритні показники перетворювача, з одночасним збільшенням його потужності. Серед проаналізованих літературних джерел є роботи присвячені використанню так званих «електронних трансформаторів» та перетворювачів підвищеної частоти у різних системах, у тому числі для тягових та перетворювачів бортового електропостачання електрорухомого складу [70-72, 146-150]. Але в цих роботах не висвітлені питання особливостей створення потужних трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти. Як встановлено у попередніх розділах (розділ 2 та 3), використання трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти дозволить будувати уніфіковані перетворювачі з відносно високим рівнем структурної надійності. Питанням створення таких трансформаторів присвячено перша половина цього розділу дисертаційної роботи, а саме: встановлення співвідношень між масогабаритними показниками, потужністю та робочою частотою трансформатора; визначенню рівня втрат у магнітопроводі трансформатора підвищеної частоти виготовленого з різних матеріалів; надання рекомендацій по конструкції основних елементів трансформатора при визначенні основних параметрів обмоток трансформаторів.

До складу сучасних багатосистемних (що експлуатуються у Європі) та електровозів змінного струму входять однофазні тягові трансформатори, які характеризуються деякими особливостями у порівнянні з трансформаторами загальнопромислового виконання [87], а саме: індукція в магнітопроводі (сталь 3404-3405 лист 0,35 мм) не перевищує 1,5...1,55 Тл, що виключає можливість виникнення великих індукцій при підвищенні напруги у контактній мережі (діапазон змін напруги -10%...+30%); система охолодження з примусовим масляним охолодженням. Крім того, тягові трансформатори характеризуються мінімальним значенням втрат у сталі, що обумовлено частою роботою трансформатора з навантаженням менше номінального.

Втрати у холоднокатаній сталі, яку використовують у існуючих трансформаторах, при підвищеній частоті приблизно визначаються як:

$$(4.1)$$

при базовій індукції 1,0 Тл та базовій частоті 50 Гц [151].

Таким чином, збільшення частоти з 50 Гц до 1000 Гц, призведе до приблизного

збільшення втрат холостого ходу (при однаковій індукції) в _____ рази.

Таке збільшення неприпустиме.

Вирішити проблему підвищення робочих частот тягового трансформатора при збереженні або зменшенні втрат неробочого ходу, пропонується за рахунок використання сучасних магнітних матеріалів.

4.1. Аналіз властивостей сучасних магнітних матеріалів

Бурхливий розвиток напівпровідникової перетворювальної техніки дозволив створити високоефективні перетворювальні пристрої - випрямлячі, інвертори, конвертори. Важливою складовою цих пристроїв є електромагнітні елементи - трансформатори, дроселі й індуктивні елементи. Так, за допомогою трансформаторів здійснюється узгодження вхідної й вихідної напруг перетворювачів, реактори й дроселі служать для фільтрації вищих гармонік, обмеження напруг на елементах перетворювачів і формування струму комутації.

Для виготовлення електромагнітних елементів використовуються магнітом'які магнітні матеріали, які за принципом електропровідності можна розділити на три групи: провідникові - електротехнічні сталі й сплави (пермалої), напівпровідникові - ферити, діелектричні – магнітодіелектрики [152-158].

В залежності від конкретних умов роботи електромагнітних елементів вимоги до магнітних матеріалів можуть бути різними, але найбільш загальні такі [152,60]:

1. Магнітний матеріал повинен легко намагнічуватися та розмагнічуватися, маючи вузьку петлю гістерезису, малу коерцитивною силою та великі значення початкової та максимальної магнітної проникності.

2. Магнітний матеріал повинен мати велику індукцію насичення, тобто забезпечити максимального магнітного потоку скрізь задану площу перерізу магнітопровода. Слід зазначити, що найбільшу індукцію насичення мають електротехнічні сталі.

3. Магнітний матеріал повинен мати по можливості мінімальну потужність втрат.

4. Магнітний матеріал повинен бути пластичним, забезпечувати високу якість штамповок, повинен мати гладку поверхню та незначну залежність магнітних властивостей від механічних напруг.

5. Бажано мати стабільні магнітні характеристики під впливом дестабілізуючих факторів (температура, вібрація та інш.), особливо для пристроїв тягового виконання.

6. Суттєвим також є вартість та дефіцитність матеріалів.

Властивості магнітних матеріалів традиційно описують за допомогою кривих намагнічування. На рис. 4.1 представлені криві намагнічування сталі марки 3424 при частотах, Гц: 400 (2), 1000 (1), 3000 (3) для стрічки товщиною 0,08 мм [152].

В залежності від частотного діапазону, на якому працюють перетворювальні установки, для виготовлення магнітопроводів електромагнітних елементів використовуються різні магнітні матеріали: сталі - при частотах від 50 Гц до 10 кГц, сплави - від 5...10 до 20...30 кГц (сплави мікронного прокату - до декількох сотень кілогерців) ферити й магнітодіелектрики - від 10 кГц і вище. Електротехнічні сталі по поширеності посідають перше місце серед феромагнітних матеріалів і при частотах приблизно до 3000 Гц перебувають поза конкуренцією. Проведеними раніш автором дослідженнями (розділ 2) встановлено, що достатнім значенням робочої частоти ланки підвищеної частоти тягового статичного перетворювача, з точки зору зменшення габаритів обладнання є частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц. Ці значення знаходяться в діапазоні частот до 3000 Гц, тобто при створення тягового трансформатора підвищеної частоти доцільно використовувати саме електротехнічні сталі.

Кращими характеристиками володіють електротехнічні сталі 3422, 3423, 3424, 3425 товщиною 0,08 й 0,05 мм [152, 154].

$B_m, \text{Тл}$

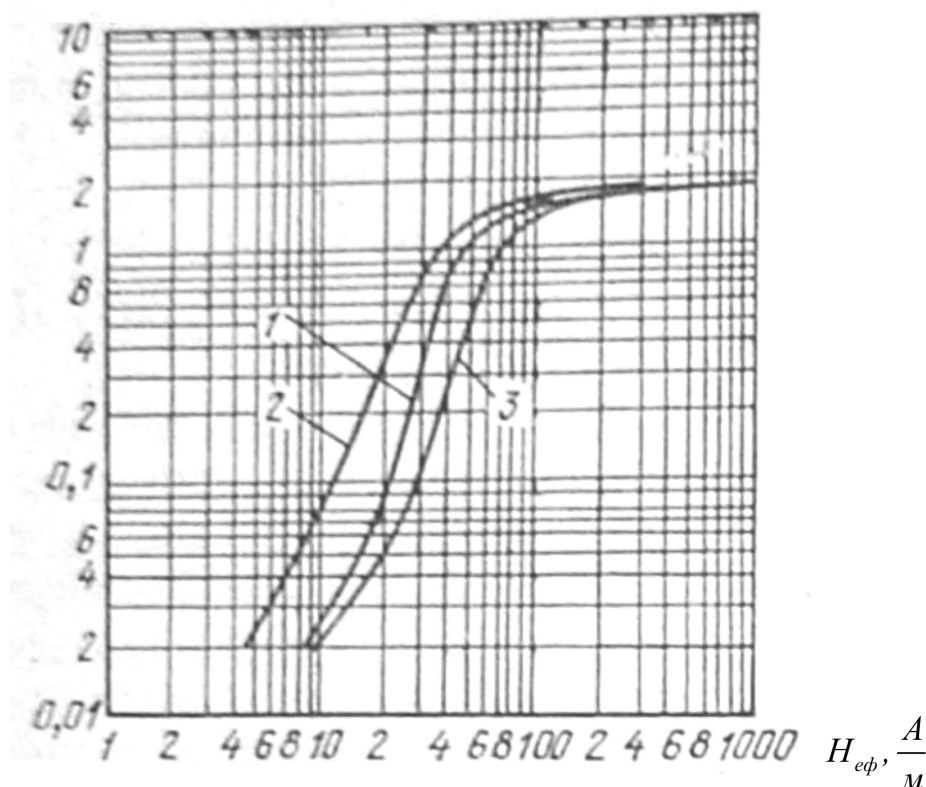


Рис. 4.1. Криві намагнічування сталі марки 3424 при частотах, Гц: 400 (2), 1000 (1), 3000 (3) для стрічки товщиною 0,08 мм.

Сталі марок 3422-3425 мають менші втрати, велику індукцію насичення (біля 1, 9 Тл), відносно високу магнітну проникність в середніх та сильних полях () та знижену, у порівнянні з пермалоевими сплавами, чутливість до механічних ушкоджень [152].

Сплави з високою проникністю (пермалої) мають постійне значення магнітної проникності в широкому діапазоні зміни магнітних полів. Недоліком пермалоїв є чутливість до термічної та механічної обробки, а крім того характеризуються значним розкидом властивостей. Тому пермалої використовують для малопотужних пристроїв [108].

Ферити – полікристалічні багатокомпонентні сполучення, які мають значення питомого об'ємного електричного опору, що перевищує відповідний опір сталей та сплавів в 50 та більш раз. Ці матеріали в постійних магнітних полях та при низьких частотах не використовуються, оскільки в порівнянні з металічними матеріалами мають знижену індукцію насичення (0,3...0,45 Тл). Ферити використовують у малопотужних високочастотних (не менше 10 кГц) пристроях [152, 154, 157, 158].

Магнітодіелектричні матеріали – це суміш здрібненого феромагнетиту, частки якого електричне відділені одна від одної діелектричним середовищем, яке виконує функцію електричної ізоляції та механічної зв'язки всієї системи. Поширені три основні групи магнітодіелектриків: альсіфери, карбонільне залізо та прессперми. Параметри магнітодіелектриків мало залежать від впливу постійних та змінних магнітних полів, що

дозволяє на їх основі будувати лінійні реактори. Але ці матеріали є доцільно використовувати при частотах не менше 10 кГц, для відносно малопотужних пристроїв (декілька кВт) [152].

Виходячи з представленого стислого аналізу властивостей та галузей застосування різних магнітних матеріалів робимо наступні висновки: для створення потужних тягових трансформаторів підвищеної частоти, в діапазоні робочих частот до 3000 Гц, недоцільно використовувати пермалої, ферити та магнітодіелектричні матеріали, які використовують у малопотужних пристроях високої частоти; для виготовлення магнітопровода потужного тягового трансформатора підвищеної частоти (до 3 кГц) доцільно використовувати електротехнічні сталі, марок 3422, 3423, 3424, 3425, які забезпечують реалізацію необхідної потужності, є технологічними та характеризуються відносною стабільністю параметрами під впливом дестабілізуючих факторів.

4.2. Вплив робочої частоти та індукції на рівень питомих втрат в магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти

Основним показником, який визначає доцільність використання магнітного матеріалу для побудови тягового трансформатора підвищеної частоти, є втрати у магнітопроводі, які складаються із втрат на гістерезис, вихрові струми й втрат внаслідок магнітної в'язкості (або магнітної післядії). Із втратами на гістерезис рахуються в сталях і сплавах на низькій частоті (коли вони порівнянні із втратами на вихрові струми), у феритах і магнітодіелектриках втрати на гістерезис істотні на всіх частотах [152, 154].

Втрати на гістерезис є властивістю даного матеріалу й зменшити їх не можна. Вихрові струми в магнітопроводі виникають у повній відповідності із законом електромагнітної індукції при змінному магнітному потоці, що пронизує магнітопровід. Втрати на вихрові струми залежать від електричної провідності матеріалу. Знизити втрати на вихрові струми можна двома шляхами: зменшивши товщину листів (або стрічки, або розміру часток у феродіелектриках) і підвищивши питомий електроопір.

Магнітною в'язкістю або магнітною післядією називають явище, що виникає у феромагнетику при швидкій зміні магнітного поля та яке проявляється в специфічному запізнюванні намагніченості матеріалу.

У праці [152] автори, на підставі обробки значної кількості статистичних даних щодо втрат у магнітних матеріалах, отриманих для різних магнітних матеріалів, стверджують, що більш раціональним є метод визначення повних втрат (без поділення на складові) на підставі експериментальних даних, отриманих при синусоїдальному впливі (у разі несинусоїдального сигналу представлені нижче співвідношення є дійсними, як досліджувана частота використовується частота першої гармоніки).

Для визначення питомих втрат у сталевому магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти, використаємо таке співвідношення [152, 154]:

$$, \quad (4.2)$$

де: - частота, Гц;
- амплітуда індукції, Тл;

Гц, Тл – базові значення частоти та індукції;

Позначивши:

$$\dots \quad (4.3)$$

Отримаємо:

$$\dots \quad (4.4)$$

де: \dots , \dots , \dots - коефіцієнти, отримані після опрацювання експериментальних залежностей [152].

Питому потужність втрат також можна визначити за таким виразом [152]:

$$\dots \quad (4.5)$$

де: \dots - коефіцієнт, що показує втрати в одиниці об'єму при частоті 1 Гц та амплітуді індукції 1 Тл.

В табл. 4.1 представлені коефіцієнти \dots , \dots , \dots для сталей 3422, 3423, 3424, 3425, 3441 [152, стор.37].

Використовуючи вираз (4.4), дослідимо залежність втрат у сталюму магнітопроводі марки 3424 (товщина стрічки 0,08 мм) при різних частотах в функції магнітної індукції. Представимо отримані результати у графічному вигляді (рис. 4.2).

На рис. 4.2 та інших подібних у цьому розділі дисертаційної роботи використано логарифмічний масштаб осей.

Таблиця 4.1

Коефіцієнти \dots , \dots , \dots для сталей 3422, 3423, 3424, 3425, 3441

Марка	Товщина стрічки, мм	\dots	\dots	\dots	\dots
3422	0,08	21,0	1,3	1,6	663
3423	0,08	19,0	1,3	1,8	600
3424	0,08	16,6	1,2	1,6	525
3425	0,08	16,5	1,5	1,8	522
3425	0,05	15,4	1,4	1,6	486
3441	0,03	14,4	1,4	1,6	455
3441	0,01	20,4	1,4	1,6	643

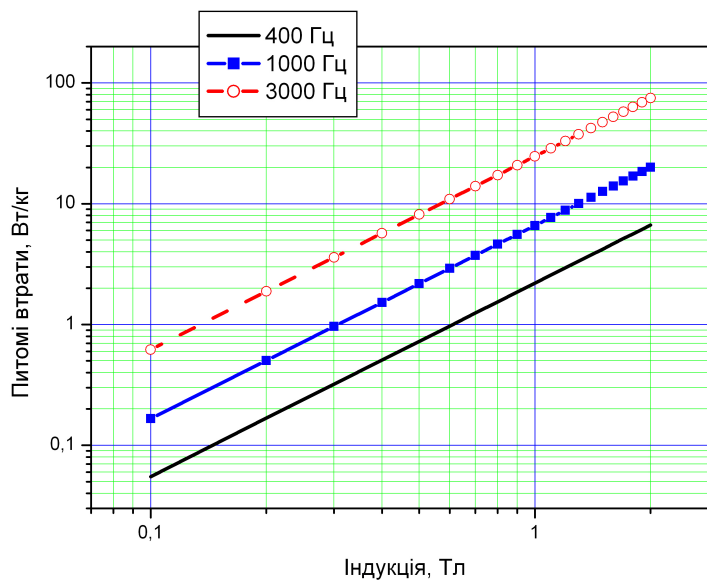


Рис. 4.2. Залежність для сталі марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм при
різних частотах різних частотах

Залежності представлені на рис. 4.2 є рівновіддаленими одна від одної та
лінійними у всьому діапазоні значень індукції на різних частотах.

Аналогічно за формулою (4.4) та на підставі даних з табл. 4.1, визначимо залежність втрати потужності для сталей різних марок та товщини від зміни частоти та магнітної індукції. Це дозволяє, порівнявши отримані результати, визначити марку сталі, яка при заданих умовах, характеризується найменшими втратами. Саме з такого матеріалу доцільно виготовляти магнітопроводи потужних тягових трансформаторів, з кращими енергетичними показниками (коефіцієнтом корисної дії).

На рис. 4.3 представлено залежність для різних марок сталей при частоті
1000 Гц.

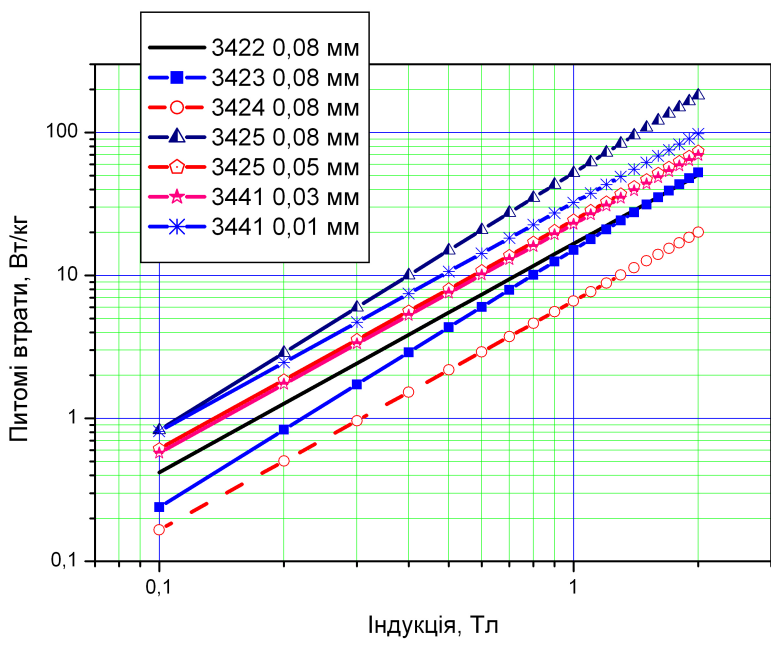


Рис. 4.3. Залежність P_{sp} для різних марок сталей при частоті 1000 Гц.

Порівнявши поміж собою представлені на рис. 4.3 залежності P_{sp} , стає очевидним, що для потужних тягових трансформаторів підвищеної частоти, на даний час серед матеріалів, що розглядаються у дисертації, доцільно використовувати сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм, оскільки вона характеризується найменшими питомими втратами при частоті 1000 Гц і вище, у порівнянні з іншими рекомендованими у попередньому підрозділі електротехнічними сталями [58].

Враховуючи характер залежності P_{sp} при різних частотах (рис. 4.2), можна стверджувати, що і на інших частотах сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм буде мати найменші питомі втрати, у порівнянні з іншими матеріалами при різних частотах, що підтверджує аналогічна залежність при частоті 2000 Гц (рис. 4.4).

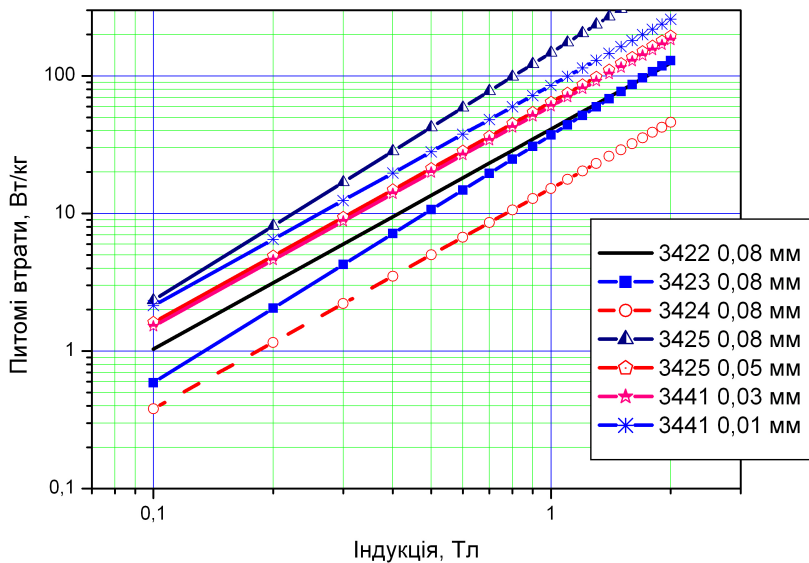


Рис. 4.4. Залежність $\rho_{\text{втр}}(\text{Вт/кг})$ для різних марок сталей при частоті 2000 Гц

Таким чином, виходячи з вимоги забезпечення мінімального рівня питомих втрат у матеріалі магнітопроводу трансформатора, в подальших дослідженнях базовий матеріал для магнітопроводу тягового трансформатора підвищеної частоти приймаємо сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм. Сталь цієї марки характеризується мінімальними питомими втратами для заданих частоти та амплітуди магнітної індукції, у порівнянні з електротехнічними сталями інших марок, що розглядалися [58].

4.3. Вплив робочої частоти на об'єм магнітопроводу та індукцію в ньому

Шляхом ефективного зменшення маси та габаритів електромагнітних пристроїв є збільшення робочої частоти. В роботі [152] доказано, що об'єм магнітопровода (см³) однофазного трансформатора залежить від частоти відповідно до виразу:

$$V_{\text{об}} = \frac{P_{\text{т}}}{k_{\text{втр}} \cdot f \cdot \mu_r \cdot k_{\text{д}} \cdot k_{\text{з}}}, \quad (4.6)$$

- де:
- потужність трансформатора, Вт;
 - робоча частота трансформатора, Гц;
 - температура перегріву магнітопроводу, °С;

табл. 4.1);

- коефіцієнт, який враховує властивості магнітного матеріалу, (

- коефіцієнт, який враховує додаткові втрати у обмотках трансформатора;

- коефіцієнт заповнення вікна трансформатора міддю.

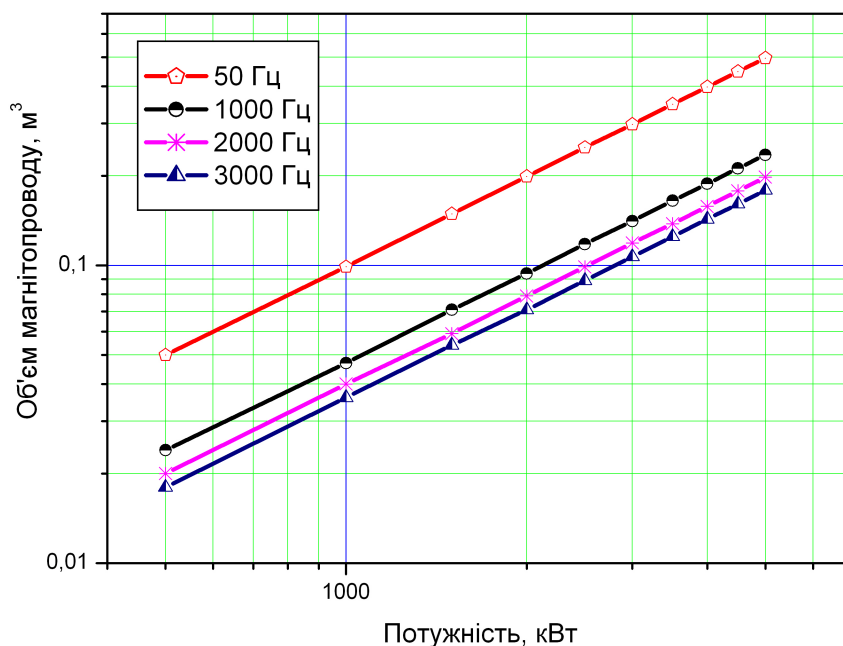


Рис. 4.5. Залежність об'єму магнітопроводу від потужності для різних значень частоти

Для потужних трансформаторів з мідними обмотками додаткові втрати не перевищують 10% [159]. Коефіцієнт заповнення вікна однофазного трансформатора міддю приймаємо рівним 0,3 [152].

Температура перегріву магнітопроводу трансформатора визначається системою охолодження трансформатора. В масляних трансформаторах (які звичайно використовуються на електровозах) максимально допустима температура перевищення поверхні магнітопроводу зверх температури охолоджуючого середовища дорівнює 75 °С [159].

Використовуючи співвідношення (4.6), дослідимо залежність об'єму магнітопроводу від потужності, в діапазоні від 500 кВт до 5000 кВт, для різних значень частоти. Результати представимо на рис. 4.6 та у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Залежність об'єму магнітопроводу від потужності для різних значень частоти

Потужність, кВт	Об'єм магнітопроводу (м³) при частотах (Гц)			
	50	1000	2000	3000
500	0,05	0,024	0,02	0,018
1000	0,099	0,047	0,04	0,036
1500	0,149	0,071	0,059	0,054
2000	0,199	0,094	0,079	0,071
2500	0,249	0,118	0,099	0,089
3000	0,298	0,141	0,119	0,107
3500	0,348	0,165	0,138	0,125
4000	0,398	0,188	0,158	0,143
4500	0,448	0,212	0,178	0,161
5000	0,497	0,235	0,198	0,179

Значення індукції , при якій повні втрати є мінімальні, визначається з виразу [152]:

$$(4.7)$$

де: – втрати в обмотці трансформатора, Вт;
– втрати у магнітопроводі трансформатора, Вт.

Виходячи з виразу (4.7), оптимальне (з точки зору мінімуму втрат) значення індукції можна визначати як [152]:

$$(4.8)$$

Використовуючи співвідношення (4.8), визначимо залежність оптимального значення магнітної індукції від потужності трансформатора, в діапазоні від 500 кВт до 5000 кВт, для різних значень частоти. Результати представимо на рис. 4.6 та у табл. 4.3.

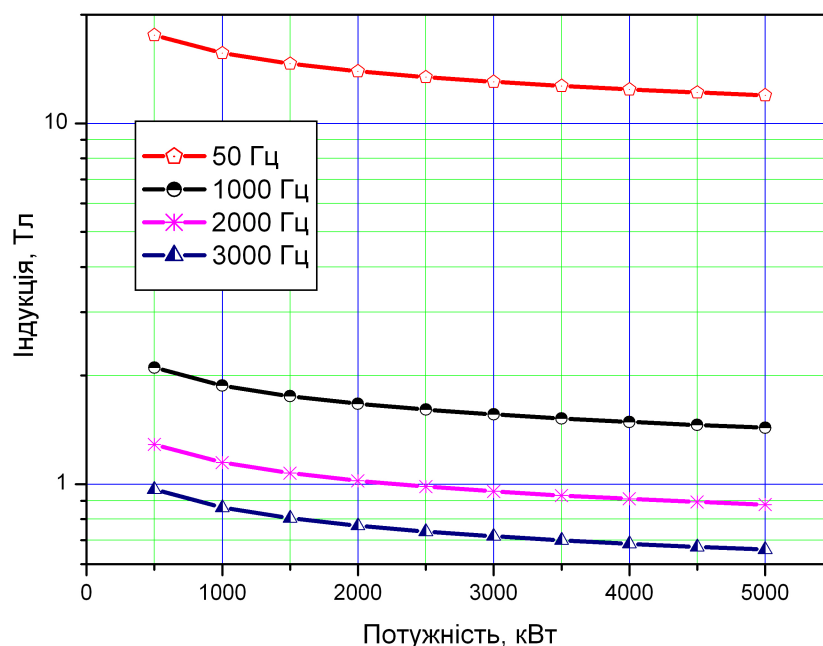


Рис. 4.6. Залежність оптимального значення магнітної індукції від потужності для різних значень частоти

Як бачимо з табл. 4.3, реалізувати на частоті 50 Гц трансформатори потужністю від 500 кВт, для визначених вище значень об'єму магнітопроводу трансформаторів цієї потужності, при сучасних матеріалах, неможливо, оскільки це потребує реалізації індукції рівнем понад 11 Тл (стовпчик 2 табл. 4.3).

Більш раціональним є підвищення робочих частот, що підтверджується меншим значенням індукції в магнітопроводі для частоти 3000 Гц, у порівнянні з іншими частотами (рис. 4.6), при забезпеченні однакових значень потужності трансформатора. Так, оптимальне значення індукції в магнітопроводі трансформатора підвищеної частоти, виготовленого зі сталі марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм потужністю 3000 кВт при робочій частоті 50 Гц складає 13,035 Тл, а при робочій частоті 3000 Гц тільки 0,717 Тл (рядок 6 табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Залежність оптимального значення магнітної індукції від частоти для різних значень потужності

Потужність, кВт		Магнітна індукція (Тл) при частота (Гц)			
		50	1000	2000	3000
1		2	3	4	5
1	500	17,571	2,105	1,288	0,967
2	1000	15,654	1,875	1,148	0,861
3	1500	14,631	1,753	1,073	0,805
4	2000	13,946	1,671	1,022	0,767
5	2500	13,437	1,61	0,985	0,739
6	3000	13,035	1,561	0,956	0,717
7	3500	12,704	1,522	0,931	0,699
8	4000	12,424	1,488	0,911	0,684
9	4500	12,183	1,459	0,893	0,67
10	5000	11,971	1,434	0,878	0,659

Але збільшення робочої частоти тягових трансформаторів підвищеної частоти обмежується низкою фізичних факторів, а саме:

- зменшення коефіцієнта перетворення трансформатора за рахунок падіння напруги на індуктивності розсіювання;

- обмеження можливості щодо розміщення обмоток у вікні магнітопровода, в залежності від способу виконання обмотки.

Враховуючи ці та інші фактори, існує раціональна межа збільшення частоти, яка забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний ККД тягового трансформатора. Максимальна частота, яка відповідає верхній межі збільшення частоти, має назву «критична» [152].

Для визначення критичної частоти тягового трансформатора підвищеної частоти скористуємося виразом [152]:

$$, \text{ Гц.} \quad (4.9)$$

Використовуючи вираз (4.9), визначимо залежність критичної частоти для сталей різних марок від потужності в діапазоні від 500 до 5000 кВт, для перегріву магнітопроводу 75 °С.

Результати представлені на рис.4.7 та табл. 4.4.

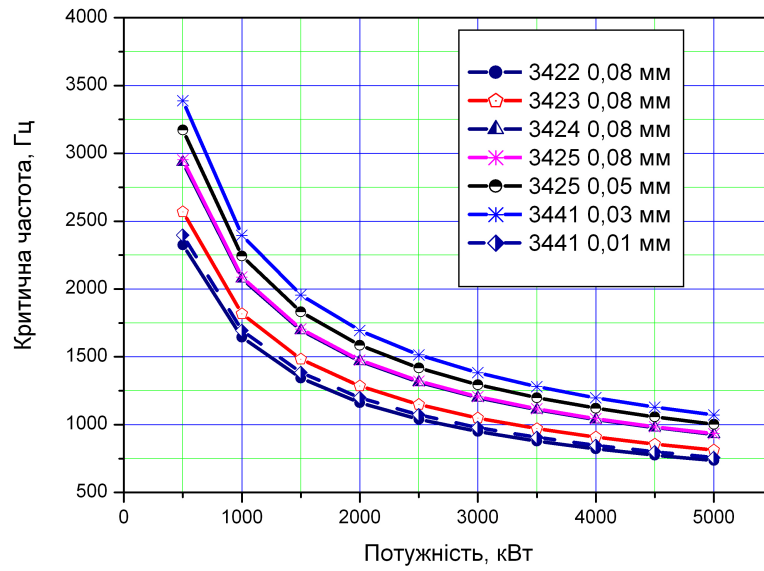


Рис. 4.7. Залежність критичної частоти для сталей різних марок від потужності

Залежність критичної частоти для сталей різних марок від потужності

Потужність, кВт	Критична частота для сталей різних марок (товщина стрічки)						
	3422 (0,08 мм)	3423 (0,08 мм)	3424 (0,08 мм)	3425 (0,08 мм)	3425 (0,05 мм)	3441 (0,03 мм)	3441 (0,01 мм)
500	2325	2569	2936	2953	3172	3388	2397
1000	1644	1817	2076	2088	2243	2396	1695
1500	1342	1483	1695	1705	1831	1956	1384
2000	1162	1285	1468	1476	1586	1694	1199
2500	1040	1149	1313	1321	1418	1515	1072
3000	949,16	1049	1199	1206	1295	1383	978,683
3500	878,752	971,021	1110	1116	1199	1280	906,085
4000	821,997	908,307	1038	1044	1121	1198	847,564
4500	774,986	856,36	978,697	984,321	1057	1129	799,091
5000	735,216	812,414	928,473	933,809	1003	1071	758,085

На рис. 4.8 представлена залежність значення критичної частоти для сталі марки 3424 (товщиною стрічки 0,08 мм) від потужності

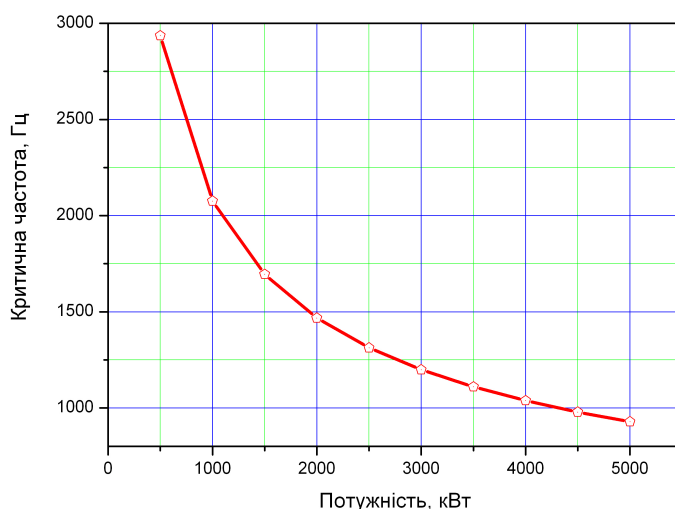


Рис. 4.8. Залежність критичної частоти для сталі марки 3424 (товщиною стрічки 0,08 мм) від потужності

Як бачимо з рис. 4.7, трансформатор, виготовлений зі сталей різних марок з товщиною стрічки від 0,01 до 0,08 мм, дозволяє реалізовувати відносно високі робочі частоти перетворювача при забезпеченні мінімальних габаритних показників та максимального ККД.

Представлені вище співвідношення та залежності дозволяють визначитися з одним з головних питань, пов'язаних із використанням тягових трансформаторів підвищеної частоти, а саме – яке значення мають втрати в магнітопроводі, в залежності від частоти та потужності трансформатора, для різних магнітних матеріалів.

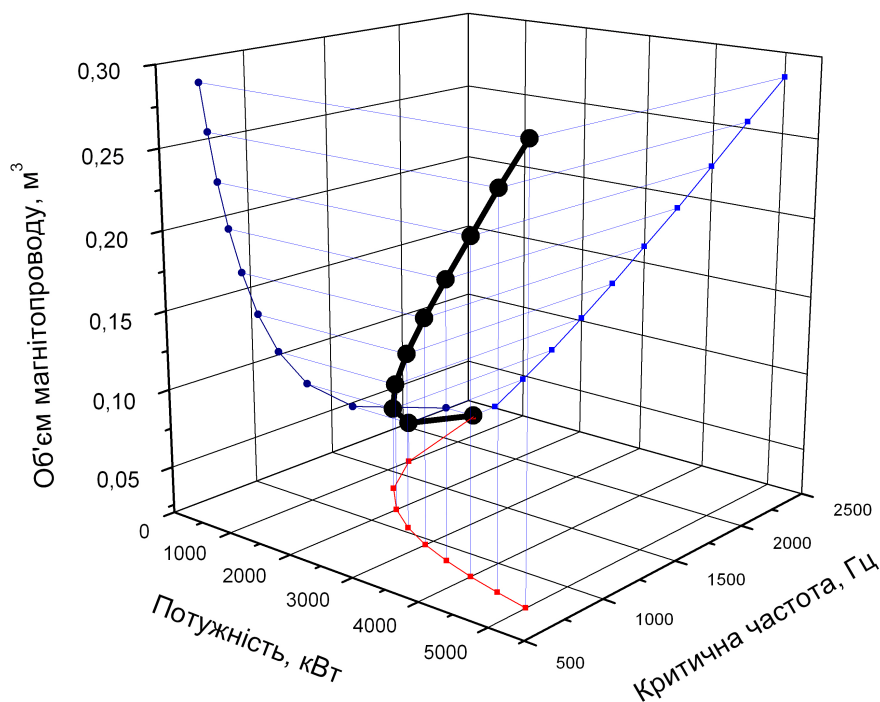


Рис. 4.9. Залежність об'єму магнітопроводу трансформатора зі сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) від потужності та критичної частоти

Втрати у магнітопроводі визначаються як добуток питомих втрат у магнітопроводі та об'єму магнітопроводу [58].

Поставлену задачу автором пропонується вирішувати у декілька етапів.

По-перше: визначимо залежність об'єму магнітопроводу від потужності для різних магнітних матеріалів, за умов роботи трансформатора на критичній частоті.

Таким чином, співвідношення (4.6), враховуючи (4.9), приймає вигляд:

$$\dots (4.10)$$

Результати відповідних розрахунків у графічному вигляді представлені на рис. 4.9 для сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) та деяких інших матеріалів на рис. 4.10

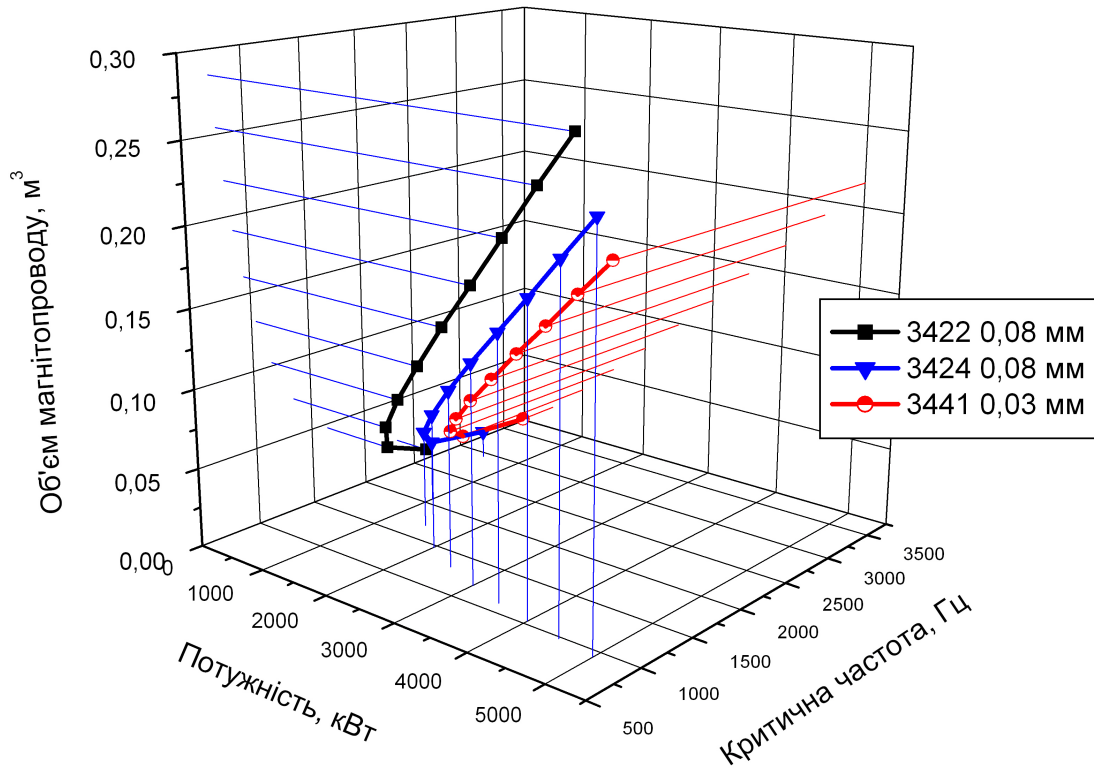


Рис. 4.10. Залежність об'єму магнітопроводу трансформатора зі сталі різних марок від потужності та критичної частоти

По-друге: використовуючи співвідношення (4.8), (4.9) та (4.10), визначимо оптимальні значення магнітної індукції, у діапазоні потужностей тягового трансформатора від 500 кВт до 5000 кВт, для значень критичних частот різних марок сталей.

Вираз (4.8) з урахуванням (4.9) та (4.10) приймає вигляд:

4.11)

Результати розрахунків залежності значення індукції від потужності та частоти, за виразом (4.11), у графічному вигляді представлені на рис. 4.11 для сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) та деяких інших матеріалів на рис. 4.12.

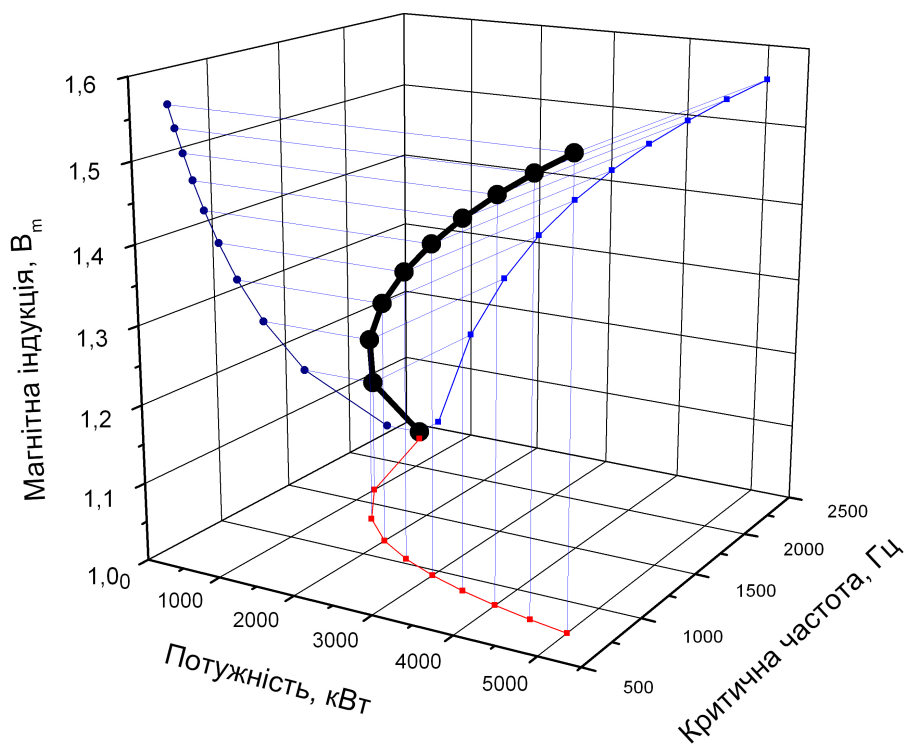


Рис. 4.11. Залежність значення магнітної індукції в магнітопроводі зі сталі марки 3422 (товщиною стрічки 0,08 мм) від потужності та критичної частоти

На третьому етапі визначимо потужність втрат у магнітопроводі тягового трансформатора підвищеної частоти для різних марок сталей в діапазоні потужностей від 500 кВт до 5000 кВт та відповідних значень критичної частоти.

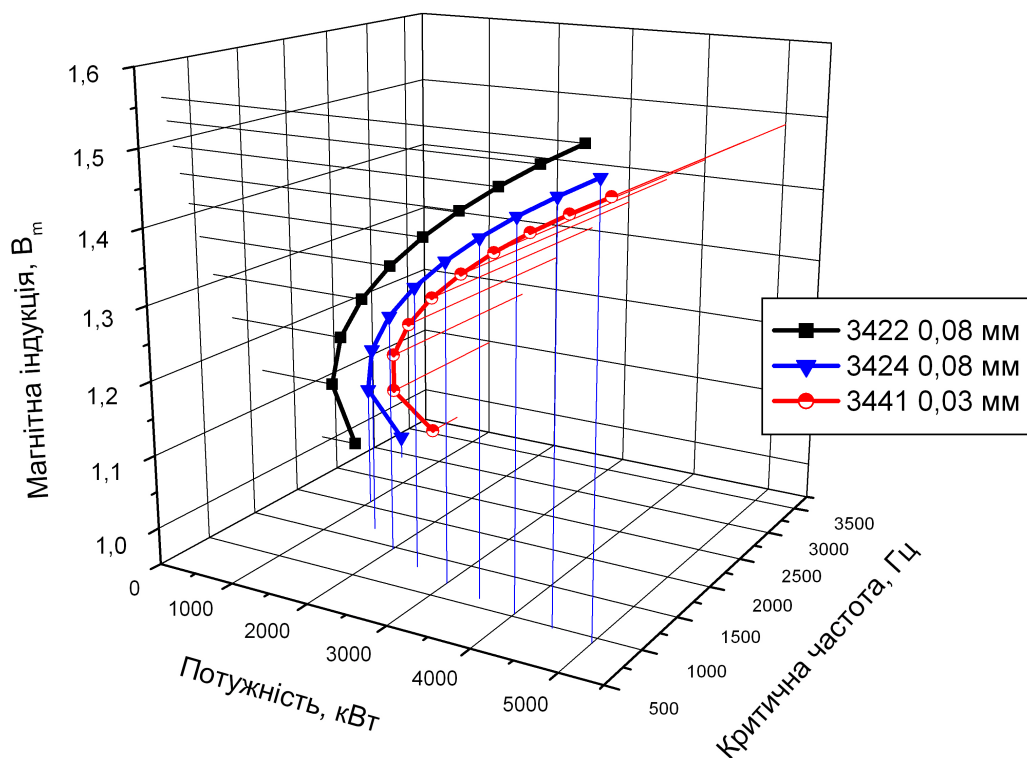


Рис. 4.12. Залежність значення магнітної індукції у магнітопроводі зі сталей різних марок від потужності та критичної частоти

Спочатку до виразу (4.4) підставимо значення та , які визначені за допомогою виразу (4.9) та (4.11) на другому етапі, це дозволить визначити питомі втрати для різних марок сталей у досліджуваному діапазоні потужностей. Потім визначимо відносні, до розрахункової потужності, значення втрат у магнітопроводах, об'єм яких , визначено за допомогою виразу (4.10).

Результати проведених розрахунків представлені на рис. 4.13, де втрати у магнітопроводі вказані у відсотках, по відношенню до розрахункового значення потужності, відповідно до виразу:

(4.12)

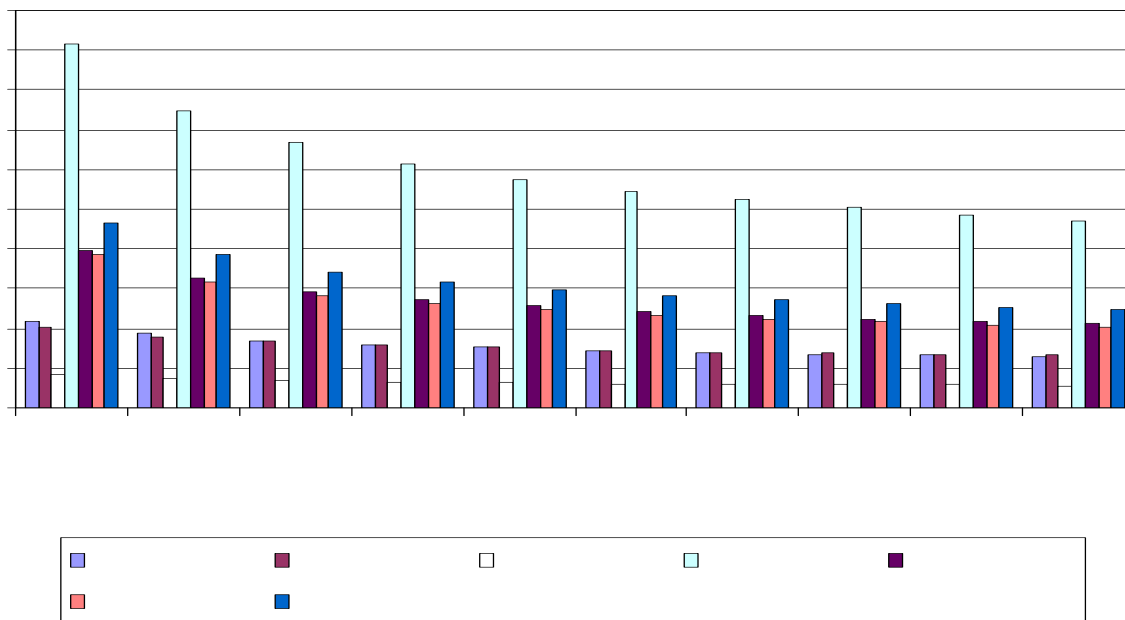


Рис. 4.12. Відносні втрати у магнітопроводі однофазного трансформатора підвищеної частоти з різних сталей в функції потужності

Як бачимо з рис. 4.12, у всьому діапазоні потужностей, що досліджується мінімальні втрати потужності мають місце в магнітопроводі, який виготовлено зі сталі марки 3424 (товщина стрічки 0,08 мм). Найбільші втрати потужності зафіксовані у магнітопроводі зі сталі марки 3425 (товщина стрічки 0,08 мм) [58].

Наведені результати досліджень відносяться до однофазних трансформаторів підвищеної частоти. Оскільки результати попередніх розділів визначили доцільність використання у запропонованих перетворювальних структурах трифазних трансформаторів підвищеної частоти, отримані результати з визначення втрат потужності у магнітопроводах однофазних трансформаторів можливо повністю перенести на трифазні трансформатори. Це твердження є справедливим, оскільки як

відомо, трифазні трансформатори можуть бути замінені трьома однофазними трансформаторами з тією самою сумарною потужністю, але при цьому на 19% збільшиться застосування електротехнічної сталі [159].

Тобто трифазні трансформатори підвищеної частоти будуть мати об'єм магнітопроводу на 19% менший, що дозволить зменшити втрати потужності на таке ж значення, при цьому до виразу (4.112) необхідно ввести коефіцієнт η , який враховує зменшення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора у порівнянні з однофазними.

Отримаємо:

$$\dots (4.13)$$

Діапазон потужностей, який досліджується для трифазних трансформаторів слід збільшити також у три рази – від 1500 кВт до 15000 кВт.

Результати розрахунків втрат потужності у магнітопроводі трифазних трансформаторів підвищеної частоти для сталей марок 3424 (0,08 мм) та 3425 (0,08 мм) представлені на рис. 4.14. Інші марки сталі не розглядалися, оскільки їх показники втрат є проміжними.

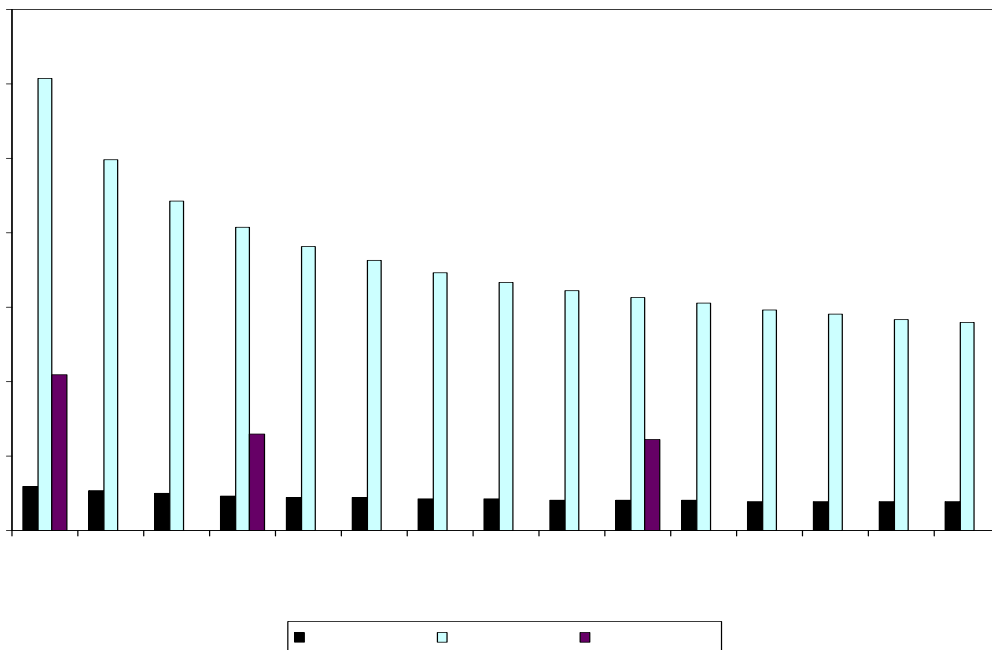


Рис. 4.14. Відносні втрати у магнітопроводі трифазного трансформатора підвищеної частоти з різних сталей в функції потужності

Для визначення ефективності використання трифазних трансформаторів підвищеної частоти, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, на рис. 4.14 представлені, відносні до потужності, стандартні значення втрат неробочого ходу трансформаторів, магнітопровід яких зібрано зі сталі марок 3404, 3405 або 3406 (товщина стрічки 0,27, 0,3 або 0,35 мм). Дані представлені для стандартного ряду потужностей та класів напруг 10 та 35 кВ [159]. Коефіцієнт потужності приймаємо приблизно $\eta \approx 0,81$ [58].

Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти

Показник		Потужність, кВт						
		1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
1		2	3	4	5	6	7	8
1	Критична частота, Гц	2076	1641	1313	1038	827	656	519
2	Втрати неробочого ходу, Вт	602	887	1283	1890	2750	4026	5933
3	Об'єм магнітопроводу, м ³	0,032	0,054	0,089	0,151	0,252	0,423	0,718

Об'єм магнітопроводу трифазного трансформатора промислової частоти будемо визначати виходячи з таких міркувань.

Втрати неробочого ходу визначаються геометричними розмірами магнітної системи та індукцією в ній. У [159] представлені значення питомих втрат в магнітопроводі трансформатора промислової частоти зі сталі 3405 (стрічка 0,30мм) при 50 Гц. Приймаючи, що магнітопровід є однорідним, визначимо масу магнітопроводу трансформаторів різної потужності (зі стандартного ряду), при індукції в магнітопроводі 1,6 Тл, виходячи зі стандартних значень втрат неробочого ходу, для трансформаторів класу напруг 10 та 35 кВ. Необхідні числові дані та результати розрахунків представлені у табл. 4.6. При визначенні об'єму приймаємо щільність електротехнічної сталі рівній 7650 кг/м³ [159].

Таблиця 4.6

Результати визначення об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора промислової частоти

Показник		Потужність, кВА						
		1000	1600	2500	4000	6300	10000	16000
1		2	3	4	5	6	7	8
1	Втрати неробочого ходу, Вт	2100	2800	3900	5200	7400	12300	17800
2	Питомі втрати, Вт/кг	1,15						
3	Маса магнітопроводу, кг	1826	2435	3391	4522	6435	10696	15478
4	Об'єм магнітопроводу, м ³	0,24	0,32	0,44	0,59	0,84	1,40	2,02

Результати порівняння об'ємів магнітопроводів трифазних трансформаторів

промислової та підвищеної частоти представимо графічно (рис.4.15).

Для реалізації можливості орієнтовного визначення виграшу в об'ємі магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти, будь-якої потужності, а не тільки значень стандартного ряду, у порівнянні з трифазними трансформаторами промислової частоти, пропонується графічну залежність, представлену на рис. 4.15, апроксимувати та отримати аналітичний вираз (у загальному вигляді - експоненціальна другого порядку):

(4.14).

Коефіцієнти апроксимації мають такі значення:

,

,

.

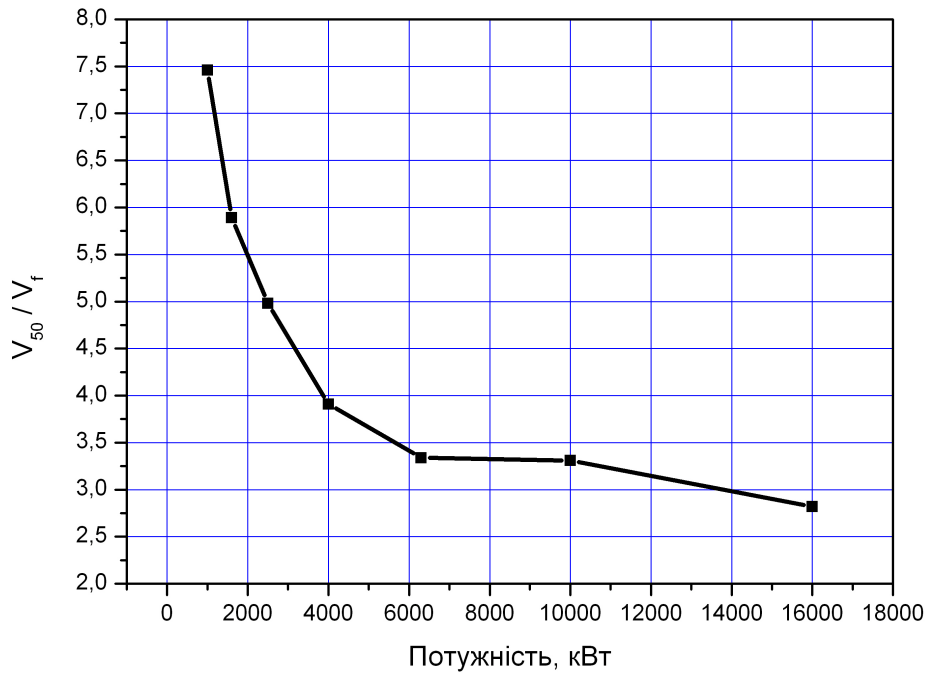


Рис. 4.15. Тенденція зміни об'єму магнітопроводу трифазного трансформатора підвищеної частоти у порівнянні з трансформатором промислової частоти при підвищенні їх потужності.

Результати апроксимації залежності

представлені на рис. 4.16.

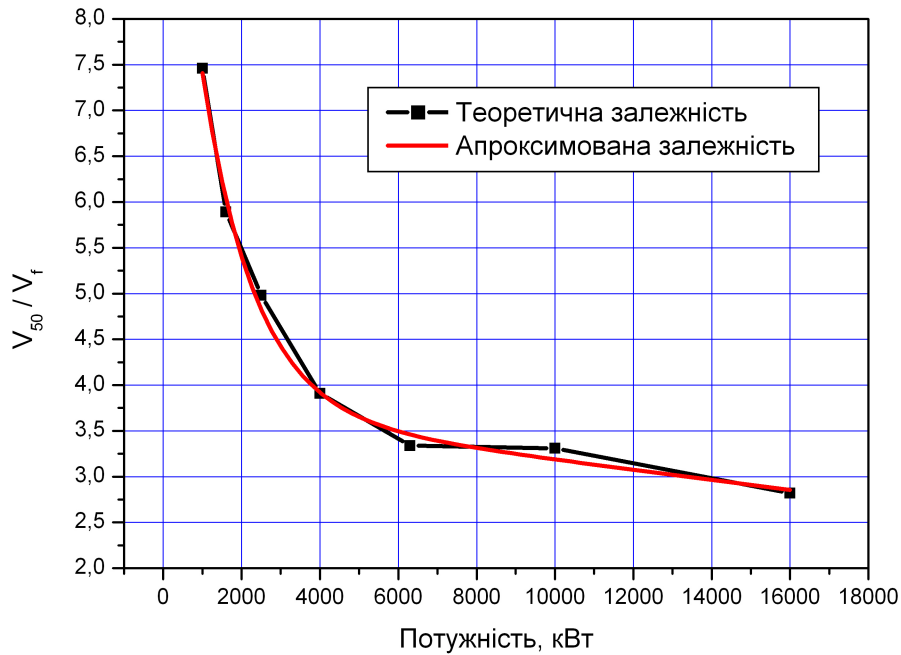


Рис. 4.16. Результати апроксимації залежності

Співвідношення (4.6) дозволяє визначити об'єм сталі магнітопроводу з урахуванням властивостей його матеріалу та конструктивних особливостей трансформатора.

Наприклад, визначимо, який буде мати об'єм магнітопроводу однофазний тяговий трансформатор підвищеної частоти (Гц) потужністю 5600 кВт, виготовлений зі сталі марки 3424 товщиною листа 0,08 мм:

мЗ.

Існуючий тяговий трансформатор типу ОЦР-5600/25 промислової частоти

має масу магнітопроводу 2263 кг. При щільності сталі об'єм магнітопроводу трансформатора типу ОЦР-5600/25 буде дорівнювати:

Тобто об'єми магнітопроводів трансформаторів потужністю 5600 кВт промислової

та підвищеної частоти відносяться між собою як:

Порівняємо отриманий результат зі значенням орієнтовного зменшення лінійних розмірів трансформатора при підвищенні частоти (табл. 2.1).

Для частоти 1000 Гц (табл. 2.1) зменшення лінійних розмірів трансформатора дорівнює 1,31 разу, розрахунковий вигравш в об'ємі магнітопроводу становитиме 1,12 разу. Між очікуваним та отриманим зменшенням габаритних розмірів трансформатора

доволі суттєва різниця

Пояснити таке розходження можна тим, що дані, представлені у табл. 2.1, стосуються габаритних розмірів трансформатора з урахуванням розмірів всього трансформатора, вираз (4.6) стосується тільки магнітопровода.

Представлені у цьому розділі результати досліджень дозволяють стверджувати, що зі збільшенням потужності трансформатора підвищеної частоти, з метою зменшення втрат потужності у магнітопроводі, слід зменшувати і робочу частоту. Це дещо зменшить виграш в об'ємі магнітопровода, але забезпечить збереження значення втрат у магнітопроводі на низькому рівні, що ілюструється графічно як залежність відношення втрат неробочого ходу трансформатора промислової частоти, до втрат у магнітопроводі

трансформатора на підвищену частоту, від потужності (рис. 4.17), визначених за табл. 4.5, 4.6.

Залежність , представлена на рис. 4.17, має значення від для потужності трансформатора 1000 кВА (рядок 2 стовпчик 2 табл. 4.5 та рядок 1

стовпчик 2 табл. 4.6), до значення для трансформатора потужністю

16000 кВА. Для інших потужностей трансформаторів співвідношення також є близькими до представлених значень, тому доцільно визначити середнє значення цієї функції та прийняти його як орієнтовне для подальших досліджень.

Для розглянутих значень потужностей трансформаторів (табл. 4.5 та 4.6) середнє

значення дорівнює:

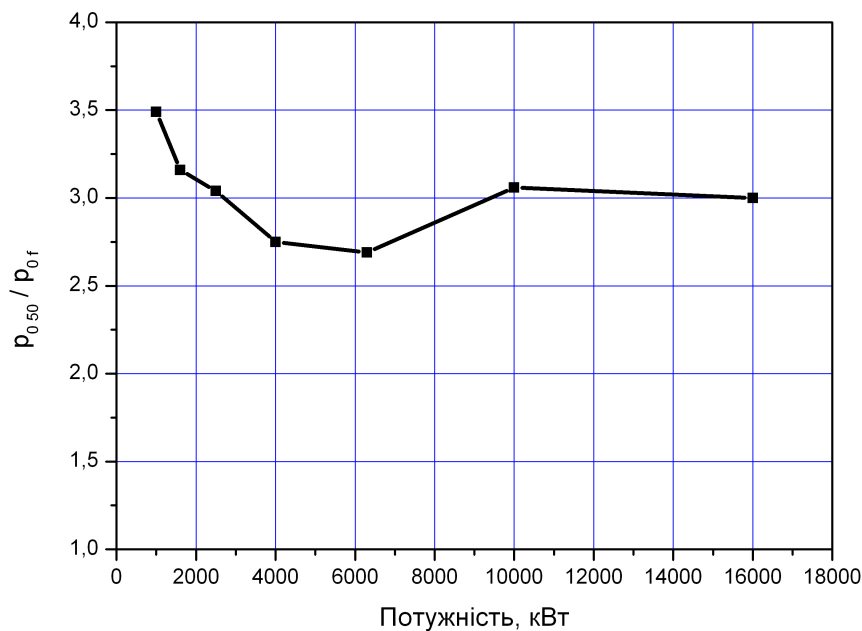


Рис. 4.17. Зменшення втрат у магнітопроводі трифазного трансформатора підвищеної частоти у порівнянні з трансформатором промислової частоти.

Отримане автором середнє значення функції у досліджуваному діапазоні потужностей дозволяє стверджувати, що використання трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти дозволяє зменшити втрати потужності у магнітопроводі приблизно в три рази, у порівнянні зі втратами потужності у магнітопроводі трифазного трансформатора промислової частоти.

4.4. Схема заміщення тягового трансформатора перетворювача

Для дослідження режимів роботи статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза необхідно визначити параметри та режими роботи його основних складових частин. Традиційно для дослідження властивостей та визначення параметрів трансформаторів використовуються схеми заміщення. Найбільш поширеною є Т-подібна схема заміщення трансформатора. Однофазний трансформатор складається з двох обмоток, які розташовані на магнітопроводі. Первинна обмотка підключається до джерела напруги, а вторинна до навантаження (рис.4.18) [150,155,160].

На рис. 4.18 прийняті такі позначення: R_1 , R_2 , R_L - активний опір та індуктивність первинної та вторинної обмоток відповідно; k - коефіцієнт взаємної індукції; R_L - опір навантаження.

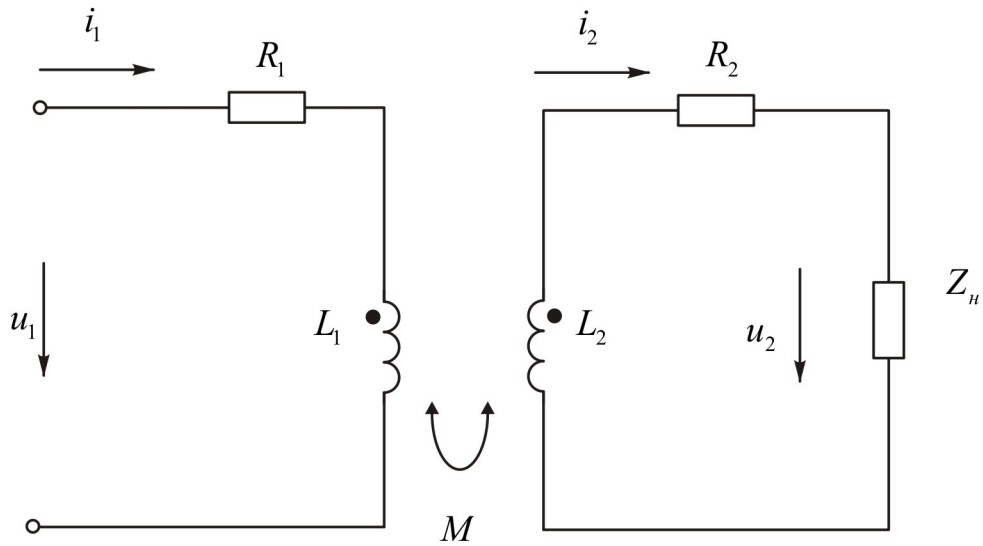


Рис. 4.18. Схема однофазного двообмоткового трансформатора.

За схемою рис. 4.18 складемо такі рівняння [155]:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \dot{i}_1 - M \dot{i}_2 \quad (4.17)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \dot{i}_2 + M \dot{i}_1 - Z_H i_2 \quad (4.18)$$

Для спрощення виконаємо перехід до приведенного трансформатора та представимо рівняння (4.17) та (4.18) у вигляді:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \dot{i}_1 - k L_2 \dot{i}_2 \quad (4.19)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \dot{i}_2 + k L_2 \dot{i}_1 - Z_H i_2 \quad (4.20)$$

де: k – коефіцієнт трансформації; R_1, L_1, R_2, L_2, Z_H – параметри трансформатора, приведені до первинної обмотки.

Тоді отримаємо:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \dot{i}_1 - k L_2 \dot{i}_2 \quad (4.21)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \dot{i}_2 + k L_2 \dot{i}_1 - Z_H i_2 \quad (4.22)$$

Додамо до рівняння (4.21) добуток i_1 , а до (4.22) добуток i'_2 ,

, отримаємо:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{S1} \frac{di_1}{dt} + R'_2 i'_2 + L'_{s2} \frac{di'_2}{dt} + u'_2 \quad (4.23)$$

;

$$u'_2 = R'_H i'_2 + L'_{s2} \frac{di'_2}{dt} + u_2 \quad (4.24)$$

Величина L_{S1} має назву індуктивність розсіювання первинної обмотки;
 L'_{s2} – індуктивність розсіювання приведена до первинної обмотки;
 L_{1n} – індуктивність первинної обмотки, яка обумовлена основним магнітним потоком. Еквівалентна схема трансформатора (Т- подібна схема заміщення), яка відповідає рівнянням (4.23) та (4.24) представлена на рис. 4.19.

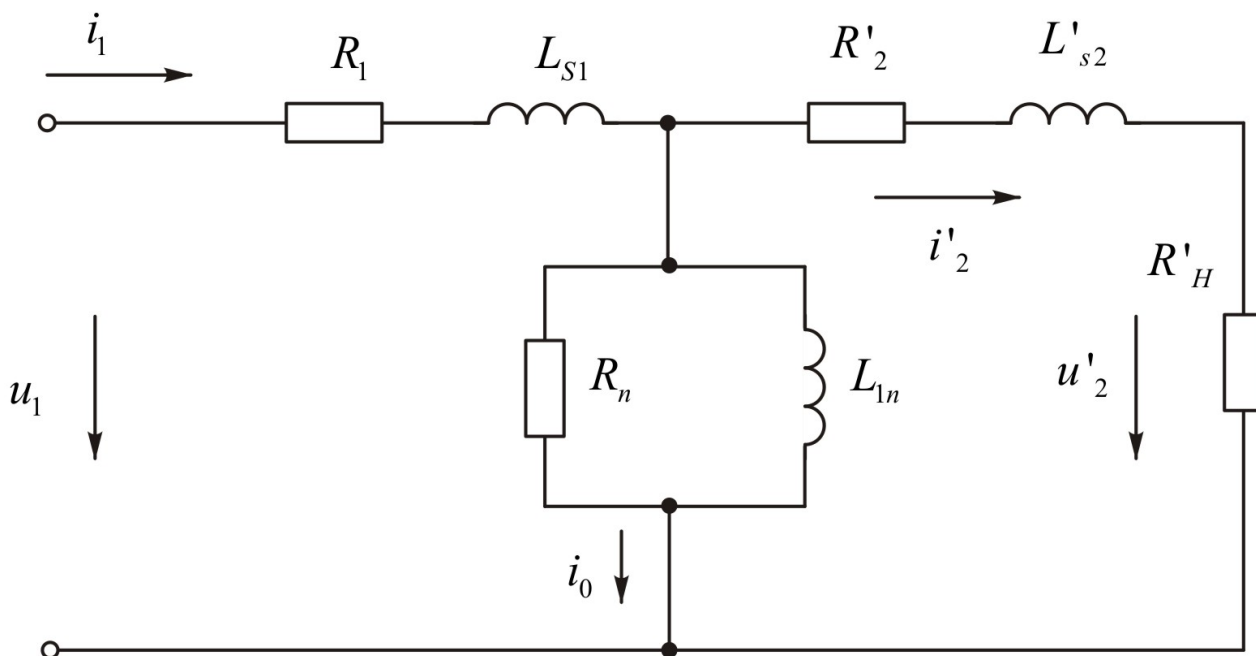


Рис. 4.19. Т-подібна схема заміщення трансформатора

На рис. 4.19: коло L_{S1} враховує явища намагнічування магнітопроводу (складова L_{S1}) та втрати у ньому (складова R_1); L_{1n} - струм намагнічування магнітопроводу.

При дослідженні роботи трифазних трансформаторів розглядаємо роботу однієї фази, так як вважаємо, що всі три фази навантажені симетрично. Для кожної з фаз використовується Т-подібна схема заміщення, представлена на рис. 4.19.

4.5. Параметри номінального режиму роботи тягового трансформатора підвищеної частоти

Особливість роботи тягових трансформаторів підвищеної частоти в запропонованих перетворювальних структурах тягової електропередачі багатосистемного електровоза (розділ 2) обумовлюється трьома факторами (за запропонованою автором класифікацією), які пов'язані з напругою у контактній мережі [63]:

- 1) нестабільність вхідної напруги трансформатора під впливом коливань напруги контактної мережі (фактор коливання);
- 2) зміна величини вхідної напруги трансформатора при зміні параметрів контактної мережі та схеми з'єднання мережевих випрямлячів перетворювача (фактор багатосистемності);
- 3) необхідність підтримки вихідної напруги трансформатора в заданих межах як вхідної напруги тягового контуру (фактор стабільності).

Перший фактор не залежить від структури перетворювача і визначається нормативними документами [161,162]. Для контактної мережі постійного струму номінальною напругою 3000 В мінімальна напруга складає 2200 В, максимальна 3850 В або 4000 В (за наявності режиму рекуперації енергії). Для контактної мережі змінного струму промислової частоти 50 Гц номінальною напругою 25000 В, мінімальна напруга складає 19000 В, а максимальна 29000 В.

У відсотковому співвідношенні значення цих напруг у першому наближенні

становитиме: , , , , [63].

За аналогією з існуючою системою тягового енергопостачання постійного струму напругою 3 кВ, пропонується прийняти такі значення коливання напруги у контактній мережі постійного струму підвищеної напруги (табл. 4.7.). Мінімальну напругу контактної мережі постійного струму підвищеного рівня напруги прийняти на рівні 73 % від номінальної, а максимальну – 133 % (з урахуванням можливості рекуперації).

Таблиця 4.7.

Значення коливання напруг підвищеного рівня у контактній мережі

Рівень напруги контактної мережі, В	Відносне значення напруги			
	Мінімальне, 73%	Номінальне, 100 %	Максимальне, 128 %	Максимальне при рекуперації, 133%
1	2	3	4	5
3000	2200	3000	3850	4000

6000	4400	6000	7700	8000
12000	8800	12000	15400	16000
24000	17600	24000	30800	32000

Отримані значення коливання напруги у контактній мережі постійного струму підвищеної напруги є орієнтовними та можуть бути використані при дослідженні основних режимів роботи обладнання багатосистемного електровоза.

Другий фактор обумовлено необхідністю зміни схеми з'єднання вхідних елементів мережевого контуру запропонованих перетворювальних структур при різних рівнях напруги у контактній мережі, що необхідно для реалізації багатосистемності електровоза. Попередні дослідження (розділ 3) показали, що при нарузі у контактній мережі постійного струму 3 кВ необхідне паралельне з'єднання кожного з мережевих випрямлячів до контактної мережі, тобто за схемою 1а (рис.3.27). При інших рівнях напруги у контактній мережі постійного струму та при змінній нарузі у контактній мережі доцільне використання поєднання мережевих випрямлячів за схемою 3а (рис. 3.26).

Зважаючи на вимоги до схеми з'єднання мережевих випрямлячів та враховуючи можливі відхилення напруги у контактній мережі постійного (табл. 4.7) та змінного струмів [161], представимо значення напруг, що діють на вході мережевих випрямлячів силових модулів тягового перетворювача при реалізації багатосистемності (табл. 4.8).

Табл. 4.8 побудована за даними табл. 3.1 та 4.7.

Таблиця 4.8

Значення напруг, що діють на вході мережевих випрямлячів силових модулів тягового перетворювача

Напруга контактної мережі		Схема 1а	Схема 3а
1	2	3	4
1	3 кВ	мінімальна	2200
2		номінальна	3000
3		максимальна	3850
4		максимальна при рекуперації	4000
5	6 кВ	мінімальна	1467
6		номінальна	2000
7		максимальна	2567
8		максимальна при рекуперації	2667
9	12 кВ	мінімальна	2934
10		номінальна	4000
11		максимальна	5134
12		максимальна при рекуперації	5334

13	24 кВ	мінімальна		5867
14		номінальна		8000
15		максимальна		10267
16		максимальна при рекуперації		10667
17	25 кВ 50 Гц	мінімальна		6333
18		номінальна		8333
19		максимальна		9667

Пояснимо представлені у табл. 4.8 числові значення.

При напрузі у контактній мережі 3 кВ на кожному з мережевих випрямлячів діє напруга контактної мережі з урахуванням можливих відхилень (табл.4.7). При інших напругах у контактній мережі реалізується послідовне з'єднання мережевих випрямлячів за схемою 3а. При номінальній напрузі в контактній мережі постійного струму 6 кВ на вході кожного з мережевих випрямлячів діє В (рядок 6, стовпчик 4 у табл. 4.8).

Перемикання схеми з'єднання мережевих випрямлячів для електровоза системи 3/6 кВ постійного струму має місце зміна напруги на вході мережевого випрямляча з 3000 В до 2000 В (зі значення строчки 2 стовпчика 3 табл. 4.8 до значення строчки 6 стовпчика 4 табл. 4.8), що призведе до зміни напруги на первинній обмотці трансформатора підвищеної частоти.

Для електровоза системи 3/12 кВ постійного струму така зміна становитиме: 3000 В – 4000 В; для системи 3/24 кВ постійного струму 3000 В – 8000 В (табл. 4.8). Для інших можливих систем живлення багатосистемного електровоза мають місце такі значення: 3/6/25 кВ – 3000/2000/8333 В; 3/12/25 кВ – 3000/4000/8333 В; 3/24/25 кВ – 3000/8000/8333 В (табл. 4.8).

Такі зміни вхідної напруги трансформатора підвищеної частоти не повинні мати суттєвий вплив на рівень вихідної напруги трансформатора (фактор стабільності), оскільки ця напруга є вхідною для тягового контуру перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза.

Кількість витків обмотки трансформатора при синусоїдальній формі напруги визначаємо як [150,151]:

$$(4.25)$$

де: U_1 – напруга обмотки; k – коефіцієнт заповнення сталлю перерізу магнітопровода. Для стрічкового магнітопровода з ізоляцією емаллю, при товщині стрічки 0,08 мм, коефіцієнт k дорівнює 0,85 [153].

Реалізувати стабільність вихідної напруги трансформатора при зміні схеми поєднання мережевих випрямлячів перетворювача та напруги контактної мережі,

відповідно до виразу (4.25), можливо за рахунок зміни кількості витків обмоток (первинної або вторинної), частоти вхідної напруги або магнітної індукції у магнітопроводі при незмінності площі перерізу магнітопровода.

Як показали попередні дослідження, частота та магнітна індукція у трансформаторах підвищеної частоти тісно пов'язані при забезпеченні мінімальних масогабаритних показників, тобто зміна однієї величини вимагає зміни іншої. Тому залишається один ефективний засіб – зміна кількості витків обмоток.

Такий спосіб використовується в системах зоно-фазового регулювання на діючих електровозах змінного струму [98,100,101,107,110] та системах регулювання напруги трансформаторів [159].

Регулювання кількості витків по первинній або вторинній стороні тягового трансформатора підвищеної частоти слід обумовлювати наявністю відповідної комутуючої апаратури і ніяким чином не впливає на суть проблеми, яка досліджується у дисертаційній роботі. Тому в подальшому це питання не розглядається і є темою окремих досліджень.

Вихідна напруга трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти є вхідною для тягового випрямляча (рис. 2.4, 2.5), який доцільно виконати за трифазною мостовою схемою, яка характеризується серед трифазних схем випрямлення відносно високими показниками якості вихідної напруги [76...79]. Тяговий випрямляч живить тяговий двигун постійного струму або тяговий інвертор, який живить асинхронний тяговий двигун. Тобто напруга тягового двигуна постійного або змінного струму визначає номінальну вихідну напругу тягового трансформатора підвищеної частоти (напругу вторинної обмотки).

На існуючих електровозах змінного струму, які експлуатуються на залізницях України, використовуються тягові двигуни пульсуючого струму з номінальними напругами від 950 В (двигун НБ-418К6) до 1600 В (двигун НБ-412К). Максимальна напруга для цих двигунів дорівнює відповідно 1180 В та 1850 В [100,107,165,166]. Серед номінальних напруг електричних апаратів, відповідно до ДСТУ 2773-94 «Апарати електричні тягові» [162], до яких відносяться і тягові електродвигуни, є два значення, які відповідають представленому діапазону напруг, це 1000 В та 1500 В.

Тоді для забезпечення максимального рівня уніфікації пропонується як номінальний рівень вихідної напруги тягового випрямляча прийняти значення 1500 В. Крім того, саме це значення напруги є номінальним для тягових двигунів постійного струму, які використовуються на електровозах постійного струму [5,167...170].

У разі використання трифазного мостового випрямляча його вхідна та вихідна напруги пов'язані співвідношенням [76]:

$$(4.26)$$

Приймаючи номінальну напругу тягового двигуна постійного струму рівною , отримаємо фазну напругу трансформатора підвищеної частоти, у разі живлення від випрямляча тягових двигунів постійного (пульсуючого) струму:

$$(4.27)$$

При використанні у тяговій електропередачі багатосистемного електровоза асинхронних тягових двигунів тяговий випрямляч повинен забезпечити підтримання на вході тягового інвертора (рис. 2.5) стабільного рівня напруги.

При використанні тягового інвертора трифазного автономного інвертора напруги (АІН) його вхідна напруга приблизно буде дорівнювати [97]:

$$(4.28)$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга на виході трифазного випрямляча тягового контуру при асинхронному тяговому двигуні (рис. 2.5).

Лінійна напруга сучасного асинхронного тягового двигуна типу АД914 (СТА1200), який використовується на електровозі ДСЗ, складає 1870 В [75,171]. Саме це значення пропонується прийняти як базове при визначенні значення вихідної фазної напруги трифазного трансформатора підвищеної частоти, який призначено для живлення тягового контуру при асинхронних тягових двигунах.

Тобто з (4.28) отримаємо необхідне значення на виході трифазного випрямляча тягового контуру запропонованого перетворювача:

$$(4.29)$$

Саме це значення пропонується прийняти як базове при визначенні значення вихідної фазної напруги трифазного трансформатора підвищеної частоти, який призначено для живлення тягового контуру при асинхронних тягових двигунах.

Тобто за аналогією з виразом (4.27) отримаємо:

$$(4.30)$$

Таким чином, автор пропонує: для запропонованих структур статичних перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів вихідну фазну напругу трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти приймаємо на рівні 640 В, у разі використання тягових двигунів постійного (пульсуючого струму) та 1026 В при використанні асинхронних тягових двигунів.

Для перетворювальних структур, визначених у попередніх розділах 2 та 3, як раціональні, з точки зору структурної надійності та уніфікації, приймаємо розрахунковим режим підключення мережевих випрямлячів за схемою 1а (рис.3.27) до контактної мережі постійного струму з напругою 3 кВ, оскільки цей режим присутній у будь-якому варіанті побудови статичного перетворювача підвищеної частоти для тягової

електропередачі багатосистемного електровоза (табл. 2.7).

Розрахунковий рівень вхідної напруги перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза у цьому режимі буде дорівнювати , оскільки первина обмотка трансформатора підвищеної частоти підключається крізь мережевий інвертор до контактної мережі постійного струму.

Втрати та струм неробочого ходу залежать від розрахункової потужності трансформатора [159].

Для проведення подальших досліджень режимів роботи тягового статичного перетворювача приймаємо: потужність тягового двигуна постійного струму еквівалентну потужності на валу тягового двигуна ЕД-141У1 (електровоз ДЕ1) - 728 кВт при

коефіцієнті корисної дії 93,3% споживана потужність становить ; потужність асинхронного тягового двигуна еквівалентну потужності на валу тягового двигуна АД914 (електровоз ДС3) - 1200 кВт при коефіцієнті корисної дії 95,5%

споживана потужність становить [5,171].

Серед визначених структур присутні силові модулі М1, М2 та М3 (розділи 2 та 3), тобто до виходу трифазного трансформатора підвищеної частоти підключаються тягові контури, які живлять відповідно один, два або три тягових двигуни.

До складу тягового контуру при тягових двигунах постійного струму (рис. 2.4) входить тяговий випрямляч та трифазний тяговий інвертор (рис. 2.5) при асинхронних тягових двигунах. У трифазних системах кращими показниками як енергетичними, так і якості вихідної напруги та струму, характеризуються трифазні мостові схеми [76...79]. Саме тому для тягового випрямляча та тягового інвертора, які входять до складу тягового контуру статичного перетворювача підвищеної частоти тягового привода електровоза, автором пропонується використати трифазні мостові схеми.

Коефіцієнти корисної дії тягового випрямляча та тягового інвертора у першому наближенні приймаємо 0,99, що відповідає показникам реальних тягових перетворювачів електровозів змінного струму [100].

Попередні дослідження (розділи 2 та 3) показали, що вихідна потужність трифазного трансформатора підвищеної частоти залежить від типу силового модуля. При силовому модулі М1 до трансформатора підключається тяговий контур для живлення одного тягового двигуна, при М2 – двох та при М3 – трьох.

Автором пропонується такий метод визначення потужності трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти для різних типів силових модулів та виду тягового двигуна.

По-перше, за типом силового модуля визначається навантаження трифазного трансформатора.

Наприклад, при силовому модулі М1 та тяговому двигуні постійного струму, потужністю 780 кВт, еквівалентною тяговому двигуну ЕД-141У1 та прийнятому вище коефіцієнті корисної дії тягового випрямляча 0,99, потужність трифазного трансформатора становитиме:

$$(4.31)$$

кВт.

Коефіцієнт 1,05 у виразі (4.31) характеризує встановлену потужність трифазного трансформатора (при активно-індуктивному навантаженні) [76].

По-друге, визначається розрахункова потужність однієї фази трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти, за умови симетричного навантаження.

Наприклад, вихідна потужність однієї фази трифазного трансформатора підвищеної частоти при тяговому двигуні постійного струму та силовому модулі типу М1, з урахуванням результату виразу (4.31), становитиме:

$$\text{кВт.} \quad (4.32)$$

За аналогічним методом розрахуємо потужність трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти при використанні асинхронних тягових двигунів потужністю 1256 кВт, еквівалентною тяговому двигуну АД914, вихідна потужність трифазного трансформатора та його однієї фази, з урахування коефіцієнтів корисної дії тягового випрямляча (на рівні 0,99) та тягового інвертора (на рівні 0,99) становитиме:

$$\text{кВт,} \quad (4.33)$$

$$\text{кВт.} \quad (4.34)$$

На третьому етапі визначається струм номінального режиму роботи трансформатора при різних видах тягових двигунів та різних типах силових модулів.

Наприклад, вихідний струм трифазного трансформатора підвищеної частоти у номінальному режимі роботи та при різних видах тягових двигунів, з урахуванням раніш визначених рівнів вихідних напруг трансформатора, дорівнюватиме:

- при тяговому двигуні постійного струму з (4.32)

$$(4.35)$$

;

- при асинхронному тяговому двигуні з (4.34)

$$(4.36)$$

При силових модулях типів М2 та М3 доцільно, з точки зору надійної роботи тягових двигунів та реалізації принципів індивідуального приводу, використовувати трьох та чотирьохобмоткові трифазні трансформатори. Тобто, на одному стрижні

розташовувати три або чотири обмотки, з яких одна первина та дві (три) вторинні. Таке схематичне рішення дозволить при аварійних режимах відключати тяговий контур, в якому спостерігається коротке замикання або інших не регламентованих режим роботи.

Потужність трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при розрахункових тягових двигунах постійного струму становитиме:

$$\text{кВт.} \quad (4.37)$$

У виразі (4.37), у відмінності від (4.31) при силовому модулі М1 силовий модуль М2 впливає на сумарну потужність навантаження, тобто враховується два тягових двигуни потужністю 780 кВт та ККД тягових випрямлячів на рівні 0,99.

Потужність однієї фази триобмоткового трансформатора:

$$\text{кВт.} \quad (4.38)$$

Струм однієї вихідної обмотки трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при тягових двигунах постійного струму буде дорівнювати:

$$\text{;} \quad (4.39)$$

Аналогічно потужність трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при розрахункових асинхронних тягових двигунах становитиме:

$$\text{кВт.} \quad (4.40)$$

Потужність однієї фази триобмоткового трансформатора:

$$\text{кВт.} \quad (4.41)$$

Струм однієї вихідної обмотки трифазного триобмоткового трансформатора підвищеної частоти силового модуля М2 при асинхронних тягових двигунах становитиме:

$$\text{;} \quad (4.42)$$

Аналогічним чином розрахуємо параметри номінального режиму роботи тягового трансформатора підвищеної частоти силового модуля МЗ при тягових двигунах постійного струму та асинхронних тягових двигунах:

$$\text{кВт}; \quad (4.43)$$

$$\text{кВт}; \quad (4.44)$$

$$; \quad (4.45)$$

$$(4.46)$$

$$\text{кВт};$$

$$\text{кВт}; \quad (4.47)$$

$$(4.48)$$

Порівнявши значення струмів вторинних обмоток трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти для різних силових модулів та різних видах тягових двигунів приймаємо як середнє розрахункове:

- номінальний вихідний струм трансформатора при ТДПС

$$(4.49)$$

;

- номінальний вихідний струм трансформатора при АТД

$$(4.50)$$

Сучасні технології будівництва трансформаторів дозволяють отримати коефіцієнти корисної дії трансформаторів на рівні 98...99% [100,150,150]. Тому у першому наближенні приймаємо, що коефіцієнт корисної дії тягового трифазного трансформатора

підвищеної частоти дорівнює

З огляду на це, визначимо номінальні параметри трансформатора для розрахункового режиму роботи – живлення первинних обмоток трансформатора від однофазних мережеских інверторів зі зсувом напруг 120 ел. градусів, які підключені паралельно з фільтрами та мережевими випрямлячами до контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ. Діюче значення вхідної напруги, за першою гармонікою, трифазного трансформатора підвищеної частоти, при однофазному напівмостовому інверторі мережевого контуру запропонованого перетворювача, дорівнює [76]:

$$(4.51)$$

У залежності від типу силового модуля (M1, M2, M3) та виду тягового двигуна вхідна потужність тягового трифазного трансформатора (повна та на один стержень) і вхідний струм однієї фази трансформатора, будуть дорівнювати.

1) силовий модуль M1, тяговий двигун постійного струму

$$(4.52)$$

кВт,

$$(4.53)$$

кВт,

$$(4.54)$$

;

2) силовий модуль M1, асинхронний тяговий двигун

$$(4.55)$$

кВт,

$$(4.56)$$

кВт,

$$(4.57)$$

Результати розрахунків вхідних параметрів тягового трансформатора підвищеної частоти представлені у табл. 4.9.

За результатами проведених досліджень відмітимо, що параметри номінального режиму роботи тягового трансформатора підвищеної частоти визначається не тільки

потужністю тягових двигунів, але і типом силового модуля та видом тягового двигуна. При розрахункових двигунах постійного струму потужністю 728 кВт номінальна вхідна потужність тягового трансформатора підвищеної частоти знаходиться в межах від 839,9 до 2519,6 кВт, в залежності від типу силового модуля. При розрахункових асинхронних тягових двигунах потужністю 1200 кВт вхідна потужність трансформатора буде знаходитися в межах від 1366,1 до 4098,2 кВт. При силових модулях типів М2 та М3 доцільно, з точки зору надійної роботи тягових двигунів та реалізації принципів індивідуального привода, використовувати трьох та чотирьохобмоткові трифазні трансформатори, а при силових модулях типу М1 слід використовувати двообмоткові трансформатори.

Кожна первина обмотка трифазного трансформатора підключається до індивідуального однофазного інвертора напруги, який живиться у розрахунковому режимі від контактної мережі постійного струму напругою 3000 В. При напівмостовій схемі інвертора мережевого контуру його вихідна напруга, тобто напруга живлення тягового трансформатора підвищеної частоти, буде дорівнювати 1350 В.

Таблиця 4.9

Значення вхідних параметрів тягового трансформатора підвищеної частоти при різних видах тягових двигунів та типах силових модулів

Параметр вхідного кола		Тяговий двигун постійного струму			Асинхронний тяговий двигун		
		Тип силового модуля					
		М1	М2	М3	М1	М2	М3
1		2	3	4	5	6	7
1	Вхідна потужність, кВт	839,9	1679,7	2519,6	1366,1	2732,1	4098,2
2	Потужність одного стержня, кВт	280	559,9	839,9	455,4	910,7	1366,1
3	Вхідний струм однієї фази трансформатора, А	103,7	207,4	311,1	168,7	337,3	505,9

4.6. Параметри схеми заміщення тягового трансформатора підвищеної частоти у режимі неробочого ходу

Для визначення параметрів схеми заміщення тягового трансформатора підвищеної частоти (рис. 4.19) пропонується використати метод знаходження активної та реактивної складової з повних опорів вхідного, вихідного та кола намагнічування трансформатора, для заданих режимів роботи трансформатора. Параметри схеми заміщення необхідні для проведення моделювання роботи перетворювача в основних

режимах.

Схема заміщення трансформатора підвищеної частоти для режиму неробочого ходу представлена на рис. 4.20 [150].

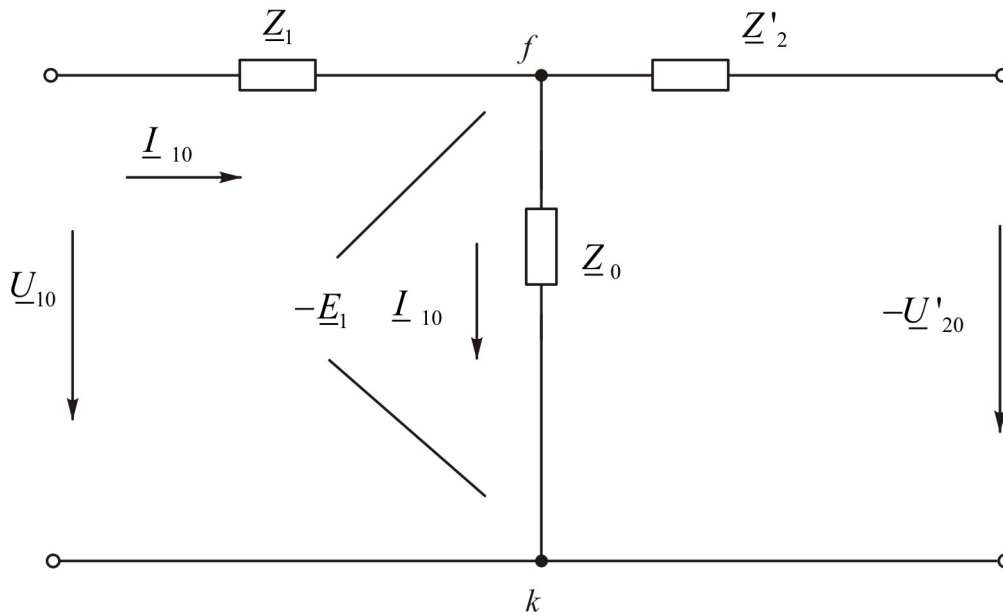


Рис. 4.20. Схема заміщення трансформатора підвищеної частоти для режиму неробочого ходу

Параметри схеми заміщення (рис.4.20) визначаємо з таких співвідношень [150]:

$$(4.58)$$

$$(4.59)$$

$$(4.60)$$

де: U_{10} – напруга на первинній обмотці трансформатора у режимі неробочого ходу;
 I_{10} – струм неробочого ходу; Z_1 – активний опір гілки намагнічування; Z_0 – магнітні втрати (втрати неробочого ходу); Z_2' – індуктивний опір кола намагнічування.

Для силових трансформаторів у режимі неробочого ходу опір гілки намагнічування не враховує активний та індуктивний опір первинної обмотки [150].

У режимі неробочого ходу (електровоз нерухомий та відсутні будь-які одиниці ЕРС на тяговому плечі) на струмоприймачеві електровоза діє напруга шин тягової підстанції. Відповідно до ГОСТ 6962-75 «Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений» [161] для системи 3 кВ постійного струму напруга на шинах тягової підстанції становить 3300 В. Тобто, аналогічно за виразом (4.51), визначимо значення напруги неробочого ходу при дослідженні схеми заміщення

трансформатора на рис. 4.20, рівнем:

$$(4.61)$$

Струм неробочого ходу трансформатора залежить від потужності та робочої напруги трансформатора. Серед стандартного ряду потужностей трансформаторів близькими значеннями до представлених у табл. 4.9 значень вхідної потужності, є: 1000 кВА; 1600 кВА; 2500 кВА; 4000 кВА; 6300 кВА [159]. Цей ряд потужностей перекриває діапазон потужностей тягових трансформаторів підвищеної частоти від 839,9 кВт до 4098,2 кВт, представлених у табл. 4.9 (рядок 1), при різних типах силових модулів та видах тягового двигуна.

У першому наближенні приймаємо стандартні значення струмів неробочого ходу, відповідно до потужності трифазного трансформатора. Так для трансформатора потужності 1000 кВА струм неробочого ходу дорівнює від номінального значення [159, с.45].

Номінальний струм мережевої обмотки однієї фази трансформатора визначаємо для номінального значення потужності зі стандартного ряду та напруги контактної мережі (з (4.51)):

$$(4.62)$$

При потужності трансформатора 1000 кВА, струм первинної обмотки дорівнює:

Звідси значення струму неробочого ходу, при потужності трансформатора 1000 кВА:

Для потужності трансформатора 1600 кВА стандартне значення струму неробочого ходу 1,3%; для 2500 кВА – 1,0%; для 4000 кВА та 6300 кВА по 0,9% [159].

Втрати неробочого ходу для прийнятого матеріалу магнітопровода трансформатора підвищеної частоти, для значень потужності 1000 кВт, 1600 кВт, 2500 кВт, 4000 кВт та 6300 кВт представлені у табл. 4.5 та відповідно дорівнюють: 602 Вт, 887 Вт, 1283 Вт, 1890 Вт та 2750 Вт.

Тоді активний опір гілки намагнічування схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти (рис. 4.20) при потужності трансформатора 1000 кВА за (4.58) дорівнює:

$$(4.63)$$

Повний опір гілки намагнічування за (4.57):

$$(4.64)$$

Індуктивний опір кола намагнічування за (4.59):

$$(4.65)$$

Індуктивність кола намагнічування (рис. 4.19) трансформатора підвищеної частоти потужністю 1000 кВт при робочій частоті f , яка відповідає критичній частоті у табл. 4.5, дорівнює [172]:

$$(4.66)$$

Таблиця 4.10

Параметри схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти для режиму неробочого ходу при різних значеннях потужності

Параметр		Потужність, кВт				
		1000	1600	2500	4000	6300
1		2	3	4	5	6
1	Втрати неробочого ходу , Вт	602	887	1283	1890	2750
2	Струм неробочого ходу , А	3,46	5,14	6,18	8,89	14,01
3	Активний опір гілки намагнічування , Ом	50,3	33,6	33,6	23,9	14,0
4	Повний опір кола намагнічування , Ом	429,2	288,9	240,3	167,1	106,0
5	Індуктивний опір кола намагнічування , Ом	426,2	287,0	237,9	165,3	105,1
6	Робоча частота трансформатора , Гц	2076	1641	1313	1038	827
7	Індуктивність кола намагнічування , Гн	0,033	0,028	0,029	0,025	0,020

Результати визначення параметрів схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти для режиму неробочого ходу для інших значень потужності наведені у табл. 4.10

За даними табл. 4.10 побудуємо залежність активного опору та індуктивності кола намагнічування трифазного трансформатора підвищеної частоти в функції потужності (для однієї фази) (рис. 4.21 та 4.22).

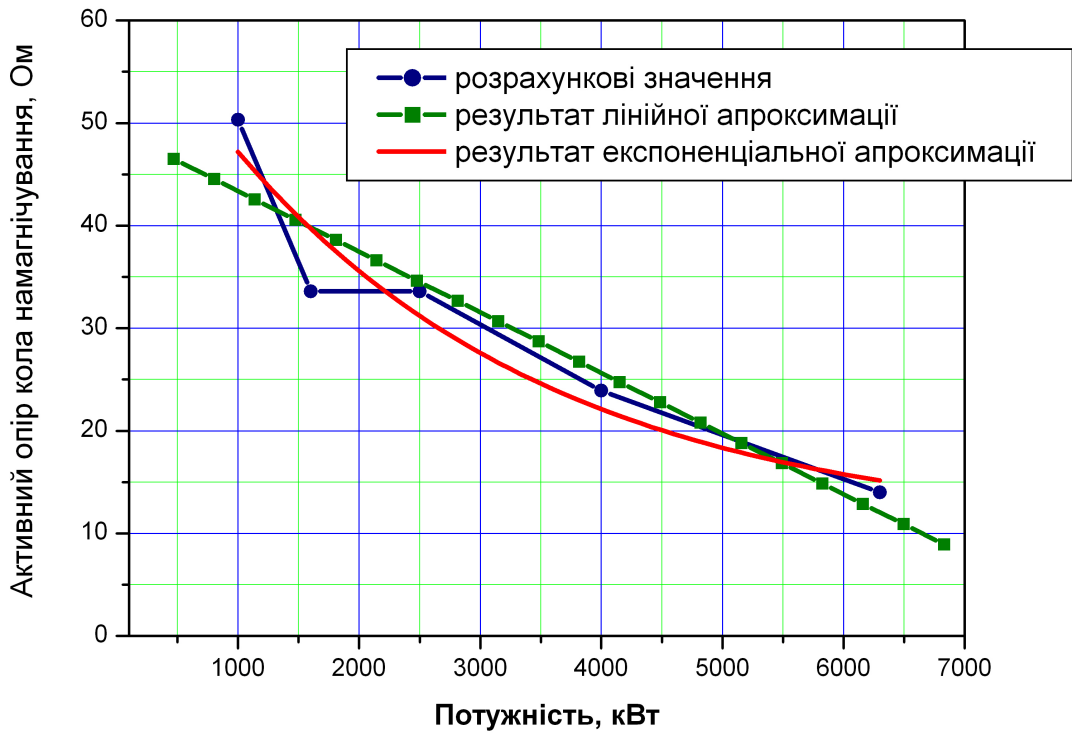


Рис. 4.21. Залежність активного опору кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності

Для апроксимації отриманих за розрахунками даних використовуємо аналітичну формулу (4.14). Результати апроксимації залежностей та представлені на рис. 4.21 та 4.22.

Коефіцієнти апроксимації залежності активного опору кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності мають такі значення:

Для апроксимування залежності індуктивності намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності використана лінійна залежність виду:

$$(4.67)$$

Коефіцієнти апроксимації залежності індуктивності намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності (рис. 4.22) мають наступні значення:

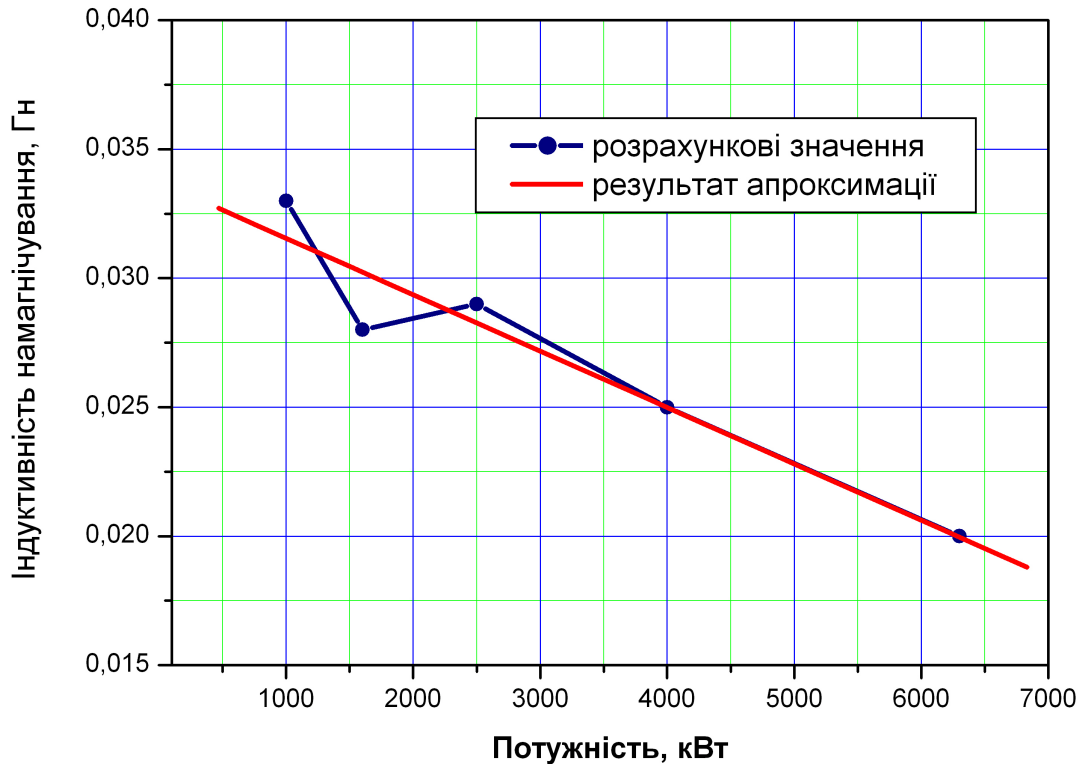


Рис. 4.22. Залежність індуктивності намагнічування трансформатора підвищеної частоти від потужності

У разі використання лінійної апроксимації для розрахункової залежності (рис. 4.21) коефіцієнти апроксимації приймають значення:

Використання лінійної апроксимації дозволяє дещо спростити попередні розрахунки параметрів схеми заміщення трансформатора підвищеної частоти.

Отримані в результаті апроксимації розрахункових значень, аналітичні форми залежностей:

та дозволяють отримати орієнтовні значення параметрів кола намагнічування трансформатора підвищеної частоти для будь-якого значення потужності в діапазоні кВА.

4.7. Параметри схеми заміщення тягового трансформатора підвищеної частоти у режимі короткого замикання

Для режиму короткого замикання схема заміщення трансформатора підвищеної частоти представлена на рис. 4.23 [150].

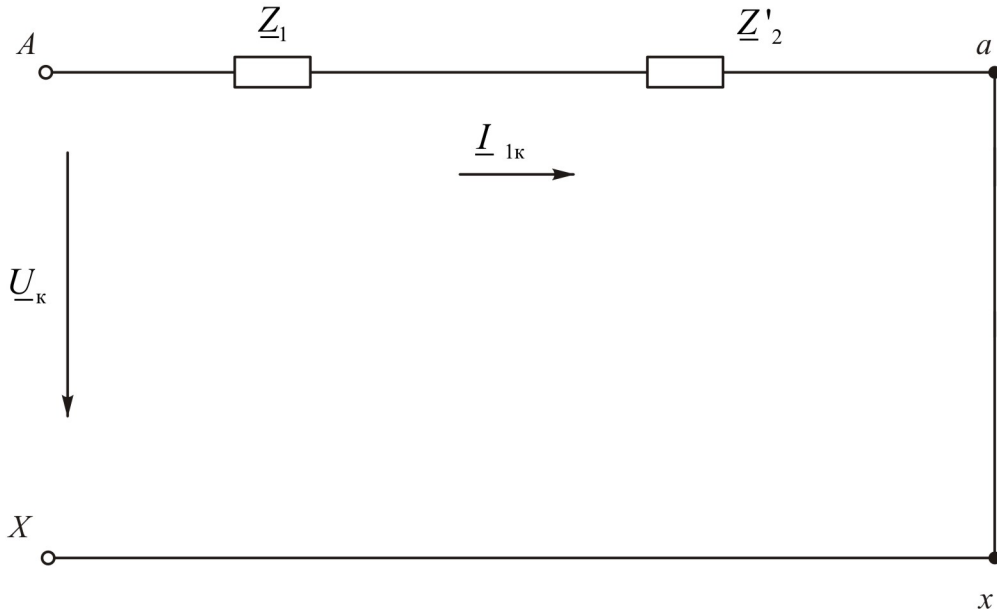


Рис. 4.23. Схема заміщення трансформатора у режимі короткого замикання

При проведенні дослідів короткого замикання втратами у сталі нехтують і тому вважають, що вся потужність, яка підводиться до первинної обмотки - потужність короткого замикання $P_{1к}$, йде на нагрів дротів обмоток та визначає величину їх активного опору [150,173]:

$$R_{1к} = \frac{P_{1к}}{I_{1к}^2} \tag{4.68}$$

де $I_{1н}$ – номінальний струм первинної обмотки, при дії на первинній стороні $U_{1н}$ - фазного трансформатора напруги короткого замикання $U_{1к}$.

Активний опір первинної та приведений опір вторинної обмоток приблизно дорівнюють [150]:

$$R_1 \approx R'_2 \tag{4.69}$$

Потужність короткого замикання трифазного трансформатора підвищеної частоти, що розглядається, визначимо зі співвідношення [174]:

$$P_{1к} = 3 I_{1к}^2 R_{1к} \tag{4.70}$$

де: σ – втрати неробочого ходу.

Приймаючи середнє значення співвідношення втрат неробочого ходу та короткого замикання на рівні трьох, отримаємо:

$$R_{1к} = \frac{P_{1к}}{3 I_{1к}^2} \tag{4.71}$$

Визначимо значення активних опорів обмоток трансформаторів ряду потужностей 1000 кВА, 16000 кВА, 2500 кВА, 4000 кВА та 6300 кВА.

Для трансформатора потужністю 1000 кВА, при втрати неробочого ходу складають (табл. 4.10), значення потужності короткого замикання дорівнює:

$$(4.72)$$

Активний опір короткого замикання трифазного трансформатора підвищеної частоти з (4.68) становитиме:

$$(4.73)$$

Тоді активний опір первинної та приведений опір вторинної обмоток приблизно за виразом (4.69) дорівнюють:

$$(4.74)$$

Активний опір вторинної обмотки трансформатора визначається за таким виразом [150]:

$$(4.75)$$

При потужності трансформатора 1000 кВА та номінальних напругах первинної та вторинної обмоток при тяговому двигуні постійного струму активний опір вторинної обмотки дорівнює:

$$(4.76)$$

Результати визначення втрат короткого замикання, опору короткого замикання та активних опорів первинної та вторинної обмоток для інших трифазних трансформаторів підвищеної частоти з прийнятого ряду потужностей, при різних видах тягових двигунів, представлені у табл. 4.11.

За даними табл. 4.11 побудуємо залежність активного опору первинної та вторинної обмоток трифазного трансформатора підвищеної частоти в функції потужності (для однієї фази) (рис. 4.24...4.26).

Таблиця 4.11

Втрати короткого замикання та активні опори трифазних трансформаторів підвищеної частоти при тягових двигунах постійного струму

Параметр		Потужність, кВт				
		1000	1600	2500	4000	6300
1		2	3	4	5	6
1	Втрати неробочого ходу , Вт	602	887	1283	1890	2750
2	Втрати короткого замикання , Вт	1806	2661	3849	5670	8250
3	Опір короткого замикання , Ом	0,0099	0,0057	0,003	0,002	0,001
4	Активний опір первинної обмотки , Ом	0,0049	0,0028	0,0017	0,0010	0,0006
5	Активний опір вторинної обмотки при , Ом	0,00028	0,00016	0,00009	0,00005	0,00003
6	Активний опір вторинної обмотки при , Ом	0,00071	0,00041	0,00024	0,00014	0,00008

Для апроксимації отриманих за розрахунками даних (табл. 4.11) використовуємо аналітичну формулу (4.14). Результати апроксимації залежностей та представлені на рис. 4.24...4.26 у вигляді відповідних графіків.

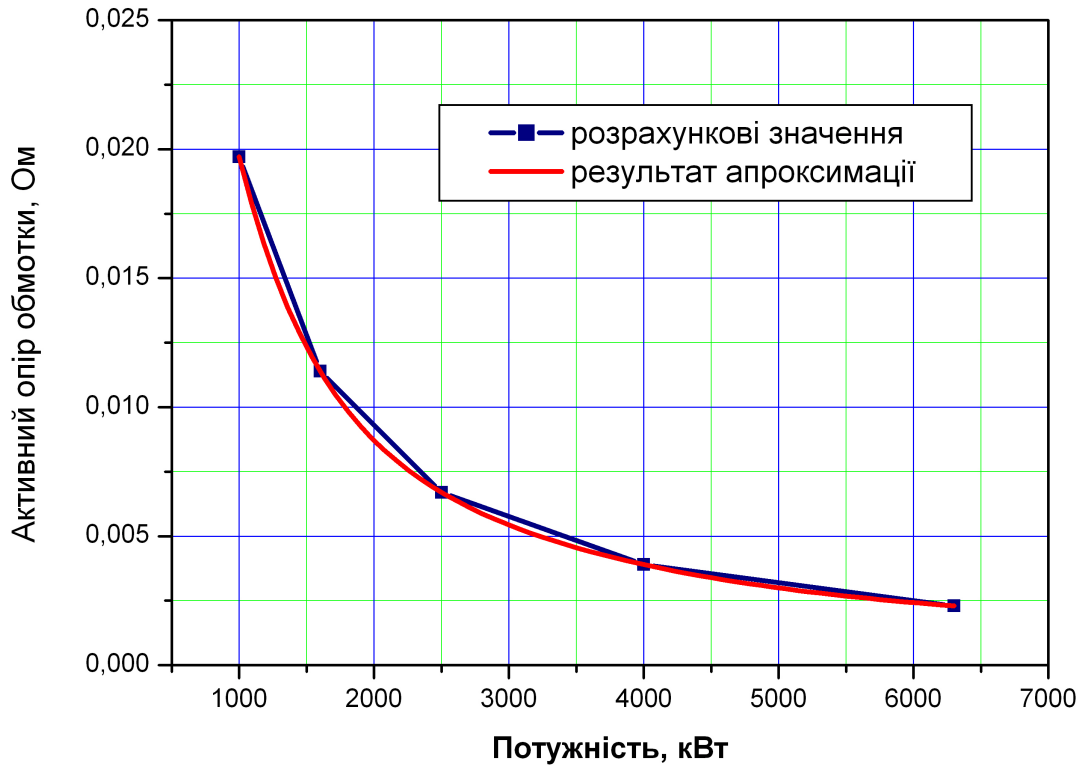


Рис. 4.24. Залежність активного опору первинної обмотки трансформатора підвищеної частоти від потужності

Коефіцієнти апроксимації залежності активного опору первинної та вторинної обмоток трансформатора підвищеної частоти від потужності та , які представлені на рис. 4.24...4.26, надані у табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Коефіцієнти апроксимації залежності активного опору обмоток трансформатора підвищеної частоти від потужності

Залежність	Значення коефіцієнтів					
		4,12265E-4	0,01984	426,3639	0,00424	2020,315
	ДПС	2,10445E-5	7,98582E-4	553,3684	2,11243E-4	1992,5595
	АТД	3,92205E-5	0,00216	553,2382	4,66209E-4	2585,08915

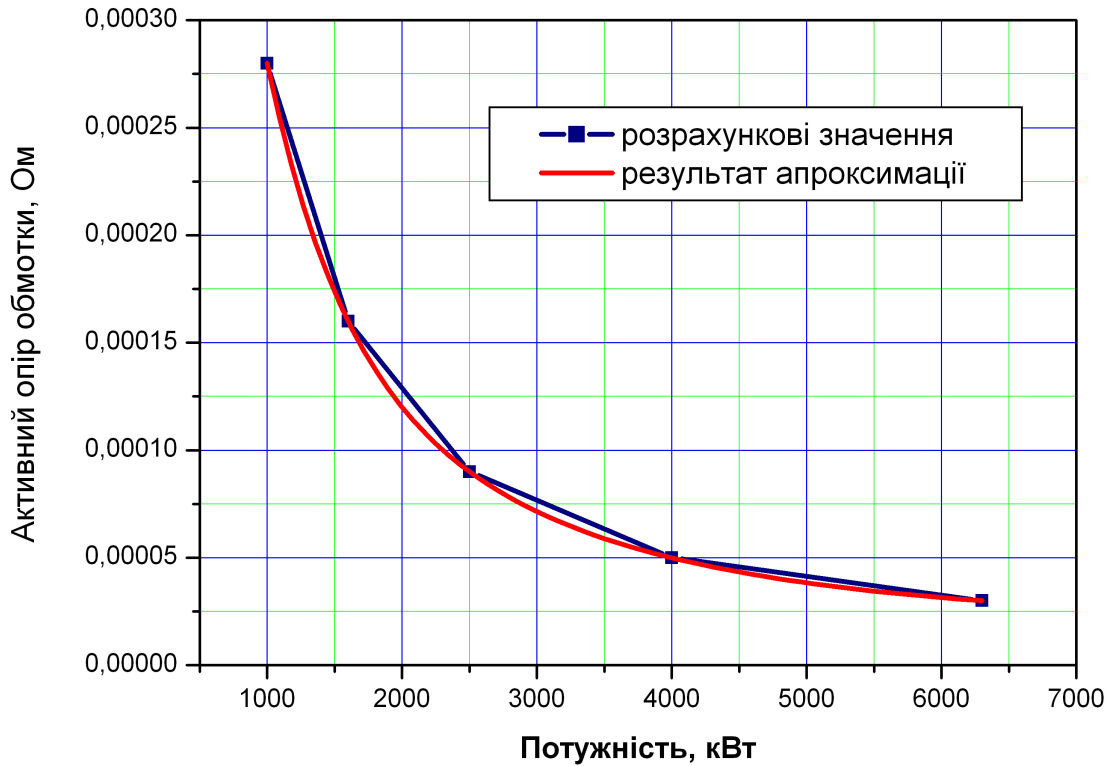


Рис. 4.25. Залежність активного опору вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти від потужності при

Реактивна складова опору короткого замикання трансформатора визначається як [150]:

$$(4.77)$$

$$(4.78)$$

$$(4.79)$$

де: R_{sc} - повний опір короткого замикання; I_{1n} - номінальний струм первинної обмотки трансформатора; U_{sc} - напруга короткого замикання, яка визначена у відсотках по відношенню до номінальної напруги U_{1n} первинної сторони трансформатора.

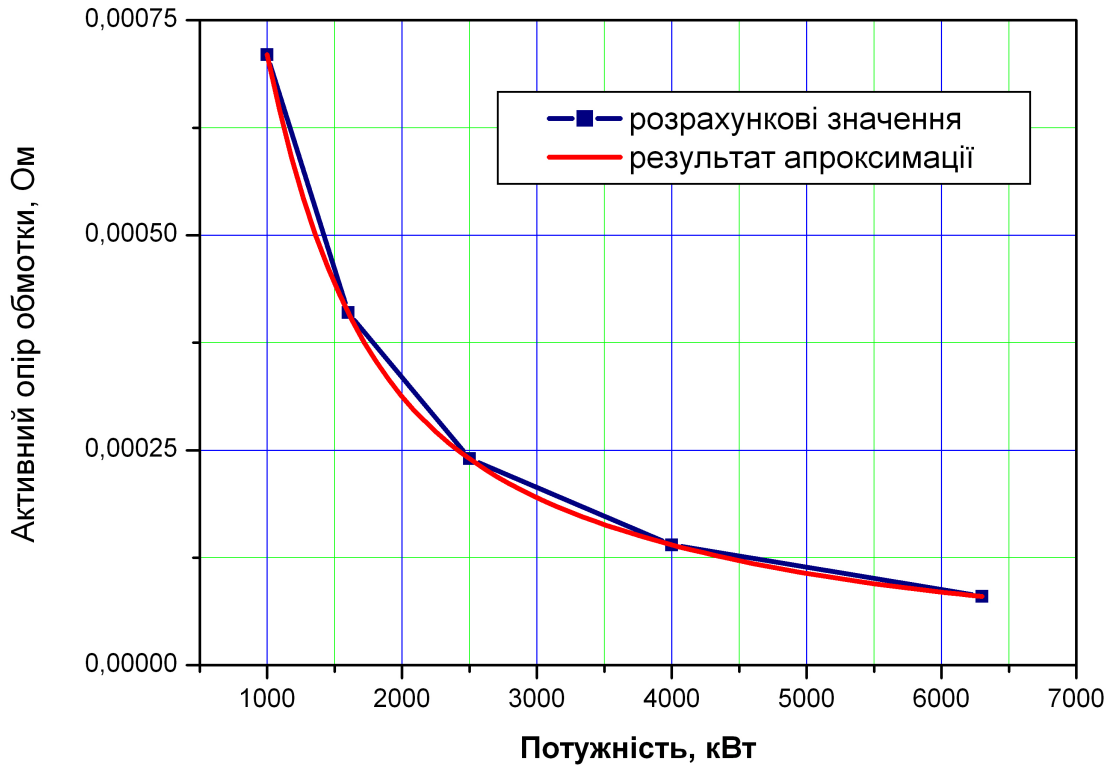


Рис. 4.26. Залежність активного опору вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти від потужності при

Для потужності трансформатора 1000 кВА стандартне значення напруги короткого замикання дорівнює 5,5%; для 1600 кВА та 2500 кВА – по 5,5%; для 4000 кВА та 6300 кВА по 7,5% [159, с.45].

Тоді повний опір короткого замикання та його реактивна складова, для трансформатора потужністю 1000 кВА для розрахункового режиму за виразами (4.78), (4.79) та (4.77) становитиме:

$$(4.80)$$

$$(4.81)$$

Реактивний опір первинної та приведений опір вторинної обмоток приблизно дорівнюють [150]:

$$(4.82)$$

Для трансформатора потужністю 1000 кВА з (4.81) та (4.82):

(4.83)

Індуктивність розсіювання первинної та приведеної вторинної обмоток трансформатора потужністю 1000 кВт при робочій частоті , яка відповідає критичній частоті у табл. 4.5, дорівнює [172]:

(4.84)

Індуктивність розсіювання вторинної обмотки трансформатора визначається за таким виразом [150]:

(4.85)

При потужності трансформатора 1000 кВА, номінальних напругах первинної та вторинної обмоток, і тяговому двигуні постійного струму індуктивність розсіювання вторинної обмотки дорівнює:

(4.86)

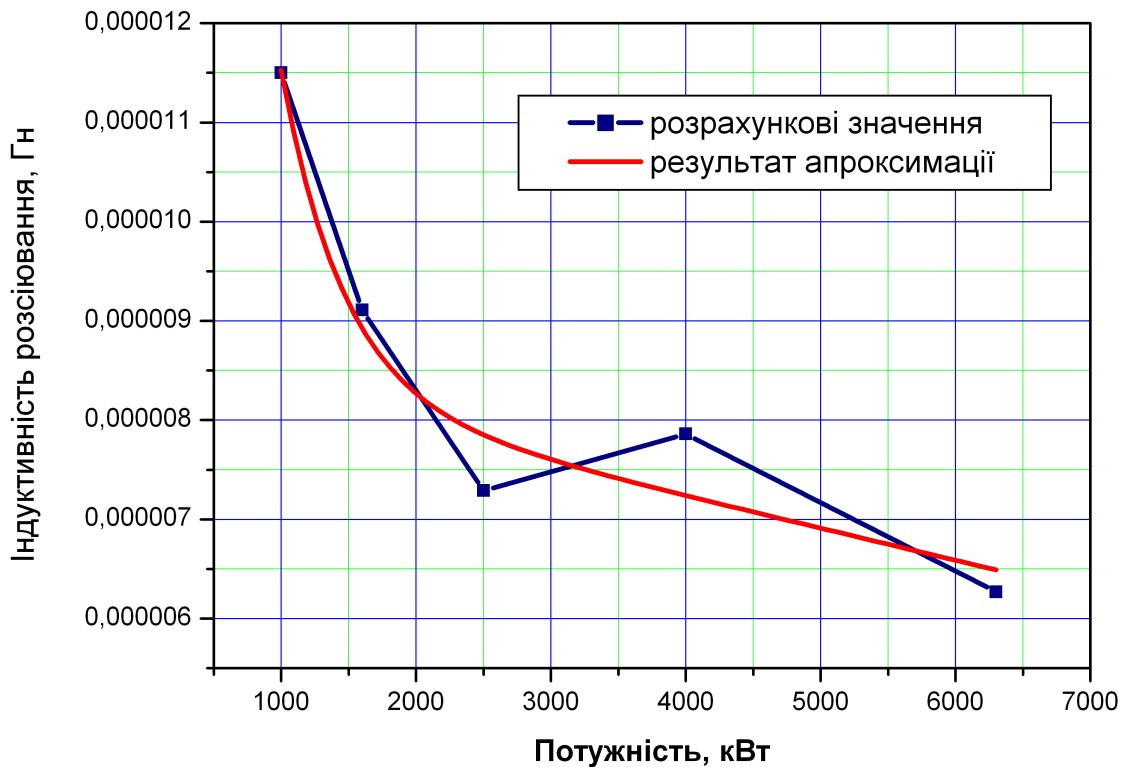


Рис. 4.27. Залежність індуктивності розсіювання первинної обмотки трансформатора підвищеної частоти від потужності

Результати визначення напруги короткого замикання , повного опору короткого замикання , індуктивностей розсіювання первинної та вторинної обмоток для інших трифазних трансформаторів підвищеної частоти з прийнятого ряду потужностей, при різних видах тягових двигунів, представлені у табл. 4.13.

За даними табл. 4.13 побудуємо залежність індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток трифазного трансформатора підвищеної частоти в функції потужності (для однієї фази) (рис. 4.27...4.29).

Таблиця 4.13

Параметри схеми заміщення трансформатора для режиму короткого замикання

Параметр		Потужність, кВт				
		1000	1600	2500	4000	6300
1		2	3	4	5	6
1	Напруга короткого замикання , %	5,5	5,5	5,5	7,5	7,5
2	Повний опір короткого замикання , Ом	0,301	0,188	0,120	0,103	0,065
3	Індуктивний опір короткого замикання , Ом	0,301	0,188	0,120	0,102	0,065

4	Робоча частота трансформатора , Гц	2076	1641	1313	1038	827
5	Індуктивність розсіювання первинної обмотки , Гн	1,15	0,91	0,73	0,79	0,63
6	Індуктивність розсіювання вторинної обмотки при ДПС, Гн	0,65	0,51	0,41	0,44	0,35
6	Індуктивність розсіювання вторинної обмотки при АТД, Гн	1,66	1,32	1,05	1,14	0,90

Для апроксимації отриманих за розрахунками даних (табл.. 4.13) використовуємо аналітичну форму (4.14). Результати апроксимації залежностей та представлені на рис. 4.27...4.29 графічно та на табл. 4.14 відповідними коефіцієнтами.

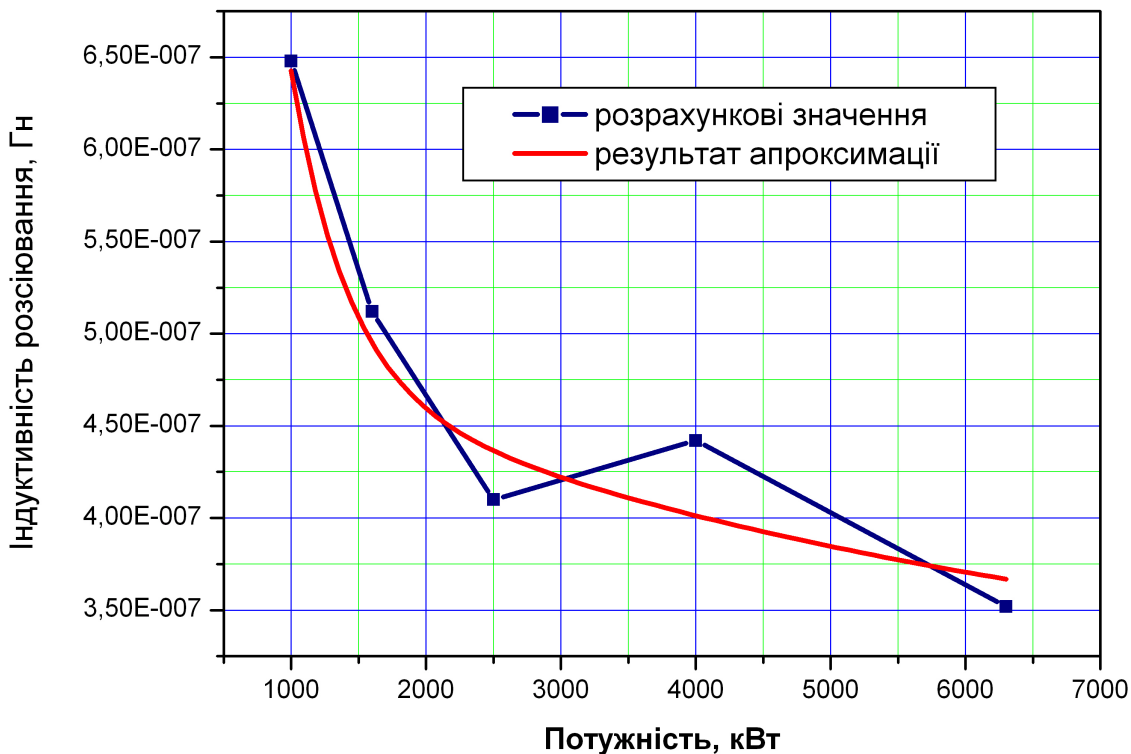


Рис. 4.28. Залежність індуктивності розсіювання вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти від потужності при

Коефіцієнти апроксимації залежності індуктивності розсіювання обмоток трансформатора підвищеної частоти від потужності

Залежність		Значення коефіцієнтів				
		-4,141E-4	2,8567E-5	464,65912	4,22633E-4	1,30027E6
	ДПС	2,93246E-7	1,87579E-6	418,08485	2,09999E-7	6008,42135
	АТД	-2,67565E-5	4,05683E-6	467,37664	2,79906E-5	595677,6894

Таким чином, параметри схеми заміщення тягового трансформатора підвищеної частоти (рис. 4.19) при роботі багатосистемного електровоза на ділянках постійного струму з напругою 3000 В при тягових двигунах постійного струму або асинхронними тяговими двигунами різних потужностей представлені у табл. 4.10, 4.11 та 4.13.

Отримані у ході досліджень основних режимів роботи трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти параметри схеми заміщення можуть бути використані при моделюванні основних режимів роботи статичного перетворювача багатосистемного електровоза при тягових двигунах постійного струму або асинхронних тягових двигунах.

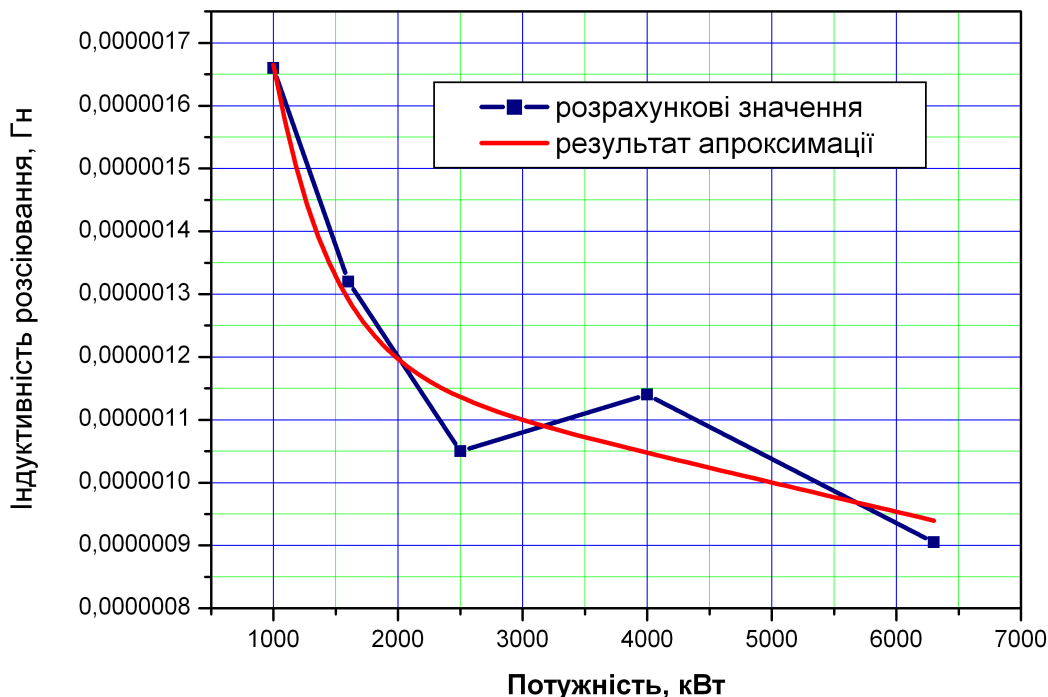


Рис. 4.29. Залежність індуктивності розсіювання вторинної обмотки трансформатора підвищеної частоти від потужності при

4.8. Дослідження взаємного зв'язку потужності та конструктивних показників перетворювачів тягової електропередачі багатосистемного електровоза

Сучасну тягову електропередачу неможливо уявити без статичних перетворювачів, які забезпечують необхідне перетворення електричної енергії від джерела (тягової підстанції) до вала тягового двигуна. Потужність тягових перетворювачів щороку зростає, це необхідно для забезпечення достатнього рівня потужності тягової електропередачі, особливо для швидкісного руху поїздів. Збільшення потужності тягової електропередачі, зокрема статичного перетворювача, при існуючих підходах до проектування електрообладнання вимагає збільшення його «життєвого» простору внаслідок збільшення потужності трансформаторно-реакторного обладнання та збільшення габаритів системи охолодження.

На шляху необхідного збільшення габаритів обладнання стає особливістю тягового рухомого складу – обмеження доступного простору габаритами кузова електровоза.

Основою запропонованої в дисертаційній роботі тягової електропередачі є тяговий статичний перетворювач, який складається з декількох ланок, кожна з яких виконує визначені функції (розділ 2). Автором запропоновано згрупувати ці ланки у два контури: мережевий, який забезпечує багатосистемність електровоза, та тяговий, який безпосередньо перетворює стабілізовану напругу на виході мережевого контуру у вид, необхідний для тягового двигуна. Як визначалось раніше (розділ 2), запропонована тягова електропередача багатосистемного електровоза має у своєму складі більше елементів, які потребують додаткового життєвого простору у кузові електровоза, ніж у традиційних системах, що експлуатуються на залізницях України.

Таким чином, є необхідність у проведенні досліджень, метою яких є розробка рекомендацій, з урахуванням властивостей сучасної (а також на найближче майбутнє) елементної бази щодо її впровадження у складі статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза.

Вище за текстом визначено шляхи зменшення габаритів трансформаторного обладнання перетворювальної установки, а саме визначені частотні діапазони та матеріали для виконання магнітопровода трансформатора підвищеної частоти. З точки зору уніфікації та рівня надійності перетворювача, також рекомендоване використання у складі запропонованих структур трифазних тягових трансформаторів підвищеної частоти. Їх використання дозволить отримати суттєвий (біля 20%) вигащ у габаритній потужності обладнання.

Інший шлях зменшення габаритних розмірів електрообладнання статичного перетворювача – використання напівпровідникових приладів підвищеного класу та струму, що дозволяє підвищити одиничну потужність кожного з вентилів у складі схем та зменшити втрати потужності на напівпровідникових приладах.

Різні фірми-виробники пропонують власні схемні та технологічні рішення щодо використання різноманітної елементної бази та систем охолодження перетворювачів, які базуються на відпрацьованих технічних та технологічних рішеннях, вартості та інших об'єктивних та суб'єктивних факторах. Тому прийняти рішення, яку елементу базу та систему охолодження використовувати у складі запропонованих перетворювальних структур для тягової електропередачі багатосистемного електровоза, є досить складною науково-технічною проблемою, вирішенню якою присвячено даний підрозділ дисертаційної роботи.

4.8.1. Елементна база сучасних тягових статичних перетворювачів

Основним силовим напівпровідниковим приладом, який застосовується на діючому електрорухомому складі, є тиристор. Застосування тиристорів дозволило плавно, з малими втратами, змінювати режими роботи тягового електропривода й допоміжного устаткування. До електровозів та електропоїздів радянського виробництва, на яких застосовуються тиристири, відносяться ВЛ60КУ, ВЛ80Т, ВЛ80С, ВЛ80Р, ЕР2Р [108].

Тиристор порівняно нескладно вмикається подачею керуючого імпульсу струму в електрод керування при позитивній напрузі між анодом і катодом. Вимикання тиристора забезпечується зниженням прямого струму, що протікає через нього, до величини, меншої струму втримання. Таке зниження відбувається або при зміні напівхвиль напруги змінного струму, або потрібні спеціальні індуктивно-ємнісні контури комутації, що не тільки збільшує вартість перетворювача, але й погіршує його масо-габаритні показники, знижують надійність [105].

Тому одночасно зі створенням тиристорів почалися дослідження, спрямовані на забезпечення його вимикання по керуючому електроду. Перші подібні тиристири з'явилися у 1960 році в США. Вони одержали назву Gate Turn Off (GTO) – тиристири, що замикаються по керуючому електроду.

У середині 90-х років було розроблено тиристор з кільцевим виводом керуючого електрода. Він отримав назву Gate Commutated Thyristor (GCT).

Подальшим розвитком повністю керованих силових напівпровідникових приладів стали IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзистори й IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) тиристири.

GTO тиристири, висувають жорсткі вимоги до крутості фронту й амплітуди як відмикаючого, так і замикаючого імпульсів струму. Крім того, увесь час включення й провідного стану GTO тиристора система керування формує імпульси струму позитивної полярності, а при вимиканні й знаходженні в заблокованому стані потрібно увесь час формувати імпульс струму негативної полярності. Вищезазначене зумовлює необхідність створення порівняно складних систем керування GTO тиристорів з гальванічною розв'язкою силових кіл і кіл керування.

Основним недоліком GTO тиристора є більші втрати енергії в захисних колах приладу при його комутації, які збільшуються з підвищенням робочої частоти. На практиці частота комутацій не перевищує 250-300 Гц.

Подальшим розвитком GTO є GCT. Більш швидке вимикання GCT (10 мкс проти 100 мкс) дало можливість відмовитися від снабберного кола (кола формування траєкторії

перемикання), тобто прилад не є чутливим до ефекту . GCT тиристор у фазах включення, провідності і заблокованому стані управляється також як і GTO тиристор. При вимиканні GCT має дві особливості:

- струм керування дорівнює або перевершує анодний струм (для GTO струм керування в 3-5 разів менше анодного струму);

- керуючий електрод має низьку індуктивність, що дозволяє досягти швидкості наростання струму керування рівної 3000 А/мкс (для GTO ця величина становить 30-40 А/мкс).

Подальшим розвитком концепції повністю керованих тиристорів стало створення «тиристорів з інтегрованим блоком керування» (IGCT - Integrated Gate Commutated Thyristor).

Застосування нових технологій дозволило збільшити область безпечної роботи IGCT до меж обмежених лавинним пробоем. Однак потужність керування, у порівнянні з GTO, знижена в 5 разів.

Завдяки можливості паралельного й послідовного з'єднання IGCT використовують в установках потужністю до декількох сотень МВ·А.

Застосування в IGCT концепції «твердого» керування (вимикання здійснюється струмом керування, який дорівнює струму навантаження) дозволило зменшити час вимикання до 1 мкс при швидкості наростання струму керування 4000 А/мкс. Блок керування складає єдину конструкцію з охолоджувачем і підключається до системи керування по оптоволоконній лінії. Діапазон робочих частот IGCT лежить у межах 500-2000 Гц.

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) транзистори, що з'явилися у 80 роках 20 століття, мають характеристики, близькі до характеристик ідеального ключа і дуже часто застосовуються як ключові елементи у складі електротехнічних установок. Однак головним параметром, що обмежує область їхнього застосування, є напруга стоку. Високовольтних МОП-транзисторів з досить гарними характеристиками створити поки не вдається, тому що опір відкритого МОП польового транзистора зростає пропорційно квадрату пробивної напруги [106]. У наш час виробниками силових напівпровідникових приладів випускаються MOSFET транзистори, розраховані на робочі напруги до 1600 В. Однак напруга насичення в них становить порядку 7...10 В, відповідно й потужність, що розсіюється в статичному режимі, неприпустимо велика.

До переваг MOSFET транзисторів варто віднести малу потужність керування, можливість керування однополярним сигналом, що більш прийнятно для кіл керування електрорухомим складом, та високі швидкості комутації.

Паралельно із силовими тиристорами поширення отримали «біполярні транзистори з ізольованим затвором» (IGBT).

Втрати IGBT у провідному стані вище в порівнянні з GTO й IGCT. Втрати при вимиканні - нижче, тому частота перемикавання в IGBT вище.

Унікальна особливість всіх IGBT складається в можливості витримувати високовольтне коротке замикання (великий струм і висока напруга скрізь прилад одночасно). При короткому замиканні струм скрізь IGBT залишається обмеженим у межах даних приладу при розробці й існує можливість безпечного вимикання по керуючому електроду протягом 10 мкс [107].

У табл. 4.15 представлена коротка порівняльна характеристика різних силових напівпровідникових приладів.

Більшість країн-виробників електровозів та електропоїздів мають значний досвід у проектуванні й експлуатації статичних напівпровідникових перетворювачів різної напруги для ЕРС. Застосовуються перетворювачі для плавного регулювання швидкості й сили тяги, за необхідним законом регулювання, тягових двигунів з діапазоном потужностей 250...1300 кВт (асинхронні, вентильні та колекторні постійного і пульсуючого струму з напругою на колекторі до 1500 В), а також для керування допоміжними машинами з діапазоном потужностей 30...50 кВт [75].

Незважаючи на всі зазначені переваги сучасних силових приладів, фактором стримуючим їхнє широке застосування, є відносно висока вартість, оскільки вони імпортного виробництва. Так для російських виробників питома вартість імпортних комплектуючих становить 150-330 USD/кВт (залежно від комплектів поставки), для установок потужністю 0,3-5 Мвт [178].

Відповідно до представленої в [179] класифікації функціональних суб'єктів електроустаткування ЕРС, на підставі вищевикладеного та аналізуючи діапазон експлуатаційних параметрів сучасних силових приладів провідних фірм виробників [29], представимо в табличному виді (табл. 4.16) перспективу застосування силових напівпровідникових приладів для різних кіл ЕРС.

Представлені рекомендації (табл. 4.16) дозволяють визначитися при виборі сучасних силових приладів при модернізації електричних кіл діючого та проектуванні перспективного ЕРС.

Таблиця 4.15

Порівняльна характеристика різних силових напівпровідникових приладів

Тип приладу	Переваги	Недоліки	Область застосування в промислових установках
Традиційний тиристор	Найнижчі втрати у включеному стані. Найвища перевантажувальна здатність. Висока надійність. Легко з'єднується паралельно й послідовно.	Не здатний до примусового запирання по керуючому електроді. Низька робоча частота. Необхідність снаберних кіл.	Приводи постійного струму; потужні джерела живлення; зварювання; плавлення й нагрівання; статичні компенсатори; ключі змінного струму.
GTO	Здатність до керованого запирання. Порівняно висока перевантажувальна здатність. Можливість послідовного з'єднання.	Високі втрати в увімкненому стані. Складні, з більшими втратами й робочими струмами, системи керування. Необхідність снаберних кіл. Робочі частоти до 250-300 Гц.	Електропривод; статичні компенсатори реактивної потужності; системи безперебійного живлення; індукційне нагрівання.
IGCT	Здатність до керованого запирання. Порівняно висока перевантажувальна здатність. Діапазон робочих частот лежить у межах 500-2000 Гц. Вбудований	Значні струми керування на вимикання. Необхідність снаберних кіл.	Потужні джерела живлення й електропривод.

	драйвер. Можливість послідовного з'єднання.		
MOSFET	Здатність до керованого запирання. Високі робочі частоти – десятки кГц.	Більші втрати у відкритому стані. Мала напруга стоку.	Високочастотні перетворювачі.
IGBT	Здатність до керованого запирання. Високі робочі частоти до 10 кГц. Відсутність снабберного кола.	Дуже високі втрати у включеному стані.	Електропривод; статичні компенсатори й активні фільтри; високочастотні перетворювачі.

Таблиця 4.16

Сучасні напівпровідникові прилади для електричних кіл електрорухомого складу

Функціональне призначення кіл	Силовий напівпровідниковий прилад, що рекомендується
Тяговий електропривод: тягові інвертори, входні перетворювачі і т.п.	Кола постійного струму 3 кВ – IGBT
	Кола змінного струму 25 кВ – GTO, GCT, IGCT
Допоміжний електропривод	Кола постійного струму до 3 кВ – IGBT
	Кола постійного струму до 400 В – IGBT, MOSFET
Система енергозабезпечення кіл керування: перетворювач власних потреб, регулятори напруги генератора власних потреб і т.п.	IGBT, MOSFET
Сервісна система: кондиціонери, освітлення й т.п.	IGBT, MOSFET
Система енергозабезпечення: захисні апаратури, перетворювачі форми, оперативне перемикання й т.п.	GTO, GCT, IGC

Для запропонованих перетворювальних структур з трансформаторами підвищеної частоти можливе використання IGBT, GTO, GCT, IGCT приладів.

Серед цих приладів лише IGBT та IGCT дозволяють реалізувати раніш отриманий частотний діапазон роботи трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти (від 827 Гц до 2076 Гц). На базі цих приладів є доцільним створювати так звані мережеві інвертори, які живлять первину сторону тягового трансформатора (рис. 2.4, 2.5). Але це не означає, що слід обмежити дослідження габаритних показників потужних статичних перетворювачів, побудованих з використанням тільки цих приладів, оскільки йде

постійне вдосконалення характеристик всіх видів напівпровідникових приладів, тому розглянемо весь доступний в наш час спектр силової елементної бази. При цьому, як і раніш, врахуємо вплив виду тягового двигуна на основні показники статичного перетворювача тягової електропередачі.

4.8.2. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів асинхронного електропривода

Питання використання асинхронного електропривода на електрорухомому складі не нове, йому присвячено значну кількість праць [75,87,90 та ін.]. В цих роботах статичний перетворювач частоти, який є невід'ємною частиною асинхронного тягового електропривода (АТЕ), розглянуто в загальному вигляді. Більш детальне проведення порівняльного аналізу різних варіантів побудови статичних перетворювачів для живлення тягових асинхронних двигунів представлено у роботі [69]. Дослідження, проведені авторами, базувались на можливостях елементної бази того часу. Сучасна елементна база дозволяє будувати статичні перетворювачі з великими функціональними можливостями [29].

Але не варто забувати, що габарити статичного перетворювача для електровоза обмежені розмірами кузова, оскільки крім статичного перетворювача в кузові потрібно розташувати інше обладнання. Особливо гостро це питання постає при розробці перспективного багатосистемного електрорухомого складу [49].

Вітчизняні електровозобудівники вже мають досвід побудови тягового асинхронного електропривода – електровоз змінного струму ДСЗ, у складі якого використовується статичний перетворювач фірми Siemens [75]. На сучасному етапі ведуться розробки магістрального пасажирського електровоза постійного – змінного струму (3/25 кВ).

Але ж питання визначення взаємного зв'язку між потужністю тягової електропередачі та масо-габаритними показниками статичного перетворювача, що є її невід'ємною частиною, не порушувалось. Тому автором проведено аналіз технічних характеристик та параметрів промислових перетворювачів для розробки рекомендацій стосовно раціональних конструктивних показників перетворювачів тягової електропередачі [50].

Традиційно до конструктивних показників статичних перетворювачів відносяться: питома маса й об'єм [86].

Як основний конструктивний показник розглянемо питоми об'єм, а оскільки цей показник безпосередньо пов'язаний із простором у кузові електровоза, визначаємо цей показник як [86]:

$$V_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{ст}}}{\rho_{\text{ст}}}, \quad (4.87)$$

де $Q_{\text{ст}}$ – об'єм статичного перетворювача, м³; $\rho_{\text{ст}}$ – потужність перетворювача, кВт.

У дисертації проаналізовано основні показники перетворювачів таких фірм та підприємств: Siemens, ABB, Rockwell Automation (Allen-Bradley). Вихідними даними є: потужність, габарити, елементна база та вид охолодження існуючих перетворювачів [180,181,182,183,184,185]. Дані за вказаними показниками представлені у додатку М.

Серед розглянутих перетворювачів було відібрано 412 перетворювачів (таблиці М. 1...М.6) з яких: фірми Siemens (186), фірми ABB (154), фірми Rockwell Automation (72).

Критерієм відбору є номінальна потужність перетворювача. До уваги бралися перетворювачі з потужністю понад 75 кВт включно (стовпчик 3 у табл. додатка М), оскільки аналіз конструкцій існуючих перетворювачів ведучих фірм виробників показав, що саме з цієї потужності починається ряд конструктивного виконання всіх потужних перетворювачів.

Було розглянуто статичні перетворювачі частотно-регульованого асинхронного електропривода з номінальними напругами з ряду 380, 400, 415, 440, 460, 480, 500, 525, 575, 600, 660, 690 В (низьковольтні) та високовольтні перетворювачі з напругами 2300, 3300, 4160, 6000, 6600 В (представлений ряд напруг є стандартним для фірм європейських виробників перетворювачів та частково співпадає з рядом номінальних напруг діючого в країнах СНД [138]).

Автором отримані залежності питомого об'єму від потужності перетворювачів, які враховують: тип елементної бази, вид охолодження. Діапазон робочих напруг визначено після попереднього порівняння графічних залежностей.

Наприклад, на рис. 4.30 представлена залежність , побудована за експериментальними даними для перетворювачів серії Simovert фірми Siemens (елементна база – IGBT, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг від 2,3 до 6 кВ (табл. М.1).

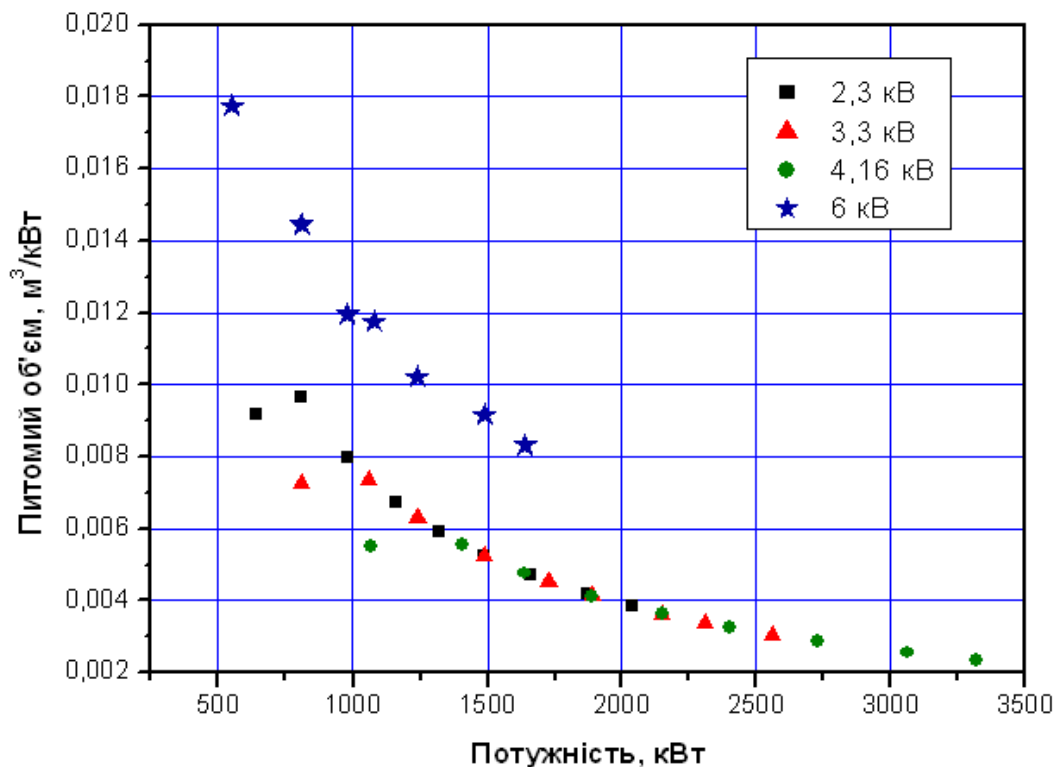


Рис. 4.30. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens від потужності перетворювачів

4.8.3. Вплив рівня робочої напруги на габаритні показники статичного перетворювача асинхронного електропривода

Із представлених на рис. 4.30 залежностей бачимо, що в діапазоні номінальних напруг 2,3...4,16 кВ експериментальні дані, отримані за каталоговими параметрами перетворювачів, знаходяться в приблизному одному діапазоні. Для перетворювачів з напругою 6 кВ експериментальні дані значно відрізняються від даних діапазону 2,3...4, 16 кВ, тому в першому наближенні, для отримання апроксимованих залежностей групуємо перетворювачі з напругами 2,3...4,16 кВ окремо від перетворювачів з напругою 6 кВ. Слід відмітити, що характер залежностей схожий, вони приблизно рівновіддалені одна від одної.

Питомий об'єм перетворювача потужністю 980 кВт при напрузі 2,3 кВ (рис. 4.30)

приблизно складає 0,00798 м³/кВт, а при напрузі 6 кВ: 0,01195 м³/кВт, в рази більше. Така різниця в показниках питомого об'єму між перетворювачами з різною робочою напругою та однаковою потужністю пояснюється, в першу чергу, необхідністю підвищення відстані між елементами перетворювача.

Це підтверджується аналізом залежності відстані по поверхні ізоляції та величини повітряного зазору від робочої напруги електроустаткування [186, стор.112, черт.1, крива 4]. При робочій напрузі 2,3 кВ мінімальна відстань між елементами та деталями електроустаткування по поверхні повинна складати не менш 54 мм, а при 6 кВ: не менш

82 мм, що в рази більше, а відповідно зростає і об'єм електроустаткування. Саме це підтверджує отримане раніше співвідношення питомих об'ємів перетворювачів з робочими напругами 2,3 та 6 кВ.

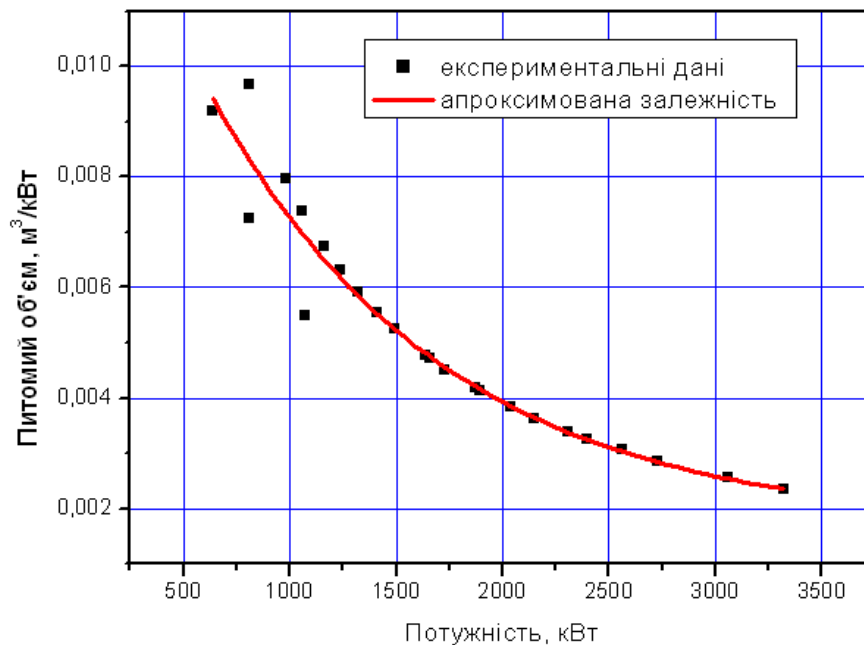


Рис. 4.31. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ від потужності перетворювачів

Для отримання аналітичних залежностей для питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens від їх потужності автором проведемо апроксимацію експериментальних значень для перетворювачів діапазону номінальних напруг 2,3...4,

16 кВ (рис. 4.31).

Залежність питомого об'єму перетворювачів від потужності апроксимувались за виразом (4.14).

Коефіцієнти апроксимації експериментальної залежності мають такі значення:

Тоді вираз для апроксимованої залежності (рис.4.31) приймає вигляд:

$$(4.88)$$

Аналогічно отримуємо аналітичні залежності питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 6...6,6 кВ від потужності перетворювачів (рис. 4.32).

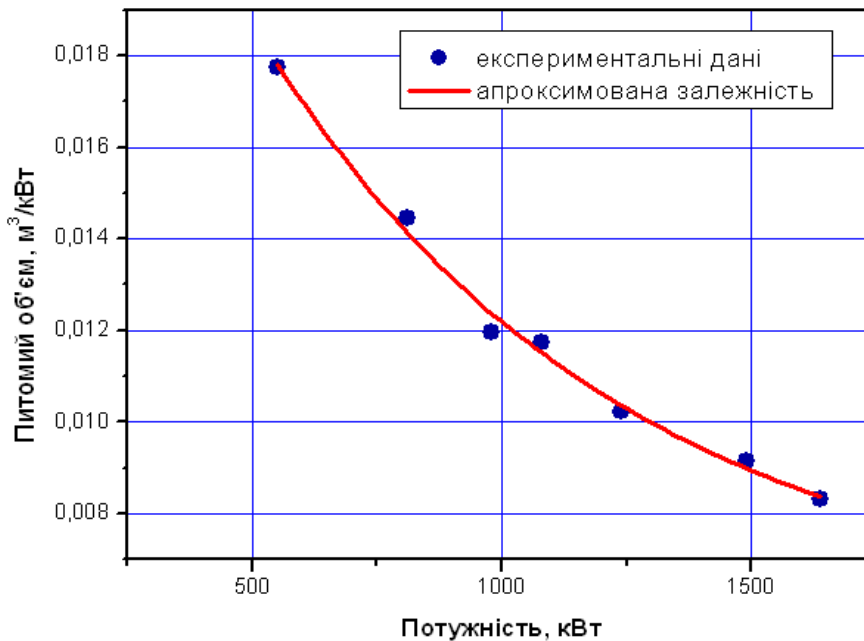


Рис. 4.32. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 6...6,6 кВ від потужності перетворювачів

Аналізуючи технічні характеристики та параметри перетворювачів серії Simovert фірми Siemens, крім стандартних перетворювачів до складу серії також входять пристрої з вбудованими у перетворювач засобами покращення електромагнітної сумісності (ЕМС).

На рис. 4.33 представлені залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert з ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ від потужності перетворювачів як експериментальні, так і апроксимовані.

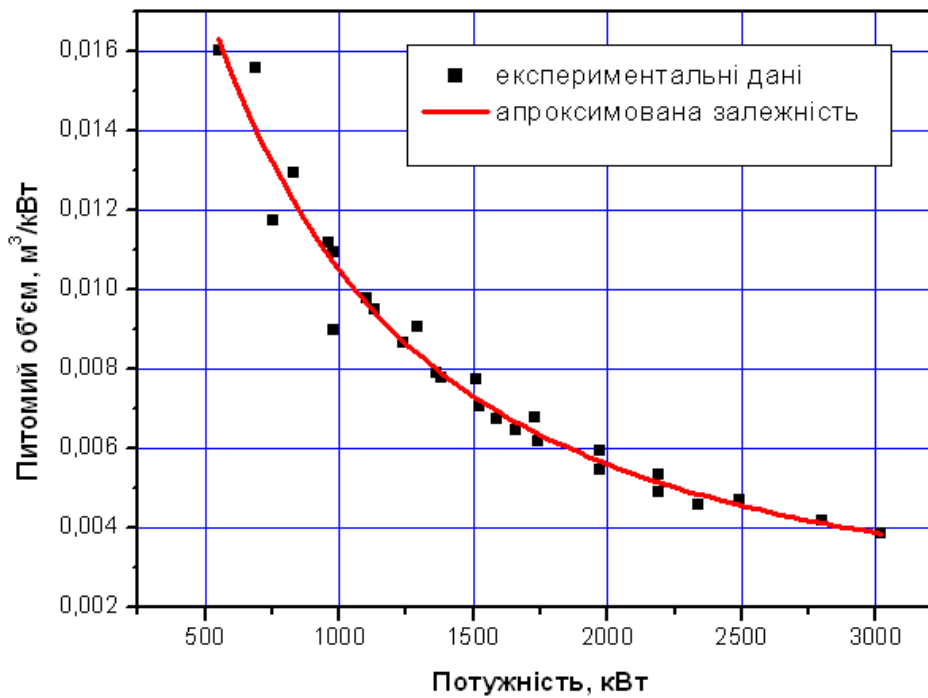


Рис. 4.33. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert з ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ від потужності перетворювачів

На рис. 4.34 наведені разом залежності $V_{\text{об'єм}}$ для перетворювачів серії Simovert без пристроїв ЕМС та з пристроями ЕМС фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ та 6...6,6 кВ.

Як бачимо з рис. 4.34, введення до складу перетворювачів пристроїв для покращення ЕМС значно підвищує об'єм перетворювача, наближаючи ці показники до перетворювачів з більшою номінальною напругою.

В сучасних умовах покращення якості електричної енергії в електричній (контактній) мережі, та зменшення впливу на основні показники якості електроенергії зі сторони навантаження (електровозів та електропоїздів), є важливою проблемою, але у даній роботі ці питання не розглядаються, тому за базові при розрахунках приймаємо перетворювачі без пристроїв ЕМС. Номінальною напругою для перетворювачів у першому наближенні приймаємо 2,3 кВ, оскільки це приблизно відповідає рівню номінальної напруги сучасних тягових асинхронних двигунів (наприклад, номінальна лінійна напруга асинхронного двигуна АД914 (СТА1200), що встановлений на електровозі ДСЗ, дорівнює 1870 В [75]).

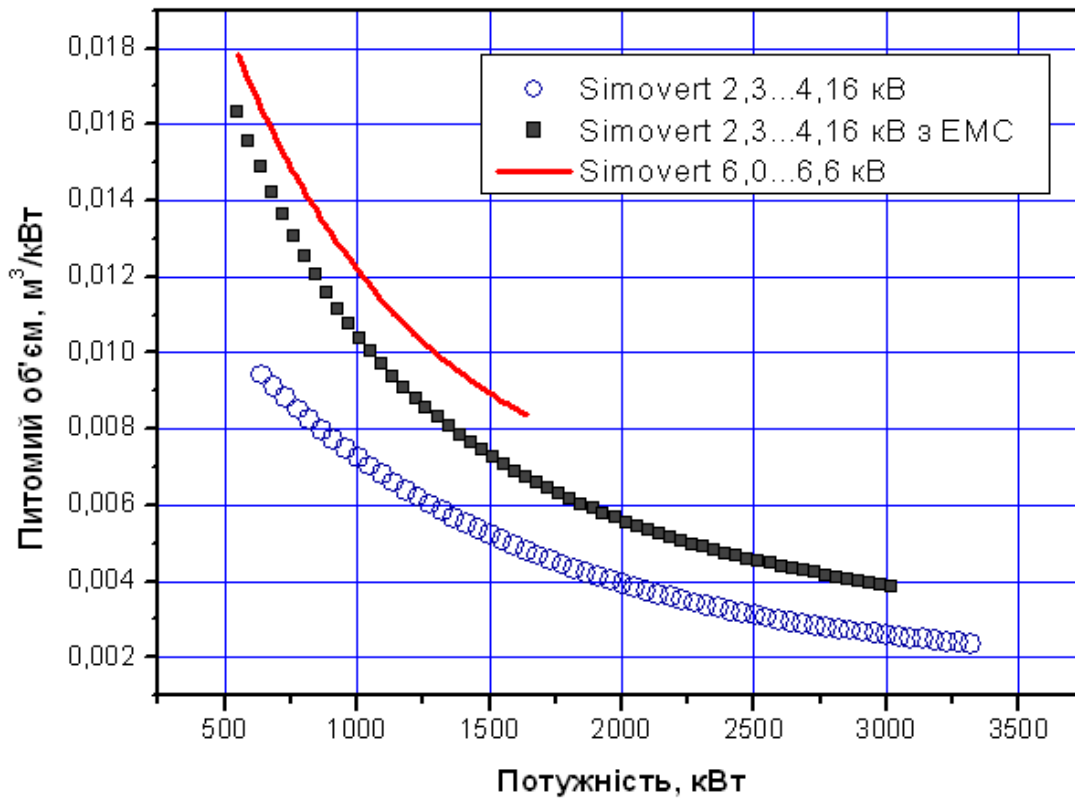


Рис. 4.34. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simover без та з EMC фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ та 6...6,6 кВ від потужності перетворювачів

Дослідимо, яким чином впливає рівень напруги на основні конструктивні показники перетворювачів. Для цього порівняємо залежності питомого об'єму від потужності перетворювачів серій Simover та Sinamics фірми Siemens, побудованих з використанням IGBT із природним повітряним охолодженням. Оскільки перетворювачі розробки та виробництва однієї фірми, це в якійсь мірі виключає фактор впливу конструктивних особливостей перетворювачів окремих виробників (що дослідимо надалі).

На рис. 4.35 представлена залежність $V_{\text{н}}^{-1}$, побудована за експериментальним даними та апроксимована експоненціальною залежністю другого порядку для перетворювачів серії Sinamics G150 ver.A фірми Siemens (елементна база – IGBT, охолодження – природне повітряне), діапазон номінальних напруг: 380...690 В.

Порівняємо між собою залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simover (2,3...4,16 кВ) та Sinamics (380...690 В) фірми Siemens від потужності перетворювачів (рис. 4.36).

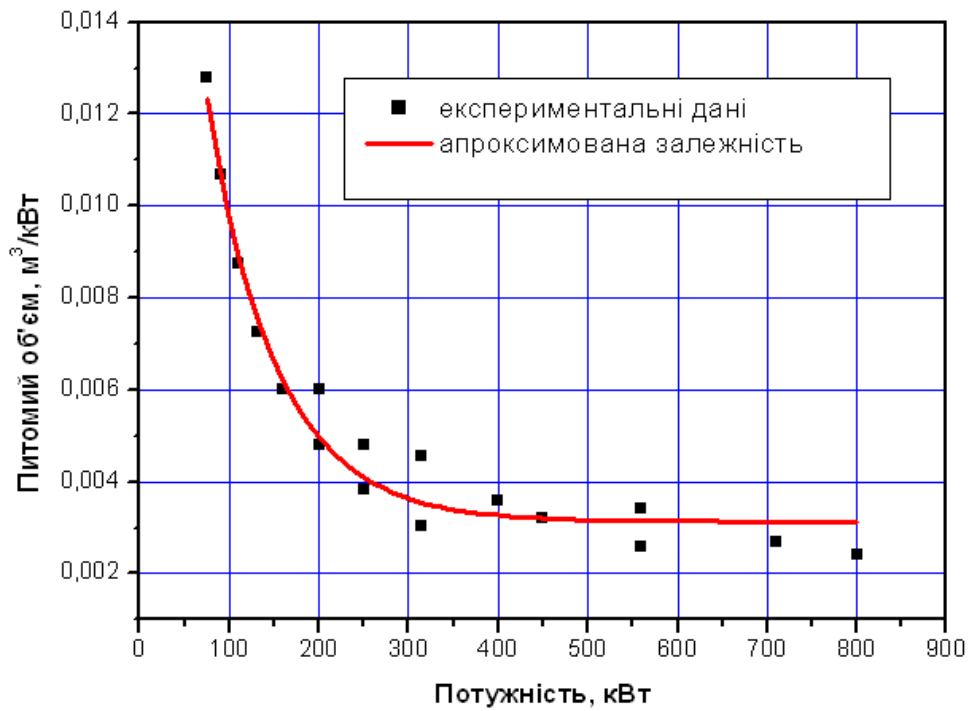


Рис. 4.35. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Sinamics G150 ver.A фірми Siemens від потужності перетворювачів

Як бачимо з представлених на рис. 4.36 залежностей, вони мають різницю не тільки в числових значеннях, але й у характері – криві не рівновіддалені одна від одної. В цьому випадку пояснити їх різницю тільки відмінністю повітряного зазора між елементами перетворювача неможливо.

При цьому слід враховувати, що в розглянутих перетворювачах серії Simovert використовують примусове повітряне охолодження, а в перетворювачах серії Sinamics природне повітряне охолодження (рис. 4.36).

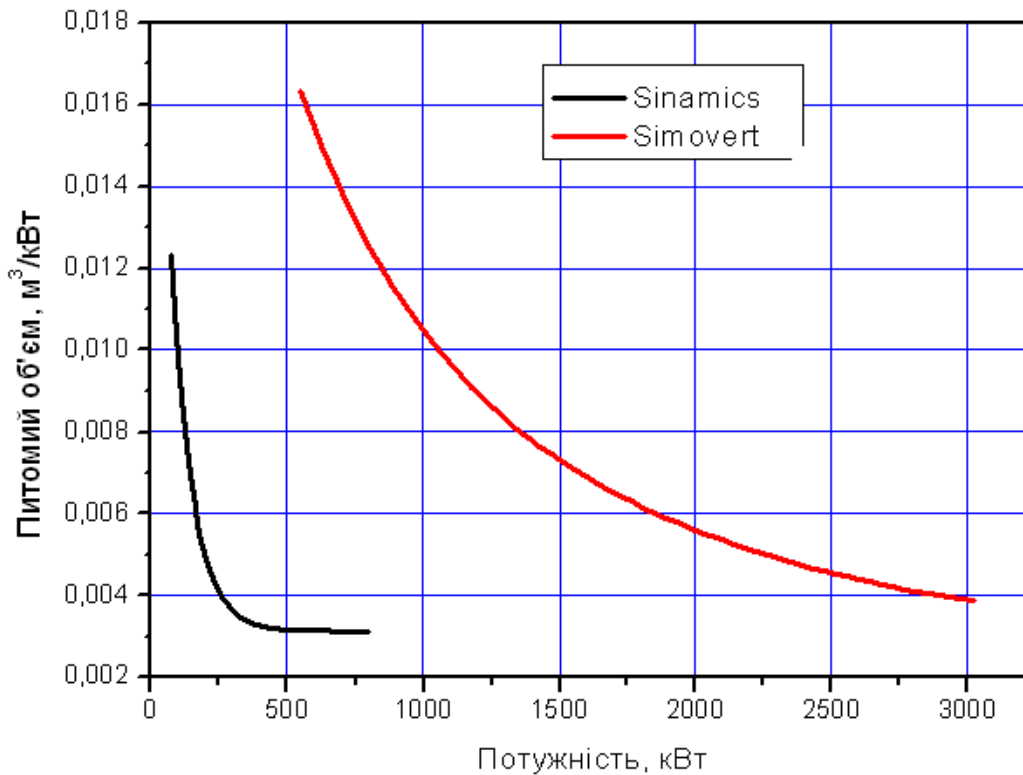


Рис. 4.36. Залежність питомого об'єму перетворювачів серій Sinamics (380...690 В) та Simovert (2,3...4,16 кВ) фірми Siemens від потужності перетворювачів

4.8.4. Вплив виду системи охолодження на габаритні показники статичного перетворювача асинхронного електропривода

Представимо залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ із водяним охолодженням від потужності перетворювачів за методикою, яка використана раніш. Отримані автором експериментальні результати та апроксимована залежність представлені на рис. 4.37.

Вплив виду охолодження на конструктивні параметри перетворювачів ілюструють залежності, представлені на рис. 4.38.

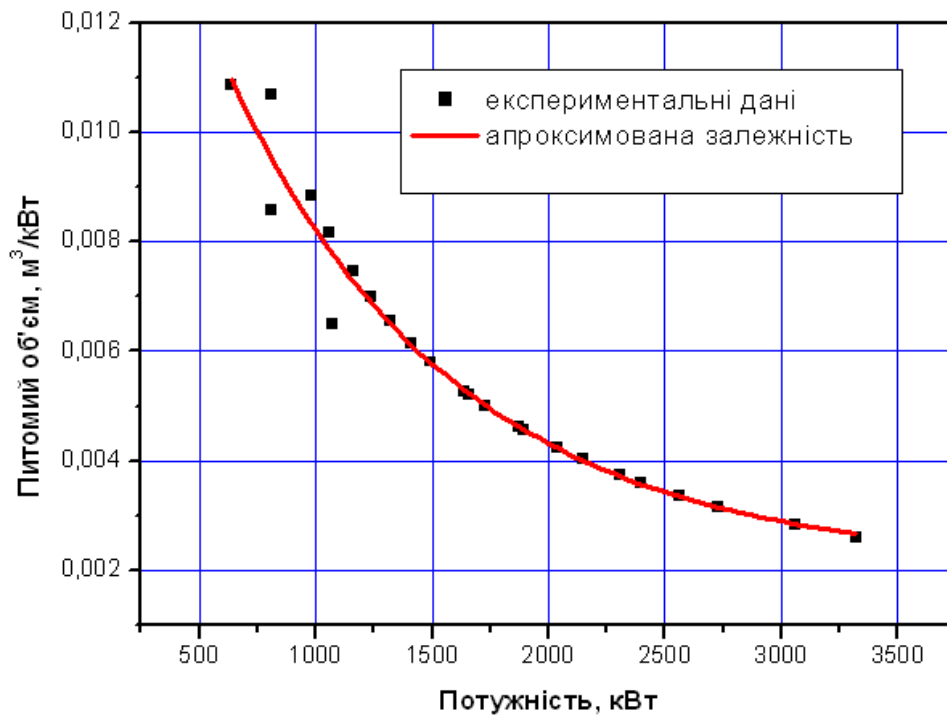


Рис. 4.37. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії Simovert фірми Siemens діапазону номінальних напруг 2,3...4,16 кВ з водяним охолодженням від потужності перетворювачів

Порівнявши представлені на рис. 4.38 залежності, відзначимо, що залежності питомого об'єму перетворювачів від потужності при примусовому повітряному і водяному охолодженні приблизно рівновіддалені одна від одної. Так перетворювач потужністю 1000 кВт при примусовому повітряному охолодженні характеризується питомим об'ємом приблизно 0,01039 м³/кВт, а при водяному охолодженні: 0,00819

м³/кВт, тобто в $\frac{0,01039}{0,00819} \approx 1,27$ рази менше. Таким чином, використання водяного охолодження при побудові перетворювачів для багатосистемних електровозів дозволить зменшити габарити перетворювачів приблизно на 20%, що є важливим в умовах обмеженого простору кузова електровоза.

Значно впливають на масо-габаритні показники перетворювачів традиції проектування та готові інженерні рішення фірм-виробників, а також елементна база, яку використовують розробники перетворювачів.

Проведемо дослідження впливу вищевказаних факторів на питомий об'єм перетворювачів різних виробників з урахуванням елементної бази перетворювачів. За базові приймаємо залежності, що характеризують перетворювачі фірми Siemens, які наведені вище (рис.4.30...4.37).

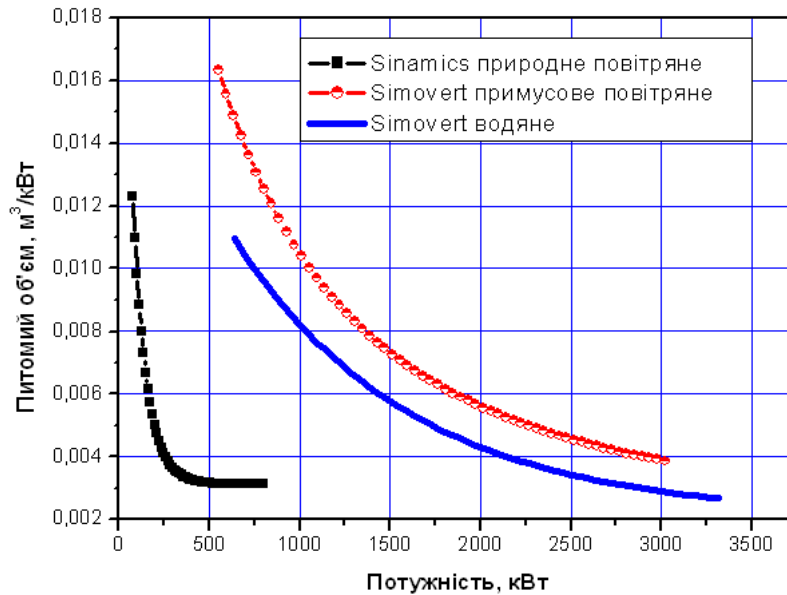


Рис. 4.38. Залежність питомого об'єму перетворювачів серій Sinamics (380...690 В) та Simovert (2,3...4,16 кВ) з примусовим повітряним та водяним охолодженням фірми Siemens від потужності перетворювачів

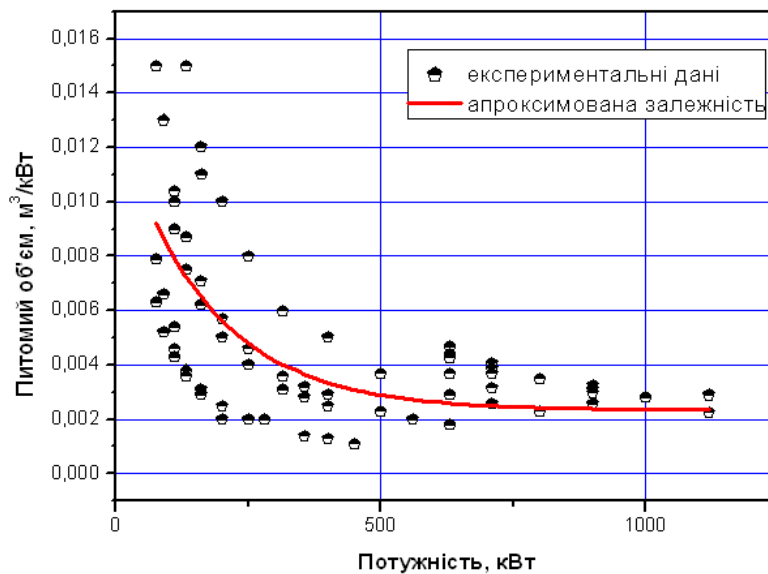


Рис. 4.39. Залежність питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми АВВ з номінальними напругами до одного кВ

На рис. 4.39 представлені залежність питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми АВВ з номінальними напругами до одного кіловольта (елементна база – IGBT, охолодження – природне повітряне). На рис. 4.40 для порівняння представлені залежності для перетворювачів фірм АВВ та Siemens діапазону напруг до одного кВ, елементна база - IGBT, охолодження - природне повітряне.

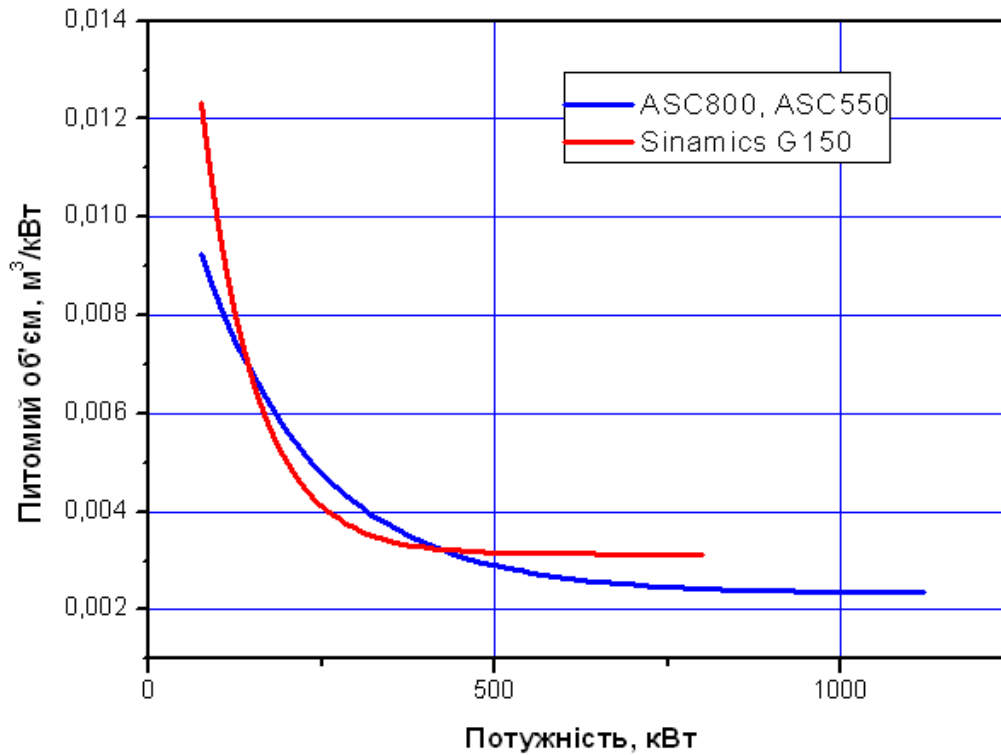


Рис. 4.40. Порівняння залежностей питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми ABB та перетворювачів серії Sinamics G150 ver.A фірми Siemens (елементна база – IGBT, охолодження – природне повітряне)

Як бачимо з рис. 4.40, характер та числові значення залежностей питомого об'єму перетворювачів серії ACS800, ACS550 фірми ABB та перетворювачів серії Sinamics G150 ver.A фірми Siemens є близькими, що може пояснюватися однаковими підходами до проектування перетворювачів, незмінною фізикою теплових та електричних процесів.

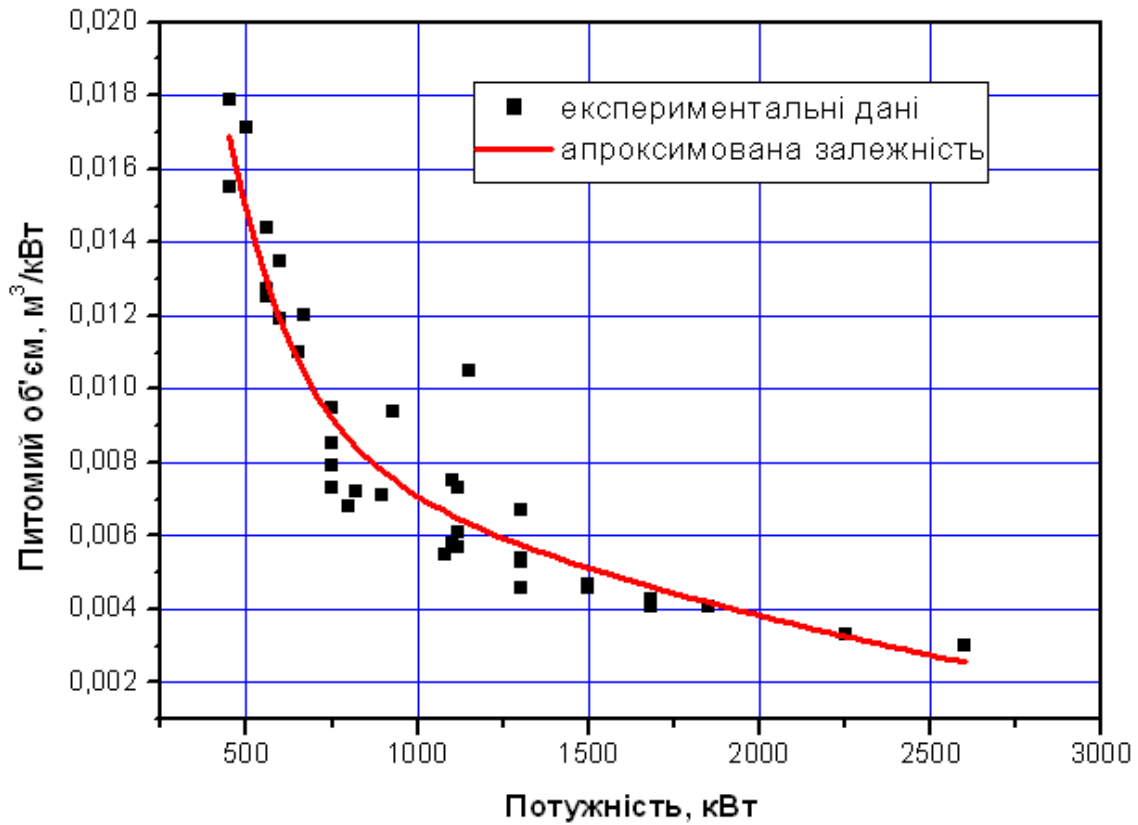


Рис. 4.41. Залежність питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT, з примусовим повітряним охолодженням)

У подальшому системи з природним повітряним охолодженням не розглядаються, оскільки ця система охолодження використовується на перетворювачах відносно малої потужності.

4.8.5. Вплив виду елементної бази на габаритні показники статичного перетворювача асинхронного електропривода

Високовольтні перетворювачі з використанням повітряного та водяного (рідинного) охолодження випускаються фірмою Rockwell Automation, елементною базою яких є SGCT тиристри.

На рис. 4.42 та 4.43 представлені залежність питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT, примусовим повітряним (рис. 4.41) та водяним (рис. 4.42) охолодженням).

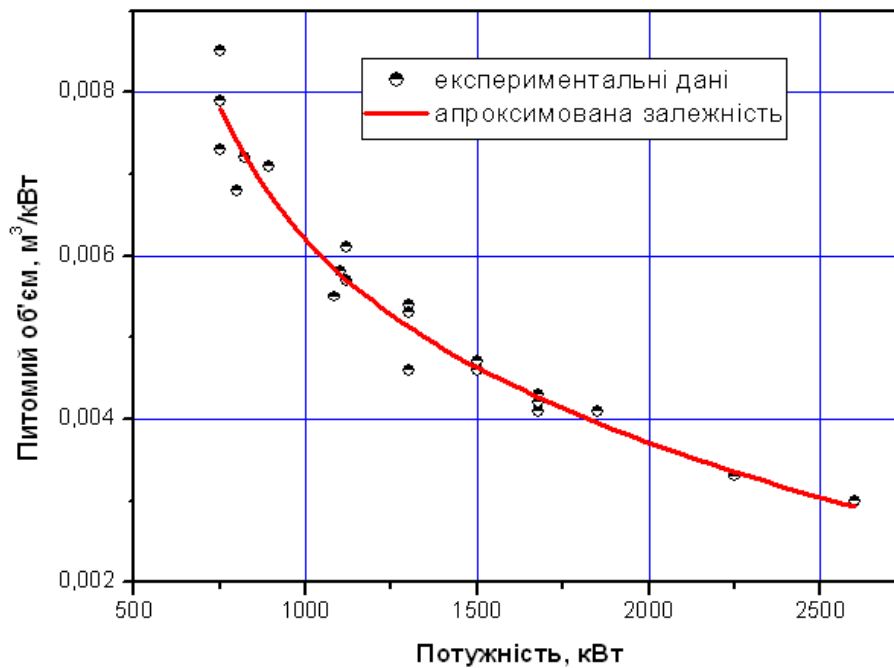


Рис. 4.42. Залежність питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT, із водяним охолодженням)

Порівняємо між собою залежності питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation та серії Simovert фірми Siemens із примусовим повітряним (рис. 4.43) та водяним (рис. 4.44) охолодженням).

Розбіжність отриманих залежностей пояснюється, в першу чергу, використанням у складі перетворювача різної елементної бази: SGCT та IGBT. Так загально відомим є той факт, що IGBT по відношенню до тиристорів (у тому числі SGCT) характеризуються більш високими втратами потужності [19], що призводить до збільшення габаритних розмірів радіаторів системи охолодження та перетворювача у цілому.

Переваги використання тиристорів у складі перетворювачів, з точки зору масо-габаритних показників, ілюструє порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation із примусовим повітряним охолодженням (елементна база – SGCT) та серії Simovert фірми Siemens з водяним охолодженням (елементна база – IGBT) (рис. 4.45).

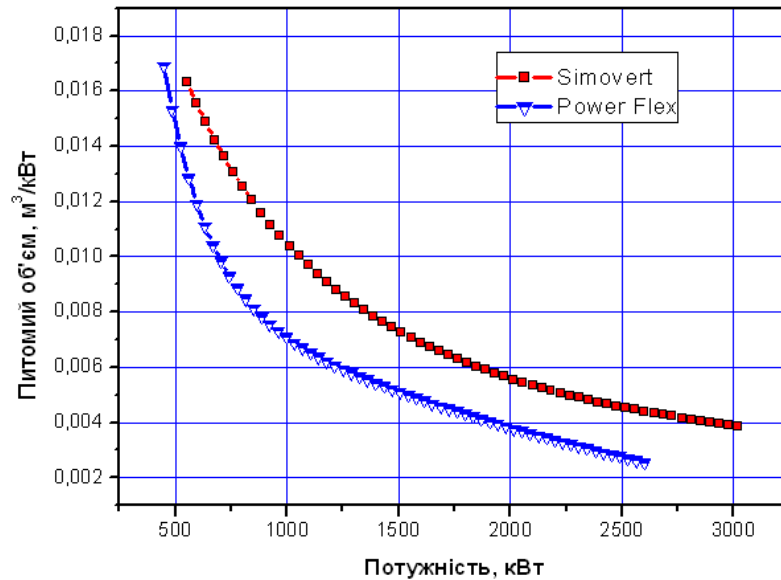


Рис. 4.43. Порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation та серії Simovert фірми Siemens з примусовим повітряним охолодженням

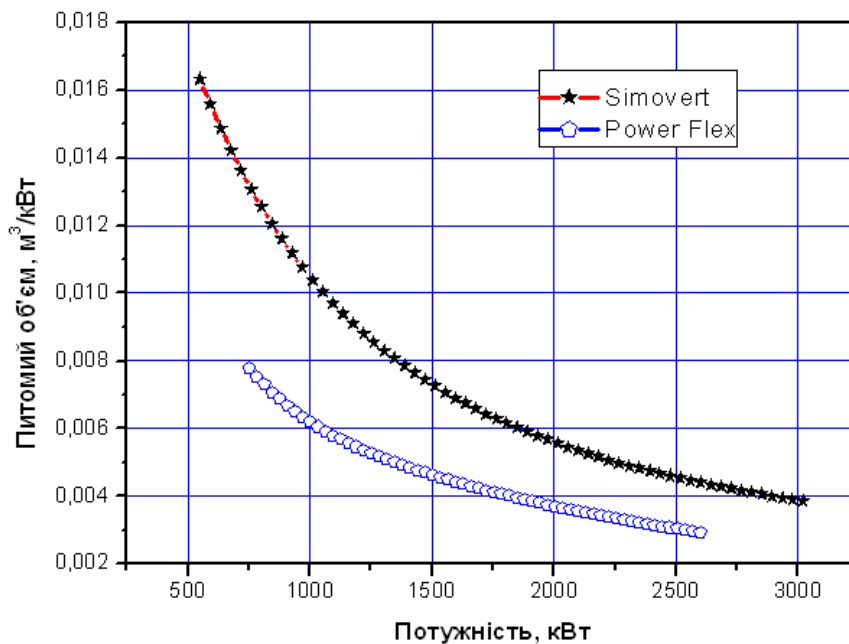


Рис. 4.44. Порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation та серії Simovert фірми Siemens із водяним охолодженням

Як бачимо з рис. 4.45, перетворювачі, які побудовані з використанням SGCT та мають примусове повітряне охолодження, характеризуються меншими габаритними показниками, у порівнянні з перетворювачами, побудованими з використанням IGBT та мають водяне охолодження (при однакових потужностях). Так перетворювач потужністю 1000 кВт на базі SGCT тиристорів при примусовому повітряному охолодженні (рис. 4.45) характеризується питомим об'ємом приблизно 0,00709 м³/кВт, а перетворювачі на базі

IGBT та водяному охолодженні: 0,01039 м³/кВт, тобто питомий об'єм у

разу більше.

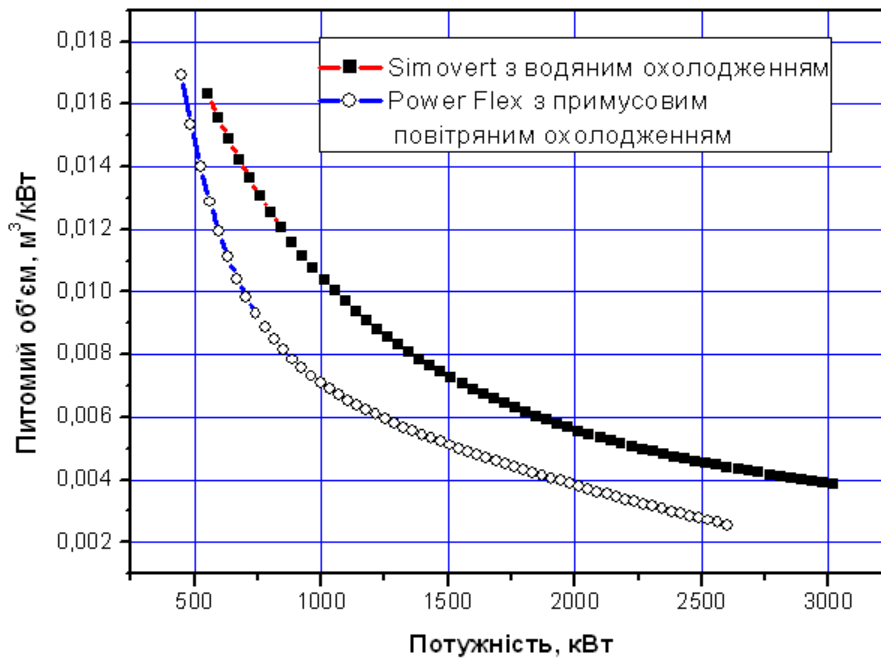


Рис. 4.45. Порівняння залежностей питомого об'єму високовольтних перетворювачів серії PowerFlex фірми Rockwell Automation із примусовим повітряним охолодженням (елементна база – SGCT) та серії Simovert фірми Siemens із водяним охолодженням (елементна база – IGBT)

Таким чином, використання SGCT тиристорів при побудові перетворювачів для багатосистемних електровозів дозволить зменшити габарити перетворювачів приблизно на 40...50 %, навіть за умови використання менш ефективного, у порівнянні з водяним, примусового повітряного охолодження.

Отримані автором вперше коефіцієнти апроксимації залежностей питомого об'єму перетворювачів різних фірм та серій представлені у табл. 4.17.

Таблиця 4.17

Коефіцієнти апроксимації для залежності для різних перетворювачів.

Тип перетворювача		Коефіцієнти				
1	Simovert 2,3...4,16 кВ (IGBT, примусове повітряне охолодження)	0,00169	0,00902	1089,60885	0,00482	1117,9204
2	Simovert 6...6,6 кВ (IGBT, примусове повітряне охолодження)	0,00562	0,01429	648,50927	0,01182	824,66319
3		0,00207	0,01635	1006,46744	0,0012	384,17899

	Simovert 2,3...4,16 кВ (IGBT, водяне охолодження)					
4	ACS800, ACS550 фірми ABB (IGBT, природне повітряне охолодження)	0,00166	0,01073	169,83663	6,6956E-4	1,76393E13
5	PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT з примусовим повітряним охолодженням)	-0,00282	0,08631	192,20354	0,01336	2863,23183
6	PowerFlex фірми Rockwell Automation (елементна база – SGCT з водяним охолодженням)	8,1938E-4	0,03234	240,60059	0,00822	1911,37934

Розглянуті перетворювачі асинхронного електропривода складені з ланкою постійного струму, тобто мають у своєму складі випрямляч, фільтр-накопичувач та трифазний інвертор. Такі самі елементи мають у своєму складі мережевий та тяговий контури запропонованого статичного перетворювача тягової електропередачі з асинхронними тяговими двигунами (рис. 2.5). Тому отримані автором вперше співвідношення можна, у першому наближенні, використовувати для орієнтовного визначення об'єму перетворювачів підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемних електровозів з асинхронними тяговими двигунами [50].

4.9. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів тягової електропередачі з двигунами постійного струму

Другим варіантом структури тягової електропередачі багатосистемного електровоза на базі статичного перетворювача підвищеної частоти є система з тяговими двигунами постійного струму (рис.2.4) [36].

За аналогією з попередніми дослідженнями (п.4.8) автором проведемо аналіз технічних параметрів існуючих статичних перетворювачів для приводів постійного струму [77,187,188,189,190,191]. Вихідними даними є: потужність, габарити, елементна база та вид охолодження існуючих перетворювачів. Дані за вказаними показниками представлені у додатку М (табл. М.7...М.9).

У цьому пункті дисертаційної роботи проаналізовані основні показники перетворювачів таких фірм та підприємств: Siemens, ВАТ «Запорізький завод

«Преобразователь» (Запоріжжя, Україна), ВАТ НДІ «Преобразователь» (Запоріжжя, Україна), ВО «Электровыпрямитель» (Саранськ, Росія), «Харківський електромеханічний завод» (Харків, Україна) та інших підприємств країн СНД (колишнього СРСР). Загалом проаналізовано 294 перетворювачі з них: фірми Siemens - 60, ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» - 135, інших підприємств колишнього СРСР - 99.

Було розглянуто параметри статичних перетворювачів електропривода постійного струму з номінальними напругами з ряду 230, 460, 660, 825 (низьковольтні) та високовольтні перетворювачі з напругами 1050, 2500, 3000, 3300 В.

Розглянутий ряд відповідає значенню напруг які діють у запропонованих перетворювальних структурах (табл. 3.1), що забезпечує багатосистемність електровоза

До уваги бралися перетворювачі з потужністю понад 75 кВт включно, оскільки дослідження відмінностей конструкцій існуючих перетворювачів провідних фірм виробників показав, що саме з цієї потужності починається ряд конструктивного виконання потужних перетворювачів.

Представлені надалі залежності питомого об'єму від потужності перетворювачів враховують тип елементної бази та вид охолодження.

По-перше, розглянемо конструктивні показники перетворювачів виробництва країн СНД, оскільки вони мають однакову інженерну школу, а тому схожі технічні рішення.

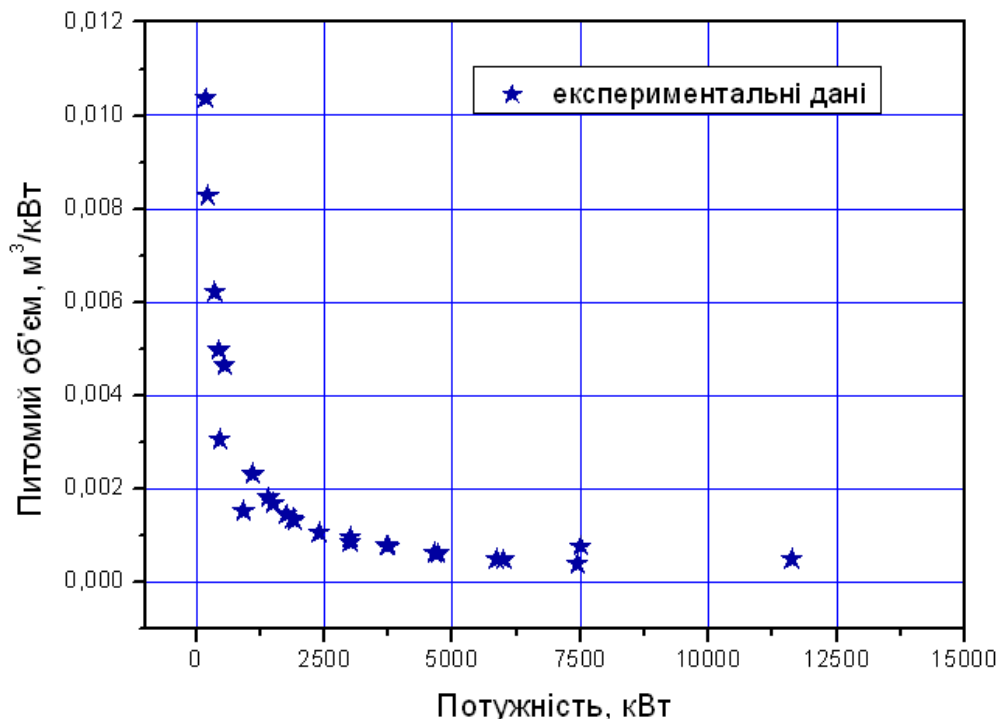


Рис.4.46. Залежність питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ від потужності перетворювачів

На рис. 4.46 представлена залежність $V_{\text{н}} = f(P_{\text{н}})$ побудована за експериментальним даними для перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ (додаток М).

Для отримання аналітичних залежностей для питомого об'єму від їх потужності проведемо апроксимацію експериментальних значень (рис. 4.47).

Залежність питомого об'єму перетворювачів від потужності апроксимувались за допомогою (4.14).

При цьому коефіцієнти апроксимації мають такі значення: $a_1 = 0,0104$, $a_2 = 0,0001$, $a_3 = 0,0000000001$, $a_4 = 0,0000000000000001$.

Тоді вираз для апроксимованої залежності $V_{\text{н}} = f(P_{\text{н}})$ має вигляд:

$$V_{\text{н}} = 0,0104 - 0,0001 P_{\text{н}} + 0,0000000001 P_{\text{н}}^2 - 0,0000000000000001 P_{\text{н}}^3 \quad (4.89)$$

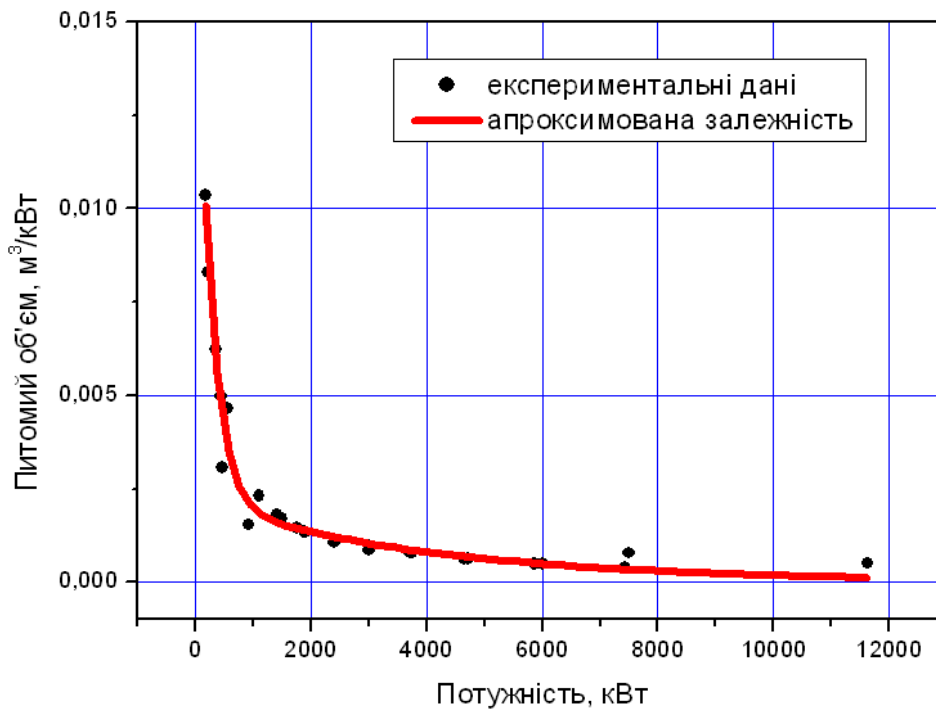


Рис. 4.47. Результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ, від потужності перетворювачів

Аналогічно отримуємо аналітичні залежності питомого об'єму для інших груп перетворювачів, що розглядаються.

Представимо коефіцієнти апроксимації за експоненціальною залежністю другого порядку для залежності $V_{\text{н}} = f(P_{\text{н}})$ по кожній з груп перетворювачів у вигляді табл. 4.18:

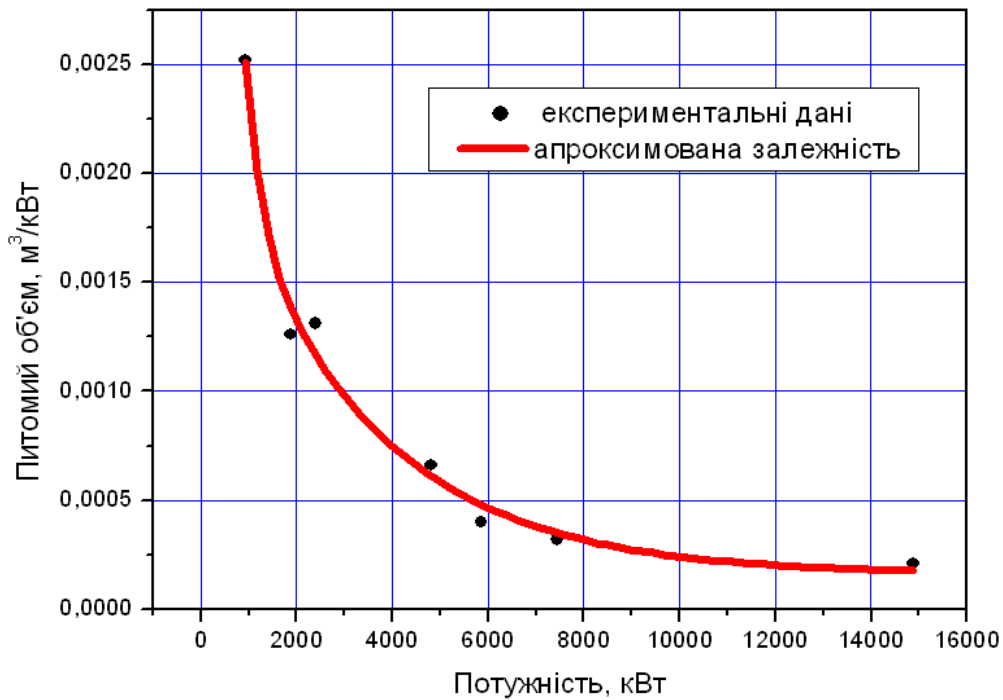


Рис. 4.48. Результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження – водяне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ від потужності перетворювачів

4.9.1. Вплив виду системи охолодження на габаритні показники статичного перетворювача електропривода постійного струму

Отримані залежності дозволяють у першому наближенні оцінити вплив системи охолодження перетворювача на його габаритні розміри, для цього представимо апроксимовані залежності з рис. 4.47 та рис. 4.48 в одній системі координат (рис. 4.49)

Представлені на рис. 4.49 залежності за характером майже не відрізняються одна від одної. Використання представлених у табл. 4.18 коефіцієнтів апроксимації дозволяє порівняти у відсотках вигаши від використання водяного охолодження в перетворювачах, які живлять двигуни постійного струму.

Таблица 4.18

Коефіцієнти апроксимації для залежності
перетворювачів
для різних груп

Тип перетворювача	Коефіцієнти				
Перетворювачі ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (тиристор, примусове повітряне охолодження), до одного кВ	0	0,00223	3942,9266	0,01657	239,70193
Перетворювачі ВАТ «Запорізький завод	1,580E-4	0,01263	331,48236	0,00218	3063,2712

«Преобразователь» (тиристор, водяне охолодження), до одного кВ					
Перетворювачі підприємств країн СНД (тиристор, примусове повітряне охолодження), до одного кВ	0	0,01041	525,68619	0,00412	20755,954
Тягові перетворювачі підприємств країн СНД (тиристор, примусове повітряне охолодження), до одного кВ	0	0,00273	2778,6024	-7,1807E-4	4378,8987
Перетворювачі серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне), до одного кВ	0	1,0221E-4	361,08463	0,00127	62,8627

Так використання водяного (рідинного) охолодження для перетворювача потужністю 4000 кВт дозволяє виграти приблизно 7,4 % від загального об'єму перетворювача, у порівнянні з таким самим за потужністю перетворювачем, який побудовано з використанням примусового повітряного охолодження.

Представимо цей розрахунок.

Питомий об'єм перетворювача потужністю 4000 кВт на базі тиристорів з примусовим охолодженням дорівнює:

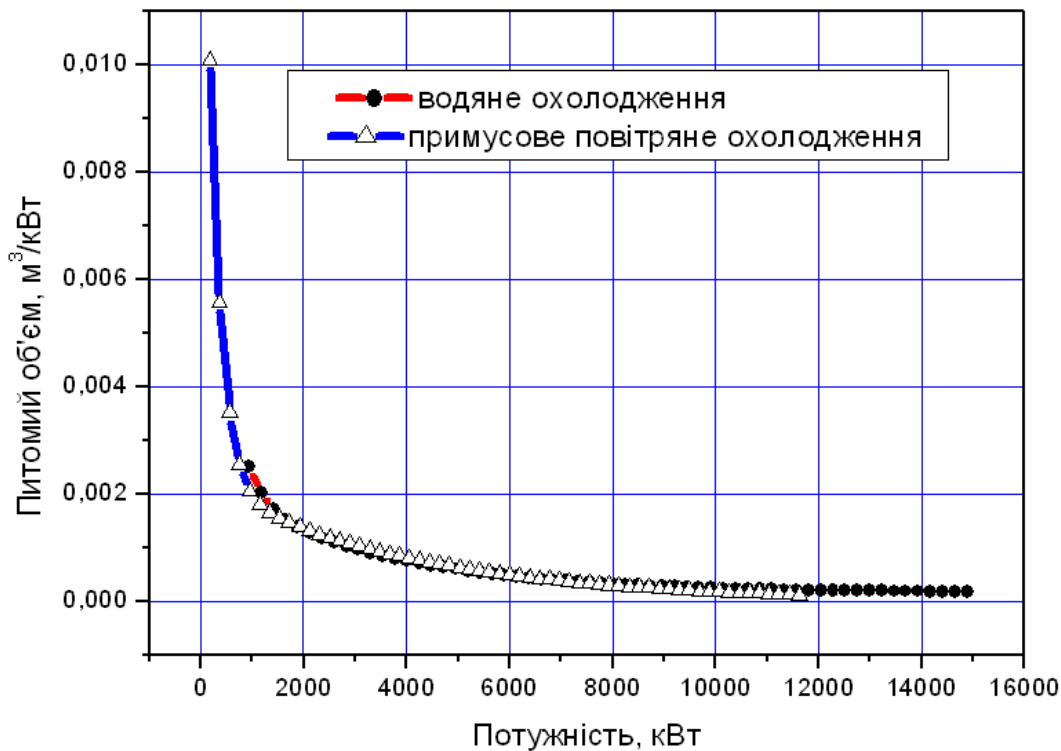


Рис. 4.49. Вплив виду охолодження на габаритні розміри перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор) з діапазоном робочих напруг до одного кВ

Питомий об'єм перетворювача потужністю 4000 кВт, на базі тиристорів з водяним охолодженням дорівнює:

Приймаючі показники системи з примусовим повітряним охолодженням за 100% отримаємо таку відносну зміну питомого об'єму перетворювача:

За табл. П6...П.9 визначимо основні конструктивні показники інших перетворювачів виробництва підприємств країн СНД. На рис. 4.50 представлені результати апроксимації залежності питомого об'єму цих перетворювачів (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ.

На рис. 4.51 представлено порівняння результатів апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів підприємств країн СНД та перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь».

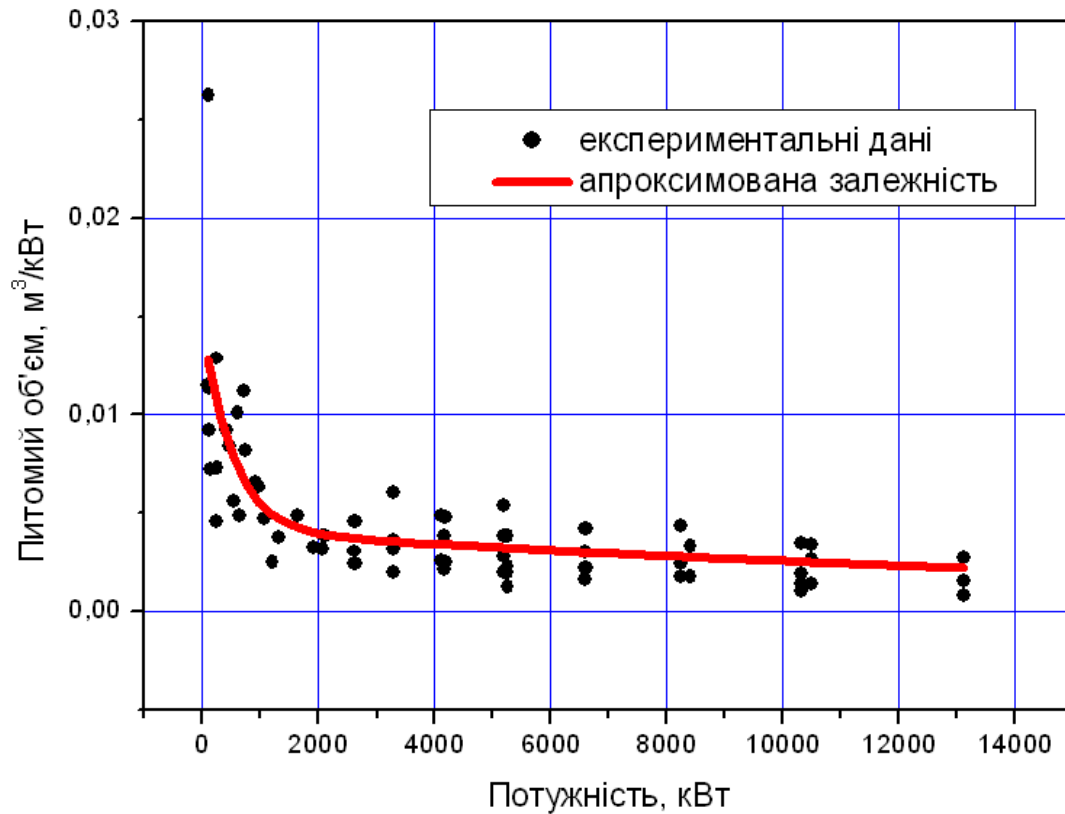


Рис. 4.50. Результати апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів виробництва підприємств країн СНД (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ, від потужності перетворювачів

При порівнянні розглянуто перетворювачі для живлення двигунів постійного струму напругою до одного кВ.

Як бачимо (рис. 4.51) показники питомого об'єму перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» є кращими у порівнянні з аналогічними показниками перетворювачів інших підприємств країн СНД.

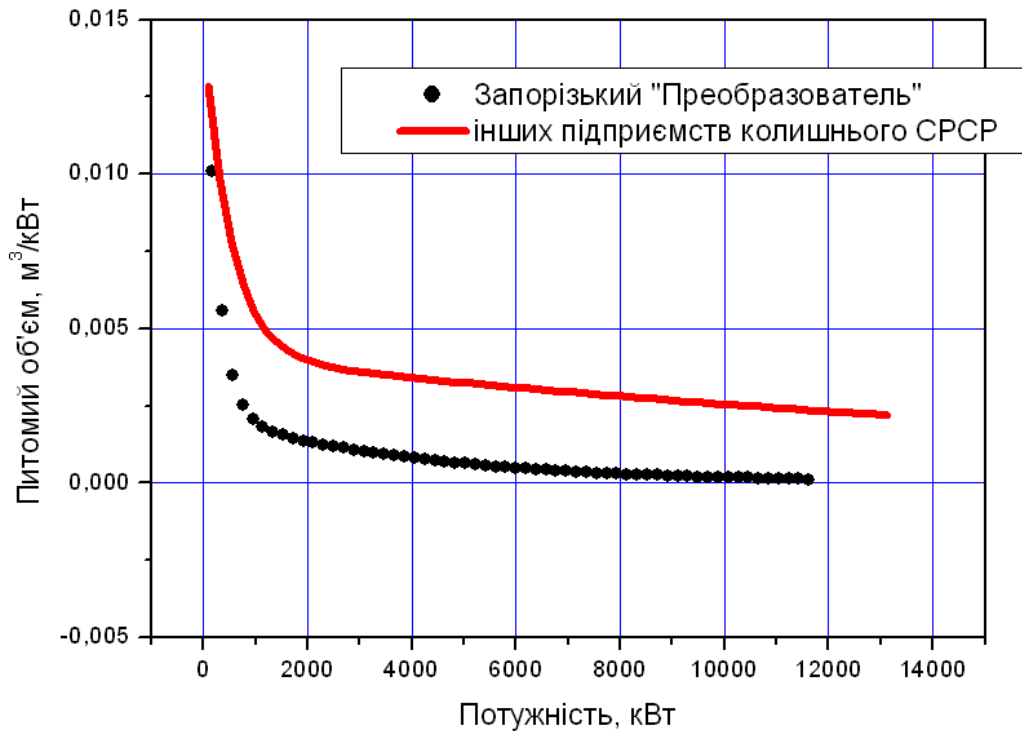


Рис. 4.51. Порівняння результатів апроксимації залежності питомого об'єму перетворювачів підприємств країн СНД та перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь»

Саме тому для подальшого дослідження впливу типу елементної бази та призначення перетворювачів (загальнопромислового або тягового виконання) за базові приймаємо показники перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь».

4.9.2. Питомий об'єм статичних перетворювачів тягового електропривода постійного струму

У представленій роботі конструктивне виконання статичних перетворювачів, призначених для експлуатації на рухомому складі, класифікується як тягове, що пов'язане з особливостями розташування електрообладнання в умовах обмеженого простору кузова.

Розглянемо вплив тягового виконання на конструктивні показники перетворювачів, побудованих із використанням тиристорів та примусового повітряного охолодження (яке використовується на тягових перетворювачах рухомого складу виробництва країн СНД, що експлуатується на залізницях України).

На рис. 4.52 та табл. 4.81 представлені результати апроксимації показників питомого об'єму тягових перетворювачів для рухомого складу виробництва країн СНД (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне).

На рис. 4.53 представимо порівняння питомого об'єму перетворювачів тягового виконання та загальнопромислового (на прикладі перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне).

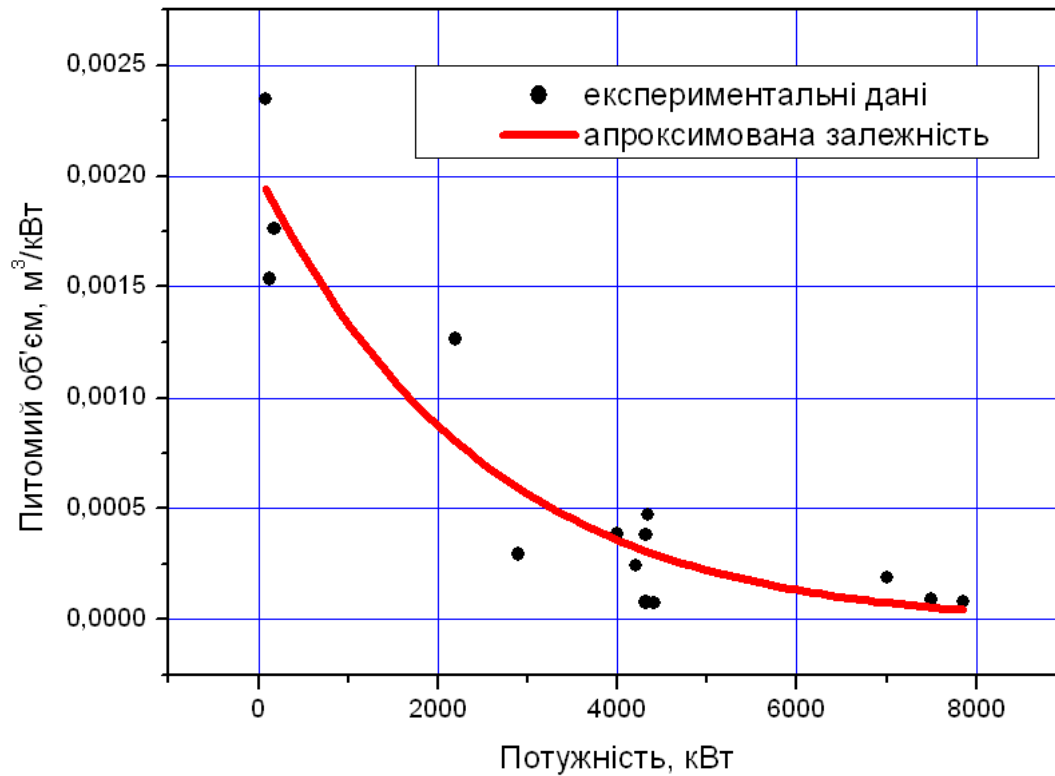


Рис. 4.52. Результати апроксимації показників питомого об'єму тягових перетворювачів для рухомого складу виробництва країн СНД (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне)

Використовуючи представлений вище порядок визначення кількісної оцінки виграшу від використання водяного охолодження (п.4.9.1), визначимо, на скільки відсотків відрізняються габаритні розміри загальнопромислових та тягових перетворювачів, на прикладі перетворювача потужністю 4000 кВт.

Питомий об'єм загальнопромислового перетворювача потужністю 4000 кВт, на базі тиристорів з примусовим охолодженням дорівнює:

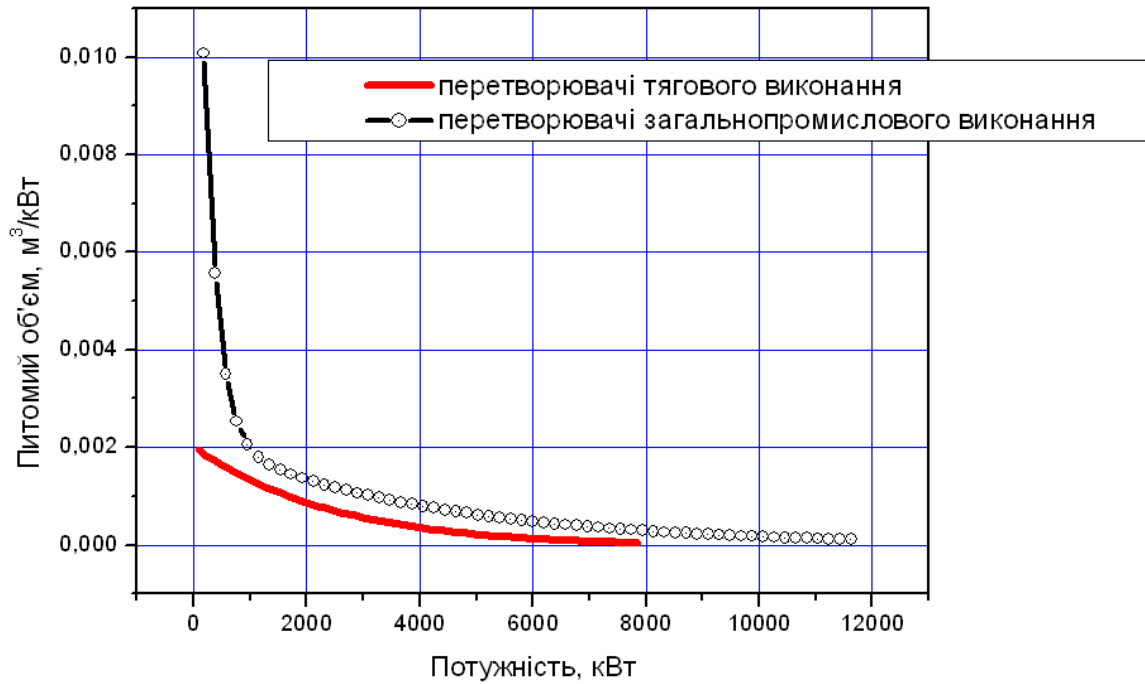


Рис. 4.53. Порівняння питомого об'єму перетворювачів тягового виконання та загальнопромислового (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне)

Питомий об'єм тягового перетворювача потужністю 4000 кВт, на базі тиристорів з примусовим охолодженням дорівнює:

Приймаючи показники загальнопромислового перетворювача з примусовим повітряним охолодженням за 100%, отримаємо таку відносну зміну питомого об'єму перетворювача:

Тобто тягові перетворювачі займають приблизно на 50...60 % менший об'єм, у порівнянні з загальнопромисловими перетворювачами.

Слід зазначити, що перетворювачі, конструктивні показники яких досліджував автор, побудовані за класичною структурою: трансформатор – керований випрямляч (із відповідними фільтрами) – двигун. Живлення цих перетворювачів, в тому числі тягових, здійснюється від мережі змінного струму. Тому при використанні неklasичної структури перетворювача або при живленні від мережі постійного струму конструктивні показники можуть змінюватися.

4.9.3. Вплив виду елементної бази на габаритні показники статичного перетворювача електропривода постійного струму

Значна частина перетворювачів вітчизняного виробництва та виробництва країн СНД, параметри та конструктивні показники яких проаналізовані автором (додаток П), побудовані з використанням елементної бази, характерної для кінця 20 ст.

На сучасному рівні розвитку силової напівпровідникової техніки параметри приладів дозволяють будувати перетворювачі без використання групового з'єднання приладів. Крупні світові компанії, наприклад «Siemens», мають у готові технічні рішення з використанням найсучасніших силових напівпровідникових вентилів. З огляду на викладене вище доцільно проаналізувати, яким чином впливає вид елементної бази на конструктивні показники перетворювачів для приводів постійного струму.

Для виконання цього завдання порівняємо питомі об'єми загальнопромислових перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» та перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження – примусове повітряне).

На рис. 4.54 представлена залежність $V_{\text{об}}^3$ для перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ.

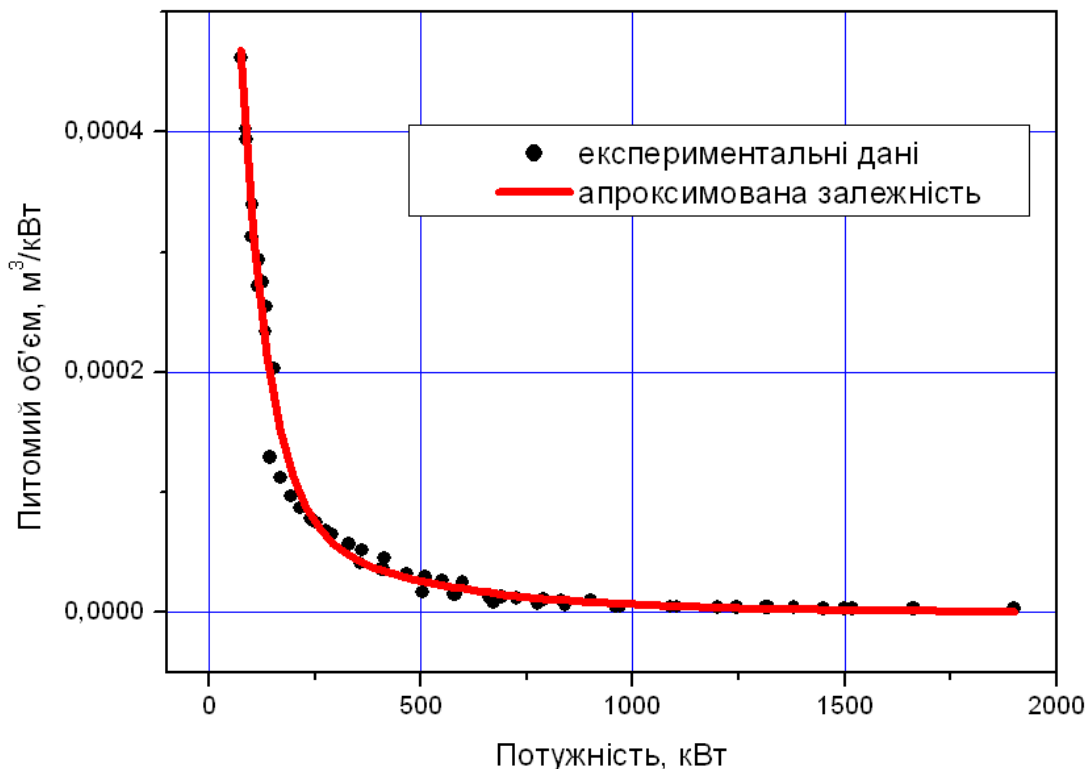


Рис. 4.54. Результати апроксимації показників питомого об'єму перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens (елементна база – тиристор, охолодження - примусове повітряне) з діапазоном робочих напруг до одного кВ

Провести порівняння показників питомого об'єму між перетворювачами заводу «Преобразователь» і перетворювачами серії Simoreg DC Master фірми Siemens на підставі отриманих залежностей можливо тільки в обмеженому діапазоні потужностей (Simoreg тільки до 2000 кВт). Але ж якщо розташувати отримані апроксимовані залежності в одній системі координат (рис.4.55), то підтверджується доцільність

використання сучасних потужних напівпровідникових елементів, оскільки показники питомого об'єму перетворювачів, які укомплектовані сучасними напівпровідниковими приладами, в декілька разів кращі.

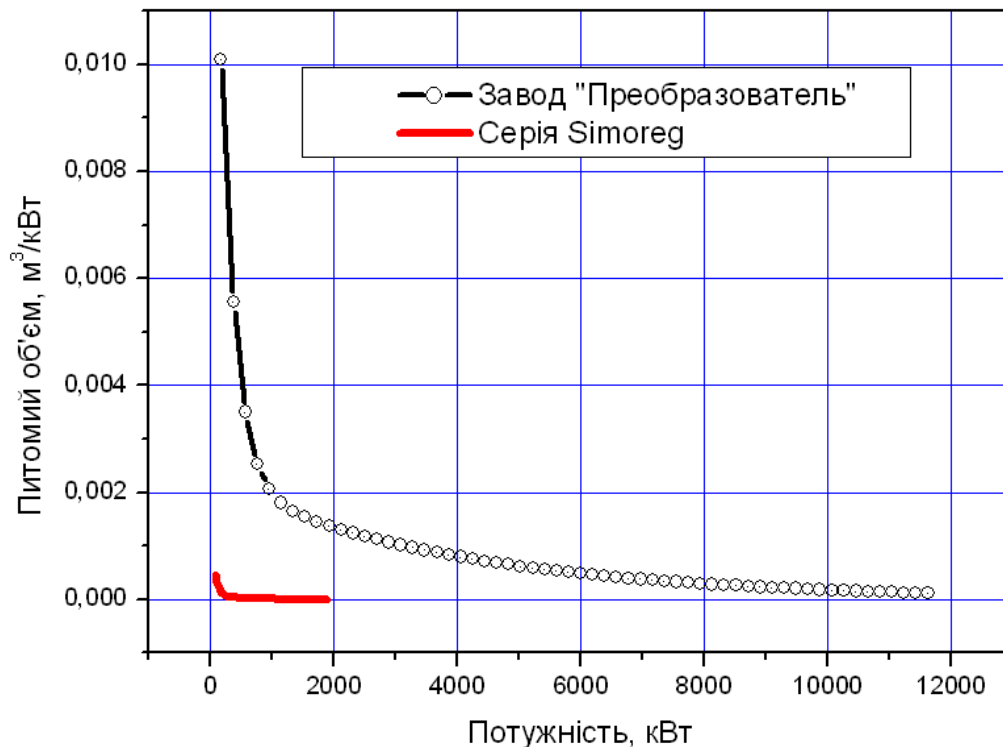


Рис. 4.55. Порівняння питомого об'єму перетворювачів загальнопромислових перетворювачів ВАТ «Запорізький завод «Преобразователь» та перетворювачів серії Simoreg DC Master фірми Siemens

4.10. Висновки з четвертого розділу

За результатами проведених у четвертому розділі дисертації досліджень основних питань щодо побудови тягового трансформатора підвищеної частоти представимо такі висновки.

1. Для тягових трансформаторів підвищеної частоти, з робочою частотою до 3000 Гц, доцільно використовувати електротехнічні сталі з товщиною стрічки не більше 0,08 мм. Ці матеріали характеризуються відносно малими питомими втратами та є технологічними для виготовлення магнітопроводів потужних трансформаторів.

2. За методом визначення повних втрат (без поділення на складові) електротехнічна сталь марки 3424 товщиною стрічки 0,08 мм буде мати найменші питомі втрати, у порівнянні з іншими матеріалами при різних частотах, що обумовлює доцільність використання саме цієї сталі при виготовленні магнітопровода тягового трансформатора підвищеної частоти.

3. Рациональна верхня межа збільшення частоти, яка забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний ККД пристрою, має назву «критична частота». Значення критичної частоти є зворотно пропорційною до потужності трансформатора. Для трансформаторів потужністю від 1000 кВА до 6300 кВА критична частота знаходиться в межах від 2076 Гц до 827 Гц.

4. Збільшення робочої частоти трансформаторів потужністю від 1000 кВА до 16000 кВА з магнітопроводом зі сталі марки 3424 та товщиною стрічки 0,08 мм дозволяє зменшити, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти тієї ж потужності, втрати у магнітопроводі приблизно у три рази, при цьому об'єм зменшується приблизно від семи з половиною до трьох разів.

5. Особливість роботи тягових трансформаторів підвищеної частоти в запропонованих перетворювальних структурах, обумовлюється трьома факторами які пов'язані з напругою живлення та напругою навантаження:

- нестабільність вхідної напруги трансформатора під впливом коливань напруги контактної мережі (фактор коливання);

- зміна величини вхідної напруги трансформатора, при зміні параметрів контактної мережі та схеми поєднання мережевих випрямлячів перетворювача (фактор багатосистемності);

- необхідність підтримки вихідної напруги трансформатора в заданих межах вхідної напруги тягового контуру (фактор стабільності).

6. Реалізувати стабільність вихідної напруги трансформатора при зміні схеми з'єднання мережевих випрямлячів перетворювача та напруги контактної мережі пропонується зміною кількості витків його первинної обмотки.

7. Пропонується для структур статичних перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів вихідну фазну напругу трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти прийняти на рівні 640 В у разі використання тягових двигунів постійного (пульсуючого струму) та 1026 В при використанні асинхронних тягових двигунів.

8. Для запропонованих перетворювальних структур, визначених у попередніх розділах, як раціональні, з точки зору надійності та уніфікації, приймаємо розрахунковий режим підключення мережевих випрямлячів за схемою 1а до контактної мережі постійного струму з напругою 3 кВ, оскільки цей режим присутній у будь-якому варіанті побудови статичного перетворювача підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемного електровоза.

9. Розрахункові потужності силових модулів типів М1, М2 та М3 знаходяться в межах 839,9 кВт до 4098,2 кВт. Для забезпечення необхідного рівня уніфікації обладнання багатосистемних електровозів пропонується прийняти стандартний ряд потужностей трансформаторів: 1000 кВА; 1600 кВА; 2500 кВА; 4000 кВА; 6300 кВА.

10. Отримані параметри схем заміщення трифазного трансформатора підвищеної частоти для запропонованого діапазону потужностей та відповідних робочих частот призначені для проведення комп'ютерного моделювання потрібних режимів роботи статичного перетворювача багатосистемного електровоза при тягових двигунах постійного або змінного струмів.

Дослідження залежності об'єму статичного перетворювача від його потужності, проведені на підставі обробки технічних параметрів існуючих пристроїв та систем, дозволяють зробити такі висновки:

17. Вперше проведений аналіз габаритних показників перетворювачів різної потужності для асинхронного та електропривода постійного струму дозволив визначити аналітичну залежність питомого об'єму перетворювача від його потужності при різній елементній базі та системі охолодження перетворювача. При проведенні аналізу перетворювачі групувались за такими критеріями: виробник, діапазон робочих напруг,

елементна база, система охолодження.

18. Вплив інженерної школи та готових технічних рішень, які відповідають різним виробникам, на залежність питомого об'єму перетворювача від потужності є мінімальним. Це можливо пояснити однаковими підходами до проектування перетворювачів, незмінною фізикою теплових та електричних процесів.

19. Вплив елементної бази перетворювача на залежність питомого об'єму перетворювача від потужності пояснюється, в першу чергу, залежністю габаритних розмірів системи охолодження від втрат потужності на силових елементах перетворювача. Тому, з цієї точки зору, використання SGCT, IGCT приладів у складі перетворювачів є більш зручним по відношенню до IGBT приладів. Так використання SGCT тиристорів із примусовим повітряним охолодженням дозволяє зменшити питомий об'єм статичного перетворювача для асинхронного приводу приблизно в 1,5 разу, у порівнянні зі статичним перетворювачем на базі IGBT транзистора з водяним охолодженням.

20. При використанні IGBT транзисторів у складі силових модулів тягового статичного перетворювача доцільно використовувати примусове водяне охолодження, яке дозволяє зменшити питомий об'єм перетворювача приблизно на 20%, у порівнянні з системами, в яких використовується примусове повітряне охолодження.

21. Отримані результати досліджень (аналітичні залежності питомого об'єму від потужності перетворювача), у першому наближенні, можуть бути використані для визначення конструктивних показників перетворювачів тягової електропередачі на базі тягових двигунів змінного або постійного струмів.

Розділ 5

Дослідження впливу процесів у перетворювачі підвищеної частоти на системи автоматики та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць

Пристрої сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) слугують для регулювання руху поїздів на перегонах і станціях залізниць. Такі пристрої позитивно впливають на роботу залізниць у цілому, забезпечуючи підвищення їх пропускної здатності та організацію безпеки руху поїздів. Рейкові кола (РК) є основним елементом будь яких пристроїв СЦБ, діяльність якого закладено в роботу всіх автоматичних і телемеханічних систем регулювання руху поїздів. Їх працездатність у значній мірі визначає надійність роботи вказаних пристроїв і, що найголовніше, забезпечує безпеку руху поїздів [231...237].

Вплив на надійність роботи кіл СЦБ і зв'язку проявляється в тому, що у вторинну обмотку дросель – трансформаторів індукуються гармоніки тягового струму і при неточному налаштуванні захисного фільтра потрапляння їх у колійне реле може призвести до спотворення його коду та перекриття сигналу. Крім того, амплітуда цих гармонік значно зростає при струмозніманні через дугу під час ожеледі, величина якої може значно перевищувати допустимі значення [231...237].

У тяговій мережі постійного струму основними гармоніками шестипульсової схеми випрямлення є частоти 300, 600, 900, і 1200 Гц. [234...236]. Від них РК частотою 25 або 50 Гц захищені досить надійно. Це досягається завдяки застосуванню в схемах таких РК реле типу ДСШ, які не вимагають додаткових заходів щодо захисту від впливу тягового струму, оскільки потрапляння у колійну обмотку останнього струму іншої частоти призводить до його відпускання.

Склад тягового змінного струму частотою 50 Гц представлений всім спектром непарних гармонік, де чільну роль відіграє третя гармоніка. Із зростанням порядку гармонік процентний вміст їх зменшується. При цьому гармонійний склад тягового струму в рейках відрізняється від свого складу в контактній мережі. Зміст третьої гармоніки в РК досягає 30% у зоні 5-6 км від тягової підстанції і знижується до 15-18% у зоні розтікання тягового струму [233...234].

Допустимі рівні гармонійних складових мережевого струму електрорухомого складу представлені в [234], де визначені допустимі смуги частот, амплітудні значення та характер впливу останніх на сигнальні кола пристроїв СЦБ та зв'язку (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Допустимі рівні гармонійних складових мережевого струму електрорухомого складу

Частота сигнального струму, Гц	Допустимі параметри струму електровоза					
	Смуга частот, Гц	При безперервній дії (більше 0,3 с)		При імпульсній дії		
		Допустимий рівень перешкод, Аефф	Характер впливу	Допустимий рівень перешкод, Аефф	Тривалість імпульсу, с	Період проходження, с
19-31				11,6	менше 0,3	0,3...0,9
19-31				26,6	менше 0,3	більше 0,9

25	21-29	1,0	небезпечне			
	19-21	11,6	що заважає			
	29-31	11,6	що заважає			
50	40-60			5,0	менше 0,1	1,0...6,0
	40-60			9,6	менше 0,1	більше 6,0
	46-54	1,3	небезпечне			
	40-46	5,0	що заважає			
	54-60	5,0	що заважає			
175	167-184	0,4	що заважає	0,4	менше 0,25	менше 0,25
	145-167	40,0		3,3	менше 0,25	більше 0,25
	184-205	40,0				
420	408-432	0,3	що заважає	0,3 1,2	менше 0,2 менше 0,2	0,25...1,5 більше 1,5
480	468-492					
580	568-592					
720	708-732					
780	768-792					
4545	4508- 4583	0,18	що заважає	0,18 0,8	менше 0,2 менше 0,2	0,25...1,5 більше 1,5
5000	4963- 5038					
5555	5518- 5593					

Для визначення рівня електромагнітної сумісності запропонованого статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза з колами СЦБ проведемо моделювання основних режимів його роботи.

Запропонований вище статичний перетворювач тягової електропередачі багатосистемного електровоза (рис. 2.4, 2.5) представляє собою багатоланкову структуру і є досить складною системою, а тому моделювання роботи цієї системи у номінальних та нестационарних режимах є складною задачею.

Для точного опису фізичних процесів в електромеханічних системах потрібне складання нелінійних диференціальних рівнянь. Навіть невелика відмінність у схемі може призвести до того, що моделюватися буде, по суті, новий об'єкт, для якого необхідно вводити нові припущення, наближення тощо [192, 193, 194].

На практиці при моделюванні статичних перетворювачів необхідно враховувати властивості силових ключів, перетворювачів, їх характеристики. Тому для моделювання використовують такі способи, які дозволять перейти від диференціальних рівнянь, котрі описують фізичні процеси, до їх практичної реалізації: моделювання тиристорних перетворювачів за середніми значеннями випрямленої електрорушійної сили; моделювання з урахуванням однонаправленості вентильного кола; моделювання тиристорних перетворювачів за миттєвими значеннями випрямленої е.р.с.; моделювання тиристорних перетворювачів методом переключаючих функцій; моделювання тиристорних перетворювачів методом змінних опорів [192,195,196].

Останній метод отримав найбільш широке застосування на практиці, оскільки ця методика моделювання ґрунтується на описі перехідних процесів нелінійними

диференційними рівняннями, в яких вентилі представлені змінними опорами, що змінюють свою величину в залежності від величини і напрямку струму, або тільки від напрямку струму, а це в найбільшій мірі відповідає реальним фізичним процесам.

Дослідження, представлені у попередніх розділах дисертації, дозволили визначити оптимальні перетворювальні структури.

До таких структур відносимо:

- 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а;
- 6Т(А)-М1-3Ф-6м3а;
- 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а;
- 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а;
- 6Т(А)-М3-3Ф-2м3а.

Отримання рівнянь для дослідження впливу тягового перетворювача багатосистемного електровоза на кола СЦБ є досить складним, це вимагає використання спеціалізованих пакетів прикладних програм для моделювання розробленої системи на персональній обчислювальній машині. Складну задачу обробки таких математичних моделей, на думку автора, найбільш доцільно покласти на потужний обчислювальний процесор такий як MatLab. Для аналізу властивостей електромеханічних та електротехнічних пристроїв широко застосовується складова частина пакету MatLab – програма імітаційного моделювання Simulink [197...214].

Вихідними даними для розробки та проведення імітаційного (комп'ютерного) моделювання, крім структури та параметрів тягової електропередачі є система енергопостачання, до якої входять тягові підстанції та контактна мережа.

5.1. Параметри моделей існуючих системи тягового електропостачання

У першому наближенні система тягового електропостачання як при постійному, так змінному струмі може бути замінена моделлю – еквівалентним джерелом напруги та послідовно ввімкненими та елементами [69].

Значення напруги контактної мережі як при традиційних, так і альтернативних системах електропостачання, представлені у табл. 4.8.

Значення параметрів та є різними для систем тягового електропостачання постійного та змінного струмів.

Для системи тягового електропостачання магістральних залізниць активний опір контактної мережі може бути визначено [69]:

$$(5.1)$$

де: $R_{\text{экв}}$ - еквівалентний опір тягової підстанції; r та l - питомі опори контактної дроти та рейці відповідно, Ом/км; L - відстань від електровоза до живлючої тягової підстанції, км.

Для системи постійного струму еквівалентний опір тягової підстанції для магістральних залізниць постійного струму приймаємо [69]

Максимальна довжина фідерної зони контактної мережі постійного струму дорівнює 20 км [69], при дослідженнях приймаємо розрахункову відстань від живлючої

підстанції до електровоза 10 км, тобто $\frac{1}{2}$ від максимальної довжини.

При сумарному питомому опорі r_{Σ} приблизно 0,055 Ом/км [121] розрахунковий активний опір контактної мережі постійного струму, тобто на відстані електровоза від тягової підстанції 10 км, буде дорівнювати:

$$R_{\Sigma} = r_{\Sigma} \cdot l \quad (5.2)$$

Індуктивність контактної мережі постійного струму визначається як [69]:

$$L_{\Sigma} = l_{\Sigma} \cdot l \quad (5.3)$$

де: l_{Σ} – питома індуктивність контактної мережі, мГн/км.

При питомій індуктивності контактної мережі l_{Σ} [121] розрахункова індуктивність становитиме:

$$L_{\Sigma} = l_{\Sigma} \cdot l \quad (5.4)$$

Питомі опір та індуктивність тягової мережі змінного струму залежать від частоти струму [69]. У першому наближенні, в діапазоні частот від 50 Гц до 3000 Гц, питома

індуктивність мережі змінного струму приймаємо $L_{\Sigma} = 0,0001 \cdot f$ [69, рис. 5.4].

Тоді розрахункова індуктивність тягової мережі змінного струму буде дорівнювати (відстань між живлючою підстанцією та електровозом приймаємо, як і на постійному струмі, 10 км):

$$L_{\Sigma} = 0,0001 \cdot f \cdot l \quad (5.5)$$

Активний опір тягової мережі змінного струму промислової частоти приймаємо 0,17 Ом/км [121]. Тоді розрахунковий активний опір тягової мережі змінного струму дорівнює:

$$R_{\Sigma} = 0,17 \cdot l \quad (5.6)$$

Для системи тягового електропостачання змінного струму тягова підстанція характеризується активним внутрішнім опором r_{Σ} та індуктивністю L_{Σ} , які можна визначити у першому наближенні, використовуючи активний та реактивний опір трансформатора тягової підстанції [239,240].

Активний внутрішній опір тягової підстанції змінного струму дорівнює [239]:

$$r_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}} \quad (5.7)$$

де: S_{Σ} – номінальна потужність трансформатора, кВ·А; P_{Σ} – потужність втрат у міді трансформатора, кВт; U_{Σ} – номінальна напруга на шинах тягової підстанції, кВ.

Реактивний опір тягової підстанції змінного струму дорівнює [239]:

$$L_{\Sigma} = \frac{Q_{\Sigma}}{S_{\Sigma}} \quad (5.8)$$

де: $U_{\text{к.з.}}$ – напруга к.з. трансформатора, %.

Приймаємо, що на тяговій підстанції змінного струму розрахункової ділянки встановлено тяговий трансформатор типу ТДТНЭ-40000/150-71 із номінальними

параметрами $S_{\text{т}}$ кВ·А, $U_{\text{т}}$ кВ, $P_{\text{т}}$ кВт, $\eta_{\text{т}}$ % [241].

Тоді з (5.7) та (5.8) отримаємо:

$$Z_{\text{т}} = \frac{U_{\text{т}}}{I_{\text{т}}} \quad (5.9)$$

$$X_{\text{т}} = \frac{Z_{\text{т}}^2 - R_{\text{т}}^2}{2R_{\text{т}}} \quad (5.10)$$

З (5.10) індуктивність тягової підстанції, при частоті 50 Гц, становитиме [172]:

$$L_{\text{т}} = \frac{X_{\text{т}}}{\omega} \quad (5.10)$$

Порівнявши порядок значень отриманих результатів за виразами (5.5) та (5.10) приймаємо, що індуктивність тягової підстанції змінного струму в подальших дослідженнях не враховуємо.

Результуючий розрахунковий активний опір контактної мережі та тягової підстанції змінного струму дорівнює:

$$R_{\text{т}} \quad (5.11)$$

5.2. Імітаційні моделі статичного перетворювача підвищеної частоти

У додатку Н представлені Simulink-моделі для дослідження процесів у колах статичного перетворювача тягової електропередачі багатосистемного електровоза з метою визначення його впливу на СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць.

Представлені імітаційні моделі статичного перетворювача відповідають структурам запропонованим автором та представленим у додатку Б. Окремо представлені імітаційні моделі відібраних (див. вище) перетворювачів для режиму живлення від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц та мережі постійного струму напругою 3 кВ.

На рис. Н.1 представлена модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ промислової частоти 50 Гц.

У представленій моделі силовий модуль позначено як тягове плече, до складу якого входить мережевий випрямляч, три однофазних інвертори, тяговий трансформатор підвищеної частоти, тяговий інвертор та навантаження. Кожен з цих елементів є типовим для системи імітаційного моделювання. Внутрішня будова цих елементів представлена

на відповідних рис. Н.2...Н.6.

Навантаження представлено RL ланцюжком із параметрами, які забезпечують протікання струму, відповідного до номінальних тягових двигунів, асинхронного або постійного струму. Запропонований підхід у моделюванні режимів роботи статичного перетворювача тягової електропередачі дозволяє оцінити саме взаємодію перетворювача з ланкою підвищеної частоти та рейкового кола [44,45]. Робочі частоти та параметри трансформатора підвищеної частоти визначаються за відповідними таблицями розділу 4 дисертаційної роботи.

В перетворювальній структурі 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а реалізовано силовий модуль типу М1, тобто кожен трифазний трансформатор підвищеної частоти 3Ф живить тяговий контур до якого підключено один тяговий двигун (асинхронний – А або постійного струму - Т). До складу кожного силового модуля входить три послідовно ввімкнених мережевих випрямлячі МВ за схемою 3а.

За рахунок зсуву фаз за напругою у роботі між кожним з силових модулів (на рис.

Н.1 тягове плече) на кут α , де α – кількість трифазних силових модулів у перетворювачі, реалізується метод еквівалентних фаз, який зменшує негативний вплив перетворювача на живлючу мережу [106].

Для перетворювальної структури типу 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а зсув напруг

еквівалентних фаз складатиме $\alpha \cdot 120$ ел. градусів, при цьому зсув фаз між кожним з трьох однофазних інверторів, які входять до складу мережевого контуру кожного з модулів, складатиме 120 ел. градусів, тобто реалізовано класичну трифазну систему. Зсув забезпечується режимом роботи системи керування однофазних інверторів мережевого контуру перетворювача (рис.Н.3).

Модель контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ 50 Гц представлена на рис. Н.7.

Як критерій взаємодії перетворювача з рейковими колами використовуються значення амплітуд гармонійних складових вхідного струму перетворювача, які надалі порівнюються з даними табл. 5.1.

На рис. 5.1 представлені часові діаграми вхідного струму та напруги на вході перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ промислової частоти 50 Гц.

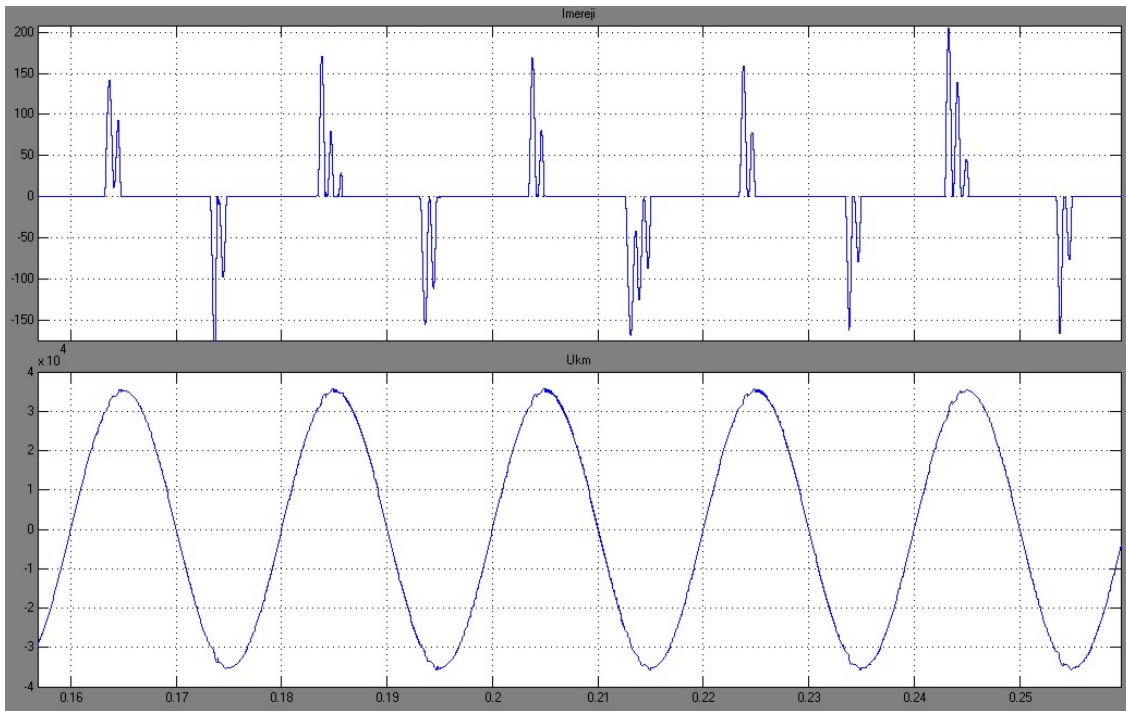


Рис. 5.1. Часові діаграми вхідного струму (верхня осцилограма) та напруги (нижня осцилограма) на вході перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі 25 кВ 50 Гц

Імітаційні моделі перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ представлені на рис. Н.9. У цьому режимі роботи перетворювача блоки однофазних мережевих інверторів, які живлять відповідні фази трансформатора підвищеної частоти, підключаються паралельно до моделі мережі постійного струму (рис. Н.8).

Моделі інших відібраних за результатами досліджень попередніх розділів у режимах живлення від мереж змінного струму 25 кВ 50 Гц та постійного струму 3 кВ, представлені на рис. Н.10...Н.20.

5.3. Оцінка рівня впливу статичного перетворювача з ланкою підвищеної частоти на кола СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць

Система Simulink дозволяє проаналізувати гармонійний склад зафіксованих на осцилографах при моделюванні сигналів. Зокрема у роботі проаналізовано гармонійний склад вхідного струму запропонованого тягового статичного перетворювача з ланкою підвищеної частоти, при струмову навантаженні перетворювача, еквівалентному тяговим двигунам АД914 (СТА1200) та ЕД141 при різних структурах та режимах живлення перетворювача.

На рис. 5.2 представлена гістограма, яка побудована за даними нормованих гармонік із табл. 5.1 та значень відповідних гармонік вхідного струму перетворювача.

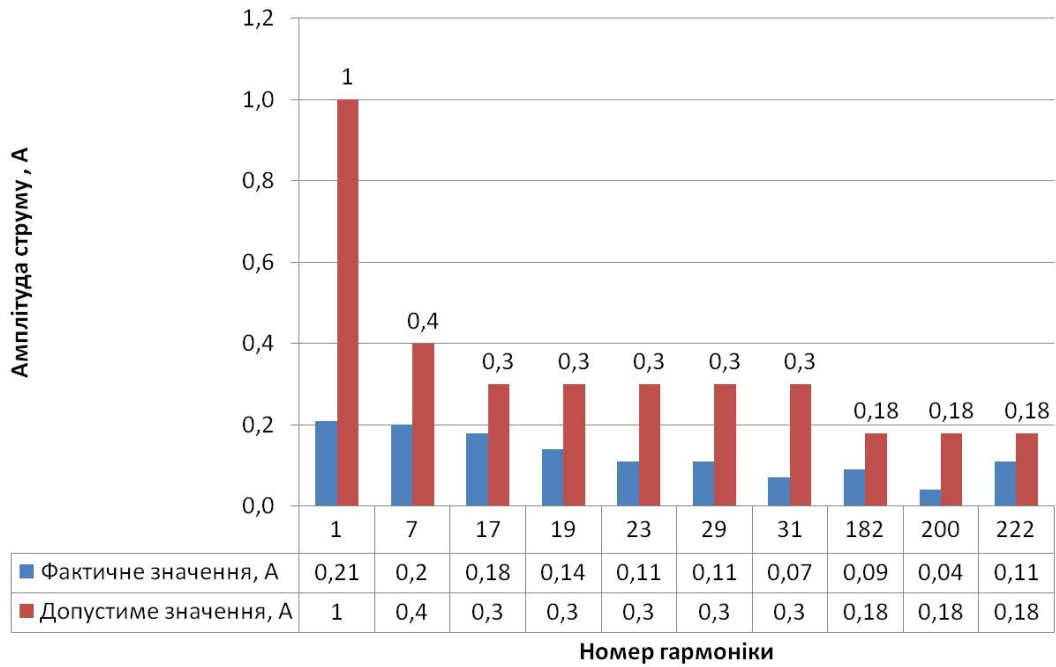


Рис. 5.2. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4А -М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями

При проведенні аналізу впливу частоти базової гармоніки приймали 25 Гц (табл. 5.1). Як бачимо з рис. 5.2 та даних табл. 5.1 (частково представлених на рис. 5.2), при розрахунковому навантаженні перетворювач не генерує у рейкові кола гармонійних складових, які є небезпечними для кіл СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць.

Результати проведення аналогічних досліджень для інших запропонованих перетворювачів при живленні від контактної мережі як змінного, так і постійного струму, моделі яких представлені у додатку Н, також представлені у графічному вигляді (додаток П) та у табл. 5.2 та 5.3:

Таблиця 5.2.

Рівень нормованих гармонік вхідного струму перетворювачів різних типів при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц

Номер гармоніки	Амплітуда, А										Допустиме значення, А
	4А-М1-3Ф-4м3а	4А-М2-3Ф-3а	6А-М1-3Ф-3а	6А-М2-3Ф-3а	6А-М3-3Ф-3а	4Т-М1-3Ф-3а	4Т-М2-3Ф-3а	6Т-М1-3Ф-3а	6Т-М2-3Ф-3а	6Т-М3-3Ф-3а	
1	0,21	0,07	0,09	0,1	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	1
2	19,3	77,7	124,5	109,2	103,1	182,4	146	181,2	142,5	124,9	1,3

7	0,2	0,04	0,02	0,01	0,03	0,005	0,01	0,01	0,008	0,003	0,4
17	0,18	0,1	0,04	0,06	0,02	0,007	0,01	0,01	0,007	0,01	0,3
19	0,14	0,09	0,24	0,11	0,08	0,02	0,01	0,01	0,008	0,01	0,3
23	0,11	0,11	0,32	0,12	0,07	0,003	0,01	0,01	0,01	0,007	0,3
29	0,11	0,05	0,11	0,05	0,07	0,02	0,01	0,01	0,005	0,01	0,3
31	0,07	0,13	0,45	0,29	0,18	0,02	0,01	0,02	0,005	0,01	0,3
182	0,09	0,26	0,14	0,17	0,18	0,17	0,45	0,16	0,15	0,23	0,18
200	0,04	0,005	0,01	0,02	0,01	0,003	0,006	0,008	0	0,04	0,18
222	0,11	0,2	0,07	0,05	0,09	0,08	0,33	0,08	0,18	0,04	0,18

Як бачимо з табл. 5.2 та 5.3 та рисунків додатка П, тягові статичні перетворювачі з ланкою підвищеної частоти типів: 4А-М2-3Ф-2м3а (рис. П.1), 4Т-М2-3Ф-2м3а (рис. П.3), 6А-М1-3Ф-6м3а (рис. П.4), 6Т-М3-3Ф-2м3а (рис. П.9) генерують гармоніки, які перевищують нормативні значення. Це вказує на неможливість використання цих перетворювальних структур, без вжиття додаткових заходів щодо забезпечення електромагнітної сумісності з колами СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць.

Таблиця 5.3.

Рівень нормованих гармонік вхідного струму перетворювачів різних типів при живленні від мережі постійного струму 6 кВ

Номер гармоніки	Амплітуда, А										Допустиме значення, А
	4А-М1-3Ф-4м3а	4А-М2-3Ф-2м3а	6А-М1-3Ф-6м3а	6А-М2-3Ф-3м3а	6А-М3-3Ф-2м3а	4Т-М1-3Ф-4м3а	4Т-М2-3Ф-2м3а	6Т-М1-3Ф-6м3а	6Т-М2-3Ф-3м3а	6Т-М3-3Ф-2м3а	
1	0,05	0,04	0,21	0,2	0,21	0,01	0,03	0,01	0,03	0,003	1
2	0,02	0,02	0,21	0,19	0,17	0,01	0,01	0,01	0,01	0,007	1,3
7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,01	0,4
17	0,01	0,007	0,02	0,01	0,01	0,04	0,08	0,02	0,14	0,01	0,3
19	0,01	0,007	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,3
23	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,3
29	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,05	0,01	0,3
31	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,01	0,03	0,01	0,06	0,004	0,3
182	0,006	0,004	0,007	0,003	0,005	0,003	0,01	0,008	0,02	0,004	0,18

200	0,004	0,003	0,006	0,005	0,005	0,002	0,01	0,006	0,02	0,002	0,18
222	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,004	0,01	0,008	0,02	0,007	0,18

5.4.Висновки з п'ятого розділу

За матеріалами проведених у представленому розділі досліджень робимо такі висновки.

1. Розроблені імітаційні моделі запропонованих структур тягового статичного перетворювача з ланкою підвищеної частоти дозволяють провести дослідження щодо визначення впливу цього перетворювача на кола СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць як на постійному, так і змінному струмах у контактній мережі.

2. Як критерій взаємодії перетворювача з рейковими колами використовуються нормовані значення амплітуд гармонійних складових вхідного струму перетворювача.

3. Серед перетворювальних структур, вплив яких на рейкові кола досліджувався при встановлених рівнях робочих частот, навантаження та напруги контактної мережі, тільки чотири структури, а саме – 4А-М2-3Ф-2м3а, 4Т-М2-3Ф-2м3а, 6А-М1-3Ф-6м3а, 6Т-М3-3Ф-2м3а недоцільно використовувати без додаткових заходів щодо забезпечення електромагнітної сумісності з колами СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць

4. У цілому проведені у представленому розділі дисертації дослідження підтвердили забезпечення електромагнітної сумісності запропонованих перетворювальних структур із колами СЦБ та зв'язку електрифікованих ділянок залізниць.

РОЗДІЛ 6

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЯГОВОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Створення нової техніки повинно мати обґрунтовану доцільність. По відношенню до електровозів це – покращення тягово-енергетичних та техніко-економічних показників. Отримані значення ККД тягової електропередачі діючих електровозів змінного та постійного струмів (розділ 1) використовуємо для визначення ефективності використання тягової електропередачі багатосистемного електровоза на базі уніфікованих перетворювачів підвищеної частоти, побудованого за визначеними автором структурами (див. розділи 3 та 4).

Для збільшення енергетичної ефективності системи електропостачання залізниць приймаємо, що перетворювач повинен забезпечити режим рекуперативного гальмування електровоза, тобто до складу мережевого та тягового контурів перетворювача входять керовані випрямлячі (рис.2.4 та 2.5).

6.1. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача в режимі живлення від контактної мережі змінного струму

Як базовий приймаємо уніфікований перетворювач типу 4А-М1-3Ф-4м3а (рис. Б.5). Для визначення ККД перетворювача розглянемо один силовий модуль при поєднанні мережевих випрямлячів за схемою , що відповідає режиму живлення перетворювача від контактної мережі змінного струму – режим «25 кВ 50 Гц». Схема для розрахунку ККД перетворювача для живлення АТД представлена на рис. 6.1 [62].



Рис. 6.1. Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні АТД

На рис. 6.1 вказані ККД: $\eta_{\text{МВ}}$ – мережевого керованого випрямляча; $\eta_{\text{СМ}}$ – DSMT4 – емнісних фільтрів мережевого та тягового контурів; $\eta_{\text{МІ}}$ – інвертора мережевого контуру; $\eta_{\text{ТТПЧ}}$ – трифазного трансформатора підвищеної частоти; $\eta_{\text{ТВ}}$ – відповідно випрямляча та інвертора тягового контуру перетворювача.

Для реалізації високого значення коефіцієнта потужності перетворювача, при живленні від контактної мережі змінного струму вхідний випрямляч пропонується виконати керованим за однофазною мостовою схемою. Як ключові елементи доцільно використати модулі на базі IGCT, GTO або IGBT приладів. Для отримання кривої струму, близької до синусоїдальної, з мінімальним зсувом фази по відношенню до напруги, доцільне використання ШІМ модуляції [84,85,97].

6.1.1. Енергетичні показники складових частин тягового перетворювача підвищеної частоти

Підвищення робочих частот ключових елементів призводить до зростання комутаційних втрат у ключах та відповідне зменшення ККД випрямляча у цілому. В роботах [215,216,219] розглянуті питання використання у складі ШІМ перетворювачів двоквADRантних сильнострумових високовольтних ключів саме з точки зору сумарних втрат енергії в них під час роботи (ввімкнення, режим провідності та вимкнення).

Тиристорний високовольтний ключ на середній струм 1400 А та робочу постійну напругу 2250 В при частоті ШІМ 1000 Гц має сумарні втрати енергії 11824 Вт [216]. У відсотках, по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати становитимуть:

(6.1)

При побудові мережевого випрямляча за мостовою однофазною схемою на базі чотирьох тиристорних високовольтних ключів одночасно працює два ключових прилади [76], сумарні втрати потужності будуть дорівнювати:

(6.2)

Тоді ККД мережевого керованого випрямляча, на базі тиристорних ключів буде дорівнювати:

(6.3)

Для порівняння відмітимо, що однофазний тяговий перетворювач радянського виробництва ВУК-60-4л, на базі діодів, має ККД на рівні 0,98, а кількість напівпровідникових приладів при цьому дорівнює 200 одиниць при робочій частоті 50 Гц. Тиристорний перетворювач ВУК-4000 на базі 192 тиристорів має ККД 0,99, а перетворювач ВІП-4000 на базі 88 тиристорів має ККД 0,985 [100].

Відносно незначний вииграш у ККД перетворювача на базі сучасних приладів, при значно меншій їх кількості, обумовлено у першу чергу високими комутаційними втратами у напівпровідникових приладах. При розрахунках втрат енергії робоча частота ключів дорівнювала 1000 Гц [216].

Другим варіантом є побудова мережевого випрямляча на транзисторних ключах.

Транзисторний високовольтний ключ на середній струм 900 А та робочу постійну напругу 2250 В при частоті ШІМ 1000 Гц має сумарні втрати енергії 9832 Вт [216]. У відсотках по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати становитимуть:

(6.4)

При побудові мережевого випрямляча на базі транзисторних високовольтних ключів сумарні втрати потужності становлять:

(6.5)

Тоді ККД мережевого випрямляча, на базі транзисторних ключів становитиме:

(6.6)

Ще одним варіантом є побудова мережевого випрямляча на так званих гібридних ключах, які поєднує в собі тиристор, транзистор та зворотній діод. Гібридні ключі

дозволяють реалізувати переваги IGBT транзисторів у режимі вимикання та переваги HD-GTO, GCT у режимах прямої провідності та ввімкнення приладів [216]. Позначення та структура гібридного ключа представлені на рис. 6.2 [215, 216].

Гібридний високовольтний ключ на середній струм 1200 А та робочу постійну напругу 2250 В, при частоті ШІМ 1000 Гц, має сумарні втрати енергії 6746 Вт [216]. У відсотках по відношенню до потужності, що комутує ключ, ці втрати становитимуть:

$$(6.7)$$

При побудові мережевого випрямляча на базі чотирьох гібридних високовольтних ключів сумарні втрати потужності дорівнюють:

$$(6.8)$$

Тоді ККД мережевого випрямляча на базі гібридних ключів буде дорівнювати:

$$(6.9)$$

Порівнявши отримані значення ККД за виразами (6.3), (6.6) та (6.9), стає зрозумілим, що для збільшення енергоефективності перетворювача у його складі доцільним буде використання гібридних ключів, які характеризуються мінімальним рівнем втрат потужності.

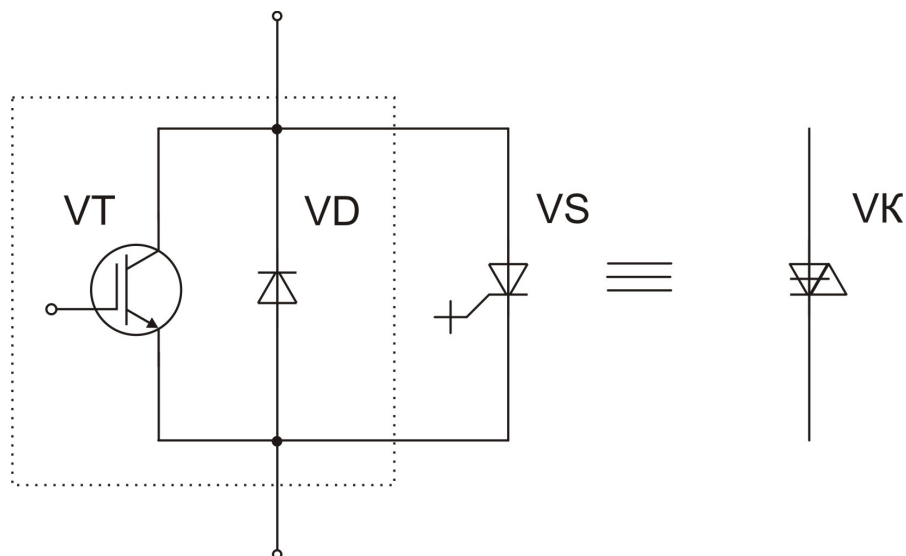


Рис. 6.2. Позначення та структура гібридного ключа

Особливо це актуально для запропонованого у роботі перетворювача підвищеної частоти, оскільки всі його складові частини мають відносно значні робочі частоти.

На підставі цього визначимо ККД інших складових частин перетворювача підвищеної частоти для тягової електропередачі багатосистемного електровоза, побудованого на базі напівпровідникових ключів.

Для зменшення кількості напівпровідникових приладів, що забезпечить більш високий ККД, доцільно побудувати інвертор мережевого контуру перетворювача за напівмостовою схемою [76,83]. В одному напівперіоді роботи інвертора бере участь один силовий ключ [76]. Тоді ККД мережевого інвертора, побудованого на гібридних ключах,

становитиме:

(6.10)

Випрямляч ТВ тягового контуру (рис.2.4, 2.5) для забезпечення режиму рекуперації електровоза повинен мати дуальні властивості, тобто у режимі тяги він працює як випрямляч струму, а у режимі рекуперації - як інвертор напруги. Варіант дуальної структури з такими властивостями представлено у роботі [217]. Принципова схема випрямляча тягового контуру перетворювача підвищеної частоти, на базі IGBT транзисторів, представлена на рис. 6.3.

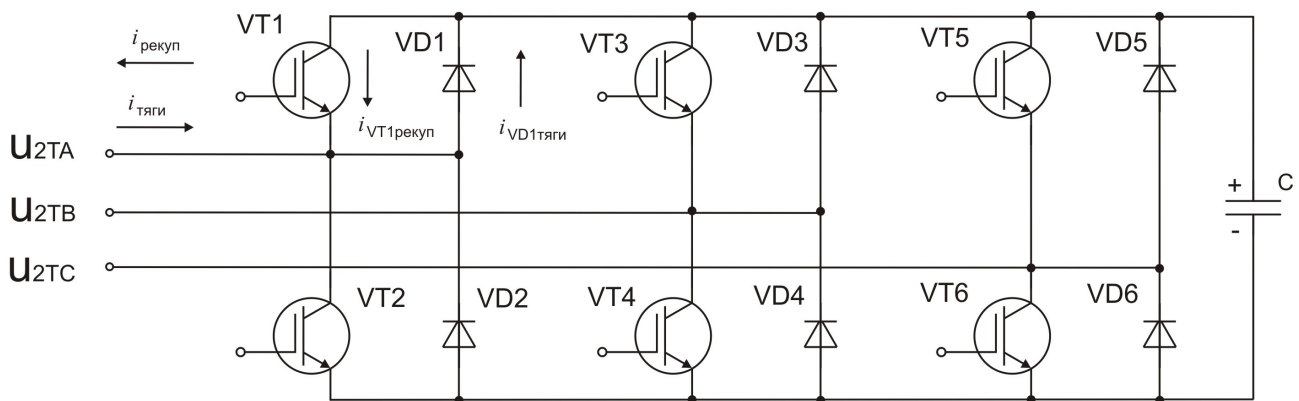


Рис. 6.3. Принципова схема випрямляча тягового контуру

У режимі тяги схема (рис. 6.3) працює як мостовий трифазний випрямляч на базі напівпровідникових діодів VD1...VD6, а у режимі рекуперації працює інвертор напруги на базі IGBT транзисторів VT1...VT6. Напрямок струмів для режиму тяги має індекс «тяги», а режиму рекуперації – «рекуп».

Приймаючи у першому наближенні втрати у гібридному ключі при знакозмінних напругах (режим тяги або рекуперації) однаковими, отримаємо значення ККД випрямляча тягового контуру, побудованого на гібридних ключах. При цьому враховуємо, що у мостовій трифазній схемі одночасно працює три ключових елементи [76].

ККД випрямляча тягового контуру дорівнює:

(6.11)

Як інвертор тягового контуру (рис. 2.5) пропонується використати трифазний мостовий інвертор напруги з ШІМ модуляцією [218]. До виходу цього інвертора підключається трифазний асинхронний тяговий двигун.

Тоді ККД тягового інвертора на базі гібридних ключів дорівнює:

(6.12)

6.1.2. Енергетичні показники трифазного трансформатора підвищеної частоти

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається співвідношенням сумарних втрат у сталі та міді до потужності трансформатора. Сумарні втрати потужності у трифазному трансформаторі підвищеної частоти, з урахуванням виразу (4.70), дорівнюють:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + P_{\text{вн}} + P_{\text{кз}}} \quad (6.13)$$

де $P_{\text{н}}$ – потужність короткого замикання; $P_{\text{вн}}$ – втрати неробочого ходу трансформатора.

Тоді з (6.13) ККД трансформатора потужністю $P_{\text{н}}$ визначається як:

$$\eta_{\text{ККД}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{н}} + P_{\text{вн}} + P_{\text{кз}}} \quad (6.14)$$

Попередні дослідження (розділ 4) дозволили визначити втрати неробочого ходу для трансформаторів підвищеної частоти з ряду потужностей: 1000 кВА; 16000 кВА; 2500 кВА; 4000 кВА та 6300 кВА. При $P_{\text{н}}$ втрати неробочого ходу цих трансформаторів складають відповідно (табл.4.11): 602 Вт; 887 Вт; 1283 Вт; 1890 Вт та 2750 Вт. Використовуючи ці значення втрат неробочого ходу за виразом (6.14), визначимо ККД трифазного трансформатора підвищеної частоти (табл.6.1) при співвідношеннях втрат неробочого ходу та короткого замикання: 2,5; 3,0; 2,5; 4,0.

Широкий діапазон співвідношення $P_{\text{вн}}/P_{\text{кз}}$ дозволяє врахувати можливі відхилення у значеннях втрат короткого замикання трансформатора при різних конструкціях складових частин трансформатора підвищеної частоти.

До складу перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а, який живить АТД із розрахунковою потужністю 1200 кВт, необхідно включити трифазний трансформатор із близьким значенням потужності з визначеного вище ряду. Близьким та більшим значенням до потужності АТД є значення 1600 кВА, тому за розрахунковий діапазон ККД приймаємо $\eta_{\text{ККД}} = 0,9979 - 0,9985$ (стовпчик 3 табл. 6.1).

Таблиця 6.1

ККД трифазного трансформатора підвищеної частоти

Параметр		Потужність, кВт				
		1000	1600	2500	4000	6300
1		2	3	4	5	6
1	Втрати неробочого ходу, Вт	602	887	1283	1890	2750
2	ККД трансформатора,	0,9979	0,9981	0,9982	0,9983	0,9985

3	ККД трансформатора,	0,9976	0,9978	0,9979	0,9981	0,9983
4	ККД трансформатора,	0,9973	0,9975	0,9977	0,9979	0,9980
5	ККД трансформатора,	0,9970	0,9972	0,9974	0,9976	0,9978

6.1.3. Енергетичні показники конденсаторних фільтрів-накопичувачів

У запропонованих перетворювальних структурах (додаток Б), призначених для роботи з асинхронними тяговими двигунами, використовуються два ємнісні фільтри-накопичувачі: мережевий та тяговий. Перший забезпечує роботу напівмостового інвертора мережевого контуру. Другий – роботу автономного інвертора напруги, який живить АТД та входить до його складу.

Для оцінки рівня втрат у конденсаторах використовується показник – тангенс кута діелектричних втрат [99,220...223]. Потужність електричних втрат у конденсаторі з реактивною потужністю (за основною гармонікою) визначається як:

$$(6.15)$$

Для конденсаторів на базі плівкових діелектриків, призначених для роботи у складі статичних перетворювачів (фільтрових, комутуючих), значення тангенсу кута діелектричних втрат знаходиться в межах від 0,003...0,005 до 0,1...0,15 [220,223].

ККД конденсаторів, які входять до складу силової частини запропонованого перетворювача, у першому наближенні, пропонується визначити як співвідношення потужності на виході конденсатора , до потужності на вході, яка враховує потужність електричних втрат у конденсаторі:

$$(6.16)$$

При значенні :

$$(6.17)$$

У робочій період інвертора працює один із конденсаторів фільтра-накопичувача мережевого контуру, тому:

.

6.1.4. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача для режиму «25 кВ, 50 Гц» при асинхронних тягових двигунах

Результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача, відповідно до рис. 6.1 визначається як:

$$(6.19)$$

Числові значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача при використанні гібридного ключа у складі випрямлячів (МВ, ТВ) та інверторів (МІ, ТІ)

мережевого та тягового контурів, при різних співвідношеннях втрат у трифазному трансформаторі підвищеної частоти (ТТПЧ) представлено у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача

	2,5	3,0	3,5	4,0
	0,9661	0,9658	0,9655	0,9652
Середнє	0,9657			

Графік залежності результуючого значення ККД перетворювача при гібридних

ключач від співвідношення втрат представлено на рис. 6.4.

Отримані значення результуючого ККД перетворювача мають високе значення (середнє 0,9657 з табл. 6.2), що підтверджує доцільність використання запропонованої структури уніфікованого перетворювача для перспективних багатосистемних електровозів.

Фірма Alstom розробила систему eTransformer, яка побудована з використанням трансформаторів підвищеної частоти. Коефіцієнт корисної дії цього перетворювача на базі IGBT транзисторів досягає значення 0,94 (живлення від контактної мережі 15 кВ 16 2/3 Гц) [71,72].

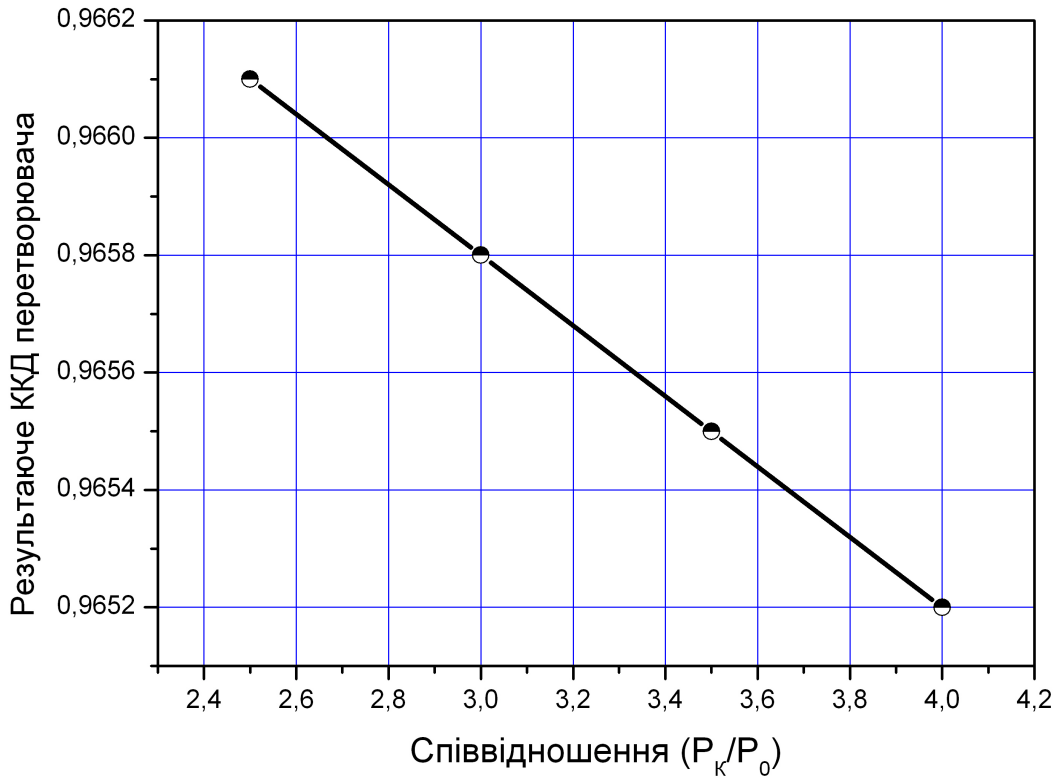


Рис. 6.4. Залежність результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача при гібридних ключах

Для порівняння розглянемо значення результуючого ККД запропонованого уніфікованого перетворювача, у режимі «25 кВ 50 Гц», при використанні ключів на базі IGBT транзисторів та GCT тиристорів. Порядок розрахунку залежностей результуючого

ККД перетворювача від співвідношення втрат трансформатора підвищеної частоти такий самий, як і для гібридного ключа, але значення ККД для мережевих випрямляча та інвертора, а також випрямляча та інвертора тягового контуру визначаються з

урахуванням співвідношень (6.1) та (6.4). Отримані залежності представлені у графічному вигляді на рис. 6.5, а числові значення представлені у табл.6.3.

При використанні транзисторного ключа середнє значення ККД перетворювача дорівнює 94,53% (табл. 6.3), тобто відповідає енергетичному показнику системи eTransformator (94%) [71,72]. Цей факт підтверджує адекватність отриманих результатів.

Таблиця 6.3

Значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача при різних силових ключах

	2,5	3,0	3,5	4,0
Транзисторний ключ				
	0,9457	0,9454	0,9451	0,9448
Середнє	0,9453			

Тиристорний ключ				
	0,9552	0,9549	0,9546	0,9543
Середнє	0,9548			

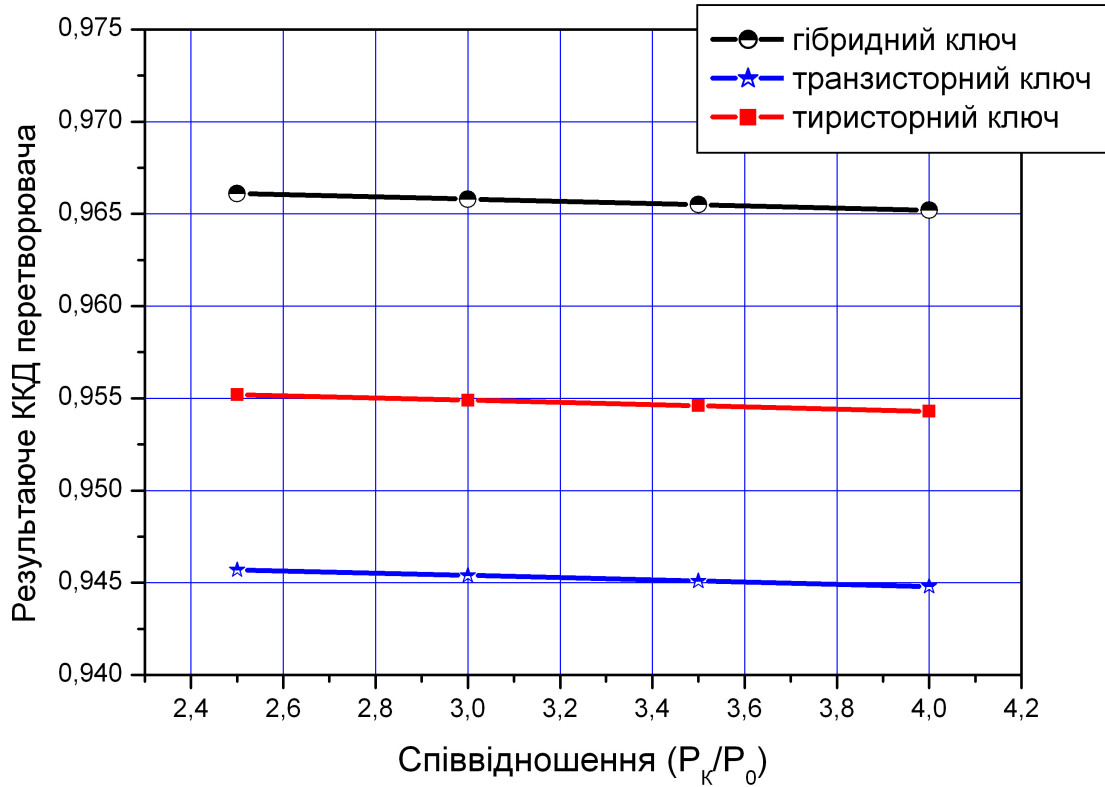


Рис. 6.5. Залежність η при різних видах силових ключів

Отримані значення ККД запропонованого уніфікованого перетворювача підвищеної частоти визначалися при тангенсі кута діелектричних втрат на рівні 0,005. Розглянемо, яким чином впливає значення тангенса кута діелектричних втрат у діапазоні

на залежність середнього значення ККД перетворювача, побудованого з використанням гібридних ключів. Для цього підставимо значення діапазону $\tan \delta$, що розглядається, до виразу (6.16) та отримаємо залежність ККД конденсаторів від $\tan \delta$ у вигляді $\eta = f(\tan \delta)$. Отримані значення η використаємо при

визначенні залежності η за результатами визначення залежності $\eta = f(\tan \delta)$ формула (6.17).

Результати представлені на рис. 6.6 (у логарифмічному масштабі).

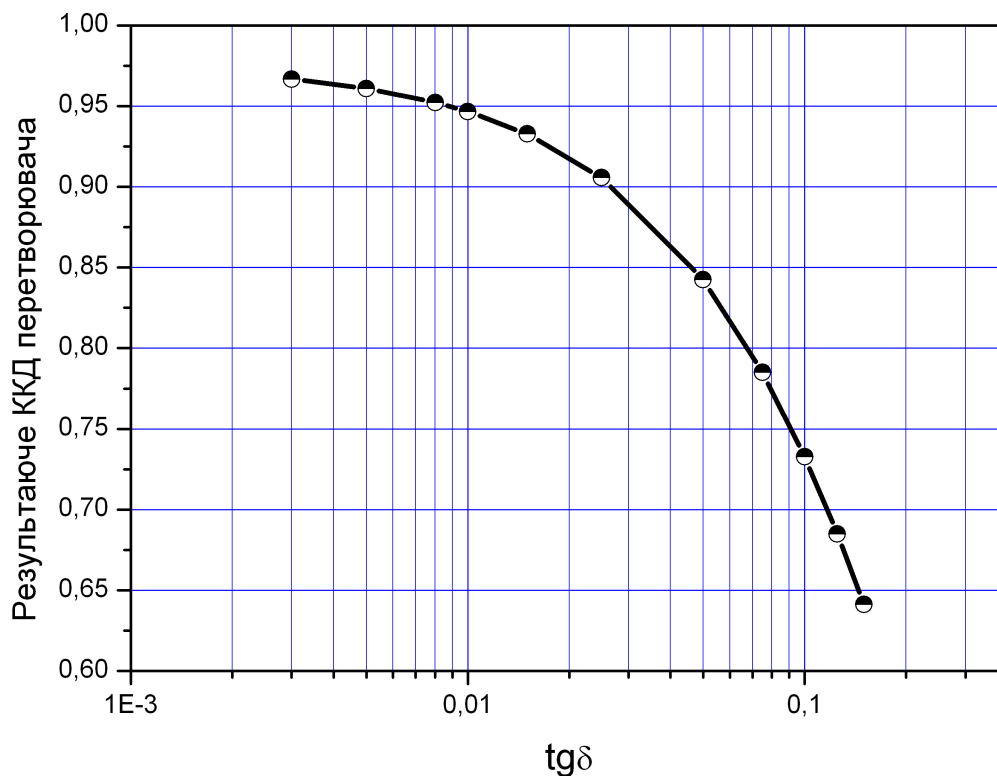


Рис. 6.6. Залежність η при гібридних силових ключах

Як бачимо з рис. 6.6, для отримання середнього ККД перетворювача підвищеної частоти на рівні 0,95 необхідно у його складі використовувати конденсатори з $\text{tg}\delta \leq 0,003$. При збільшенні рівня тангенса діелектричних втрат має місце зниження середнього значення ККД перетворювача підвищеної частоти, а тому і багатосистемного електровоза у цілому.

Для оцінки рівня енергетичної ефективності тягової електропередачі багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами та перетворювачем підвищеної частоти у режимі змінного струму використаємо вираз (1.6), в якому добуток

замінімо значенням середнього результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача $\eta_{\text{ср}}$, побудованого з використанням гібридного ключа (табл. 6.2).

Тоді:

$$\eta_{\text{ср}} = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пд}} \quad (6.20)$$

$$\eta_{\text{ср}} = \eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{пд}} \quad (6.21)$$

Значення ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму з перетворювачем підвищеної частоти перевищує отримане за виразом (1.7) значення ККД

електровозів з АТД на

, що є відносно великим значенням.

При використанні тягового редуктора та АТД, аналогічних до тих, що використовуються на електровозах європейського виробництва, рівень ККД тягової електропередачі багатосистемних електровозів із перетворювачами підвищеної частоти у режимі змінного струму буде дорівнювати:

$$(6.22)$$

$$(6.23)$$

Додатковий вииграш у ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза з АТД та перетворювачем підвищеної частоти при використанні редуктора та АТД із більшими ККД становитиме

Порівняємо отримані значення ККД з відповідними показниками сучасних електровозів змінного струму з АТД.

Сучасний електровоз змінного струму ДСЗ, на базі АТД, українського виробництва має ККД на рівні 85%, а російський електровоз подвійного живлення ЭП10, на базі АТД, має ККД у режимі змінного струму 86%, а на постійному струмі 88% [224, 225].

Якщо використати більш досконалі тягову зубчасту передачу та АТД, тягова електропередача багатосистемного електровоза, на базі перетворювача підвищеної частоти, у режимі живлення від мережі змінного струму буде мати ККД на рівні 91,8% (6.23), тобто не гірший, ніж у сучасних локомотивів. Але це значення може відрізнятись від ККД електровоза в цілому, оскільки необхідно враховувати ККД іншого обладнання електровоза.

6.1.5. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача для режиму «25 кВ, 50 Гц» при тягових двигунах постійного струму

При використанні тягових двигунів постійного струму структура статичного перетворювача підвищеної частоти декілька спрощується, у порівнянні зі структурою при АТД (рис. 2.4, 2.5). Це обумовлено відсутністю у складі системи інвертора (з ємнісним фільтром) тягового контуру. Схема для розрахунку ККД перетворювача для живлення ТДПС представлена на рис. 6.7.



Рис. 6.7. Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні ТДПС.

Результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача, при живленні тягових двигунів постійного струму, відповідно до рис. 6.7, визначається як:

$$(6.24)$$

Числові значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача при використанні гібридного ключа у складі випрямлячів МВ, ТВ та інвертора МІ

мережевого та тягового контурів, при різних співвідношеннях втрат у трифазному трансформаторі підвищеної частоти представлено у табл. 6.4.

Порівнявши середні значення ККД перетворювачів на базі гібридного ключа для живлення АТД (табл. 6.2) та ТДПС (табл. 6.4), стає очевидним енергетична перевага перетворювача, призначеного для живлення тягового двигуна постійного струму, оскільки різниця між значеннями ККД дорівнює , що є досить суттєвим для тягового електропривода.

Таблиця 6.4

Значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача для живлення ТДПС

	2,5	3,0	3,5	4,0
	0,9783	0,978	0,9777	0,9774
Середнє	0,9778			

При використанні уніфікованого перетворювача на базі гібридного ключа сумарний ККД тягової передачі електровоза змінного струму при тягових двигунах постійного струму буде дорівнювати:

$$(6.25)$$

При (табл. 6.4) отримаємо:

$$(6.26)$$

Отримане значення ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму з перетворювачем підвищеної частоти перевищує отримане за виразом (1.5) значення ККД

електровозів змінного струму з ТДПС на , що є досить суттєвим.

Сучасний електровоз змінного струму 2ЭС5К російського виробництва, на базі ТДПС, має ККД на рівні 85% [226]. Цей електровоз побудовано за класичною структурою, з використанням тягового трансформатора промислової частоти.

Тобто, багатосистемний електровоз у режимі живлення від контактної мережі змінного струму з перетворювачем підвищеної частоти, призначеним для живлення ТДПС, має ККД не гірший, ніж у сучасного електровоза змінного струму на базі тягових двигунів постійного струму.

Таким чином, використання уніфікованого перетворювача підвищеної частоти запропонованої структури дозволяє отримати більш високі значення ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза, який працює від контактної мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц, як при тягових двигунах постійного струму, так і асинхронних.

6.2. Визначення коефіцієнта корисної дії уніфікованого перетворювача в режимі живлення від контактної мережі постійного струму

Статичний перетворювач тягової електропередачі багатосистемного електровоза повинен забезпечувати виконання поїзної роботи на ділянках залізниці, електрифікованих як на змінному, так і постійному струмах. Представимо результати дослідження ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза при живленні від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ.

Для базового уніфікованого перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а схема розрахунку ККД перетворювача для живлення АТД представлена на рис. 6.8 [63].

На відміну від схеми, представленої на рис.6.1, у розрахунковій схемі відсутній, що відповідає керуваному випрямлячу мережевого контуру. Це є доцільним саме з енергетичної точки зору, оскільки немає сенсу проводити повторне перетворення напруги постійного струму контактної мережі у напругу постійного струму на вході інвертора мережевого контуру. Інші елементи структурної схеми є аналогічними до тих, що мають місце у режимі живлення від мережі змінного струму.



Рис. 6.8. Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні від мережі постійного струму

Результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача для асинхронного тягового привода при живленні від мережі постійного струму відповідно до рис. 6.8 у

функції співвідношення втрат $\eta_{\text{ТТПЧ}}$ у трифазному трансформаторі підвищеної частоти, визначається як:

$$(6.27)$$

Числові значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача при використанні гібридного ключа у складі випрямляча ТВ та інверторів МІ, ТІ мережевого

та тягового контурів при різних співвідношеннях втрат $\eta_{\text{ТТПЧ}}$ у трифазному трансформаторі підвищеної частоти, при живленні від мережі постійного струму, представлено у табл. 6.5.

При використанні уніфікованого перетворювача на базі гібридного ключа сумарний ККД тягового привода багатосистемного електровоза при живленні від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ та асинхронних тягових двигунів буде дорівнювати:

$$(6.28)$$

Значення результуючого значення ККД уніфікованого перетворювача
(для АТД при живленні від мережі постійного струму)

	2,5	3,0	3,5	4,0
	0,9709	0,9707	0,9704	0,9701
Середнє	0,9705			

При (табл. 6.5) та значеннями з виразу (6.23) отримаємо:

$$(6.29)$$

Сучасний російський двосистемний електровоз струму 2ЭП20, на базі асинхронних тягових двигунів, у режимі живлення від мережі постійного струму має розрахункове значення ККД 87,5% [227].

Отримане значення ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза в режимі живлення від контактної мережі постійного струму, на базі перетворювача підвищеної частоти, менше цього значення.

При використанні тягового редуктора та АТД аналогічних до тих, що використовуються на електровозах європейського виробництва, рівень ККД тягової електропередачі багатосистемних електровозів із перетворювачами підвищеної частоти у режимі живлення від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ, буде дорівнювати:

$$(6.30)$$

$$(6.31)$$

Додатковий вигравш у ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза з АТД та перетворювачем підвищеної частоти, при використанні редуктора й АТД з більшими ККД, у режимі живлення від контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ, становитиме

Тобто, багатосистемний електровоз у режимі живлення від контактної мережі постійного струму з перетворювачем підвищеної частоти, призначеним для живлення АТД, має ККД не гірший, ніж у сучасного електровоза на базі асинхронних тягових двигунів.

6.2.1. Коефіцієнт корисної дії уніфікованого перетворювача для режиму «3 кВ постійного струму» при тягових двигунах постійного струму

Аналогічно до розрахункової схеми, представленій на рис. 6.7, та враховуючи зміни, які внесені до рис. 6.8, схема для розрахунку ККД перетворювача при ТДПС у режимі живлення від контактної мережі постійного струму 3 кВ представлена на рис. 6.9.

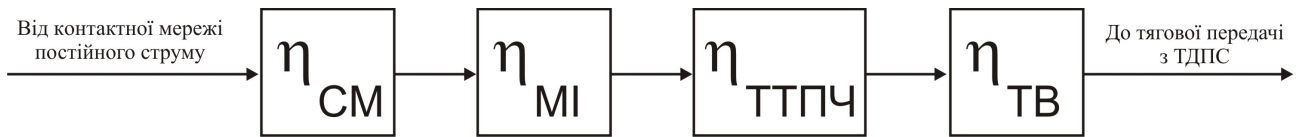


Рис. 6.9. Схема для розрахунку ККД перетворювача при живленні ТДПС у режимі «3 кВ постійного струму»

Результуюче значення ККД уніфікованого перетворювача при живленні тягових двигунів постійного струму для режиму «3 кВ постійного струму», відповідно до рис. 6.9 та виразу (6.24), визначається як:

$$(6.32)$$

Значення ККД уніфікованого перетворювача при використанні у складі його складових частин гібридного ключа та при різних співвідношеннях втрат у трифазному трансформаторі підвищеної частоти, представлені у табл. 6.6.

Таблиця 6.6

Значення ККД уніфікованого перетворювача для ТДПС у режимі «3 кВ постійного струму»

	2,5	3,0	3,5	4,0
	0,9832	0,9829	0,9826	0,9823
Середнє	0,9828			

Аналогічно до режиму роботи перетворювача «25 кВ 50 Гц» порівняємо середні значення ККД перетворювача, на базі гібридного ключа, для живлення АТД (табл. 6.5) та ТДПС (табл. 6.6):

Отримана різниця (1,23%) відповідає значенню аналогічної величини для режиму «25 кВ 50 Гц» (1,21%, п.6.1.5), що підтверджує енергетичну ефективність перетворювача, призначеного для живлення тягових двигунів постійного струму.

При використанні уніфікованого перетворювача на базі гібридного ключа сумарний ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза у режимі постійного струму при тягових двигунах постійного струму буде дорівнювати:

$$(6.33)$$

При (табл. 6.6) отримаємо:

$$(6.34)$$

Сучасний електровоз постійного струму 2ЭС4К російського виробництва, на базі ТДПС, має ККД на рівні 88% [226]. Тобто, багатосистемний електровоз у режимі

живлення від контактної мережі постійного струму з перетворювачем підвищеної частоти, призначеним для живлення ТДПС, має ККД не гірший, ніж у сучасного електровоза постійного струму на базі ТДПС.

Отримане значення ККД тягової електропередачі, з перетворювачем підвищеної частоти багатосистемного електровоза у режимі постійного струму, перевищує отримане за виразом (1.5) значення ККД електровозів постійного струму з ТДПС на

Відповідно до отриманих результатів порівняння ККД тягової електропередачі багатосистемного електровоза у режимі «3 кВ постійного струму» та електровоза постійного струму з тяговими двигунами постійного струму, стає очевидним, що використання уніфікованого перетворювача підвищеної частоти запропонованої структури дозволяє отримати більш високі значення ККД тягової електропередачі електровоза за рахунок зменшення втрат енергії у трансформаторі підвищеної частоти та використання сучасних гібридних напівпровідникових ключів. Все це підтверджує енергоефективність уніфікованого перетворювача підвищеної частоти для тягового привода електровоза

6.3. Шляхи підвищення коефіцієнта корисної дії енергетичних систем електрифікованих залізниць

Попередні дослідження (розділ 4) показали, що при живленні від контактної мережі постійного струму підвищеного рівня напруги (6 кВ; 12 кВ або 24 кВ) структура уніфікованого перетворювача не змінюється, що обумовлює можливість прийняти, у першому наближенні, що значення ККД тягового привода у цьому режимі дорівнює значенню ККД для режиму живлення «3 кВ постійного струму». Але при цьому за рахунок зменшення втрат енергії у контактній мережі підвищиться ККД енергосистеми постійного струму. Дослідимо більш детально це питання.

Розглянемо тільки режим підвищення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ, що має технічні можливості та може бути впроваджено у наш час [229,230].

При збільшенні напруги у контактній мережі до 6 кВ рівень електричних втрат, у порівнянні з традиційною системою 3 кВ, буде зменшено у середньому на 75,02% [46], тобто збільшиться ККД контактної мережі. При середньому ККД контактної мережі у режимі 3 кВ на рівні 88% втрати енергії дорівнюють 12%. Перехід на 6кВ зменшить ці

втрати до рівня _____, що становитиме _____ . Тоді ККД

контактної мережі постійного струму, при напрузі 6 кВ, буде дорівнювати _____ .

Приймаючи, у першому наближенні, що значення ККД багатосистемного електровоза дорівнює ККД тягової електропередачі, отримаємо такі значення ККД енергосистеми при підвищенні рівня напруги постійного струму та використанні багатосистемних електровозів з асинхронними або тяговими двигунами постійного струму.

Для режиму, який розглядається, та при двигунах постійного струму приймаємо ККД багатосистемного електровоза 90%, а при асинхронних тягових двигунах 86% або

92,2% (у разі використання тягової передачі та АТД з більшими значеннями ККД), що характерно для електровозів європейського виробництва.

При ТДПС та напрузі 6 кВ, середній ККД енергетичної системи при підвищеній напрузі у контактній мережі постійного струму, аналогічно до виразу (1.2) буде дорівнювати:

$$(6.35)$$

Аналогічно ККД енергосистеми при роботі багатосистемного електровоза з АТД буде дорівнювати:

$$(6.36)$$

або

$$(6.37)$$

Порівняємо отримані значення ККД енергосистеми з підвищеною напругою та при роботі багатосистемних електровозів на базі запропонованого перетворювача підвищеної частоти за виразами (6.35), (6.36) та (6.37) з показниками існуючої системи (1.2).

При використанні АТД енергетична ефективність від впровадження підвищеної напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ у поєднанні з використанням багатосистемних електровозів на базі уніфікованого енергоефективного перетворювача підвищеної частоти дозволить збільшити ККД енергосистеми постійного струму на

або

При використанні ТДПС на багатосистемних електровозах збільшення ККД енергосистеми становитиме:

Як бачимо, використання асинхронного тягового привода дає більший ефект від впровадження системи 6 кВ та багатосистемних електровозів із перетворювачами підвищеної частоти тільки при використанні тягової зубчастої передачі та АТД зі значеннями ККД вищими, ніж у існуючих системах. У протилежному випадку є доцільним використання тягової електропередачі на базі тягових двигунів постійного струму.

6.4. Висновки з шостого розділу

На підставі отриманих під час проведення досліджень енергетичної ефективності запропонованого перетворювача підвищеної частоти для багатосистемного електровоза співвідношень зробимо такі висновки:

1. Проведені дослідження визначили енергетичну ефективність уніфікованого перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза, як при використанні тягових двигунів постійного струму, так і асинхронних, як при живленні від контактної мережі змінного, так і постійного струмів. Збільшення ККД відбувається за рахунок використання трансформатора підвищеної частоти з підвищеним значенням ККД, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, та впровадження гібридних напівпровідникових ключів, які мають відносно низьке

значення електричних втрат.

2. При використанні у складі тягової електропередачі багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами середній результуючий ККД запропонованого перетворювача, для режиму живлення від контактної мережі змінного струму, буде дорівнювати приблизно 96%, а при тягових двигунах постійного струму - 97%, що обумовлено меншою кількістю складових частин перетворювача.

3. Для підвищення рівня ККД складових частин перетворювачів на напівпровідникових ключах доцільно використовувати гібридні ключі, які, завдяки меншому сумарному значенню втрат дозволяють підвищити ККД перетворювача у цілому на 1,09% у порівнянні з системою на базі тиристорних ключів, та на 2,04% у порівняння з перетворювачем на базі транзисторних ключів.

4. Середнє значення ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму з асинхронними тяговими двигунами при використанні уніфікованого статичного перетворювача підвищеної частоти збільшиться на 5,3%, у порівнянні з асинхронним тяговим приводом на базі тягових трансформаторів промислової частоти.

5. При тягових двигунах постійного струму збільшення ККД тягової електропередачі електровоза змінного струму, у порівнянні з діючими електровозами, дорівнює 2,3% за рахунок використання перетворювача підвищеної частоти.

6. Збільшення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ та використання багатосистемних електровозів з тяговою електропередачею на базі уніфікованого енергоефективного перетворювача підвищеної частоти дозволить підвищити ККД енергосистеми постійного струму на 9,9% у разі використання багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму та на 11,9% при використанні на багатосистемних електровозах асинхронних тягових двигунів.

РОЗДІЛ 7

ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ НА ПІДВИЩЕНУ НАПРУГУ У КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Електрифікація залізниць є найважливішою ланкою технічного прогресу на транспорті. Переконавання у тому, що електричний транспорт як вид транспорту є найбільш економним і екологічно чистим, не вимагає довгих пояснень. Завдяки електрифікації стало можливим суттєве підвищення пропускної та перевізної здатності залізниць, ефективності роботи з перевезень, поліпшення умов праці, зниження витрат паливо-енергетичних ресурсів. Електрифікація залізничних магістралей сприяла електрифікації промисловості в цілому, оскільки тягові підстанції, що живлять розподільчі мережі, використовуються не лише для потреб електричної тяги, але й для забезпечення електроенергією промислових підприємств, а також підприємств сільського господарства в районах, суміжних із залізницями [19,239,242].

Зі зростанням споживання основного енергоресурсу для залізниці – електричної енергії з підвищенням ваги потягів та зміни швидкісних режимів, а також інтенсивності та завантаженості діючих залізничних маршрутів, на перший план все частіше починають виступати питання щодо економії електроенергії, модернізації систем електроспоживання і т. ін. Одним із найвигідніших з економічної точки зору є підвищення живлячої напруги в контактній мережі [4].

Варто сказати, що проблема підвищення напруги в контактній мережі постійного струму не нова. Вона неодноразово досить гостро поставала на різних етапах розвитку залізничного транспорту. Вперше це питання загострилося у зв'язку із тим, що в 60 роки почали різко зростати вантажопотоки на ділянках, електрифікованих постійним струмом. Разом із тим зростали швидкість та вага поїздів. Враховуючи всі ці негативні, з точки зору живлення рухомого складу, фактори було прийнято рішення про підсилення систем електрозабезпечення найбільше завантажених районів залізниць. З цього приводу було висунуто низку пропозицій, таких як переведення даних ділянок на системи живлення змінним струмом, а також використання різних прийомів щодо обладнання та експлуатації додаткових підстанцій. Але найбільш економічно та технічно вигідною була пропозиція про підвищення напруги в контактній мережі. Це пояснюється тим, що встановлювати додаткові підстанції дорого, а переводити вантажонапружені ділянки на змінний струм, використовуючи при цьому тисячі технологічних вікон, просто не видавалося можливим. Тому найбільш раціональним було рішення про переведення інтенсивно завантажених ділянок на живлення підвищеною напругою [2,18,46].

Сьогодні з'являються ідеї про те, щоб підвищувати напругу не тільки в мережі постійного струму, а й мережах змінного також. Так в контактну мережу постійного струму пропонується подавати замість звичних 3 кВ – 6 кВ, 12 кВ або 24 кВ. Мета, яку маємо досягти в ході цих заходів, - зниження тягового струму локомотива, що тягне за собою зменшення втрат електричної енергії в контактній мережі.

В даному розділі дисертаційної роботи розглянуто питання впливу збільшення напруги в контактній мережі на величину втрат електричної енергії при потужностях електровозів у діапазоні від 3000 до 12000 кВт з метою визначення доцільного рівня

підвищення напруги у контактній мережі постійного струму, з точки зору мінімізації рівня втрат електричної енергії.

В літературних джерелах [238,239] наведена стандартна методика розрахунку втрат енергії в контактній мережі. Використаємо її для оцінки необхідності проведення вказаних заходів.

Приймемо такі початкові умови.

До фідерної зони тягової підстанції входить один перегін, довжина якого складає 10 км. Приймаємо профіль перегону таким, що потяг проходить його зі швидкістю 100 км/год при увімкнених тягових двигунах.

За методикою [239], втрати розраховуються для рельсового кола та кола контактної мережі окремо, тобто відомо, що для одноколійного перегону втрати енергії в рейковому колі визначають за формулою:

$$(7.1)$$

де: $R_{\text{р}}$ – опір 1 км рейкового кола, Ом/км; T – заданий розрахунковий період, год;
 $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга в контактній мережі, В; $E_{\text{сп}}$ – енергія, що споживається всіма потягами на перегоні, колії за період T , кВт·год; $K_{\text{в}}$ – коефіцієнт взаємного зв'язку між точками прикладання навантаження та рейкового кола; σ – дисперсія струму перегону колії, .

Якщо у формулу (7.1) замість $R_{\text{к}}$ підставити $R_{\text{р}}$, де $R_{\text{к}}$ – опір 1 км контактного проводу, Ом/км, то отримаємо повні втрати енергії на одноколійному перегоні.

$$(7.2)$$

Дисперсія – міра розкиду випадкової величини (у даному випадку тягового струму), тобто відхилення від математичного очікування цієї самої величини [239].

Перед тим, як розраховувати втрати енергії, необхідно визначитися з дисперсією тягового струму. Для цього скористаємось стандартною методикою, що наводиться в довідниковій літературі [239]. Нехай на нашому умовному перегоні не використовується рекуперация, це припущення суттєво спростить математичні розрахунки.

Отже, дисперсія тягового струму на одноколійному перегоні визначається за формулою:

$$(7.3)$$

де: N – кількість потягів типу N , які пройдуть по перегону за період часу T ; $E_{\text{сп}}$ – час споживання енергії потягом типу N на перегоні, год; $E_{\text{сп}}$ – енергія, що

споживається потягом типу при русі по перегону за період часу , кВт·год; – енергія, що споживається усіма потягами на перегоні за період часу , кВт·год.

Приймаємо всі потяги, що рухаються перегонном однотипними, тобто . Кількість потягів за період складає . Нехай всі потяги рухаються перегонном з однаковою швидкістю, отже, час споживання енергії потягом на перегоні дорівнює

години. Приймемо розрахунковий період часу година. Визначимо дисперсію тягового струму для напруги в контактній мережі в 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ та при потужності локомотивів 3000 кВт, 6000 кВт, 9000 кВт, 12000 кВт. Використовуючи формулу (7.3), отримаємо значення дисперсії, які наведемо в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Значення дисперсії тягового струму при різних значеннях напруги контактної мережі та потужності електровозів

Потужність електровоза, кВт	Напруга контактної мережі, кВ			
	3	6	12	24
3000	0,1	0,025	0,00625	0,0015625
6000	0,4	0,1	0,025	0,00625
9000	0,9	0,225	0,056	0,014
12000	1,6	0,4	0,1	0,025

Отримані результати розрахунків представимо у вигляді графіків (рис. 7.1).

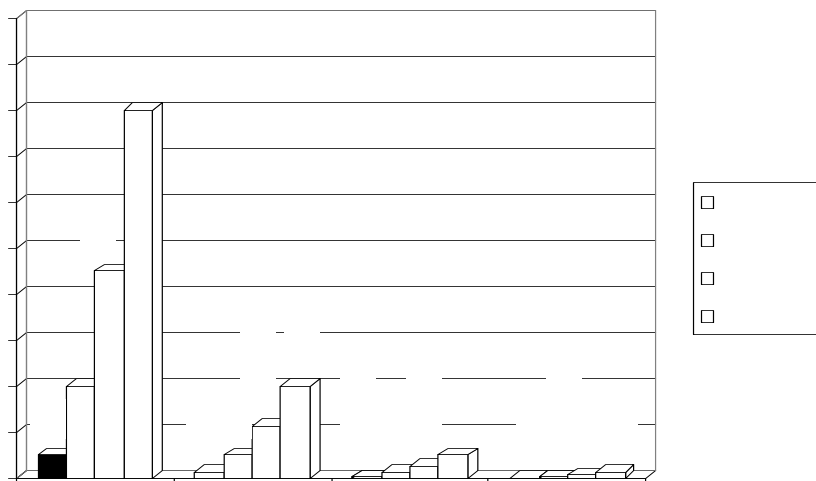


Рис. 7.1. Діаграма, що ілюструє зміну значень дисперсії тягового струму при різних напругах контактної мережі та різній потужності електровозів

Як бачимо з рис. 7.1, збільшення напруги тягне за собою зменшення величини тягового струму, а відповідно і його дисперсії. Відбувається це таким чином: при

збільшенні напруги в контактній мережі в два рази величина дисперсії струму зменшується в 4 рази, при збільшенні напруги в 4 рази дисперсія зменшується в 16 разів та при збільшенні напруги у 8 разів – дисперсія зменшується в 64 рази. Маємо чітку квадратичну зворотну залежність.

Водночас збільшення потужності електровоза призводить до збільшення значення дисперсії. Таким чином, збільшення потужності в 2 рази викличе чотирикратне збільшення дисперсії тягового струму; збільшення потужності в три рази – збільшення дисперсії в 9 раз, і т. д. Дисперсія тягового струму прямо пропорційна квадрату потужності електровоза та зворотно пропорційна квадрату живлячої напруги.

Розглянемо вплив зміни напруги в контактній мережі та потужності електровозів на величину втрат енергії в ній.

Нехай для живлення рухомого складу на умовній ділянці контактний провід типу МФ – 150, опір якого складає $R_{\text{МФ}}$ Ом/км, а опір одного кілометра рейок Р-65 дорівнює $R_{\text{Р-65}}$ Ом/км. Середній коефіцієнт взаємного зв'язку між точками прикладення навантаження приймемо таким, що дорівнює k . Підставивши значення потужності електровоза, напруги контактної мережі та дисперсії тягового струму, можемо за формулою (7.2) визначити величину втрат енергії та їх залежність від напруги та потужності. Результати розрахунків занесемо до табл. 7.2.

Таблиця 7.2

Значення втрат енергії при різних значеннях живлячої напруги контактної мережі та різних потужностях електровозів (в кВт)

Потужність електровоза, кВт	Напруга контактної мережі, кВ			
	3	6	12	24
3000	0,654	0,163	0,041	0,01
6000	2,614	0,654	0,163	0,041
9000	5,882	1,47	0,368	0,092
12000	10,456	2,614	0,654	0,163

Аналізуючи дані, що наведені в табл. 7.2, зазначимо: збільшення живлячої напруги вдвічі при потужності електровозів 3000 кВт тягне за собою зменшення втрат енергії в 4, 012 разу, при збільшенні напруги в чотири рази –

у 15,951 разу; при збільшенні напруги у вісім разів – втрати зменшуються в 65,4 разу. Майже такі ж самі співвідношення можна спостерігати і для потужностей електровозів 6000 кВт, 9000 кВт, 12000 кВт. Зміну величини витрат електричної енергії в абсолютних значеннях при зміні напруги к контактній мережі наочно представимо на рис. 7.2 та на рис. 7.3.

Метою проведених досліджень є визначення доцільного рівня підвищення напруги у контактній мережі постійного струму з точки зору мінімізації рівня втрат електричної енергії. Для цього перейдемо від абсолютних величин втрат енергії до відносних (табл. 7.3).

Розрахунки проведені, виходячи з умови рівності 100 % втрат потужності для напруги у контактній мережі 3 кВ, для кожної з потужностей електровоза.

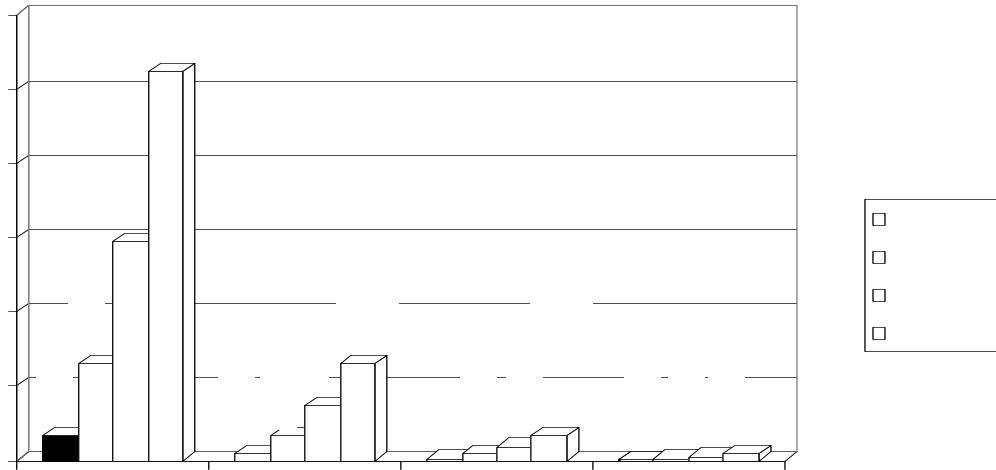


Рис. 7.2. Діаграма, що ілюструє зміну значення втрат електричної енергії в контактній мережі при різних напругах та потужностях електровозів

За даними табл. 7.3 визначимо відносне зменшення втрат потужності (у %) при переході від однієї системи живлення до іншої.

Таблиця 7.3

Значення втрат енергії при різних значеннях живлячої напруги контактної мережі та різних потужностях електровозів (у відносних величинах)

Потужність електровоза, кВт	Напруга контактної мережі, кВ			
	3	6	12	24
3000	100,00 %	24,92 %	6,27 %	1,53 %
6000	100,00 %	25,02 %	6,24 %	1,57 %
9000	100,00 %	24,99 %	6,26 %	1,56 %
12000	100,00 %	25,00 %	6,25 %	1,56 %

Величина відносного приросту втрат енергії дає уяву про те, як інтенсивно зменшуються втрати з підвищенням напруги в живлячій мережі.

Аналізуючи наведені на рис. 7.4 графічні залежності, відзначимо, що підвищення напруги в контактній мережі до 6 кВ дозволяє зменшити втрати на 75 %.

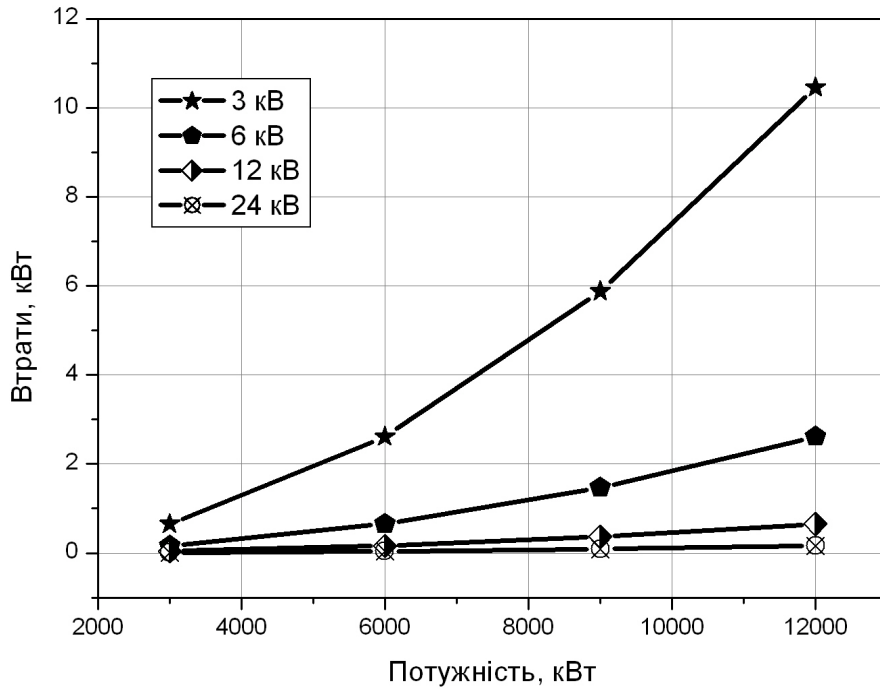


Рис. 7.3. Залежність між потужністю електровоза та втратами енергії при різних напругах у контактній мережі

Це досить суттєве зменшення. Якщо ж далі підвищити напругу до 12 кВ, то додатковий вигравш у зменшенні втрат сягатиме майже 19 % (18,73 %) відносно до втрат при напрузі 6 кВ. При переході з 12 кВ на 24 кВ приріст втрат складає лише 4,70 % відносно до втрат при напрузі 12 кВ.

Порівнюючи усі три значення приросту втрат, зробимо висновок, що найбільш доцільними є заходи щодо підвищення напруги в контактній мережі до 6...12 кВ. Підвищення ж до 24 кВ не має сенсу, бо низький приріст втрат енергії не покриє значних капіталовкладень у впровадження систем живлення такого типу.

Суттєвою перевагою у виборі між двома напругами є той факт, що для того, аби подавати в контактну мережу замість 3 кВ шість, не потрібно великих витрат. Система 6 кВ будується на базі існуючих тягових підстанцій шляхом перемикання схем випрямлячів [79]. Живлення від такої системи можна застосовувати на всіх ділянках, що електрифіковані постійним струмом, а особливо на тих, що мають великий вантажообіг та значну інтенсивність руху поїздів.

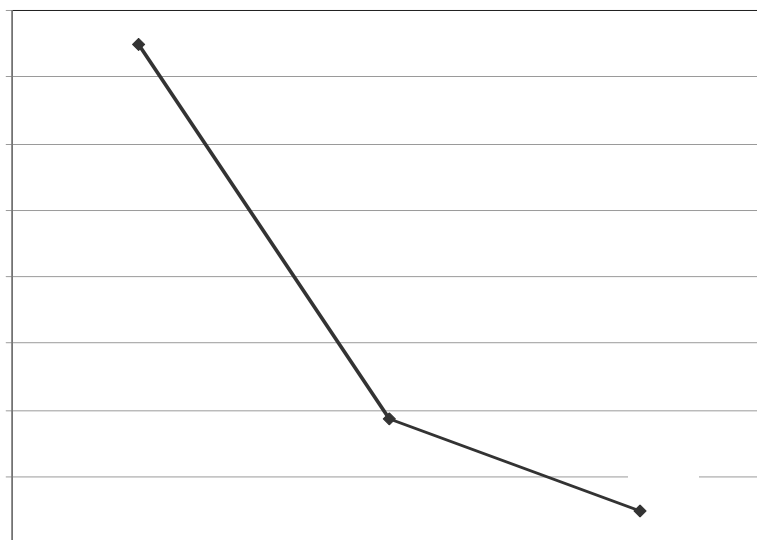


Рис. 7.4. Графік зміни величини відносного зменшення втрат при переході з однієї напруги живлення на іншу

Таблиця 7.4

Величини приростів втрат при переході від однієї системи живлення до іншої

Потужність електровоза, кВт	Перехід з 3 кВ на 6 кВ	Перехід з 6 кВ на 12 кВ	Перехід з 12 кВ на 24 кВ
3000	75,08 %	18,65%	4,74%
6000	74,98 %	18,78%	4,67%
9000	75,01 %	18,74%	4,69%
12000	75,00 %	18,75%	4,70%
Середнє значення приросту втрат	75,02 %	18,73%	4,70%

На ділянках із складним профілем, а також там, де рухаються переважно потяги великої ваги, більш раціональним є застосування системи живлення напругою 12 кВ постійного струму.

Це можна пояснити тим, що велика маса потяга вимагає експлуатувати електровози великої потужності. При потужності локомотивів більше 6000 кВт, навіть при напрузі 6 кВ, мають місце значні втрати енергії. Тому з метою зниження втрат доцільним є застосування більш високої напруги (12 кВ) для живлення електрорухомого складу.

Зниження величини тягового струму дозволяє зменшити площу перерізу контактного проводу, тобто зменшити кількість міді на його виготовлення. Також зниження струму дозволить більш раціонально використовувати поперечний переріз провідника, бо при меншому значенні величини струму має місце менший вплив поверхневого ефекту; знизить температуру нагріву контактної мережі, отже, збільшить і термін служби контактних проводів.

Обґрунтовану вище технічну доцільність впровадження системи підвищеної напруги у контактній мережі постійного струму представимо у грошовому еквіваленті.

За 2008 рік залізниці України електрифіковані на постійному струмі, а саме Донецька, Львівська, Південна та Придніпровська спожили на тягу поїздів 2888,09 млн. кВт·год [243].

Згідно з табл. 7.2 при напрузі у контактній мережі 3 кВ середні втрати потужності у ній, в діапазоні потужностей електровозів від 3000 кВт до 12000 кВт, приймаємо на рівні:

(7.4)

Тоді рівень витрат електричної енергії на компенсацію втрат потужності у контактній мережі постійного струму для залізниць України орієнтовно становитиме:

млн. кВт·год. (7.5)

При середній ціні закупівлі електричної енергії 358,61 грн/МВт·год [243] вартість витрат енергії з (7.5) становитиме:

тис. грн. (7.5)

При переході на систему 6 кВ постійного струму дозволить зменшити ці витрати приблизно на 75% (табл. 7.4), у грошовому еквіваленті нове значення витрат буде становитиме:

тис. грн. (7.6)

7.1. Висновки з сьомого розділу

Досить низький рівень розвитку напівпровідникової техніки в 70 роки загальмував процес втілення цієї ідеї в життя. Однак теоретичний бік питання прогнозує суттєвий економічний результат від застосування систем живлення підвищеною напругою. Сьогодні, коли силова електроніка вийшла на якісно новий рівень, а вартість енергоресурсів зростає, настає час, коли питання економії електроенергії та підсилення систем енергозабезпечення виходять на перший план, є нагальна потреба у створенні нових перетворювачів для рухомого складу та переведення існуючих залізниць на живлення системою 6, 12 або 24 кВ постійного струму. Таким чином, проведені дослідження дозволяють стверджувати, що при потужностях локомотивів до 6000 кВт є доцільним використовувати систему тягового електропостачання постійного струму з напругою 6 кВ, що дає змогу зменшити втрати електричної енергії у контактному проводі та рейковому колі на 75%. При збільшенні потужностей локомотивів (від 6000 кВт) стає доцільним використовувати системи 12 або 24 кВ. Але враховуючи те, що виграш у зменшенні втрат від впровадження системи 24 кВ у порівнянні з 12 кВ не перевищує 5%, є доцільним використовувати систему 12 кВ. Систему 24 кВ доцільно використовувати при потужностях від 12000 кВт, наприклад, у системах швидкісного руху.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішено актуальну науково-технічну проблему покращення техніко-економічних показників перевізного процесу за рахунок збільшення енергоефективності електрифікованих ділянок залізниць при використанні багатосистемних електровозів з більшим ККД та підвищенні напруги у контактній мережі постійного струму.

Основні результати і висновки дисертаційної роботи полягають у наступному.

1. Показано, що тяговий рухомий склад залізниць України морально застарів та фізично зношений, і тому треба його поповнювати, зокрема електровозами нового покоління, які розроблено з урахуванням останнього слова науки та техніки. Зокрема, з метою покращення енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та збільшення пропускної спроможності ділянок електрифікованих на постійному струмі напругою 3 кВ є доцільним підвищити напругу у контактній мережі до рівня кратного 3 кВ, а саме – 6, 12 або 24 кВ поетапно, що забезпечить зменшення витрат електроенергії в декілька разів. Перевід ділянок, електрифікованих на постійному струмі з напругою 3 кВ на напругу 25 кВ змінного струму частотою 50 Гц, у наш час недоцільно з економічних міркувань. При поетапному переході з 3 кВ на підвищену напругу доцільно використовувати багатосистемні електровози, які змогли б забезпечити роботу на електрифікованих ділянках з напругою 3 кВ, 6 кВ, 12 кВ, 24 кВ постійного струму та 25 кВ змінного струму. Багатосистемні електровози дозволять підвищити ефективність роботи залізниць за рахунок: зменшення кількості локомотивних бригад; скорочення витрат на утримання оборотних депо; відмов від зупинок на станціях стикування; зменшення кількості локомотивів у порівнянні з односистемними при виконанні однакового об'єму перевезень при одночасному впровадженні системи тяги на постійному струмі з підвищеним рівнем напруги.

2. Найбільш ефективна структура тягової електропередачі багатосистемного електровоза складається з двох частин:

- мережевого контуру, що відповідає за взаємодію з контактною мережею.

Основними складовими частинами цього контуру є випрямляч (для режиму роботи з контактною мережею змінного струму), інвертор та тяговий трансформатор підвищеної частоти. Встановлено, що достатнім значенням робочої частоти ланки підвищеної частоти тягового статичного перетворювача, з точки зору зменшення габаритів обладнання, є частота 500 Гц, а для зменшення маси – 1400 Гц;

- тягового контуру, який живить тяговий двигун. До складу цього контуру входить випрямляч та інвертор (при використанні асинхронних тягових двигунів).

3. Класифікація перетворювачів тягової електропередачі багатосистемних електровозів повинна враховувати:

- кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуни (АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуни постійного струму (ТДПС); 6Т – шість ТДПС;

- тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6;

- тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;

- схему з'єднання вхідних випрямлячів мережевого контуру за формулою $n \times m$, де

- n – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів;
- m – кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

4. Серед запропонованих перетворювальних структур, які мають відносно високі показники структурної надійності, слід виділити перетворювачі, мережеві випрямлячі яких складаються з одної (1а) або трьох (3а) послідовних ланок. Тому для побудови тягової електропередачі багатосистемних електровозів доцільно використовувати структури з цим поєднанням мережевих випрямлячів.

5. Знайшли подальший розвиток теоретичні положення щодо уніфікації електрообладнання запропонованих перетворювальних структур тягової електропередачі багатосистемних електровозів. На базі цих положень розроблено математичну модель, за допомогою якої визначено оптимальні параметричні ряди вказаних пристроїв. При проведенні оптимізації функцію витрат визначено як залежність вартості силових напівпровідникових приладів від їх основних параметрів, у вигляді показника «струм-клас».

6. Використання у складі тягової електропередачі трифазної системи, у порівнянні з однофазною системою, дозволяє зменшити габаритну потужність трансформаторів підвищеної частоти на 14,6 %. Рациональна верхня межа збільшення частоти, яка забезпечує мінімальні габаритні показники та максимальний ККД пристрою, є обернено пропорційною до потужності трансформатора. Для трансформаторів потужністю від 1000 кВА до 6300 кВА критична частота знаходиться в межах від 2076 Гц до 827 Гц.

7. Використання SGCT, IGCT приладів у складі перетворювачів є більш зручним по відношенню до IGBT приладів: застосування SGCT тиристорів з примусовим повітряним охолодженням, у порівнянні зі статичним перетворювачем на базі IGBT транзистора з водяним охолодженням, дозволяє зменшити питомий об'єм статичного перетворювача для асинхронного приводу приблизно в 1,5 рази.

8. Гармонійний склад тягового струму електровоза знаходиться в межах існуючих норм, в результаті можна стверджувати, що електромагнітна сумісність запропонованої системи з колами СЦБ та зв'язку на електрифікованих ділянках забезпечена.

9. Збільшення енергетичної ефективності уніфікованого перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровоза, як при використанні тягових двигунів постійного струму, так і асинхронних, як при живленні від контактної мережі змінного, так і постійного струмів, відбувається за рахунок використання трансформатора підвищеної частоти з підвищеним значенням ККД, у порівнянні з трансформаторами промислової частоти, а також в результаті впровадження гібридних напівпровідникових ключів, що мають відносно низьке значення електричних втрат.

10. Збільшення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6 кВ та використання багатосистемних електровозів з тяговою електропередачею на базі уніфікованого енергоефективного перетворювача підвищеної частоти дозволяє підвищити ККД енергосистеми постійного струму на 9,9% у разі використання багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму та на 11,9% при використанні асинхронних тягових двигунів.

11. Основні теоретичні розробки та прикладні результати дисертаційної роботи впроваджено в локомотивному господарстві Укрзалізниці та на Запорізькому електровозоремонтному заводі (ПАТ «ЗЕРЗ»). Окремі результати досліджень впроваджено в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

перелік використаних джерел

1. Мукминова Т. А. Прогрес залізничного транспорту визначається характеристиками тягового рухомого складу / Т. А. Мукминова // Залізничний транспорт України. – 2004. - №5. - С. 31-34.
2. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы (аналитический обзор). Монография / Корниенко В. В., Котельников А. В., Доманский В. Т. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
3. Котельников А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / Котельников А. В. – М.: Интескт, 2002. – 104 с.
4. Бадер, М. П. Концептуальные решения по нетрадиционным системам тягового электроснабжения и электромагнитной совместимости / М. П. Бадер // Электрификация железнодорожного транспорта «Трансэлектро-2008»: междунар. науч.-практ. конф., 30 сент.-04 окт. 2008 г.: тезисы докл. – Д.: ДНУЖТ, 2008. – С. 26.
5. Отчет по НИР «Экспертиза технической документации электровоза ДЭ1» (НИР № 8 СНЦ-284/96-505.96-ЦТех от 20.06.96 по заказу Укрзалізниці). - Дн-вск: ДИИТ, 1996. – 58 с.
6. Снітко М. П. Оновлення магістральних електровозів залізниць України / М. П. Снітко // Электрификация железнодорожного транспорта «Трансэлектро-2008»: междунар. науч.-практ. конф., 30 сент.-04 окт. 2008 г.: доклад – Д.: ДНУЖТ, 2008.
7. Яновський П.О. Загальні принципи стратегічного розвитку мережі залізниць України / П.О. Яновський // Залізничний транспорт України. - 2008. - №5. – С.11-13.
8. Федюшин Ю. М. К проблеме обновления подвижного состава железных дорог Украины / Ю. М. Федюшин, Ю. Е. Пащенко, В. И. Букин // Залізничний транспорт України. - 2001. - №2. – С.7-10.
9. Кірпа Г. М. Основні напрямки поліпшення стану Українських залізниць у сучасних умовах / Г. М. Кірпа // Залізничний транспорт України. - 2001. - №4. – С.2-6.
10. Бакланов А. А. Анализ энергетической эффективности электрической тяги / А. А. Бакланов // «Элтранс-2007»: 4-й международный симпозиум, 23-26 октября 2007 г.: тезисы докл. – С-Пб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2008. – С. 63-68.
11. Колппахчян Г. И. Проблемы внедрения асинхронного тягового электропривода / Г. И. Колппахчян, П. И. Гордиенко // Электровозостроение: сборник научных трудов. - 1979. - т.20. – С.3-22.
12. Житенёв Ю.А. Важно не отстать от жизни. Некоторые размышления по ресурсосбережению на железнодорожном транспорте / Ю.А. Житенёв // Локомотив. - 1999. - №5. – С.2-5.
13. Бикадоров В.П. Програма розвитку вітчизняного рухомого складу приміського сполучення / В.П. Бикадоров, Є.І. Ломакін, Н.М. Найш // Залізничний транспорт України. - 2003. - №4. – С.2-6.
14. Лашко А.Д. Енергозбереження на залізничному транспорті України / А.Д. Лашко // Залізничний транспорт України. - 2001. - №4. – С.7-11.
15. Дудка Н.В. Напрямки розвитку локомотивного господарства України / Н.В. Дудка // Залізничний транспорт України. - 2001. - №4. – С.16-18.
16. Лашко А.Д. Технічні вимоги до тягового рухомого складу нового покоління / А. Д. Лашко, С. Г. Грищенко // Залізничний транспорт України. - 2008. - №3. – С.11-

14.

17. Гапанович В. Перспективы обновления подвижного состава Российских железных дорог / В. Гапанович // Транспорт Российской Федерации. - 2006. - №2. - 43-45.

18. Муха А. М. Підвищення напруги у контактній мережі постійного струму, як шлях енерго- та ресурсозберігання / А.М. Муха, О.Я. Куриленко, Р.В. Радіонов // Транспортні зв'язки. Проблеми та перспективи: міжнар. наук. – практ. конф., 29-30 травня 2008 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2008. - С. 74-75.

19. Корниенко В. В. Существующие и перспективные технологии электроснабжения железных дорог / В. В. Корниенко, Г. А. Доманская // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 4. – С. 3-6.

20. Житенёв Ю.А. Электровозы выгоднее тепловозов / Ю.А. Житенёв // Локомотив. - 2001. - №1. – С.2-5.

21. Феоктистов В. П. Нужны многосистемные электровозы / В.П. Феоктистов, В. В. Литовченко, О.Б. Баранцев // Локомотив. - 2002. - №1. – С.4-5.

22. Купцов Ю.Е. Новости стальных магистралей / Ю.Е. Купцов // Локомотив. - 2001. - №1. – С.45-47.

23. Хворост Н.В. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, Н.Н. Панасенко // Залізничний транспорт України. - 2003. - №6. – С.25-31.

24. Купцов Ю.Е. Ресурсосбережение в контактной сети: что мешает? / Ю.Е. Купцов // Локомотив. - 2001. - №6. – С.43-44.

25. Литовченко В. В. Современные многосистемные электровозы / В.В. Литовченко, О.Б. Баранцев // Локомотив. - 2000. - №9. – С.45-46.

26. Литовченко В. В. Современные многосистемные электровозы / В.В. Литовченко, О.Б. Баранцев // Локомотив. - 2000. - №10. – С.44-48.

27. Лувшис А. Л. Новые электровозы с асинхронным приводом / А.Л. Лувшис // Железнодорожный транспорт. - 1998. - №2. – С.70-77.

28. Литовченко В.В. Современные многосистемные электровозы / В.В. Литовченко, О.Б. Баранцев // Локомотив. - 2000. - №11. – С.42-43.

29. Муха А. М. Перспективна елементна база електричних кіл електрорухомого складу залізниць України / А. М. Муха, Д. С. Білухін // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. - №4. - С.32-34.

30. Муха А. М. Шляхи зниження впливу тягових вентильних перетворювачів на тягову мережу / А. М. Муха, О. Я. Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 24-26 травня 2007 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2007. - С. 38-39.

31. Дубинець Л. В. Структурна схема перспективного електровозу подвійного живлення / Л.В. Дубинець, Г.М. Чілікін, А.М. Муха // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки): [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»] – Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2007. С.356 - 357.

32. Муха А. М. Поліпшення експлуатаційних характеристик електровозів змінного струму. / А. М. Муха, В. М. Безрученко, О. І. Гілевич, А. В. Шаповалов // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ.

конф., 11-12 травня 2006 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2006. - С. 55-56.

33. Муха А. М. Обґрунтування вибору частоти тягового трансформатора багатосистемного електрорухомого складу / А. М. Муха, Л. В. Дубинець, О. Л. Маренич, О. А. Гусар // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. - №3. – С.28-29.

34. Муха А. М. Підвищення робочих частот – перспективний шлях удосконалення тягового обладнання електровозів подвійного живлення. / А. М. Муха, Л. В. Дубинець, Г. М. Чілікін // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 24-25 травня 2007 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2007. - С. 107-108.

35. Муха А. М. До питання використання тягових двигунів постійного струму на багатосистемному електрорухомому складі залізниць. / А. М. Муха, Л. В. Дубинець, О. Л. Маренич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2008. - №20. - С.49-53.

36. Муха А. М. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів тягового електроприводу з двигунами постійного струму для багатосистемних електровозів / А. М. Муха, О. В. Кузнецов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2008. - №25. - С.3743.

37. Муха А. Н. Определение рациональной структуры преобразователя многосистемного электроподвижного состава / А. Н. Муха, Е. Я. Куриленко // Scientific proceedings of Riga technical university. Transport and engineering. – 2008. - ser. 6. - vol. 30. - P. 88-90.

38. Муха А. М. До питання взаємного впливу системи тягового електропостачання та тягових статичних перетворювачів електрорухомого складу при підвищеній напрузі у контактній мережі / А. М. Муха, О. Я. Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 03-05 червня 2009 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2009. - С. 33-34.

39. Пат. UA 55283 МПК (2009) H02M 3/24 Перетворювач постійної напруги з трифазним мостовим випрямлячем / Муха А.М., Бондаренко Ю.С.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки у 2010 06622; дата заявки 31.05.2010; дата публікації 10.12.2010. Бюл. №23.

40. Пат. UA 55281 МПК (2009) H02M 3/24 Перетворювач постійної напруги / Муха А.М., Бондаренко Ю.С.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки у 2010 06618; дата заявки 31.05.2010; дата публікації 10.12.2010. Бюл. №23.

41. Пат. UA 55282 МПК (2009) H02M 3/24 Перетворювач постійної напруги / Муха А.М., Балійчук О.Ю.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки у 2010 06621; дата заявки 31.05.2010; дата публікації 10.12.2010. Бюл. №23.

42. Пат. UA 56612 МПК (2009) H02M 3/24 Перетворювач постійної напруги / Муха А.М., Балійчук О.Ю.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. - № заявки у 2010 06685; дата заявки 31.05.2010; дата публікації 25.01.2011. Бюл. №2.

43. Муха А. Н. О возможности модернизации электровозов переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями. / А. Н. Муха, В. Н. Безрученко, О.И. Гилевич,

А. В. Шаповалов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. - №14. - С. 30 – 34.

44. Муха А. М. Математичне моделювання статичних перетворювачів електрорухомого складу / А. М. Муха, О. Ю. Балійчук // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2010»: междунар. науч.-практ. конф., 27-30 сент. 2010 г.: тези докл. – Д.: ДНУЖТ, 2010. – С. 21 - 22.

45. Муха А. М. Параметри тягових трансформаторів підвищеної частоти та їх вплив на рейкові кола / А. М. Муха, О. Я. Куриленко // Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. - С.58-59.

46. Муха А. М. Вплив підвищення напруги в контактній мережі постійного струму на величину втрат енергії / А. М. Муха, О. Ю. Балійчук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2010. - №31. - С. 100–105.

47. Муха А. М. Режими роботи статичного перетворювача тягового приводу багатосистемних електровозів при вентильних двигунах. / А. М. Муха, О. Я. Куриленко, Р. В. Краснов // Енергозбереження на залізничному транспорті: міжнар. наук. – практ. конф., 29 вересня – 01 жовтня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. - С. 12.

48. Муха А. М. Обґрунтування вибору потужності тягового перетворювача багатосистемних електровозів. / А. М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. 2007. - №19. – С.61-67.

49. Муха А. М. Визначення «життєвого простору» для статичних тягових перетворювачів на електрорухомому складі. / А. М. Муха // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2008»: междунар. науч.-практ. конф., 30 сент.-04 окт. 2008 г.: тези докл. – Д.: ДНУЖТ, 2008. – С. 107-108.

50. Муха А. М. Визначення питомого об'єму статичних перетворювачів тягового асинхронного електроприводу / А.М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2008. - №24. - С.71 77.

51. Муха А. М. Критерії порівняльного аналізу варіантів побудови статичних перетворювачів тягового приводу багатосистемних електровозів. / А. М. Муха // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро-2009»: междунар. науч.-практ. конф., 03-05 юня 2009 г.: тези докл. – Д.: ДНУЖТ, 2009. – С. 17-18.

52. Муха А. М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму / А. М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. - №27. - С .93 98.

53. Муха А. М. Структурна надійність тягового перетворювача для багатосистемного електровоза з асинхронними тяговими двигунами. / А. М. Муха // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. - №28. - С. 40 – 47.

54. Муха А. М. Уніфікація як критерій порівняльної оцінки структурних схем тягового перетворювача для багатосистемного електровоза / А. М. Муха // Вісник

Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2009. - №29. - С. 66 – 70.

55. Муха А. М. Структурні схеми тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом / А. М. Муха // Збірник наукових праць “Гірнича електромеханіка та автоматика”, ДНГУ, Дніпропетровськ. - 2009. – №82. - С. 13 - 21.

56. Муха А. М. Варіаційний аналіз структурної надійності тягового перетворювача асинхронного електропривода для багатосистемного електровоза. / А. М. Муха // Науково-технічний журнал «Електроінформ»: [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»]. – Львів, 2009. – С. 416-417.

57. Муха А. М. Визначення співвідношення між вартістю та параметрами силових напівпровідникових приладів тягових перетворювачів багатосистемних електровозів. / А. М. Муха // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць, Харків. - 2009. № 47. С.46-53.

58. Муха А. М. Втрати у магнітопроводі трифазного тягового трансформатора підвищеної частоти / Муха А. М. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дн-вськ: Видавництво Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. - №35. - С. 81 – 88. – (Препринт / НАН України, Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна; ДНУЗТ 2010-5).

59. Муха А. М. Визначення функції попиту в задачі оптимального вибору структури тягового перетворювача багатосистемного електровозу / А. М. Муха // Збірник наукових праць “Гірнича електромеханіка та автоматика”, ДНГУ, Дніпропетровськ. - 2009. – №83. - С.25 - 32.

60. Муха А. М. Критерії вибору магнітних матеріалів для електромагнітних пристроїв підвищеної частоти / А. М. Муха // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 15-16 квітня 2010 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2010. - С. 98-99.

61. Муха А. М. Порівняльний аналіз параметричних рядів структур статичних перетворювачів тягового привода багатосистемних електровозів. / А. М. Муха // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки): [тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика»] – Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2010. С.87 - 92.

62. Муха А. М. Енергоефективність перетворювача багатосистемного електровозу у режимі змінного струму / А. М. Муха // Східно-Європейський журнал передових технологій. - 2011. – №2/8 (50). – С.8-12.

63. Муха А.М. Номінальні режими роботи тягового трансформатора підвищеної частоти. / А. М. Муха // Вісник. Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – Дн-вськ: Видавництво Дніпропетр. нац. ун-ту. залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. - №36. - С. 73 – 79. – (Препринт / НАН України, Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна; ДНУЗТ 2010-5).

64. Липп А. Высокоскоростной поезд Valero для России. / А. Липп // Залізничний транспорт України. - 2008. - №1. – С.6-17.

65. Безрученко В. Н. Тяговый асинхронный электропривод для скоростного электровоза. / В.Н. Безрученко, В.К. Варченко, В.В. Чумак // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. - 2008. - №5(123). - Ч.2. – С.88-92.
66. Сергеев Н.А. Подвижной состав XXI века / Н.А. Сергеев // Локомотив. - 2001. - №3. – С.33-36.
67. Корниенко В. В. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения в обычном, тяжеловесном и высокоскоростном движении поездов / В.В. Корниенко, Г.А. Доманская // Залізничний транспорт України. - 2008. - №3. – С.3-6.
68. Мазнев А. С. Повышение эффективности электроподвижного состава / А. С. Мазнев, А. М. Евстафьев // Железнодорожный транспорт. - 2010. - №9. – С.33-36.
69. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями / [Солодунов А. М., Иньков Ю. М., Коваливкер Г. Н., Литовченко В.В.]; под ред. А. М. Солодунова. – Рига: Зинантне, 1991. – 351 с.
70. Victor M. Преобразование энергии на электроподвижном составе переменного тока с помощью трансформаторов повышенной частоты / М. Victor // Железные дороги мира. - 2006. - № 6. – С.49-53.
71. Электронная система eTransformator как альтернатива тяговому трансформатору // Железные дорги мира. – 2004. - №9. - С.51-53.
72. Steimel A. Power-Electronics Issues of Modern Electric Railway Systems / A. Steimel // Advances in Electrical and Computer Engineering. vol. 10. - №2. - 2010. - P.3-10.
73. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока / Хвостов В.С. – М.: Высшая Школа, 1988. – 336 с.
74. Брускин Д.Э. Электрические машины, ч.1 / Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. – М.: Высшая школа, 1979. – 288 с.
75. Безрученко В.М. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навчальний посібник. / Безрученко В.М., Варченко В.К., Чумак В.В. / – Д.: Вид-во Дніпропетровського нац. унів. зал-го тр-ту ім. акад. В. Лазаряна, 2003. - 252 с.
76. Забродин Ю.С. Промышленная электроника / Забродин Ю.С. – М.: Высшая Школа, 1982. – 496 с.
77. Чиженко И. М. Справочник по преобразовательной технике. / Чиженко И. М., Андриенко П. Д. / – К.: Техніка, 1978. – 447 с.
78. Электронная и ионная техника / Засорин С.Н., Карш Н.А., Кучма К.Г., Мірошніченко Р.И. – М.: Транспорт, 1969. – 376 с.
79. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи: учебн. для вузов ж.-д. трансп. / Бурков А. Т. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
80. Розанов Ю.К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. / Розанов Ю.К. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
81. Ситник, Н. Х. Силовая полупроводниковая техника / Ситник Н. Х. – М.: Энергия, 1968. – 320 с.
82. Бедфорд, Б. Теория автономных инверторов / Бедфорд Б., Хофт Р.; пер. с англ. И. В. Антика. – М.: Энергия, 1969. - 280 с.
83. Перетворювальна техніка: підручник. / [Гончаров Ю. П., Будьонний О. В., Морозов В. Г. та ін.] ; за ред. В. С. Руденка. – [Ч.2]. - Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.

84. Литовченко В.В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4qS-преобразователями / В.В. Литовченко // Электротехника. – 1993. - №5. - с. 23-31.
85. Литовченко В.В. 4qS-четырёхквadrантный преобразователь электровозов переменного тока. / Литовченко В.В. // Известия вузов. Электромеханика. – 2000. - №3. - с. 64-73.
86. Зиновьев Г. С. Основы силовой электроники: учебник / Зиновьев Г. С. - [Ч.1]. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
87. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины и трансформаторы. / [Захарченко Д. Д., Романов Н. А., Горчаков Е. В., Шляхто П. Н.]. - М.: Транспорт, 1968. - 296 с.
88. Винокуров В. А. Электрические машины железнодорожного транспорта. / В. А. Винокуров, Д. А. Попов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
89. Захарченко Д. Д. Тяговые электрические машины: учебник [для вузов ж.-д трансп.] / Д. Д. Захарченко, Н. А. Романов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
90. Калинин В.К. Электровозы и электропоезда. / Калинин В.К. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.
91. Розенфельд В. Е. Теория электрической тяги. / Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.
92. Рубчинский З.М. Устройство и работа электропоезда. / Рубчинский З.М., Соколов С.К. - М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
93. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза 1956-1965 / Раков В.А. - М.: Транспорт, 1966. – 248 с.
94. Концепция перспективного тягового привода. // Железные дороги мира. – 1996. - № 6 (G. Kratz et. al. Elektrische Bahnen. - 1998. - №11. – S.333-337)
95. Тяговый привод с возбуждением от постоянных магнитов. // Железные дороги мира. – 2004. - № 9 (Т. Klockow et. al. Elektrische Bahnen. - 2003. - №3. – S.107-112)
96. Курбасов А.С. Проектирование тяговых электродвигателей. / Курбасов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н. – М.: Транспорт, 1987. – 534 с.
97. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Н. А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; под ред. Н.А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.
98. Карпов М.С. Тяговые статические преобразователи грузовых электровозов / Карпов М.С. – М.: Транспорт, 1986. – 31 с.
99. Статичні перетворювачі тягового рухомого складу. / [Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, О. І. Семененко, М. В. Хворост.]. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – 192 с.
100. Дубровский З. М. Грузовые электровозы переменного тока: Справочник. / Дубровский З. М., Попов В. И., Тушканов Б. А. - М.: Транспорт, 1991. – 471 с.
101. Электровоз ВЛ85: Руководство по эксплуатации. / [Б. А. Тушканов, Н. Г. Пушкарев, Л. А. Позднякова, В.П. Ярош и др.] / - М.: Транспорт, 1992. – 480 с.
102. Ротанов Н. А. Проектирование систем управления электроподвижным составом. / Ротанов Н. А. Захарченко Д. Д., Плакс А. В.; под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
103. Гетьман Г. К. Выбор оптимальных параметров электровозов для грузовых перевозок / Г. К. Гетьман // Залізничний транспорт України. - 2000. - №3. – С.47-51.

104. Сергиенко Н. И. Определение параметров номинального режима пассажирских электровозов для железных дорог Украины/ Н. И. Сергиенко, Г. К. Гетьман // Залізничний транспорт України. - 2008. - №4. – С.10-12.
105. Казачковський М. М. Керовані випрямлячі: навчальний посібник / Казачковський М. М. – Д.: НГА України, 1999. - 229 с.
106. Флора В.Д. Полупроводниковые устройства / В.Д. Флора, Ю.С. Коробков. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 64 с.
107. Электровоз ВЛ80Т. Руководство по эксплуатации / [под ред. Б. Р. Бондаренко]. – М.: Транспорт, 1977. – 568 с.
108. Тихменев Б. Н., Трахтман Л. М. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты / Б. Н. Тихменев, Л. М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1980. – 471 с.
109. Пассажирские электровозы ЧС4 и ЧС4Т / [Каптелкин В. А., Колесин Ю. В., Ильин И. П. и др.]. – М.: Транспорт, 1975. – 384 с.
110. Тихменев Б. Н. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями / Б.Н. Тихменев, В.А. Кучумов. – М.: Транспорт, 1988. – 311 с.
111. Головатский А. Т. Электроподвижной состав. Эксплуатация. Надежность. Ремонт. / Головатский А.Т., Исаев И.П., Борцов П.И. – М.: Транспорт, 1983. – 350 с.
112. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002-89. – [действ. от 1990-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
113. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность: ГОСТ 27.410-87. - [действ. от 1989-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 109 с.
114. Беккер П. Проектирование надежных электронных схем / Беккер П., Йенсен Ф.; пер. с англ., под ред. И. А. Ушакова. - М.: Советское радио, 1977. – 256 с.
115. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. Дружинин Г. В. - М.: Энергия, 1977. – 536 с.
116. Надежность технических систем. Справочник / [Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.] ; под. ред.. И. А. Ушакова. – М. Радио и связь, 1985. – 608 с.
117. Муха А. Н. Повышение надежности эксплуатируемого электроподвижного состава путем применения релейной аппаратуры на современной элементной базе / А. Н. Муха // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірник наукових праць. 2000. - №113. С.222-224.
118. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники: в 2 т. – [под ред . Кривицкого Б.Х., Дулина В.Н.]. – М.: Энергия, 1977. – Т.1. – 1977. - 504 с.
119. Преснухин Л. Н. Конструирование электронно-вычислительных машин / Л. Н. Преснухин, В.А. Шахнов. – М.: Высшая школа, 1986. – 512 с.
120. Сборник задач по теории надежности / [под ред. А.М. Половко, И.М. Маликова]. – М.: Советское радио, 1972. – 408 с.
121. Большая энциклопедия транспорта: в 8 т. / [гл. ред. Конарев Н.С.]. – М.: Научное из-во «Большая Российская энциклопедия», 2003 - Т. 4. - 2003. – 1039 с.
122. Муха А. Н. Повышение надёжности релейной аппаратуры электроподвижного состава железных дорог Украины: дис. канд. техн. наук: 05.22.09 / Муха Андрей Николаевич. Днепропетровск, 2001. – 217 с.

123. Власьевский, С. В. Методика оценки работоспособности электронного оборудования подвижного состава, работающего в условиях низких температур / Власьевский С. В., Рожнецов А. В., Малышева О. А. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. – 120 с.
124. Дубинец Л. В. Научное обоснование и разработка систем управления электроподвижным составом на основе применения герконовых устройств: дис. докт. техн. наук: 05.09.03 / Дубинец Леонид Викторович. Днепропетровск, 1991. – 356 с.
125. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / Якушев А. И. – М.: Машиностроение, 1979. – 344 с.
126. Верченко В. Р. Стандартизация общих узлов и деталей машин / Верченко В. Р. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 312 с.
127. Количественные методы оптимизации параметров объектов стандартизации. Основные положения по составлению математических моделей: ГОСТ 18.101-82. – [действ. от 1987-01-07]. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 42 с.
128. Болдин Л. А. Основы взаимозаменяемости и стандартизации в машиностроении / Болдин Л. А. – М.: Машиностроение, 1984. - 271 с.
129. Основы комплексной стандартизации / [Ткаченко В. В., Комаров Д. М., Мартынов Г. К., Фомин В. Н.]. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 111 с.
130. Лякдон Ю. Н. Функциональная взаимозаменяемость в машиностроении / Лякдон Ю. Н. – М.: Издательство госкомитета стандартов, 1965. – 575 с.
131. Методика и практика стандартизации / [под ред. В. В. Ткаченко]. – М.: Издательство госкомитета стандартов, 1965. – 575 с.
132. Ткаченко В. В. Система оптимизации параметров объектов стандартизации / Ткаченко В. В., Алексеев Ю. Т., Комаров Д. М. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 184 с.
133. Выгодский М. Я. Справочник по элементарной математике / Выгодский М. Я. – М.: Наука, 1982. – 335 с.
134. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; перевод с англ., под ред. И. Г. Арамоновича. – М.: Наука, 1974. - 831 с.
135. Анго Андре Математика для электро- и радиоинженеров / Анго Андре; перевод с франц., под ред. К. С. Шифрина. – М.: Наука, 1967. - 778 с.
136. Лоза П. О. Покращення методів випробувань тягових двигунів та допоміжних машин електровозів постійного струму: дис. канд. техн. наук: 05.22.09 / Лоза Петро Олексійович. Дніпропетровськ, 2010. – 192 с.
137. Кулаев Ю. Ф. Методы экономической оценки инвестиционных проектов на транспорте: учеб.-метод. Пособие / Кулаев Ю. Ф. – К.: Транспорт України, 2001. – 182 с.
138. Электротехнический справочник: в 3 т. / [ред. Герасимов В.Г., Грудинский П.Г., Жукова Л.А. и др.]. – М.: Энергия, 1980. – Т.1. - 1980. - 520 с.
139. Силовые полупроводниковые приборы и агрегаты. Прайс-лист [Электронный ресурс]. – Челябинск: ЗАО «Производственное объединение электрических машин» «Электромаш», от 01 апреля 2006 г. – Режим доступа: <http://www.po-electromash.ru>

140. Ценник реализуемой продукции [Электронный ресурс]. - Санкт-Петербург: ООО «Элемент преобразователь» от 07 сентября 2006 г. – Режим доступа: <http://www.preobraz.ru/>
141. Прейскурант договорных оптовых цен на силовые полупроводниковые приборы и охладители [Электронный ресурс]. – Саранск: ОАО «Электровыпрямитель» от 01 июля 2007 г. Режим доступа: <http://www.elvpr.ru>.
142. Справочник по теории вероятностей и математической статистики / [Королюк В.С., Портенко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф.]. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
143. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. / Гмурман В.Е. – М.: Высшая школа, 1975. – 146 с.
144. Зекцер Д. М. Особенности маркетинга низковольтных электрических аппаратов / Зекцер Д. М. – Х.: РЦНИТ, 2006. - 84 с.
145. Лоза П. О. Уніфікація вольтододатних пристроїв стендів для випробування тягових двигунів постійного струму / П. О. Лоза // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – №29 – С. 81-83.
146. Славик И. Конструирование силовых полупроводниковых преобразователей / Славик И.; пер. с чешск. В. И. Васина – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 222 с.
147. Чумак В.В. Бортовая система электроснабжения электровозов постоянного тока на основе статических преобразователей: автореф. дис. на соискание степени канд. техн. наук: спец. 05.22.09 «Электротранспорт» / В. В. Чумак. – Харьков, 1998. – 20 с.
148. Хоменко Б. Н. Вспомогательные транзисторные преобразователи для перспективного ЭПС / Б. Н. Хоменко, Г. И. Колпахчян, И. В. Пехотский // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. - №2. – С.41-47.
149. Рутштейн А.М. Система питания вспомогательных цепей магистрального электровоза постоянного тока от статического преобразователя / А.М. Рутштейн // Вестник ВЭЛНИИ. - 2004. - №2. – С.108-127.
150. Дубинець Л.В. Електричні машини. Трансформатори. Асинхронні машини: [навчальний посібник] / Дубинець Л.В., Момот О.І., Маренич О.Л. - Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
151. Безрученко В.Н. Электрические машины. / В.Н. Безрученко, А.С. Хотян. – К.: Вища школа, 1987. - 215 с.
152. Горский А.Н. Расчет электромагнитных элементов вторичного электропитания / А.Н. Горский, Ю.С. Русин, Н.Р. Иванов, Л.А. Сергеева. – М.: Радио и связь, 1988. – 176 с.
153. Горский А. Н. Методы расчета реакторно-трансформаторного оборудования преобразовательных устройств при минимизации массы и габаритов: автореф. дис. на соиск. учен. степени докт. техн. наук: спец 05.09.01 «Электрические машины» / А. Н. Горский. – М., 1995. – 52 с.
154. Троицкий В. А. Магнитодиэлектрики в силовой электротехнике. / Троицкий В. А., Ролик А. И., Яковлев А. И. –К.: Техніка, 1983. – 207 с.
155. Вдовин С. С. Проектирование импульсных трансформаторов / Вдовин С. С. – Л.: Энергия, 1971. – 148 с.

156. Сергеев В. В. Магнитотвердые материалы / В. В. Сергеев, Т. И. Булыгина. – М.: Энергия, 1980. – 224 с.
157. Злобин В. А. Изделия из ферритов и магнитодиэлектриков / Злобин В. А., Муромкина Т. С., Поспелов П. В. – М.: Советское радио, 1972. – 240 с.
158. Киффер И. И. Характеристики ферромагнитных сердечников / Киффер И. И. – М.: Энергия, 1967. – 168 с.
159. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. / Тихомиров П. М. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
160. Пиотровский Л. М. Электрические машины / Пиотровский Л. М. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 528 с.
161. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75. – [действ. от 1977-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
162. Апарати електричні тягові. Загальні технічні умови: ДСТУ 2773-94 (ГОСТ 9219-95). – [чинний від 1996-01-07]. К.: Держстандарт України, 1996. 74 с.
163. Кучма Г. К. Выпрямительные установки электроподвижного состава переменного тока / Кучма Г. К. – М.: Транспорт, 1966. – 224 с.
164. Шляпошников Б. М. Игнитронные выпрямители / Шляпошников Б. М. – М.: Трансжелдориздат, 1947. – 736 с.
165. Дубровский З. М., Электровозы ВЛ60^К и ВЛ60^{ПК}. Руководство по эксплуатации / З. М. Дубровский, Л. М. Лорман. – М.: Транспорт, 1993. – 400 с.
166. Васько Н. М. Электровоз ВЛ80С. Руководство по эксплуатации. / Васько Н. М., Девятов А. С., Кучеров А. Ф. – М.: Транспорт, 1990. – 454 с.
167. Электровоз ВЛ-8. Руководство по эксплуатации / [под ред. О.А. Кикнадзе]. – М.: Транспорт, 1982. 320 с.
168. Электровозы ВЛ-10 и ВЛ-10^У. Руководство по эксплуатации / [под ред. О.А. Кикнадзе]. – М.: Транспорт, 1981. 519 с.
169. Раков В. А. Пассажирский электровоз ЧС2 / Раков В. А. – М.: Транспорт, 1976. 288 с.
170. Пассажирский электровоз ЧС2^Т / [под ред. А. Л. Лисицына]. – М.: Транспорт, 1979. – 288 с.
171. Протокол квалификационных испытаний асинхронного двигателя СТА-1200У1 (ТХ 218.1039). – Х.: ГП завод «Электротяжмаш», 2008. – 30 с.
172. Основы теории цепей / [Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
173. Кулик Ю.А. Электрические машины / Кулик Ю.А. - М.: Высшая школа, 1971. – 456 с.
174. Пиотровский Л.М. Электрические машины / Пиотровский Л.М. – Л.: Энергия, 1975. – 504 с.
175. Сосков А.Г. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита / А.Г. Сосков, И.А. Соскова. – К.: Каравелла, 2005. – 344 с.
176. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление / Уильямс Б. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
177. Флоренцев С.Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий (анализ рынка) / С.Н. Флоренцев // Электротехника. – 1999. - №4. - С.2-10.

178. Шамис М. А. Двигатели среднего напряжения (3-10 кВ) особенности автоматизированного электропривода. [Электронный ресурс] / М. А. Шамис, М.И. Альтшуллер, И.И. Ушаков. - Режим доступа: <http://vniir.chuvashia.com>.
179. Беляев А.В. Тенденция построения электрической части современного ЭПС / А.В. Беляев, А.Г. Вольвич, Н.Ю. Федорова // Электровозостроение. Сборник научных трудов ОАО «ВЭЛНИИ». – Новочеркасск, 1999. - т.41. - С.14-32.
180. SIMOVERT MV Medium-Voltage Drives 660 kVA to 7200 kVA: catalog Siemens DA 63 [Электронный ресурс]. - 2001. – 180 p. – Режим доступа: <http://www.ad.siemens.de>
181. Siemens. SINAMICS G130/SINAMICS G150: catalog Siemens D 11 [Электронный ресурс]. - 2004. – 108 p. Режим доступа: <http://www.ad.siemens.de>
182. АBB. Низковольтный привод переменного тока DriveIT. Каталог ACS800: технический каталог 3AFE 64589075 REV E RU [Электронный ресурс]. - 2004. – 40 с. Режим доступа: www.abb.ru/ibs
183. Стандартный привод АBB. ACS550, 0,75 – 355 кВт. Привод переменного тока низкого напряжения DriveIT: технический каталог 3AFE 64792857 REV B RU [Электронный ресурс]. - 2003. – 16 с. Режим доступа: www.abb.ru/ibs
184. Привод переменного тока среднего напряжения серии 1557: бюллетень 1557-5.0RU – Rockwell Automation (Allen-Bradley) [Электронный ресурс]. - 1999. – 348 с. Режим доступа: www.rockwellautomation.com.
185. Высоковольтный привод переменного тока PowerFlex 7000: бюллетень 7000-TD001D-RU-P –Rockwell Automation (Allen-Bradley) [Электронный ресурс]. - 2002. - 150 с. Режим доступа: www.abpowerflex.com.
186. Проектирование и изготовление электрооборудования для электрической тяги. Руководящие технические материалы. – М.: ВНИИЭМ, 1968. – 276 с.
187. Приводы постоянного тока. Основные серии, мощностью до 500 кВт: каталог Siemens DA 12.1 · 1999. – 68 с.
188. Siemens AG. Automation and Drives Group. Large Drives Division. Siemens Supplement DA 12 [Электронный ресурс]. - 2001. – 85 p. Режим доступа: <http://www.siemens.de/automation/ld>
189. Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт силовой электроники «Преобразователь». Преобразователи частоты для тяговой электропередачи дизель-поезда с асинхронными тяговыми двигателями. – Запорожье.: ОАО НИИ «Преобразователь». – 2 с.
190. Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт силовой электроники «Преобразователь». Преобразователи частоты для питания собственных нужд дизель-поезда с асинхронными тяговыми двигателями. – Запорожье.: ОАО НИИ «Преобразователь». – 2 с.
191. Каталоги продукции предприятия ОАО Запорожский завод «Преобразователь». – Запорожье.: ОАО «Преобразователь», 2005..2007 гг.
192. Дунаевский С.Я. Моделирование элементов электромеханических систем / Дунаевский С.Я., Крылов О.А., Мазия Л.В. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 304 с.
193. Моделювання електромеханічних систем / [Чорний О.П., Луговий А.В., Родькін Д.Й. та ін.]. – Кременчук, 2001. – 376 с.
194. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6 в математике и моделировании / Дьяконов В.П. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 576 с.

195. Богрый В. С. Математическое моделирование тиристорных преобразователей / В. С. Богрый, А. А. Русских. – М.: Энергия, 1972. – 184 с.
196. Стульников В. И. Моделирование полупроводниковых преобразователей / В. И. Стульников, Е. В. Колчев. – К.: Техніка, 1971. – 108 с.
197. Михальський В.М. Пульсации электромагнитного момента асинхронного двигателя при управлении от автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией / В.М Михальський, С.М. Пересада, В.Н. Соболев, В.В. Чопик, І.А. Шаповал // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.1. – с. 5 – 11.
198. Павлов Г.В. Сравнение характеристик резонансных преобразователей при различных способах регулирования с использованием имитационных моделей / Г.В. Павлов, А.В. Обрубов, Е.В. Никитина, Т.В. Щербинин // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.1. – с. 97 – 102.
199. Колпаков А.И. SKIP 4 – новая серия интеллектуальных силовых модулей для применений высокой мощности / А. И. Колпаков, С. Полищук, Т. Мысак // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.1. – с. 43 – 47.
200. Сокол Е. И. Анализ возможностей технологии передачи электрической энергии однофазным переменным током повышенной частоты квазипрямоугольной формы / Е.И. Сокол, Ю.П. Гончаров, В.В. Замаруев, В.В. Ивахно, С.Ю. Кривошеев, А. Е. Иванов, П.Л. Вейцман, М.А. Чернетченко, Arous Mohammed // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.1. – с. 32 – 37.
201. Жемеров Г.Г. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой / Г.Г Жемеров, Н.А. Ильина, О.И Ковальчук, Е.И. Сокол // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.1. – с. 22 – 31.
202. Барский В.А. Фильтрация выходного напряжения в стендах для приемодаточных испытаний тяговых асинхронных двигателей с питанием от инверторов напряжения / В.А. Барский, С.В. Булохов, Н.Н. Дубров, Д.С. Курдюмов, А.В. Маляр // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.1. – с. 114 – 115.
203. Жемеров Г.Г. Математическое моделирование процессов в компенсированной асинхронной машине / Г.Г. Жемеров, Д.С. Крылов, В.Ю. Колесник // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 237 – 240.
204. Синчук О.Н. Двублочный IGBT-преобразователь для тягового электротехнического комплекса с управлением по системе многих единиц / О.Н. Синчук, А.А. Чернишев, А.С. Ключка, И.О. Синчук, Э.С. Гузов, С.Н. Якимец // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 5 – 6.
205. Жемеров Г.Г. КПД систем электроснабжения однофазного переменного тока прямоугольной и синусоидальной формы / Г.Г. Жемеров, О.В. Ильина, О.И. Ковальчук // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 7 – 15.

206. Stepanov A. Selection of inverter topology for uninterruptible power supply system / A. Stepanov, I. Galkin // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 22 – 25.
207. Жаркин А.Ф. Определение условий подключения к сети низкого напряжения потребителей, имеющих нелинейные однофазные электроприемники / А. Ф. Жаркин, С.А. Палачев // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 26 – 31.
208. Кайда Е. А. Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством / Е. А. Кайда, И. Ф. Домнин // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 44 – 51.
209. Гончаров Ю. П. Характеристики однофазных трансформаторов при передаче напряжений и токов повышенной частоты квазипрямоугольной формы / Ю. П. Гончаров, А. В. Ересько, В. В. Замаруев, В. В. Ивахно, М. А. Чернетченко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 81 – 84.
210. Иванец С. А. Адаптивная нечеткая система управления трехфазным фильтро-компенсирующим преобразователем / С. А. Иванец, А. А. Гусев, П. В. Болотный // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 110 – 115.
211. Сиченко В. Г. Моделювання електротягового навантаження у задачах електромагнітної сумісності електрифікованих залізниць постійного струму / В. Г. Сиченко, Є. М. Гайсьонюк // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 185 – 188.
212. Бутова О. А. Особенности применения пакета Matlab/Sim Power Systems для моделирования устройств силовой электроники / О. А. Бутова, В. В. Замаруев // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 247 – 251.
213. Волков А. Г. Высоковольтные выпрямители для новых систем электроснабжения железных дорог / А.Г. Волков, Г.С. Зиновьев, А.П. Косарев // Технічна електродинаміка. Тем. випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – ч.2. – с. 262 – 264.
214. Струтинський В. Б. Математичне моделювання стохастичних процесів у системах приводів: [монографія] / В. Б. Струтинський, О. В. Колот. – Краматорськ: ЗАТ «Тираж-51», 2005. – 530 с.
215. Семененко О. І. Імпульсний тяговий перетворювач на IGBT / О. І. Семененко, В. С. Ковальов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2010. - №114. – С. 88-93.
216. Козачок В. М. Силові двоквADRантні ключі для резервних тягових ШІМ-перетворювачів / В. М. Козачок, В. С. Нікулін, Н. М. Панасенко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2009. - №108. – С.159-168.
217. Резников С. Двухсетевой импульсный тяговый электропривод для железнодорожного транспорта / С. Резников, С. Коняхин, А. Соколов // Компоненты и технологии. – 2007. - №1. – С.128-131.
218. Панасенко М. В. Енергозберігаючі сильно струмові високовольтні ключі і фазні модулі на їх основі / М. В. Панасенко, Н. М. Панасенко, В. Ю. Хворост //

Електротехніка і електромеханіка. - 2007. - №5. – С.24-29.

219. Лагута И. И. Энергетические проблемы системы переменного тока на транспорте и использование средств силовой электроники для их решения / И. И. Лагута, Н. В. Панасенко, Гончаров Ю. П., Замаруев В. В. [и др.] // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. - №3. – С.7-17.

220. Богородицкий Н. П. Высоковольтные керамические конденсаторы. Богородицкий / Н. П., Гедзюн В. А., Мандрыка Н. А. – М.: Советское радио, 1970. – 208 с.

221. Ермуратский В. В. Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях. / В. В. Ермуратский, П. В. Ермуратский. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.

222. Кучинский Г. С. Высоковольтные импульсные конденсаторы / Кучинский Г. С. – Л.: Энергия, 1973. – 176 с.

223. Кучинский Г. С. Силовые электролитические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 320 с.

224. Соколов Ю. Н. Электровоз ДС3. Устройство, управление, обслуживание: конспект [для лок. бригад] / Соколов Ю. Н. – К.: КУЕТТ, 2011. – 299 с.

225. Пассажирский электровоз ЭП10 [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Вокзал». - 2010. - №13. – С.41. – Режим доступа: www.railfanclub.spb.ru

226. Испытания и сертификация новых грузовых электровозов [Электронный ресурс] // Техника железных дорог. - 2008. - №4. – С. 40-43. – Режим доступа: <http://www.ipem.ru>

227. Усвицкий С. А. Электровоз ЭП20 – базовая платформа электровозов нового поколения [Электронный ресурс] / С. А. Усвицкий // Техника железных дорог - 2009. - №2(6). – С. 81-86. – Режим доступа: <http://www.ipem.ru>

228. Муха А. М. Енергетична ефективність тягових електропередач діючих електровагонів постійного та змінного струмів. / А. М. Муха // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: 71 міжнар. наук. – практ. конф., 14-15 квітня 2011 р.: тези доп. - Д.: ДНУЗТ, 2011. - С. 116-117.

229. Неугодников Ю. П. Анализ основных характеристик и энергетических показателей 12 и 24 пульсовых преобразователей повышенного напряжения 6,6 и 13,2 кВ / Ю. П. Неугодников, А. Ю. Неугодников. // «Элтранс-2007»: 4-й международный симпозиум, 23-26 октября 2007 г.: тезисы докл. – С-Пб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. – С. 74-75.

230. Неугодников Ю. П. Преобразовательное оборудование для систем тягового электроснабжения повышенного напряжения 6,6 и 13,2 кВ / Ю. П. Неугодников, А. Ю. Неугодников. // «Элтранс-2007»: 4-й международный симпозиум, 23-26 октября 2007 г.: тезисы докл. – С-Пб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2007. – С. 75-76.

231. Кондратьева Л. А. Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник [для техникумов ж/д тр-та] / Кондратьева Л. А. – М.: Транспорт, 1983. – 232 с.

232. Казаков А. А. Станционные устройства автоматики и телемеханики : учебник [для техникумов ж/д тр-та] / Казаков А. А., Бубнов В. Д., Казаков Е. А. – М.: Транспорт, 1990. – 431 с.

233. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / Брылеев А. М., Кравцов Ю. А., Шишляков А. В. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
234. Разгонов А. П. Оценка электромагнитной совместимости централизованного энергоснабжения пассажирских поездов и устройств СЦБ / А. П. Разгонов, В. Т. Вислогузов. // Транспорт. Збірник наукових праць. – 2002. - №12. – С. 137 – 145.
235. Щербак Я. В. Анализ эффективности работы пассивных энергетических фильтров тяговых подстанций постоянного тока / Я. В. Щербак, И. В. Слободчиков. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. - №6. – с. 27 – 31.
236. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость / М. П. Бадер – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
237. Поплаухин Э. Н. Пособие по ознакомлению с основными принципами работы и системами электроснабжения устройств СЦБ [Электронный ресурс] / Э. Н. Поплаухин, Н. В. Ожиганов. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2001. – Режим доступа: <http://пгупс.рф/index.php?PHPS ESSID=hf16jk6ej4r8qlirbmiqkdt5r1&action=profile;u=1;area=showposts;sa=topics;start=80>
238. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Марквардт К. Г. – М.: Транспорт, 1982. - 528с.
239. Справочник по электроснабжению железных дорог: в 2 т. – [под ред. Марквардта К. Г.]. – М.: Транспорт, 1980. – Т.1. – 1980. - 256 с.
240. Справочник по электроснабжению железных дорог: в 2 т. – [под ред. Марквардта К. Г.]. – М.: Транспорт, 1980. – Т.2. – 1981. - 392 с.
241. Хоменко Б. И. Унифицированный преобразователь для электровозов постоянного и переменного тока / Б. И. Хоменко, К. Н. Сулова // Электротехника. – 2009. - № 6. – С.27-32.
242. Инновации на службе электрификации [Текст] // Евразия вести. – 2009. - № 10. – С. 8 – 9.
243. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2008 році. – К.: Видавництво ТОВ «ВД «Мануфактура», 2009. – 244 с.

МІНІСТЕРСТВО ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

Муха Андрій Миколайович

УДК 629.423.1:621.314

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ
БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

ДОДАТКИ

05.22.09 - електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Науковий консультант
Дубинець Леонід Вікторович
доктор технічних наук, професор

Дніпропетровськ – 2011

ЗМІСТ

стор.

ДОДАТОК А. Параметри багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом
4

ДОДАТОК Б. Запропоновані структурні схеми тягових електропередач на базі перетворювача з ланкою підвищеної частоти для багатосистемних електровозів
5

ДОДАТОК В. Схеми для дослідження структурної надійності запропонованих перетворювальних структур
45

ДОДАТОК Д. Параметри мережевих випрямлячів перетворювача
85

ДОДАТОК Е. Витяг з прайс-листів по силовим напівпровідниковим приладам російського виробництва
113

ДОДАТОК Ж. Значення функції витрат відібраних перетворювальних структур
127

ДОДАТОК З. Розрахунок значень цільових функцій
143

ДОДАТОК К. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур

147

ДОДАТОК Л. Результати визначення перетворювальних структур
159

ДОДАТОК М. Основні показники перетворювачів фірм: Siemens, ABB,
Rockwell Automation (Allen-Bradley) та вітчизняного (країн СНД)
виробництва
163

ДОДАТОК Н. Моделі для комп'ютерного моделювання основних режимів
роботи статичного перетворювача підвищеної частоти тягової
електропередачі багатосистемного електровозу
190

ДОДАТОК П. Рівень нормованих гармонік вхідного струму
перетворювачів різних типів
209

ДОДАТОК Р. Акти впровадження
219

ДОДАТОК А

Параметри багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом

Многосистемные электровозы с АТП, использующие системы питания 3 кВ постоянного и 25 кВ переменного тока

п/п	Технические параметры	Серия электровоза															
		14E	1822	S252	E402B	36000	E412	13/30	EU43	ЭП10	189	109E	185	ЭП300			
1	Год изготовления первого образца	1990	1990	1991	1995	1995	1997	1997	1998	1998	1999	1999	проект	185			
2	Заказчик	SPOOR	ÖBB	RENFE	FS	SNCF	FS	SNCB/CFL	PKP	РЖД	DB	СД	DB	РЖД			
3	Число единиц	32	5	31	50	30	20	20/60	8	1	1	—	—	—			
4	Род службы	Универсальный	Грузовой	Универсальный	Универсальный	Универсальный	Универсальный	Универсальный	Универсальный	Пассажирский	Грузовой	Универсальный	Грузовой	Пассажирский			
5	Изготовитель электрической части	«Siemens»	«ABB»	«Siemens»	«Ansaldo»	«Alstom»	«ADtranz»	«Alstom»	«ADtranz»	«Alstom»	«ADtranz»	«Siemens»	«ADtranz»	«ADtranz»			
6	Изготовитель механической части	SLM	SGP	KM	«Ansaldo»	«Alstom»	«ADtranz»	«Alstom»	«ADtranz»	«Alstom»	«ADtranz»	KM	«ADtranz»	«ADtranz»			
7	Системы питания (напряжение, частота):	+	—	+	+	—	—	+	—	+	+	+	+	+			
	25 кВ, 50 Гц	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	15 кВ, 16 ² / ₃ Гц	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	3 кВ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	1,5 кВ	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
8	Длительная мощность, кВт:	4000	—	5600	5600	5600	—	5000	—	—	7000	5000	4200	10000			
	25 кВ, 50 Гц	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	15 кВ, 16 ² / ₃ Гц	—	4400	—	—	5500	—	—	5500	—	6400	5000	4200	—			
	3 кВ	4000	4400	5600	5600	6000	5000	5000	6000	7000	6000	5000	4200	10000			
	1,5 кВ	—	—	—	5600	2700	—	—	—	—	4200	—	4200	—			
9	Длительная мощность, кВт:	2900	4400	5600	5600	5600	—	5000	—	—	7000	5000	4200	10000			
	рекуперативное торможение	—	1100	3300	3350	3000	—	—	—	—	2700/5700	4000	4000	4000			
	реостатное торможение	290	280	300	280	320	300	280	300	375	300	203	—	400			
10	Максимальная сила тяги, кН	200	250	290	215	250	227	—	227	300	300	133	—	260			
11	Длительная сила тяги, кН	160	140	140	220	—	—	—	—	160	140	200	140	200			
12	Максимальная скорость, км/ч	72	70	100	100	80	87	70	87	67	130	—	—	—			
13	Длительная скорость, км/ч	1065	1435	1688	1435	1435	1435	1435	1435	1520	1435	1435	1520	1520			
14	Осевая формула	02.5	82	88	87	86	87	86	87	135	86	84	180	180			
15	Ширина колеи, мм	1435	1435	1688	1435	1435	1435	1435	1435	1520	1435	1435	1520	1520			
16	Масса т	92.5	82	88	87	86	87	86	87	135	86	84	180	180			

ДОДАТОК Б

Запропоновані структурні схеми тягових електропередач на базі перетворювача з ланкою підвищеної частоти для багатосистемних електровозів

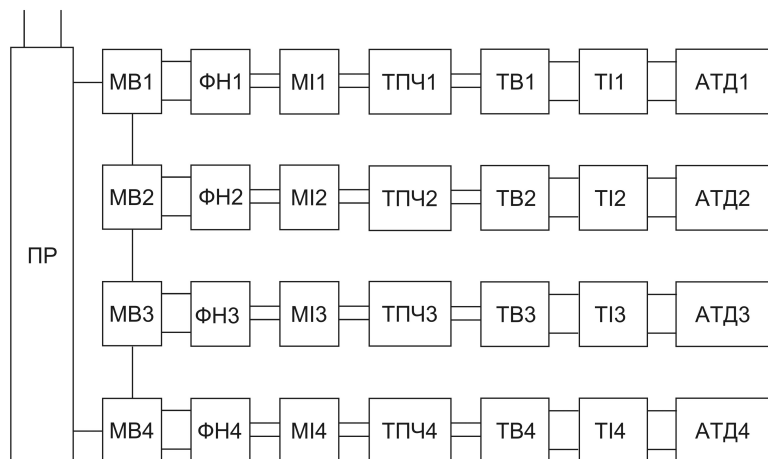
$$=U_M \sim U_M$$


Рис. Б.1. Структура тягової електропередачі типу 4А-М1-1Ф-1м4а.

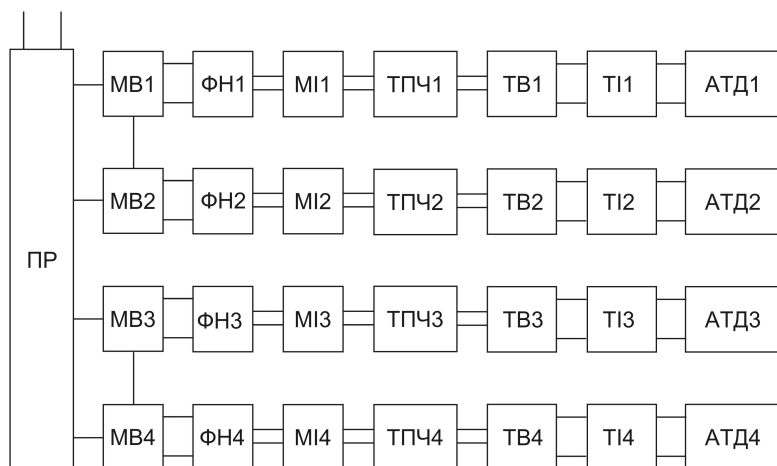
$$=U_M \sim U_M$$


Рис. Б.2. Структура тягової електропередачі типу 4А-М1-1Ф-2м2а.

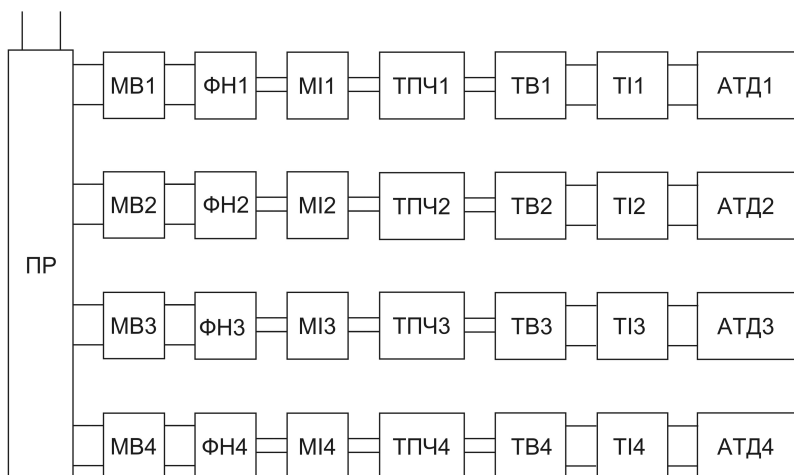
$$=U_M \sim U_M$$


Рис. Б.3. Структура тягової електропередачі типу 4А-М1-1Ф-4м1а.

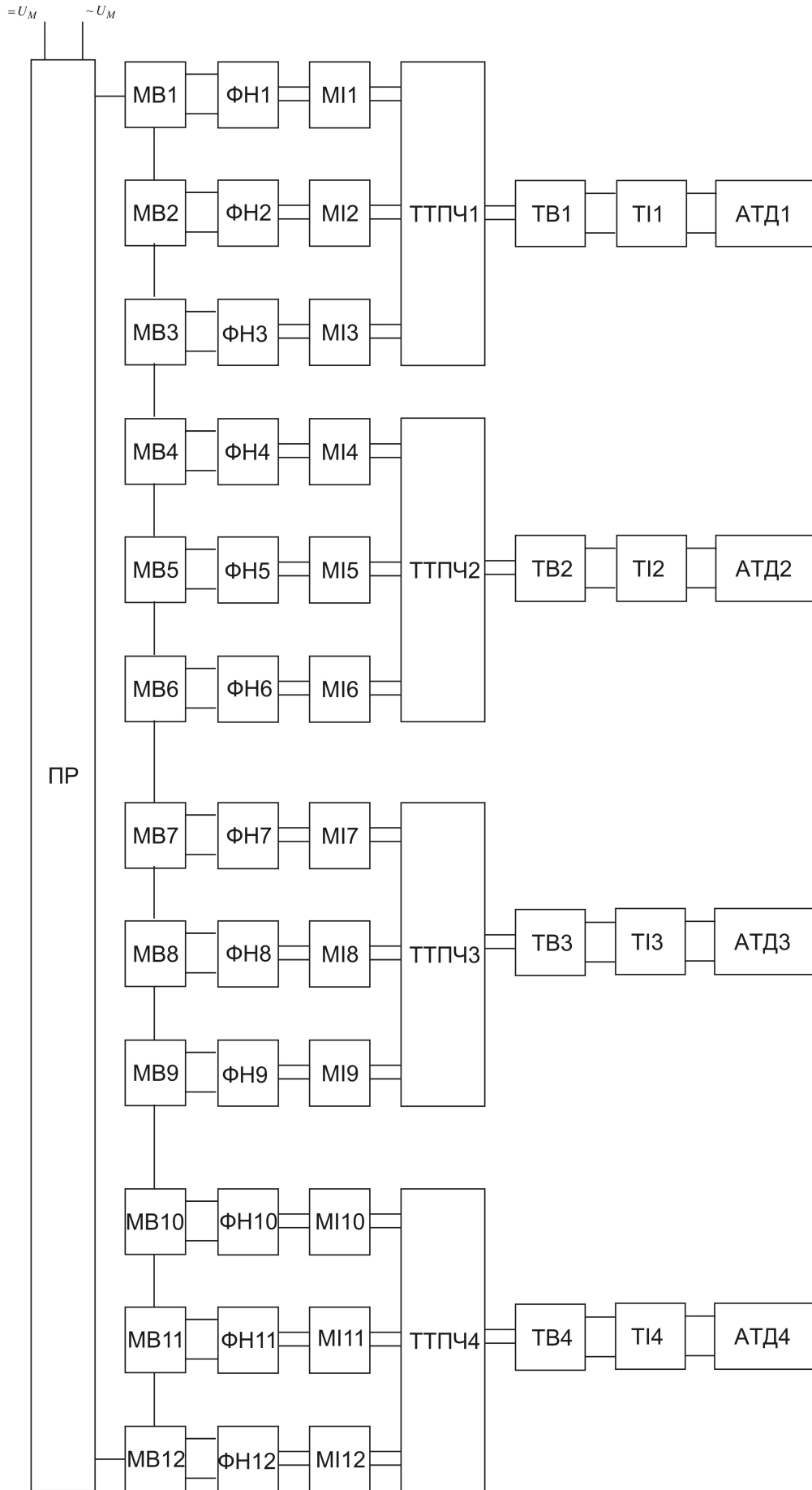


Рис. Б.4. Структура тягової електропередачі типу 4А-М1-3Ф-1м12а.

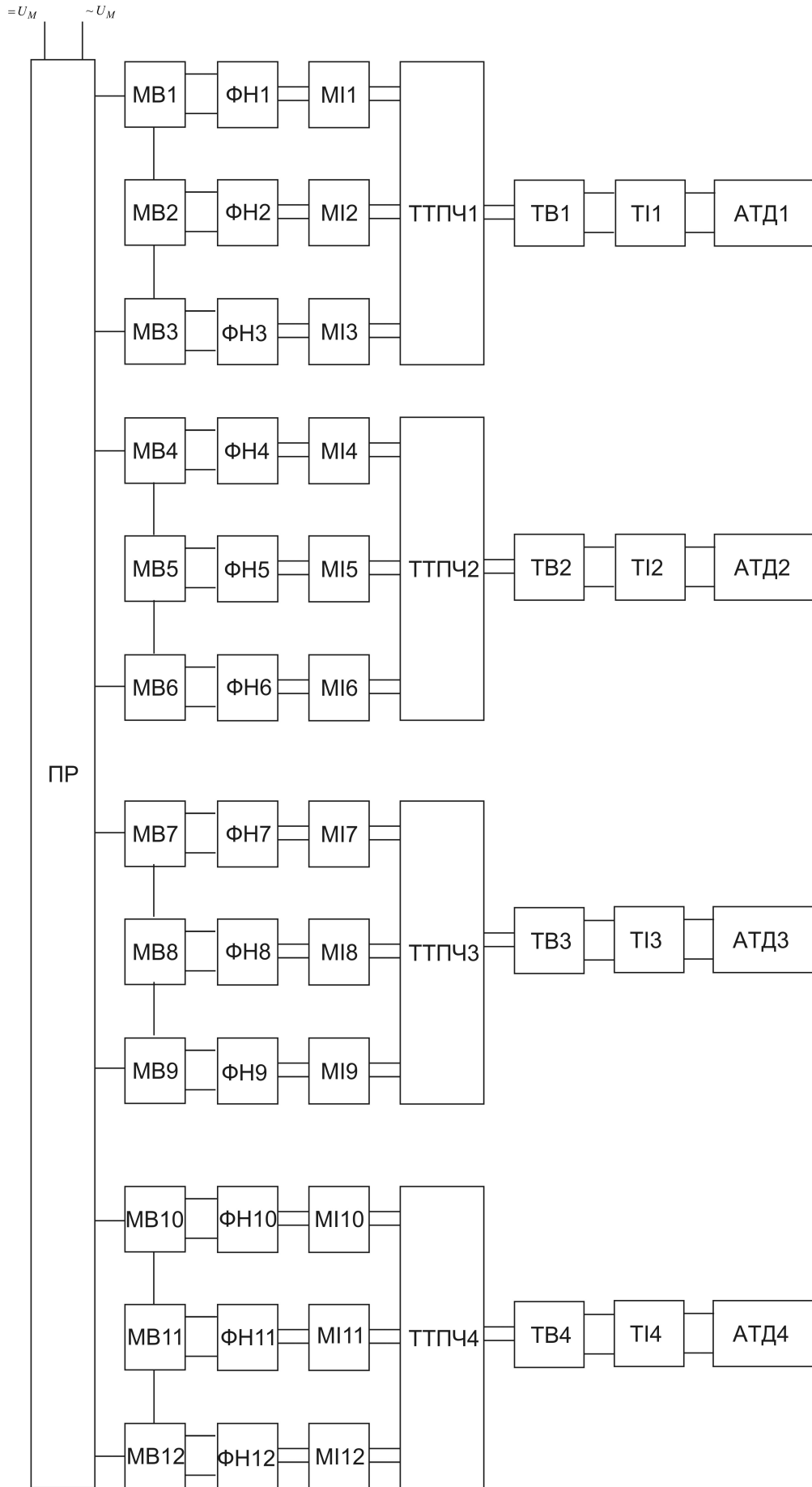


Рис. Б.5. Структура тягової електропередачі типу 4А-М1-3Φ-4М3а.

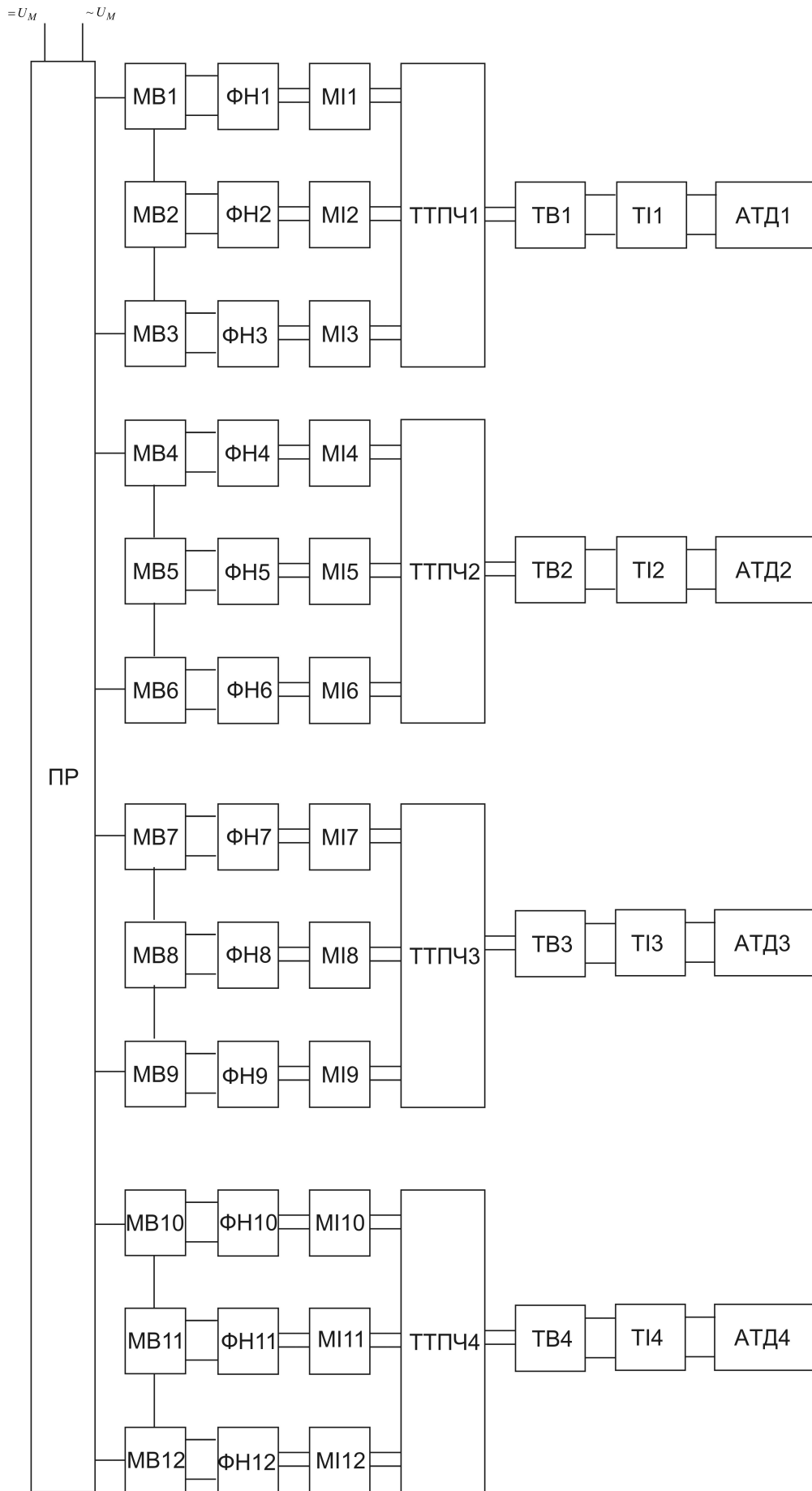


Рис. Б.6. Структура тягової електропередачі типу 4А-М1-3Ф-12м1а.

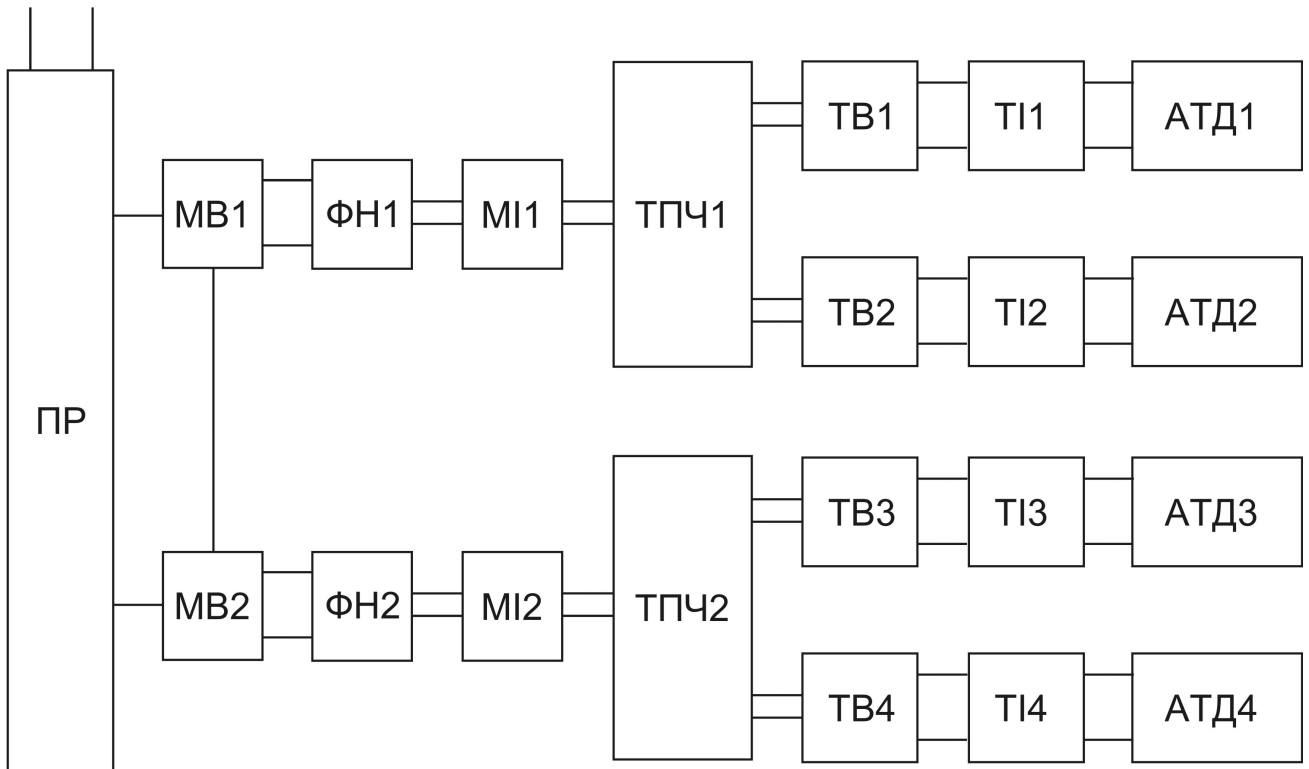
$=U_M \sim U_M$


Рис. Б.7. Структура тягової електропередачі типу 4А-М2-1Ф-1м2а.

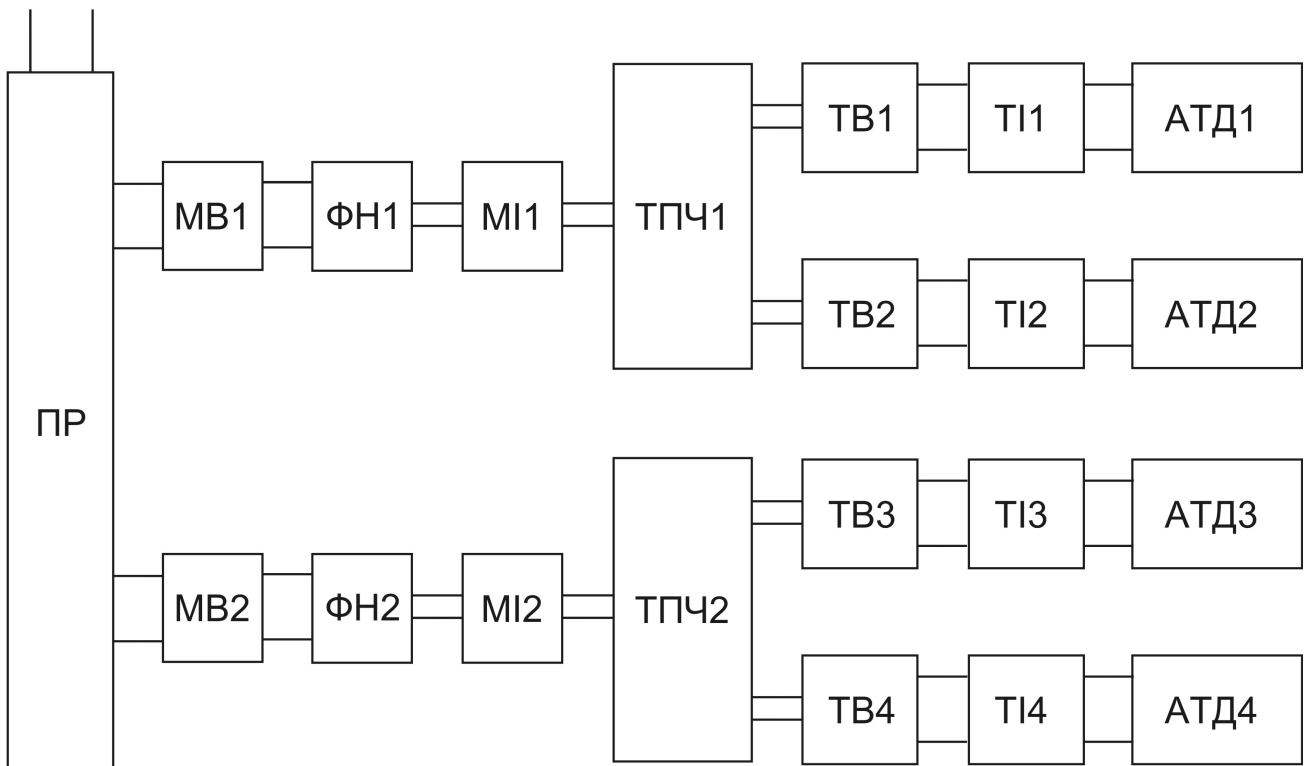
 $=U_M \sim U_M$


Рис. Б.8. Структура тягової електропередачі типу 4А-М2-1Ф-2м1а.

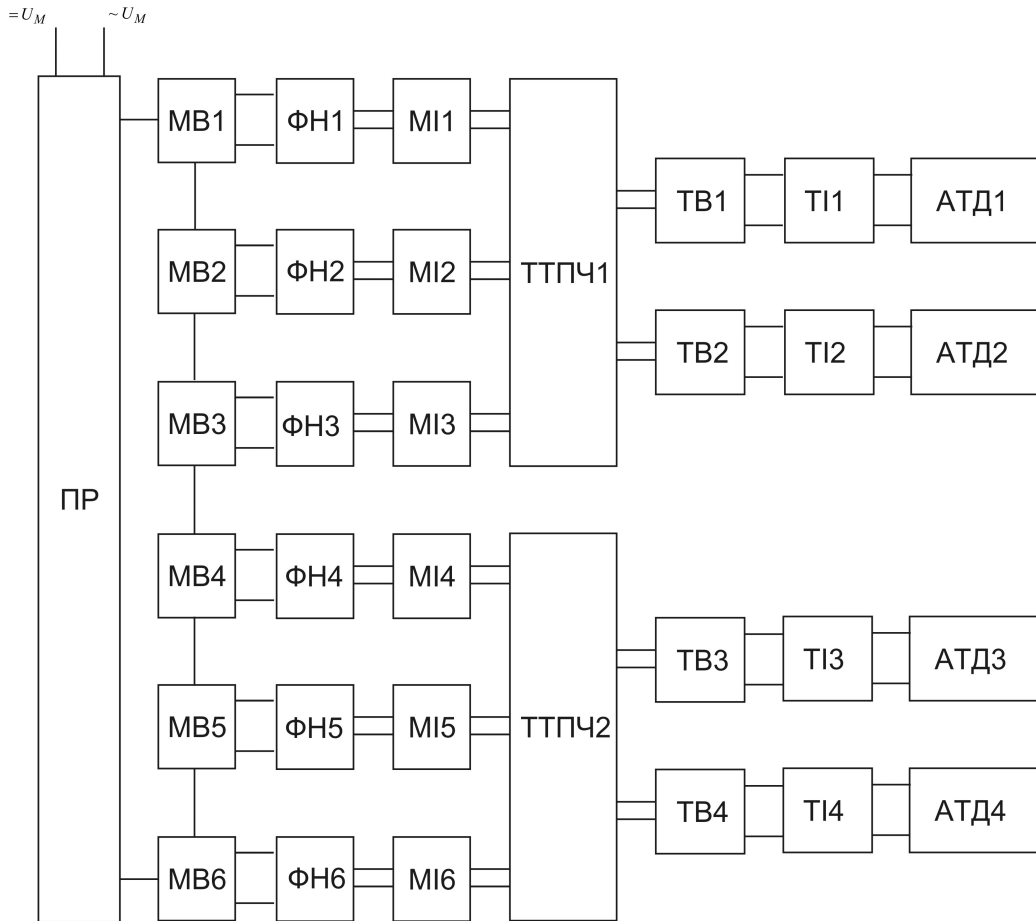


Рис. Б.9. Структура тягової електропередачі типу 4А-М2-3Φ-1мба.

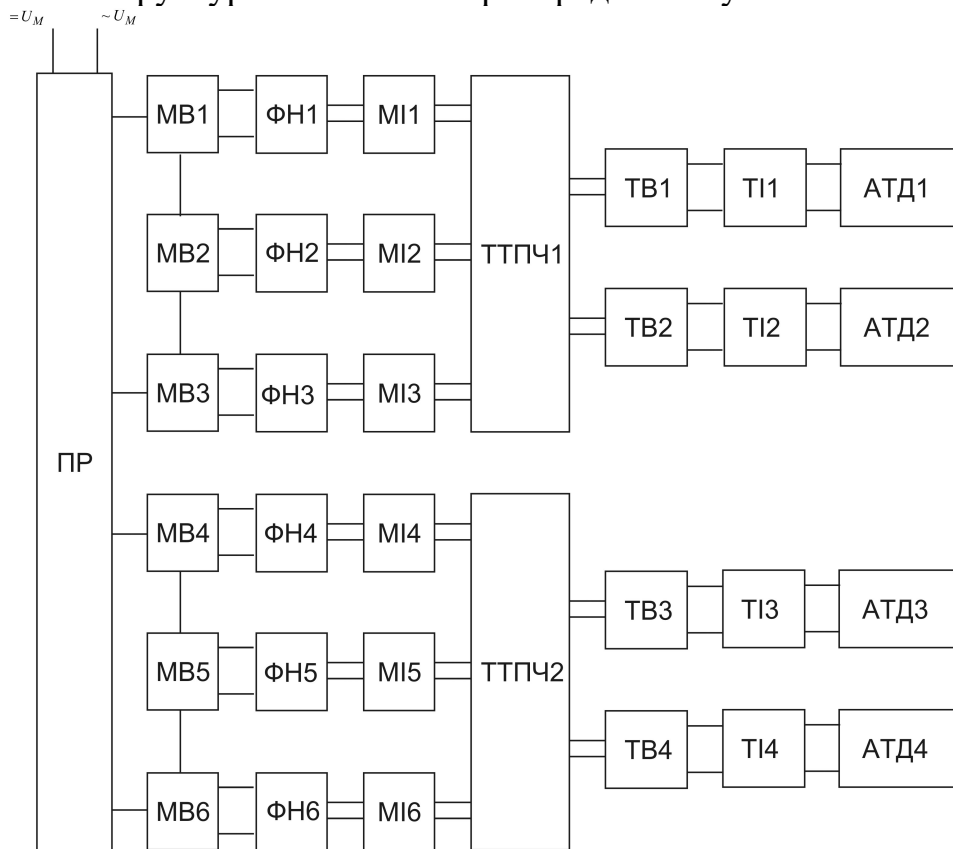


Рис. Б.10. Структура тягової електропередачі типу 4А-М2-3Φ-2м3а.

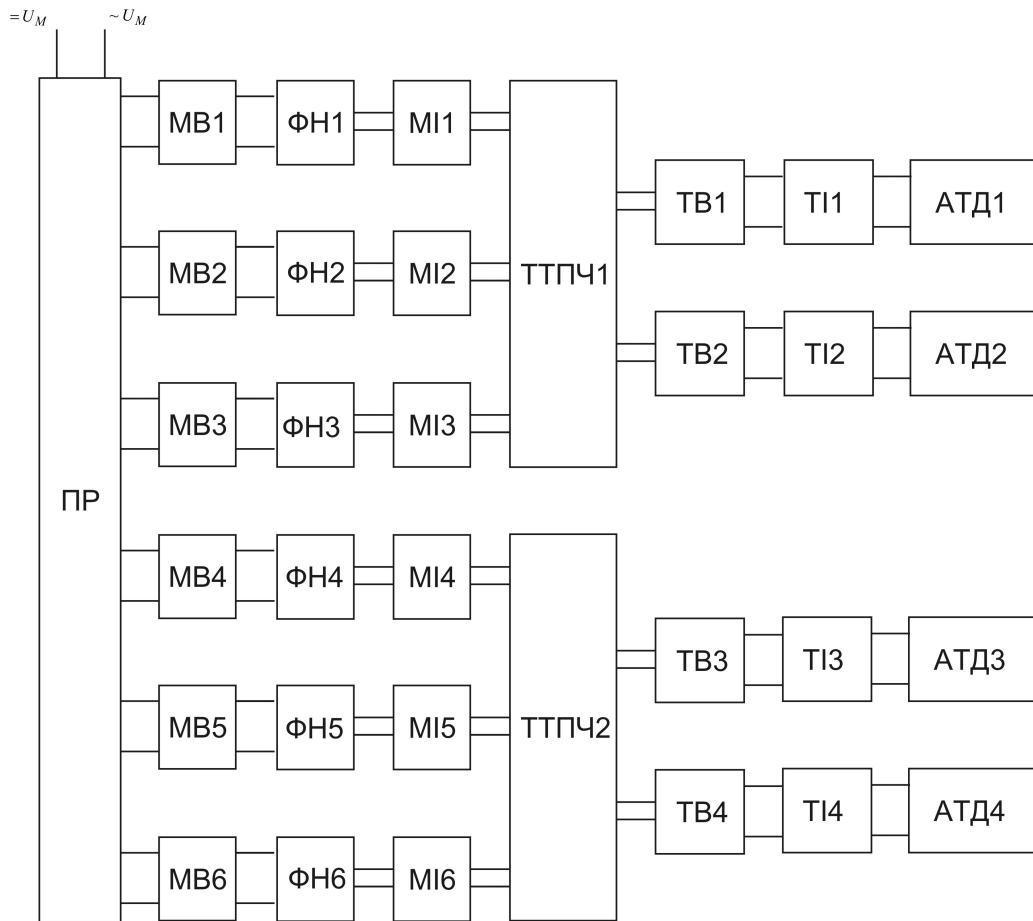


Рис. Б.11. Структура тягової електропередачі типу 4А-М2-3Φ-6м1а.

$=U_M$ $\sim U_M$

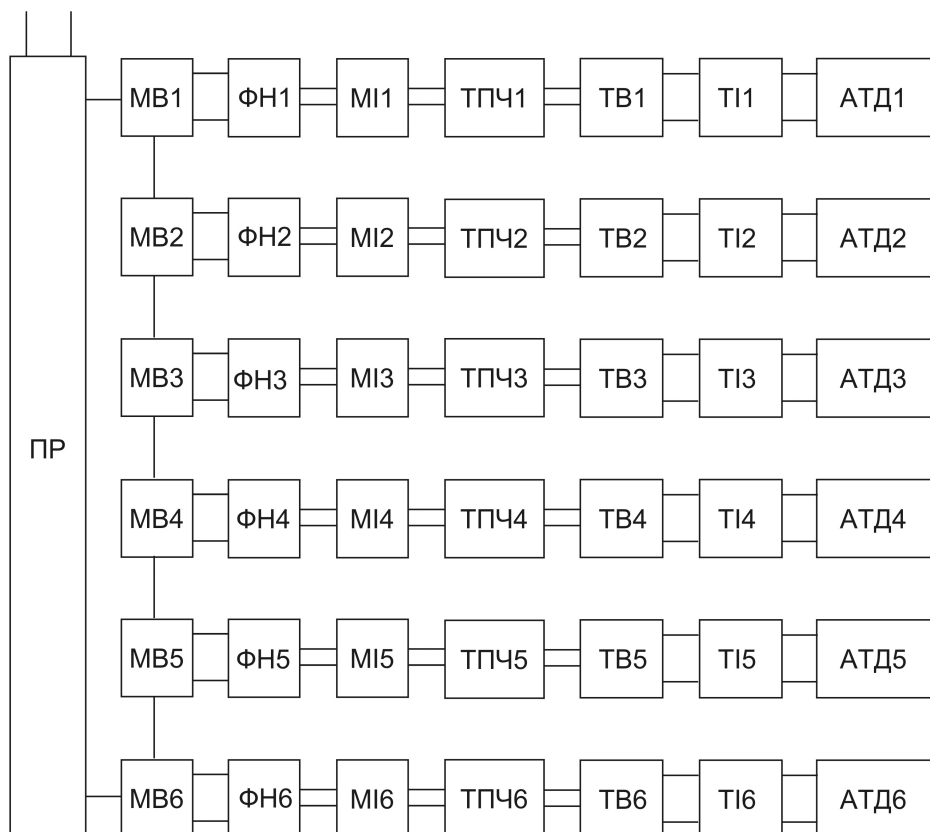


Рис. Б.12. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-1Φ-1м6а.

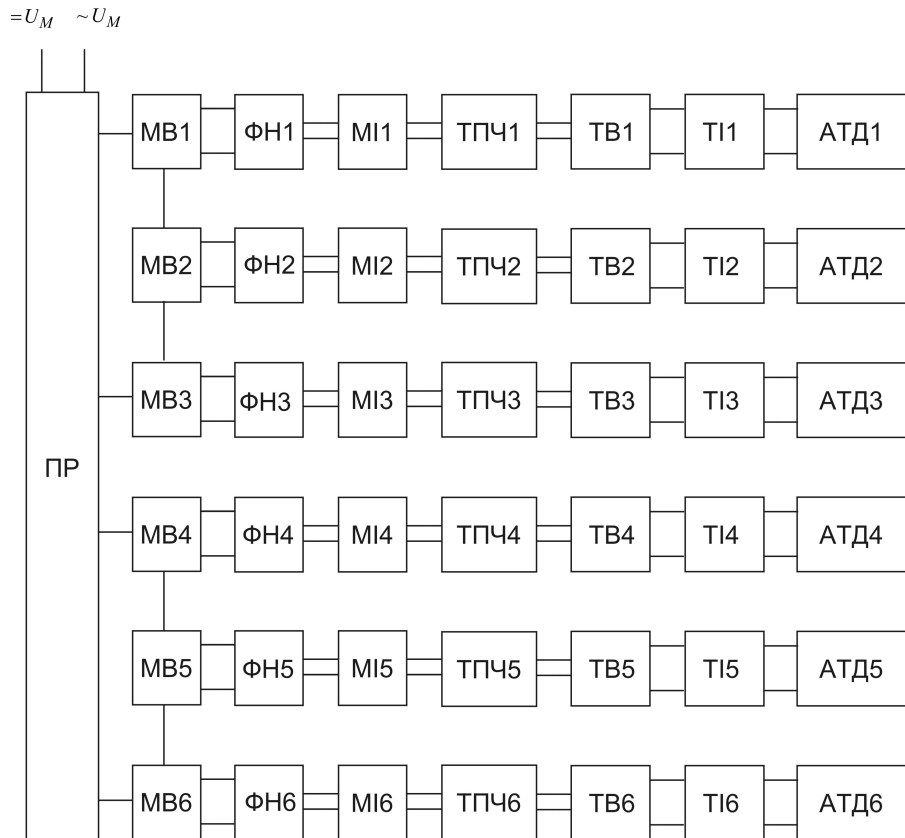


Рис. Б.13. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-1Φ-2м3а.

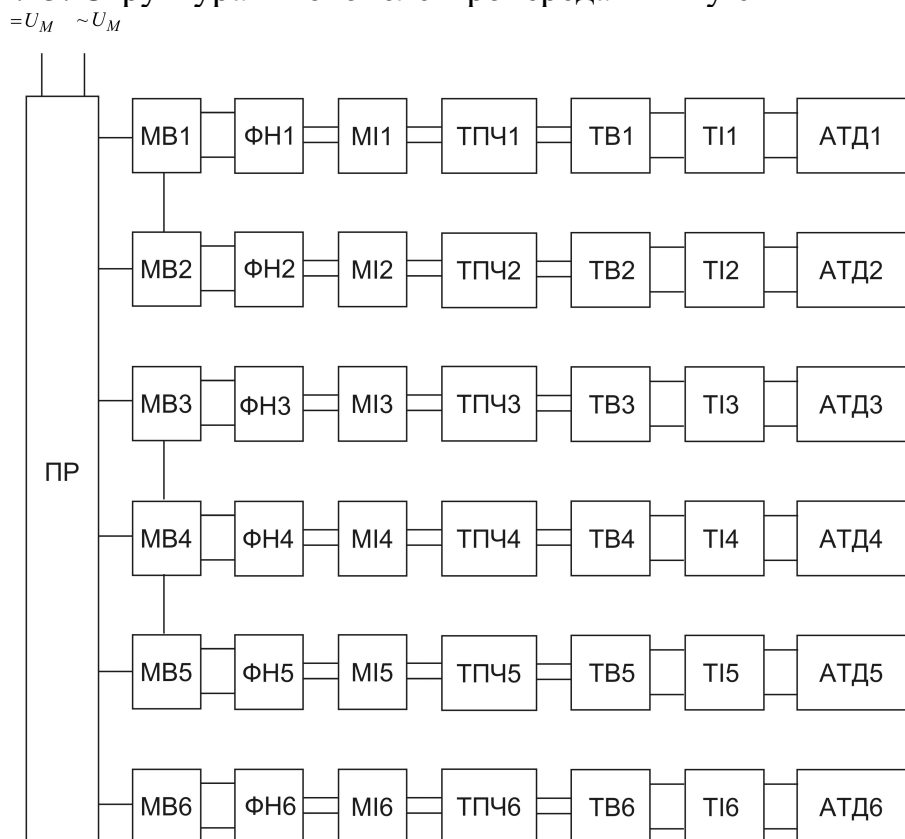


Рис. Б.14. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-1Φ-3м2а.

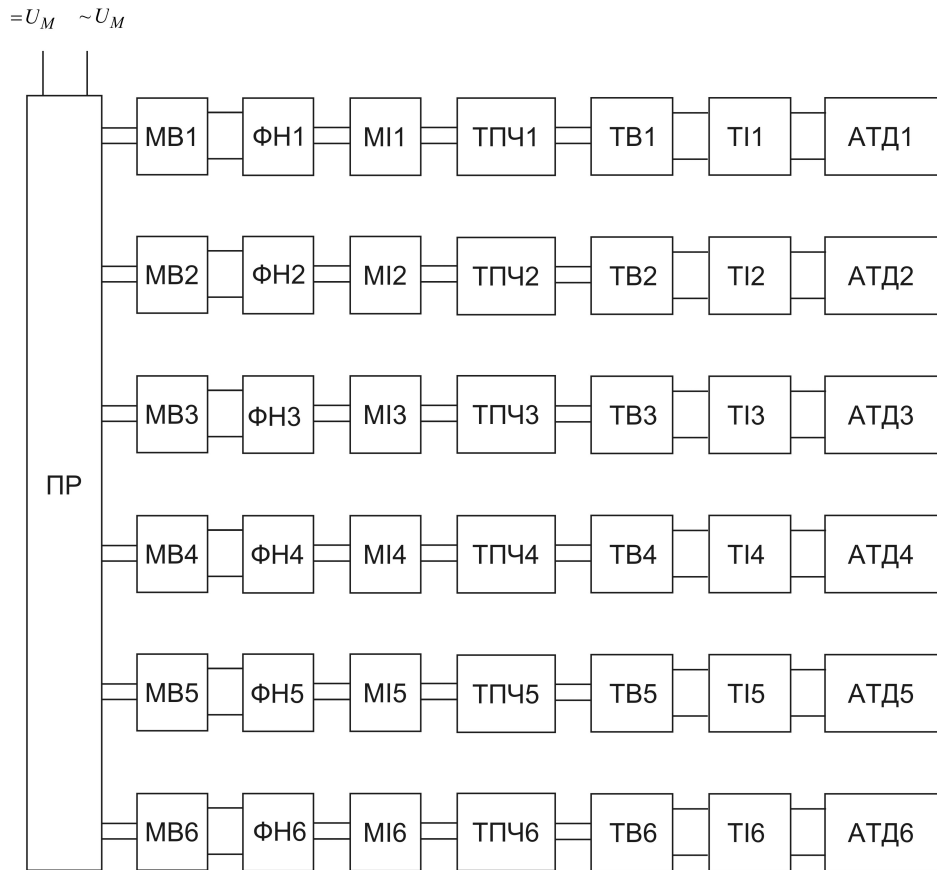


Рис. Б.15. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-1Ф-6м1а

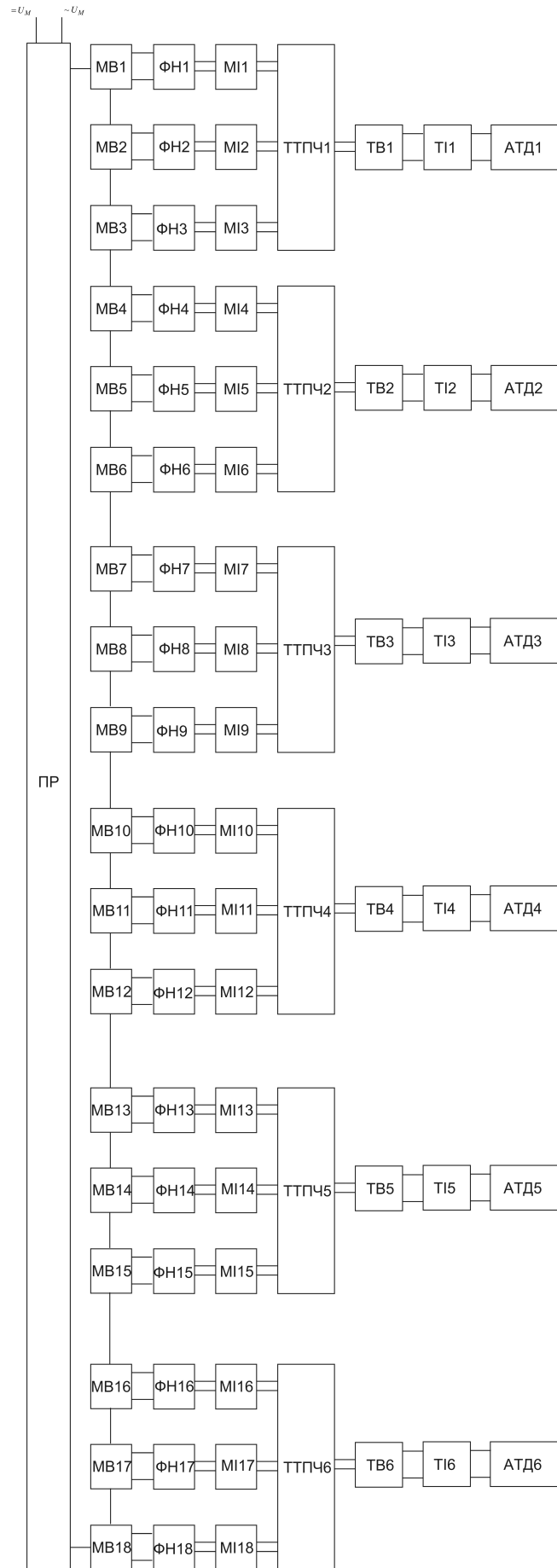


Рис. Б.16. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-3Φ-1м18а

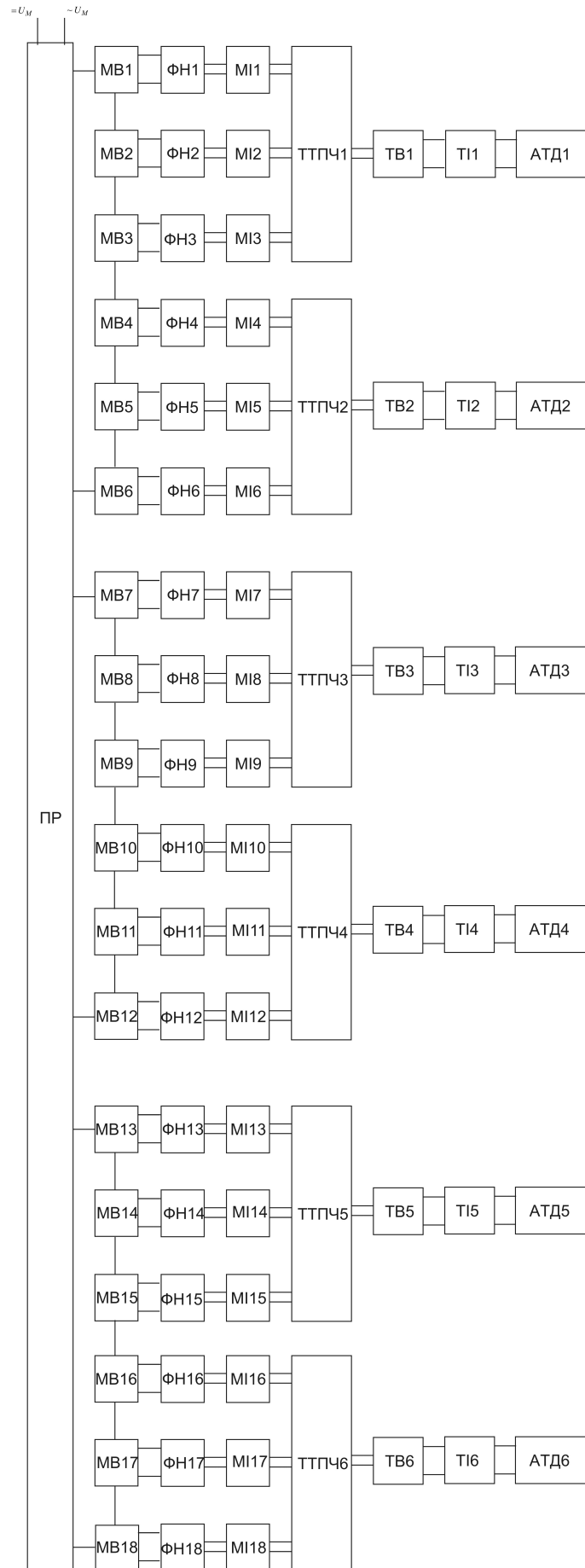


Рис. Б.17. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-3Ф-3мба

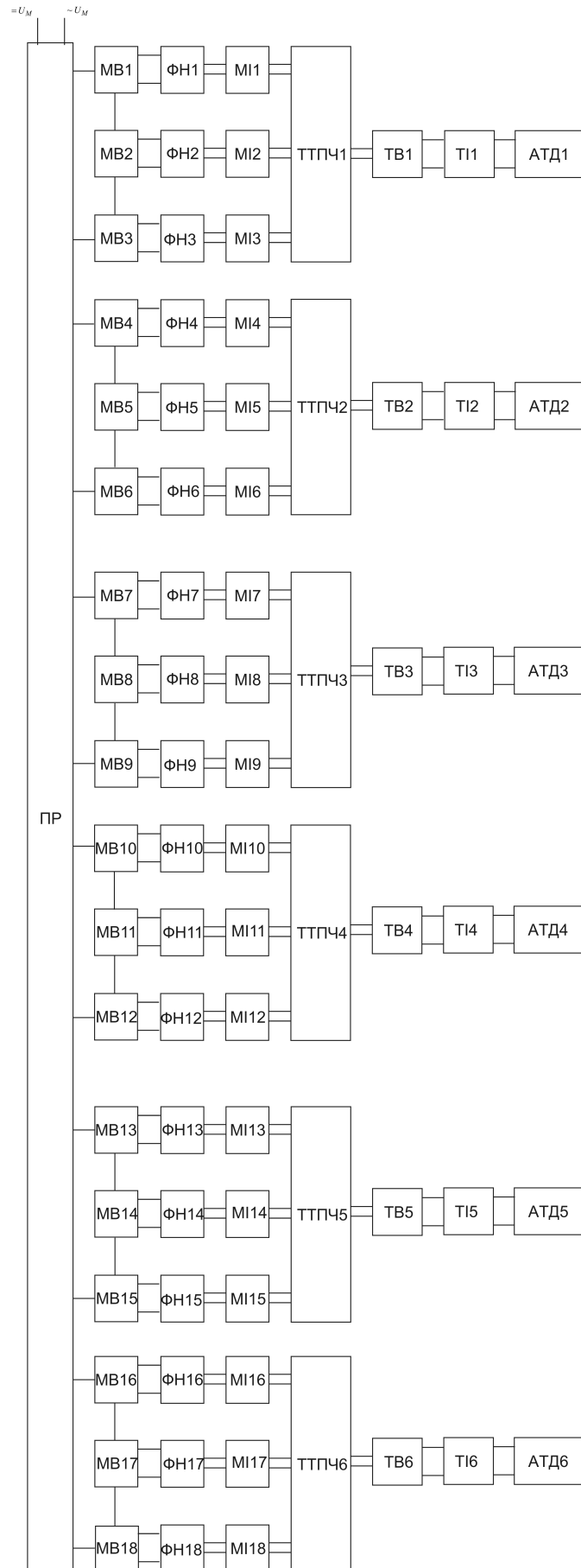


Рис. Б.18. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-3Ф-6М3а

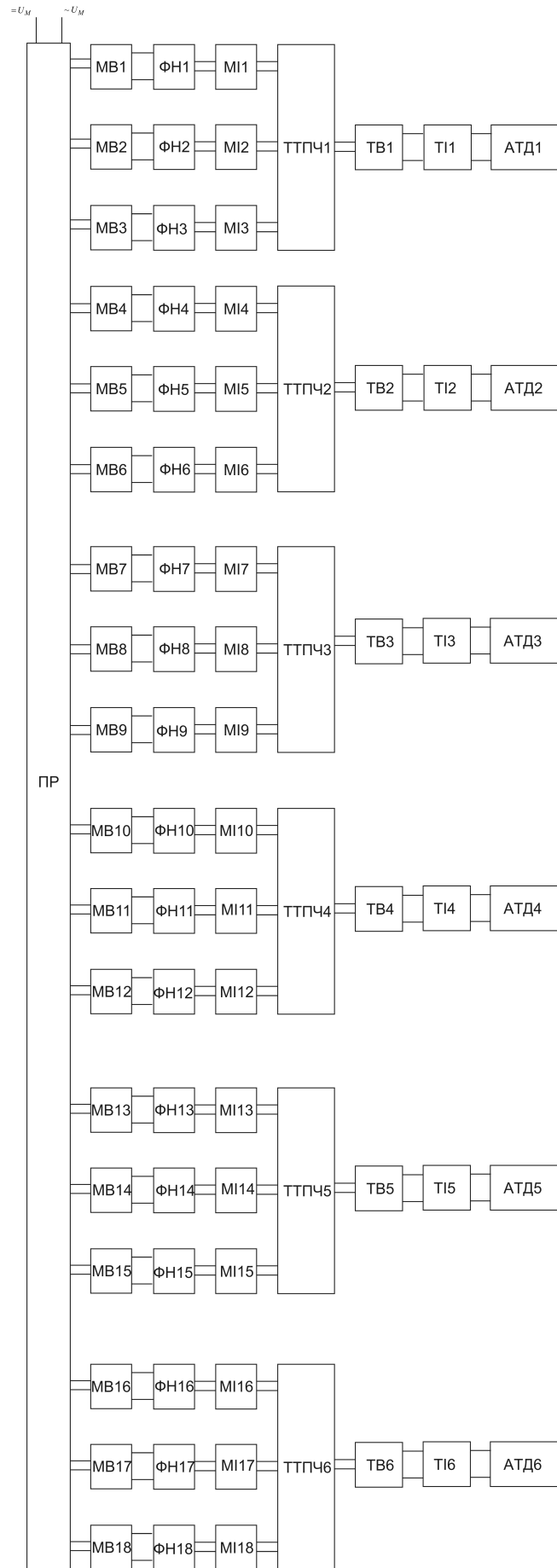


Рис. Б.19. Структура тягової електропередачі типу 6А-М1-3Φ-18м1а

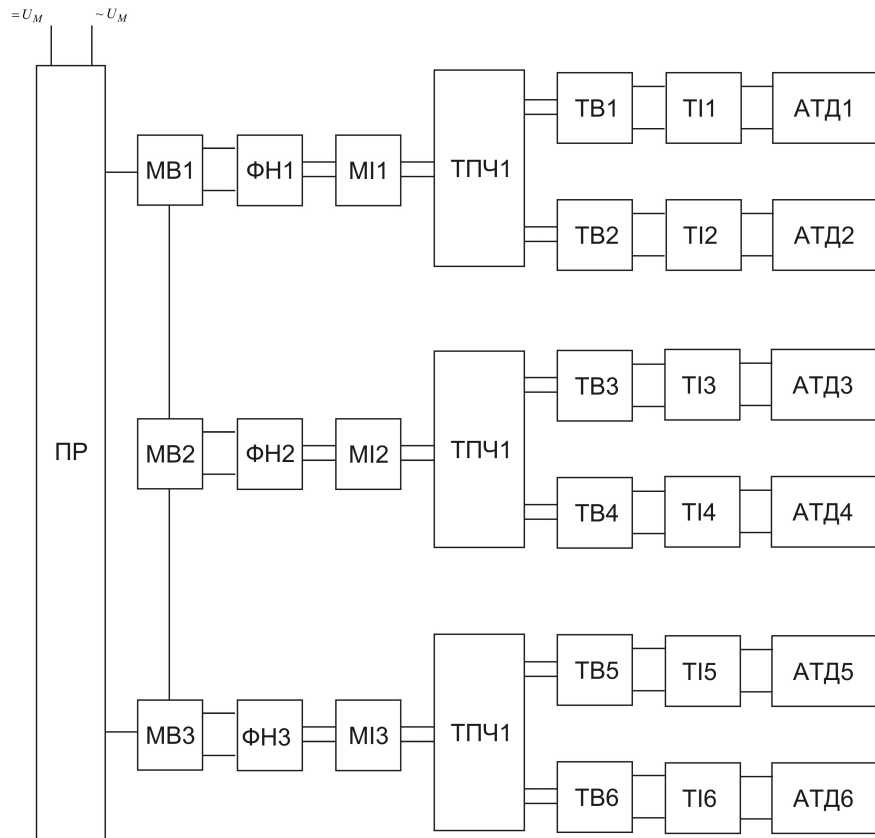


Рис. Б.20. Структура тягової електропередачі типу 6А-М2-1Ф-1м3а.

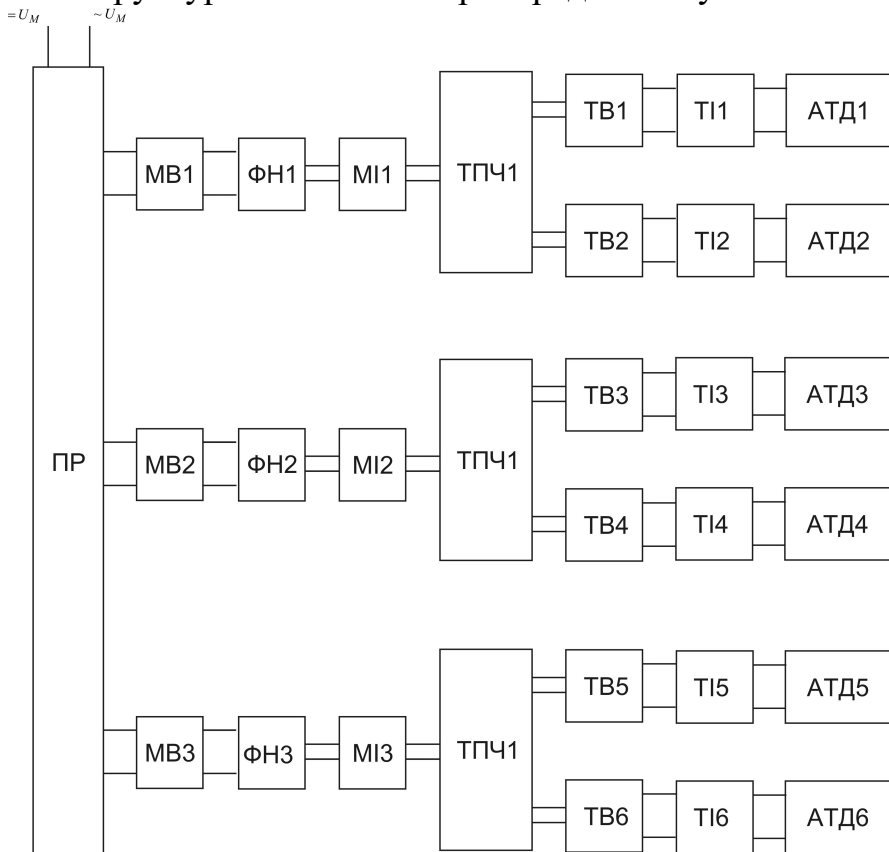


Рис. Б.21. Структура тягової електропередачі типу 6А-М2-1Ф-3м1а.

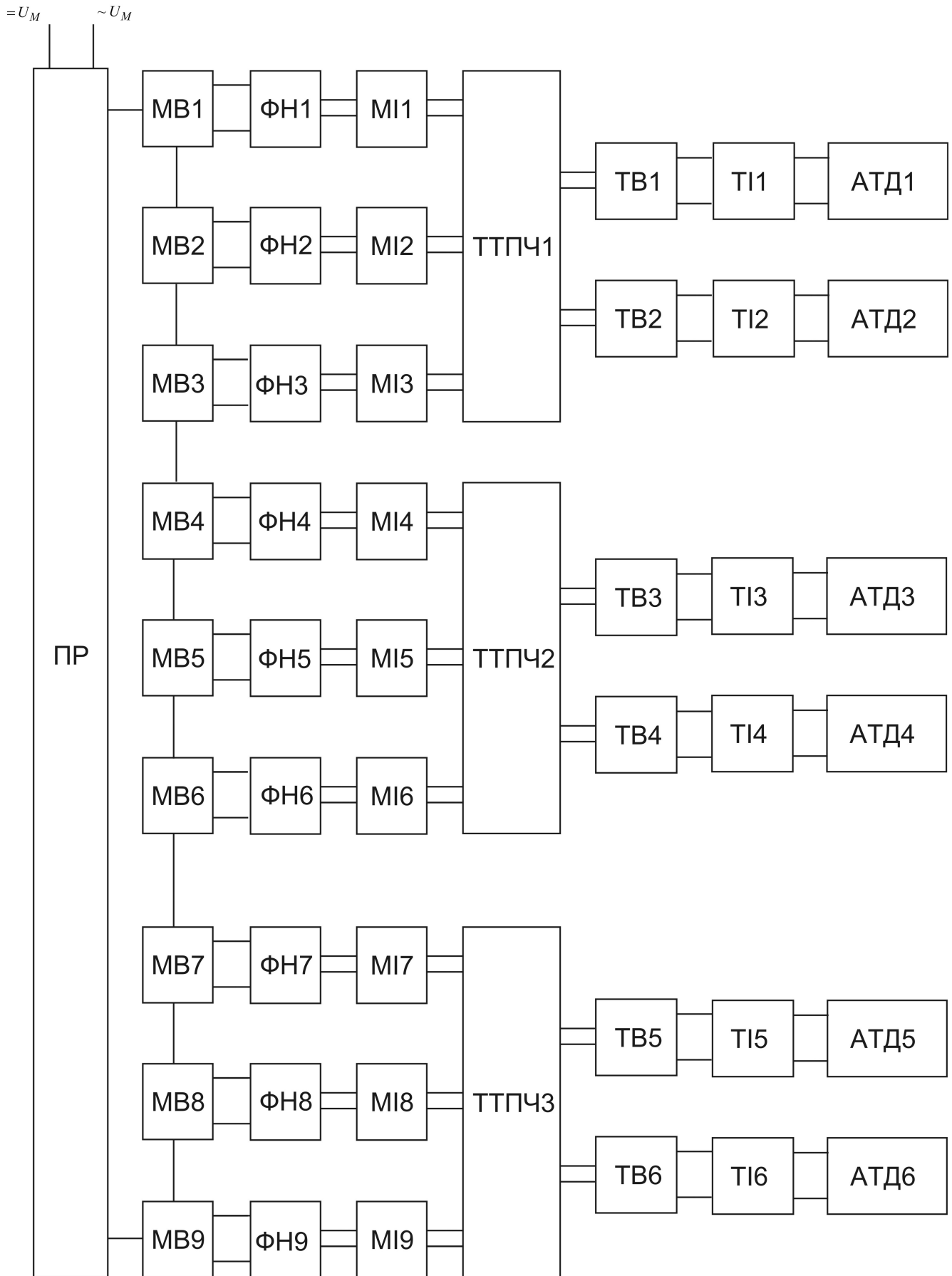


Рис. Б.22. Структура тягової електропередачі типу 6А-М2-3Ф-1м9а.

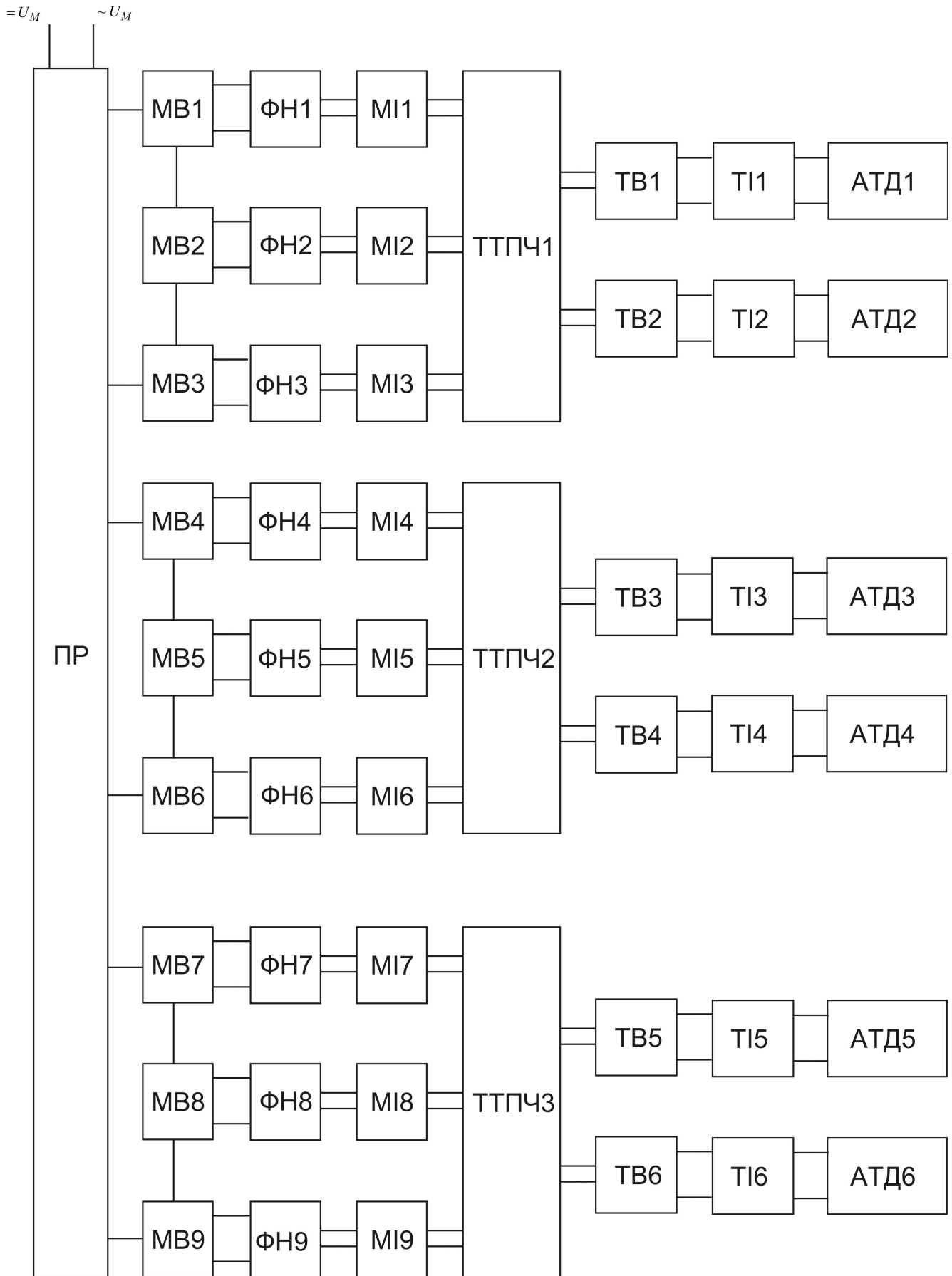


Рис. Б.23. Структура тягової електропередачі типу 6А-М2-3Ф-3м3а.

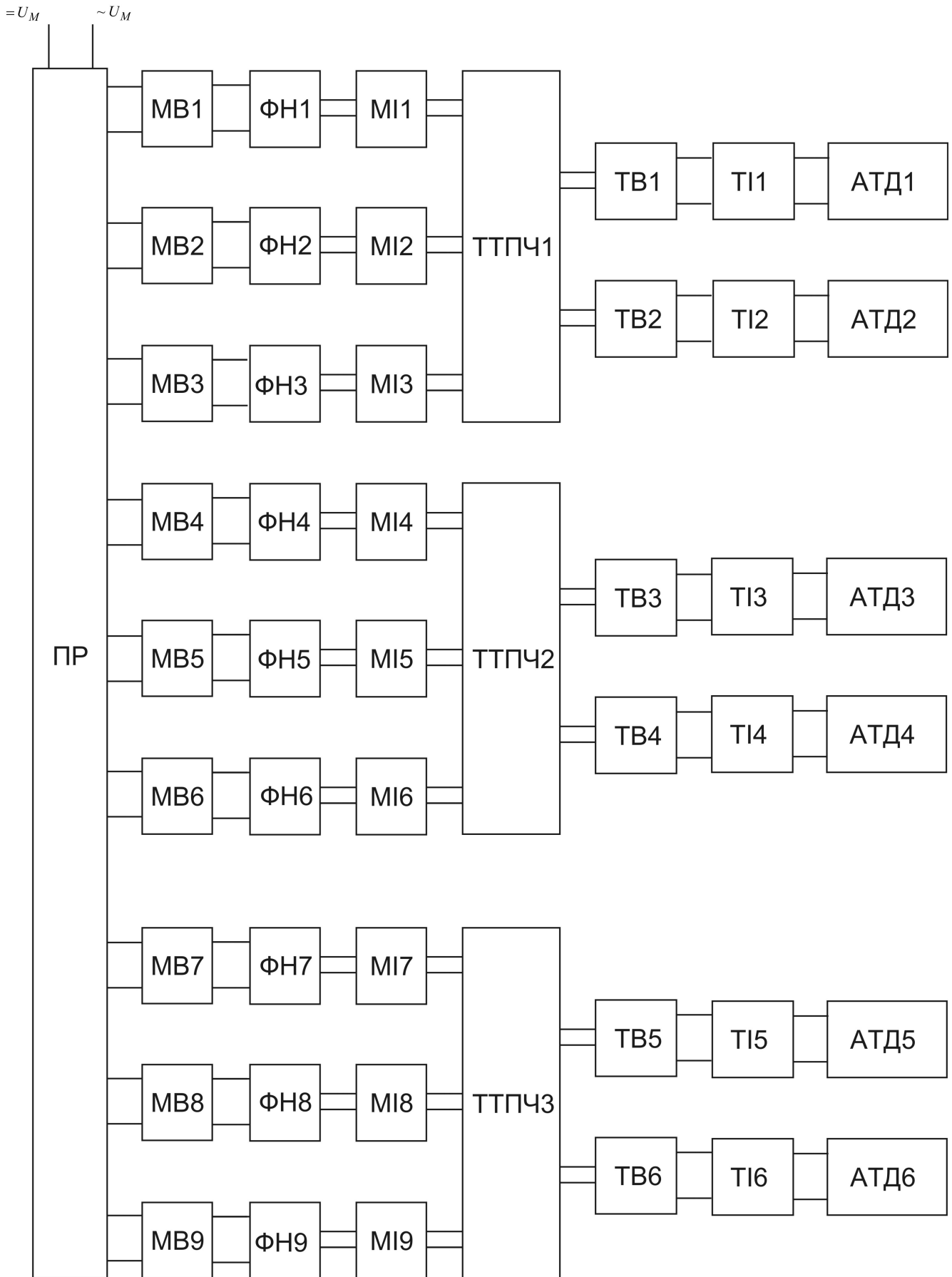


Рис. Б.24. Структура тягової електропередачі типу 6А-М2-3Φ-9м1а.

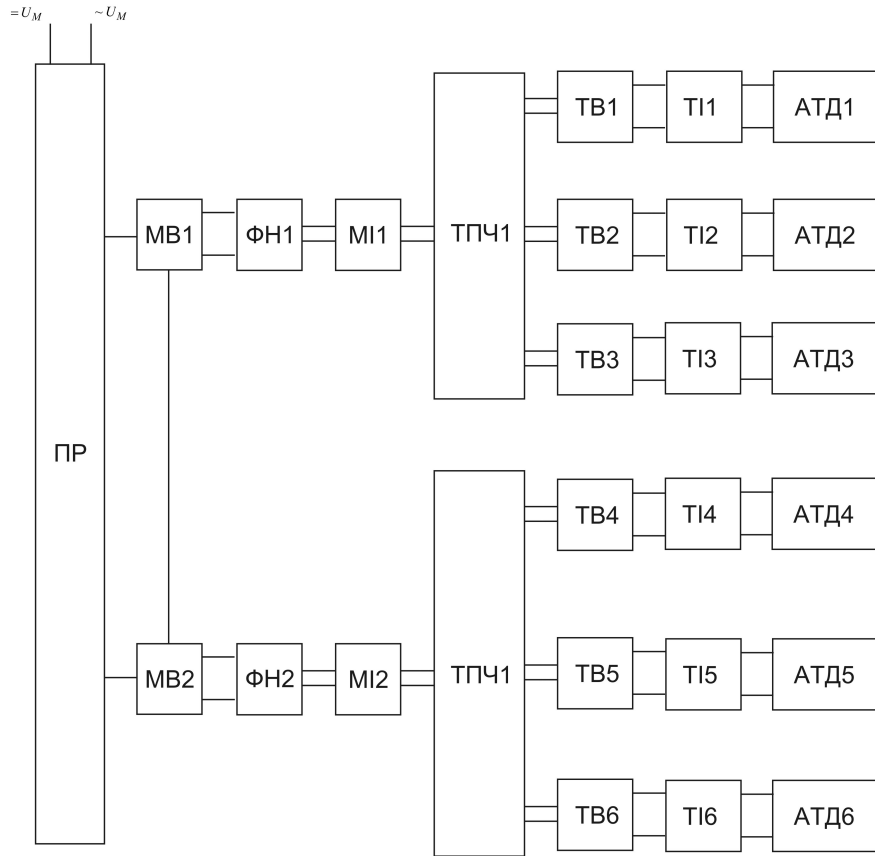


Рис. Б.25. Структура тягової електропередачі типу 6А-М3-1Φ-1м2а.

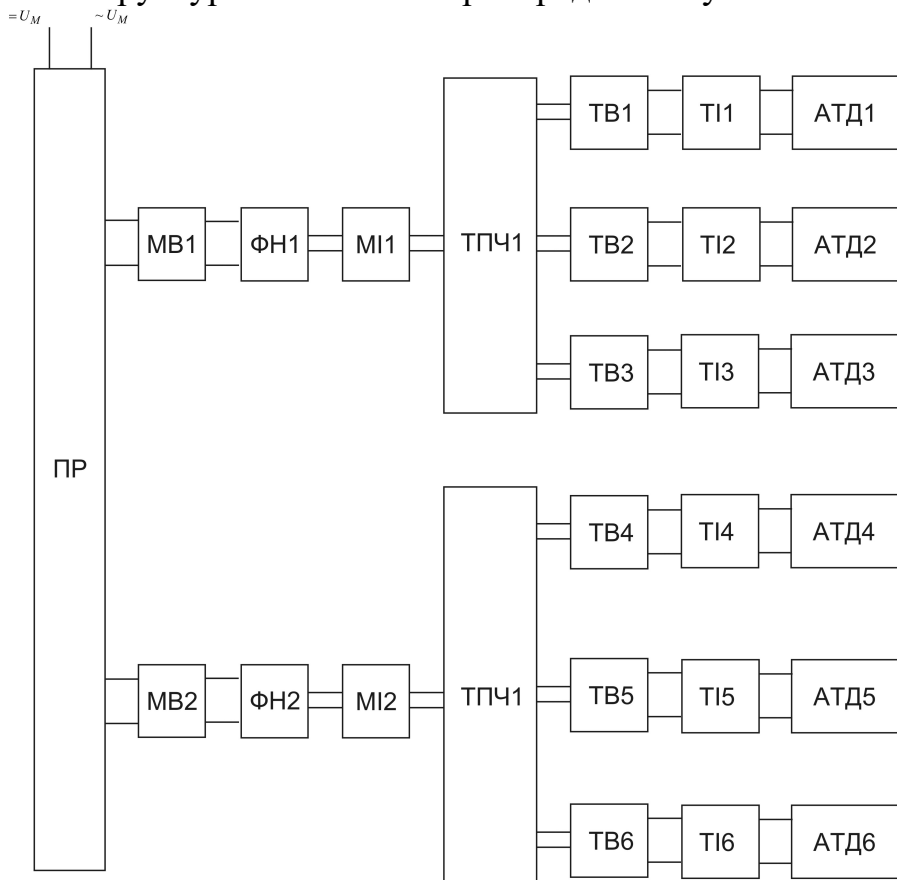


Рис. Б.26. Структура тягової електропередачі типу 6А-М3-1Φ-2м1а.

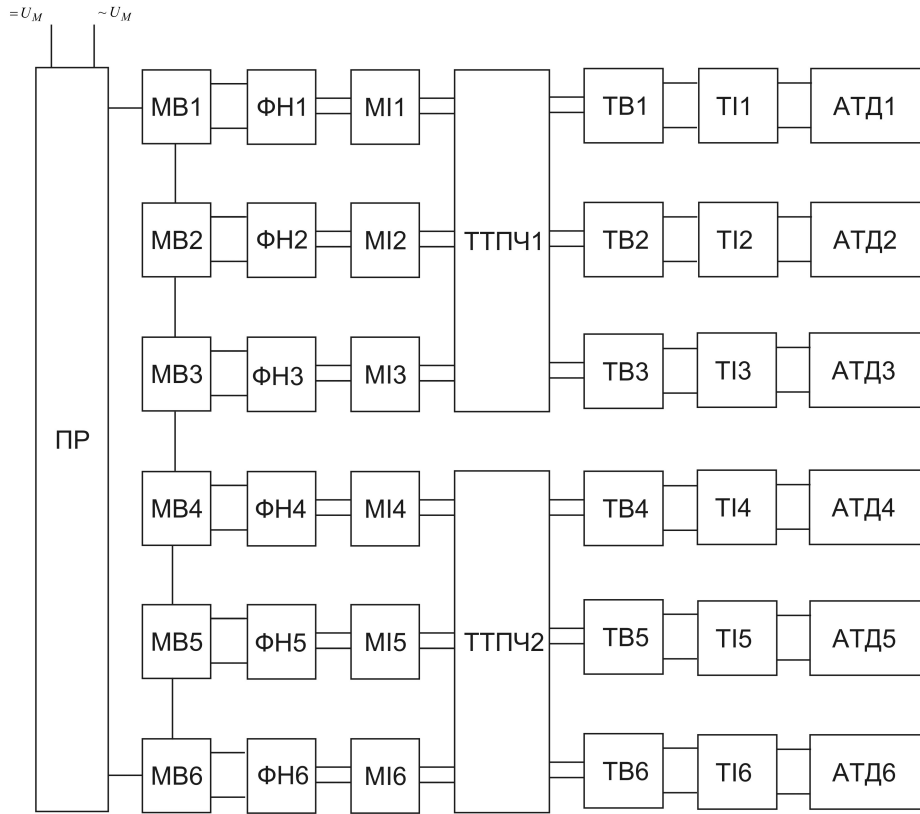


Рис. Б.27. Структура тягової електропередачі типу 6А-М3-3Φ-1мБа.

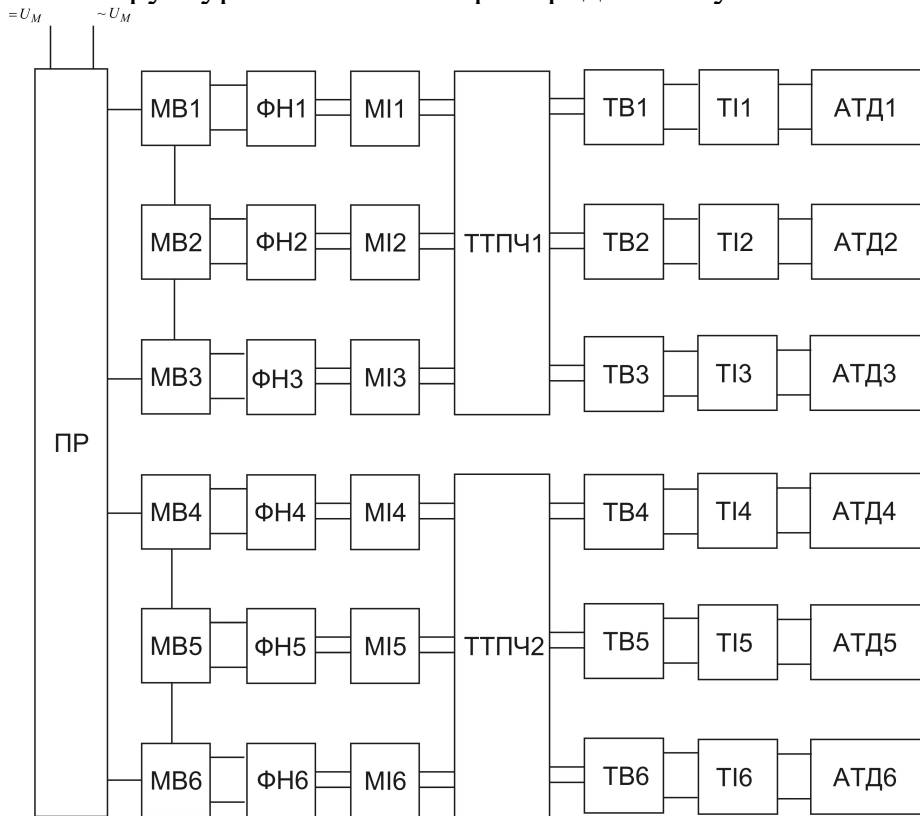


Рис. Б.28. Структура тягової електропередачі типу 6А-М3-3Φ-2м3а.

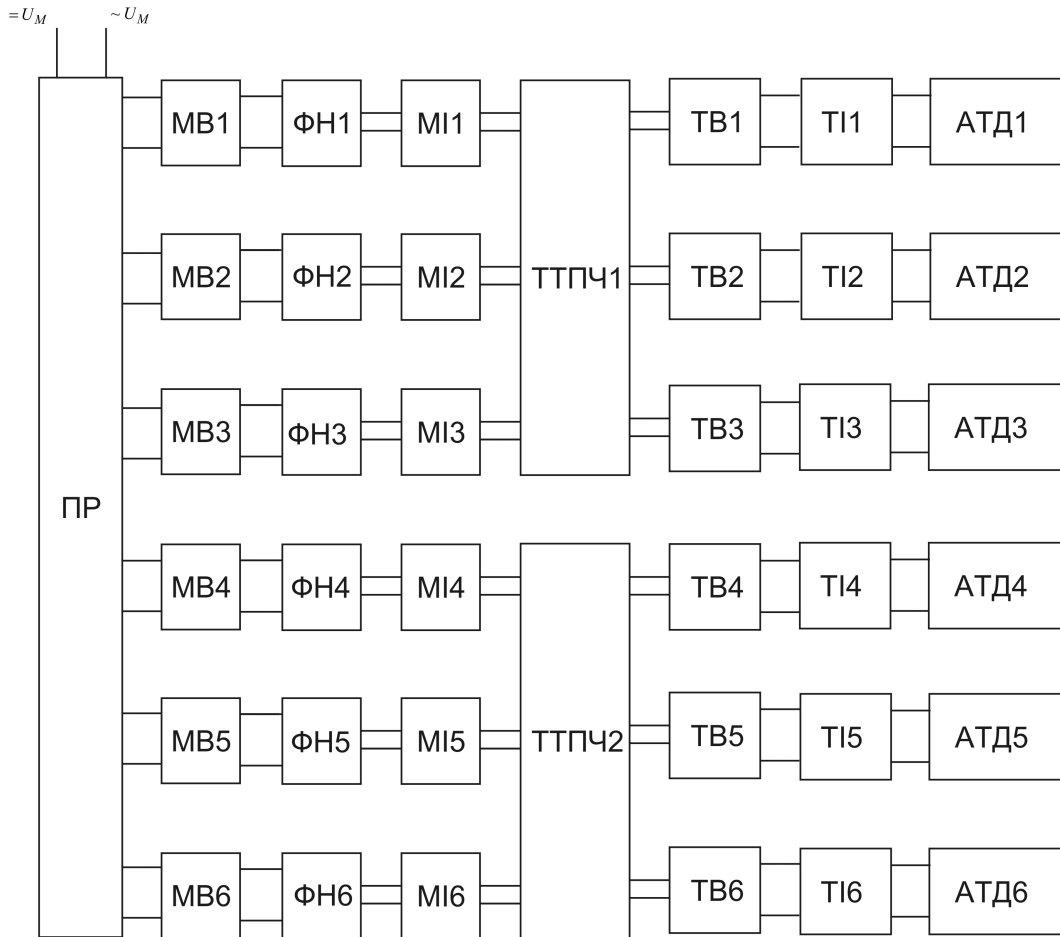


Рис. Б.29. Структура тягової електропередачі типу 6А-М3-3Φ-6м1а.
 $=U_M$ $\sim U_M$

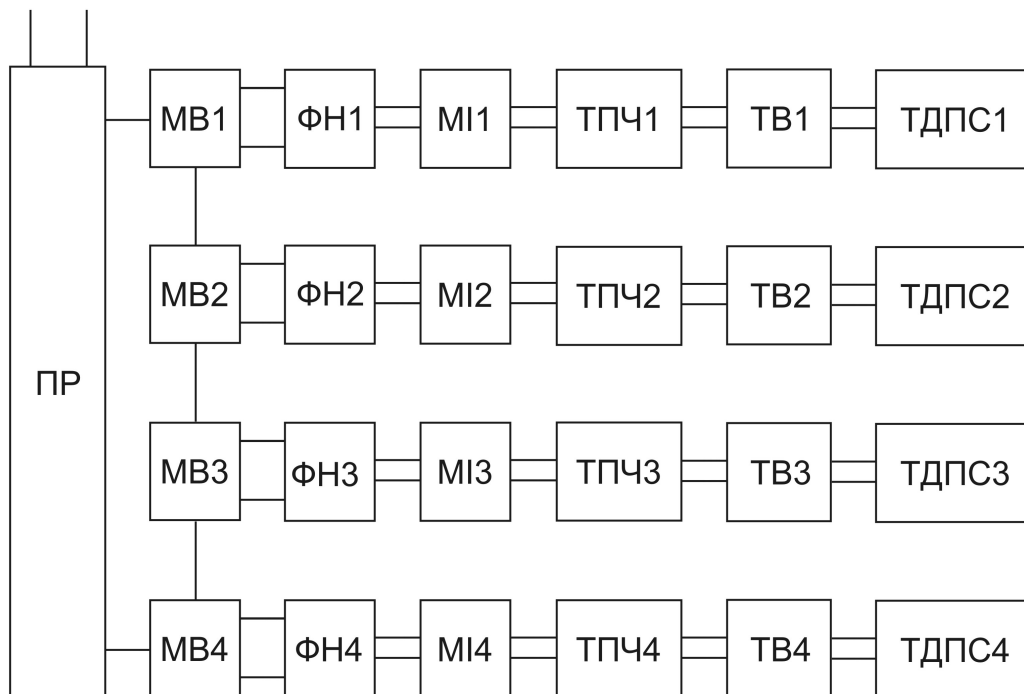


Рис. Б.30. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М1-1Φ-1м4а.

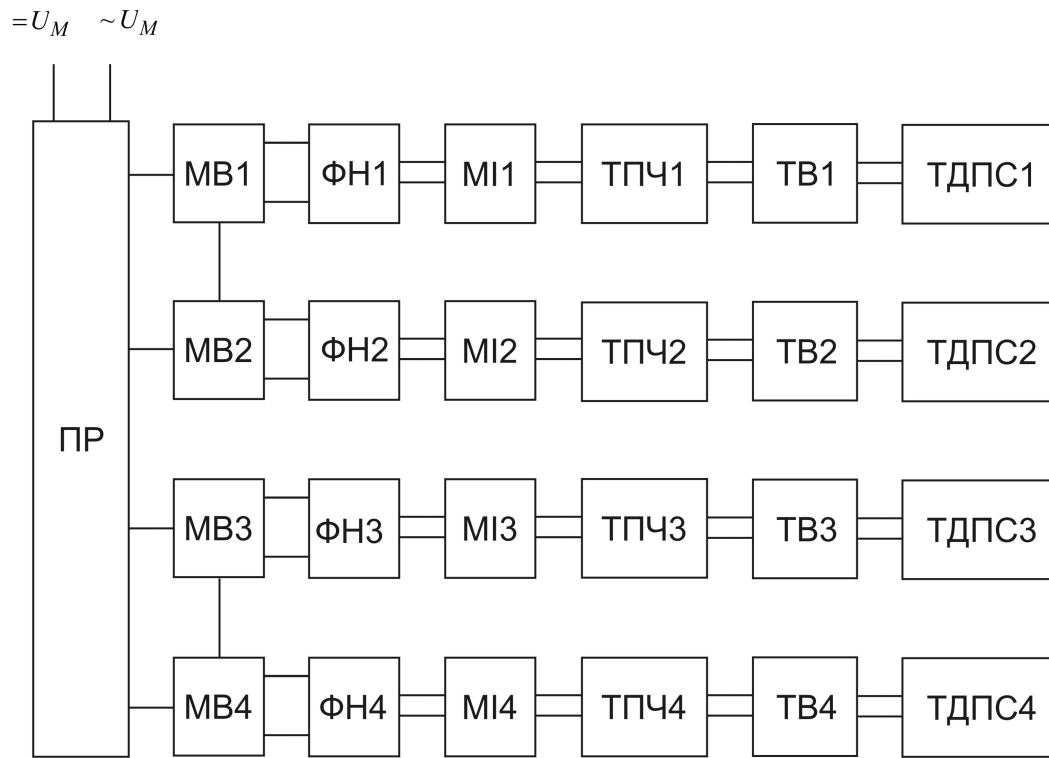


Рис. Б.31. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М1-1Φ-2м2а.
 $=U_M \quad \sim U_M$

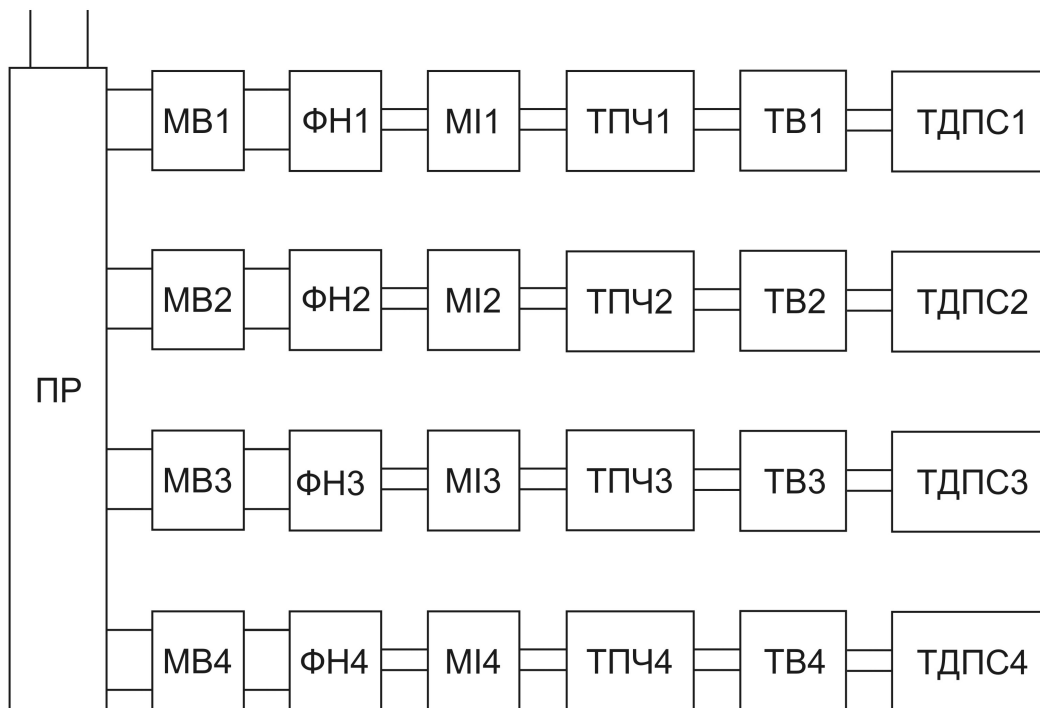


Рис. Б.32. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М1-1Φ-4м1а.

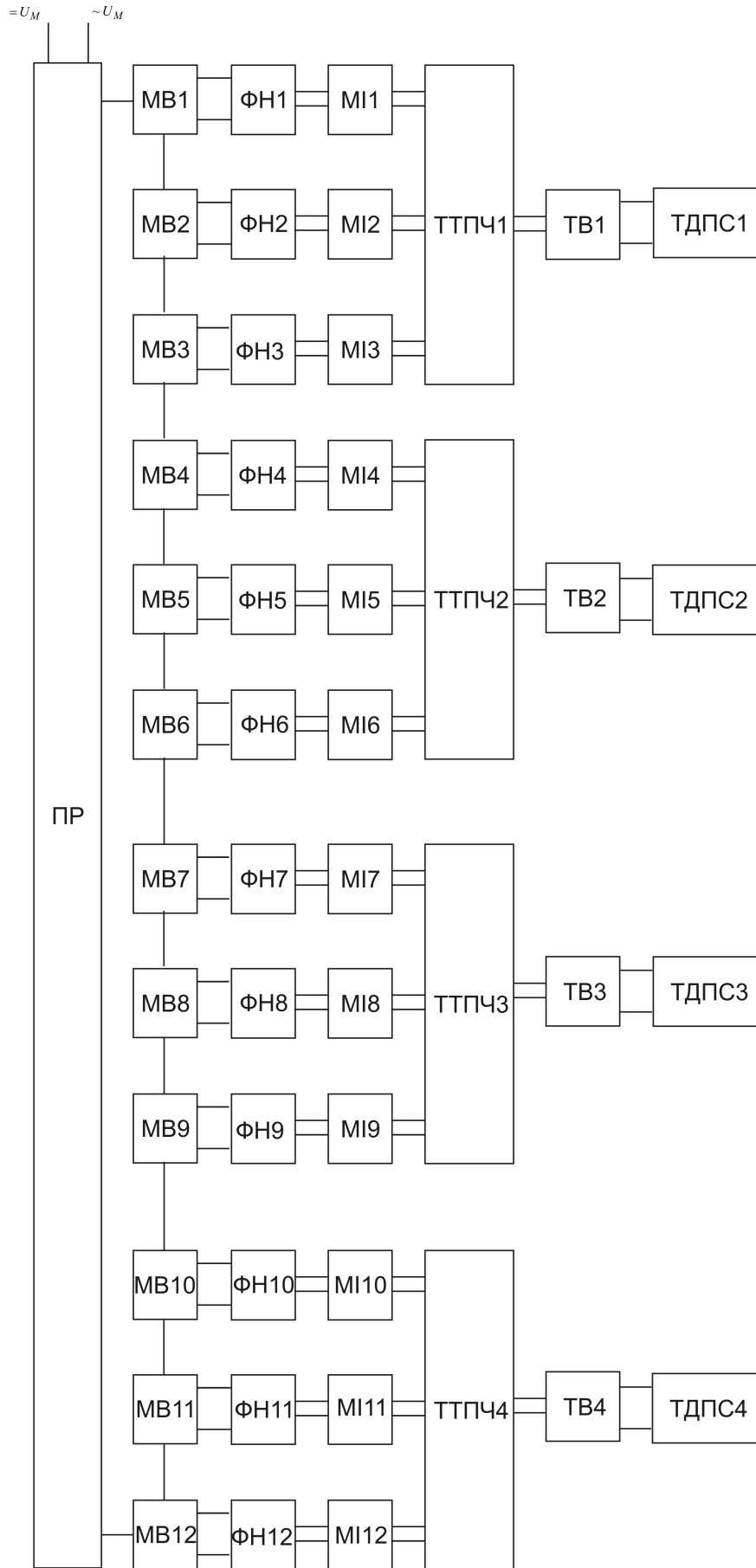


Рис. Б.33. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М1-3Ф-1м12а.

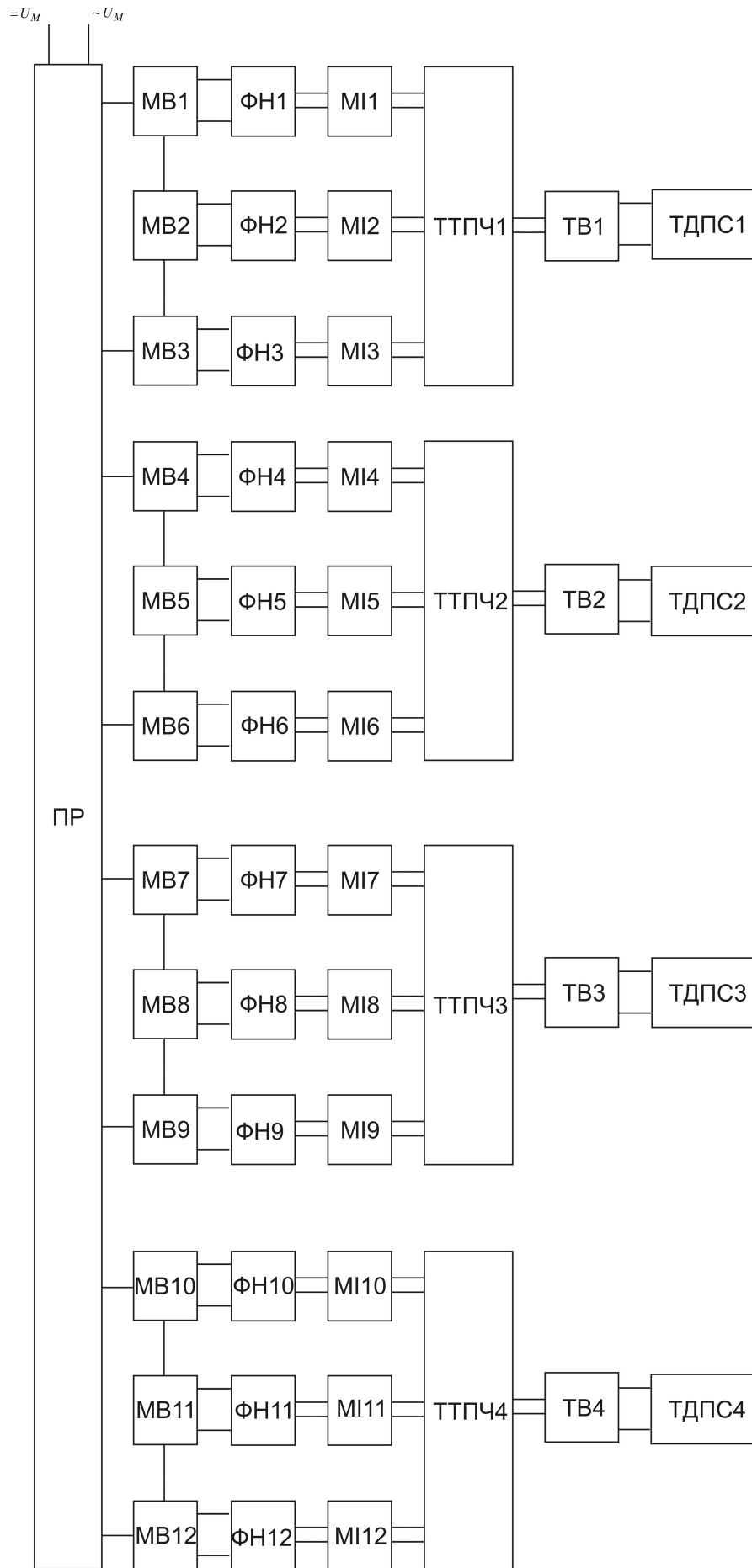


Рис. Б.34. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М1-3Ф-4м3а.

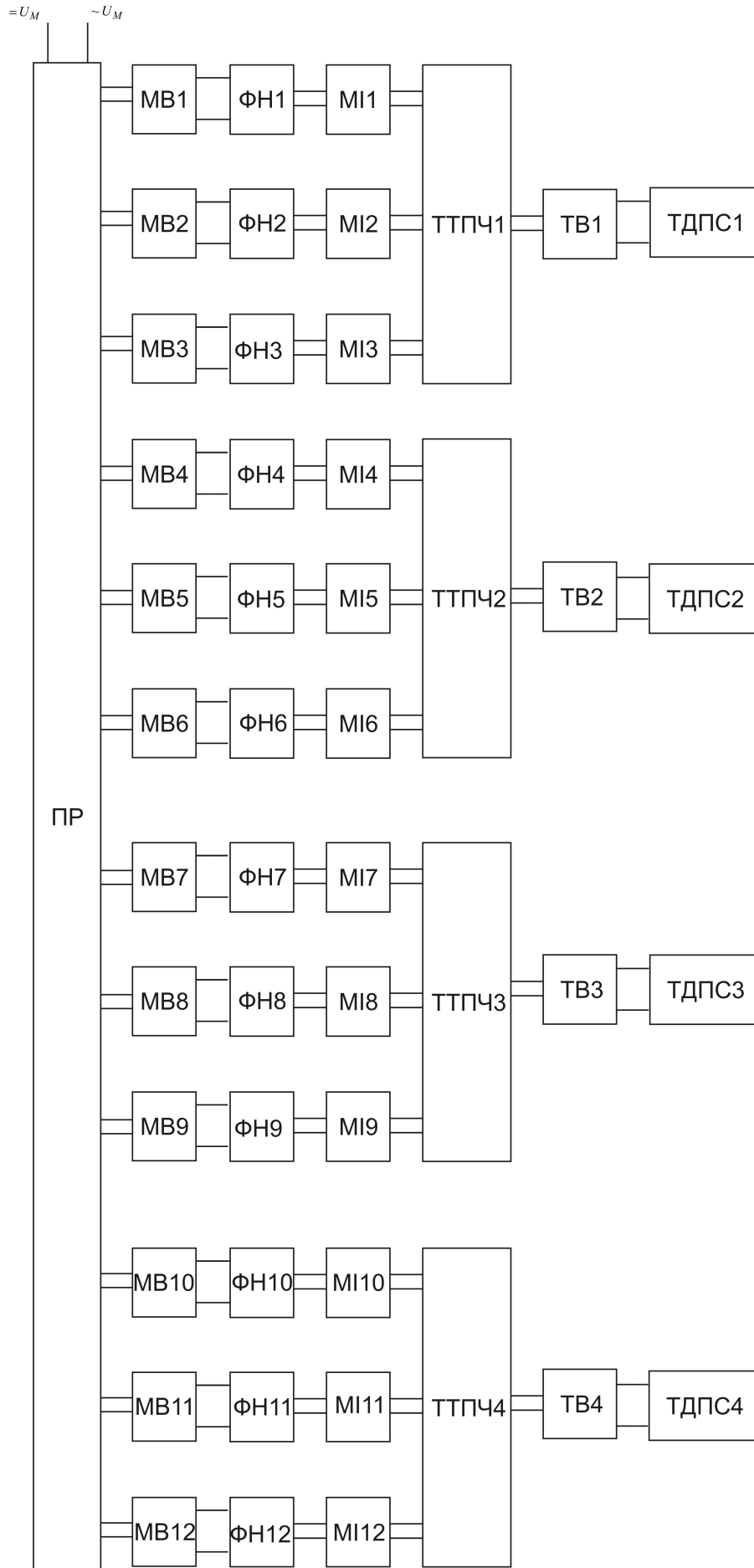


Рис. Б.35. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М1-3Ф-12м1а.

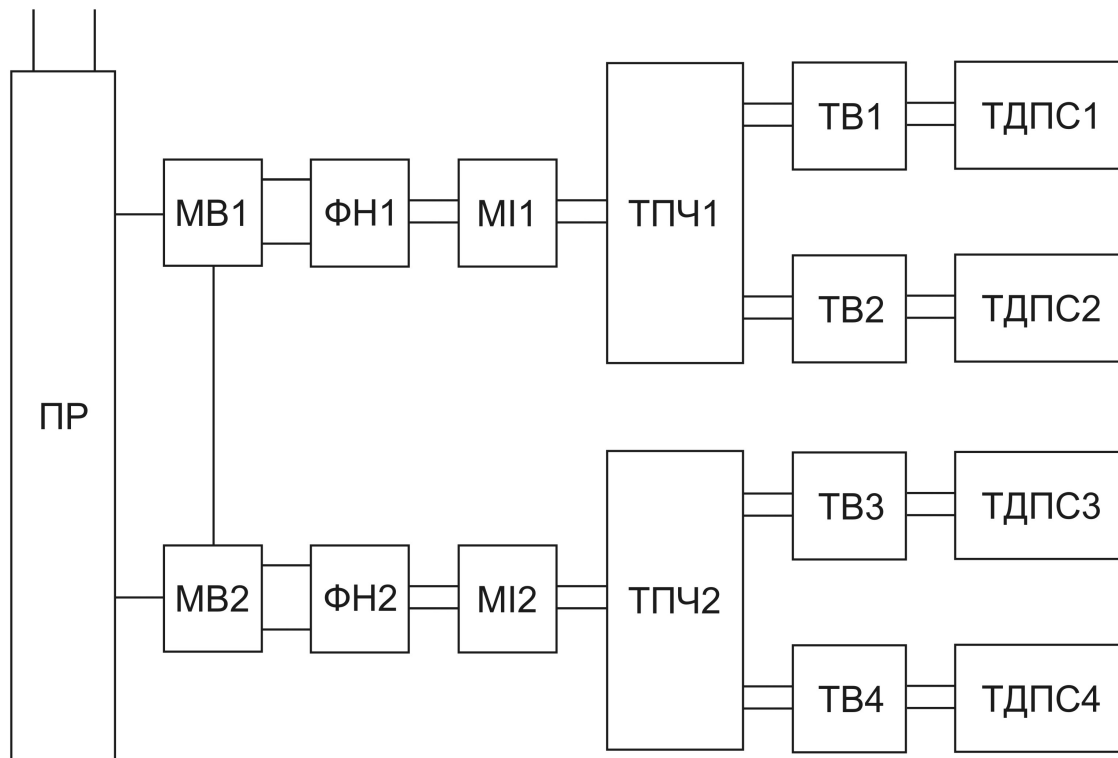
$=U_M \sim U_M$


Рис. Б.36. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М2-1Φ-1м2а.

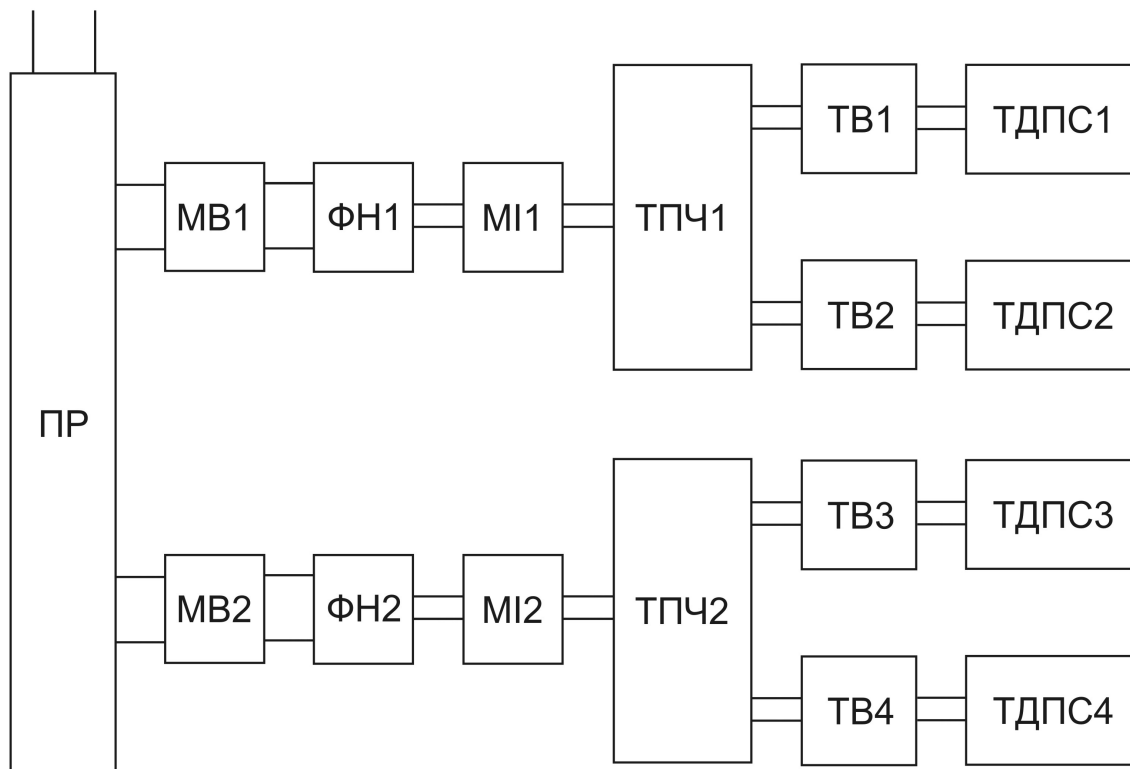
 $=U_M \sim U_M$


Рис. Б.37. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М2-1Φ-2м1а.

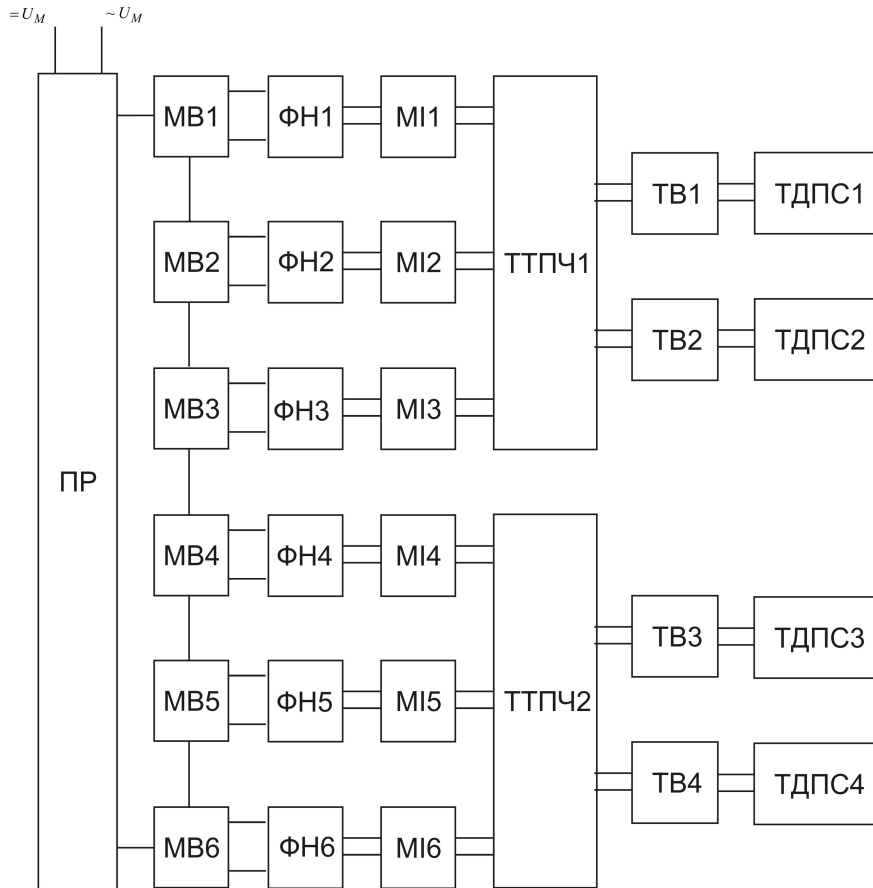


Рис. Б.38. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М2-3Ф-1мба.

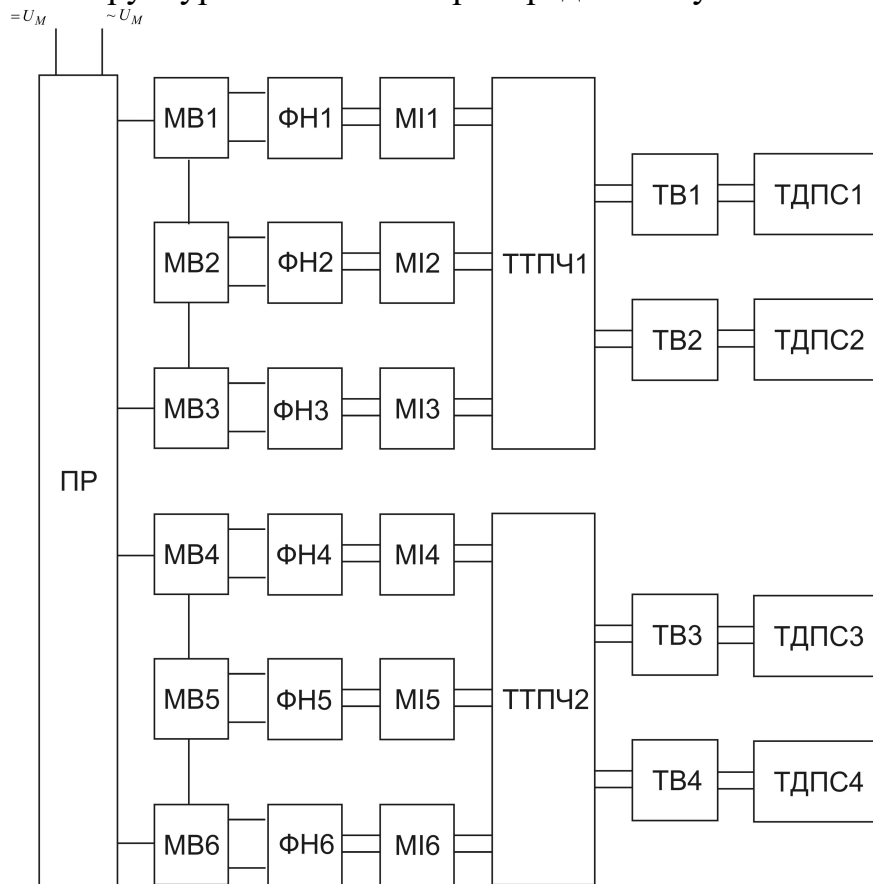


Рис. Б.39. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М2-3Ф-2м3а.

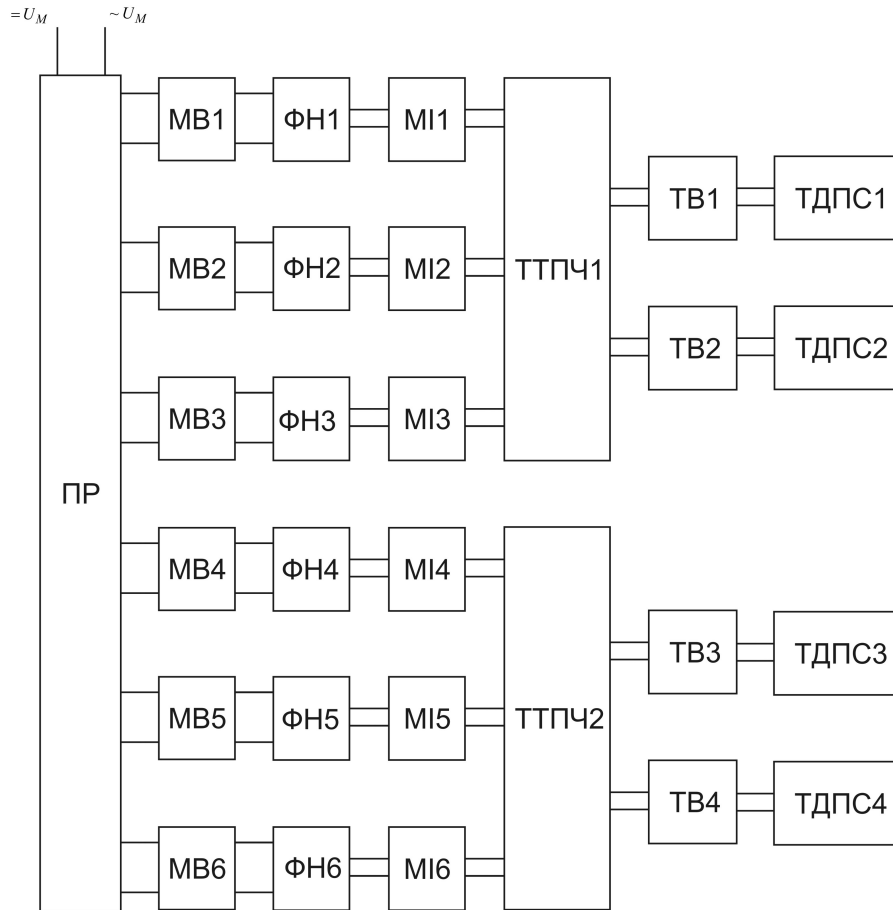


Рис. Б.40. Структура тягової електропередачі типу 4Т-М2-3Φ-6м1а.

$=U_M$ $\sim U_M$

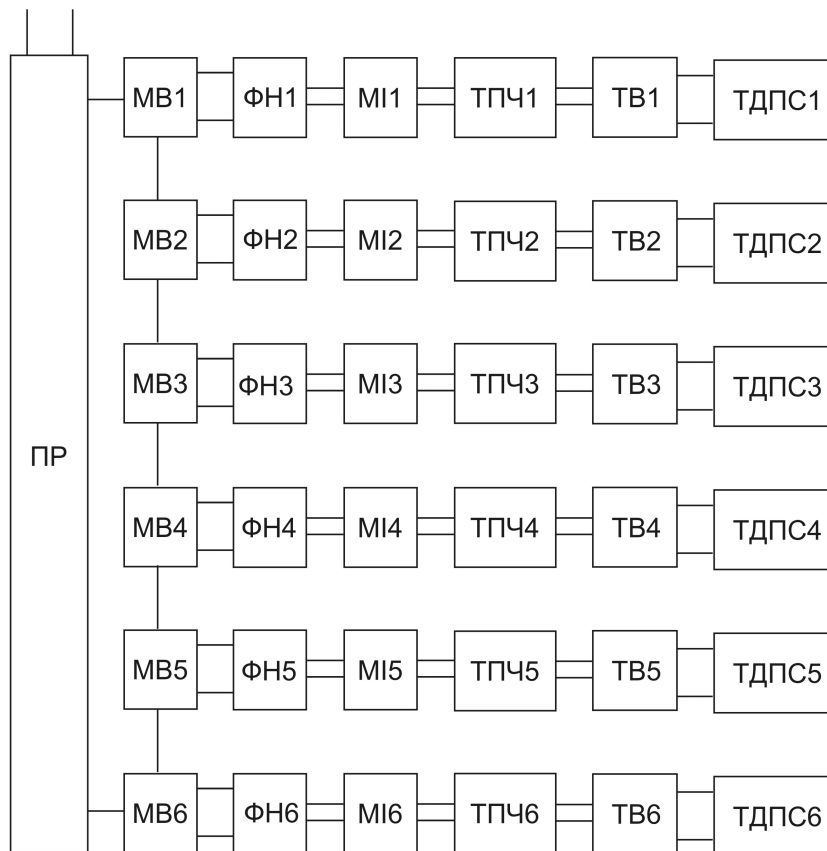


Рис. Б.41. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Φ-1м6а.

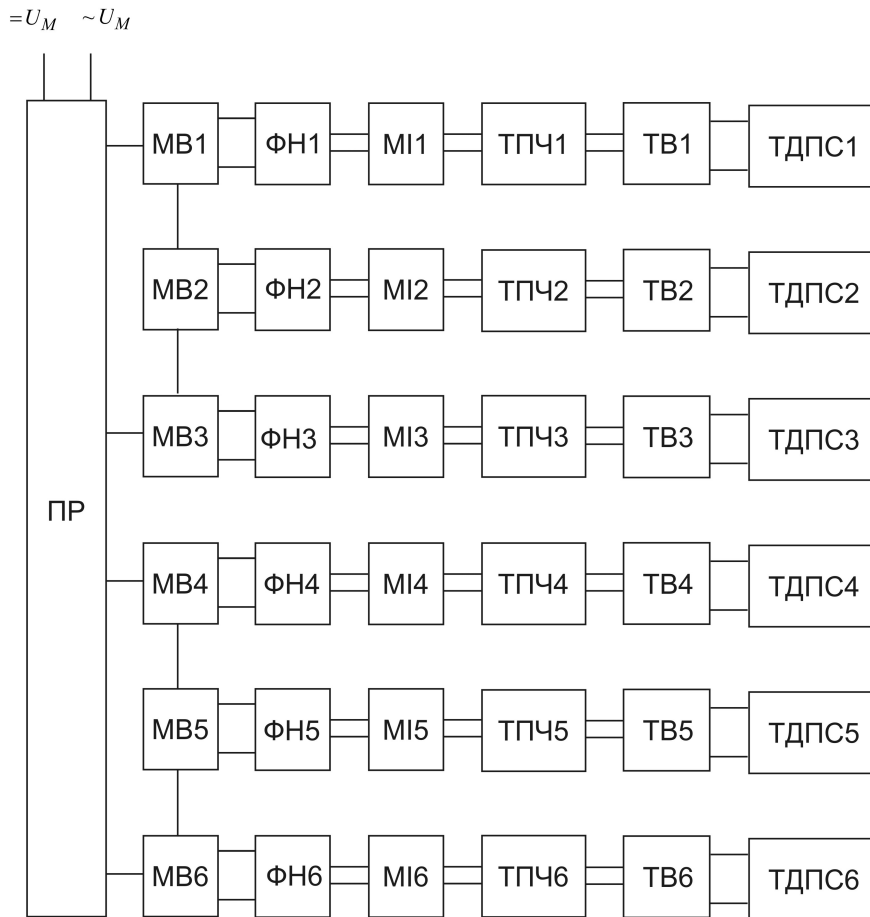


Рис. Б.42. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Ф-2м3а.

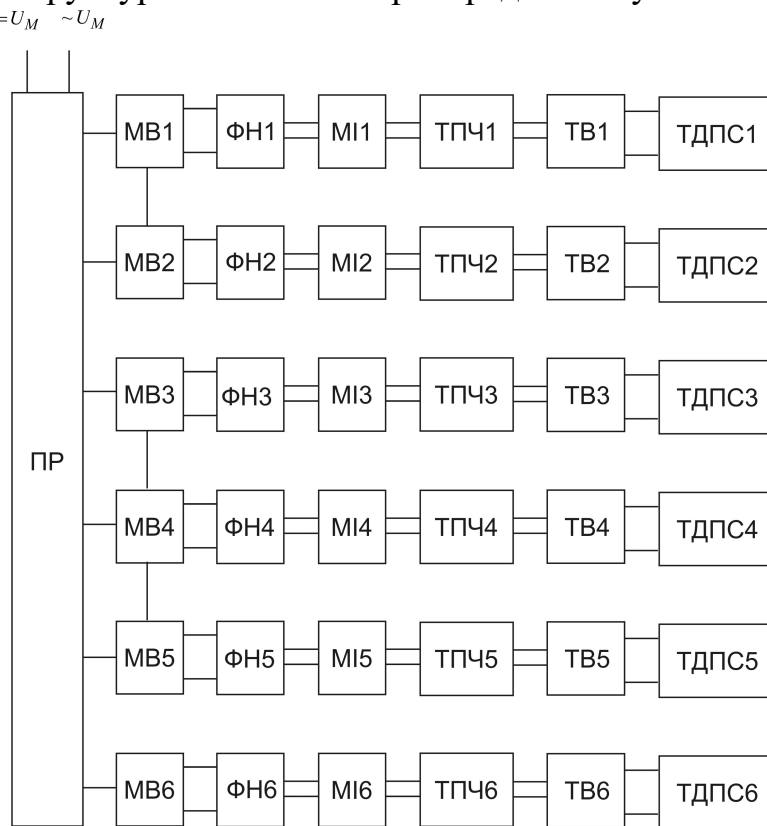


Рис. Б.43. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Ф-3м2а.

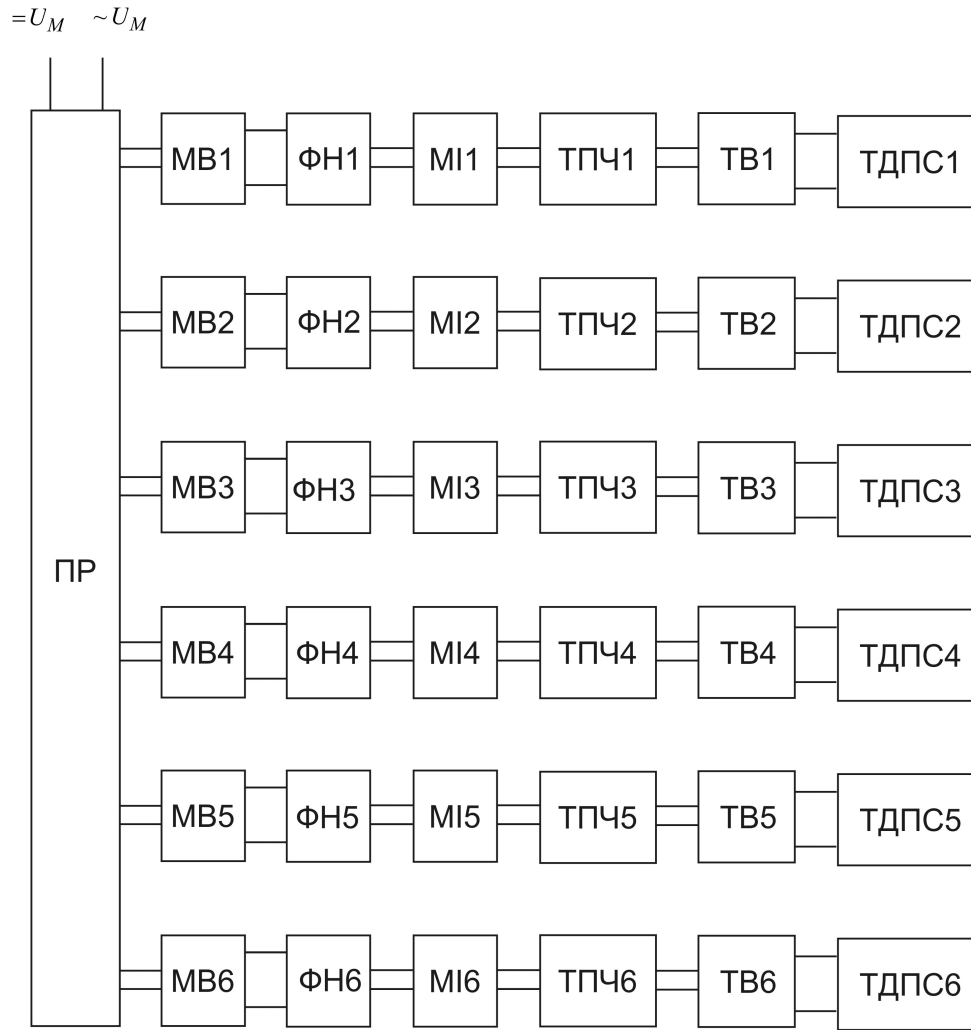


Рис. Б.44. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Ф-6м1а

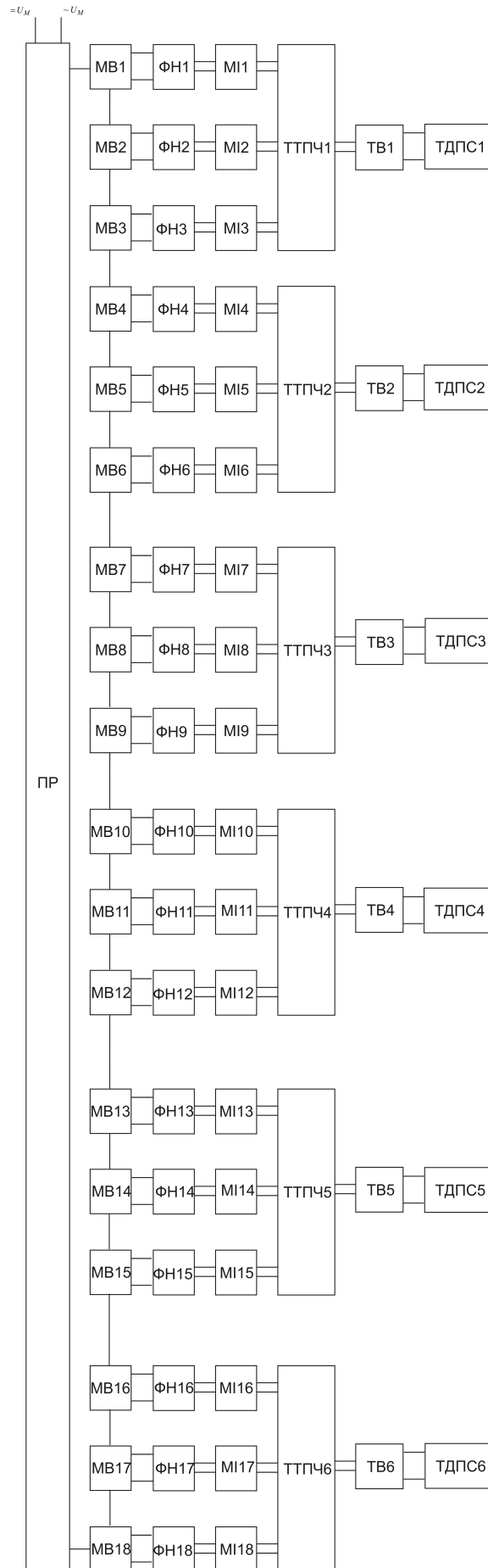


Рис. Б.45. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-1м18а

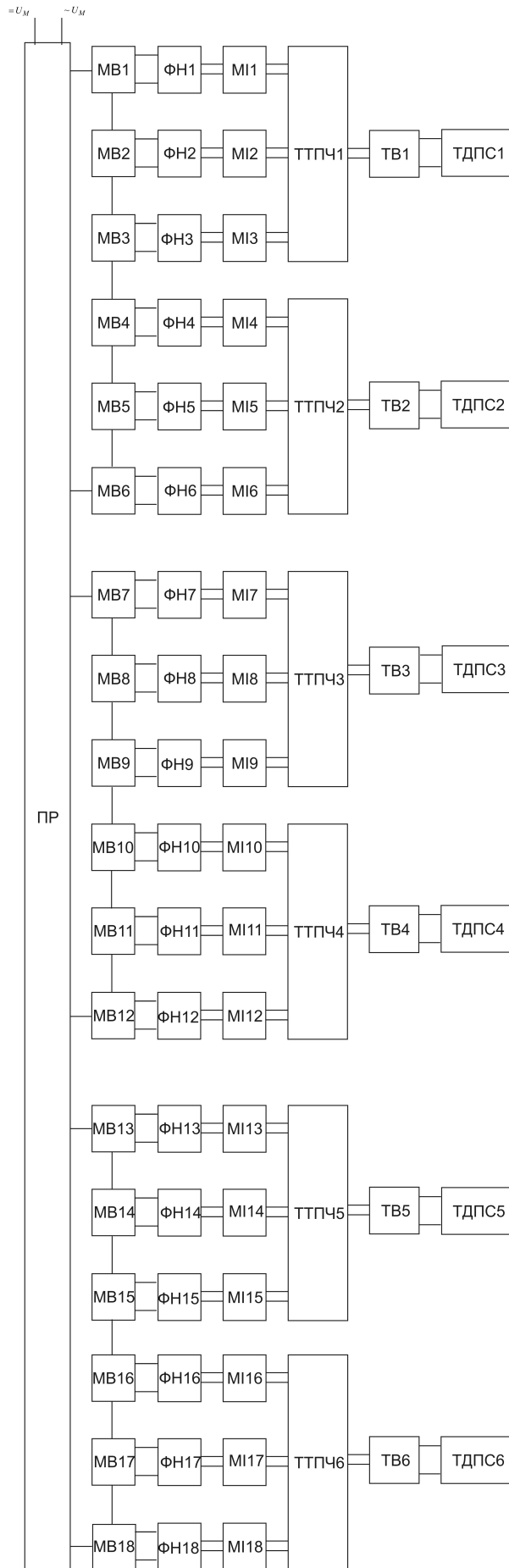


Рис. Б.46. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-3мба

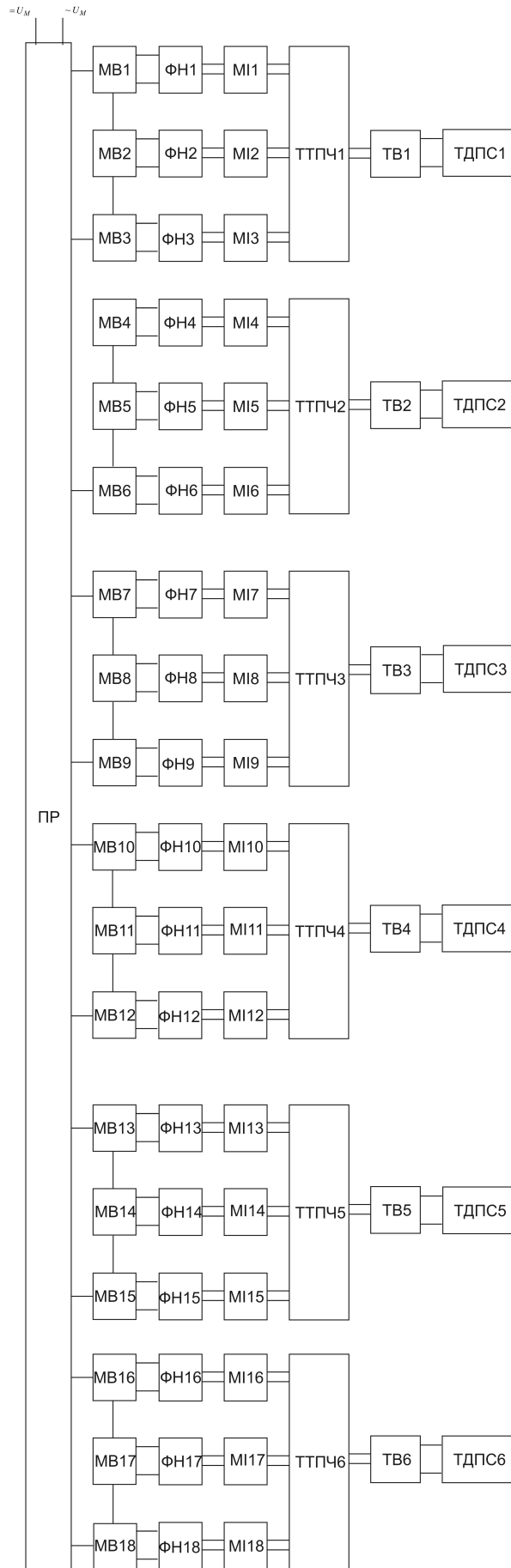


Рис. Б.47. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-6м3а

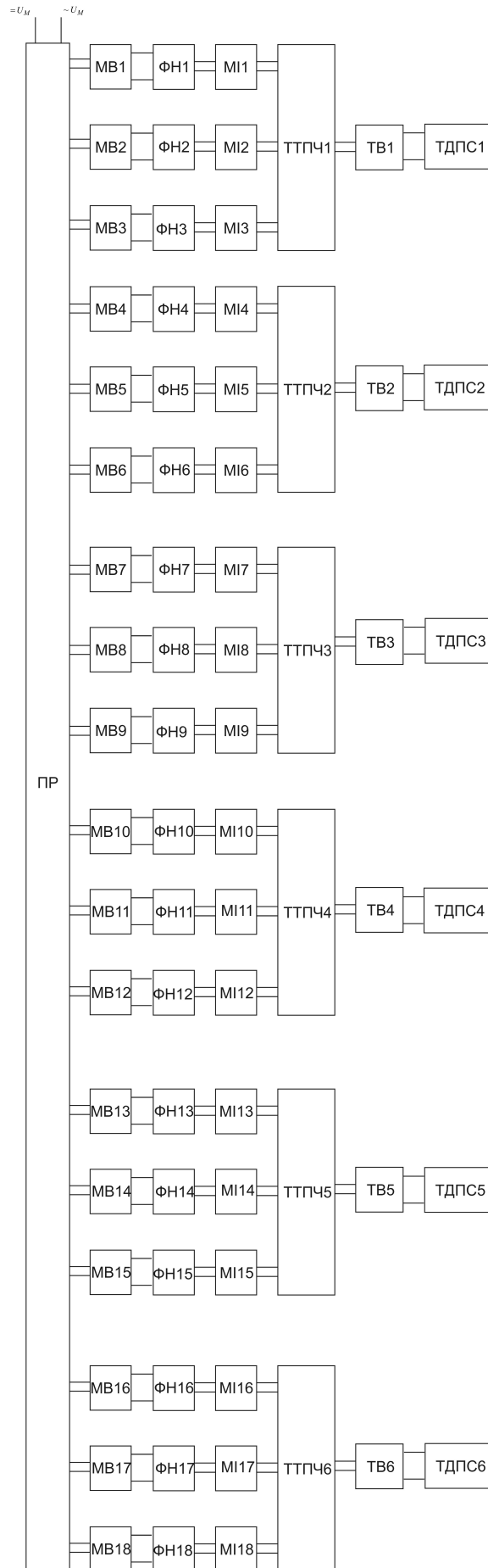


Рис. Б.48. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Φ-18м1а

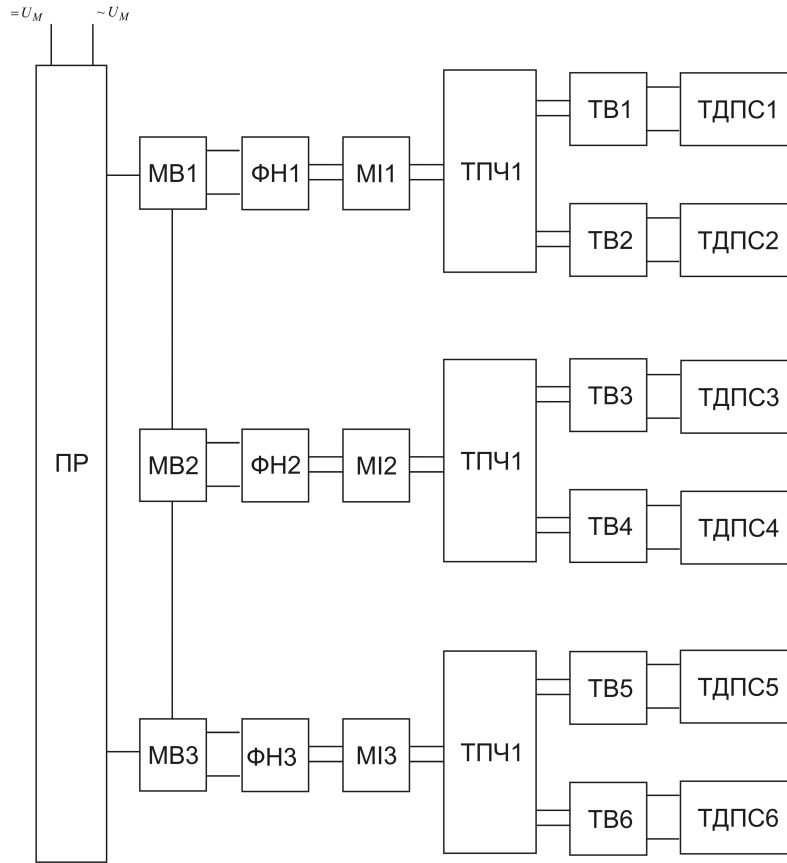


Рис. Б.49. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М2-1Φ-1м3а.

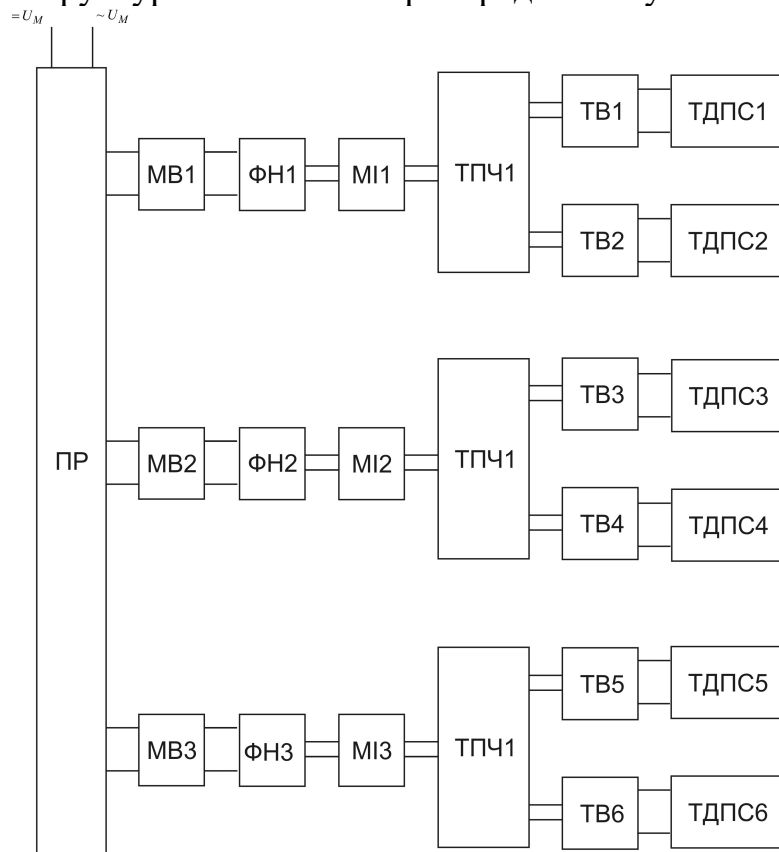


Рис. Б.50. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М2-1Φ-3м1а.

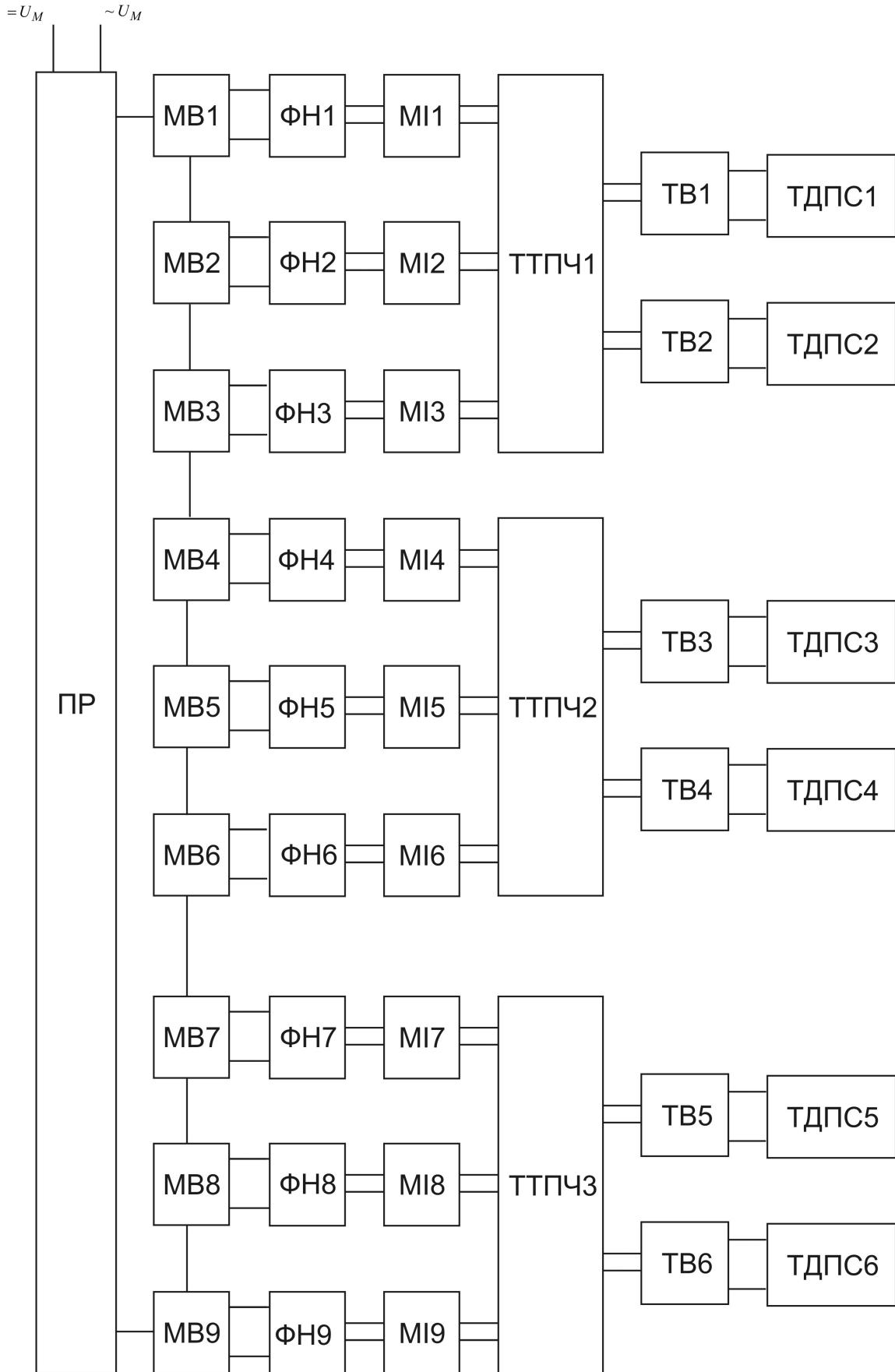


Рис. Б.51. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М2-3Ф-1м9а.

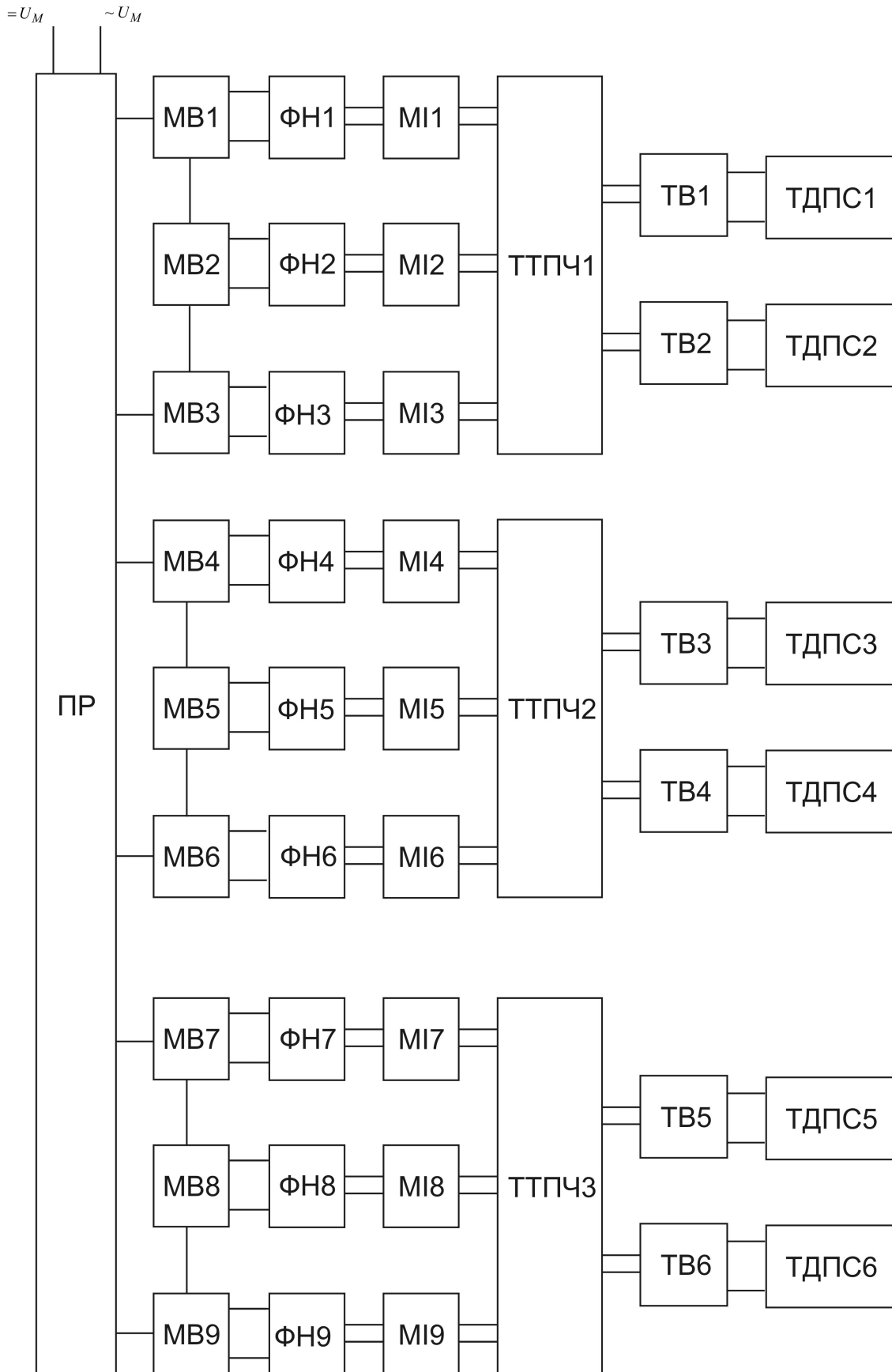


Рис. Б.52. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М2-3Φ-3М3а.

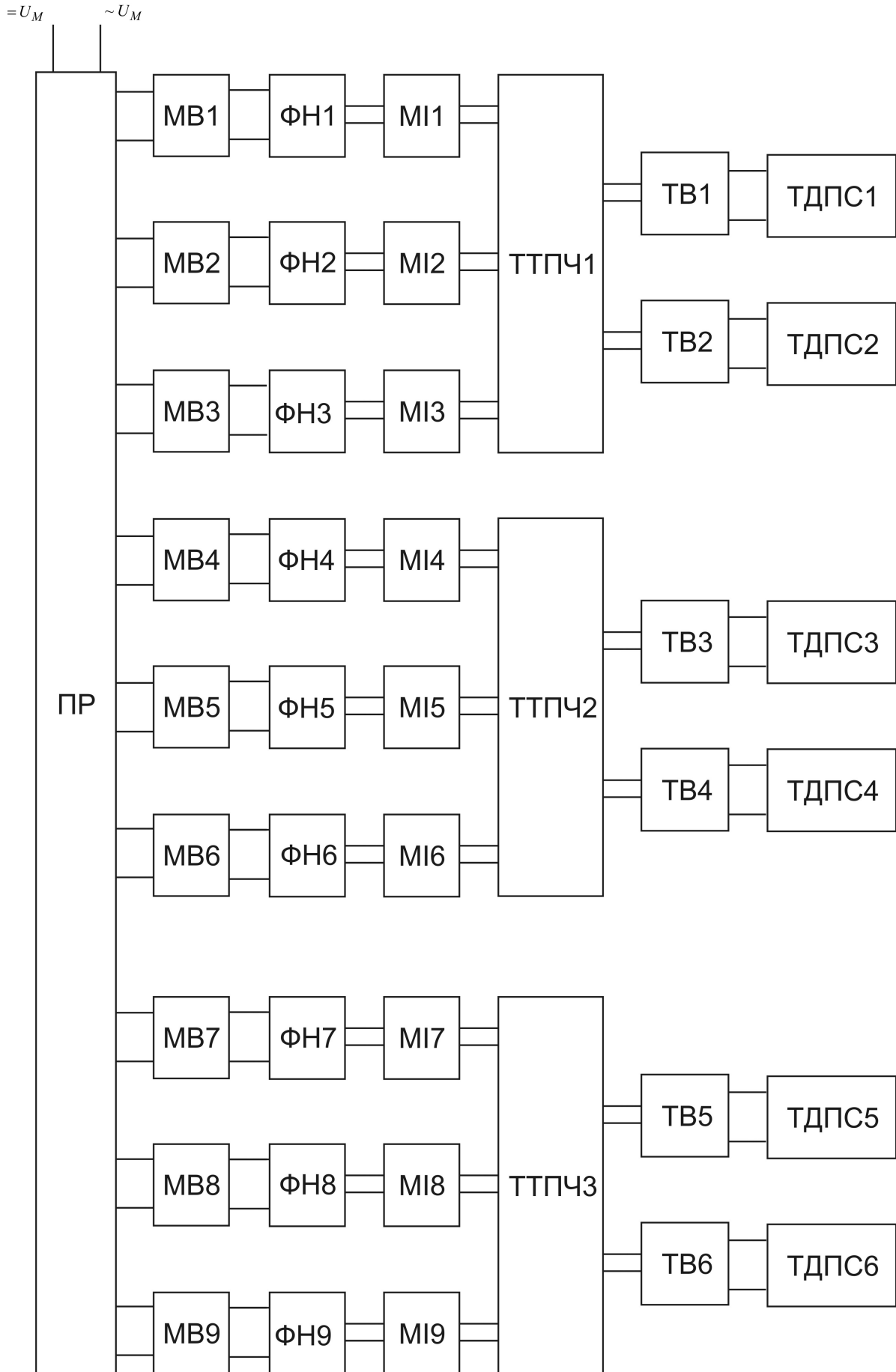


Рис. Б.53. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М2-3Φ-9м1а.

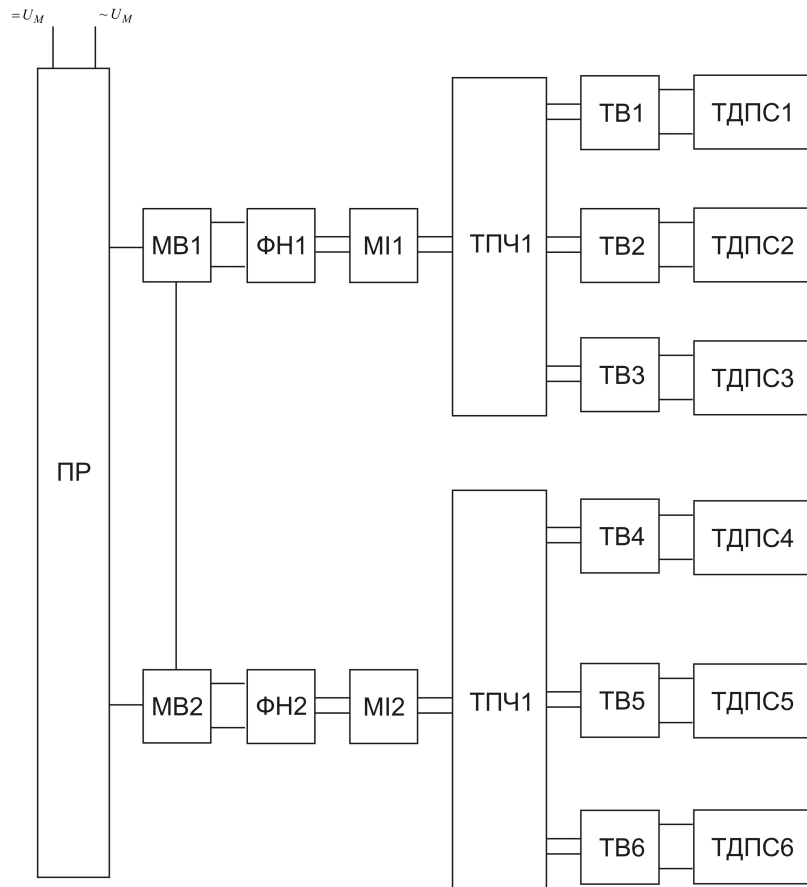


Рис. Б.54. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М3-1Φ-1м2а.

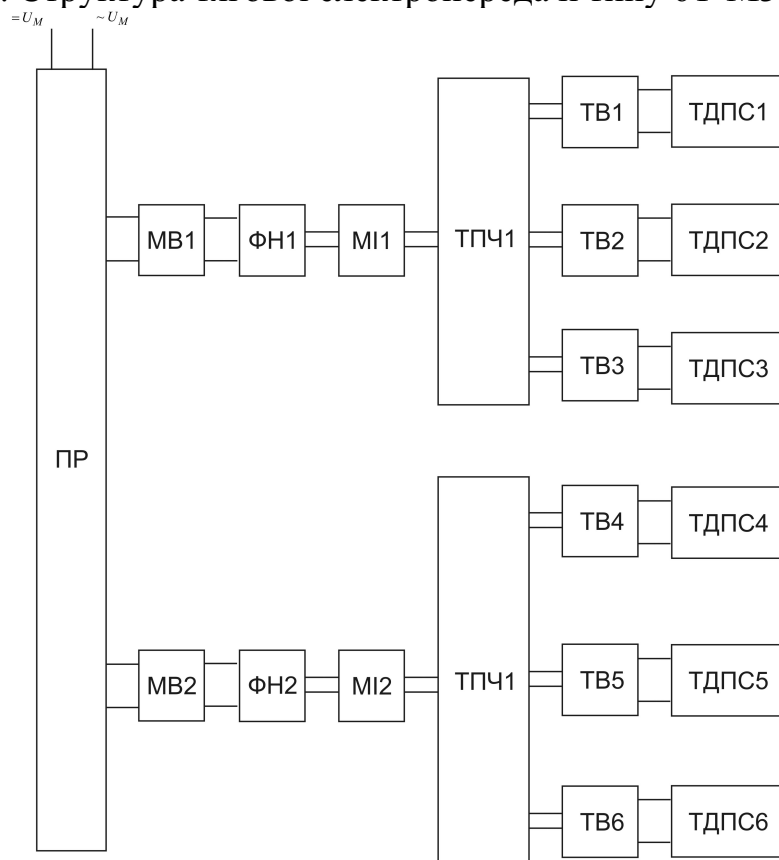


Рис. Б.55. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М3-1Φ-2м1а.

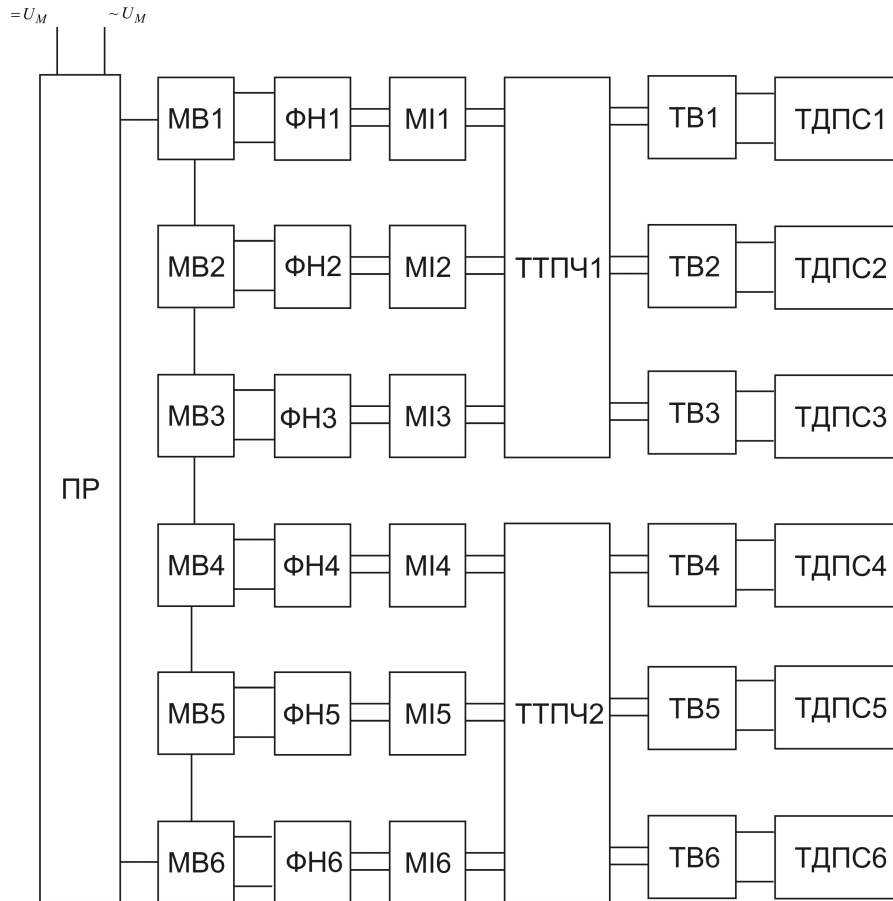


Рис. Б.56. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М3-3Φ-1мба.

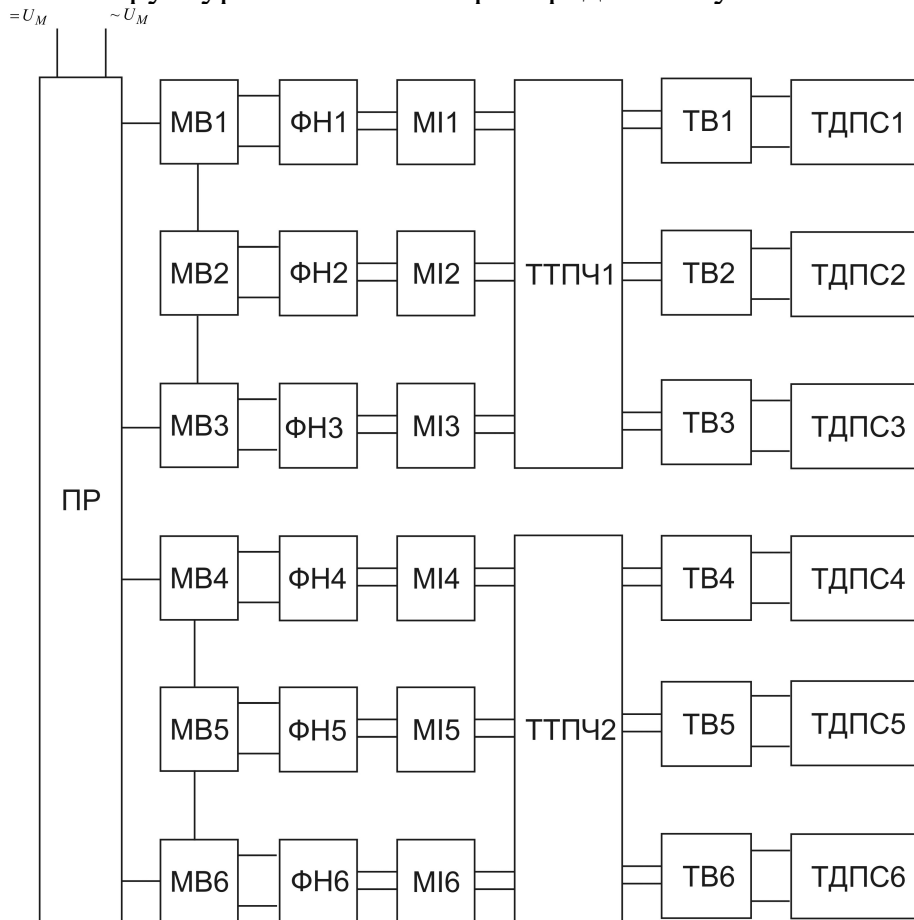


Рис. Б.57. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М3-3Φ-2м3а.

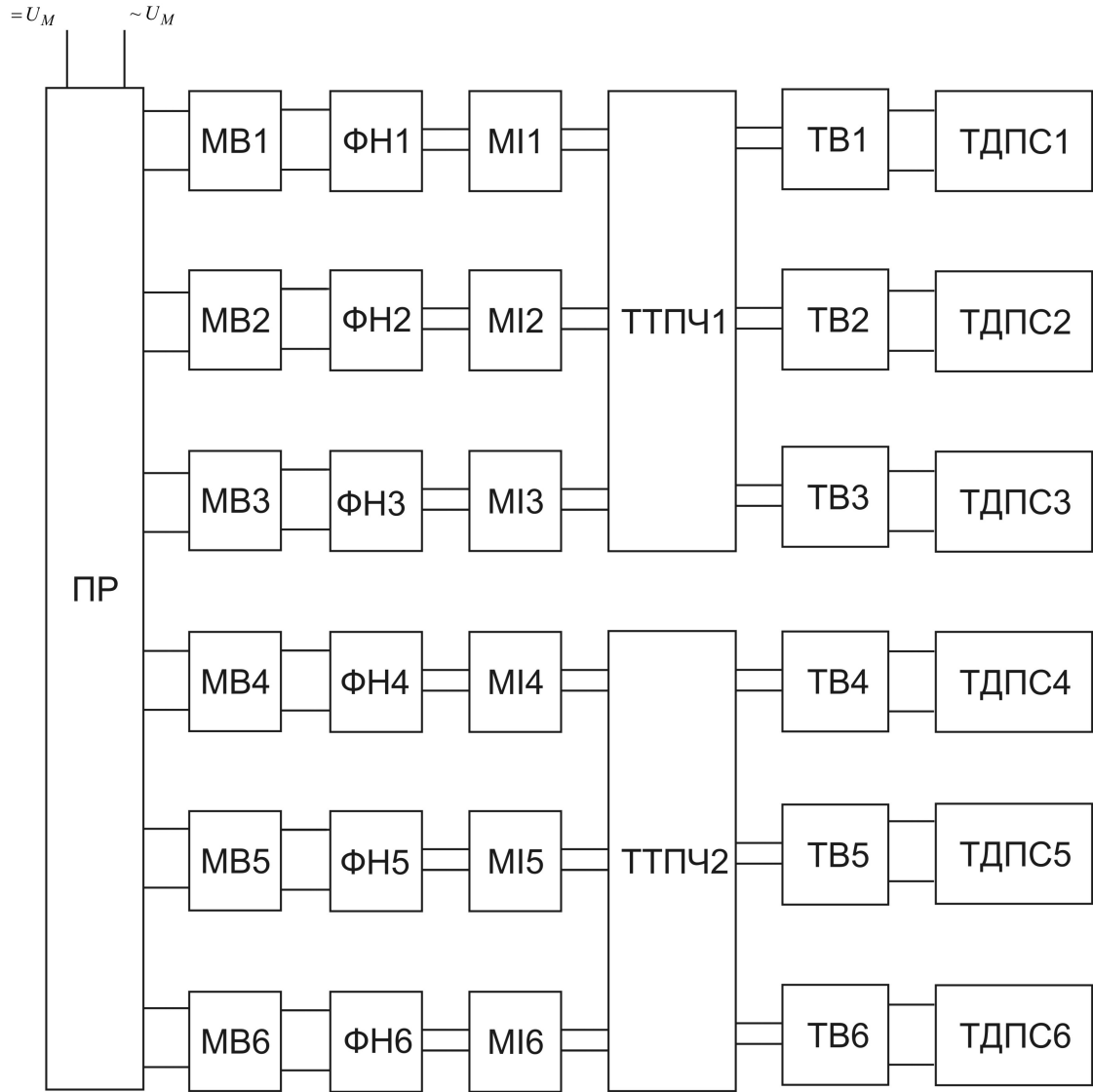


Рис. Б.58. Структура тягової електропередачі типу 6Т-М3-3Φ-6м1а.

ДОДАТОК В

Схеми для дослідження структурної надійності запропонованих перетворювальних структур

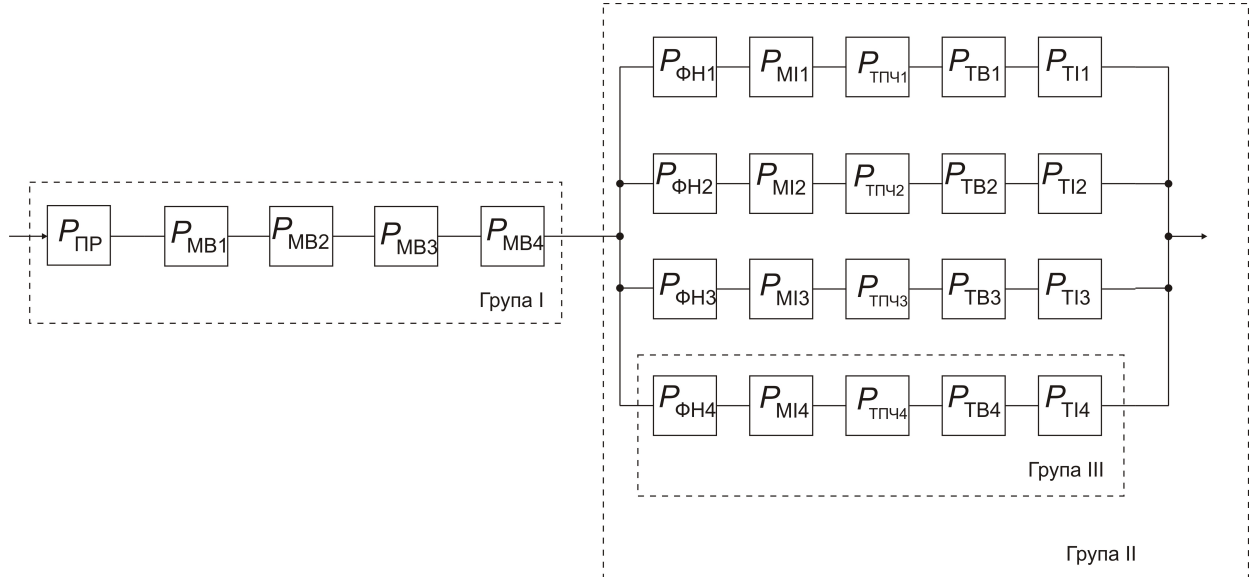


Рис. В.1. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М1-1Φ-1М4а.

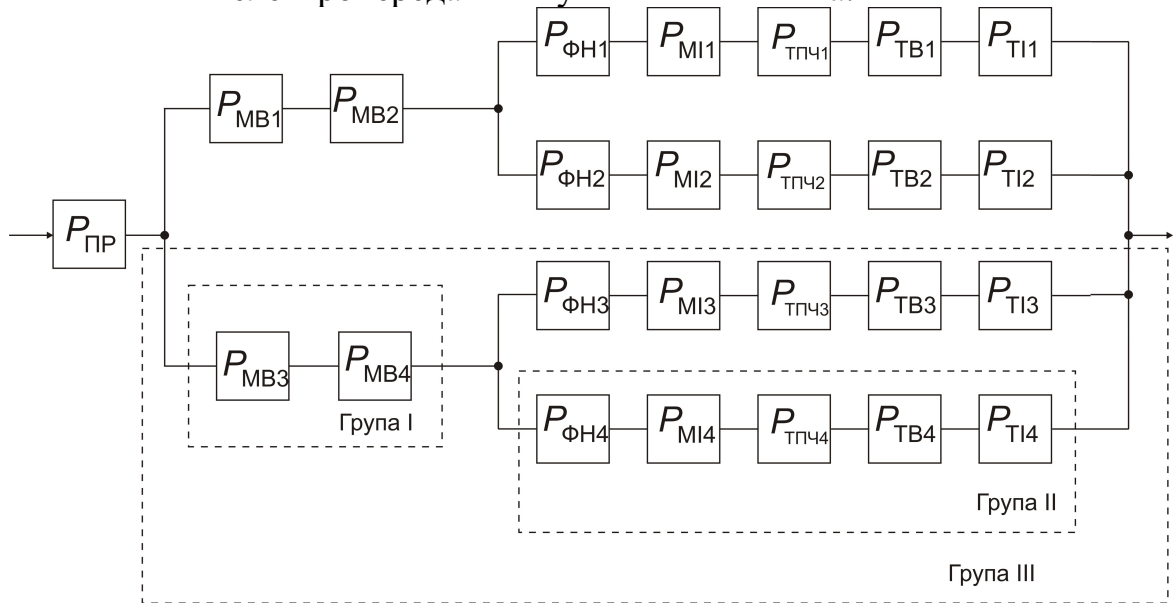


Рис. В.2. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М1-1Φ-2М2а.

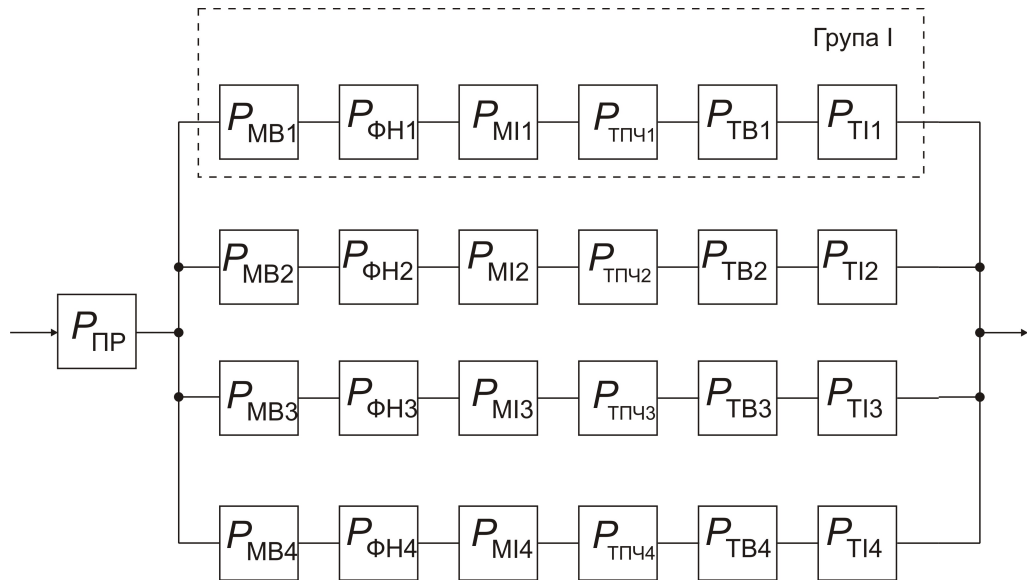


Рис. В.3. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М1-1Φ-4м1а.

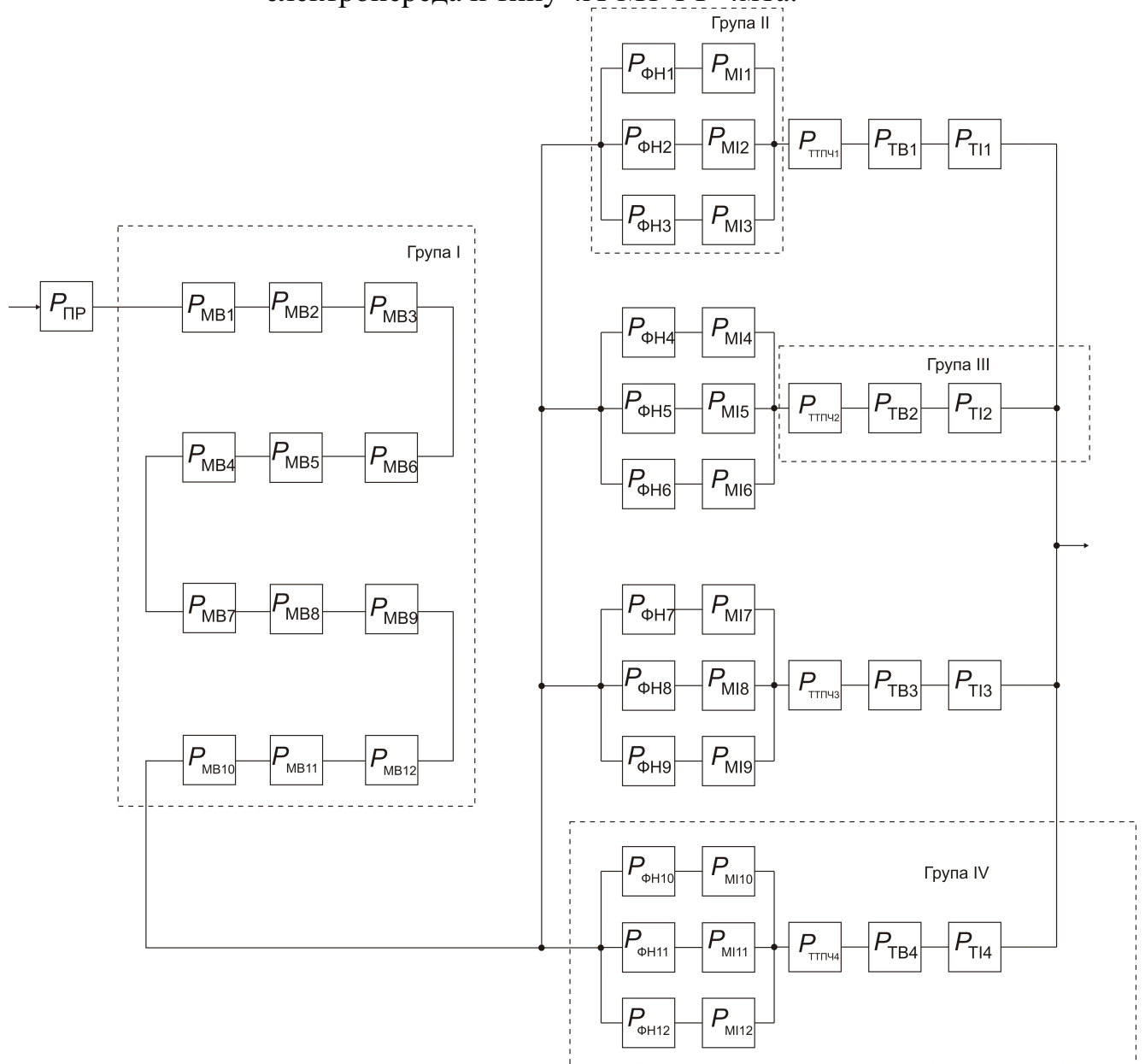


Рис. В.4. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М1-3Φ-1м12а.

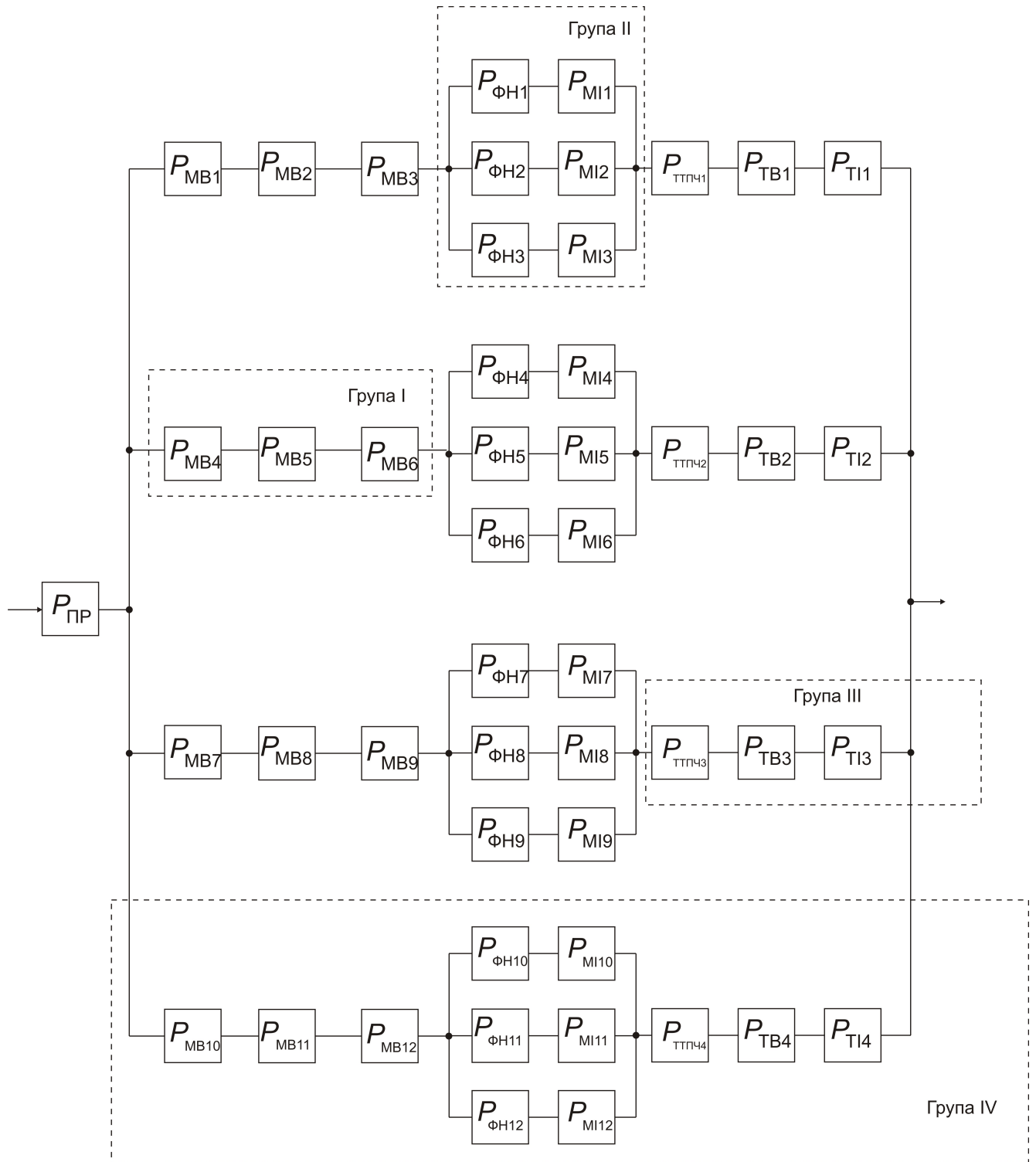


Рис. В.5. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М1-3Ф-4м3а.

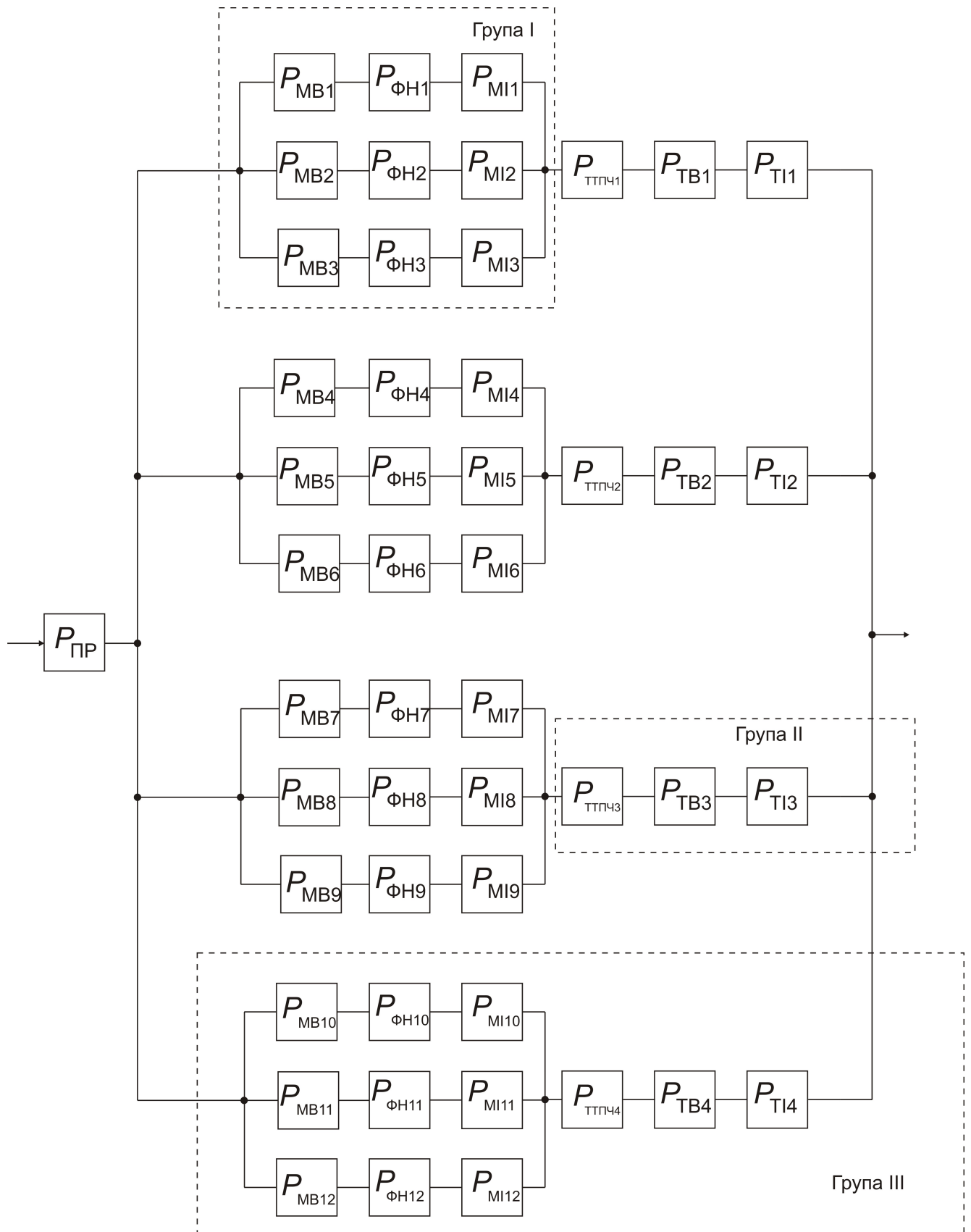


Рис. В.6. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М1-3Ф-12м1а.

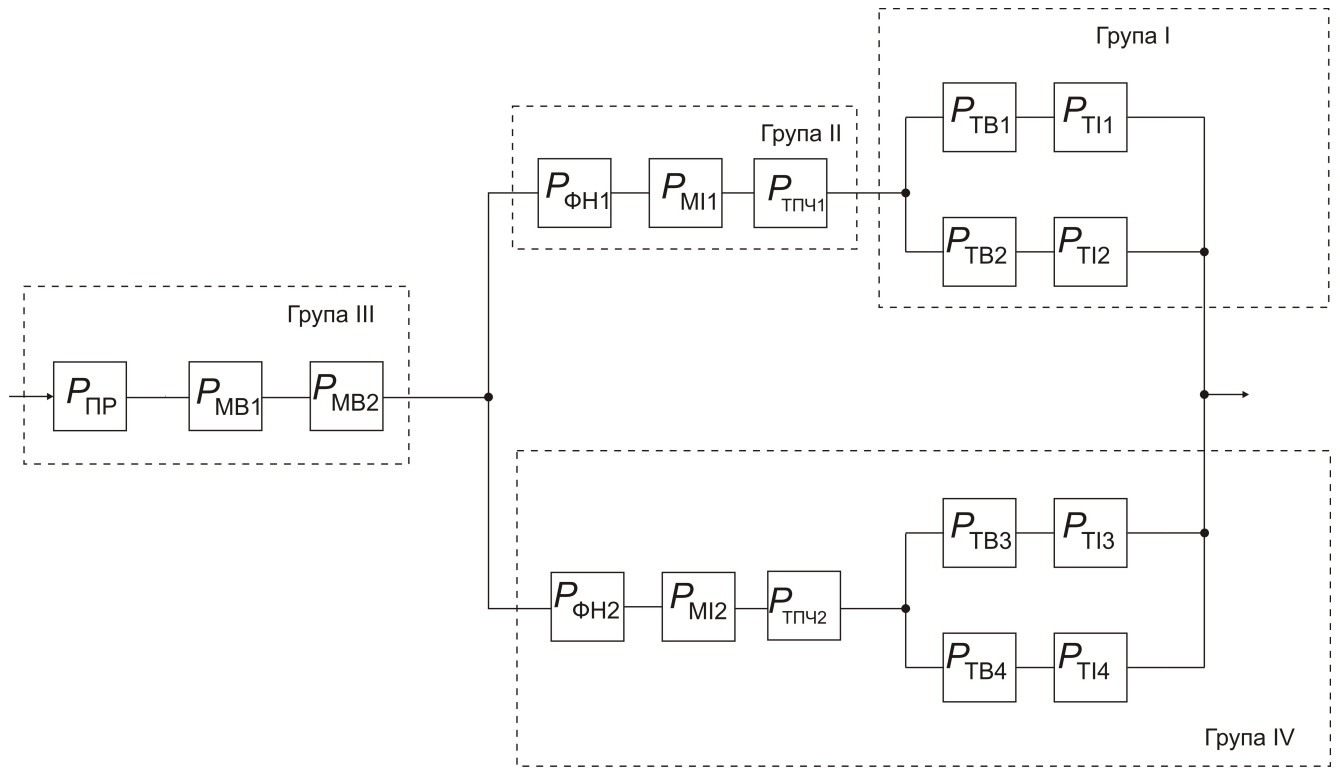


Рис. В.7. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М2-1Ф-1м2а.

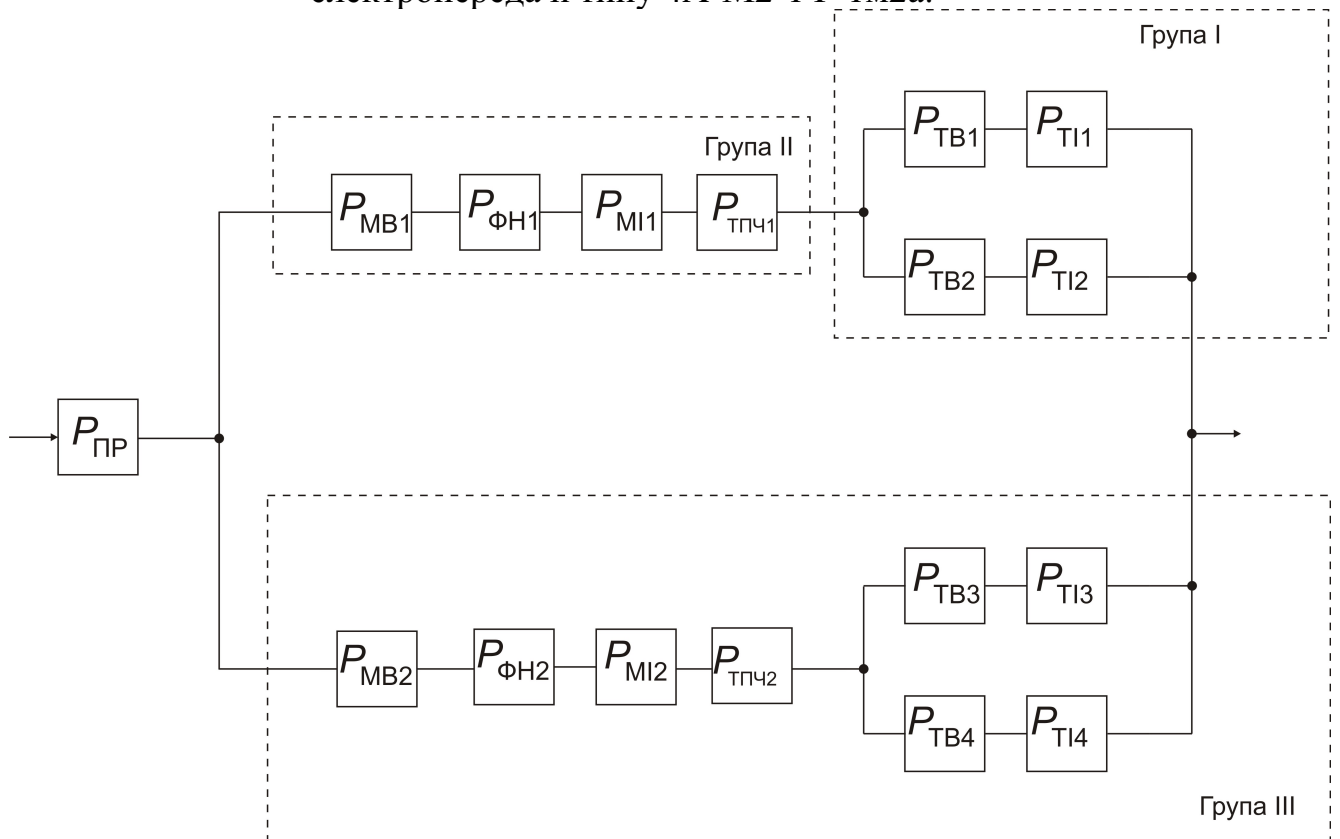


Рис. В.8. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М2-1Ф-2м1а.

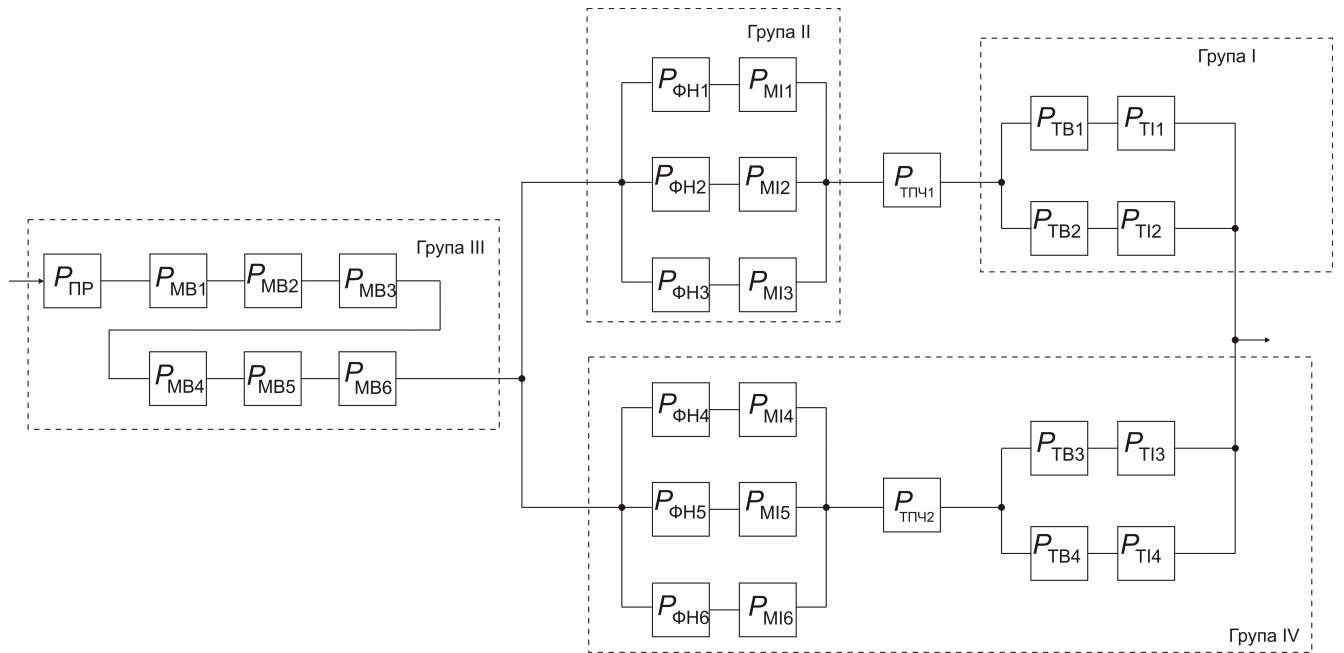


Рис. В.9. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М2-3Ф-1мба.

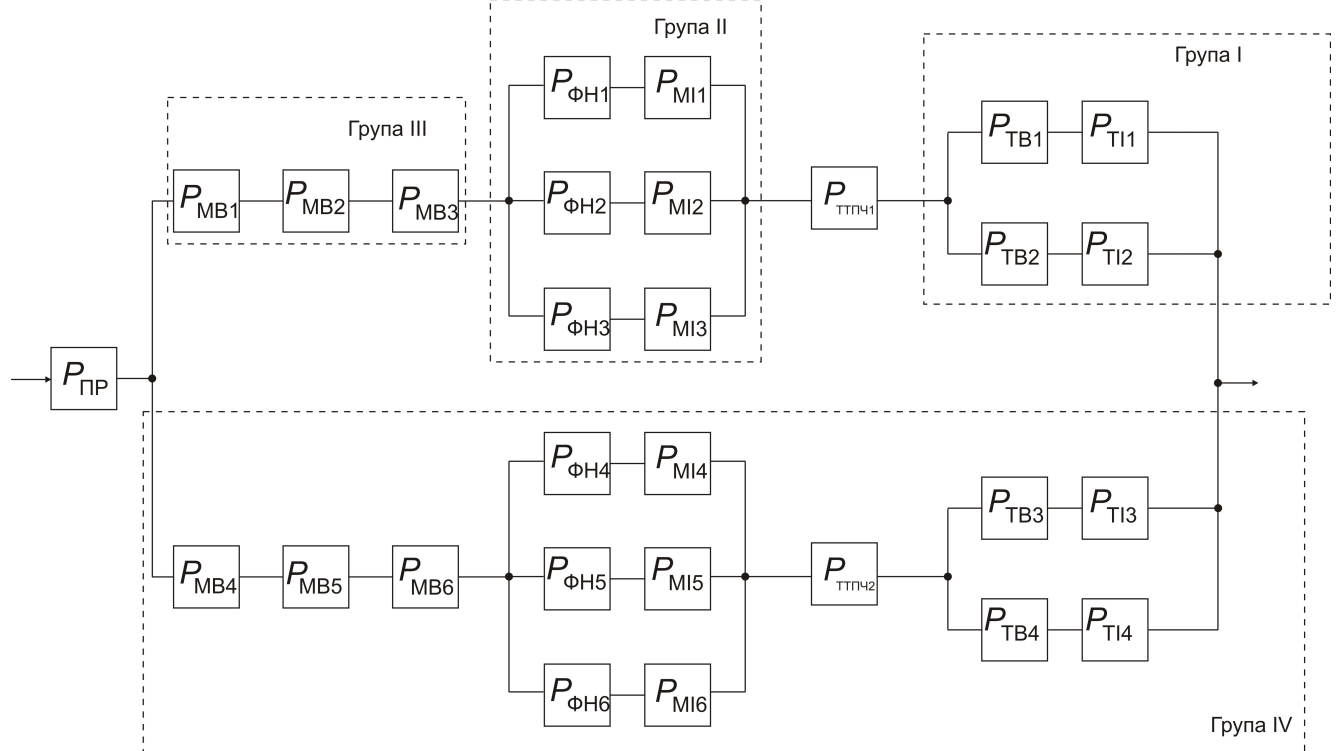


Рис. В.10. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М2-3Ф-2м3а.

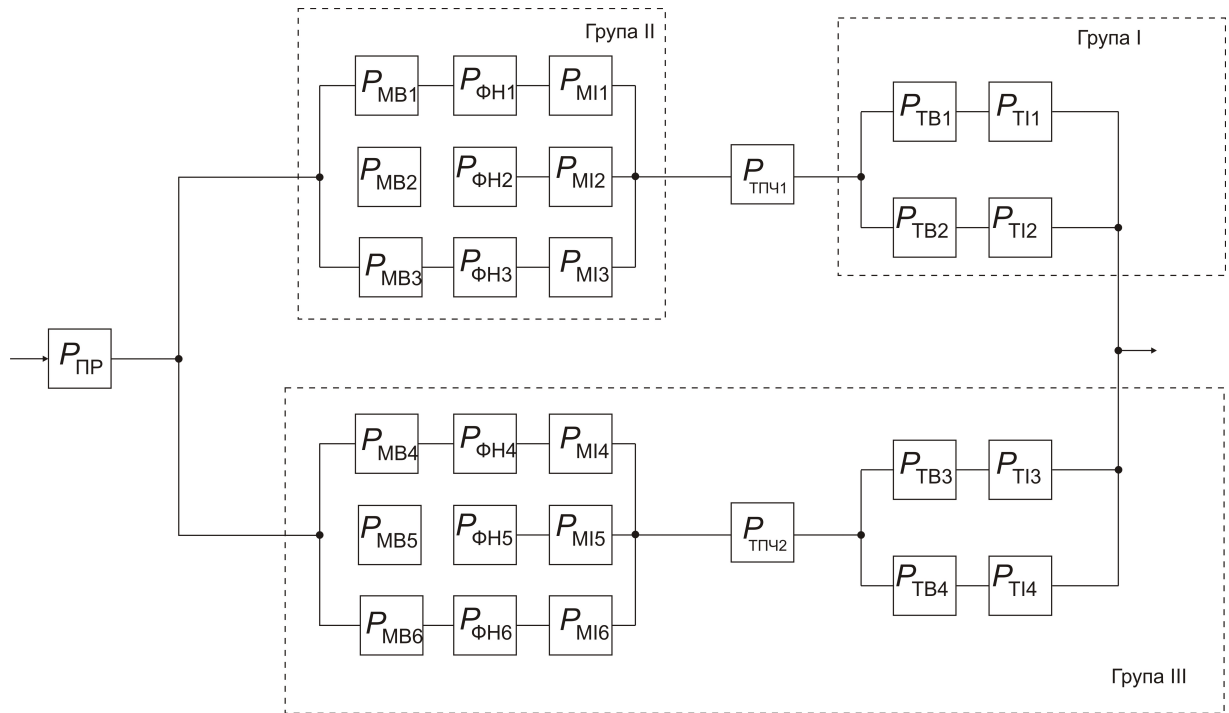


Рис. В.11. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4А-М2-3Ф-6м1а.

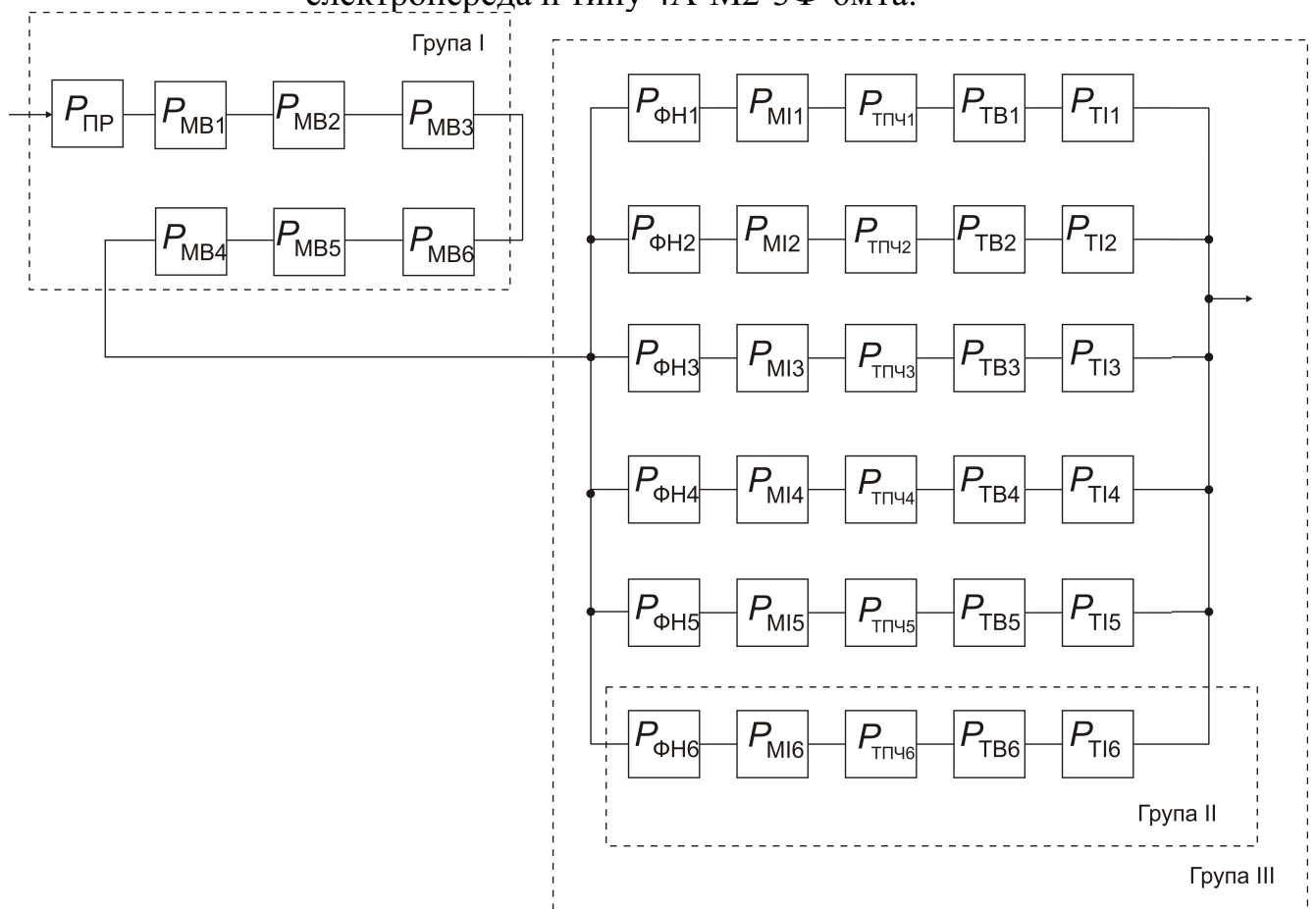


Рис. В.12. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-1Ф-1мба.

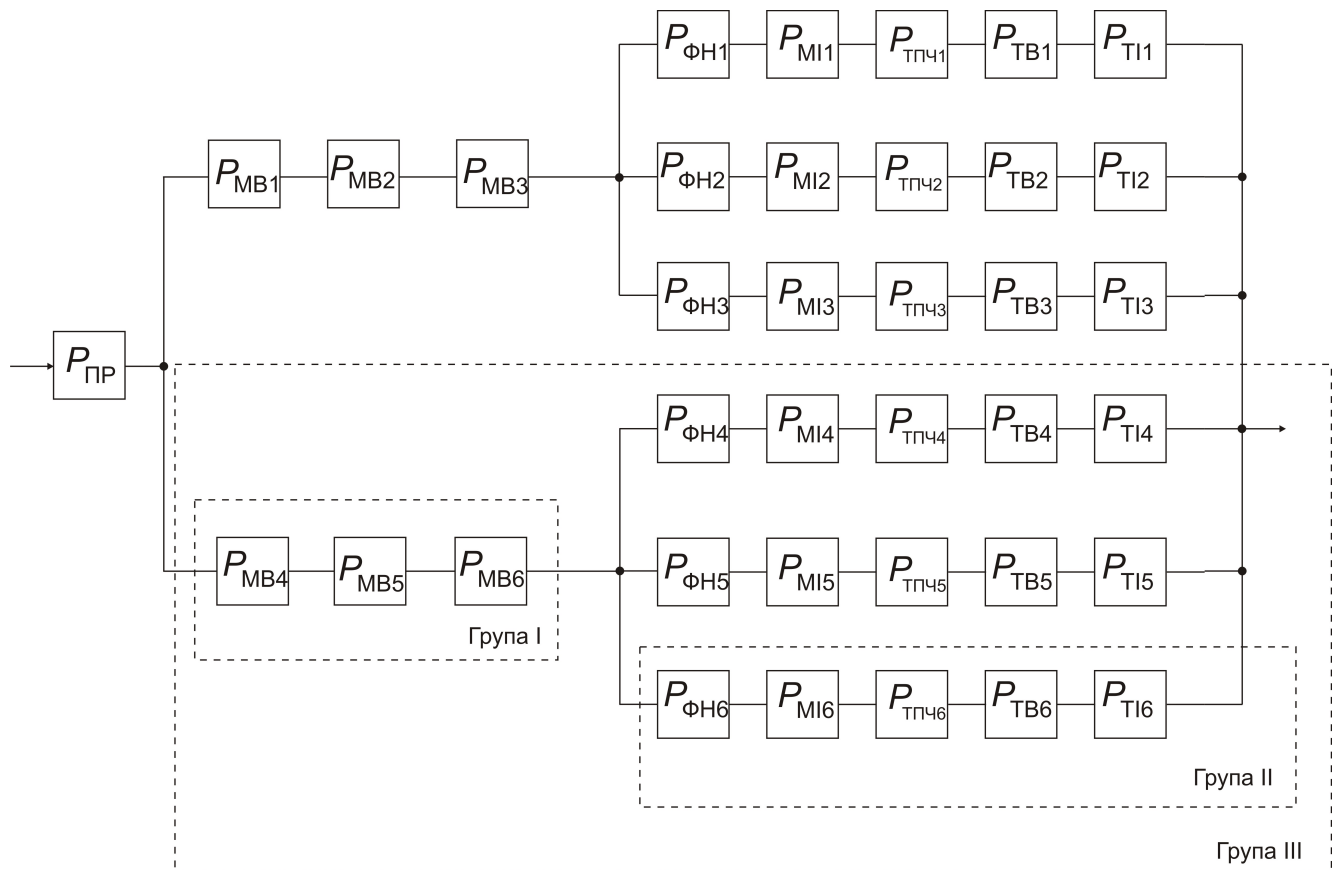


Рис. В.13. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-1Ф-2м3а.

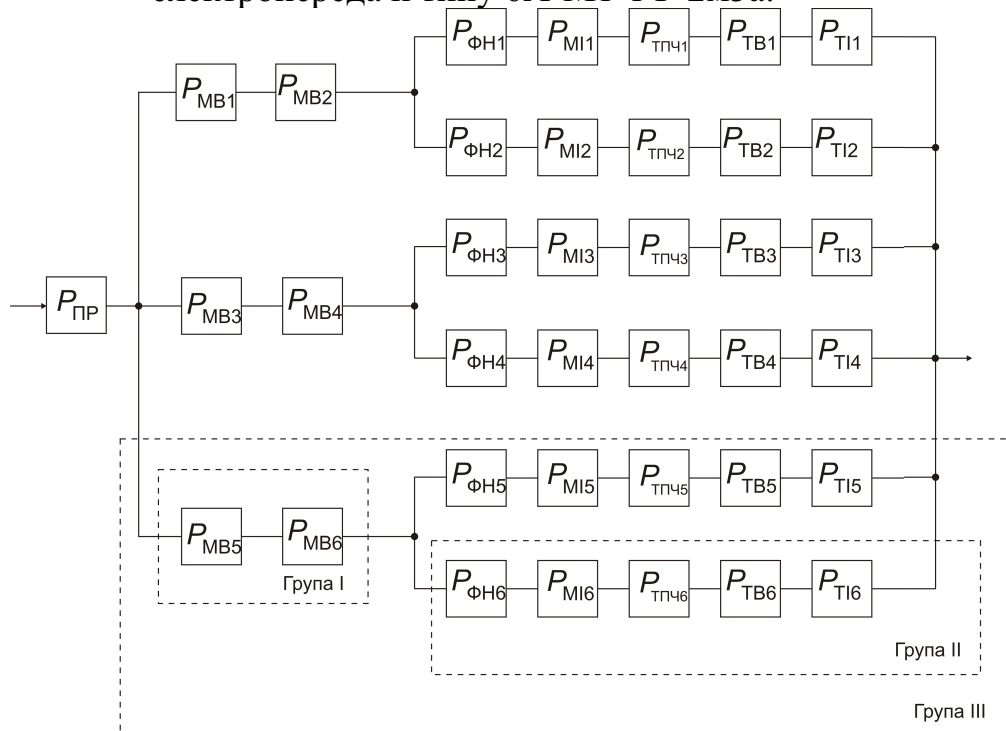


Рис. В.14. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-1Ф-3м2а.

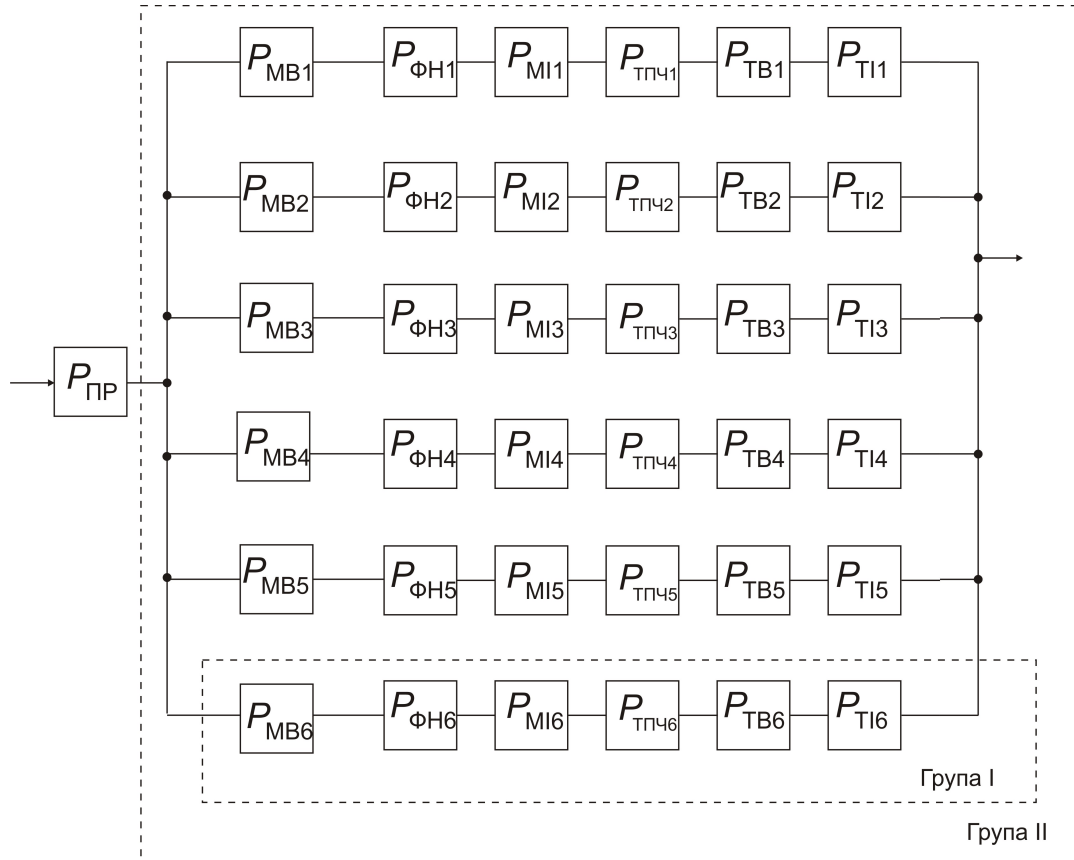


Рис. В.15. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-1Ф-6м1а

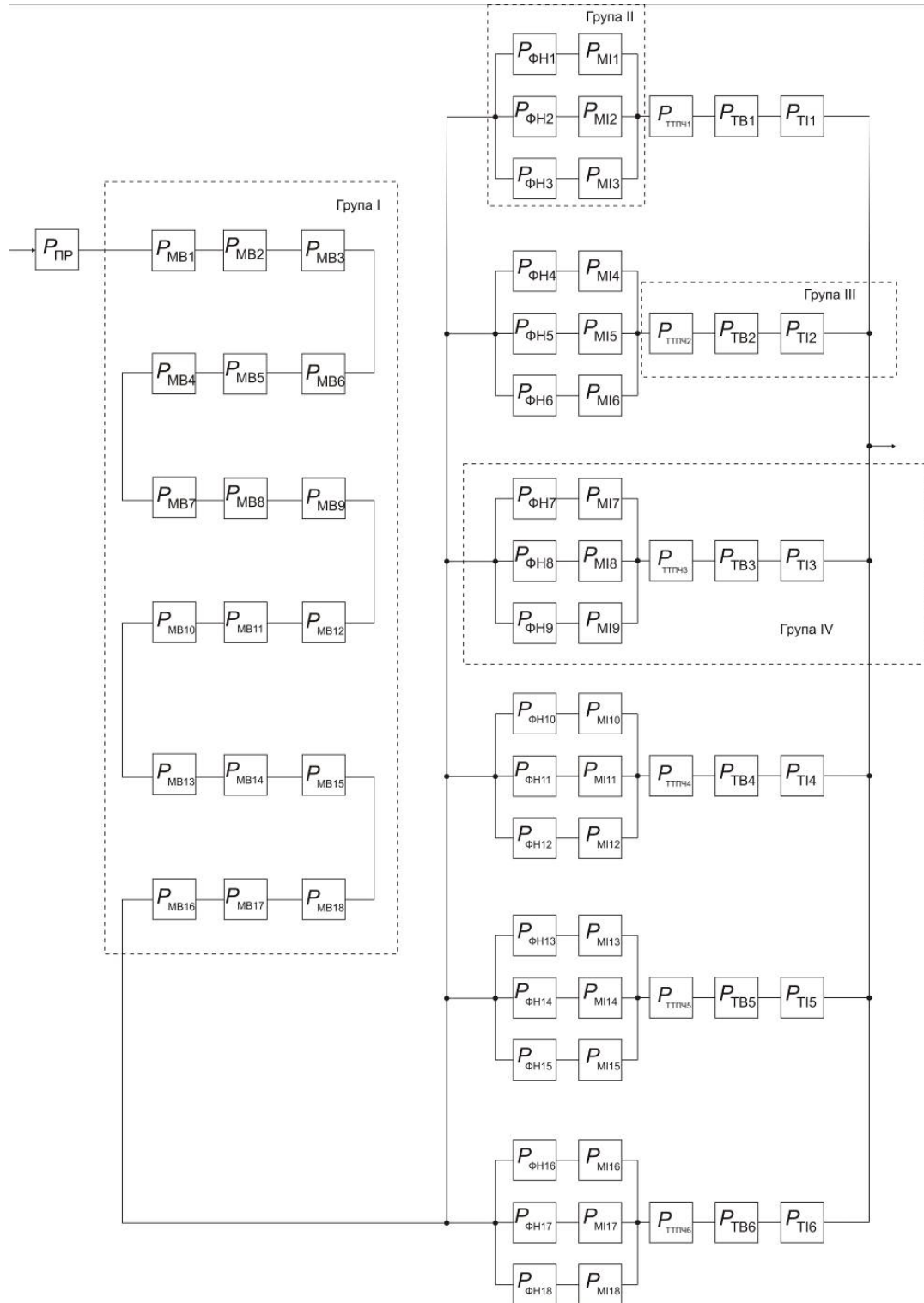


Рис. В.16. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-3Ф-1м18а

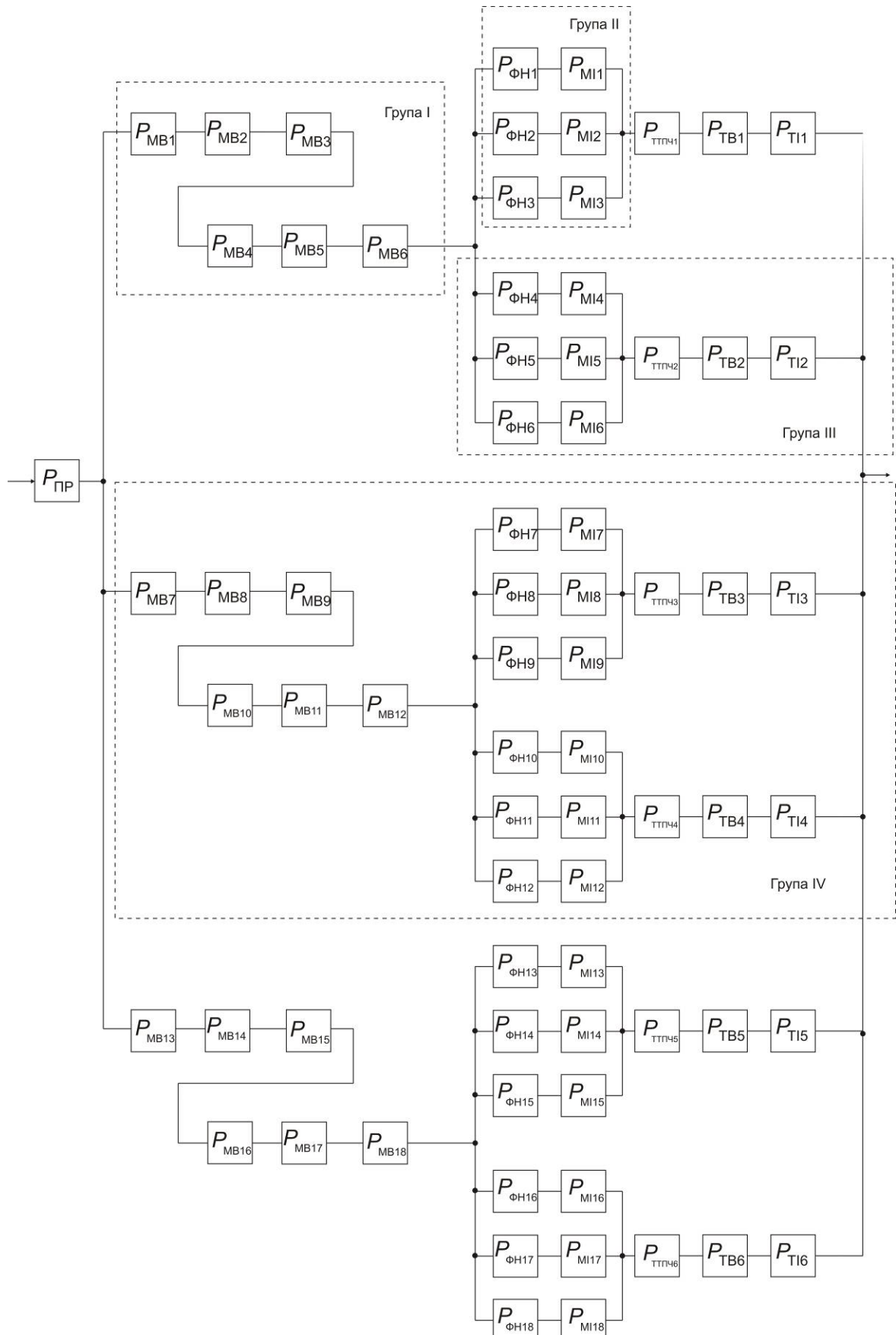


Рис. В.17. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-3Ф-3м6а

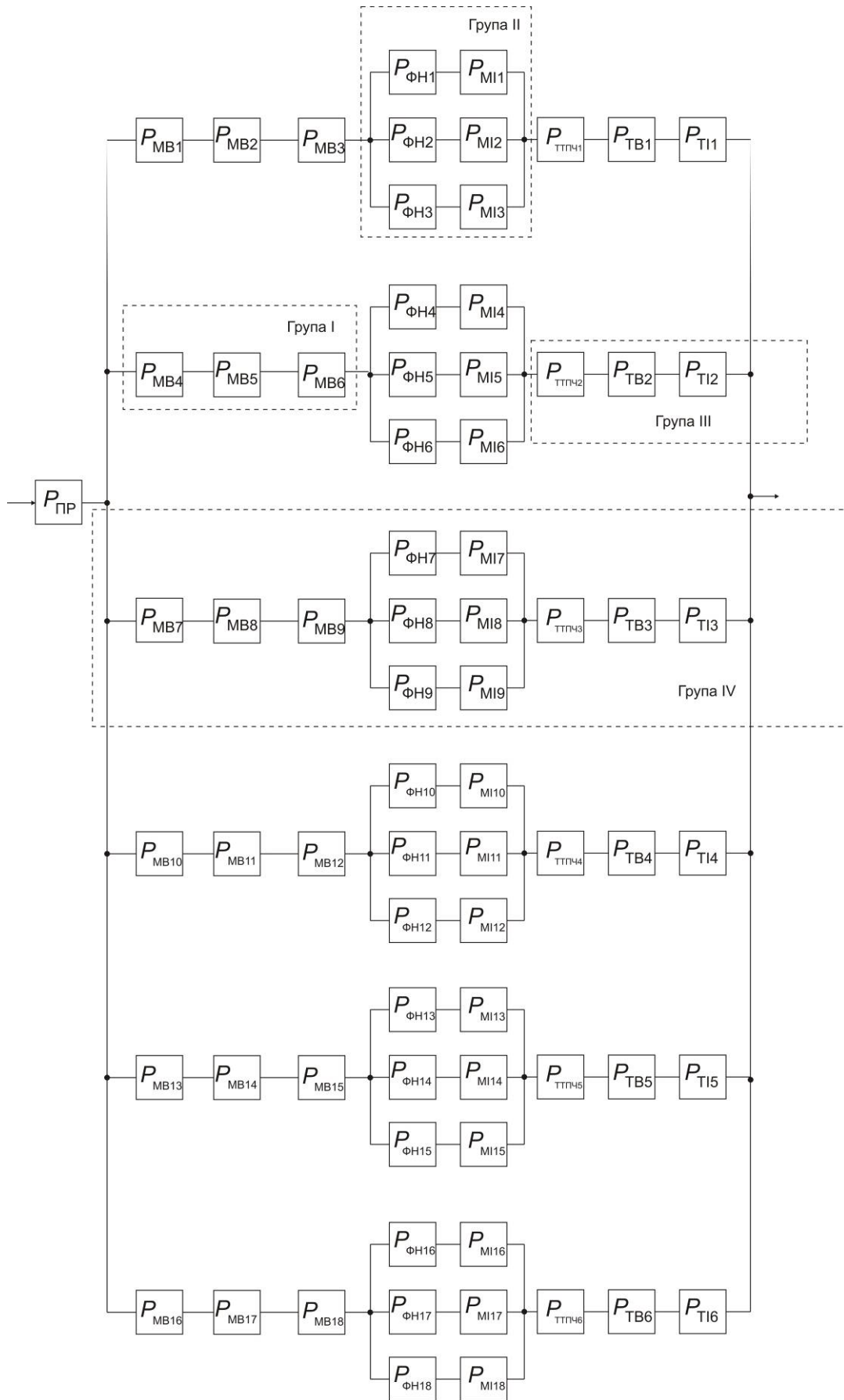


Рис. В.18. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-3Φ-6м3а

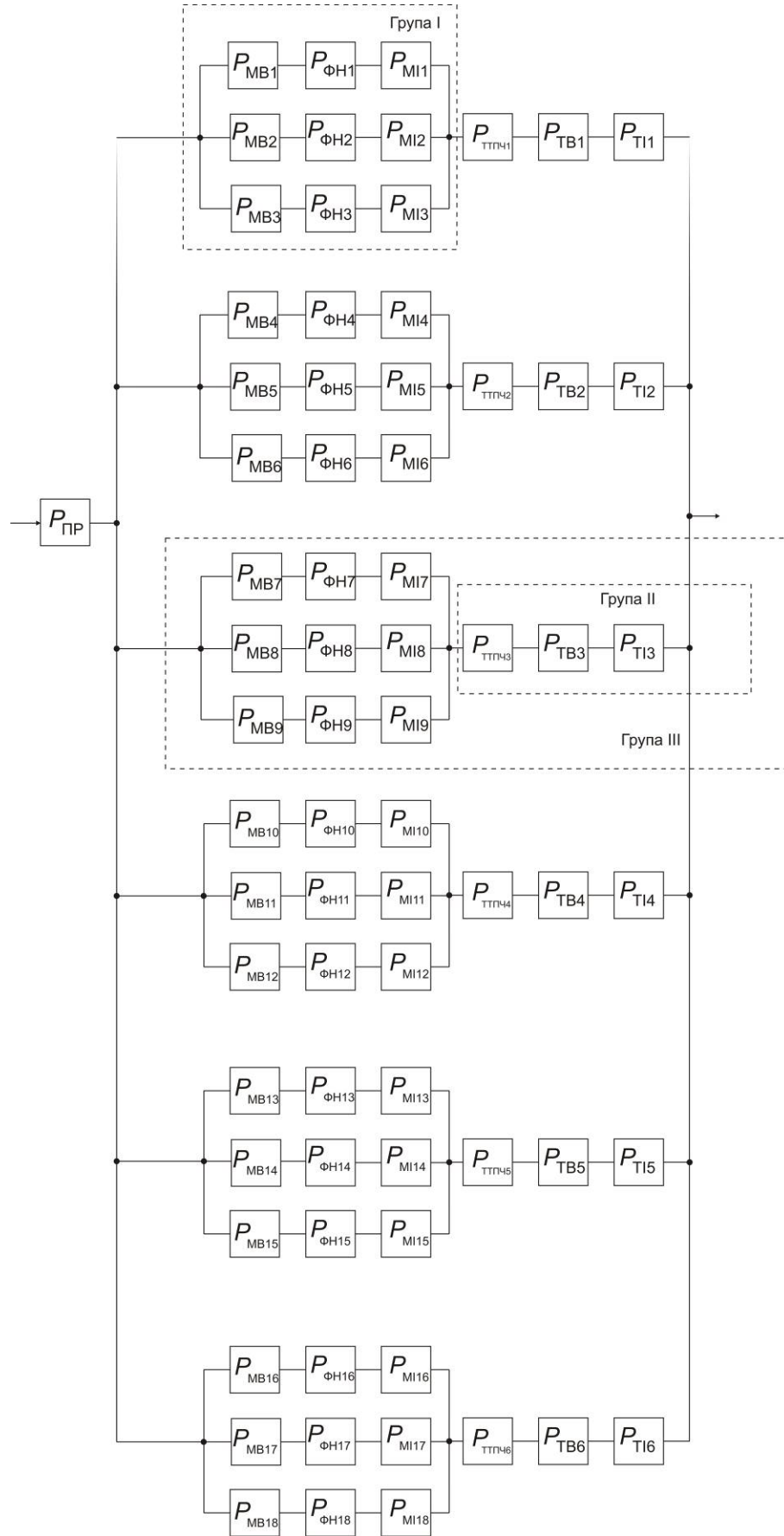


Рис. В.19. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М1-3Ф-18м1а

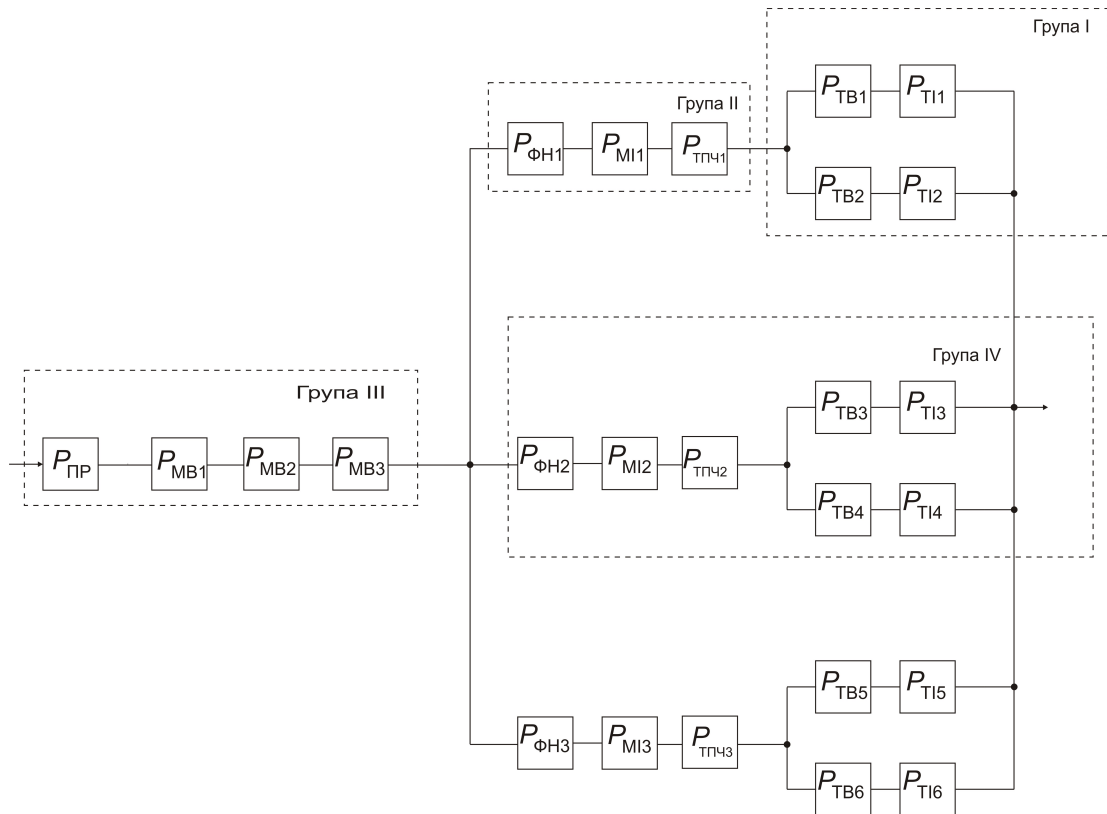


Рис. В.20. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М2-1Φ-1М3а.

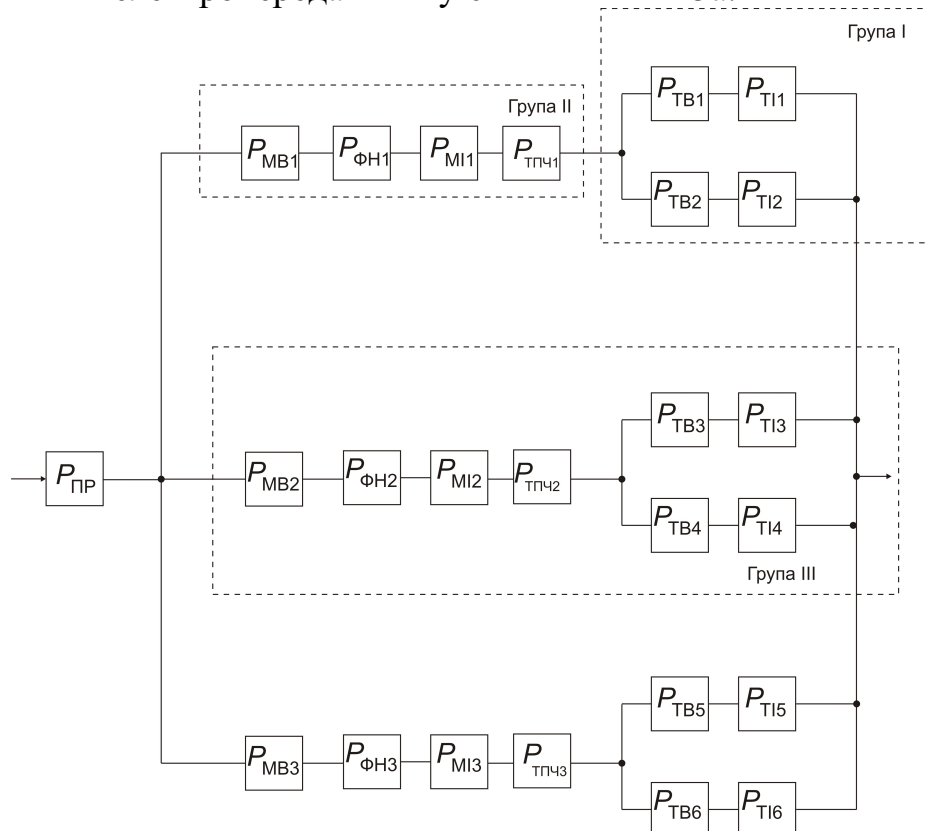


Рис. В.21. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М2-1Φ-3М1а.

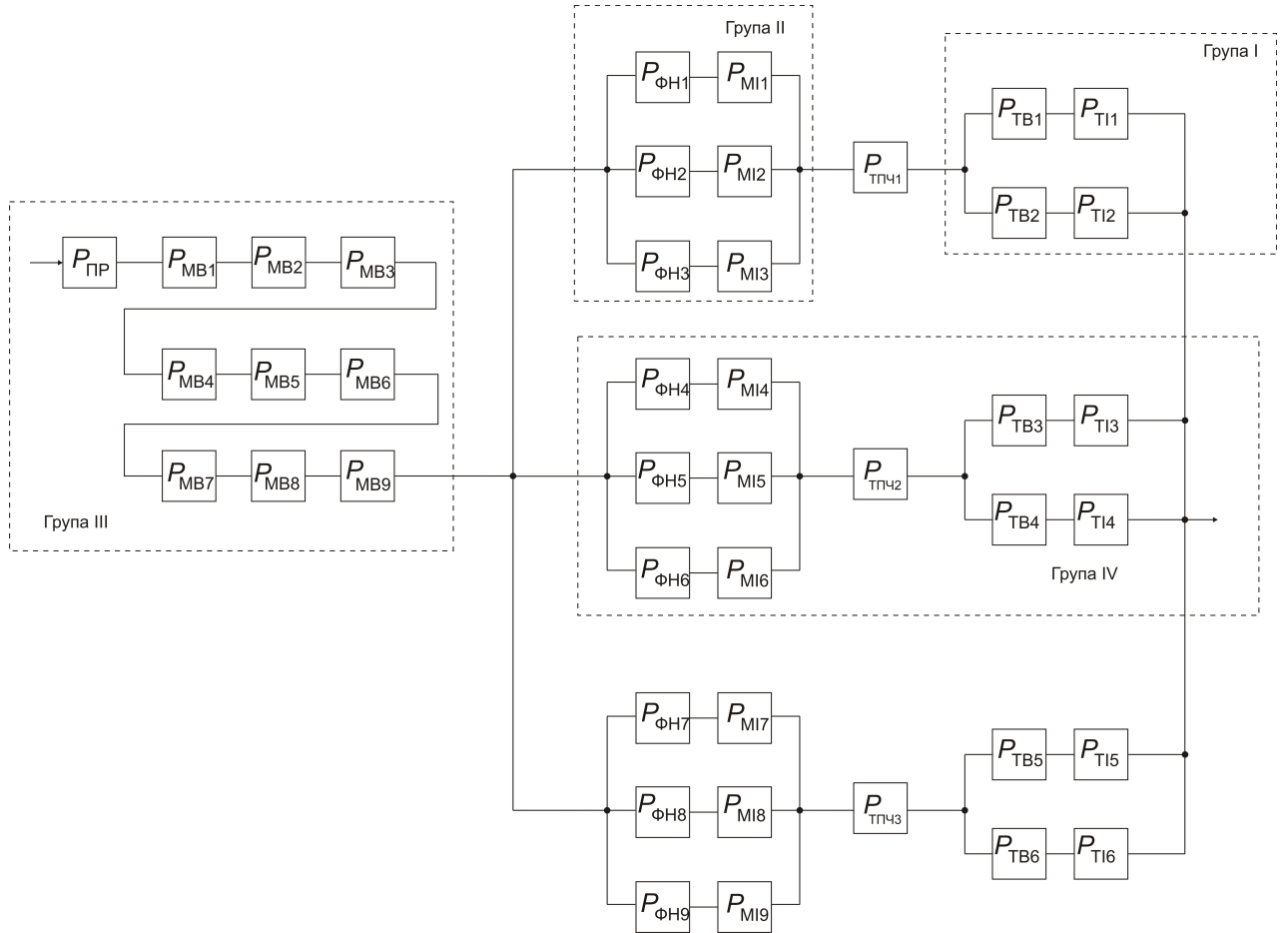


Рис. В.22. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М2-3Ф-1м9а.

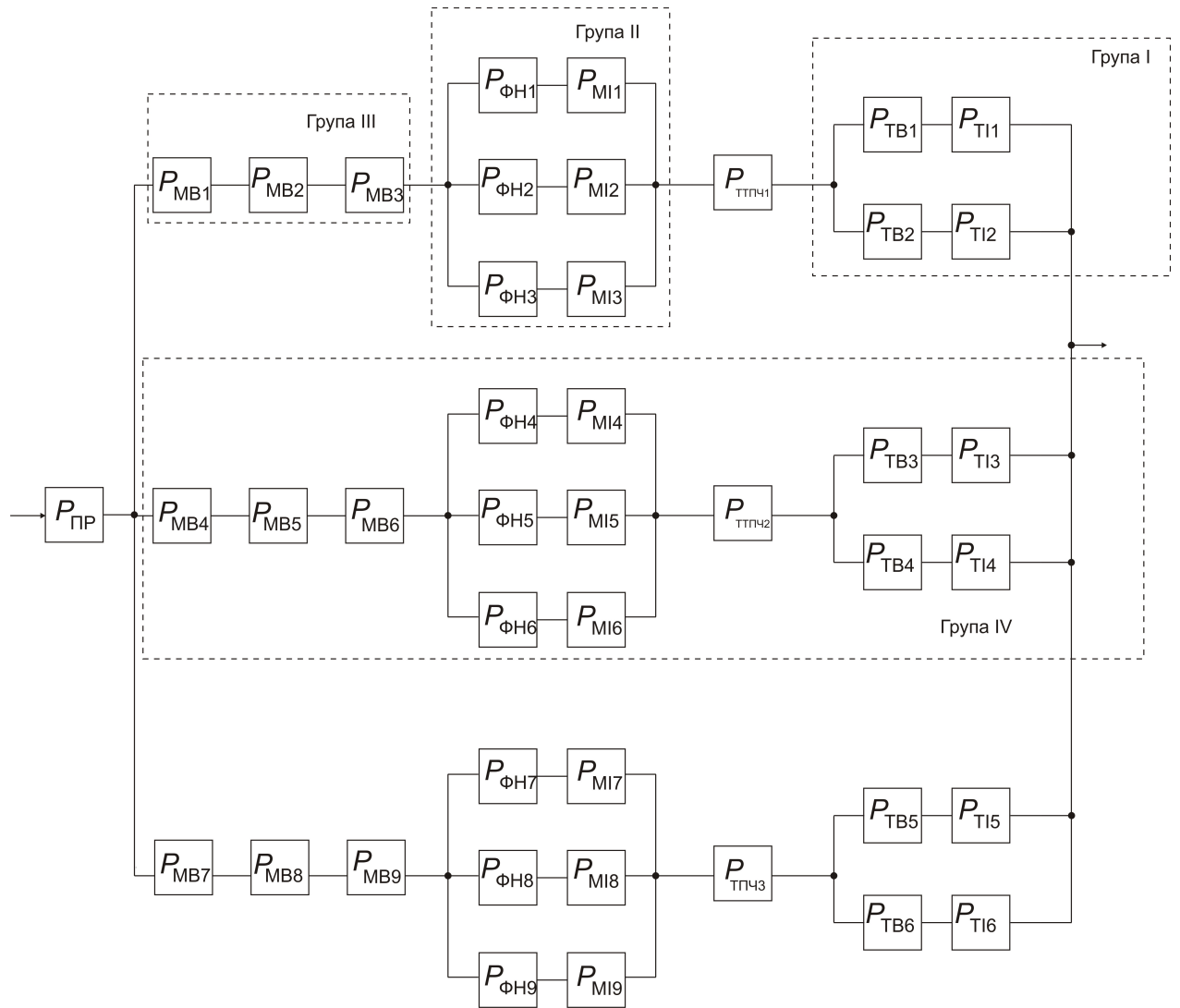


Рис. В.23. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М2-3Ф-3м3а.

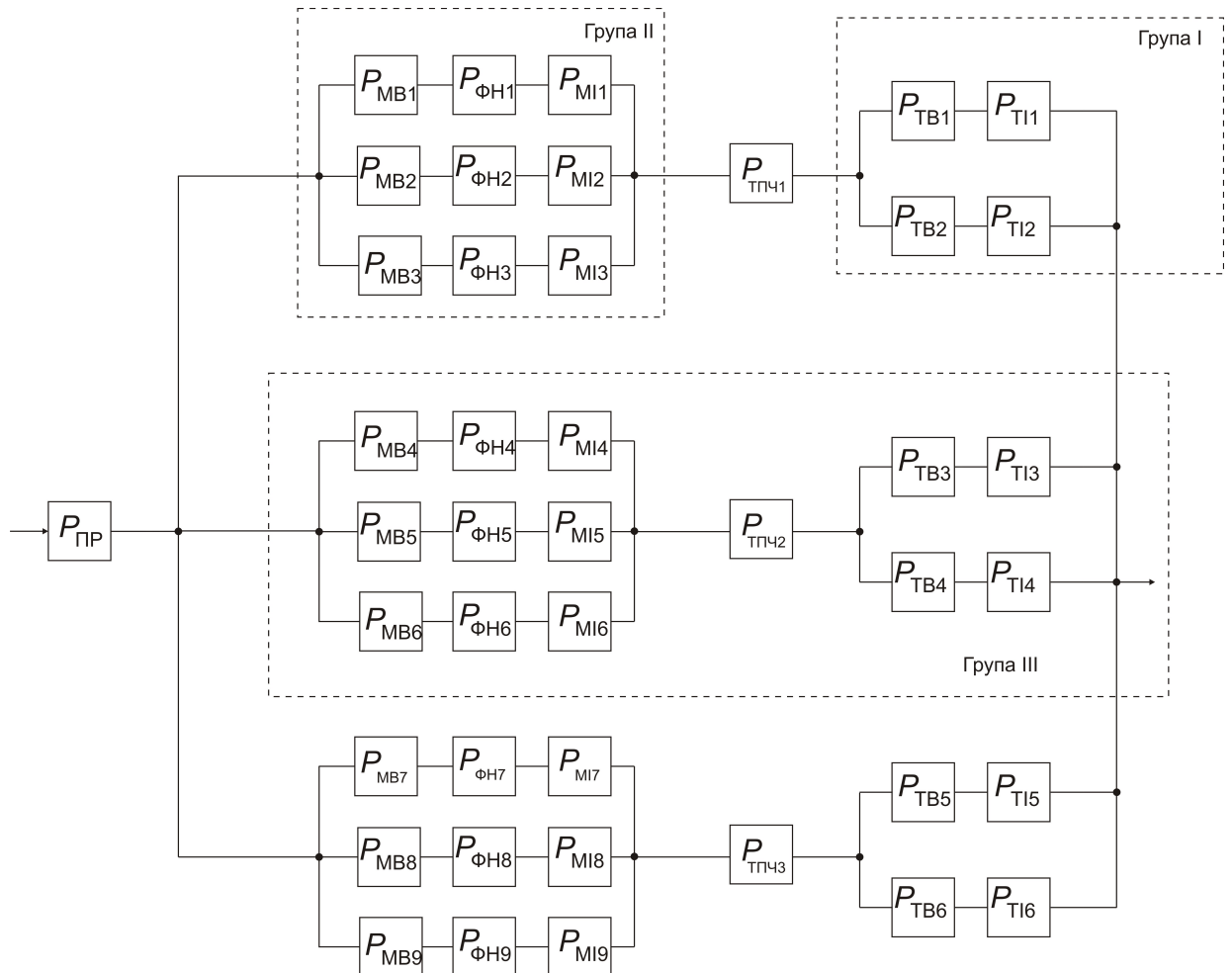


Рис. В.24. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М2-3Ф-9м1а.

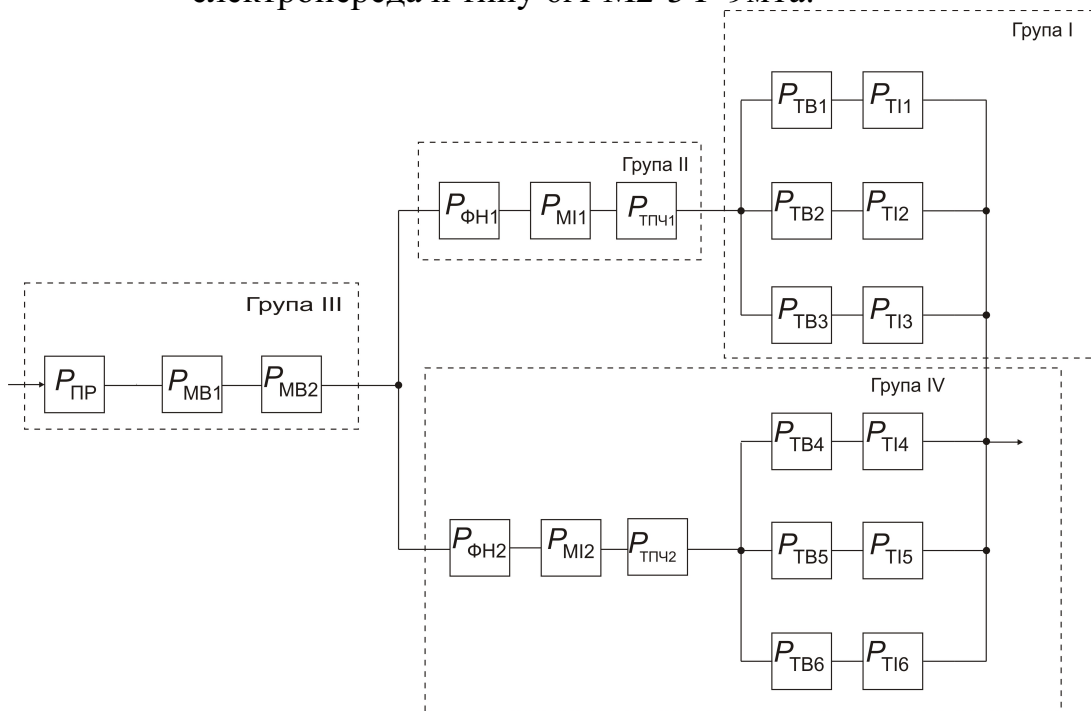


Рис. В.25. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М3-1Ф-1м2а.

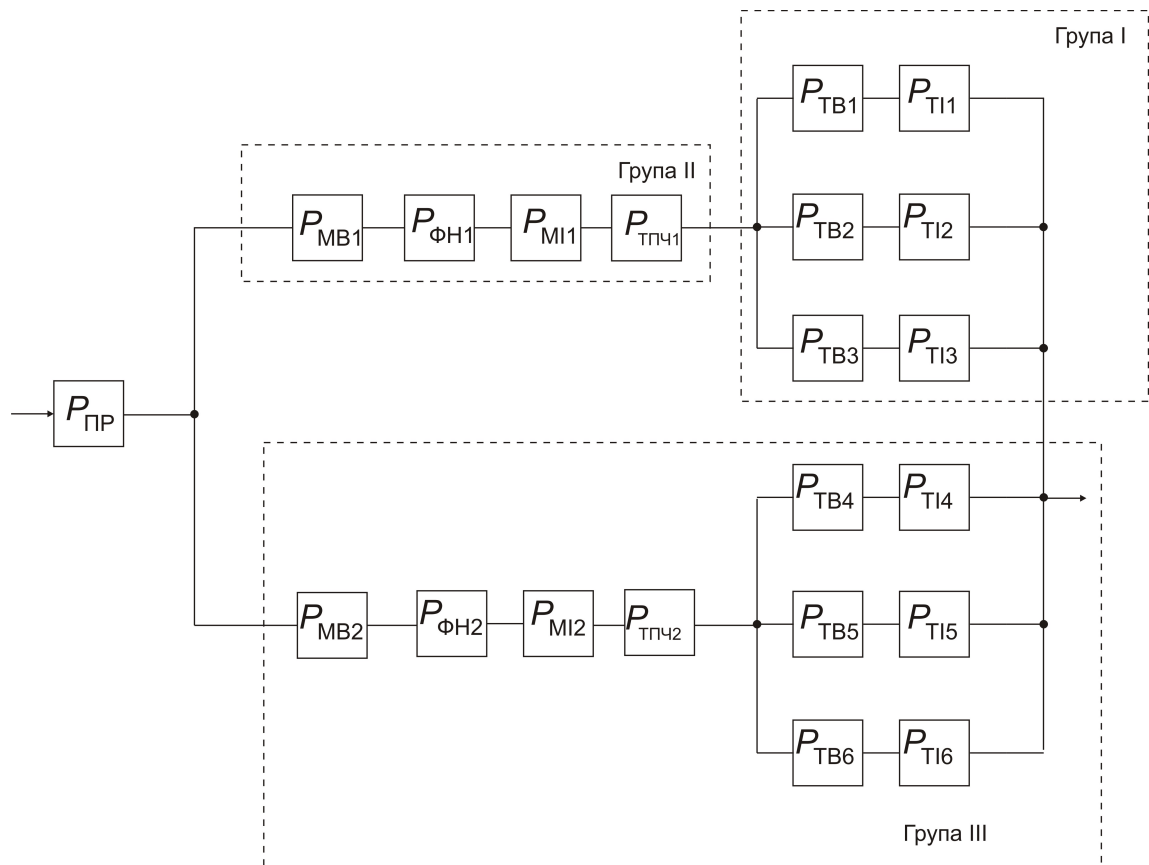


Рис. В.26. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М3-1Φ-2м1а.

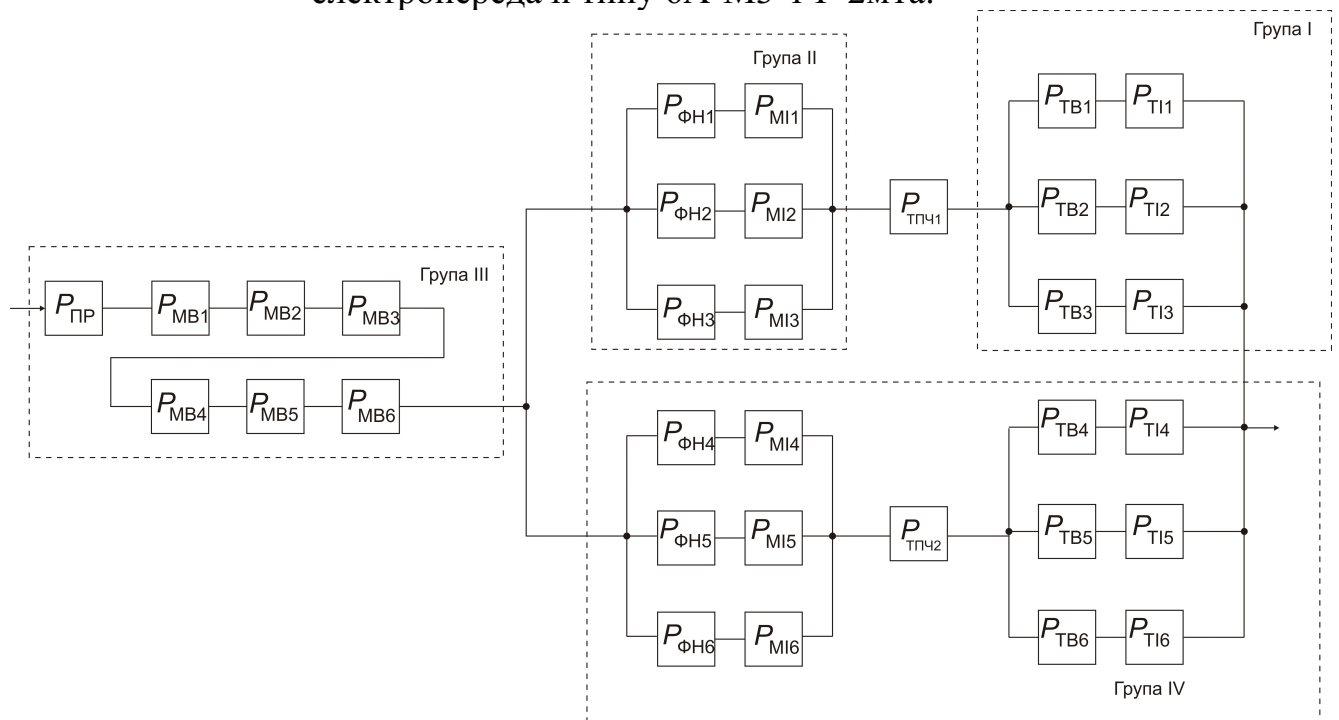


Рис. В.27. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М3-3Φ-1м6а.

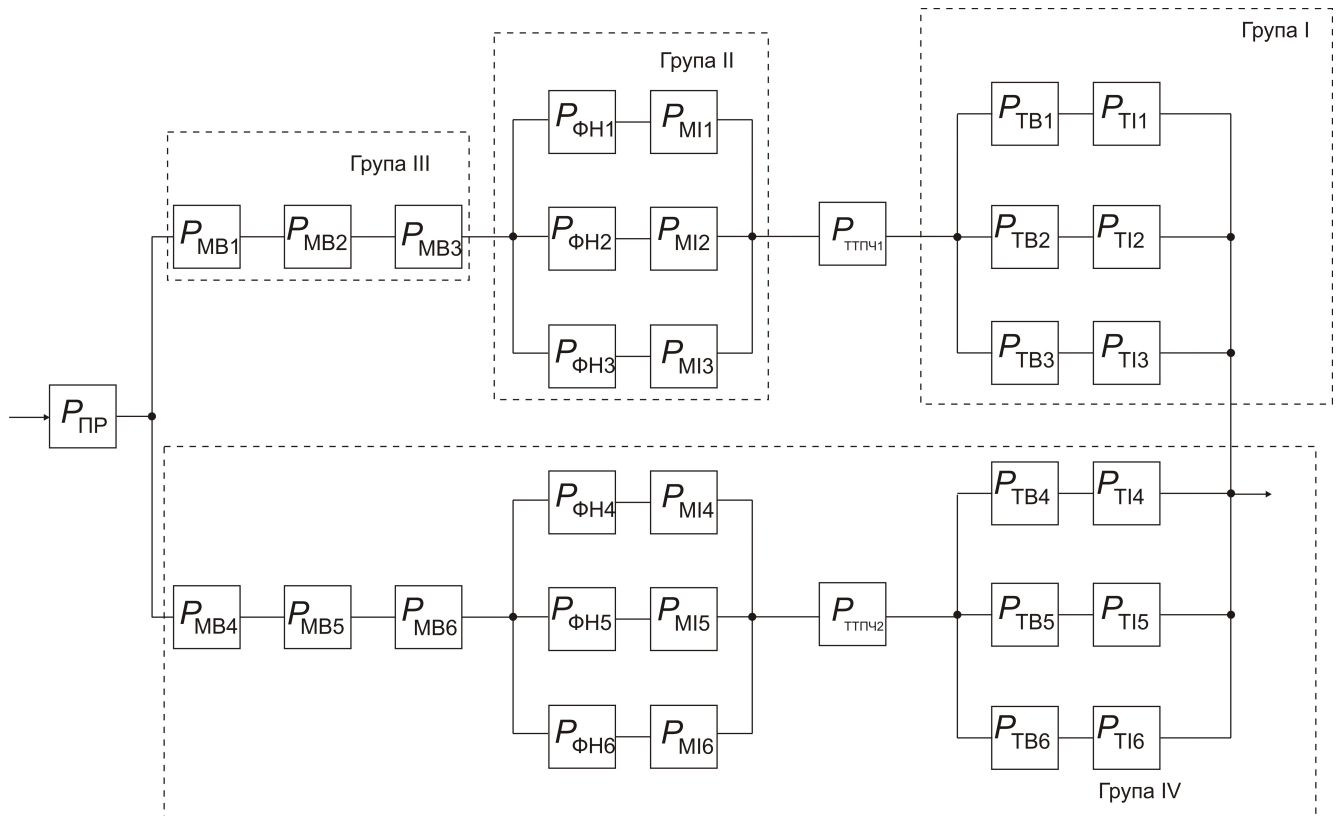


Рис. В.28. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М3-3Φ-2М3а.

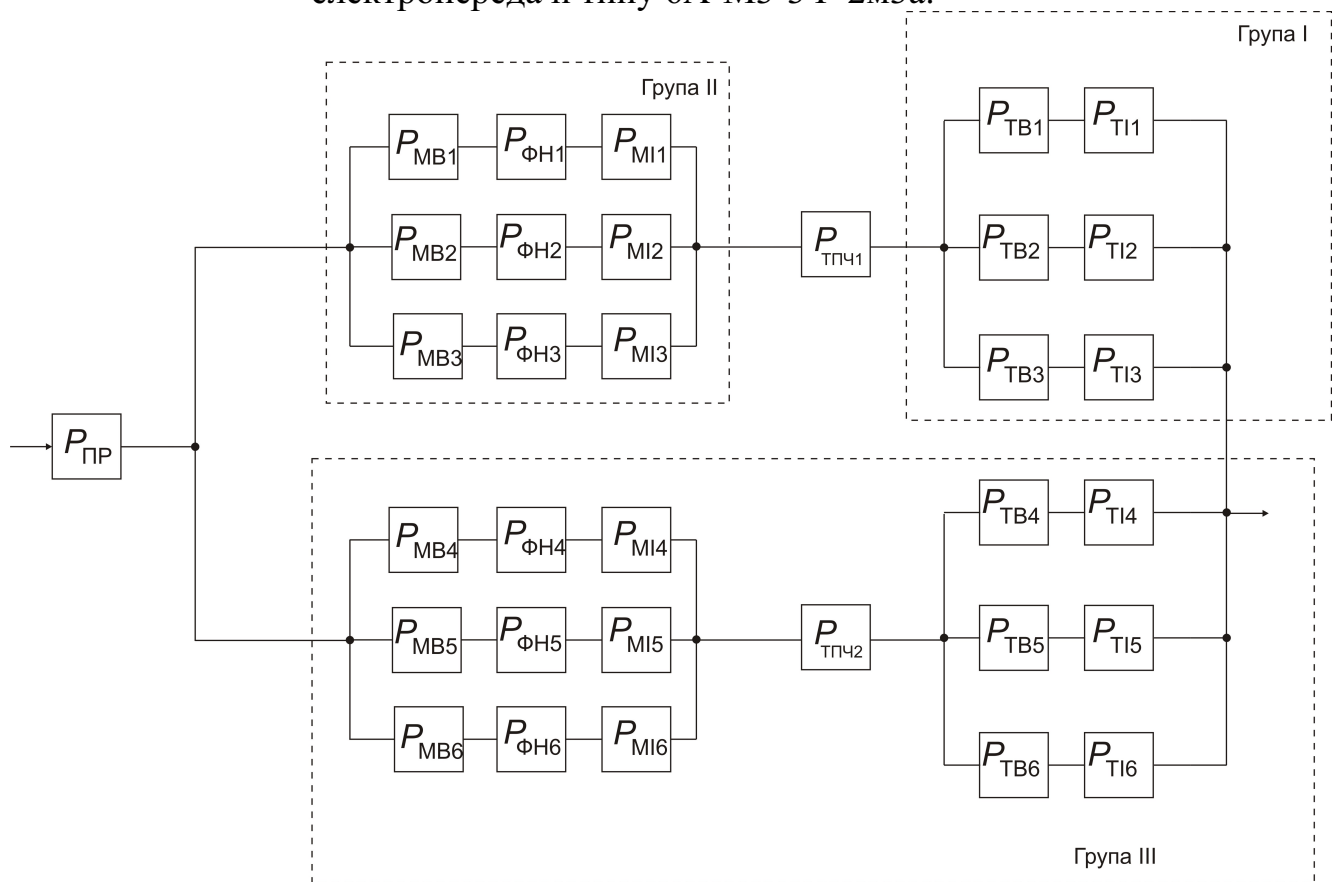


Рис. В.29. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6А-М3-3Φ-6М1а.

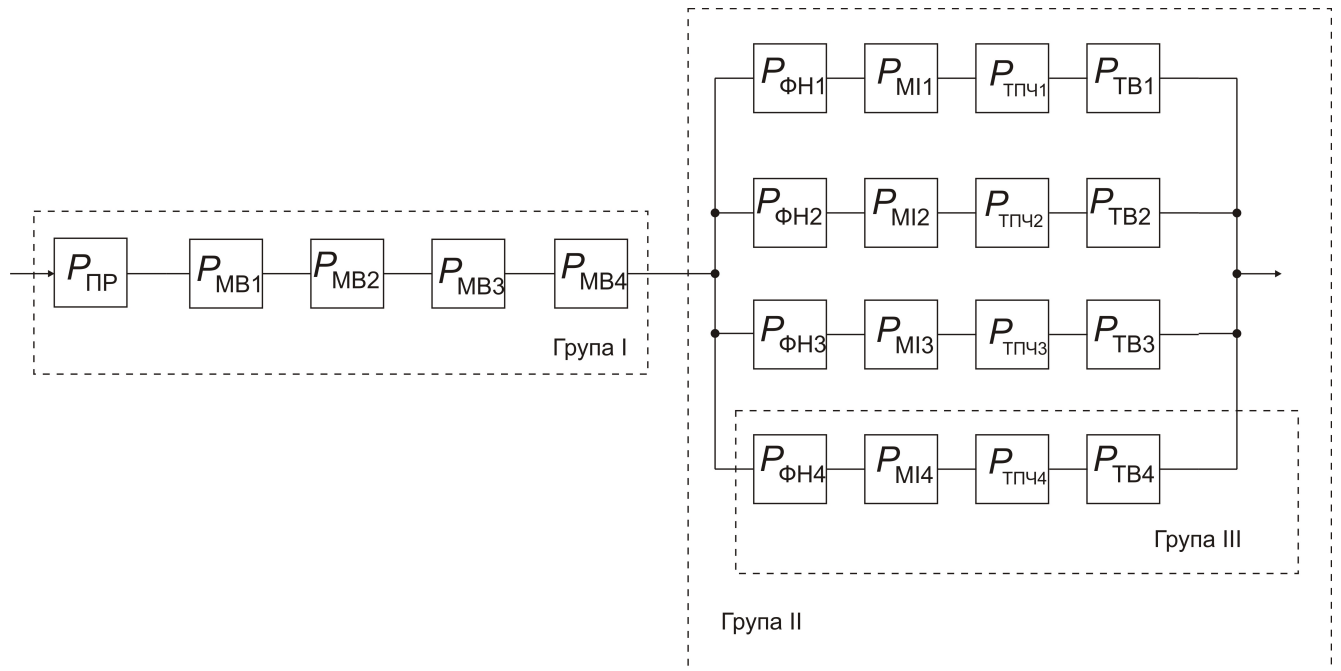


Рис. В.30. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М1-1Ф-1м4а.

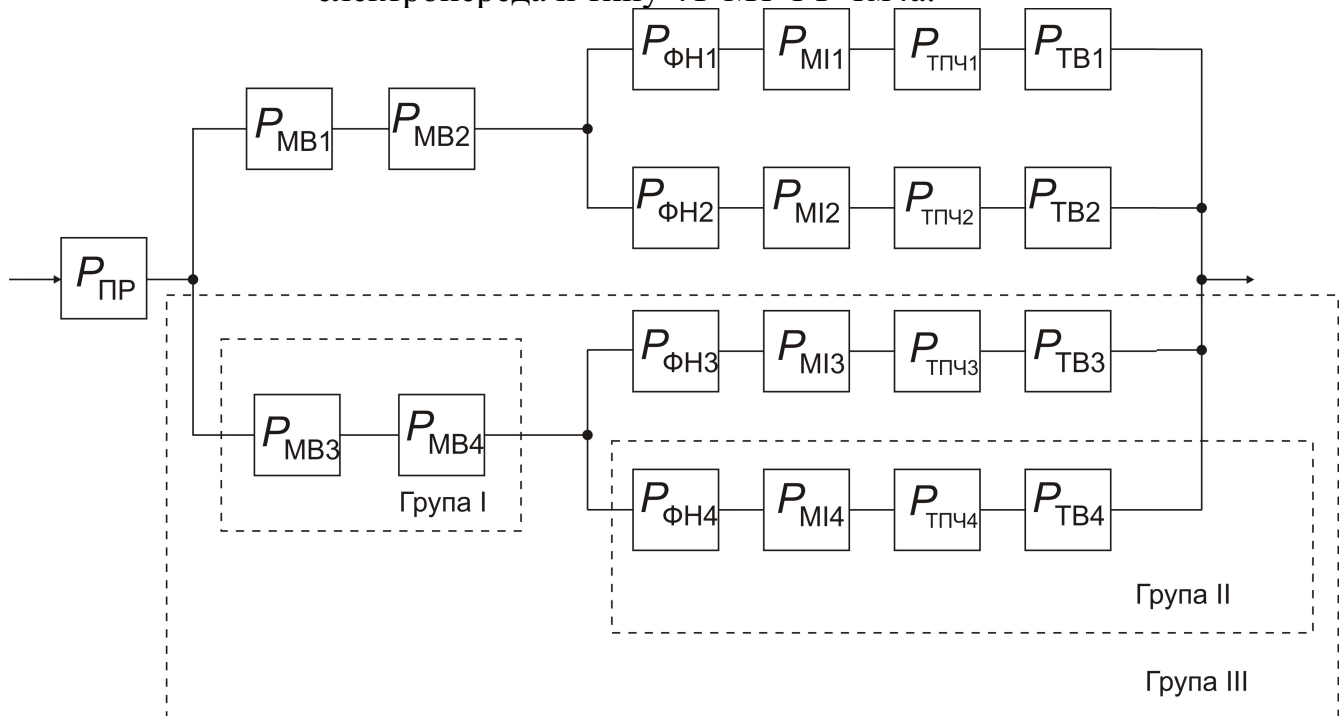


Рис. В.31. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М1-1Ф-2м2а.

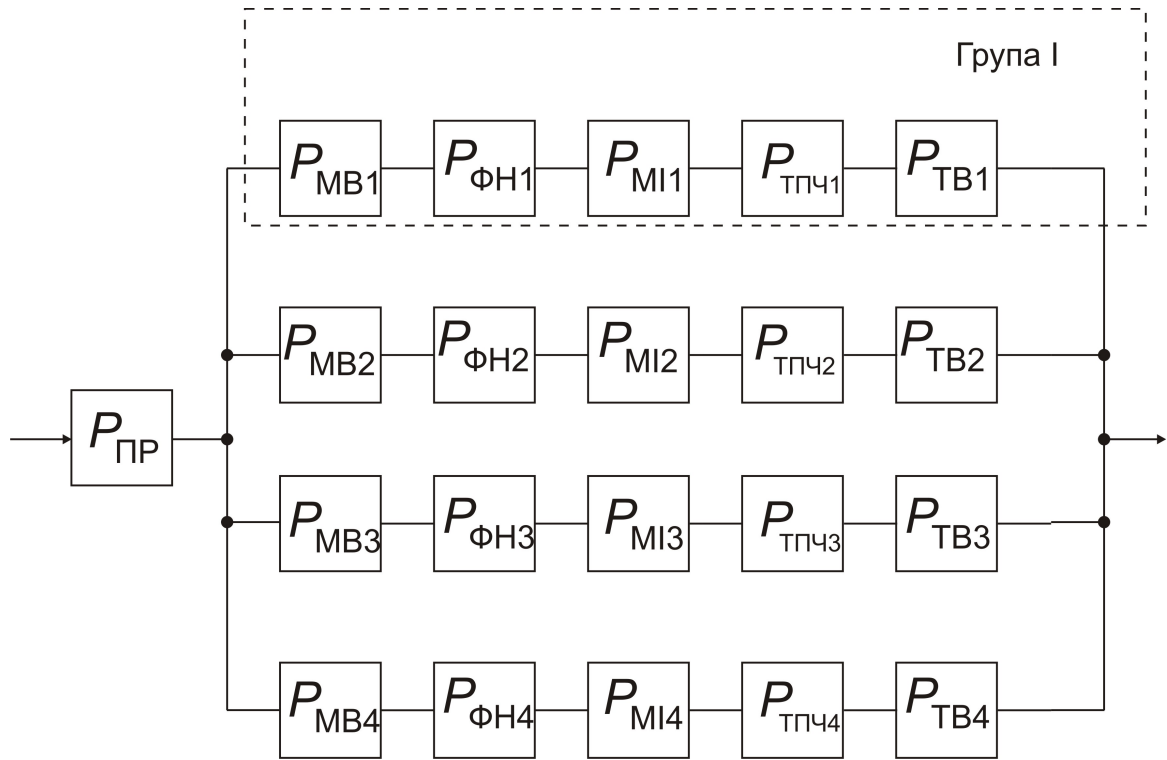


Рис. В.32. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М1-1Ф-4м1а.

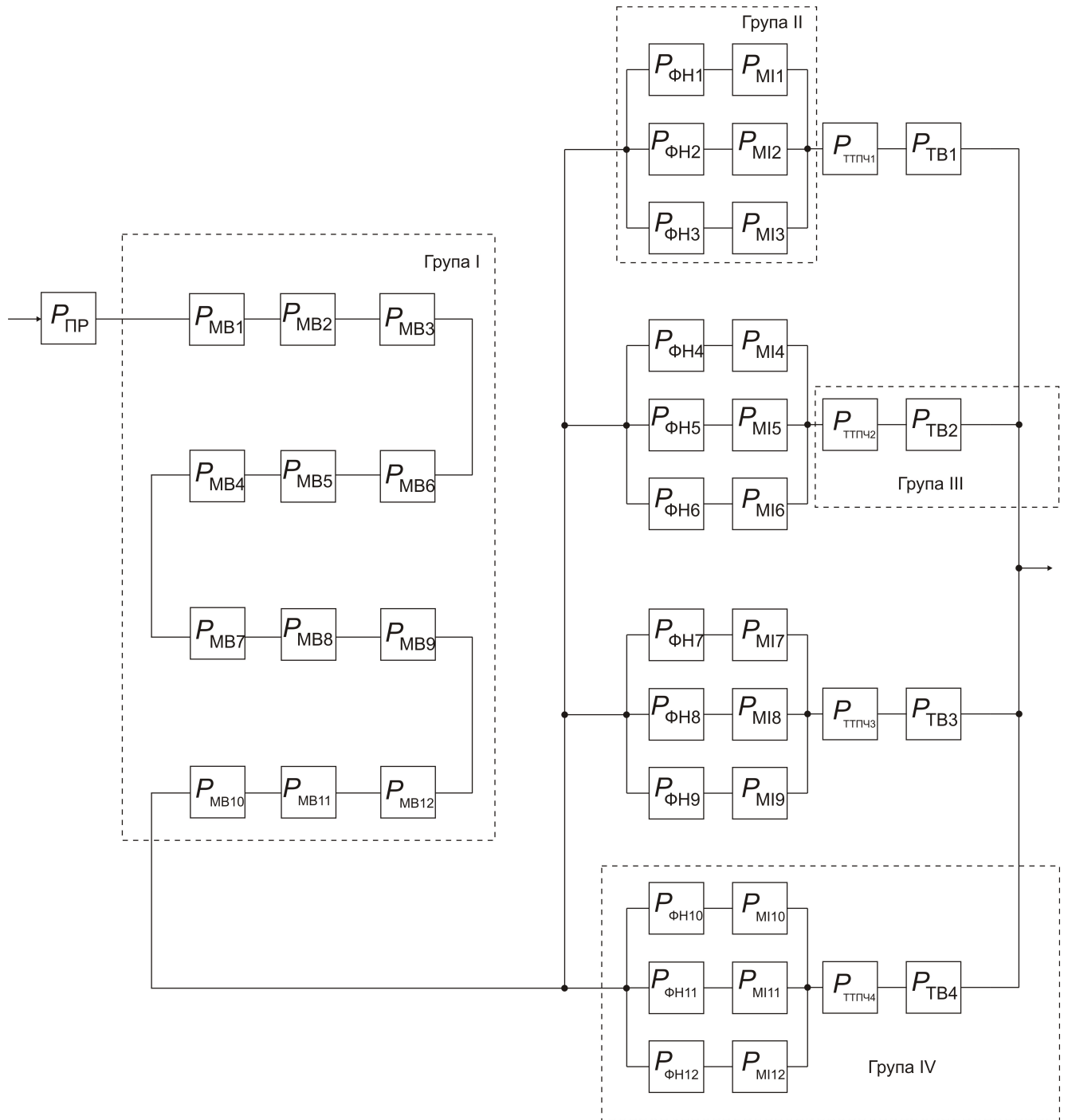


Рис. В.33. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М1-3Ф-1м12а.

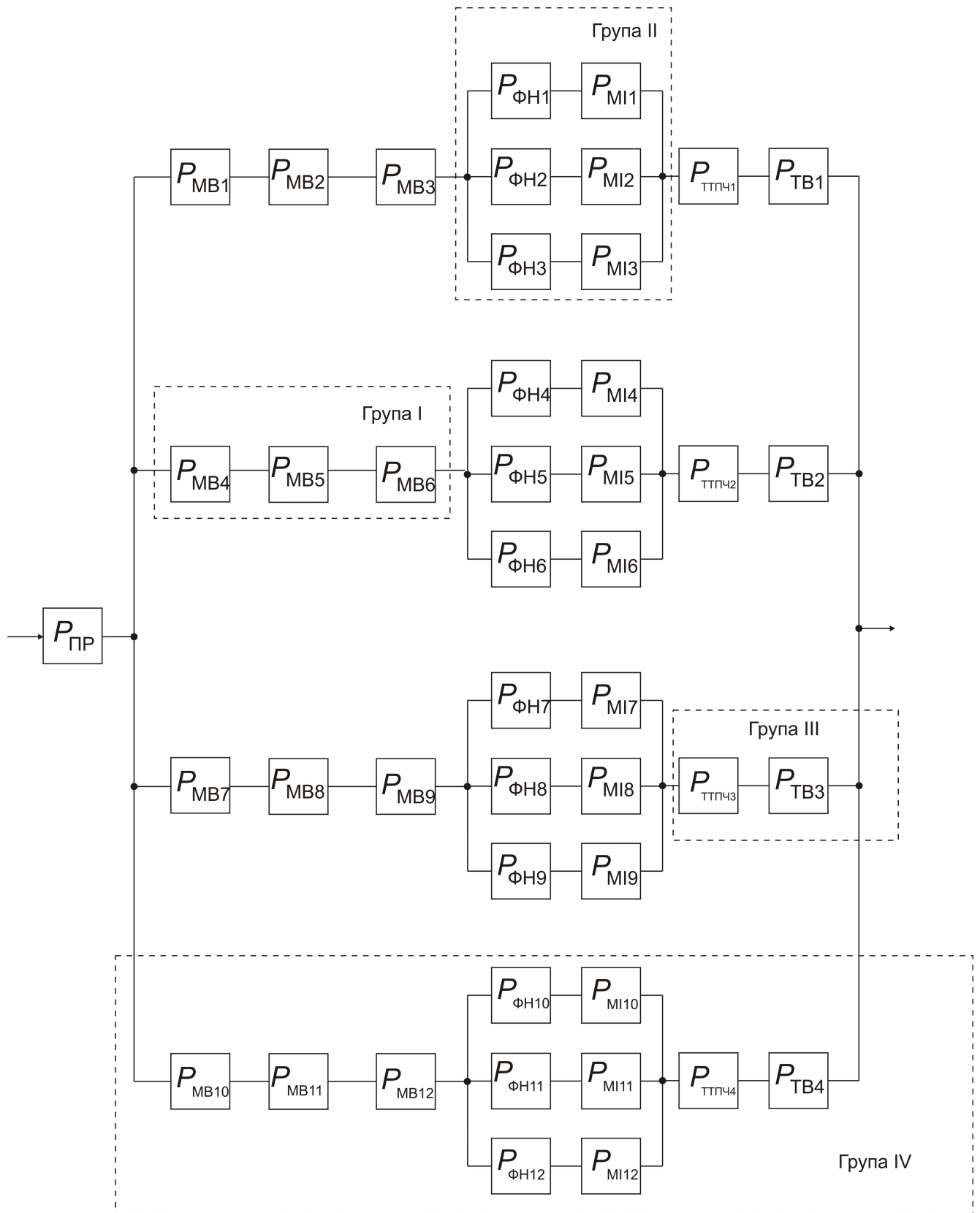


Рис. В.34. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М1-3Ф-4м3а.

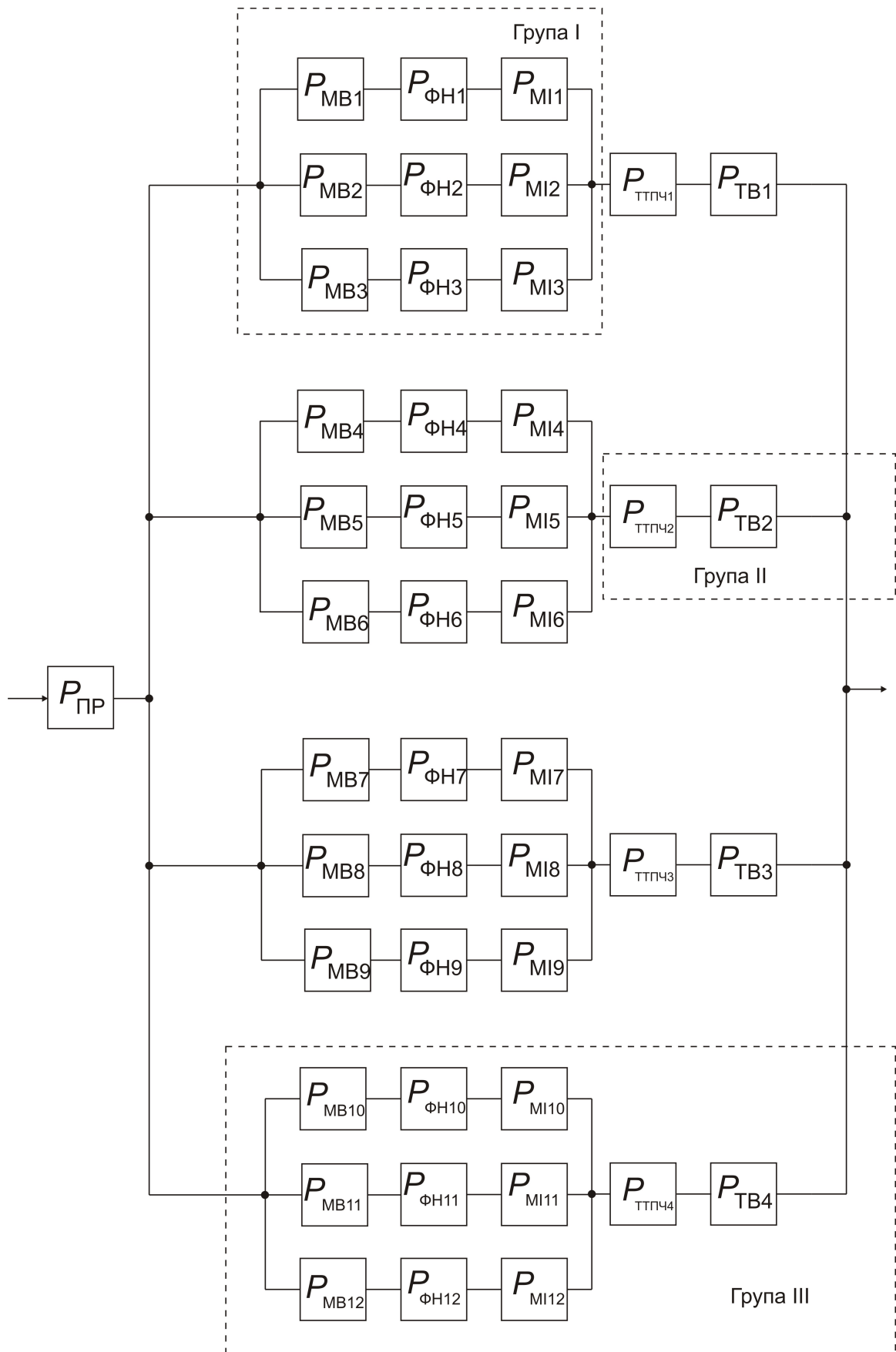


Рис. В.35. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М1-3Ф-12м1а.

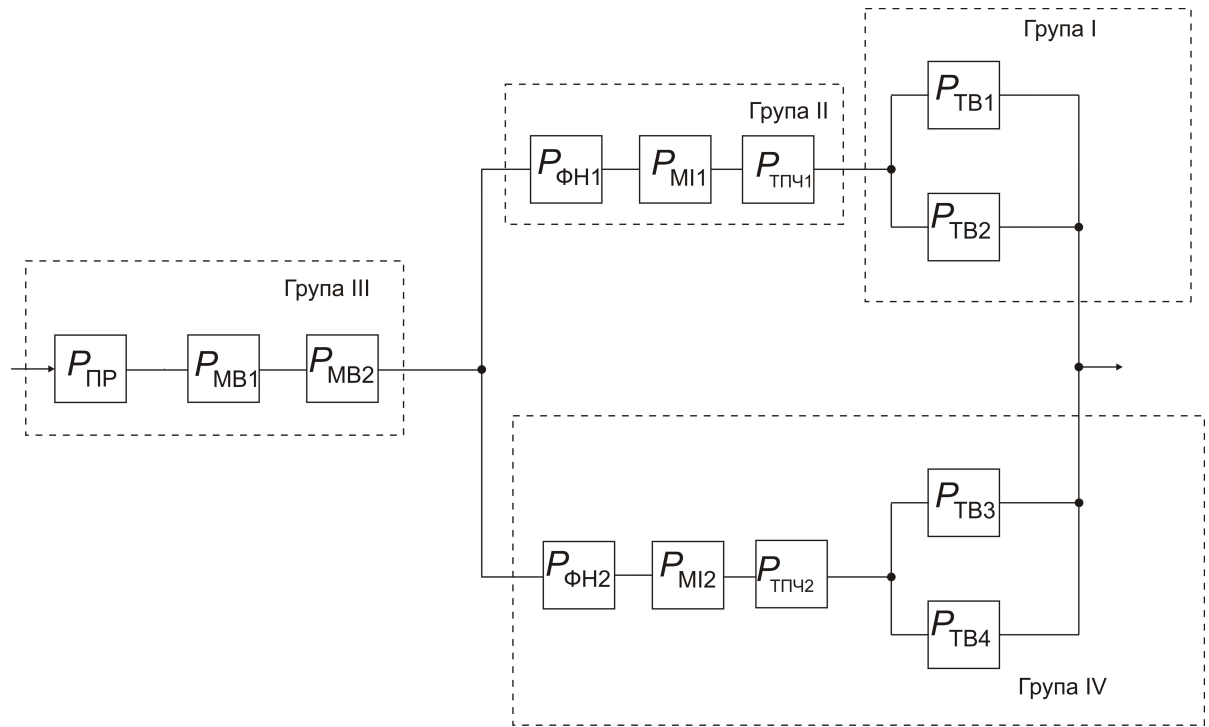


Рис. В.36. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М2-1Φ-1м2а.

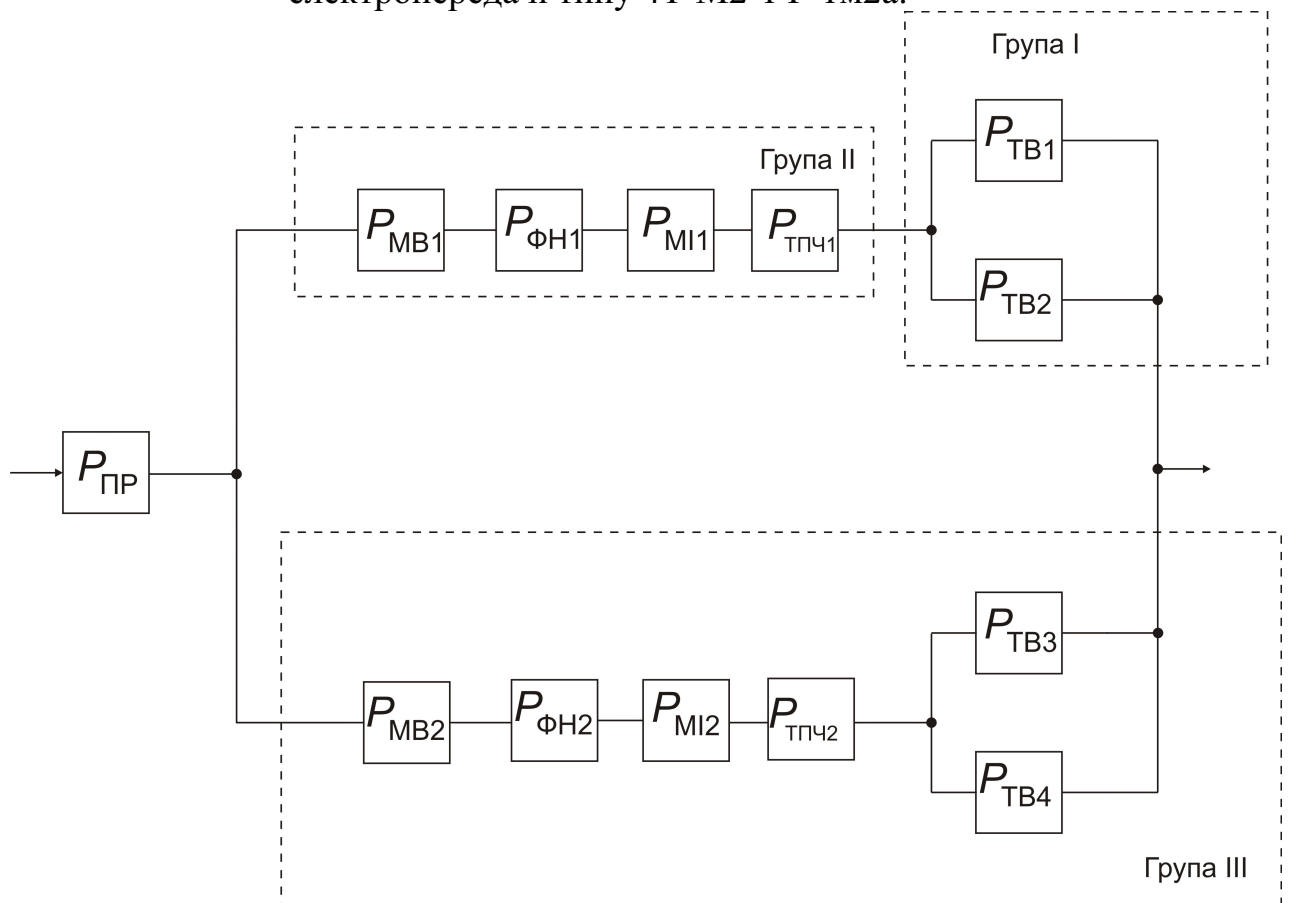


Рис. В.37. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М2-1Φ-2м1а.

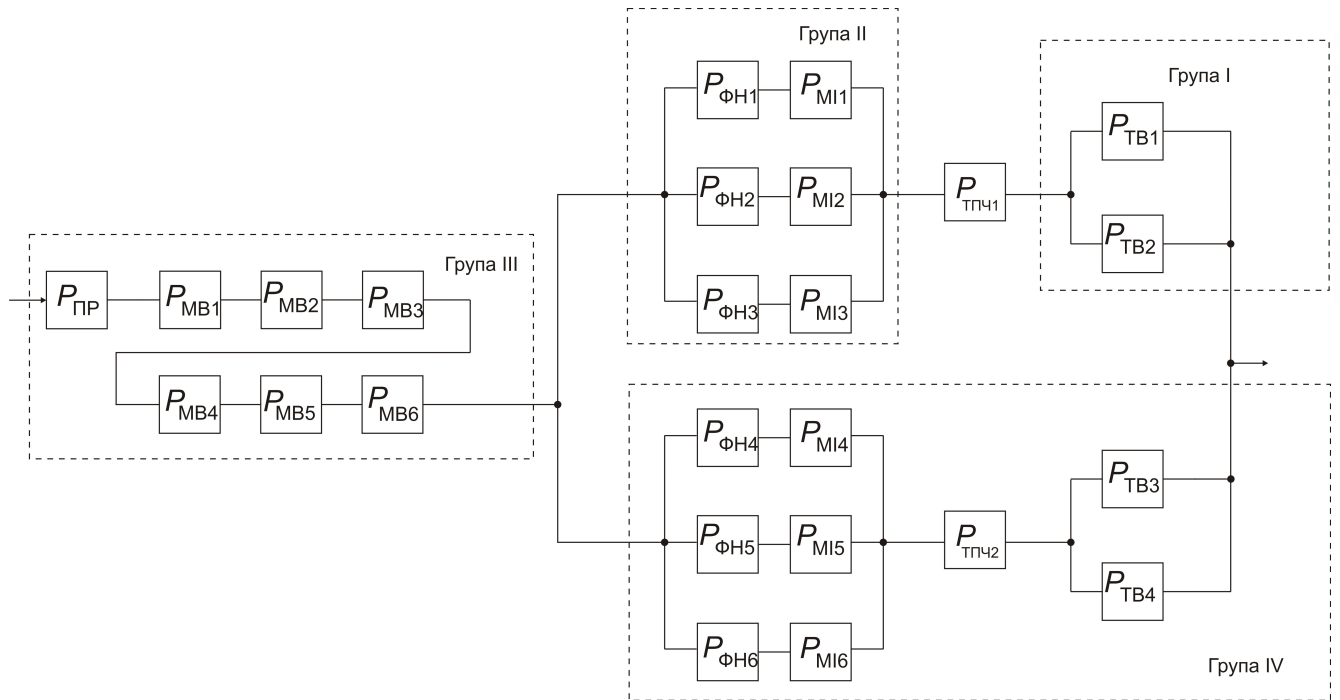


Рис. В.38. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М2-3Ф-1мба.

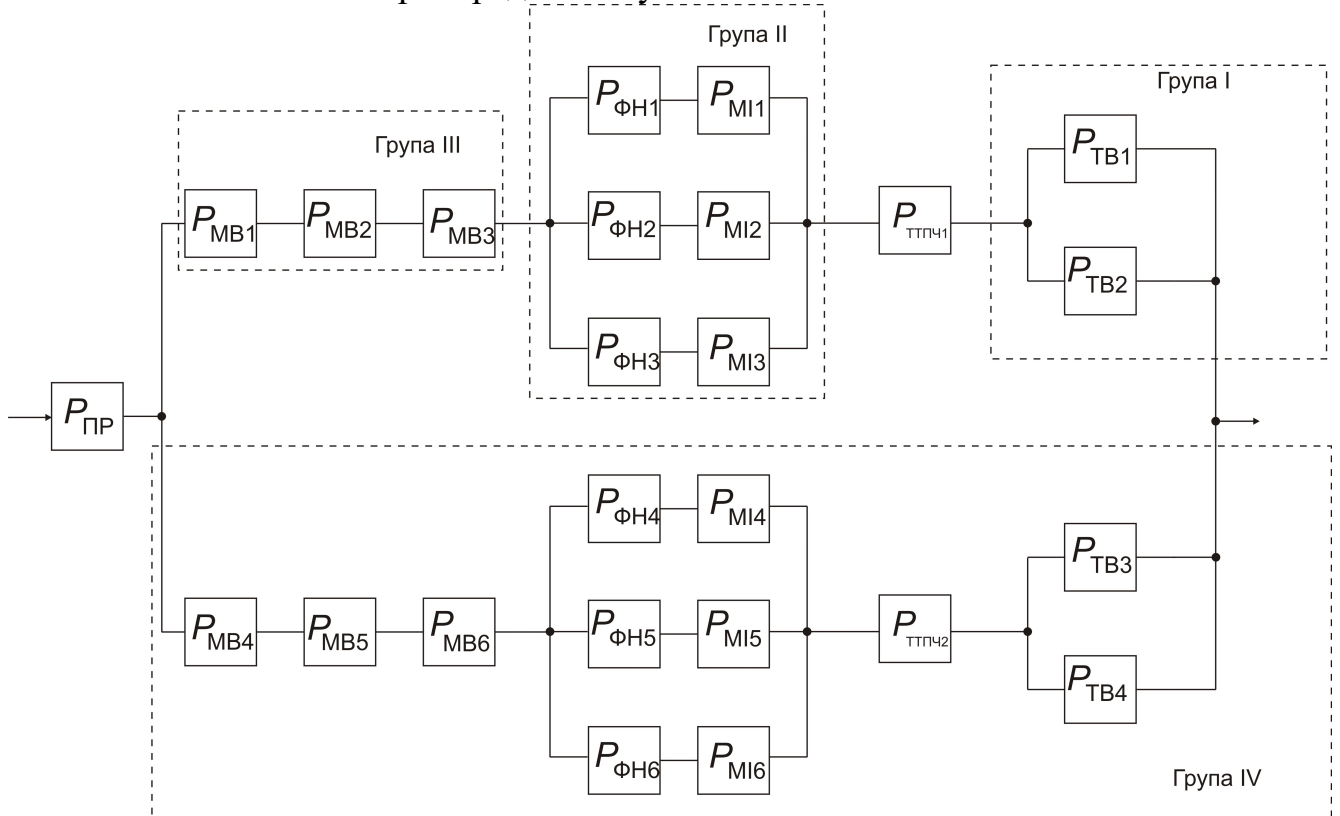


Рис. В.39. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М2-3Ф-2м3а.

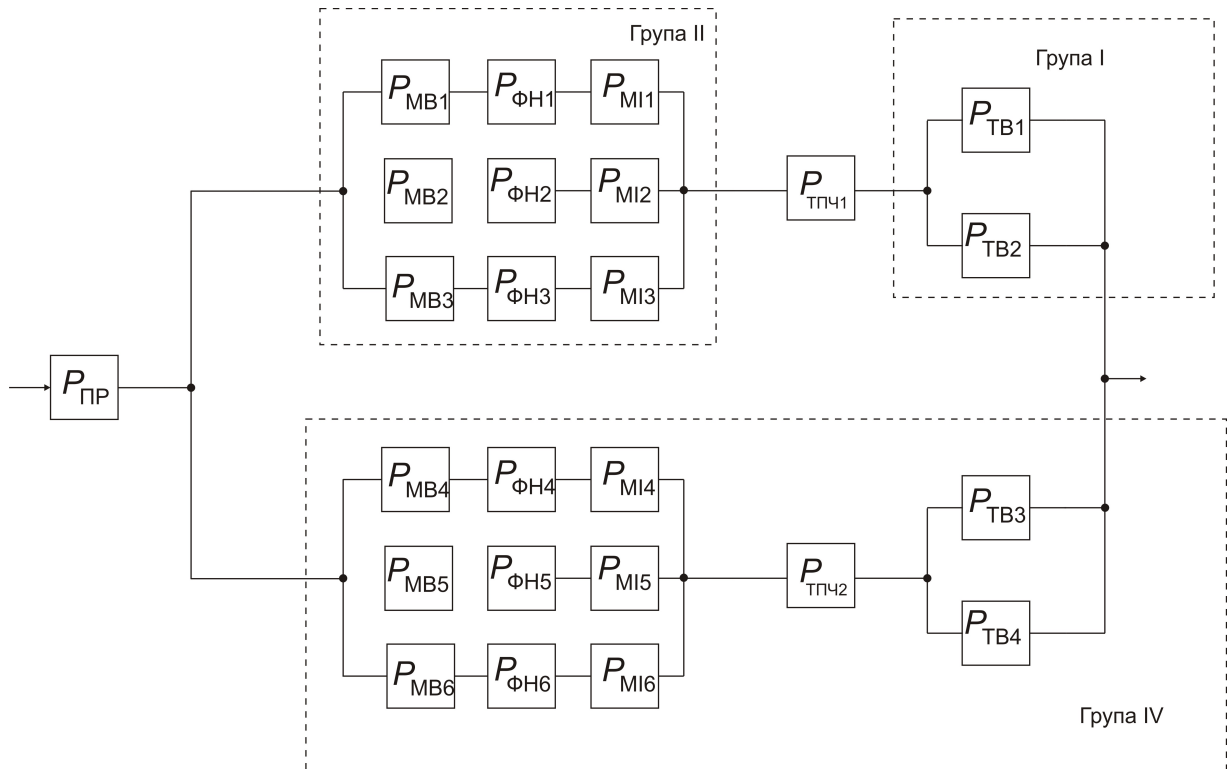


Рис. В.40. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 4Т-М2-3Ф-6м1а.

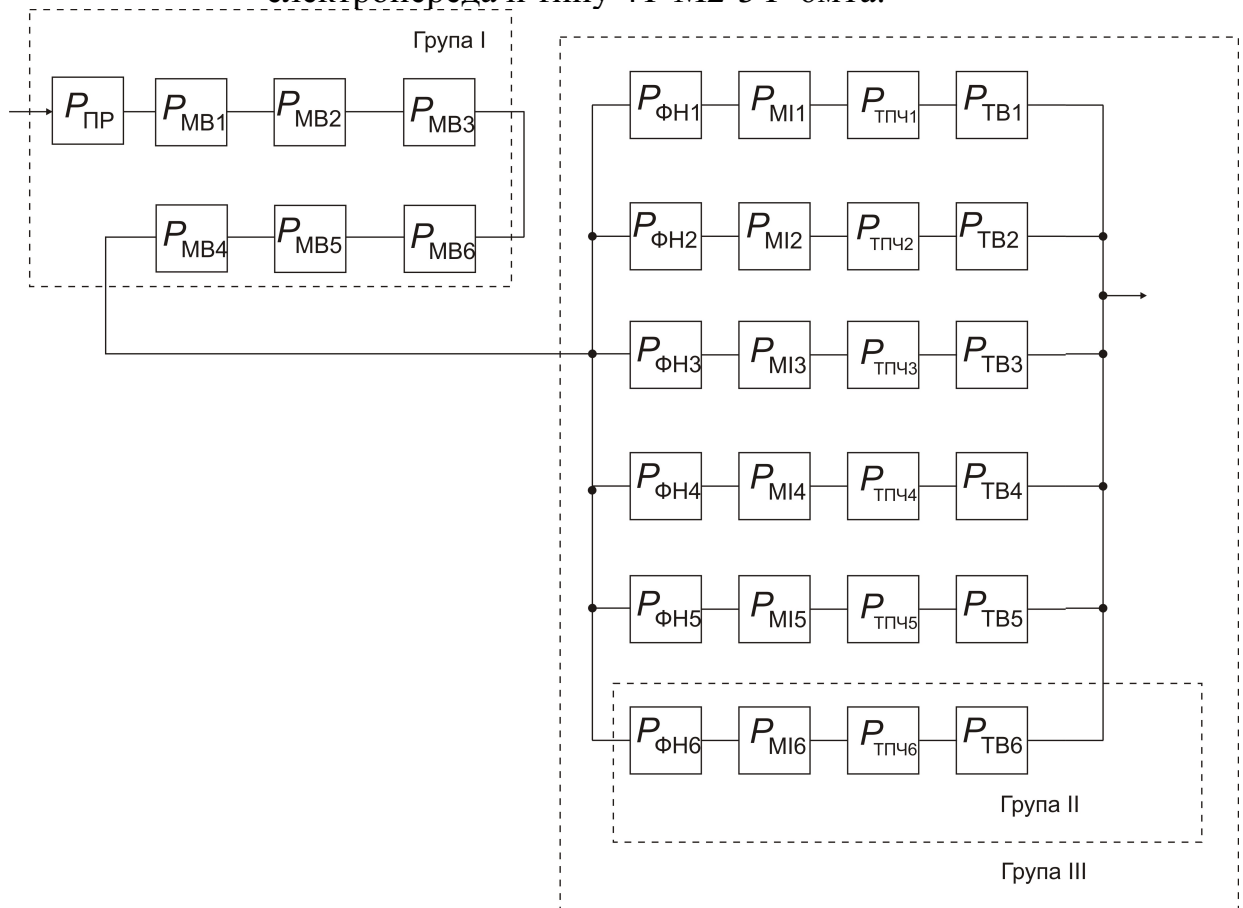


Рис. В.41. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Ф-1м6а.

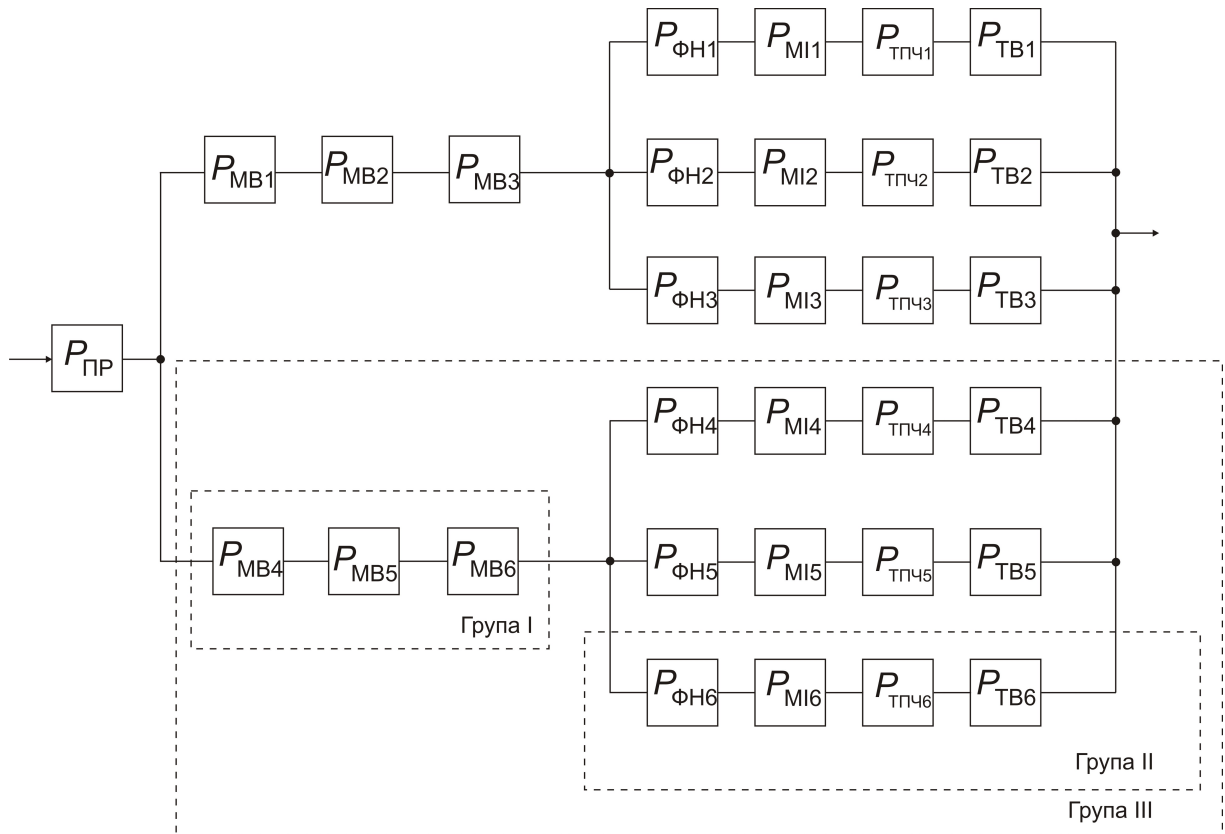


Рис. В.42. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Φ-2М3а.

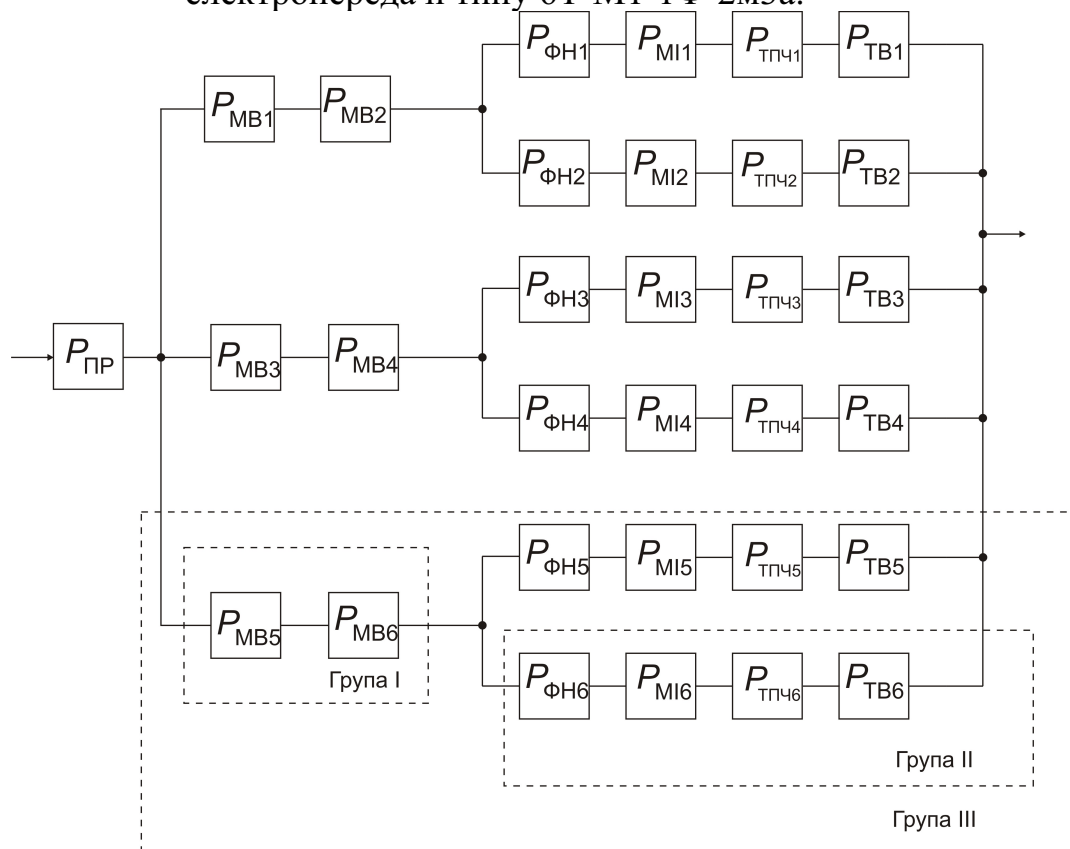


Рис. В.43. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Φ-3М2а.

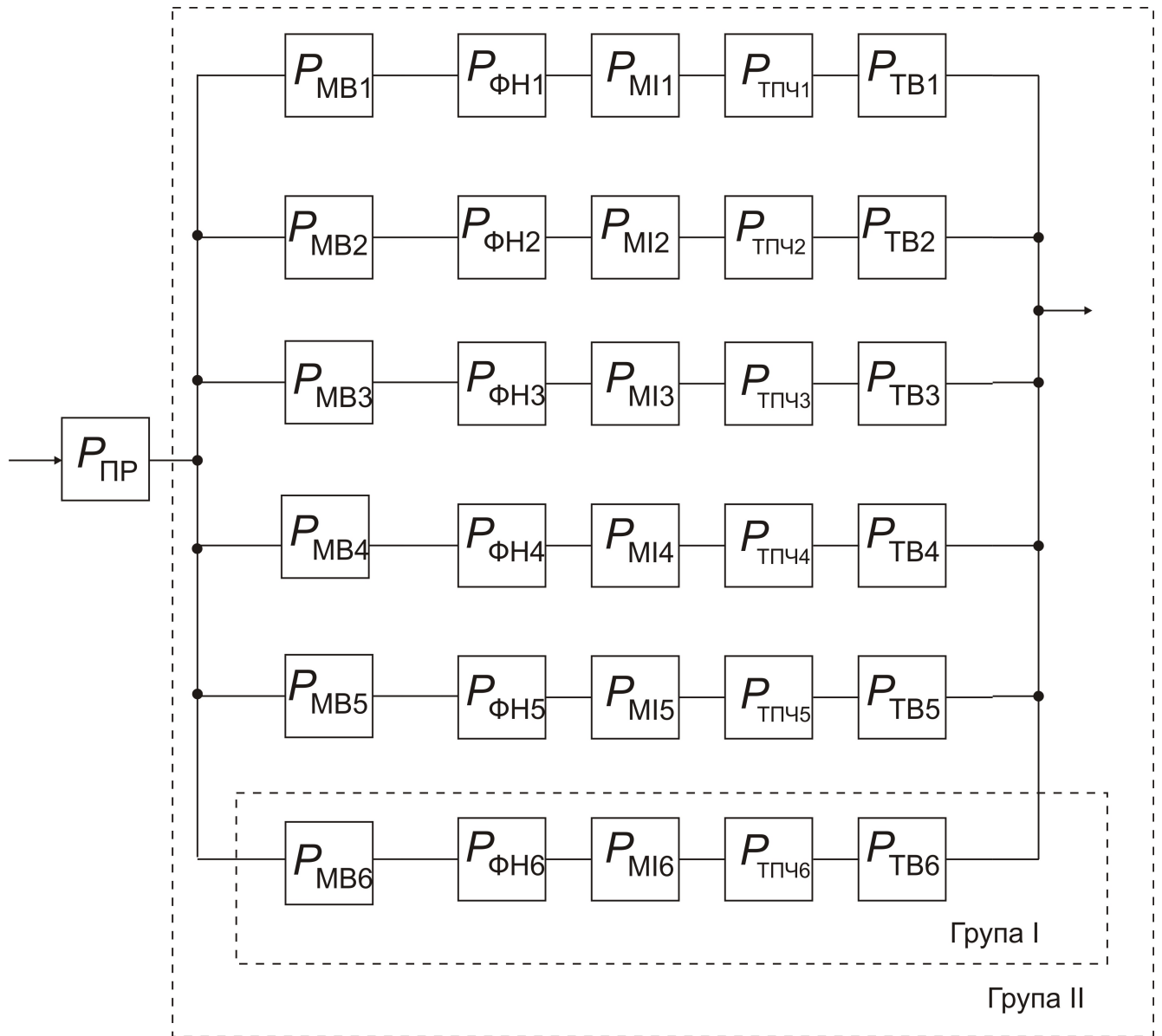


Рис. В.44. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-1Ф-6м1а

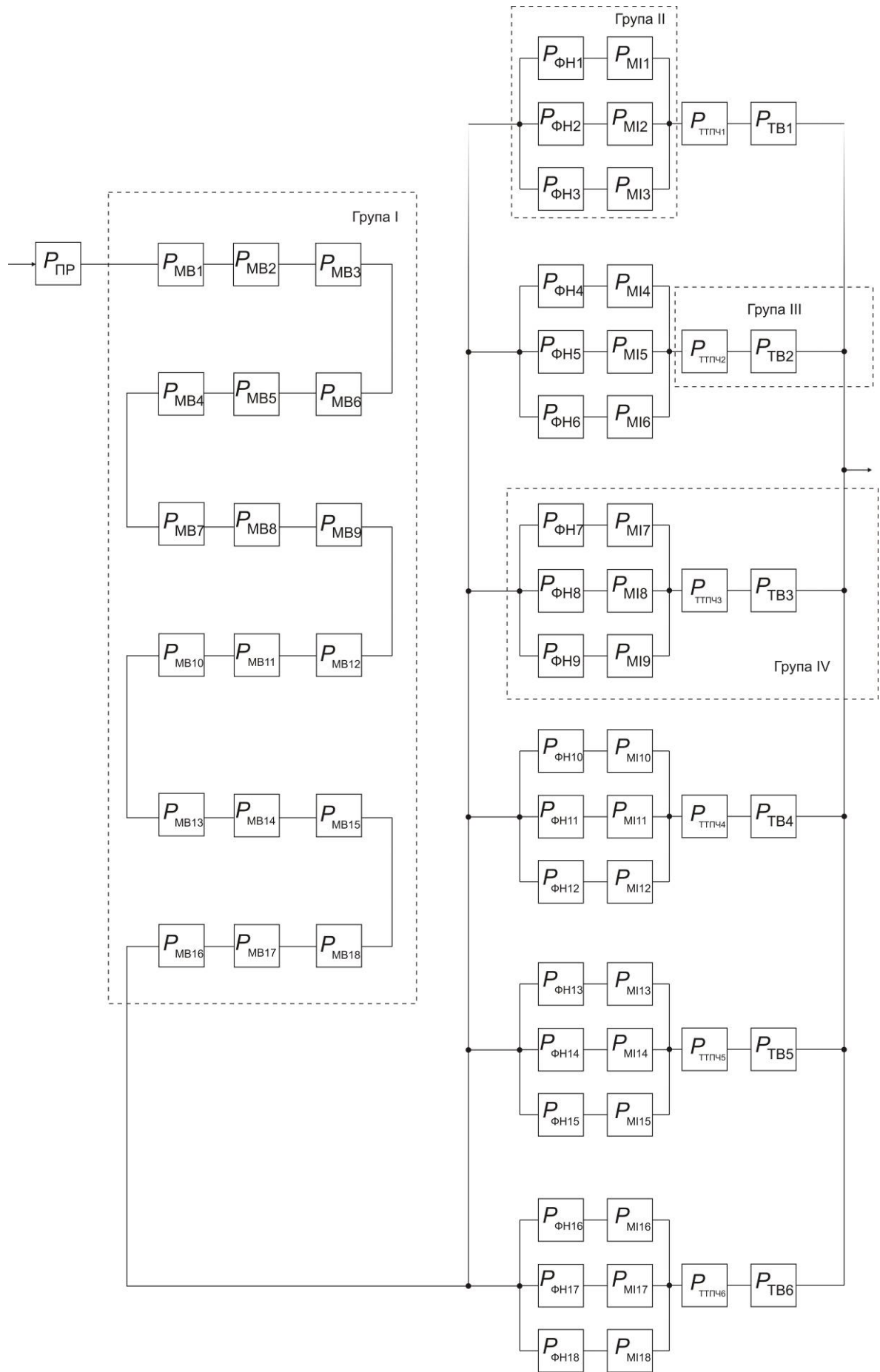


Рис. В.45. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-1М18а

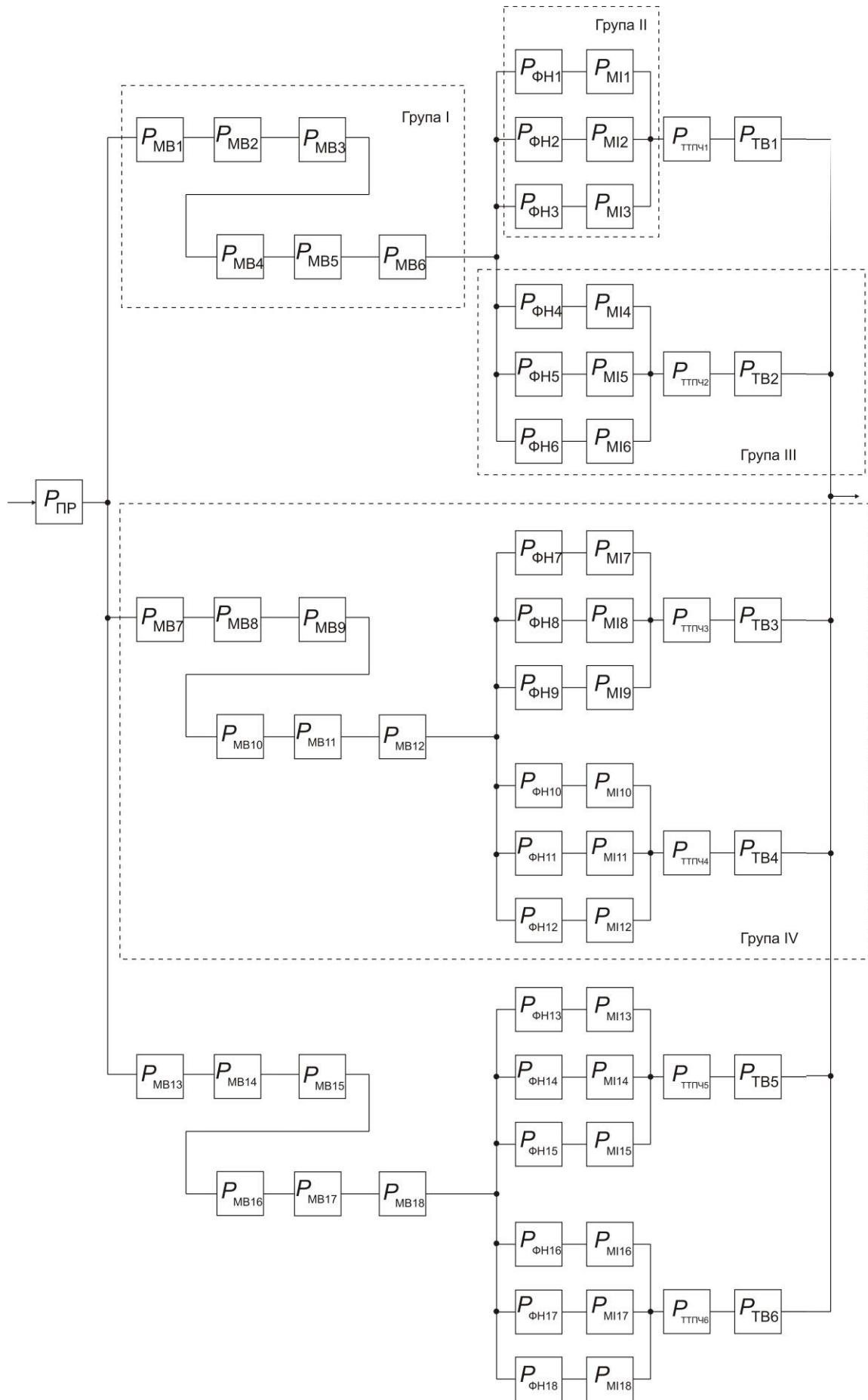


Рис. В.46. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-3мба

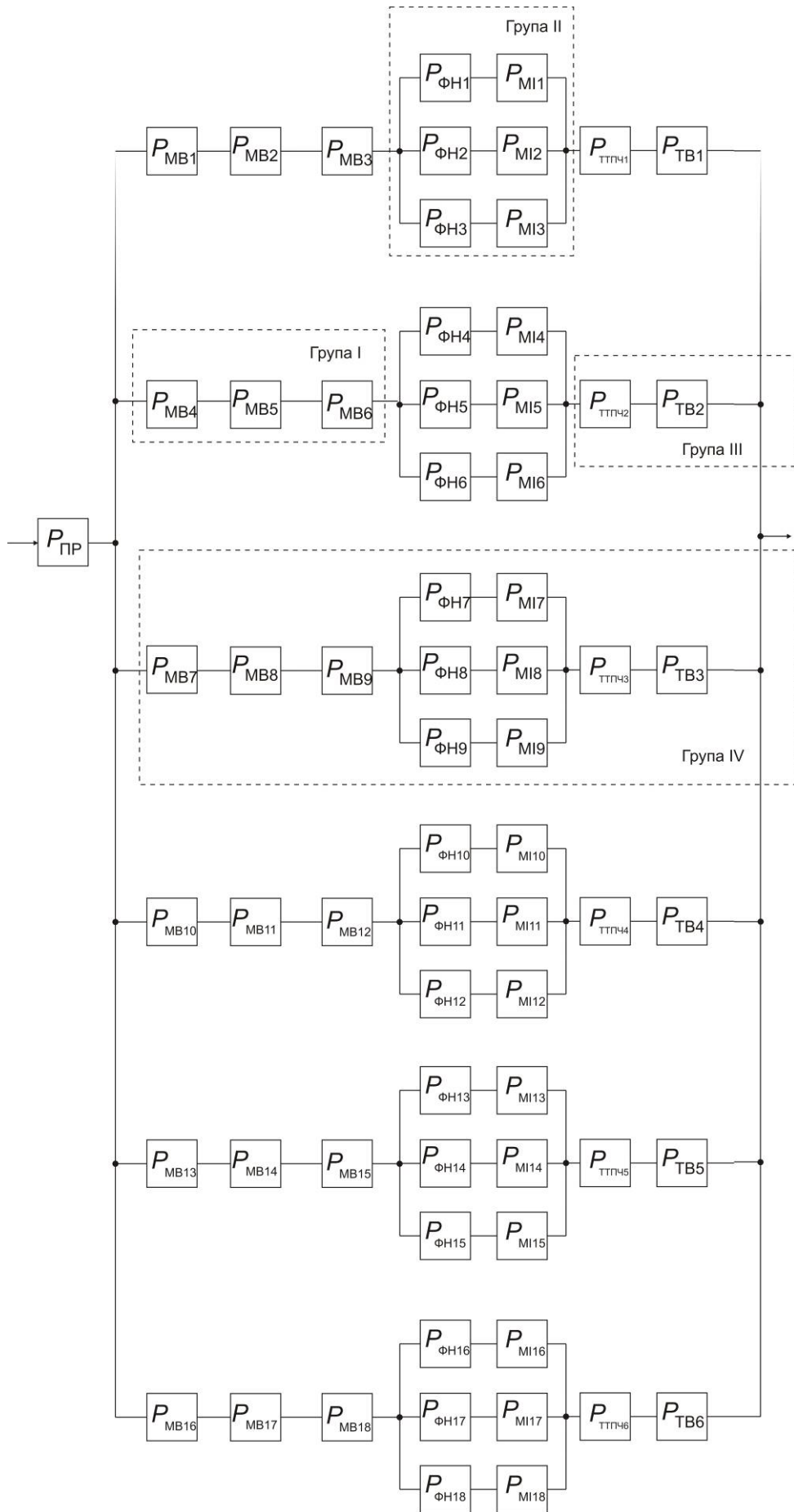


Рис. В.47. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-6м3а

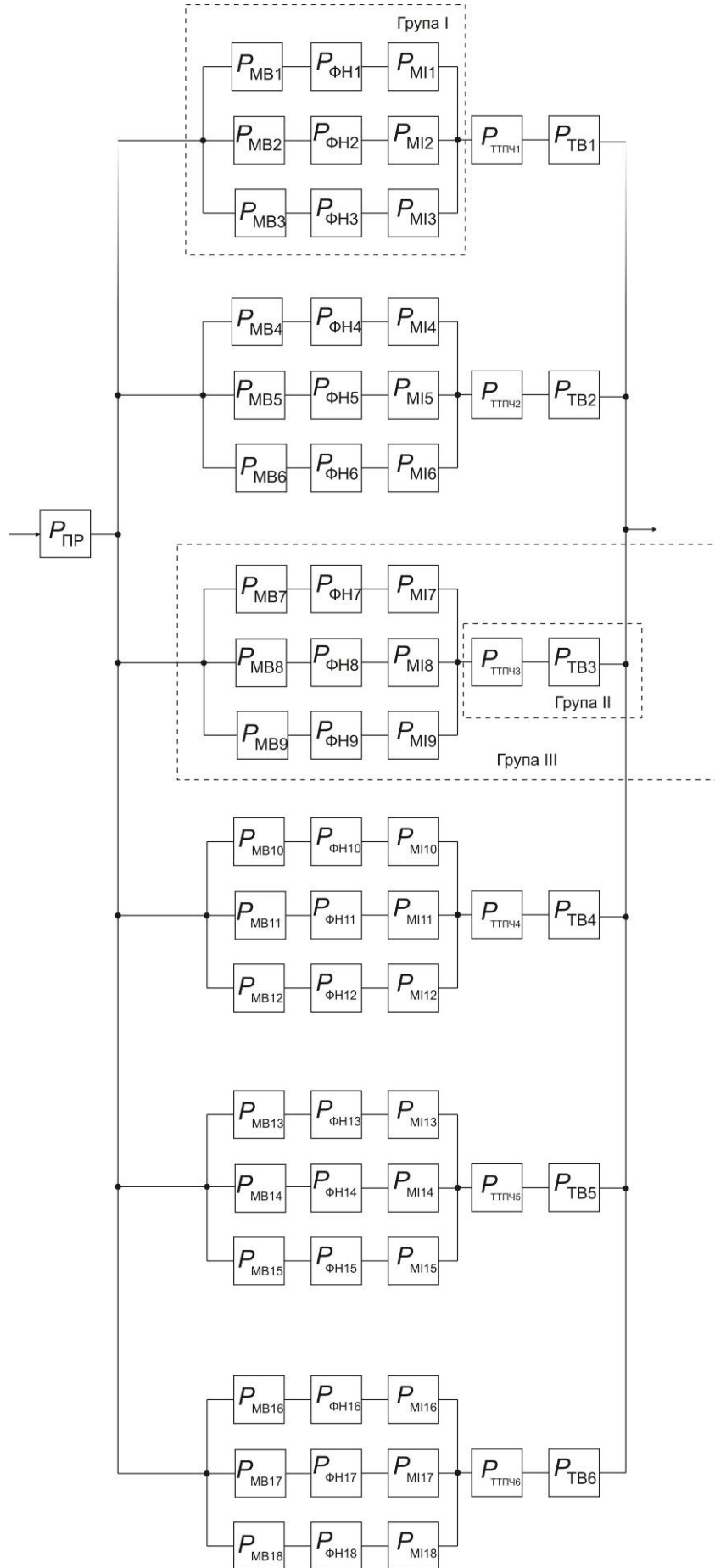


Рис. В.48. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М1-3Ф-18М1а

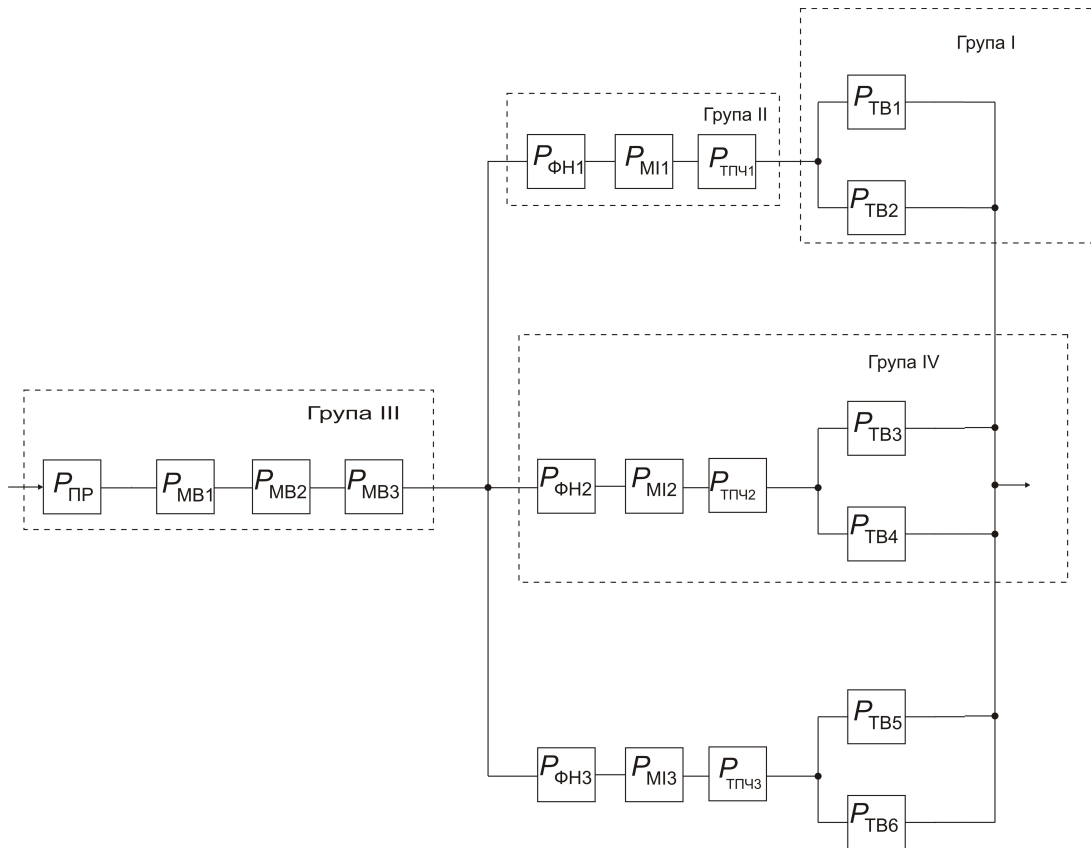


Рис. В.49. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М2-1Ф-1м3а.

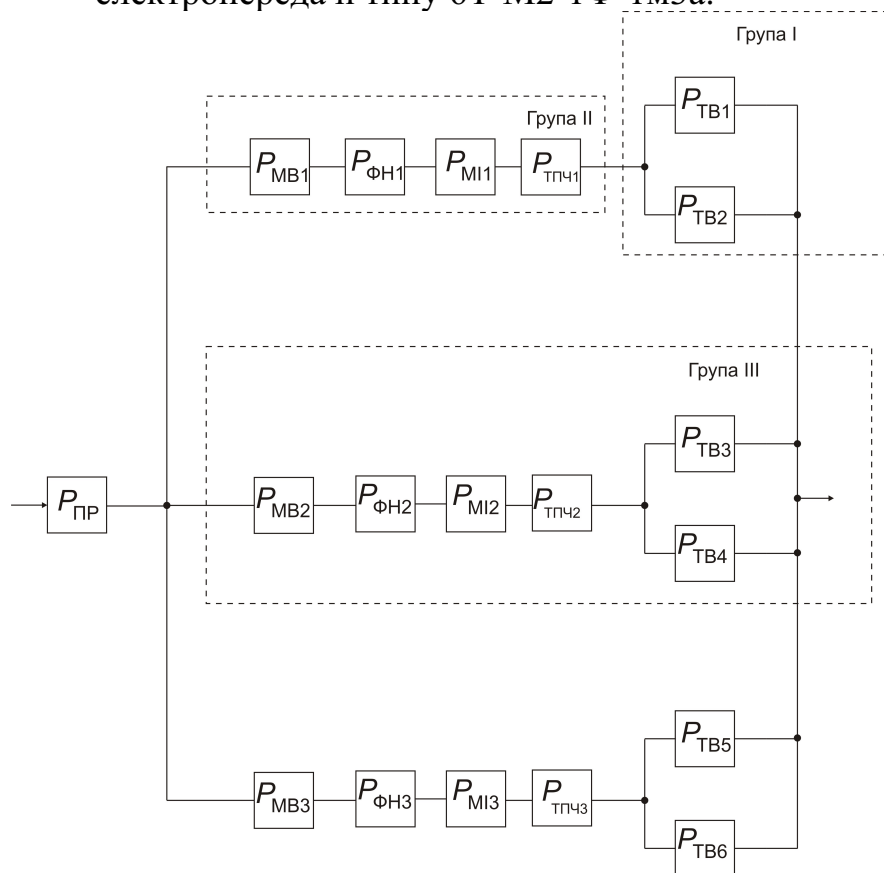


Рис. В.50. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М2-1Ф-3м1а.

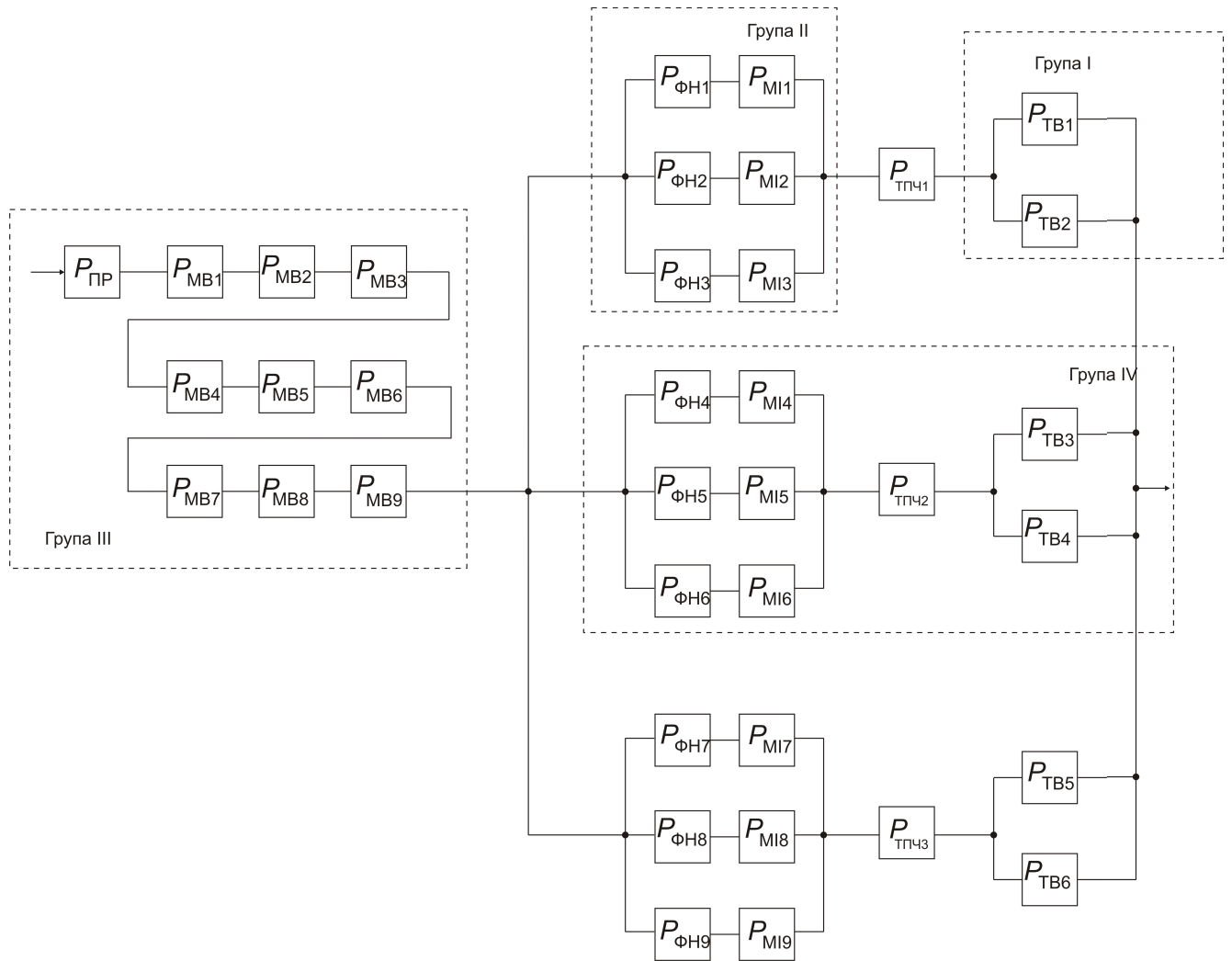


Рис. В.51. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М2-3Ф-1м9а.

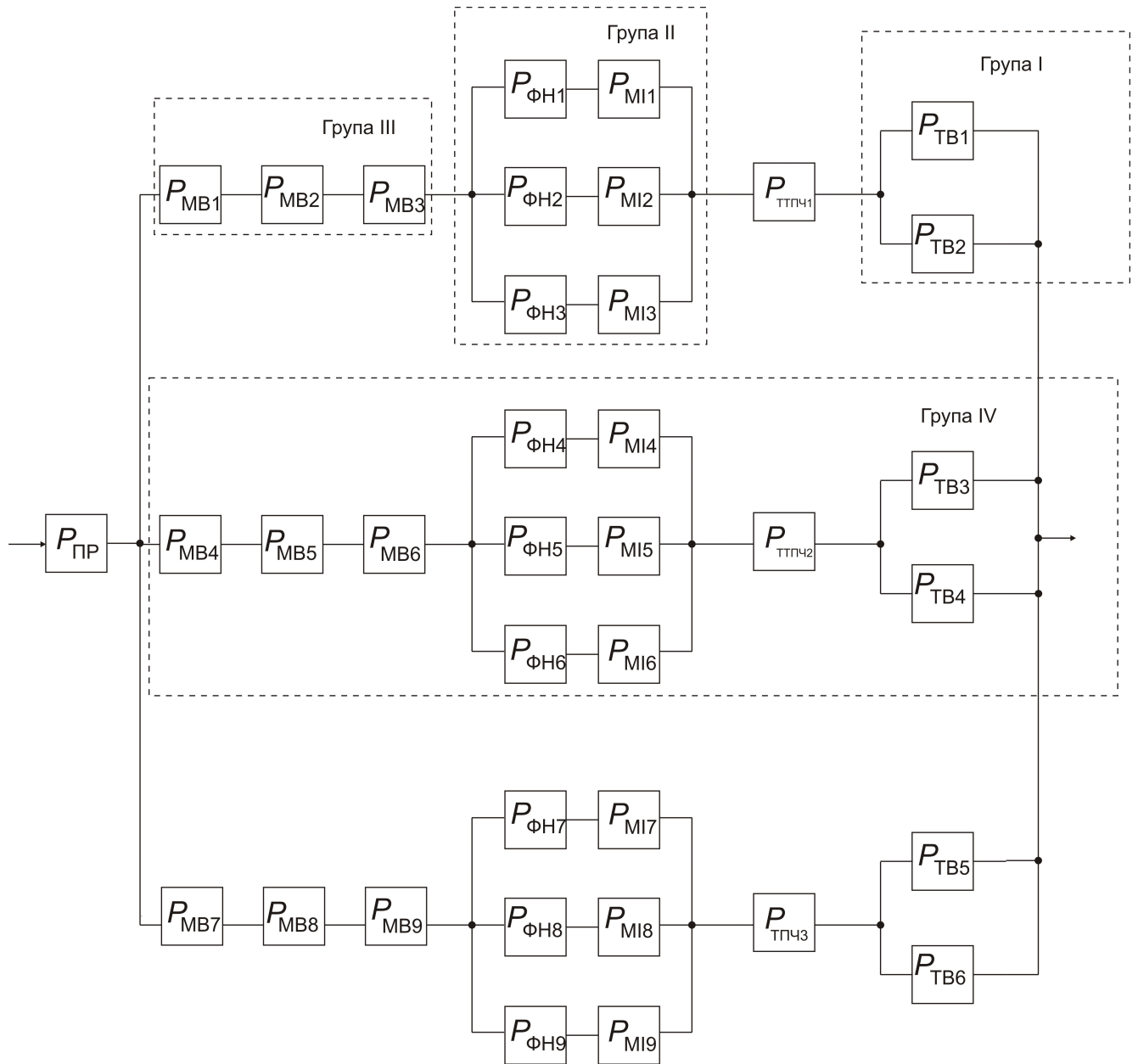


Рис. В.52. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М2-3Φ-3М3а.

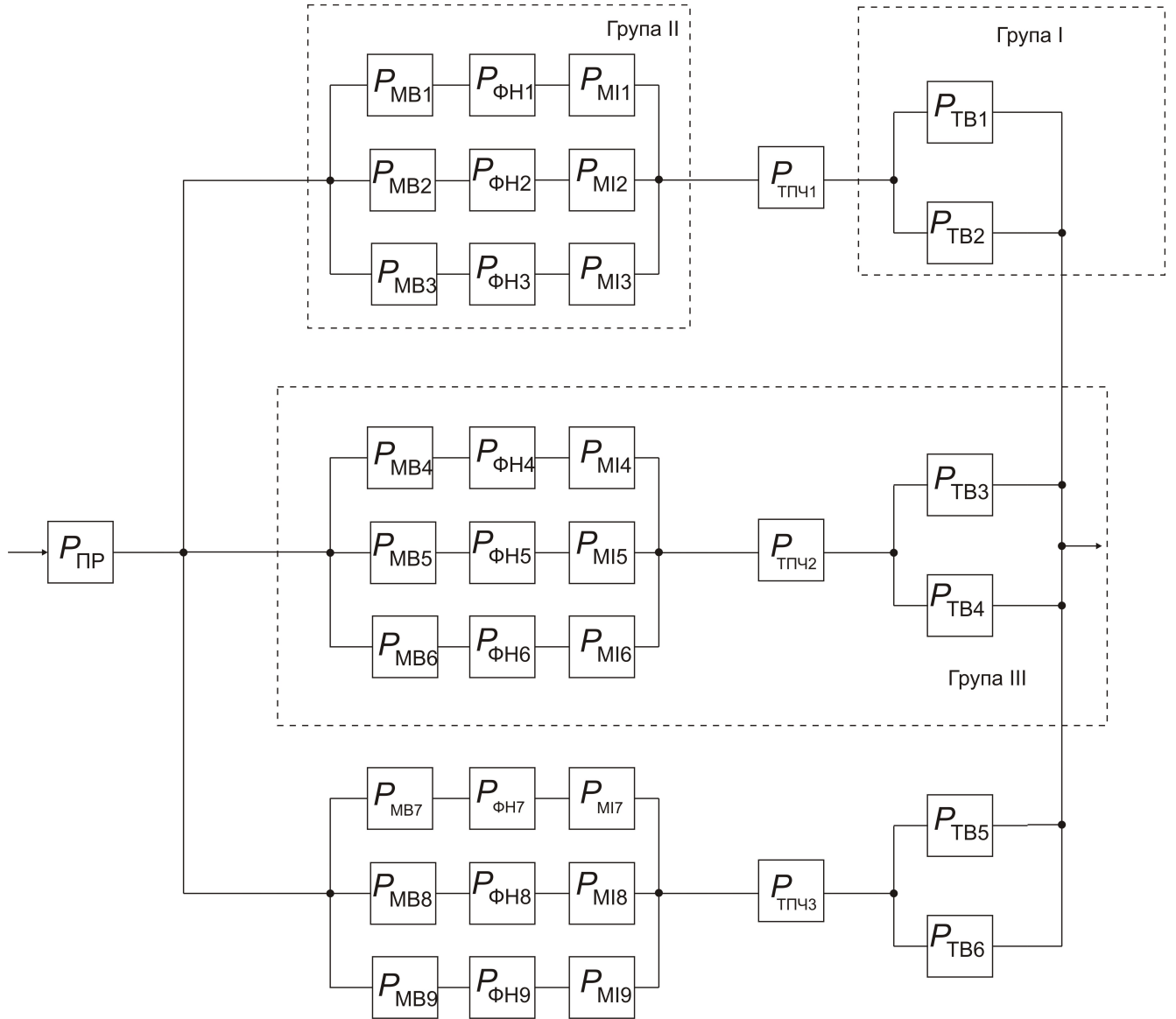


Рис. В.53. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М2-3Ф-9м1а.

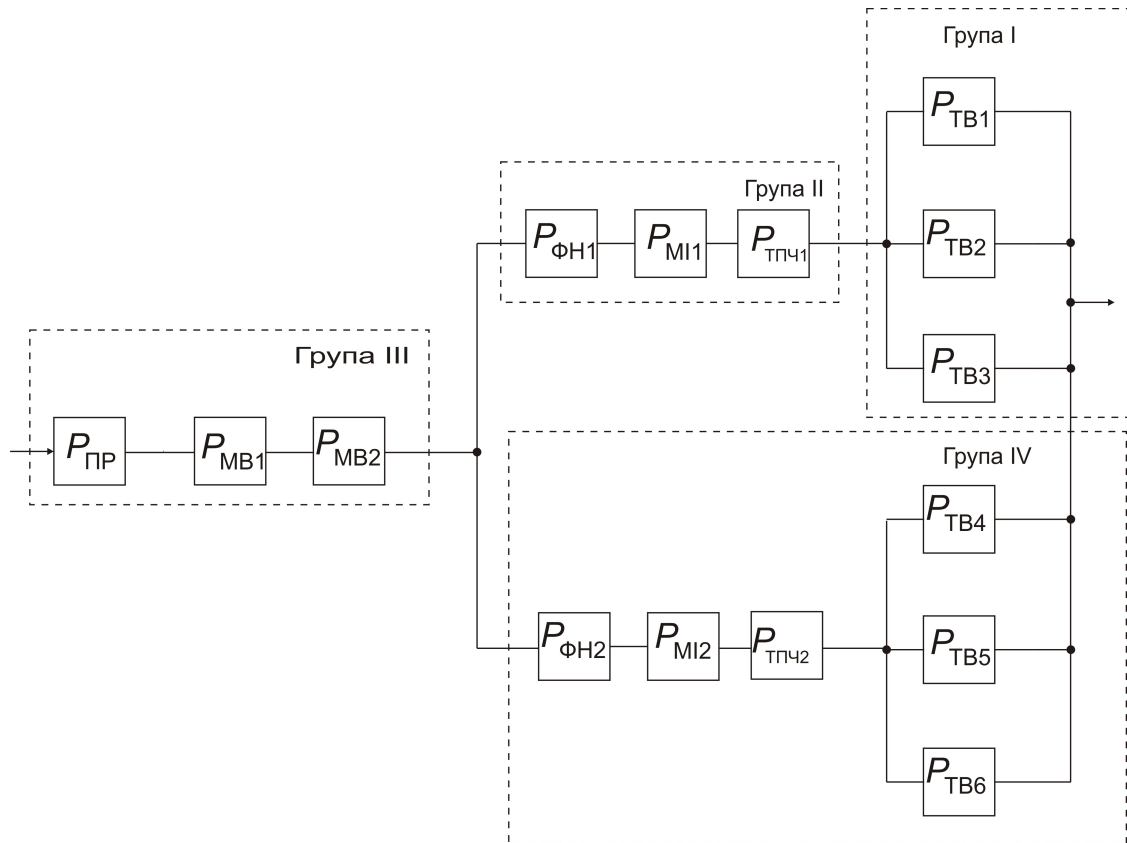


Рис. В.54. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М3-1Ф-1м2а.

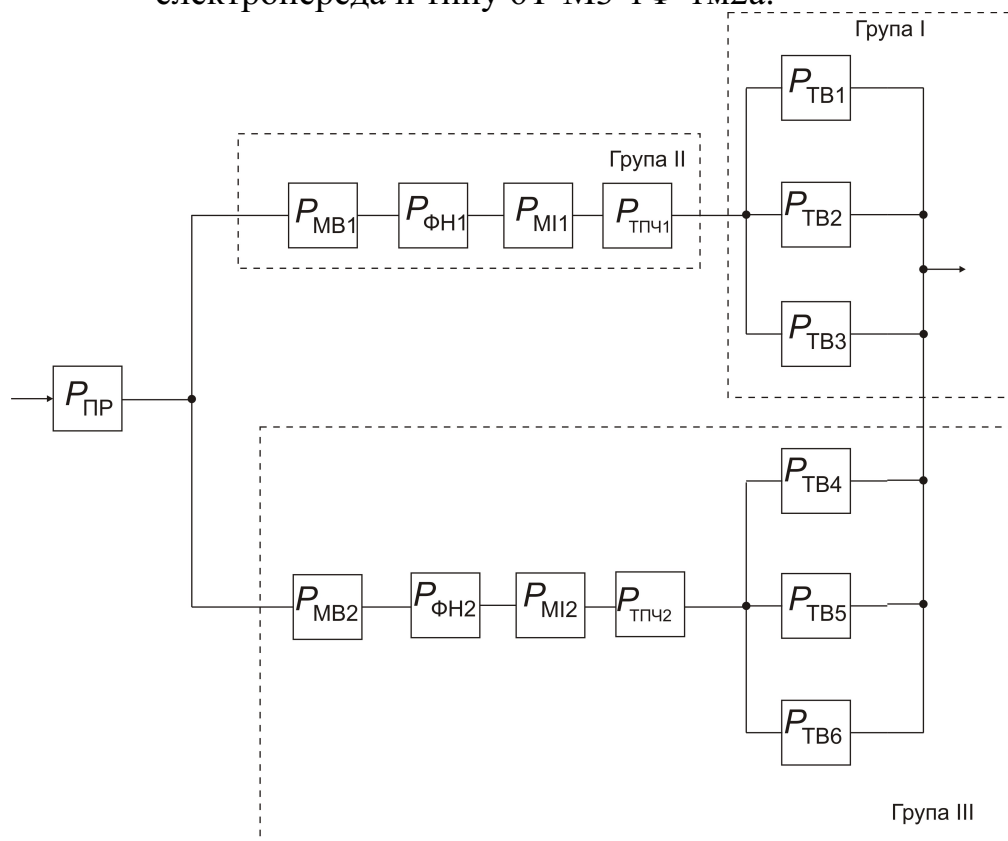


Рис. В.55. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М3-1Ф-2м1а.

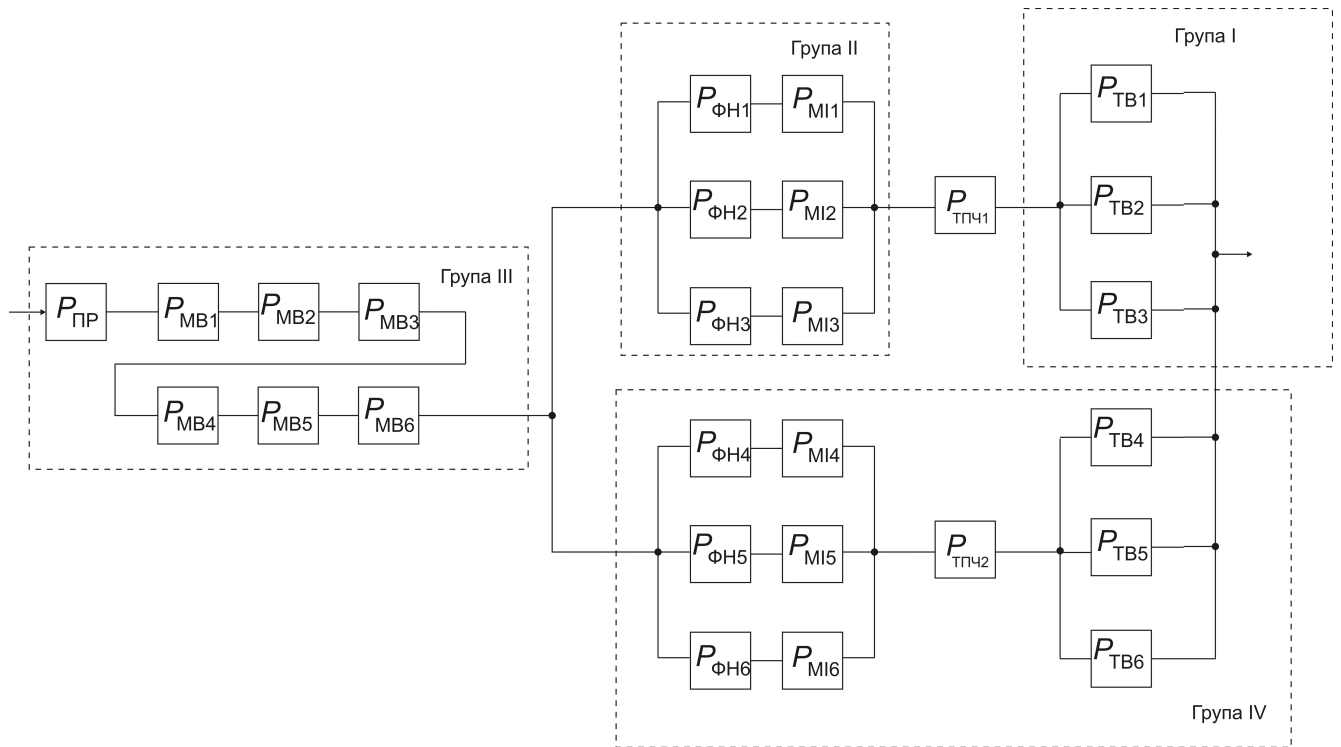


Рис. В.56. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М3-3Ф-1мба.

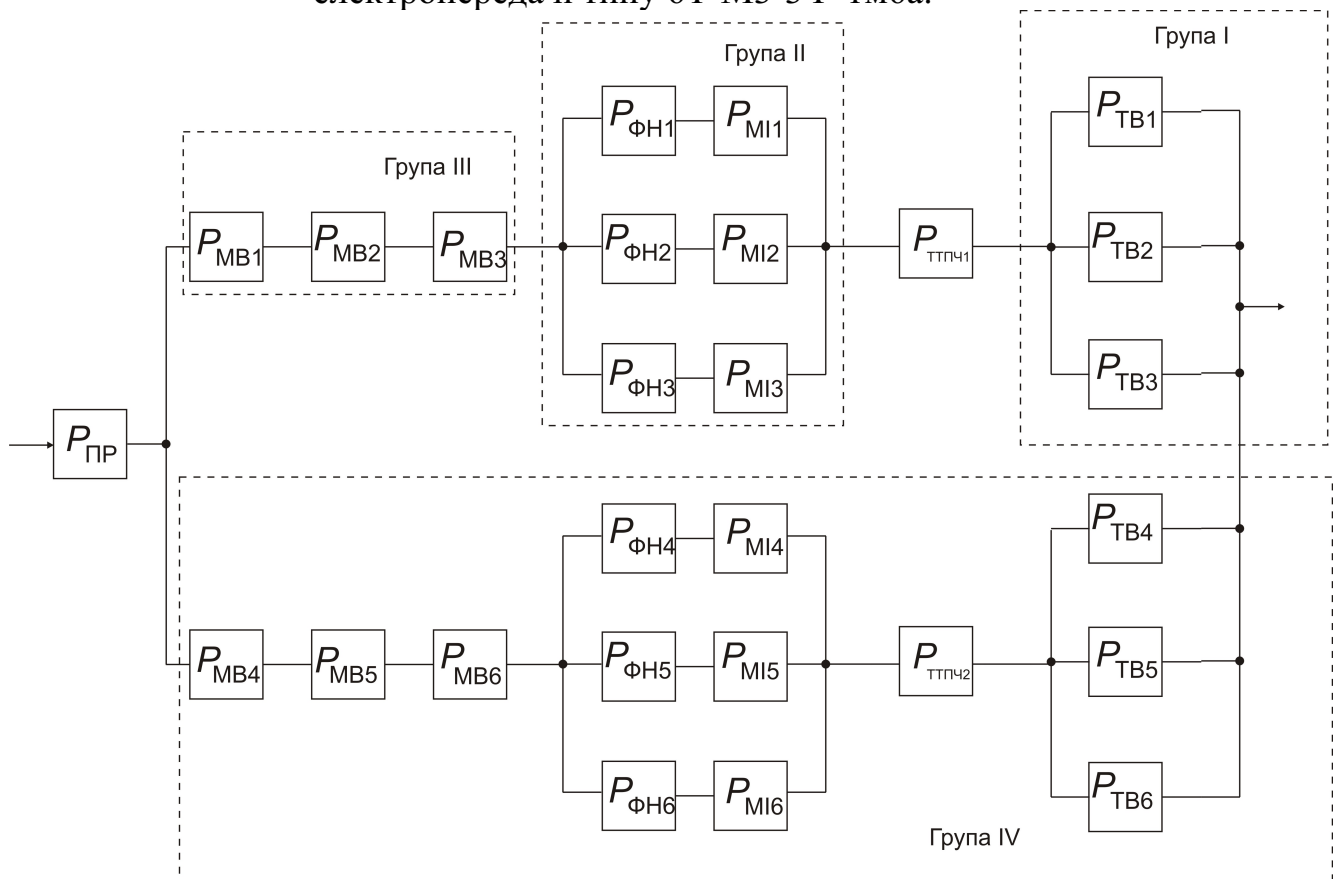


Рис. В.57. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М3-3Ф-2м3а.

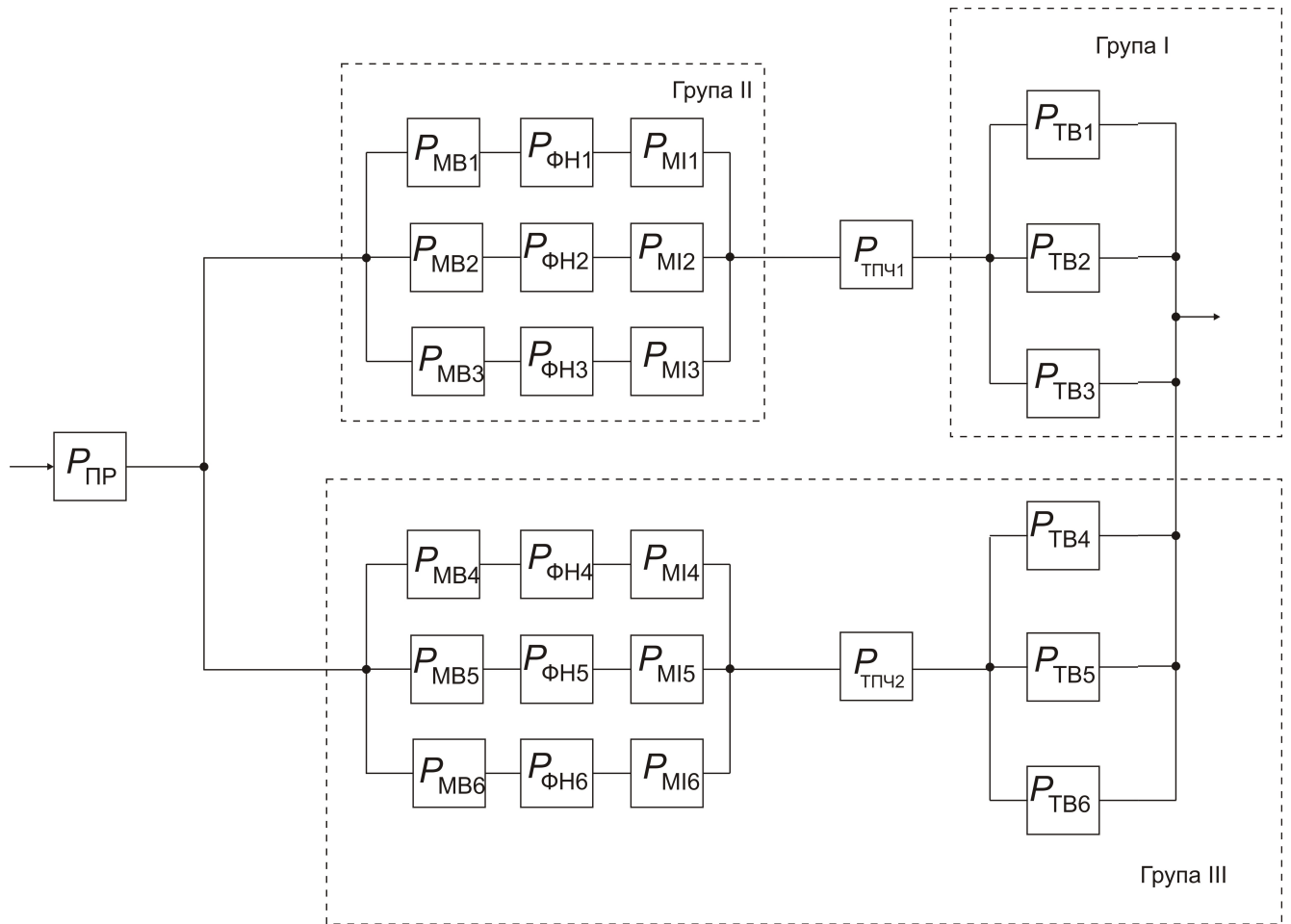


Рис. В.58. Схема для дослідження структурної надійності перетворювача тягової електропередачі типу 6Т-М3-3Ф-6м1а.

ДОДАТОК Д

Параметри мережевих випрямлячів

Таблиця Д.1

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача		кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
1		2	3	4	5	6	7
1	4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	750	250	6,00	60	41,67	0,69
2	4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	750	250	0,50	5	500,00	100,00
3	4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	750	250	2,00	20	125,00	6,25
4	4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
5	4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50
6	4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	1500	500	6,00	60	83,33	1,38

Таблиця Д.2

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача		кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а		750	250	12,00	120	20,83	0,17
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а		750	250	1,00	10	250,00	25,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а		750	250	4,00	40	62,50	1,56
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а		1500	500	2,00	20	250,00	12,50
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а		1500	500	4,00	40	125,00	3,13
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а		1500	500	12,00	120	41,67	0,35

Таблиця Д.3

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	750	250	24,00	240	10,42	0,04
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	750	250	2,00	20	125,00	6,25
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	750	250	8,00	80	31,25	0,39
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	1500	500	4,00	40	125,00	3,13
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	1500	500	8,00	80	62,50	0,78
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	1500	500	24,00	240	20,83	0,09

Таблиця Д.4

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	750	250	35,25	353	7,09	0,02
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	750	250	2,94	30	85,11	2,84
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	750	250	11,75	118	21,28	0,18
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	1500	500	5,88	59	85,11	1,44
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	1500	500	11,75	118	42,55	0,36
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	1500	500	35,25	353	14,18	0,04

Таблиця Д.5

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	1500	500	3,00	30	166,67	5,56
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	1500	500	0,25	3	2000,00	666,67
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	3000	1000	0,50	5	2000,00	400,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	1000	3,00	30	333,33	11,11

Таблиця Д.6

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	1500	500	6,00	60	83,33	1,39
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	1500	500	0,50	5	1000,00	200,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	1000	6,00	60	166,67	2,78

Таблиця Д.7

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	1500	500	12,00	120	41,67	0,35
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	1500	500	4,00	40	125,00	3,13
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	1000	4,00	40	250,00	6,25
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	1000	12,00	120	83,33	0,69

Таблиця Д.8

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	1500	500	24,00	240	20,83	0,09
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	1500	500	8,00	80	62,50	0,78
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	3000	1000	4,00	40	250,00	6,25
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	1000	8,00	80	125,00	1,56
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	1000	24,00	240	41,67	0,17

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	1500	500	35,25	353	14,18	0,04
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	1500	500	2,94	30	170,21	5,67
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	1500	500	11,75	118	42,55	0,36
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	3000	1000	5,88	59	170,21	2,88
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	1000	11,75	118	85,11	0,72
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	1000	35,25	353	28,37	0,08

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	2250	750	3,00	30	250,00	8,33
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	2250	750	0,25	3	3000,00	1000,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	2250	750	1,00	10	750,00	75,00
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	4500	1500	0,50	5	3000,00	600,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	4500	1500	1,00	10	1500,00	150,00
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	4500	1500	3,00	30	500,00	16,67

Таблиця Д.11

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	2250	750	6,00	60	125,00	2,08
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	2250	750	0,50	5	1500,00	300,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	2250	750	2,00	20	375,00	18,75
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	4500	1500	1,00	10	1500,00	150,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	4500	1500	2,00	20	750,00	37,50
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	4500	1500	6,00	60	250,00	4,17

Таблиця Д.12

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	2250	750	12,00	120	62,50	0,52
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	2250	750	1,00	10	750,00	75,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	2250	750	4,00	40	187,50	4,69
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	4500	1500	2,00	20	750,00	37,50
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	4500	1500	4,00	40	375,00	9,38
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	4500	1500	12,00	120	125,00	1,04

Таблиця Д.13

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	2250	750	24,00	240	31,25	0,13
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	2250	750	2,00	20	375,00	18,75
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	2250	750	8,00	80	93,75	1,17
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	4500	1500	4,00	40	375,00	9,38
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	4500	1500	8,00	80	187,50	2,34
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	4500	1500	24,00	240	62,50	0,26

Таблиця Д.14

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	2250	750	35,25	353	21,28	0,06
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	2250	750	2,94	30	255,32	8,51
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	2250	750	11,75	118	63,83	0,54
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	4500	1500	5,88	59	255,32	4,33
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	4500	1500	11,75	118	127,66	1,08
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	4500	1500	35,25	353	42,55	0,12

Таблиця Д.15

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000	1000	3,00	30	333,33	11,11
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	3000	1000	0,25	3	4000,00	1333,33
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	6000	2000	0,50	5	4000,00	800,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	6000	2000	1,00	10	2000,00	200,00
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	6000	2000	3,00	30	666,67	22,22

Таблиця Д.16

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000	1000	6,00	60	166,67	2,78
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	3000	1000	0,50	5	2000,00	400,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	6000	2000	1,00	10	2000,00	200,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	6000	2000	2,00	20	1000,00	50,00
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	6000	2000	6,00	60	333,33	5,56

Таблиця Д.17

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000	1000	12,00	120	83,33	0,69
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	1000	4,00	40	250,00	6,25
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	6000	2000	2,00	20	1000,00	50,00
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	6000	2000	4,00	40	500,00	12,50
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	6000	2000	12,00	120	166,67	1,39

Таблиця Д.18

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000	1000	24,00	240	41,67	0,17
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	1000	8,00	80	125,00	1,56
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	6000	2000	4,00	40	500,00	12,50
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	6000	2000	8,00	80	250,00	3,13
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	6000	2000	24,00	240	83,33	0,35

Таблиця Д.19

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення чотирьох тягових двигунів (потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000	1000	35,25	353	28,37	0,08
4Т(А)-М1-3Ф-1м12а	3000	1000	2,94	30	340,43	11,35
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	1000	11,75	118	85,11	0,72
4Т(А)-М2-3Ф-1м6а	6000	2000	5,88	59	340,43	5,77
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	6000	2000	11,75	118	170,21	1,44
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	6000	2000	35,25	353	56,74	0,16

Таблиця Д.20

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	500	167	6,00	60	27,78	0,46
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	500	167	0,33	4	500,00	125,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	500	167	1,00	10	166,67	16,67
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	500	167	2,00	20	83,33	4,17
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	1000	333	0,67	7	500,00	71,43
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	1000	333	2,00	20	166,67	8,33
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	1000	333	6,00	60	55,56	0,93
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	1500	500	6,00	60	83,33	1,39

Таблиця Д.21

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів (потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	500	167	12,00	120	13,89	0,12
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	500	167	0,67	7	250,00	35,71
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	500	167	2,00	20	83,33	4,17
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	500	167	4,00	40	41,67	1,04
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	1000	333	1,33	14	250,00	17,86
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	1000	333	4,00	40	83,33	2,08
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	1000	333	12,00	120	27,78	0,23
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50

6T(A)-M3-3Φ-2M3a	1500	500	4,00	40	125,00	3,13
6T(A)-M3-3Φ-6M1a	1500	500	12,00	120	41,67	0,35

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	500	167	24,00	240	6,94	0,03
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	500	167	1,33	14	125,00	8,93
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	500	167	4,00	40	41,67	1,04
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	500	167	8,00	80	20,83	0,26
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	1000	333	2,67	27	125,00	4,63
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	1000	333	8,00	80	41,67	0,52
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	1000	333	24,00	240	13,89	0,06
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	1500	500	4,00	40	125,00	3,13
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	1500	500	8,00	80	62,50	0,78
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	1500	500	24,00	240	20,83	0,09

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 3000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	500	167	35,25	353	4,73	0,01
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	500	167	1,96	20	85,11	4,26
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	500	167	5,88	59	28,37	0,48
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	500	167	11,75	118	14,18	0,12
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	1000	333	3,92	40	85,11	2,13
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	1000	333	11,75	118	28,37	0,24
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	1000	333	35,25	353	9,46	0,03
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	1500	500	5,88	59	85,11	1,44
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	1500	500	11,75	118	42,55	0,36
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	1500	500	35,25	353	14,18	0,04

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1000	333	3,00	30	111,11	3,70
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1000	333	0,17	2	2000,00	1000,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1000	333	0,50	5	666,67	133,33
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1000	333	1,00	10	333,33	33,33
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	2000	667	0,33	4	2000,00	500,00
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	2000	667	1,00	10	666,67	66,67
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	2000	667	3,00	30	222,22	7,41
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	3000	1000	0,50	5	2000,00	400,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	1000	3,00	30	333,33	11,11

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1000	333	6,00	60	55,56	0,93
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1000	333	0,33	4	1000,00	250,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1000	333	1,00	10	333,33	33,33
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1000	333	2,00	20	166,67	8,33
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	2000	667	0,67	7	1000,00	142,86
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	2000	667	2,00	20	333,33	16,67
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	2000	667	6,00	60	111,11	1,85
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	1000	6,00	60	166,67	2,78

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1000	333	12,00	120	27,78	0,23
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1000	333	0,67	7	500,00	71,43
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1000	333	2,00	20	166,67	8,33
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1000	333	4,00	40	83,33	2,08
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	2000	667	1,33	14	500,00	35,71
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	2000	667	4,00	40	166,67	4,17
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	2000	667	12,00	120	55,56	0,46
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	1000	4,00	40	250,00	6,25
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	1000	12,00	120	83,33	0,69

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1000	333	24,00	240	13,89	0,06
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1000	333	1,33	14	250,00	17,86
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1000	333	4,00	40	83,33	2,08
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1000	333	8,00	80	41,67	0,52
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	2000	667	2,67	27	250,00	9,26
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	2000	667	8,00	80	83,33	1,04
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	2000	667	24,00	240	27,78	0,12
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	3000	1000	4,00	40	250,00	6,25
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	1000	8,00	80	125,00	1,56
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	1000	24,00	240	41,67	0,17

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 6000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1000	333	35,25	353	9,46	0,03
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1000	333	1,96	20	170,21	8,51
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1000	333	5,88	59	56,74	0,96
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1000	333	11,75	118	28,37	0,24
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	2000	667	3,92	40	170,21	4,26
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	2000	667	11,75	118	56,74	0,48
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	2000	667	35,25	353	18,91	0,05
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	3000	1000	5,88	59	170,21	2,88
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	1000	11,75	118	85,11	0,72
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	1000	35,25	353	28,37	0,08

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1500	500	3,00	30	166,67	5,56
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1500	500	0,17	2	3000,00	1500,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1500	500	0,50	5	1000,00	200,00
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	3000	1000	0,33	4	3000,00	750,00
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	1000	1,00	10	1000,00	100,00
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000	1000	3,00	30	333,33	11,11
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	4500	1500	0,50	5	3000,00	600,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	4500	1500	1,00	10	1500,00	150,00
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	4500	1500	3,00	30	500,00	16,67

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1500	500	6,00	60	83,33	1,39
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1500	500	0,33	4	1500,00	375,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1500	500	1,00	10	500,00	50,00
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	3000	1000	0,67	7	1500,00	214,29
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	1000	2,00	20	500,00	25,00
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000	1000	6,00	60	166,67	2,78
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	4500	1500	1,00	10	1500,00	150,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	4500	1500	2,00	20	750,00	37,50
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	4500	1500	6,00	60	250,00	4,17

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1500	500	12,00	120	41,67	0,35
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1500	500	0,67	7	750,00	107,14
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1500	500	2,00	20	250,00	12,50
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1500	500	4,00	40	125,00	3,13
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	3000	1000	1,33	14	750,00	53,57
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	1000	4,00	40	250,00	6,25
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000	1000	12,00	120	83,33	0,69
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	4500	1500	2,00	20	750,00	37,50
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	4500	1500	4,00	40	375,00	9,38
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	4500	1500	12,00	120	125,00	1,04

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1500	500	24,00	240	20,83	0,09
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1500	500	1,33	14	375,00	26,79
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1500	500	4,00	40	125,00	3,13
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1500	500	8,00	80	62,50	0,78
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	3000	1000	2,67	27	375,00	13,89
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	1000	8,00	80	125,00	1,56
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000	1000	24,00	240	41,67	0,17
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	4500	1500	4,00	40	375,00	9,38
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	4500	1500	8,00	80	187,50	2,34
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	4500	1500	24,00	240	62,50	0,26

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 9000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	1500	500	35,25	353	14,18	0,04
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	1500	500	1,96	20	255,32	12,77
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	1500	500	5,88	59	85,11	1,44
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	1500	500	11,75	118	42,55	0,36
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	3000	1000	3,92	40	255,32	6,38
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	1000	11,75	118	85,11	0,72
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000	1000	35,25	353	28,37	0,08
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	4500	1500	5,88	59	255,32	4,33
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	4500	1500	11,75	118	127,66	1,08
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	4500	1500	35,25	353	42,55	0,12

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 3 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	2000	667	3,00	30	222,22	7,41
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	2000	667	0,17	2	4000,00	2000,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	2000	667	0,50	5	1333,33	266,67
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	2000	667	1,00	10	666,67	66,67
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	4000	1333	0,33	4	4000,00	1000,00
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	4000	1333	1,00	10	1333,33	133,33
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	4000	1333	3,00	30	444,44	14,81
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	6000	2000	0,50	5	4000,00	800,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	6000	2000	1,00	10	2000,00	200,00
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	6000	2000	3,00	30	666,67	22,22

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 6 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	2000	667	6,00	60	111,11	1,85
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	2000	667	0,33	4	2000,00	500,00
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	2000	667	1,00	10	666,67	66,67
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	2000	667	2,00	20	333,33	16,67
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	4000	1333	0,67	7	2000,00	285,71
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	4000	1333	2,00	20	666,67	33,33
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	4000	1333	6,00	60	222,22	3,70
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	6000	2000	1,00	10	2000,00	200,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	6000	2000	2,00	20	1000,00	50,00
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	6000	2000	6,00	60	333,33	5,56

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 12 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	2000	667	12,00	120	55,56	0,46
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	2000	667	0,67	7	1000,00	142,86
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	2000	667	2,00	20	333,33	16,67
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	2000	667	4,00	40	166,67	4,17
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	4000	1333	1,33	14	1000,00	71,43
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	4000	1333	4,00	40	333,33	8,33
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	4000	1333	12,00	120	111,11	0,93
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	6000	2000	2,00	20	1000,00	50,00
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	6000	2000	4,00	40	500,00	12,50
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	6000	2000	12,00	120	166,67	1,39

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 24 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	2000	667	24,00	240	27,78	0,12
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	2000	667	1,33	14	500,00	35,71
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	2000	667	4,00	40	166,67	4,17
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	2000	667	8,00	80	83,33	1,04
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	4000	1333	2,67	27	500,00	18,52
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	4000	1333	8,00	80	166,67	2,08
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	4000	1333	24,00	240	55,56	0,23
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	6000	2000	4,00	40	500,00	12,50
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	6000	2000	8,00	80	250,00	3,13
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	6000	2000	24,00	240	83,33	0,35

Параметри мережевих випрямлячів перетворювача для живлення шести тягових двигунів
(потужність перетворювача 12000 кВт, напруга контактної мережі 25 кВ).

Структура перетворювача	кВт	кВт	кВ	Клас вентилів МВ	, А	СК
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	2000	667	35,25	353	18,91	0,05
6Т(А)-М1-3Ф-1м18а	2000	667	1,96	20	340,43	17,02
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	2000	667	5,88	59	113,48	1,92
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	2000	667	11,75	118	56,74	0,48
6Т(А)-М2-3Ф-1м9а	4000	1333	3,92	40	340,43	8,51
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	4000	1333	11,75	118	113,48	0,96
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	4000	1333	35,25	353	37,83	0,11
6Т(А)-М3-3Ф-1м6а	6000	2000	5,88	59	340,43	5,77
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	6000	2000	11,75	118	170,21	1,44
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	6000	2000	35,25	353	56,74	0,16

Додаток Е

Витяг з прайс-листів по силовим напівпровідниковим приладам російського виробництва
[139, 140, 141]

Таблиця Е.1

Витяг по випрямним діодам

№	Тип	Струм, А	Клас	Вартість, руб
1	2	3	4	5
1	Д 143-1000	1000	6	2137,81
2	Д 253-4000	4000	6	4899,43
3	Д 143-630	630	8	2468,41
4	Д 143-800	800	8	2304,86
5	Д 143-1250	1250	8	2273,32
6	Д 253-1600	1600	8	4628,41
7	Д 253-2000	2000	8	5053,63
8	В6-200, 200Х	630	8	2749,94
9	Д 143	2000	8	3885,4
10	Д 233	1600	8	2864,52
11	Д 253	3200	8	6799,9
12	Д 253	4000	8	6865,93
13	Д 161-200	200	12	1205,58
14	Д 161-250	250	12	1268,67
15	Д 123-500	500	12	1372,64
16	Д 133-500	500	12	1829,4
17	Д 133-630	630	12	1949,73
18	Д 133-800	800	12	1667,02
19	Д 133-1000	1000	12	1738,28
20	Д 173-5000	5000	12	10978,7
21	Д 273-5000	5000	12	11187,9
22	Д173-6300	6300	12	10770,8
23	Д 106Х	10	12	39,26
24	Д 106Х	16	12	39,26
25	Д 106Х	20	12	41,05
26	Д 106Х	25	12	41,05
27	Д 112(Х)	10	12	80,31
28	Д 112(Х)	16	12	83,88
29	Д 112(Х)	25	12	92,81
30	Д 115	10	12	107,09
31	Д 115	16	12	110,65

1	2	3	4	5
32	Д 115	20	12	112,44
33	Д 122(X)	32	12	108,87
34	Д 122(X)	40	12	121,36
35	Д 132(X)	50	12	208,82
36	Д 132(X)	63	12	228,45
37	Д 132(X)	80	12	244,51
38	Д 142(X)	80	12	324,82
39	Д 142(X)	100	12	330,18
40	Д 165	80	12	371,23
41	Д 165	100	12	378,37
42	Д 141(X)	80	13	351,6
43	Д 141(X)	100	13	449,76
44	Д 151(X)	125	13	679,99
45	Д 151(X)	160	13	694,27
46	Д 161X	200	13	1809,74
47	Д 161(X)	250	13	1923,96
48	Д 161(X)	320	13	1981,07
49	Д 171	400	13	2605,74
50	Д 171(X)	500	13	2827,04
51	Д 273-2500	2500	14	12359,6
52	Д 212-10	10	16	165,88
53	Д 212-16	16	16	183,41
54	Д 222-40	40	16	232,47
55	Д 161-320	320	16	1357,45
56	Д 161-400	400	16	1457,91
57	Д 171-400	400	16	1919,35
58	Д 133-400	400	16	2092,25
59	Д 233-500	500	16	1857,44
60	Д 233-1000	1000	16	2046,69
61	Д 243-1000	1000	16	2435,7
62	Д 123	500	16	1988,21
63	Д 161(X)	250	16	1845,43
64	Д 161(X)	250	16	1963,23
65	Д 161(X)	320	16	2020,34
66	Д 165	100	16	378,37
67	Д 165	100	16	385,51
68	Д 212-25	25	18	218,45
69	Д 222-32	32	18	225,46
70	Д 141-100	100	18	1272,17
71	Д 151-125	125	18	1306,05
72	Д 151-160	160	18	1369,13

1	2	3	4	5
73	Д 153-800	800	18	6963,64
74	Д 173-4000	4000	18	11009,1
75	Д 112(X)	10	18	82,1
76	Д 112(X)	16	18	83,88
77	Д 112(X)	25	18	99,95
78	Д 122(X)	32	18	112,44
79	Д 122(X)	40	18	123,15
80	Д 132(X)	50	18	221,31
81	Д 132(X)	63	18	244,51
82	Д 132(X)	80	18	251,65
83	Д 141(X)	80	18	356,95
84	Д 141(X)	100	18	460,47
85	Д 142(X)	80	18	330,18
86	Д 142(X)	100	18	335,53
87	Д 151(X)	125	18	694,27
88	Д 151(X)	160	18	708,55
89	Д 152	125	18	524,72
90	Д 152	160	18	553,27
91	Д 171(X)	400	18	2657,49
92	Д 171(X)	500	18	2884,16
93	Д 233	630	18	2646,78
94	Д 233	800	18	2700,33
95	Д 233	1000	18	2753,87
96	Д 243	1000	18	3210,77
97	Д 243	1250	18	3344,62
98	Д 253	1600	18	6301,95
99	Д 253	2000	18	6664,26
100	Д 253	2500	18	7312,12
101	Д 553	2000	18	6061,01
102	Д 553	2500	18	6519,69
103	Д 232-50	50	20	400,69
104	Д 232-63	63	20	399,52
105	Д 232-80	80	20	483,63
106	Д 223	320	22	2320,18
107	Д 243-800	800	24	2631,95
108	Д 233	800	24	2753,87
109	Д 233	1000	24	2807,41
110	Д 243	1250	24	3412,44
111	Д 173-3200	3200	26	11066,4
112	Д 553	2000	26	6182,37
113	Д 553	2500	26	6649,98

Продовження табл. Е.1

1	2	3	4	5
114	Д 223	320	28	2366,58
115	Д 253	2500	28	7458,47
116	Д 233	400	30	2495,08
117	Д 233	500	30	2543,27
118	Д 243	630	30	3183,99
119	Д 243	800	30	3232,18
120	Д 233	630	32	2700,33
121	Д 243	1000	32	3275,02
122	Д 253	1600	32	6428,67
123	Д 253	2000	32	6933,75
124	Д 223	250	34	2273,77
125	Д 233	400	36	2545,05
126	Д 233	500	36	2593,24
127	Д 243	630	36	3248,25
128	Д 243	800	36	3296,43
129	Д 253	2000	36	6798,11
130	Д 553	2500	36	6783,83
131	Д 553	2000	38	6305,52
132	Д 173-2000	2000	40	11192,5
133	Д173-2500	2500	40	11125,9
134	Д 223	250	44	2320,18
135	Д 233	400	44	2595,03
136	Д 233	500	44	2646,78
137	Д 243	630	44	3312,5
138	Д 243	800	44	3362,47
139	Д 253	1600	44	6557,17
140	Д 553	1600	44	5964,63
141	Д173-1250	1250	50	11263,8
142	Д 173-1600	1600	50	11214,7
143	Д105-630, 630Х	630	50	6553,6

Таблиця Е.2

Витяг по лавинним діодам

№	Тип	Струм, А	Клас	Вартість, руб
1	2	3	4	5
1	ДЛ212-10	10	4	178,73
2	ДЛ212-16	16	4	199,76
3	ДЛ212-25	25	4	209,11
4	ДЛ222-32	32	4	233,64

1	2	3	4	5
5	ДЛ132-50 (4-16)	50	4	240,00
6	ДЛ222-40	40	4	242,99
7	ДЛ132-63 (4-16)	63	4	252,00
8	ДЛ132-80 (4-16)	80	4	282,00
9	ДЛ232-50	50	4	396,02
10	ДЛ232-63	63	4	473,12
11	ДЛ232-80	80	4	521,02
12	ДЛ123-320 (4-16)	320	4	648,00
13	ДЛ161-200 (4-18)	200	4	660,00
14	ДЛ133-500 (4-16)	500	4	720,00
15	ДЛ171-320 (4-18)	320	4	900,00
16	ДЛ112-10 (4-16)	10	16	81,60
17	ДЛ112-16 (4-16)	16	16	90,00
18	ДЛ112-25 (4-16)	25	16	93,60
19	ДЛ122-32 (4-16)	32	16	141,60
20	ДЛ122-40 (4-16)	40	16	144,00
21	ДЛ165	80	16	464,04
22	ДЛ165	100	16	472,96
23	ДЛ161-200	200	16	1381,98
24	ДЛ123-320	320	16	1759,31
25	ДЛ133-500	500	16	1856,27
26	ДЛ123	320	16	1868,63
27	ДЛ153-2000 (16-20)	2000	16	3960,00
28	ДЛ112	10	18	135,64
29	ДЛ112	16	18	137,43
30	ДЛ112	25	18	141,00
31	ДЛ122	32	18	155,27
32	ДЛ122	40	18	169,55
33	ДЛ132	50	18	271,28
34	ДЛ132	63	18	278,42
35	ДЛ132	80	18	283,78
36	ДЛ142	80	18	474,74
37	ДЛ142	100	18	499,73
38	ДЛ152	160	18	722,82
39	ДЛ171-320	320	18	1950,89
40	ДЛ161	200	18	1997,14
41	ДЛ553	2500	18	2097,08
42	ДЛ233	500	18	2441,54

Продовження табл. Е.2

1	2	3	4	5
43	ДЛ171	320	18	2794,92
44	ДЛ171	400	18	2934,13
45	ДЛ253-2000 (12-18)	2000	18	3960,00
46	ДЛ153-2000	2000	20	5198,49
47	ДЛ153-1250 (22-32)	1250	22	3840,00
48	ДЛ153-1600 (22-32)	1600	22	3960,00
49	ДЛ233	500	24	2491,51
50	ДЛ243	800	24	4220,93
51	ДЛ253	1600	24	6405,47
52	ДЛ253	2000	24	6771,34
53	ДЛ553	2000	24	7108,66
54	ДЛ253	2500	24	7283,56
55	ДЛ553	2500	24	7645,87
56	ДЛ253	2500	28	7429,91
57	ДЛ253-1250 (22-32)	1250	32	3840,00
58	ДЛ253-1600 (22-32)	1600	32	3840,00
59	ДЛ153-1600	1600	32	5657,59
60	ДЛ153-1250	1250	32	6069,97
61	ДЛ253	1600	32	6533,97
62	ДЛ253	2000	32	6905,20
63	ДЛ553	2500	36	7801,14
64	ДЛ153-1000 (38-50)	1000	38	3720,00
65	ДЛ553	2000	38	7249,65

Таблиця Е.3

Витяг по низькочастотним тиристорам

№	Тип	Струм, А	Клас	Вартість, руб
1	2	3	4	5
1	Т 173-4000 (1-10)	4000	1	6360,00
2	Т 173-5000 (1-8)	5000	1	6600,00
3	Т 500 (1-16)	500	1	720,00
4	Т 173-3200 (2-10)	320	2	6000,00
5	Т 151-100 (3-18)	100	3	540,00
6	Т 123-200 (4-16)	200	4	648,00
7	Т 123-250 (4-16)	250	4	648,00
8	Т 123-320 (4-16)	320	4	678,00

1	2	3	4	5
9	T 143-1000 (1-10)	1000	4	2400,00
10	T 15-125 (4-18)	125	4	360,00
11	T 15-160 (4-16)	160	4	420,00
12	T 15-200 (4-18)	200	4	480,00
13	T 15-250 (4-16)	250	4	540,00
14	T 133-500 (1-8)	500	6	1134,00
15	T 133-630 (1-8)	630	6	1800,00
16	T 143-1000	1000	6	3960,20
17	T 143-1250 (1-8)	1250	6	2640,00
18	T 15-100 (1-16)	100	6	300,00
19	T 153-2000 (1-8)	2000	6	4200,00
20	T 161-125 (3-18)	125	6	696,00
21	T 171-200 (3-18)	200	6	1140,00
22	T 171-250 (3-18)	250	6	1140,00
23	T 2-12 (0.5-12)	12	6	72,00
24	T 2-25 (0.5-12)	25	6	84,00
25	T 25 (1-14)	25	6	90,00
26	T 261-160 (3-18)	160	6	708,00
27	T 9-250 (4-16)	250	6	504,00
28	T 123-500 (4-8)	500	8	1200,00
29	T 133	500	8	2477,23
30	T 133	630	8	2614,66
31	T 133-500	500	8	2334,06
32	T 133-630	630	8	2450,88
33	T 143	1000	8	4579,67
34	T 143	1250	8	4767,07
35	T 143-1250	1250	8	3852,72
36	T 143-500 (4-16)	500	8	1680,00
37	T 143-630 (4-16)	630	8	1800,00
38	T 153	1600	8	5896,81
39	T 153	2000	8	6426,88
40	T 153-2000	2000	8	5166,95
41	T 15-80 (1-18)	80	8	186,00
42	T 161-160 (3-18)	160	8	708,00
43	T 161-200 (3-18)	200	8	816,00
44	T 16-320 (4-18)	250	8	540,00
45	T 171-320	320	8	2410,00

1	2	3	4	5
46	T 173-5000	5000	8	17616,46
47	T 173-1600	1600	8	6166,31
48	T 173-2000	2000	8	6475,07
49	T 133-320 (9-24)	320	9	1080,00
50	T 133-400 (4-16)	400	9	1104,00
51	T 143-800 (9-16)	800	9	1920,00
52	T 233-500 (9-16)	500	9	1134,00
53	T 106	10	10	42,83
54	T 106	12,5	10	49,97
55	T 153-800 (10-18)	800	10	2400,00
56	T 16-400 (10-22)	400	10	552,00
57	T 16-500 (10-22)	500	10	618,00
58	T 171-200	200	10	2122,62
59	T 171-250	250	10	2242,94
60	T 171-320 (3-18)	320	10	1224,00
61	T 173-2500 (10-14)	2500	10	6000,00
62	T 173-3200	3200	10	15776,54
63	T 173-4000	4000	10	16457,60
64	T 253-1000 (10-18)	1000	10	2760,00
65	T 253-1250 (4-18)	1250	10	3000,00
66	T 271-250 (3-18)	250	10	1140,00
67	T 271-320 (3-18)	320	10	1200,00
68	T 10-10 (1-12)	10	12	72,00
69	T 10-12 (1-12)	12	12	72,00
70	T 10-16 (1-12)	16	12	84,00
71	T 10-20 (1-12)	20	12	96,00
72	T 10-25 (1-12)	25	12	108,00
73	T 10-40 (1-12)	40	12	138,00
74	T 10-50 (1-12)	20	12	162,00
75	T 10-63 (1-12)	63	12	210,00
76	T 10-80 (1-12)	80	12	216,00
77	T 112	10	12	73,17
78	T 112	16	12	78,53
79	T 112-16 (1-12)	16	12	72,00
80	T 115	6,3	12	124,93
81	T 115	10	12	128,50
82	T 115	16	12	130,29

1	2	3	4	5
83	T 122	20	12	99,95
84	T 122	25	12	114,22
85	T 122	32	12	116,01
86	T 122-20 (1-12)	20	12	96,00
87	T 122-25 (1-12)	25	12	104,40
88	T 122-32 (1-12)	32	12	105,60
89	T 132	50	12	255,22
90	T 132	63	12	321,26
91	T 132 H/B	40	12	199,89
92	T 132-40 (1-12)	40	12	186,00
93	T 132-50 (1-12)	50	12	234,00
94	T 142	80	12	381,94
95	T 142 H/B	63	12	326,61
96	T 142-63 (1-12)	63	12	300,00
97	T 142-80 (1-12)	80	12	348,00
98	T 143-500	500	12	2532,66
99	T 152	125	12	697,84
100	T 152 H/B	100	12	683,56
101	T 153-1600 (1-18)	1600	12	3000,00
102	T 161	125	12	2357,65
103	T 161	125	12	2405,84
104	T 161	160	12	2429,04
105	T 161	200	12	2462,96
106	T 161-125	125	12	1710,24
107	T 171	200	12	2976,96
108	T 171	250	12	3066,20
109	T 171	320	12	3094,76
110	T 171-200	200	12	2228,93
111	T 171-250	250	12	2355,09
112	T 212-10	10	12	165,88
113	T 212-16	16	12	183,41
114	T 453-1000 (10-18)	1000	12	4200,00
115	T2-160 (1-14)	160	14	3600,00
116	T 100 (1-14)	25	14	300,00
117	T 143-630	630	14	2556,02
118	T 173-2500	2500	14	15875,84
119	T 2-320 (1-14)	80	14	660,00

1	2	3	4	5
120	T 232-40	40	14	487,14
121	T 232-50	50	14	525,69
122	T 233-500	500	14	2367,94
123	T 242-63	63	14	595,78
124	T 242-80	80	14	663,54
125	T 50 (1-14)	50	14	156,00
126	T 123	200	16	1720,50
127	T 123	250	16	1943,59
128	T 123	320	16	2063,17
129	T 123-200	200	16	1835,24
130	T 123-250	250	16	1890,15
131	T 123-320	320	16	1967,25
132	T 123-500	500	16	2200,89
133	T 132 B/B	16	16	244,51
134	T 133-400	400	16	2279,16
135	T 142	40	16	442,62
136	T 142	50	16	456,90
137	T 142 B/B	32	16	435,48
138	T 143	500	16	2636,08
139	T 143	630	16	2661,06
140	T 143	800	16	3071,55
141	T 143-500	500	16	2413,50
142	T 143-630	630	16	2683,36
143	T 143-800	800	16	2742,93
144	T 151-100	100	16	1803,70
145	T 151-100	100	16	1892,48
146	T 152	80	16	633,59
147	T 152 B/B	63	16	533,64
148	T 153-800	800	16	4620,23
149	T 15-40 (4-16)	40	16	138,00
150	T 161	250	16	2511,14
151	T 161-160	160	16	1713,75
152	T 16-250 (4-18)	250	16	480,00
153	T 165	50	16	374,80
154	T 165	63	16	398,00
155	T 165	80	16	405,14

1	2	3	4	5
156	T 173-2000 (16-20)	2000	16	5400,00
157	T 222-20	20	16	259,34
158	T 222-25	25	16	274,53
159	T 233	400	16	2487,94
160	T 233	500	16	2539,70
161	T 243	630	16	3694,43
162	T 243	800	16	4072,80
163	T 243-500	500	16	2988,26
164	T 253-1000	1000	16	5718,34
165	T 253-1200	1200	16	5241,71
166	T 3-320 (16-24)	320	16	480,00
167	T 630 (16-24)	50	16	780,00
168	T 123	25	16	278,42
169	T 133	32	16	306,98
170	T 153	100	16	426,56
171	T 1000 (10-18)	200	18	1506,00
172	T 123-100	100	18	2075,89
173	T 123-200	200	18	1926,36
174	T 123-250	250	18	1983,60
175	T 123-320	320	18	2065,38
176	T 133-320	320	18	2383,13
177	T 133-400	400	18	2392,47
178	T 143-400 (18-24)	400	18	1680,00
179	T 153-1600	1600	18	5595,68
180	T 15-32 (4-18)	32	18	138,00
181	T 153-800	800	18	4850,37
182	T 161	160	18	2479,02
183	T 161-125	125	18	1631,98
184	T 161-160	160	18	1799,03
185	T 161-200	200	18	1803,70
186	T 171	200	18	3037,64
187	T 171	250	18	3128,67
188	T 171	320	18	3157,22
189	T 171-320	320	18	2530,32
190	T 233	320	18	2496,87

1	2	3	4	5
191	T 243	400	18	3362,47
192	T 243	500	18	3507,03
193	T 243-400	400	18	3350,40
194	T 253	1000	18	5880,75
195	T 253	1250	18	6002,11
196	T 253-1000	1000	18	6002,21
197	T 253-1200	1200	18	5503,39
198	T 261-160	160	18	1752,30
199	T 271-250	250	18	2346,91
200	T 271-320	320	18	2501,12
201	T 273-2000 (18-25)	2000	18	5400,00
202	T 453-1000	1000	18	5440,31
203	T 553	1000	18	5586,27
204	T 553	1250	18	5750,46
205	T 132	25	20	251,65
206	T 132	40	20	314,12
207	T 132-25 (12-20)	25	20	258,00
208	T 142	63	20	442,62
209	T 142	63	20	447,97
210	T 142	63	20	460,47
211	T 152	63	20	544,35
212	T 152	80	20	646,08
213	T 152-63 (12-20)	63	20	480,00
214	T 152-80 (12-20)	80	20	576,00
215	T 153-630 (20-24)	630	20	2160,00
216	T 173-2000	2000	20	15204,12
217	T 253-800 (20-24)	800	20	2400,00
218	T 273	2500	20	16194,82
219	T 273-1600 (20-26)	1600	20	5400,00
220	T 353-1000 (20-28)	1000	20	4104,00
221	T 142	25	20	283,78
222	T 353-2000	2000	20	14049,55
223	T 653	1000	22	6780,27
224	T 133-320	320	24	2502,28

1	2	3	4	5
225	T 143-400	400	24	2846,90
226	T 153-630	630	24	4703,17
227	T 173-1600 (24-34)	1600	24	5400,00
228	T 193-3200	3200	24	31655,88
229	T 233	320	24	2546,84
230	T 253-800	800	24	5308,30
231	T 353	800	24	6512,55
232	T 353	1000	24	6630,35
233	T 353-800 (24-34)	800	24	3420,00
234	T 453-630 (24-32)	630	24	3420,00
235	T 453-800 (24-28)	800	24	4104,00
236	T 653	800	24	7162,20
237	T 273-2000	2000	25	15964,62
238	T 193-2500	2500	26	32204,94
239	T 273-1600	1600	26	15698,27
240	T 453-800	800	26	7659,89
241	T 663	1600	26	13376,70
242	T 273	2000	26	15348,85
243	T 173-1250 (28-34)	1250	28	5160,00
244	T 243-500 (18-28)	500	28	1800,00
245	T 353	1000	28	6762,42
246	T 353-1000	1000	28	5739,37
247	T 453-800	800	28	8041,89
248	T 653	1000	28	6915,91
249	T 653-800	800	28	7672,74
250	T 453-630	630	30	8326,93
251	T 243	400	32	3839,00
252	T 243	500	32	4006,76
253	T 273	1600	32	14651,01
254	T 353	630	32	6385,84
255	T 353-800	800	32	7309,43
256	T 453-630	630	32	8712,44
257	T2-160	160	32	2885,45
258	T 173-1250	1250	34	13484,53
259	T 173-1600	1600	34	15478,65

1	2	3	4	5
260	T 353	630	34	6512,55
261	T 353	800	34	6642,84
262	T 353-800	800	34	7548,91
263	T 353-800	800	34	7675,07
264	T 653	800	34	7303,20
265	T 273-1250 (36-44)	1250	36	5160,00
266	T 553-500 (36-42)	500	36	4620,00
267	T 553-630 (36-42)	630	36	4680,00
268	T 553-800 (36-42)	800	36	4800,00
269	T253-630-38	630	38	3840,00
270	T 193-2000	2000	38	33199,08

Додаток Ж

Значення функції витрат відібраних перетворювальних структур

Таблиця Ж.1

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 6000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання некерованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	166,67	5,56	57,865
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	500,00	50,00	82,823
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	1000,0	100,00	143,499
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	333,33	11,11	57,865
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	111,11	3,70	57,865
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	666,67	133,33	74,698
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	333,33	33,33	58,145
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	666,67	66,67	105,128
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	222,22	7,41	57,865
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	1000,0	100,00	143,499
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	333,33	11,11	57,865
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	83,33	1,39	115,73
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	250,00	12,50	35,252
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	500,00	25,00	67,067
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	166,67	2,78	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	55,56	0,93	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	333,33	33,33	58,145
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	166,67	8,33	23,623
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	20	20	1	166,67	8,33	23,623
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	60	30	2	111,11	1,85	115,73
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	20	20	1	500,00	25,00	67,067
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	60	30	2	166,67	2,78	115,73

1	2	3	4	5	6	7
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	120	40	3	41,67	0,35	121,647
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	40	40	1	125,00	3,13	40,549
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	40	40	1	250,00	6,25	47,027
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	120	40	3	83,33	0,69	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	120	40	3	27,78	0,23	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	20	20	1	166,67	8,33	23,623
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	40	40	1	83,33	2,08	40,549
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	40	40	1	166,67	4,17	40,549
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	120	40	3	55,56	0,46	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	40	40	1	250,00	6,25	47,027
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	120	40	3	83,33	0,69	121,647
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	240	40	6	20,83	0,09	243,294
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	80	40	2	62,50	0,78	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	80	40	2	125,00	1,56	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	240	40	6	41,67	0,17	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	240	40	6	13,89	0,06	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	40	40	1	83,33	2,08	40,549
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	80	40	2	41,67	0,52	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	80	40	2	83,33	1,04	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	240	40	6	27,78	0,12	243,294
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	80	40	2	125,00	1,56	81,098
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	240	40	6	41,67	0,17	243,294
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	353	40	9	14,18	0,04	364,941
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	118	40	3	42,55	0,36	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	118	40	3	85,11	0,72	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	28,37	0,08	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	9,46	0,03	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	56,74	0,96	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	28,37	0,24	121,647

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	56,74	0,48	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	18,91	0,05	364,941
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	85,11	0,72	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	28,37	0,08	364,941

Таблиця Ж.2

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 9000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання некерованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	250,00	8,33	57,865
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	750,00	75,00	115,456
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	1500,0	150,00	188,303
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	500,00	16,67	90,421
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	166,67	5,56	57,865
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	1000,0	200,00	97,078
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	500,00	50,00	82,823
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	1000,0	100,00	143,499
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	333,33	11,11	57,865
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	1500,0	150,00	188,303
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	500,00	16,67	90,421
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	125,00	2,08	115,73
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	375,00	18,75	51,708
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	750,00	37,50	94,777
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	250,00	4,17	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	83,33	1,39	115,73

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	500,00	50,00	82,823
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	250,00	12,50	35,252
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	20	20	1	500,00	25,00	67,067
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	60	30	2	166,67	2,78	57,865
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	20	20	1	750,00	37,50	94,777
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	60	30	2	250,00	4,17	115,73
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	120	40	3	62,50	0,52	121,647
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	40	40	1	187,50	4,69	40,549
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	40	40	1	375,00	9,38	79,683
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	120	40	3	125,00	1,04	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	120	40	3	41,67	0,35	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	20	20	1	250,00	12,50	35,252
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	40	40	1	125,00	3,13	40,549
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	40	40	1	250,00	6,25	47,027
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	120	40	3	83,33	0,69	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	40	40	1	375,00	9,38	79,683
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	120	40	3	125,00	1,04	121,647
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	240	40	6	31,25	0,13	243,294
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	80	40	2	93,75	1,17	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	80	40	2	187,50	2,34	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	240	40	6	62,50	0,26	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	240	40	6	20,83	0,09	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	40	40	1	125,00	3,13	40,549
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	80	40	2	62,50	0,78	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	80	40	2	125,00	1,56	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	240	40	6	41,67	0,17	243,294
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	80	40	2	187,50	2,34	81,098
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	240	40	6	62,50	0,26	243,294
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	353	40	9	21,28	0,06	364,941

1	2	3	4	5	6	7
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	118	40	3	63,83	0,54	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	118	40	3	127,66	1,08	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	42,55	0,12	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	14,18	0,04	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	85,11	1,44	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	42,55	0,36	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	85,11	0,72	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	28,37	0,08	364,941
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	127,66	1,08	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	42,55	0,12	364,941

Таблиця Ж.3

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 12000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання некерованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	333,33	11,11	57,865
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	1000,0	100,00	143,499
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	2000,0	200,00	221,387
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	666,67	22,22	118,256
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	222,22	7,41	57,865
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	1333,3	266,67	114,358
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	666,67	66,67	105,128
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	1333,3	133,33	174,847
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	444,44	14,81	80,052
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	2000,0	200,00	221,387
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	666,67	22,22	118,256

1	2	3	4	5	6	7
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	166,67	2,78	115,73
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	500,00	25,00	67,067
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	1000,0	50,00	118,912
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	333,33	5,56	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	111,11	1,85	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	666,67	66,67	105,128
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	333,33	16,67	46,357
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	20	20	1	666,67	33,33	85,955
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	60	30	2	222,22	3,70	115,73
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	20	20	1	1000,0	50,00	118,912
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	60	30	2	333,33	5,56	115,73
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	120	40	3	83,33	0,69	121,647
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	40	40	1	250,00	6,25	47,027
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	40	40	1	500,00	12,50	107,808
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	120	40	3	166,67	1,39	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	120	40	3	55,56	0,46	121,647
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	20	20	1	333,33	16,67	46,357
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	40	40	1	166,67	4,17	40,549
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	40	40	1	333,33	8,33	69,256
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	120	40	3	111,11	0,93	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	40	40	1	500,00	12,50	107,808
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	120	40	3	166,67	1,39	121,647
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	240	40	6	41,67	0,17	243,294
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	80	40	2	125,00	1,56	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	80	40	2	250,00	3,13	81,098
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	240	40	6	83,33	0,35	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	240	40	6	27,78	0,12	243,294
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	40	40	1	166,67	4,17	40,549
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	80	40	2	83,33	1,04	81,098

Продовження табл. Ж.3

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	80	40	2	166,67	2,08	81,098
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	240	40	6	55,56	0,23	243,294
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	80	40	2	250,00	3,13	81,098
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	240	40	6	83,33	0,35	243,294
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	353	40	9	28,37	0,08	364,941
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	118	40	3	85,11	0,72	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	118	40	3	170,21	1,44	121,647
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	56,74	0,16	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	18,91	0,05	364,941
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	113,48	1,92	115,73
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	56,74	0,48	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	113,48	0,96	121,647
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	37,83	0,11	364,941
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	170,21	1,44	121,647
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	56,74	0,16	364,941

Таблиця Ж.4

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 3000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання керованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	83,33	2,78	74,948
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	250,00	25,00	49,799
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	500,00	50,00	84,058
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	166,67	5,56	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	55,56	1,85	74,948

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	333,33	66,67	43,24
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	166,67	16,67	37,536
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	333,33	33,33	61,628
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	111,11	3,70	74,948
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	500,00	50,00	84,058
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	166,67	5,56	74,948
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	41,67	1,38	149,896
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	125,00	6,25	20,552
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	250,00	12,50	53,001
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	83,33	1,39	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	27,78	0,46	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	166,67	16,67	37,536
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	83,33	4,17	9,05
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	20	20	1	166,67	8,33	31,696
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	60	30	2	55,56	0,93	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	20	20	1	250,00	12,50	53,001
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	60	30	2	83,33	1,39	149,896
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	120	40	3	20,83	0,17	224,844
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	40	40	1	62,50	1,56	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	40	40	1	125,00	3,13	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	120	40	3	41,67	0,35	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	120	40	3	13,89	0,12	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	20	20	1	83,33	4,17	9,05
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	40	40	1	41,67	1,04	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	40	40	1	83,33	2,08	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	120	40	3	27,78	0,23	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	40	40	1	125,00	3,13	74,948
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	120	40	3	41,67	0,35	224,844

1	2	3	4	5	6	7
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	240	40	6	10,42	0,04	449,688
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	80	40	2	31,25	0,39	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	80	40	2	62,50	0,78	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	240	40	6	20,83	0,09	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	240	40	6	6,94	0,03	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	40	40	1	41,67	1,04	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	80	40	2	20,83	0,26	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	80	40	2	41,67	0,52	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	240	40	6	13,89	0,06	449,688
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	80	40	2	62,50	0,78	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	240	40	6	20,83	0,09	449,688
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	353	40	9	7,09	0,02	674,532
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	118	40	3	21,28	0,18	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	118	40	3	42,55	0,36	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	14,18	0,04	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	4,73	0,01	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	28,37	0,48	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	14,18	0,12	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	28,37	0,24	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	9,46	0,03	674,532
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	42,55	0,36	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	14,18	0,04	674,532

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 6000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання керованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	166,67	5,56	74,948
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	500,00	50,00	84,058
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	1000,0	100,00	142,408
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	333,33	11,11	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	111,11	3,70	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	666,67	133,33	79,61
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	333,33	33,33	61,628
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	666,67	66,67	104,929
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	222,22	7,41	74,948
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	1000,0	100,00	142,408
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	333,33	11,11	74,948
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	83,33	1,39	149,896
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	250,00	12,50	53,001
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	500,00	25,00	109,333
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	166,67	2,78	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	55,56	0,93	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	333,33	33,33	61,628
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	166,67	8,33	31,696
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	20	20	1	166,67	8,33	31,696
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	60	30	2	111,11	1,85	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	20	20	1	500,00	25,00	109,333
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	60	30	2	166,67	2,78	149,896
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	120	40	3	41,67	0,35	224,844

1	2	3	4	5	6	7
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	40	40	1	125,00	3,13	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	40	40	1	250,00	6,25	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	120	40	3	83,33	0,69	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	120	40	3	27,78	0,23	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	20	20	1	166,67	8,33	31,696
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	40	40	1	83,33	2,08	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	40	40	1	166,67	4,17	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	120	40	3	55,56	0,46	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	40	40	1	250,00	6,25	74,948
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	120	40	3	83,33	0,69	224,844
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	240	40	6	20,83	0,09	449,688
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	80	40	2	62,50	0,78	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	80	40	2	125,00	1,56	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	240	40	6	41,67	0,17	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	240	40	6	13,89	0,06	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	40	40	1	83,33	2,08	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	80	40	2	41,67	0,52	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	80	40	2	83,33	1,04	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	240	40	6	27,78	0,12	449,688
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	80	40	2	125,00	1,56	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	240	40	6	41,67	0,17	449,688
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	353	40	9	14,18	0,04	674,532
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	118	40	3	42,55	0,36	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	118	40	3	85,11	0,72	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	353	40	9	28,37	0,08	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	353	40	9	9,46	0,03	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	59	30	2	56,74	0,96	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	118	40	3	28,37	0,24	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	118	40	3	56,74	0,48	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	353	40	9	18,91	0,05	674,532

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	85,11	0,72	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	28,37	0,08	674,532

Таблиця Ж.6

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 9000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання керованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	250,00	8,33	74,948
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	750,00	75,00	114,808
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	1500,0	150,00	189,417
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	500,00	16,67	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	166,67	5,56	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	1000,0	200,00	103,728
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	500,00	50,00	84,058
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	1000,0	100,00	142,0408
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	333,33	11,11	74,948
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	1500,0	150,00	189,417
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	500,00	16,67	125,826
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	125,00	2,08	149,896
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	20	20	1	375,00	18,75	82,506
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	20	20	1	750,00	37,50	155,904
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	60	30	2	250,00	4,17	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	60	30	2	83,33	1,39	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	10	10	1	500,00	50,00	84,058
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	20	20	1	250,00	12,50	53,001

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	20	20	1	500,00	25,00	109,333
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	60	30	2	166,67	2,78	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	20	20	1	750,00	37,50	155,904
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	60	30	2	250,00	4,17	149,896
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	120	40	3	62,50	0,52	224,844
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	40	40	1	187,50	4,69	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	40	40	1	375,00	9,38	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	120	40	3	125,00	1,04	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	120	40	3	41,67	0,35	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	20	20	1	250,00	12,50	53,001
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	40	40	1	125,00	3,13	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	40	40	1	250,00	6,25	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	120	40	3	83,33	0,69	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	40	40	1	375,00	9,38	74,948
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	120	40	3	125,00	1,04	224,844
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	240	40	6	31,25	0,13	449,688
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	80	40	2	93,75	1,17	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	80	40	2	187,50	2,34	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	240	40	6	62,50	0,26	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	240	40	6	20,83	0,09	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	40	40	1	125,00	3,13	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	80	40	2	62,50	0,78	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	80	40	2	125,00	1,56	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	240	40	6	41,67	0,17	449,688
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	80	40	2	187,50	2,34	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	240	40	6	62,50	0,26	449,688
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	353	40	9	21,28	0,06	674,532
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	118	40	3	63,83	0,54	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	118	40	3	127,66	1,08	224,844

1	2	3	4	5	6	7
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	42,55	0,12	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	14,18	0,04	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	85,11	1,44	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	42,55	0,36	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	85,11	0,72	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	28,37	0,08	674,532
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	127,66	1,08	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	42,55	0,12	674,532

Таблиця Ж.7

Значення функції затрат відібраних перетворювальних структур при потужності перетворювача 12000 кВт та при різних напругах у контактній мережі у разі використання некерованого МВ

Структура перетворювача	Клас вентилів МВ	Розрахунковий клас вентилів МВ	Кількість вентилів	, А	СК	
1	2	3	4	5	6	7
Напруга 3 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	30	30	1	333,33	11,11	74,948
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	10	10	1	1000,0	100,00	142,408
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	10	10	1	2000,0	200,00	227,288
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	30	30	1	666,67	22,22	178,69
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	30	30	1	222,22	7,41	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	5	5	1	1333,3	266,67	119,718
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	10	10	1	666,67	66,67	104,929
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	10	10	1	1333,3	133,33	174,859
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	30	30	1	444,44	14,81	105,636
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	10	10	1	2000,0	200,00	227,288
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	30	30	1	666,67	22,22	178,69
Напруга 6 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	60	30	2	166,67	2,78	149,896

1	2	3	4	5	6	7
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	20	20	1	500,00	25,00	109,333
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	20	20	1	1000,0	50,00	194,406
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	60	30	2	333,33	5,56	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	60	30	2	111,11	1,85	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	10	10	1	666,67	66,67	104,929
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	20	20	1	333,33	16,67	72,997
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	20	20	1	666,67	33,33	141,342
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	60	30	2	222,22	3,70	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	20	20	1	1000,0	50,00	194,406
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	60	30	2	333,33	5,56	149,896
Напруга 12 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	120	40	3	83,33	0,69	224,844
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	40	40	1	250,00	6,25	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	40	40	1	500,00	12,50	74,948
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	120	40	3	166,67	1,39	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	120	40	3	55,56	0,46	224,844
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	20	20	1	333,33	16,67	72,997
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	40	40	1	166,67	4,17	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	40	40	1	333,33	8,33	74,948
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	120	40	3	111,11	0,93	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-2М3а	40	40	1	500,00	12,50	78,623
6Т(А)-М3-3Ф-6М1а	120	40	3	166,67	1,39	224,844
Напруга 24 кВ						
4Т(А)-М1-3Ф-12М1а	240	40	6	41,67	0,17	449,688
4Т(А)-М1-3Ф-4М3а	80	40	2	125,00	1,56	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-2М3а	80	40	2	250,00	3,13	149,896
4Т(А)-М2-3Ф-6М1а	240	40	6	83,33	0,35	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-18М1а	240	40	6	27,78	0,12	449,688
6Т(А)-М1-3Ф-3М6а	40	40	1	166,67	4,17	74,948
6Т(А)-М1-3Ф-6М3а	80	40	2	83,33	1,04	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-3М3а	80	40	2	166,67	2,08	149,896
6Т(А)-М2-3Ф-9М1а	240	40	6	55,56	0,23	449,688

1	2	3	4	5	6	7
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	80	40	2	250,00	3,13	149,896
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	240	40	6	83,33	0,35	449,688
Напруга 25 кВ (50 Гц)						
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	353	40	9	28,37	0,08	674,532
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	118	40	3	85,11	0,72	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	118	40	3	170,21	1,44	224,844
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	353	40	9	56,74	0,16	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	353	40	9	18,91	0,05	674,532
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	59	30	2	113,48	1,92	149,896
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	118	40	3	56,74	0,48	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	118	40	3	113,48	0,96	224,844
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	353	40	9	37,83	0,11	674,532
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	118	40	3	170,21	1,44	224,844
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	353	40	9	56,74	0,16	674,532

Додаток 3
Розрахунок значень цільових функцій

Додаток К

Значення цільових функцій різних перетворювальних структур



Рис. К.1. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 6000 кВт та різних напругах у контактній мережі.



Рис. К.2. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 9000 кВт та різних напругах у контактній мережі.



Рис. К.3. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 12000 кВт та різних напругах у контактній мережі.

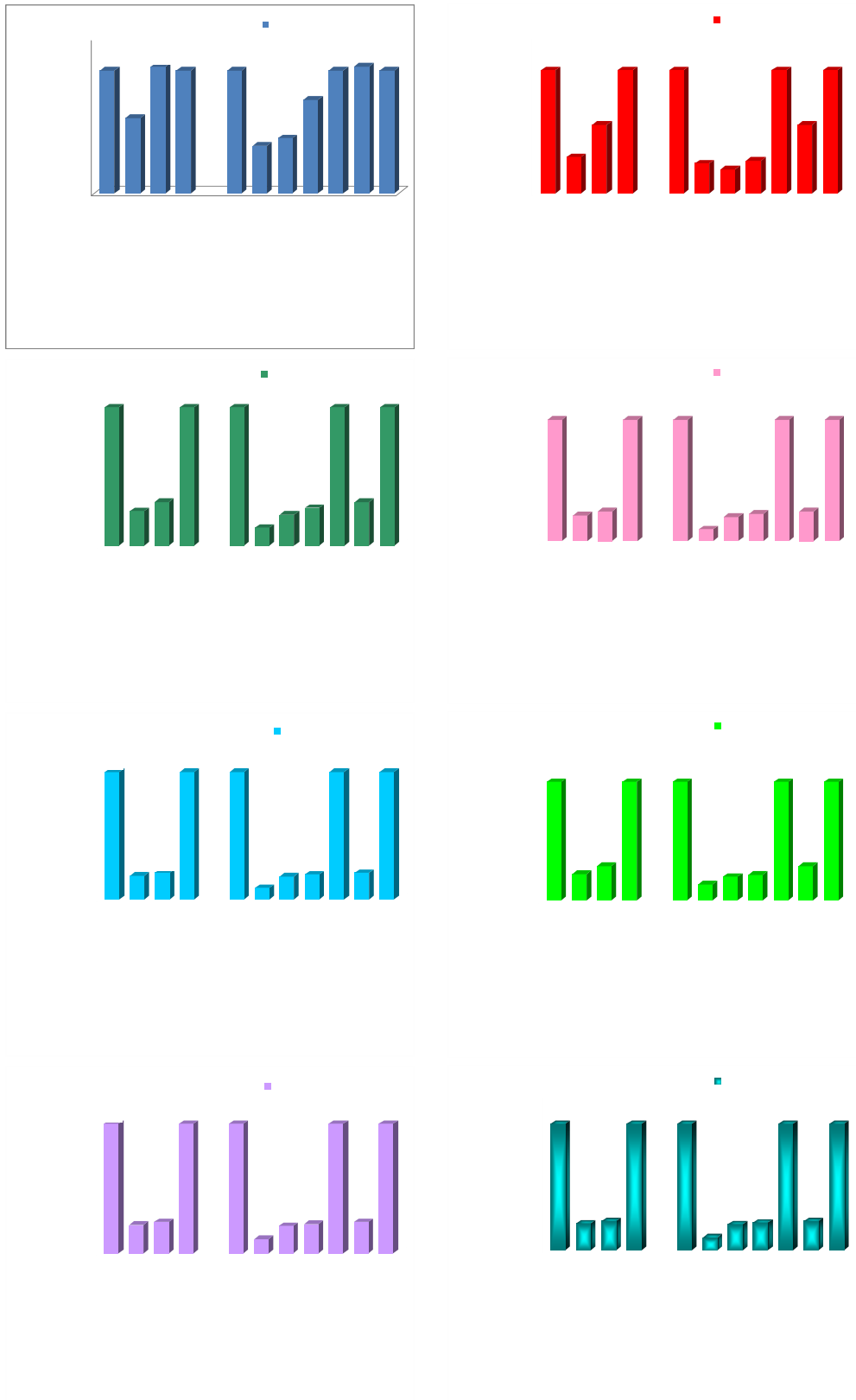


Рис. К.4. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ, при потужності перетворювача 6000 кВт та різних напругах у контактній мережі.



Рис. К.5. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ, при потужності перетворювача 9000 кВт та різних напругах у контактній мережі.

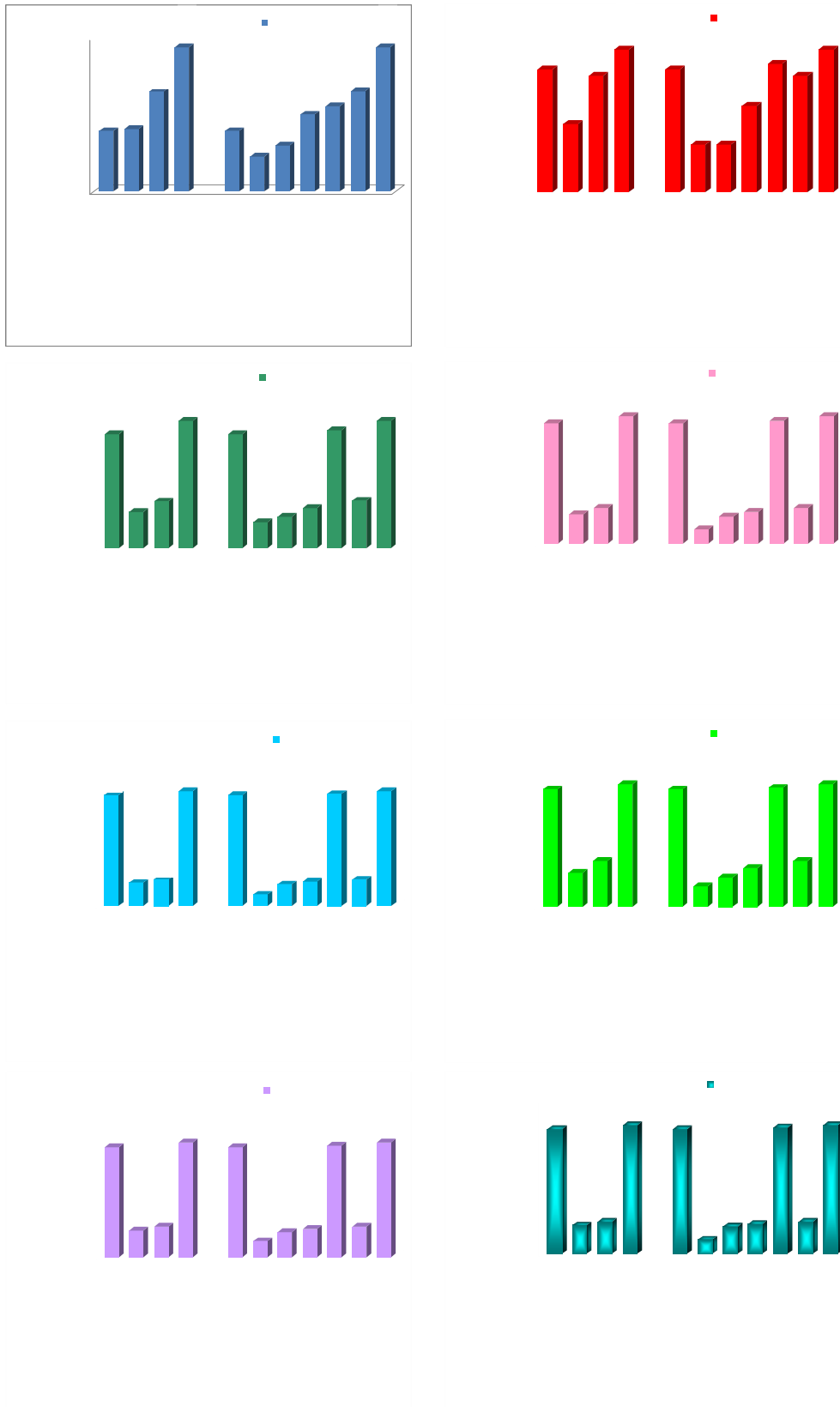


Рис. К.6. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ, при потужності перетворювача 12000 кВт та різних напругах у контактній мережі.



Рис.К.7. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерваним МВ, при потужності перетворювача 6000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиті.



Рис.К.8. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 9000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиті.



Рис.К.9. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з некерованим МВ, при потужності перетворювача 12000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиті.



Рис.К.10. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ, при потужності перетворювача 6000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиті.



Рис.К.11. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ, при потужності перетворювача 9000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиті.

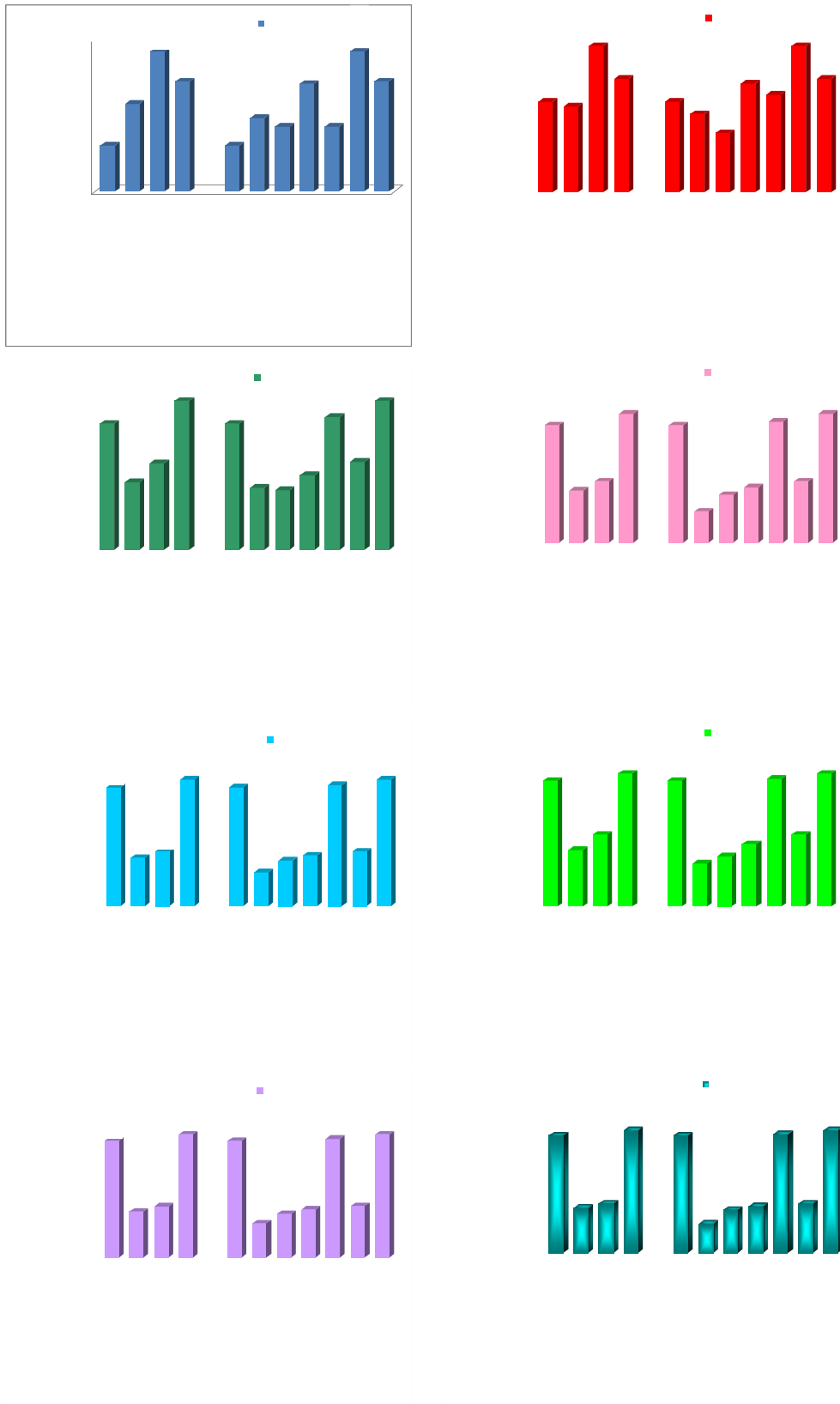


Рис.К.12. Значення цільових функцій різних перетворювальних структур з керованим МВ, при потужності перетворювача 12000 кВт та різних напругах у контактній мережі та однаковому попиті.

Додаток Л
Результати визначення перетворювальних структур

Результати визначення перетворювальних структур з керованими МВ з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 4 ТЕД при однаковому попиті

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	3 к В	3 / 6 к В	3 / 1 2 к В	3 / 2 4 к В	3 / 2 5 к В	3 / 6 / 2 5 к В	3 / 1 2 / 2 5 к В	3 / 2 4 / 2 5 к В
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000								
	6000	●							
	9000	●							
	12000	●							
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	●	●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000		●	●	●	●	●	●	●
	12000		●	●	●	●	●	●	●
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000		●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000			●	●	●	●	●	●
	12000			●	●	●	●	●	●
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000	●							
	6000	●							
	9000	●	●						
	12000	●	●						

Результати визначення перетворювальних структур з керованими МВ з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 6 ТЕД при однаковому попиті

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	3 к В	3 / 6 к В	3 / 1 2 к В	3 / 2 4 к В	3 / 2 5 к В	3 / 6 / 2 5 к В	3 / 1 2 / 2 5 к В	3 / 2 4 / 2 5 к В
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	3000								
	6000								
	9000	●							
	12000	●							
6Т(А)-М1-3Ф-3м6а	3000			●	●	●	●	●	●
	6000			●	●	●	●	●	●
	9000			●	●	●	●	●	●
	12000			●	●	●	●	●	●
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	3000	●	●						
	6000	●	●						
	9000		●						
	12000		●						
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	●	●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000		●	●	●	●	●	●	●
	12000			●	●	●	●	●	●
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000								
	6000	●							
	9000	●							
	12000	●	●						
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000		●	●	●	●	●	●	●
	6000		●	●	●	●	●	●	●
	9000			●	●	●	●	●	●
	12000			●	●	●	●	●	●
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000	●							
	6000	●							
	9000	●	●						
	12000	●	●						

Додаток М
 Основні показники перетворювачів фірм:
 Siemens, ABB, Rockwell Automation (Allen-Bradley)
 та вітчизняного (країн СНД) виробництва

Таблиця М.1

Перетворювачі серії SIMOVERT MV. Фірма Siemens.

№	Тип	Потужність, Вт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження *
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2,3 kV	640000	1818	1259	2570	1200	0,009191	0,001875	IGBT	ПП
2		810000	2418	1259	2570	1750	0,009659	0,00216	IGBT	ПП
3		980000	2418	1259	2570	1750	0,007983	0,001786	IGBT	ПП
4		1160000	2418	1259	2570	1800	0,006745	0,001552	IGBT	ПП
5		1320000	2418	1259	2570	1800	0,005927	0,001364	IGBT	ПП
6		1490000	2418	1259	2570	1850	0,005251	0,001242	IGBT	ПП
7		1660000	2418	1259	2570	1850	0,004713	0,001114	IGBT	ПП
8		1870000	2418	1259	2570	1900	0,004184	0,001016	IGBT	ПП
9		2040000	2418	1259	2570	1900	0,003835	0,000931	IGBT	ПП
10	3,3 kV	810000	1818	1259	2570	1500	0,007262	0,001852	IGBT	ПП
11		1060000	2418	1259	2570	2050	0,007381	0,001934	IGBT	ПП
12		1240000	2418	1259	2570	2050	0,006309	0,001653	IGBT	ПП
13		1490000	2418	1259	2570	2100	0,005251	0,001409	IGBT	ПП
14		1730000	2418	1259	2570	2100	0,004522	0,001214	IGBT	ПП
15		1890000	2418	1259	2570	2150	0,00414	0,001138	IGBT	ПП
16		2150000	2418	1259	2570	2150	0,003639	0,001	IGBT	ПП
17		2310000	2418	1259	2570	2200	0,003387	0,000952	IGBT	ПП
18		2560000	2418	1259	2570	2200	0,003056	0,000859	IGBT	ПП
19	4,16 kV	1070000	1818	1259	2570	1500	0,005498	0,001402	IGBT	ПП
20		1410000	2418	1259	2570	2050	0,005549	0,001454	IGBT	ПП

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21		1640000	2418	1259	2570	2050	0,004771	0,00125	IGBT	ПП
22		1890000	2418	1259	2570	2100	0,00414	0,001111	IGBT	ПП
23		2150000	2418	1259	2570	2100	0,003639	0,000977	IGBT	ПП
24		2400000	2418	1259	2570	2150	0,00326	0,000896	IGBT	ПП
25		2730000	2418	1259	2570	2150	0,002866	0,000788	IGBT	ПП
26		3060000	2418	1259	2570	2200	0,002557	0,000719	IGBT	ПП
27		3320000	2418	1259	2570	2200	0,002357	0,000663	IGBT	ПП
28	2*4,16 кV	3900000	4218	1259	2570	3600	0,003499	0,000923	IGBT	ПП
29		4300000	4218	1259	2570	3650	0,003174	0,000849	IGBT	ПП
30		4900000	4218	1259	2570	3650	0,002785	0,000745	IGBT	ПП
31		5500000	4218	1259	2570	3700	0,002481	0,000673	IGBT	ПП
32		6000000	4218	1259	2570	3700	0,002275	0,000617	IGBT	ПП
33	2,3 кV	550000	2718	1259	2570	2300	0,01599	0,004182	IGBT	ПП
34		690000	3318	1259	2570	2850	0,015559	0,00413	IGBT	ПП
35		830000	3318	1259	2570	3100	0,012935	0,003735	IGBT	ПП
36		960000	3318	1259	2570	3150	0,011183	0,003281	IGBT	ПП
37		1100000	3318	1259	2570	3220	0,00976	0,002927	IGBT	ПП
38		1240000	3318	1259	2570	3270	0,008658	0,002637	IGBT	ПП
39		1380000	3318	1259	2570	3550	0,00778	0,002572	IGBT	ПП
40		1520000	3318	1259	2570	3600	0,007063	0,002368	IGBT	ПП
41		1660000	3318	1259	2570	3700	0,006467	0,002229	IGBT	ПП
42	3,3 кV	750000	2718	1259	2570	2850	0,011726	0,0038	IGBT	ПП
43		980000	3318	1259	2570	3400	0,010955	0,003469	IGBT	ПП
44		1130000	3318	1259	2570	3450	0,009501	0,003053	IGBT	ПП
45		1360000	3318	1259	2570	3500	0,007894	0,002574	IGBT	ПП
46		1590000	3318	1259	2570	3730	0,006752	0,002346	IGBT	ПП
47		1740000	3318	1259	2570	3780	0,00617	0,002172	IGBT	ПП

48		1970000	3318	1259	2570	3990	0,00545	0,002025	IGBT	III
49		2190000	3318	1259	2570	4040	0,004902	0,001845	IGBT	III
50		2340000	3318	1259	2570	4100	0,004588	0,001752	IGBT	III
51	4,16 kV	980000	2718	1259	2570	3100	0,008974	0,003163	IGBT	III
52		1290000	3618	1259	2570	3690	0,009075	0,00286	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
53		1510000	3618	1259	2570	3690	0,007753	0,002444	IGBT	ПП
54		1730000	3618	1259	2570	3740	0,006767	0,002162	IGBT	ПП
55		1970000	3618	1259	2570	4150	0,005942	0,002107	IGBT	ПП
56		2190000	3618	1259	2570	4200	0,005345	0,001918	IGBT	ПП
57		2490000	3618	1259	2570	4550	0,004701	0,001827	IGBT	ПП
58		2800000	3618	1259	2570	4600	0,004181	0,001643	IGBT	ПП
59		3020000	3618	1259	2570	4800	0,003876	0,001589	IGBT	ПП
60	6 kV	550000	3018	1259	2570	4550	0,017755	0,008273	IGBT	ПП
61		810000	3618	1259	2570	5500	0,014452	0,00679	IGBT	ПП
62		980000	3618	1259	2570	5500	0,011945	0,005612	IGBT	ПП
63		1080000	3918	1259	2570	5600	0,011738	0,005185	IGBT	ПП
64		1240000	3918	1259	2570	5600	0,010224	0,004516	IGBT	ПП
65		1490000	4218	1259	2570	6450	0,00916	0,004329	IGBT	ПП
66		1640000	4218	1259	2570	6500	0,008322	0,003963	IGBT	ПП
67	6,6 kV	550000	3018	1259	2570	4550	0,017755	0,008273	IGBT	ПП
68		810000	3618	1259	2570	5500	0,014452	0,00679	IGBT	ПП
69		980000	3618	1259	2570	5500	0,011945	0,005612	IGBT	ПП
70		1080000	3918	1259	2570	5600	0,011738	0,005185	IGBT	ПП
71		1240000	3918	1259	2570	5600	0,010224	0,004516	IGBT	ПП
72		1490000	4218	1259	2570	6450	0,00916	0,004329	IGBT	ПП
73		1640000	4218	1259	2570	6500	0,008322	0,003963	IGBT	ПП
74	2,3 kV	640000	2418	1259	2280	1900	0,010845	0,002969	IGBT	Вод
75		810000	3018	1259	2280	2450	0,010695	0,003025	IGBT	Вод
76		980000	3018	1259	2280	2450	0,00884	0,0025	IGBT	Вод
77		1160000	3018	1259	2280	2500	0,007468	0,002155	IGBT	Вод
78		1320000	3018	1259	2280	2500	0,006563	0,001894	IGBT	Вод
79		1490000	3018	1259	2280	2550	0,005814	0,001711	IGBT	Вод
80		1660000	3018	1259	2280	2550	0,005219	0,001536	IGBT	Вод

81		1870000	3018	1259	2280	2600	0,004633	0,00139	IGBT	Вод
82		2040000	3018	1259	2280	2600	0,004247	0,001275	IGBT	Вод
83	3,3 kV	810000	2418	1259	2280	2200	0,008569	0,002716	IGBT	Вод
84		1060000	3018	1259	2280	2750	0,008173	0,002594	IGBT	Вод

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
85		1240000	3018	1259	2280	2750	0,006986	0,002218	IGBT	Вод
86		1490000	3018	1259	2280	2800	0,005814	0,001879	IGBT	Вод
87		1730000	3018	1259	2280	2800	0,005008	0,001618	IGBT	Вод
88		1890000	3018	1259	2280	2850	0,004584	0,001508	IGBT	Вод
89		2150000	3018	1259	2280	2850	0,004029	0,001326	IGBT	Вод
90		2310000	3018	1259	2280	2900	0,00375	0,001255	IGBT	Вод
91		2560000	3018	1259	2280	2900	0,003384	0,001133	IGBT	Вод
92	4,16 kV	1070000	2418	1259	2280	2200	0,006487	0,002056	IGBT	Вод
93		1410000	3018	1259	2280	2750	0,006144	0,00195	IGBT	Вод
94		1640000	3018	1259	2280	2750	0,005282	0,001677	IGBT	Вод
95		1890000	3018	1259	2280	2800	0,004584	0,001481	IGBT	Вод
96		2150000	3018	1259	2280	2800	0,004029	0,001302	IGBT	Вод
97		2400000	3018	1259	2280	2850	0,00361	0,001188	IGBT	Вод
98		2730000	3018	1259	2280	2850	0,003173	0,001044	IGBT	Вод
99		3060000	3018	1259	2280	2900	0,002831	0,000948	IGBT	Вод
100	2*4, 16 kV	3320000	3018	1259	2280	2900	0,002609	0,000873	IGBT	Вод
101		3900000	4818	1259	2280	4300	0,003546	0,001103	IGBT	Вод
102		4300000	4818	1259	2280	4350	0,003216	0,001012	IGBT	Вод
103		4900000	4818	1259	2280	4350	0,002822	0,000888	IGBT	Вод
104		5500000	4818	1259	2280	4400	0,002515	0,0008	IGBT	Вод
105		6000000	4818	1259	2280	4400	0,002305	0,000733	IGBT	Вод
106		605000	3318	1259	2280	3000	0,015743	0,004959	IGBT	Вод
107		810000	3918	1259	2280	3800	0,013885	0,004691	IGBT	Вод
108		980000	3918	1259	2280	3800	0,011476	0,003878	IGBT	Вод
109		1160000	3918	1259	2280	3920	0,009695	0,003379	IGBT	Вод
110		1320000	3918	1259	2280	3920	0,00852	0,00297	IGBT	Вод

111		1490000	3918	1259	2280	4250	0,007548	0,002852	IGBT	Вод
112		1660000	3918	1259	2280	4250	0,006775	0,00256	IGBT	Вод
113		1870000	3918	1259	2280	4400	0,006014	0,002353	IGBT	Вод
114		2040000	3918	1259	2280	4400	0,005513	0,002157	IGBT	Вод
115	6 kV	810000	3318	1259	2280	3550	0,011759	0,004383	IGBT	Вод
116		1060000	3918	1259	2280	4150	0,01061	0,003915	IGBT	Вод

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
117		1240000	3918	1259	2280	4150	0,00907	0,003347	IGBT	Вод
118		1490000	3918	1259	2280	4430	0,007548	0,002973	IGBT	Вод
119		1730000	3918	1259	2280	4430	0,006501	0,002561	IGBT	Вод
120		1890000	3918	1259	2280	4690	0,005951	0,002481	IGBT	Вод
121		2150000	3918	1259	2280	4690	0,005231	0,002181	IGBT	Вод
122		2310000	3918	1259	2280	4750	0,004869	0,002056	IGBT	Вод
123		2560000	3918	1259	2280	4750	0,004393	0,001855	IGBT	Вод
124	6,6 kV	1020000	3318	1259	2280	3800	0,009338	0,003725	IGBT	Вод
125		1410000	4218	1259	2280	4390	0,008587	0,003113	IGBT	Вод
126		1640000	4218	1259	2280	4390	0,007383	0,002677	IGBT	Вод
127		1890000	4218	1259	2280	4850	0,006406	0,002566	IGBT	Вод
128		2150000	4218	1259	2280	4850	0,005632	0,002256	IGBT	Вод
129		2400000	4218	1259	2280	5250	0,005045	0,002188	IGBT	Вод
130		2730000	4218	1259	2280	5250	0,004435	0,001923	IGBT	Вод
131		3060000	4218	1259	2280	5500	0,003957	0,001797	IGBT	Вод
132		3320000	4218	1259	2280	5500	0,003647	0,001657	IGBT	Вод

Примітка: ПП – примусове повітряне; Вод – водяне.

Таблиця М.2

Перетворювачі серії Sinamics. Фірма Siemens.

№	Тип	Потужність, Вт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження *
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	380-480 В	315000	503	1506	540	294	0,001299	0,000933	IGBT	ПП
2		400000	503	1506	540	294	0,001023	0,000735	IGBT	ПП
3		450000	503	1506	540	294	0,000909	0,000653	IGBT	ПП

4		560000	908	1510	540	530	0,001322	0,000946	IGBT	III
5	660- 690 B	315000	326	1533	545	162	0,000865	0,000514	IGBT	III
6		400000	503	1506	540	294	0,001023	0,000735	IGBT	III
7		450000	503	1506	540	294	0,000909	0,000653	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8		560000	503	1506	540	294	0,00073	0,000525	IGBT	ПП
9		710000	908	1510	540	530	0,001043	0,000746	IGBT	ПП
10		800000	908	1510	540	530	0,000925	0,000663	IGBT	ПП
11	380- 480 В исп А	110000	800	2000	600	320	0,008727	0,002909	IGBT	ПП
12		132000	800	2000	600	320	0,007273	0,002424	IGBT	ПП
13		160000	800	2000	600	390	0,006	0,002438	IGBT	ПП
14		200000	1000	2000	600	480	0,006	0,0024	IGBT	ПП
15		250000	1000	2000	600	480	0,0048	0,00192	IGBT	ПП
16		315000	1200	2000	600	860	0,004571	0,00273	IGBT	ПП
17		400000	1200	2000	600	865	0,0036	0,002163	IGBT	ПП
18		450000	1200	2000	600	1075	0,0032	0,002389	IGBT	ПП
19		560000	1600	2000	600	1360	0,003429	0,002429	IGBT	ПП
20	380- 480 В исп С	110000	400	2000	600	225	0,004364	0,002045	IGBT	ПП
21		132000	400	2000	600	225	0,003636	0,001705	IGBT	ПП
22		160000	400	2000	600	300	0,003	0,001875	IGBT	ПП
23		200000	400	2000	600	300	0,0024	0,0015	IGBT	ПП
24		250000	400	2000	600	300	0,00192	0,0012	IGBT	ПП
25		315000	600	2000	600	670	0,002286	0,002127	IGBT	ПП
26		400000	600	2000	600	670	0,0018	0,001675	IGBT	ПП
27		450000	600	2000	600	670	0,0016	0,001489	IGBT	ПП
28		560000	1000	2000	600	980	0,002143	0,00175	IGBT	ПП
29	660- 690 В исп А	75000	800	2000	600	320	0,0128	0,004267	IGBT	ПП

30		90000	800	2000	600	320	0,010667	0,003556	IGBT	III
31		110000	800	2000	600	320	0,008727	0,002909	IGBT	III
32		132000	800	2000	600	320	0,007273	0,002424	IGBT	III
33		160000	800	2000	600	390	0,006	0,002438	IGBT	III
34		200000	800	2000	600	390	0,0048	0,00195	IGBT	III
35		250000	800	2000	600	390	0,00384	0,00156	IGBT	III
36		315000	800	2000	600	390	0,003048	0,001238	IGBT	III
37		400000	1200	2000	600	860	0,0036	0,00215	IGBT	III

2		90000	1507	602	520	110	0,0052	1,222	IGBT	III
3		110000	2024	793	617	240	0,0090	2,182	IGBT	III
4		132000	2024	793	617	240	0,0075	1,818	IGBT	III
5		160000	2024	793	617	240	0,0062	1,500	IGBT	III
6		200000	2024	793	617	240	0,0050	1,200	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7		75000	880	300	400	67	0,0014	0,893	IGBT	ПП
8		90000	880	300	400	67	0,0012	0,744	IGBT	ПП
9		110000	880	300	400	67	0,0010	0,609	IGBT	ПП
10		110000	1507	602	520	110	0,0043	1,000	IGBT	ПП
11		132000	1507	602	520	110	0,0036	0,833	IGBT	ПП
12		160000	1507	602	520	110	0,0029	0,688	IGBT	ПП
13		200000	2024	793	617	240	0,0050	1,200	IGBT	ПП
14		250000	2024	793	617	240	0,0040	0,960	IGBT	ПП
15		315000	2024	793	617	240	0,0031	0,762	IGBT	ПП
16		355000	2024	793	617	240	0,0028	0,676	IGBT	ПП
17		400000	2024	793	617	240	0,0025	0,600	IGBT	ПП
18		75000	1121	426	467	110	0,0030	1,467	IGBT	ПП
19		90000	1121	426	467	110	0,0025	1,222	IGBT	ПП
20		110000	1558	571	564	204	0,0046	1,855	IGBT	ПП
21		132000	1558	571	564	204	0,0038	1,545	IGBT	ПП
22		160000	1558	571	564	204	0,0031	1,275	IGBT	ПП
23		200000	1558	571	564	204	0,0025	1,020	IGBT	ПП
24		110000	1121	426	467	110	0,0020	1,000	IGBT	ПП
25		132000	1121	426	467	110	0,0017	0,833	IGBT	ПП
26		160000	1121	426	467	110	0,0014	0,688	IGBT	ПП
27		200000	1558	571	564	204	0,0025	1,020	IGBT	ПП
28		250000	1558	571	564	204	0,0020	0,816	IGBT	ПП
29		315000	1558	571	564	204	0,0016	0,648	IGBT	ПП
30		355000	1558	571	564	204	0,0014	0,575	IGBT	ПП
31		400000	1558	571	564	204	0,0013	0,510	IGBT	ПП
32		110000	1121	426	467	110	0,0020	1,000	IGBT	ПП
33		132000	1121	426	467	110	0,0017	0,833	IGBT	ПП
34		160000	1121	426	467	110	0,0014	0,688	IGBT	ПП

35		200000	1121	426	467	110	0,0011	0,550	IGBT	III
36		250000	1558	571	564	204	0,0020	0,816	IGBT	III
37		315000	1558	571	564	204	0,0016	0,648	IGBT	III
38		355000	1558	571	564	204	0,0014	0,575	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
39		400000	1558	571	564	204	0,0013	0,510	IGBT	ПП
40		450000	1558	571	564	204	0,0011	0,453	IGBT	ПП
41		500000	1558	571	564	204	0,0010	0,408	IGBT	ПП
42		110000	1121	426	467	110	0,0020	1,000	IGBT	ПП
43		132000	1121	426	467	110	0,0017	0,833	IGBT	ПП
44		160000	1121	426	467	110	0,0014	0,688	IGBT	ПП
45		200000	1121	426	467	110	0,0011	0,550	IGBT	ПП
46		250000	1558	571	564	204	0,0020	0,816	IGBT	ПП
47		315000	1558	571	564	204	0,0016	0,648	IGBT	ПП
48		355000	1558	571	564	204	0,0014	0,575	IGBT	ПП
49		400000	1558	571	564	204	0,0013	0,510	IGBT	ПП
50		450000	1558	571	564	204	0,0011	0,453	IGBT	ПП
51		500000	1558	571	564	204	0,0010	0,408	IGBT	ПП
52		560000	1558	571	564	204	0,0009	0,364	IGBT	ПП
53		75000	430	2130	646	300	0,0079	4,000	IGBT	ПП
54		90000	430	2130	646	300	0,0066	3,333	IGBT	ПП
55		110000	430	2130	646	300	0,0054	2,727	IGBT	ПП
56		110000	830	2130	646	400	0,0104	3,636	IGBT	ПП
57		132000	830	2130	646	400	0,0087	3,030	IGBT	ПП
58		160000	830	2130	646	400	0,0071	2,500	IGBT	ПП
59		200000	830	2130	646	500	0,0057	2,500	IGBT	ПП
60		110000	830	2130	646	500	0,0104	4,545	IGBT	ПП
61		132000	830	2130	646	500	0,0087	3,788	IGBT	ПП
62		160000	830	2130	646	500	0,0071	3,125	IGBT	ПП
63		200000	830	2130	646	500	0,0057	2,500	IGBT	ПП
64		250000	830	2130	646	500	0,0046	2,000	IGBT	ПП
65		315000	830	2130	646	500	0,0036	1,587	IGBT	ПП
66		355000	830	2130	646	500	0,0032	1,408	IGBT	ПП

67		400000	830	2130	646	500	0,0029	1,250	IGBT	III
68		500000	1330	2130	646	890	0,0037	1,780	IGBT	III
69		630000	2030	2130	646	1200	0,0044	1,905	IGBT	III
70		710000	2030	2130	646	1200	0,0039	1,690	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
71		800000	2030	2130	646	1200	0,0035	1,500	IGBT	ПП
72		1000000	2030	2130	646	1200	0,0028	1,200	IGBT	ПП
73		1200000	2230	2130	646	1350	0,0026	1,125	IGBT	ПП
74		1450000	2230	2130	646	1350	0,0021	0,931	IGBT	ПП
75		75000	430	2130	646	300	0,0079	4,000	IGBT	ПП
76		90000	430	2130	646	300	0,0066	3,333	IGBT	ПП
77		110000	430	2130	646	300	0,0054	2,727	IGBT	ПП
78		132000	830	2130	646	400	0,0087	3,030	IGBT	ПП
79		160000	830	2130	646	400	0,0071	2,500	IGBT	ПП
80		200000	830	2130	646	400	0,0057	2,000	IGBT	ПП
81		250000	830	2130	646	500	0,0046	2,000	IGBT	ПП
82		315000	830	2130	646	500	0,0036	1,587	IGBT	ПП
83		355000	830	2130	646	500	0,0032	1,408	IGBT	ПП
84		400000	830	2130	646	500	0,0029	1,250	IGBT	ПП
85		500000	830	2130	646	500	0,0023	1,000	IGBT	ПП
86		630000	1330	2130	646	890	0,0029	1,413	IGBT	ПП
87		710000	2030	2130	646	1200	0,0039	1,690	IGBT	ПП
88		800000	2030	2130	646	1200	0,0035	1,500	IGBT	ПП
89		1000000	2030	2130	646	1200	0,0028	1,200	IGBT	ПП
90		1200000	2030	2130	646	1200	0,0023	1,000	IGBT	ПП
91		1450000	2230	2130	646	1350	0,0021	0,931	IGBT	ПП
92		1900000	2230	2130	646	1350	0,0016	0,711	IGBT	ПП
93		75000	430	2130	646	300	0,0079	4,000	IGBT	ПП
94		90000	430	2130	646	300	0,0066	3,333	IGBT	ПП
95		110000	430	2130	646	300	0,0054	2,727	IGBT	ПП
96		132000	830	2130	646	400	0,0087	3,030	IGBT	ПП
97		160000	830	2130	646	400	0,0071	2,500	IGBT	ПП
98		200000	830	2130	646	400	0,0057	2,000	IGBT	ПП

99		315000	830	2130	646	500	0,0036	1,587	IGBT	III
100		355000	830	2130	646	500	0,0032	1,408	IGBT	III
101		400000	830	2130	646	500	0,0029	1,250	IGBT	III
102		500000	830	2130	646	500	0,0023	1,000	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
103		560000	830	2130	646	500	0,0020	0,893	IGBT	ПП
104		630000	830	2130	646	500	0,0018	0,794	IGBT	ПП
105		710000	1330	2130	646	890	0,0026	1,254	IGBT	ПП
106		800000	1330	2130	646	890	0,0023	1,113	IGBT	ПП
107		900000	2030	2130	646	1200	0,0031	1,333	IGBT	ПП
108		1000000	2030	2130	646	1200	0,0028	1,200	IGBT	ПП
109		1200000	2230	2130	646	1350	0,0026	1,125	IGBT	ПП
110		1400000	2230	2130	646	1350	0,0022	0,964	IGBT	ПП
111		1700000	2230	2130	646	1680	0,0018	0,988	IGBT	ПП
112		1900000	2630	2130	646	1540	0,0019	0,811	IGBT	ПП
113		2600000	3430	2130	646	2170	0,0018	0,835	IGBT	ПП
114		2800000	4030	2130	646	2520	0,0020	0,900	IGBT	ПП
115	ASC80	90000	2130	730	731	305	0,013	3,389	IGBT	ПП
116	0 4 qs	132000	2130	1230	731	625	0,015	4,735	IGBT	ПП
117		160000	2130	1230	731	625	0,012	3,906	IGBT	ПП
118		200000	2130	1230	731	625	0,010	3,125	IGBT	ПП
119		250000	2130	1230	731	655	0,008	2,620	IGBT	ПП
120		315000	2130	1230	731	655	0,006	2,079	IGBT	ПП
121		500000	2130	3630	731	1490	0,011	2,980	IGBT	ПП
122		630000	2130	3630	731	1490	0,009	2,365	IGBT	ПП
123		710000	2130	4630	731	2530	0,010	3,563	IGBT	ПП
124		900000	2130	4630	731	2530	0,008	2,811	IGBT	ПП
125		75000	2130	730	731	305	0,015	4,067	IGBT	ПП
126		110000	2130	730	731	305	0,010	2,773	IGBT	ПП
127		160000	2130	1230	731	625	0,012	3,906	IGBT	ПП
128		200000	2130	1230	731	625	0,010	3,125	IGBT	ПП
129		250000	2130	1230	731	625	0,008	2,500	IGBT	ПП

130		315000	2130	1230	731	655	0,006	2,079	IGBT	III
131		400000	2130	1230	731	655	0,005	1,638	IGBT	III
132		630000	2130	3630	731	1490	0,009	2,365	IGBT	III
133		710000	2130	3630	731	1490	0,008	2,099	IGBT	III
134		900000	2130	4630	731	2530	0,008	2,811	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
135		1120000	2130	4630	731	2530	0,006	2,259	IGBT	ПП
136		160000	2130	1230	731	625	0,012	3,906	IGBT	ПП
137		200000	2130	1230	731	625	0,010	3,125	IGBT	ПП
138		250000	2130	1230	731	625	0,008	2,500	IGBT	ПП
139		315000	2130	1230	731	655	0,006	2,079	IGBT	ПП
140		400000	2130	1230	731	655	0,005	1,638	IGBT	ПП
141		630000	2130	3630	731	1490	0,009	2,365	IGBT	ПП
142		710000	2130	3630	731	1490	0,008	2,099	IGBT	ПП
143		900000	2130	4630	731	2530	0,008	2,811	IGBT	ПП
144		1120000	2130	4630	731	2530	0,006	2,259	IGBT	ПП
115		90000	2130	730	731	305	0,013	3,389	IGBT	ПП
116		132000	2130	1230	731	625	0,015	4,735	IGBT	ПП
117		160000	2130	1230	731	625	0,012	3,906	IGBT	ПП
118		200000	2130	1230	731	625	0,010	3,125	IGBT	ПП
119		250000	2130	1230	731	655	0,008	2,620	IGBT	ПП
120		315000	2130	1230	731	655	0,006	2,079	IGBT	ПП
121		500000	2130	3630	731	1490	0,011	2,980	IGBT	ПП
122		630000	2130	3630	731	1490	0,009	2,365	IGBT	ПП
123		710000	2130	4630	731	2530	0,010	3,563	IGBT	ПП
124		900000	2130	4630	731	2530	0,008	2,811	IGBT	ПП
125		75000	2130	730	731	305	0,015	4,067	IGBT	ПП
126		110000	2130	730	731	305	0,010	2,773	IGBT	ПП
127		160000	2130	1230	731	625	0,012	3,906	IGBT	ПП
128		200000	2130	1230	731	625	0,010	3,125	IGBT	ПП
129		250000	2130	1230	731	625	0,008	2,500	IGBT	ПП
130		315000	2130	1230	731	655	0,006	2,079	IGBT	ПП
131		400000	2130	1230	731	655	0,005	1,638	IGBT	ПП
132		630000	2130	3630	731	1490	0,009	2,365	IGBT	ПП

133		710000	2130	3630	731	1490	0,008	2,099	IGBT	III
134		900000	2130	4630	731	2530	0,008	2,811	IGBT	III
135		1120000	2130	4630	731	2530	0,006	2,259	IGBT	III
136		160000	2130	1230	731	625	0,012	3,906	IGBT	III

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
137		200000	2130	1230	731	625	0,010	3,125	IGBT	ПП
138		250000	2130	1230	731	625	0,008	2,500	IGBT	ПП
139		315000	2130	1230	731	655	0,006	2,079	IGBT	ПП
140		400000	2130	1230	731	655	0,005	1,638	IGBT	ПП
141		630000	2130	3630	731	1490	0,009	2,365	IGBT	ПП
142		710000	2130	3630	731	1490	0,008	2,099	IGBT	ПП
143		900000	2130	4630	731	2530	0,008	2,811	IGBT	ПП
144		1120000	2130	4630	731	2530	0,006	2,259	IGBT	ПП

Примітка: ПП – примусове повітряне; Вод – водяне.

Таблиця М.4

Перетворювачі серії ASC550. Фірма АВВ.

№	Тип	Потужність, Вт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження *
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ASC550	75000	880	300	400	59,9	0,001	0,799	IGBT	ПП
2		90000	880	300	400	59,9	0,001	0,666	IGBT	ПП
3		110000	1507	250	520	195	0,002	1,773	IGBT	ПП
4		132000	1507	250	520	195	0,001	1,477	IGBT	ПП
5		160000	1507	250	520	195	0,001	1,219	IGBT	ПП
6		200000	2024	347	617	375	0,002	1,875	IGBT	ПП
7		250000	2024	347	617	375	0,002	1,500	IGBT	ПП
8		280000	2024	347	617	375	0,002	1,339	IGBT	ПП
9		315000	2024	347	617	375	0,001	1,190	IGBT	ПП
10		355000	2024	347	617	375	0,001	1,056	IGBT	ПП

Примітка: ПП – примусове повітряне.

Перетворювачі серії PowerFlex 1557. Фірма Rockwell Automation (Allen-Bradley).

№	Тип	Потужність, кВт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м3/кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження *
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2300	560	2946	2591	915	2945	0,0125	5,259	SGCT	ПП
2		600	3404	2591	915	3262	0,0135	5,437	SGCT	ПП
3		650	2946	2642	915	2945	0,0110	4,531	SGCT	ПП
4		1120	3404	2642	915	3262	0,0073	2,913	SGCT	ПП
5		1150	4978	2642	915	4077	0,0105	3,545	SGCT	ПП
6	3300	450	2946	2591	915	2945	0,0155	6,544	SGCT	ПП
7		450	3404	2591	915	3262	0,0179	7,249	SGCT	ПП
8		560	2946	2642	915	2945	0,0127	5,259	SGCT	ПП
9		1120	3404	2642	915	3262	0,0073	2,913	SGCT	ПП
10		1150	4978	2642	915	4077	0,0105	3,545	SGCT	ПП
11	4000	560	2946	2591	915	2945	0,0125	5,259	SGCT	ПП
12		560	3404	2591	915	3262	0,0144	5,825	SGCT	ПП
13		670	3404	2591	915	3262	0,0120	4,869	SGCT	ПП
14		750	2946	2642	915	2945	0,0095	3,927	SGCT	ПП
15		1100	3404	2642	915	3262	0,0075	2,965	SGCT	ПП
16		1300	3607	2642	915	3405	0,0067	2,619	SGCT	ПП
17	6300	450	2946	2591	915	2945	0,0155	6,544	SGCT	ПП
18		500	3607	2591	915	3405	0,0171	6,810	SGCT	ПП
19		600	2946	2642	915	2945	0,0119	4,908	SGCT	ПП
20		930	3607	2642	915	3405	0,0094	3,661	SGCT	ПП

Примітка: ПП – примусове повітряне.

Перетворювачі серії PowerFlex 7000. Фірма Rockwell Automation (Allen-Bradley).

№	Тип	Потужність, кВт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження *
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2300	750	2275	2400	1000	1955	0,0073	2,607	SGCT	ПП
2		1300	2275	2600	1000	2140	0,0046	1,646	SGCT	ПП
3		800	2275	2400	1000	1955	0,0068	2,444	SGCT	ПП
4		1300	2275	3100	1000	2640	0,0054	2,031	SGCT	ПП
5	3300	820	2275	2600	1000	2160	0,0072	2,634	SGCT	ПП
6		1120	2275	2800	1000	2365	0,0057	2,112	SGCT	ПП
7		1500	2275	3000	1000	2365	0,0046	1,577	SGCT	ПП
8		750	2275	2600	1000	2160	0,0079	2,880	SGCT	ПП
9		1120	2275	2800	1000	1955	0,0057	1,746	SGCT	ПП
10		1500	2275	3100	1000	2640	0,0047	1,760	SGCT	ПП
11		1850	2275	3300	1000	2725	0,0041	1,473	SGCT	ПП
12	4000	1082	2275	2600	1000	2160	0,0055	1,996	SGCT	ПП
13		1120	2275	2800	1000	2365	0,0057	2,112	SGCT	ПП
14		1680	2275	3000	1000	2365	0,0041	1,408	SGCT	ПП
15		750	2275	2600	1000	2160	0,0079	2,880	SGCT	ПП
16		1100	2275	2800	1000	1955	0,0058	1,777	SGCT	ПП
17		1680	2275	3100	1000	2640	0,0042	1,571	SGCT	ПП
18		2250	2275	3300	1000	2725	0,0033	1,211	SGCT	ПП
19	6300	895	2275	2800	1000	2365	0,0071	2,642	SGCT	ПП
20		1120	2275	3000	1000	2525	0,0061	2,254	SGCT	ПП
21		1680	2275	3200	1000	2365	0,0043	1,408	SGCT	ПП
22		2600	2275	3400	1000	2680	0,0030	1,031	SGCT	ПП
23		750	2275	2800	1000	2365	0,0085	3,153	SGCT	ПП
24		1300	2275	3000	1000	2365	0,0053	1,819	SGCT	ПП

25		1500	2275	3100	1000	2640	0,0047	1,760	SGCT	ПП
26		2250	2275	3300	1000	2725	0,0033	1,211	SGCT	ПП
27	2300	750	2275	2400	1000	1955	0,0073	2,607	SGCT	Вод
28		1300	2275	2600	1000	2140	0,0046	1,646	SGCT	Вод

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29		800	2275	2400	1000	1955	0,0068	2,444	SGCT	Вод
30		1300	2275	3100	1000	2640	0,0054	2,031	SGCT	Вод
31	3300	820	2275	2600	1000	2160	0,0072	2,634	SGCT	Вод
32		1120	2275	2800	1000	2365	0,0057	2,112	SGCT	Вод
33		1500	2275	3000	1000	2365	0,0046	1,577	SGCT	Вод
34		750	2275	2600	1000	2160	0,0079	2,880	SGCT	Вод
35		1120	2275	2800	1000	1955	0,0057	1,746	SGCT	Вод
36		1500	2275	3100	1000	2640	0,0047	1,760	SGCT	Вод
37		1850	2275	3300	1000	2725	0,0041	1,473	SGCT	Вод
38	4000	1082	2275	2600	1000	2160	0,0055	1,996	SGCT	Вод
39		1120	2275	2800	1000	2365	0,0057	2,112	SGCT	Вод
40		1680	2275	3000	1000	2365	0,0041	1,408	SGCT	Вод
41		750	2275	2600	1000	2160	0,0079	2,880	SGCT	Вод
42		1100	2275	2800	1000	1955	0,0058	1,777	SGCT	Вод
43		1680	2275	3100	1000	2640	0,0042	1,571	SGCT	Вод
44		2250	2275	3300	1000	2725	0,0033	1,211	SGCT	Вод
45	6300	895	2275	2800	1000	2365	0,0071	2,642	SGCT	Вод
46		1120	2275	3000	1000	2525	0,0061	2,254	SGCT	Вод
47		1680	2275	3200	1000	2365	0,0043	1,408	SGCT	Вод
48		2600	2275	3400	1000	2680	0,0030	1,031	SGCT	Вод
49		750	2275	2800	1000	2365	0,0085	3,153	SGCT	Вод
50		1300	2275	3000	1000	2365	0,0053	1,819	SGCT	Вод
51		1500	2275	3100	1000	2640	0,0047	1,760	SGCT	Вод
52		2250	2275	3300	1000	2725	0,0033	1,211	SGCT	Вод

Примітка: ПП – примусове повітряне; Вод – водяне.

Перетворювачі серії SIMOREG. Фірма Siemens.

№	Тип	Потужність, кВт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1Q	102	385	265	283	16	0,000340	0,000613	Тиристор	ПП
2		136	385	265	283	17	0,000255	0,000433	Тиристор	ПП
3		194	625	268	318	30	0,000097	0,000172	Тиристор	ПП
4		291	625	268	318	30	0,000065	0,000115	Тиристор	ПП
5		412	700	268	362	40	0,000036	0,000061	Тиристор	ПП
6		582	780	410	362	80	0,000015	0,000021	Тиристор	ПП
7		776	880	450	500	125	0,000007	0,000010	Тиристор	ПП
8		970	880	450	500	125	0,000005	0,000008	Тиристор	ПП
9		115	385	265	313	17	0,000272	0,000512	Тиристор	ПП
10		154	385	265	313	18	0,000203	0,000361	Тиристор	ПП
11		247	625	268	318	32	0,000076	0,000127	Тиристор	ПП
12		330	625	268	318	32	0,000057	0,000095	Тиристор	ПП
13		467	700	268	362	42	0,000032	0,000051	Тиристор	ПП
14		660	780	410	362	80	0,000013	0,000019	Тиристор	ПП
15		86	385	265	283	16	0,000403	0,000727	Тиристор	ПП
16		145	625	268	318	30	0,000129	0,000230	Тиристор	ПП
17		276	625	268	318	30	0,000068	0,000121	Тиристор	ПП
18		414	625	268	318	30	0,000045	0,000081	Тиристор	ПП
19		552	700	268	362	40	0,000027	0,000045	Тиристор	ПП
20		690	780	410	362	80	0,000013	0,000018	Тиристор	ПП
21		1104	880	450	500	125	0,000005	0,000007	Тиристор	ПП
22		1380	880	450	500	125	0,000004	0,000006	Тиристор	ПП
23		1518	880	450	500	125	0,000003	0,000005	Тиристор	ПП
24		598	700	268	362	40	0,000025	0,000042	Тиристор	ПП

25		789	780	410	362	80	0,000011	0,000016	Тиристор	ПП
26		1245	880	450	500	125	0,000004	0,000006	Тиристор	ПП
27		1660	880	450	500	125	0,000003	0,000005	Тиристор	ПП
28		900	780	410	362	80	0,000010	0,000014	Тиристор	ПП

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
29		1500	880	450	500	125	0,000003	0,000005	Тиристор	ПП
30		1900	880	450	500	125	0,000003	0,000004	Тиристор	ПП
31	4Q	88	385	265	283	16	0,000394	0,000710	Тиристор	ПП
32		118	385	265	283	17	0,000294	0,000499	Тиристор	ПП
33		168	625	268	318	30	0,000112	0,000198	Тиристор	ПП
34		252	625	268	318	30	0,000075	0,000132	Тиристор	ПП
35		357	700	268	362	40	0,000041	0,000070	Тиристор	ПП
36		504	780	410	362	80	0,000017	0,000025	Тиристор	ПП
37		672	880	450	500	145	0,000008	0,000010	Тиристор	ПП
38		840	880	450	500	145	0,000006	0,000008	Тиристор	ПП
39		100	385	265	313	16	0,000313	0,000625	Тиристор	ПП
40		134	385	265	313	17	0,000234	0,000439	Тиристор	ПП
41		216	625	268	318	32	0,000087	0,000145	Тиристор	ПП
42		288	625	268	318	32	0,000065	0,000109	Тиристор	ПП
43		408	700	268	362	47	0,000036	0,000052	Тиристор	ПП
44		576	780	410	362	85	0,000015	0,000020	Тиристор	ПП
45		75	385	265	283	16	0,000462	0,000833	Тиристор	ПП
46		126	385	265	283	16	0,000275	0,000496	Тиристор	ПП
47		240	625	268	318	30	0,000078	0,000139	Тиристор	ПП
48		360	625	268	318	30	0,000052	0,000093	Тиристор	ПП
49		510	700	268	362	45	0,000029	0,000044	Тиристор	ПП
50		660	780	410	362	85	0,000013	0,000018	Тиристор	ПП
51		960	880	450	500	145	0,000005	0,000007	Тиристор	ПП
52		1200	880	450	500	145	0,000004	0,000006	Тиристор	ПП
53		1320	880	450	500	145	0,000004	0,000005	Тиристор	ПП
54		551	700	268	362	45	0,000027	0,000040	Тиристор	ПП
55		725	780	410	362	85	0,000012	0,000016	Тиристор	ПП
56		1088	880	450	500	145	0,000005	0,000006	Тиристор	ПП

57		1450	880	450	500	145	0,000003	0,000005	Тиристор	ПП
58		831	780	410	362	85	0,000010	0,000014	Тиристор	ПП
59		1313	880	450	500	145	0,000004	0,000005	Тиристор	ПП
60		1663	880	450	500	145	0,000003	0,000004	Тиристор	ПП

Таблиця М.8

Перетворювачі вітчизняного (країн СНД) виробництва

№	Тип	Потужність, кВт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	АТЕЗ Саранск "Електровыпрямитель"	92	700	655	1300	350	0,00648	3,80435	Тиристор	ЕВ
2	АТЕЗ Саранск "Електровыпрямитель"	92	800	800	1900	400	0,01322	4,34783	Тиристор	ЕВ
3	АТЕЗ Саранск "Електровыпрямитель"	92	700	660	2135	400	0,01072	4,34783	Тиристор	ЕВ
4	АТЕЗ Саранск "Електровыпрямитель"	92	800	800	2200	500	0,01530	5,43478	Тиристор	ЕВ
5	АТ+АТР Преобразователь	115	2650	1120	2560	2550	0,06607	22,17391	Тиристор	ПВ
6	АТ+АТР Преобразователь	184	3930	1120	2560	4390	0,06124	23,85870	Тиристор	ПВ
7	АТ+АТР Преобразователь	230	3930	1120	2560	4390	0,04899	19,08696	Тиристор	ПВ
8	АТ+АТР Преобразователь	115	1700	1120	2560	1490	0,04238	12,95652	Тиристор	ПВ
9		184	2400	1120	2560	2410	0,03740	13,09783	Тиристор	ПВ

	АТ+АТР Преобразователь									
10	АТ+АТР Преобразователь	230	2400	1120	2560	2410	0,02992	10,47826	Тиристор	ПВ
11	АТ+АТР Преобразователь	115	2650	1120	2560	2640	0,06607	22,95652	Тиристор	ПВ
12	АТ+АТР Преобразователь	184	4230	1120	2560	4530	0,06591	24,61957	Тиристор	ПВ
13	АТ+АТР Преобразователь	230	4230	1120	2560	4530	0,05273	19,69565	Тиристор	ПВ
14	АТ+АТР Преобразователь	115	1700	1120	2560	1550	0,04238	13,47826	Тиристор	ПВ
15	АТ+АТР Преобразователь	184	2700	1120	2560	2530	0,04207	13,75000	Тиристор	ПВ
16	АТ+АТР Преобразователь	230	2700	1120	2560	2530	0,03366	11,00000	Тиристор	ПВ
17	АТ+АТР Преобразователь	115	2950	1120	2560	3270	0,07355	28,43478	Тиристор	ПВ
18	АТ+АТР Преобразователь	184	3930	1120	2560	5823	0,06124	31,64674	Тиристор	ПВ
19	АТ+АТР Преобразователь	230	4930	1120	2560	5825	0,06146	25,32609	Тиристор	ПВ
20	АТ+АТР Преобразователь	115	2000	1120	2560	2190	0,04986	19,04348	Тиристор	ПВ
21	АТ+АТР Преобразователь	230	3980	1120	2560	4420	0,04962	19,21739	Тиристор	ПВ
22	АТ+АТР Преобразователь	368	3980	1320	2560	6790	0,03655	18,45109	Тиристор	ПВ
23	АТ+АТР Преобразователь	460	3980	1320	2560	6790	0,02924	14,76087	Тиристор	ПВ
24		736	6125	1640	2560	8090	0,03494	10,99185	Тиристор	ПВ

	АТ+АТР Преобразователь									
25	АТ+АТР Преобразователь	1150	8347	1250	2560	13330	0,02323	11,59130	Тиристор	ПВ
26	АТ+АТР Преобразователь	147,2	1700	1120	2560	1680	0,03311	11,41304	Тиристор	ПВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	АТ+АТР Преобразователь	230	1700	1120	2560	1940	0,02119	8,43478	Тиристор	ПВ
28	АТ+АТР Преобразователь	368	2400	1320	2560	3160	0,02204	8,58696	Тиристор	ПВ
29	АТ+АТР Преобразователь	460	2400	1320	2560	3160	0,01763	6,86957	Тиристор	ПВ
30	АТ+АТР Преобразователь	92	1700	1120	2560	1700	0,05298	18,47826	Тиристор	ПВ
31	АТ+АТР Преобразователь	230	3930	1120	2560	4520	0,04899	19,65217	Тиристор	ПВ
32	АТ+АТР Преобразователь	368	4280	1320	2560	6920	0,03930	18,80435	Тиристор	ПВ
33	АТ+АТР Преобразователь	460	4280	1320	2560	6920	0,03144	15,04348	Тиристор	ПВ
34	АТ+АТР Преобразователь	736	7225	1540	2560	9175	0,03870	12,46603	Тиристор	ПВ
35	АТ+АТР Преобразователь	92	1700	1120	2560	1700	0,05298	18,47826	Тиристор	ЕВ
36	АТ+АТР Преобразователь	230	1700	1120	2560	2000	0,02119	8,69565	Тиристор	ПВ
37	АТ+АТР Преобразователь	368	2700	1320	2560	3300	0,02479	8,96739	Тиристор	ПВ
38	АТ+АТР Преобразователь	460	2700	1320	2560	3320	0,01983	7,21739	Тиристор	ПВ
39	АТ+АТР Преобразователь	230	4320	1120	2560	4720	0,05385	20,52174	Тиристор	ПВ
40	АТ+АТР Преобразователь	368	4980	1120	2560	7470	0,03880	20,29891	Тиристор	ПВ
41		460	4980	1120	2560	7470	0,03104	16,23913	Тиристор	ПВ

	АТ+АТР Преобразователь									
42	АТ+АТР Преобразователь	147,2	2000	1120	2560	1950	0,03896	13,24728	Тиристор	ПВ
43	АТ+АТР Преобразователь	230	2000	1120	2560	2190	0,02493	9,52174	Тиристор	ПВ
44	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	1056	2500	2500	800	2500	0,00473	2,36742	Тиристор	ПВ
45	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	1650	2500	4000	800	3200	0,00485	1,93939	Тиристор	ПВ
46	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	2640	2500	3250	800	3000	0,00246	1,13636	Тиристор	ПВ
47	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	2640	2500	6000	800	5200	0,00455	1,96970	Тиристор	ПВ
48	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	3300	2500	5250	800	5000	0,00318	1,51515	Тиристор	ПВ
49	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	3300	2500	3250	800	3000	0,00197	0,90909	Тиристор	ПВ
50	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	3300	2500	6000	800	5000	0,00364	1,51515	Тиристор	ПВ
51	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	3300	2500	3250	800	3000	0,00197	0,90909	Тиристор	ПВ
52	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	4158	2500	8000	800	8000	0,00385	1,92400	Тиристор	ПВ
53	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	4158	2500	4500	800	4500	0,00216	1,08225	Тиристор	ПВ
54	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	4158	2500	10000	800	9200	0,00481	2,21260	Тиристор	ПВ
55	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	4158	2500	5250	800	5000	0,00253	1,20250	Тиристор	ПВ
56		1320	2500	2500	800	2500	0,00379	1,89394	Тиристор	ПВ

	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "									
57	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	2062,5	2500	4000	800	3200	0,00388	1,55152	Тиристор	ПВ
58	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	2062,5	2500	3250	800	3000	0,00315	1,45455	Тиристор	ПВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
59	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	3300	2500	3250	800	3000	0,00197	0,90909	Тиристор	ПВ
60	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	712,5	2500	4000	800	5200	0,01123	7,29825	Тиристор	ПВ
61	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	3300	2500	6000	800	5200	0,00364	1,57576	Тиристор	ПВ
62	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	3300	2500	10000	800	9200	0,00606	2,78788	Тиристор	ПВ
63	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	3300	2500	5250	800	5000	0,00318	1,51515	Тиристор	ПВ
64	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	4125	2500	10000	800	9200	0,00485	2,23030	Тиристор	ПВ
65	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	4125	2500	5250	800	5000	0,00255	1,21212	Тиристор	ПВ
66	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	4125	2500	10000	800	9200	0,00485	2,23030	Тиристор	ПВ
67	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5197,5	2500	10000	800	9200	0,00385	1,77008	Тиристор	ПВ
68	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5197,5	2500	5250	800	5000	0,00202	0,96200	Тиристор	ПВ
69	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5197,5	2500	14000	800	13200	0,00539	2,53968	Тиристор	ПВ
70	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5197,5	2500	7250	800	7000	0,00279	1,34680	Тиристор	ПВ
71	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5197,5	2500	14000	800	13200	0,00539	2,53968	Тиристор	ПВ
72	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	6600	2500	10000	800	9200	0,00303	1,39394	Тиристор	ПВ
73		6600	2500	5250	800	5000	0,00159	0,75758	Тиристор	ПВ

	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "									
74	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	6600	2500	14000	800	13200	0,00424	2,00000	Тиристор	ПВ
75	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	6600	2500	7250	800	7000	0,00220	1,06061	Тиристор	ПВ
76	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	6600	2500	14000	800	13200	0,00424	2,00000	Тиристор	ПВ
77	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	8250	2500	18000	800	9200	0,00436	1,11515	Тиристор	ПВ
78	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	8250	2500	10000	800	5000	0,00242	0,60606	Тиристор	ПВ
79	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	8250	2500	18000	800	17200	0,00436	2,08485	Тиристор	ПВ
80	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	8250	2500	7250	800	7000	0,00176	0,84848	Тиристор	ПВ
81	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	10312,5	2500	10000	800	9200	0,00194	0,89212	Тиристор	ПВ
82	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	10312,5	2500	5250	800	5000	0,00102	0,48485	Тиристор	ПВ
83	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	10312,5	2500	18000	800	17200	0,00349	1,66788	Тиристор	ПВ
84	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	10312,5	2500	7250	800	7000	0,00141	0,67879	Тиристор	ПВ
85	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	10312,5	2500	18000	800	17200	0,00349	1,66788	Тиристор	ПВ
86	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	2625	2500	6000	800	5200	0,00457	1,98095	Тиристор	ПВ
87	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	2625	2500	4000	800	3200	0,00305	1,21905	Тиристор	ПВ
88		2625	2500	3200	800	3000	0,00244	1,14286	Тиристор	ПВ

	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "									
89	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	4200	2500	10000	800	9200	0,00476	2,19048	Тиристор	ПВ
90	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	4200	2500	5250	800	5000	0,00250	1,19048	Тиристор	ПВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
91	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5250	2500	6000	800	5200	0,00229	0,99048	Тиристор	ПВ
92	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5250	2500	3250	800	3000	0,00124	0,57143	Тиристор	ПВ
93	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5250	2500	10000	800	9200	0,00381	1,75238	Тиристор	ПВ
94	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	5250	2500	5250	800	5000	0,00200	0,95238	Тиристор	ПВ
95	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	6615	2500	14000	800	13200	0,00423	1,99546	Тиристор	ПВ
96	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	6615	2500	7250	800	7000	0,00219	1,05820	Тиристор	ПВ
97	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	6615	2500	14000	800	13200	0,00423	1,99546	Тиристор	ПВ
98	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	8400	2500	14000	800	13200	0,00333	1,57143	Тиристор	ПВ
99	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	8400	2500	7250	800	7000	0,00173	0,83333	Тиристор	ПВ
100	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	10500	2500	14000	800	13200	0,00267	1,25714	Тиристор	ПВ
101	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	10500	2500	18000	800	17200	0,00343	1,63810	Тиристор	ПВ
102	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	10500	2500	7250	800	7000	0,00138	0,66667	Тиристор	ПВ
103	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	13125	2500	10000	800	9200	0,00152	0,70095	Тиристор	ПВ
104	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ" "	13125	2500	5250	800	5000	0,00080	0,38095	Тиристор	ПВ
		13125	2500	18000	800	17200	0,00274	1,31048	Тиристор	ПВ

10 5	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "									
10 6	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	13125	2500	18000	800	17200	0,00274	1,31048	Тиристор	ПВ
10 7	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	2625	2500	6000	800	5200	0,00457	1,98095	Тиристор	ПВ
10 8	ТПЗ + ТПРЗ "ХЭМЗ "	2100	2500	4000	800	3200	0,00381	1,52381	Тиристор	ПВ
10 9	ТПЗ Преобразователь	1150	3000	7940	1200	5420	0,02486	4,71304	Тиристор	ПВ
11 0	ТПЗ Преобразователь	1650	2580	5715	1200	5420	0,01072	3,28485	Тиристор	ПВ
11 1	ТПЗ Преобразователь	3300	2580	7916	1200	9680	0,00743	2,93333	Тиристор	ПВ
11 2	ТПЗ Преобразователь	6615	2635	9870	1500	11200	0,00590	1,69312	Тиристор	ПВ
11 3	ТПЗ Преобразователь	1056	3000	9100	1200	14600	0,03102	13,82576	Тиристор	ПВ
11 4	ТПЗ Преобразователь	736	3000	9100	1200	14600	0,04451	19,83696	Тиристор	ПВ
11 5	ТПЗ Преобразователь	1650	2580	9100	1000	15500	0,01423	9,39394	Тиристор	ПВ
11 6	ТПЗ Преобразователь	1650	2580	8610	1200	8160	0,01616	4,94545	Тиристор	ПВ
11 7	ТПЗ Преобразователь	1650	580	9420	1200	11600	0,00397	7,03030	Тиристор	ПВ
11 8	ТПЗ Преобразователь	2625	2635	11425	1200	13430	0,01376	5,11619	Тиристор	ПВ
11 9	ТПЗ Преобразователь	2062,5	2635	11425	1200	8740	0,01752	4,23758	Тиристор	ПВ
		2640	2580	17080	1200	20830	0,02003	7,89015	Тиристор	ПВ

12 0	ТПЗ Преобразователь									
12 1	ТПЗ Преобразователь	3300	2635	13830	1500	10550	0,01656	3,19697	Тиристор	ПВ
12 2	ТПЗ Преобразователь	2112	2635	13830	1500	25110	0,02588	11,88920	Тиристор	ПВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12 3	ТПЗ Преобразователь	4125	2635	15835	1500	20300	0,01517	4,92121	Тиристор	ПВ
12 4	ТПЗ Преобразователь	5250	2635	15835	1500	20300	0,01192	3,86667	Тиристор	ПВ
12 5	АТПЗ Саранск " Электровыпрямител ь"	92	700	700	2165	350	0,01153	3,80435	Тиристор	ПВ
12 6	АТПЗ Саранск " Электровыпрямител ь"	147,2	700	700	2165	400	0,00721	2,71739	Тиристор	ПВ
12 7	АТПЗ Саранск " Электровыпрямител ь"	115	700	700	2165	500	0,00922	4,34783	Тиристор	ПВ
12 8	АТПЗ Саранск " Электровыпрямител ь"	230	700	700	2165	500	0,00461	2,17391	Тиристор	ПВ
12 9	ПТП Преобразователь	660	2000	1000	2400	1350	0,00727	2,04545	Тиристор	ПВ
13 0	ПТП Преобразователь	1050	2000	1000	2400	1350	0,00457	1,28571	Тиристор	ПВ
13 1	ПТП Преобразователь	1056	2000	1000	2400	1350	0,00455	1,27841	Тиристор	ПВ
13 2	ПТП Преобразователь	1680	2000	1000	2400	1350	0,00286	0,80357	Тиристор	ПВ
13 3	ПТП Преобразователь	1650	3200	1000	2400	2300	0,00465	1,39394	Тиристор	ПВ
13 4	ПТП Преобразователь	2625	3200	1000	2400	2300	0,00293	0,87619	Тиристор	ПВ
		2112	3200	1000	2400	2300	0,00364	1,08902	Тиристор	ПВ

13 5	ПТП Преобразователь									
13 6	ПТП Преобразователь	3360	3200	1000	2400	2300	0,00229	0,68452	Тиристор	ПВ
13 7	ТПЧ Преобразователь	100	1260	100	2540	1400	0,00320	14,00000	Тиристор	ПВ
13 8	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	540	2385	700	1820	1470	0,00563	2,72222	Тиристор	ПВ
13 9	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	1200	2385	700	1820	1470	0,00253	1,22500	Тиристор	ПВ
14 0	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	1920	3090	850	2370	2500	0,00324	1,30208	Тиристор	ПВ
14 1	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	740	2615	930	2490	1200	0,00818	1,62162	Тиристор	ПВ
14 2	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	940	2615	930	2490	1400	0,00644	1,48936	Тиристор	ПВ
14 3	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	960	2615	930	2490	1600	0,00631	1,66667	Тиристор	ПВ
14 4	ВУТГО (ВУТГВО) Ереван	600	2615	930	2490	1500	0,01009	2,50000	Тиристор	ПВ
14 5	УАВ (аэродромный Таллин)	100	1750	1250	1200	1100	0,02625	11,00000	Тиристор	ПВ
14 6	ВАК (Преобразователь)	75,6	1860	2510	2460	3480	0,15191	46,03175	Тиристор	Вод
14 7	ВАК (Преобразователь)	150	2375	2995	2400	5910	0,11381	39,40000	Тиристор	Вод
14 8	ВАК (Преобразователь)	300	3300	2650	3000	8420	0,08745	28,06667	Тиристор	Вод
14 9	ВАК (Преобразователь)	76,8	1900	2315	900	2340	0,05154	30,46875	Тиристор	Вод
		76,8	1900	2315	900	2220	0,05154	28,90625	Тиристор	Вод

15 0	ВАК (Преобразователь)									
15 1	ВАК (Преобразователь)	153,6	1400	1200	2200	2000	0,02406	13,02083	Тиристор	Вод

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15 2	ВАК (Преобразователь)	151,2	1400	1450	2200	2000	0,02954	13,22751	Тиристор	Вод
15 3	ВАК (Преобразователь)	75,6	1860	2510	2460	4020	0,15191	53,17460	Тиристор	Вод
15 4	ТВ9 (Преобразователь)	600	1710	1000	2000	1750	0,00570	2,91667	Тиристор	Вод
15 5	ТВ9 (Преобразователь)	1200	3010	1000	2000	2600	0,00502	2,16667	Тиристор	Вод
15 6	ТВ9 (Преобразователь)	937,5	1710	1000	2000	1750	0,00365	1,86667	Тиристор	Вод
15 7	ТВ9 (Преобразователь)	1875	3010	1000	2000	2600	0,00321	1,38667	Тиристор	Вод
15 8	ТВ9 (Преобразователь)	2875	3010	1000	2000	4850	0,00209	1,68696	Тиристор	Вод
15 9	ТВ9 (Преобразователь)	2812,5	4620	1000	2000	3200	0,00329	1,13778	Тиристор	Вод
16 0	ТВ9 (Преобразователь)	736	800	1000	2000	680	0,00217	0,92391	Тиристор	Вод
16 1	ТВ9 (Преобразователь)	2898	1710	1000	2000	1750	0,00118	0,60386	Тиристор	Вод
16 2	ТВ9 (Преобразователь)	8250	3210	1000	2400	3000	0,00093	0,36364	Тиристор	Вод
16 3	ТПЧ (Таллин)	800	4000	800	2200	4200	0,00880	5,25000	Тиристор	Вод
16 4	ТПЧ (Таллин)	500	4000	800	2440	2650	0,01562	5,30000	Тиристор	Вод
16 5	ТПЧ (Таллин)	250	2000	800	2440	1500	0,01562	6,00000	Тиристор	Вод
	ТПЧ (Таллин)	250	2800	800	2440	3000	0,02186	12,00000	Тиристор	Вод

16 6										
16 7	ТПЧ (Таллин)	630	5210	900	2470	4000	0,01838	6,34921	Тиристор	Вод
16 8	СЧИ (Ереван)	100	1845	1120	1700	1850	0,03513	18,50000	Тиристор	Вод
16 9	РМТ (Саранск)	250	950	800	2400	350	0,00730	1,40000	Тиристор	ПВ
17 0	РМТ (Саранск)	630	1600	800	2400	700	0,00488	1,11111	Тиристор	ПВ
17 1	ВДМ Сварочный)	122	1035	820	1630	750	0,01134	6,14754	диод	ПВ
17 2	ВДМ Сварочный)	230	2175	835	1630	1750	0,01287	7,60870	диод	ПВ
17 3	КВПП (Саранск)	420	1350	1100	2600	740	0,00919	1,76190	Тиристор	ПВ
17 4	КВПП (Саранск)	460	1350	1100	2600	650	0,00839	1,41304	Тиристор	ПВ
17 5	КВПП (Саранск)	736	2100	1100	2600	1250	0,00816	1,69837	Тиристор	ПВ
17 6	КВПП (Саранск)	920	2100	1100	2600	1270	0,00653	1,38043	Тиристор	ПВ
17 7	БАВКМ (Каджи_Сайск)	75	630	148	180	11	0,00022	0,14667	Тиристор	ЕВ
17 8	БАВКМ (Каджи_Сайск)	96	630	190	230	12	0,00029	0,12500	Тиристор	ЕВ
17 9	ПЧ-ТТЕТ	4750	300	250	400	15	158,333	316,667	IGBT	ПВ
18 0		11970	500	300	750	55	106,400	217,636	IGBT	ПВ
		15200	500	300	750	60	135,111	253,333	IGBT	ПВ

18 1										
18 2		23940	500	300	750	65	212,800	368,308	IGBT	ПВ
18 3		30400	500	300	750	70	270,222	434,286	IGBT	ПВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
18 4		47500	500	350	1085	75	250,165	633,333	IGBT	ПВ
18 5		60800	800	600	1660	320	76,305	190,000	IGBT	ПВ
18 6		76000	800	600	2000	420	79,167	180,952	IGBT	ПВ
18 7		95000	800	600	2000	430	98,958	220,930	IGBT	ПВ
18 8		119700	1000	800	2260	620	66,206	193,065	IGBT	ПВ
18 9		152000	1000	800	2260	630	84,071	241,270	IGBT	ПВ
19 0		190000	1000	800	2260	635	105,088	299,213	IGBT	ПВ
19 1		239400	2000	800	2260	1310	66,206	182,748	IGBT	ПВ
19 2	ТПЧ-М	63000	600	600	1800	410	97,222	153,659	IGBT	Вод
19 3		100000	800	600	2000	470	104,167	212,766	IGBT	Вод
19 4		100000	800	600	2000	470	104,167	212,766	IGBT	Вод
19 5		160000	800	800	2300	520	108,696	307,692	IGBT	Вод
19 6		160000	800	800	2300	495	108,696	323,232	IGBT	Вод
19 7		250000	1000	800	2300	600	135,870	416,667	IGBT	Вод
		250000	1000	800	2300	580	135,870	431,034	IGBT	Вод

19 8										
19 9		320000	1200	800	2300	600	144,928	533,333	IGBT	Вод
20 0		320000	1200	800	2300	620	144,928	516,129	IGBT	Вод
20 1		320000	1200	800	2300	650	144,928	492,308	IGBT	Вод
20 2		320000	1200	800	2300	620	144,928	516,129	IGBT	Вод
20 3		500000	1600	800	2300	850	169,837	588,235	IGBT	Вод
20 4		630000	1600	800	2300	850	213,995	741,176	IGBT	Вод

Примітка: ЕВ – природне повітряне. ПВ – примусове повітряне; Вод – водяне.

Перетворювачі для залізничної галузі вітчизняного (країн СНД) виробництва

№	Тип	Потужність, кВт	Висота, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	Вага, кг	Питомий об'єм, м ³ /кВт	Питома вага, кг/кВт	Елементна база	Система охолодження
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	МПЧ-Т2ТП тяговий (ДПЛ)	230	2000	650	800	577	0,004522	2,509	IGBT	ПВ
2	ВОППД-3,15к-1,4к (ВЛ80с)	4410	1120	472	630	340	0,000076	0,077	диод	ПВ
3	ВУК-60-4л (ВЛ60к)	7500	980	620	1100	320	0,000089	0,043	Тиристор	ПВ
4	ВУК-6700М (ВЛ82м)	7854	1120	600	925	400	0,000079	0,051	Тиристор	ПВ
5	ВУК-4000Т-02 (ВЛ80т)	4320	1120	472	630	225	0,000077	0,052	Тиристор	ПВ
6	ВУК-7000-У2	7008	1145	1690	680	660	0,000188	0,094	Тиристор	ПВ
7	ВУК-4000л (ВЛ80к)	4320	1630	680	1488	650	0,000382	0,150	Тиристор	ПВ
8	ВИП2-2200М (ВЛ80Р)	2200	2100	1540	860	1700	0,001264	0,773	Тиристор	ПВ
9	ВИП-4000 (ВЛ85)	4340	1900	1250	860	1350	0,000471	0,311	Тиристор	ПВ
10	ВИП 4000 М (2С5К)	4000	1900	1080	750	1150	0,000385	0,288	Тиристор	ПВ
11	УВКТ-4Т2 (Тепловоз)	2900	1250	975	700	500	0,000294	0,172	Тиристор	ПВ
12	УВКТ-5У2 (тепловоз)	4200	1250	1165	700	650	0,000243	0,155	Тиристор	ПВ
13	УВПЗ (ЭР9П)	990				370	0,000000	0,374	Тиристор	ПВ
14	ПЧТ-1У2 (отопление вагонов)	600				330	0,000000	0,550	Тиристор	ПВ
15	М-Т2ТПП собственных нужд	20	1800	550	800	450	0,039600	22,500	IGBT	ПВ
16	ВУВ-758 (ВЛ80)	85	1110	620	290	92	0,002348	1,082	Тиристор	ПВ

17	ВУВ-001 (ВЛ85)	130	1110	620	290	85	0,001535	0,654	Тиристор	ПВ
18	СТП 50x4x500	100				2000	0,000000	20,000	Тиристор	ПВ
19	РТ-300/300А-У2 (метро)	180	882	585	615	43	0,001763	0,239	Тиристор	
20	ИВУ-300/5	8250	3000	6600	1410		0,003384	0,000	Тиристор	ПВ
21	ПВЭ-5АУ1	9900	1500	2800	3100		0,001315	0,000	Тиристор	ПВ
22	ВАКЛЭ	600	1350	800	2000		0,003600	0,000	Тиристор	ЕВ
23	ВАКЛЭ	1200	1350	800	2000		0,001800	0,000	Тиристор	ЕВ
24	ВАКЛЭ	600	1085	1200	2330		0,005056	0,000	Тиристор	ЕВ
25	ВАКЛЭ	1200	1600	1200	2000		0,003200	0,000	Тиристор	ЕВ
26	АТДЕ	1200	1200	800	2000		0,001600	0,000	Тиристор	ЕВ
27	АТПШ	600	1035	1000	2025		0,003493	0,000	Тиристор	ЕВ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
28	АТПШ	1200	1035	1000	2035		0,001755	0,000	Тиристор	ЕВ
29	УВКМ	500	1600	1200	2530		0,009715	0,000	Тиристор	ЕВ
30	УВКМ	1000	283	1200	2576		0,000875	0,000	Тиристор	ЕВ

Примітка: ЕВ – природне повітряне. ПВ – примусове повітряне; Вод – водяне.

Додаток Н

Моделі для комп'ютерного моделювання основних режимів роботи статичного перетворювача підвищеної частоти тягової електропередачі багатосистемного електровозу

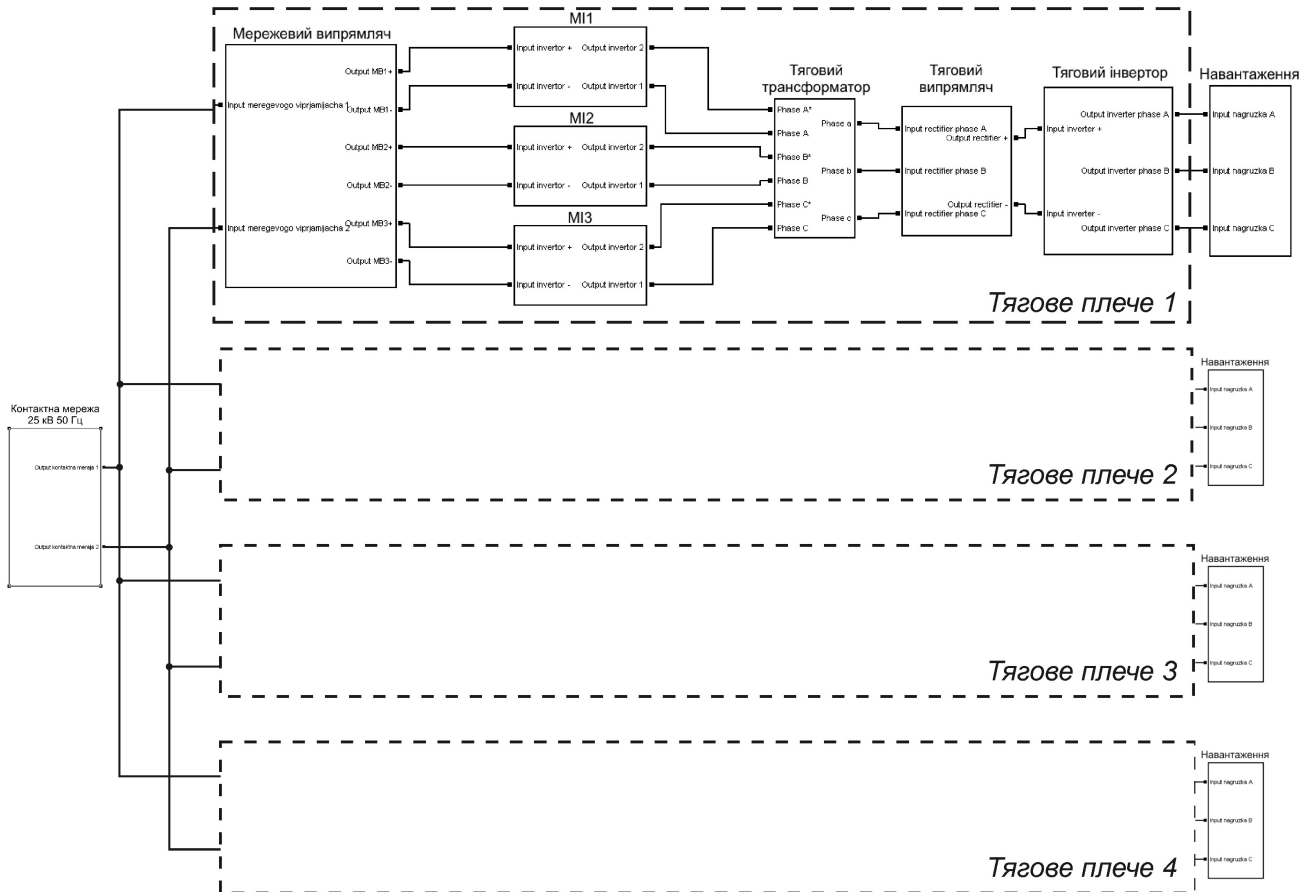


Рис. Н.1. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ промислової частоти 50 Гц.

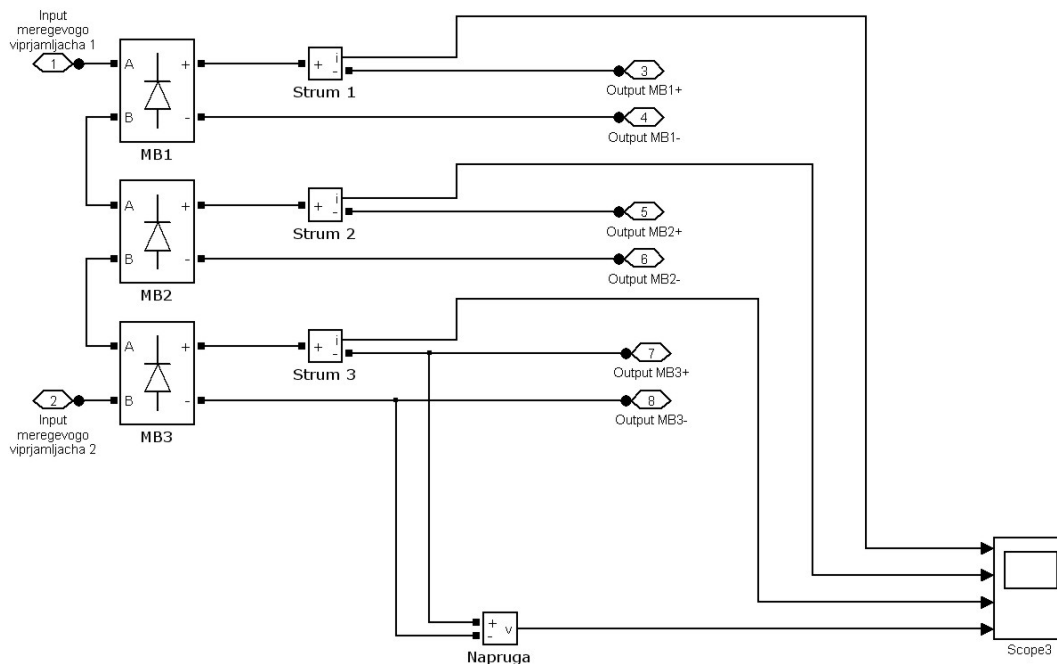


Рис. Н.2. Модель мережевого випрямляча тягового плеча статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4м3а.

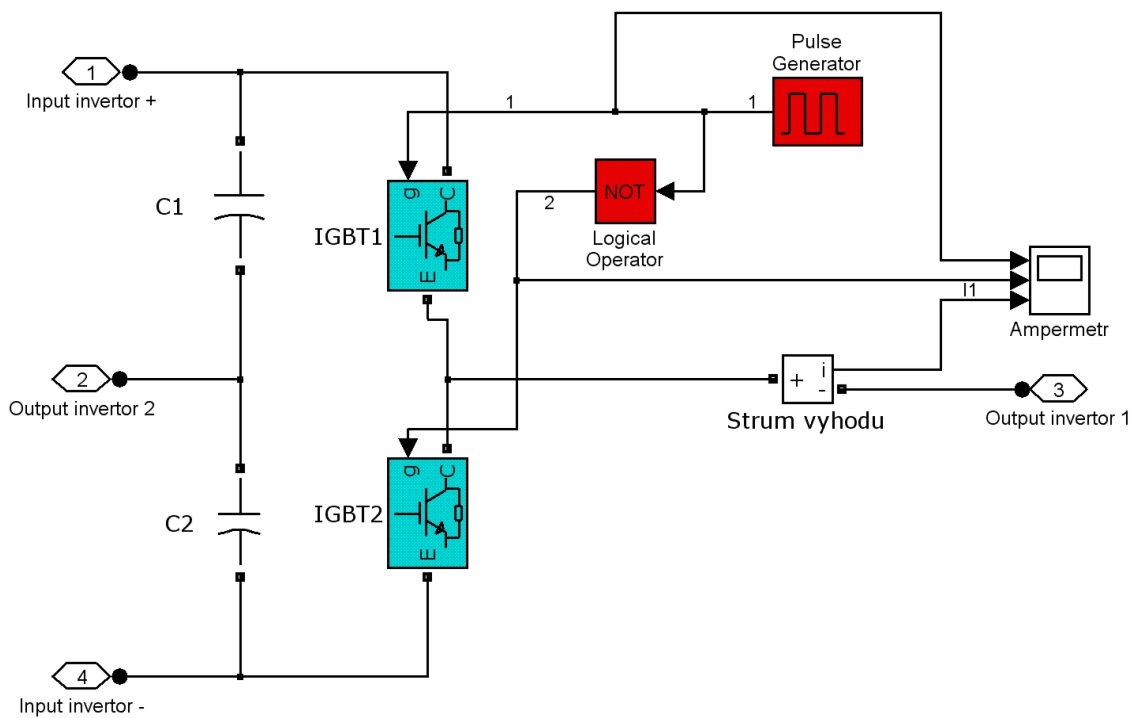


Рис. Н.3. Модель мережевого інвертора тягового плеча статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4м3а.

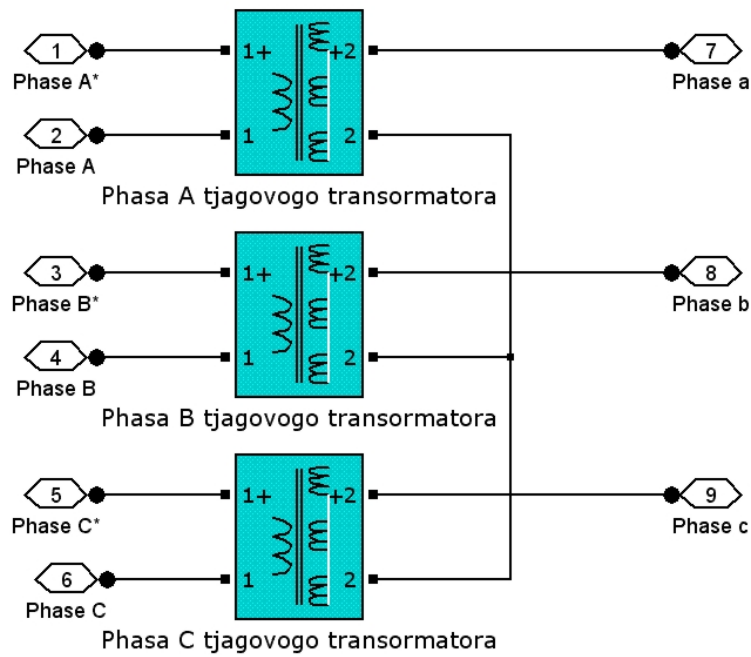


Рис. Н.4. Модель блоку трифазного трансформатора підвищеної частоти тягового плеча статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4М3а.

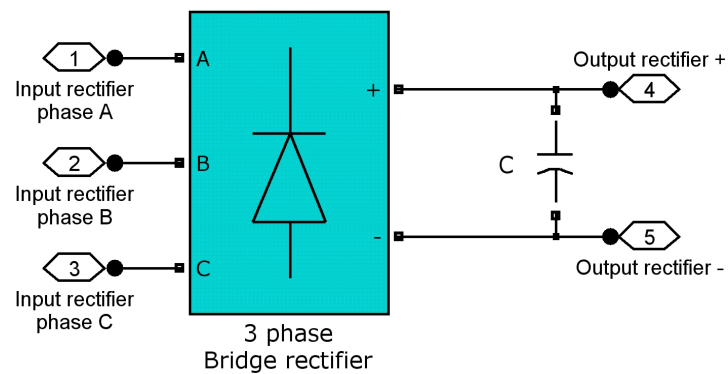


Рис. Н.5. Модель блоку трифазного випрямляча тягового контуру статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4М3а.

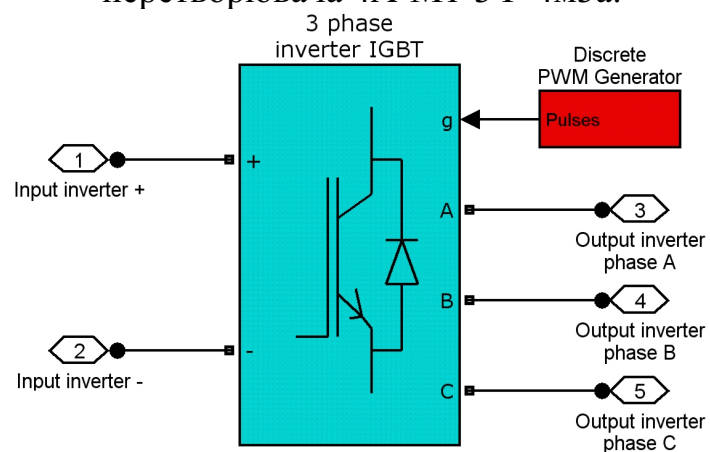


Рис. Н.6. Модель блоку трифазного інвертора тягового контуру статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4М3а.

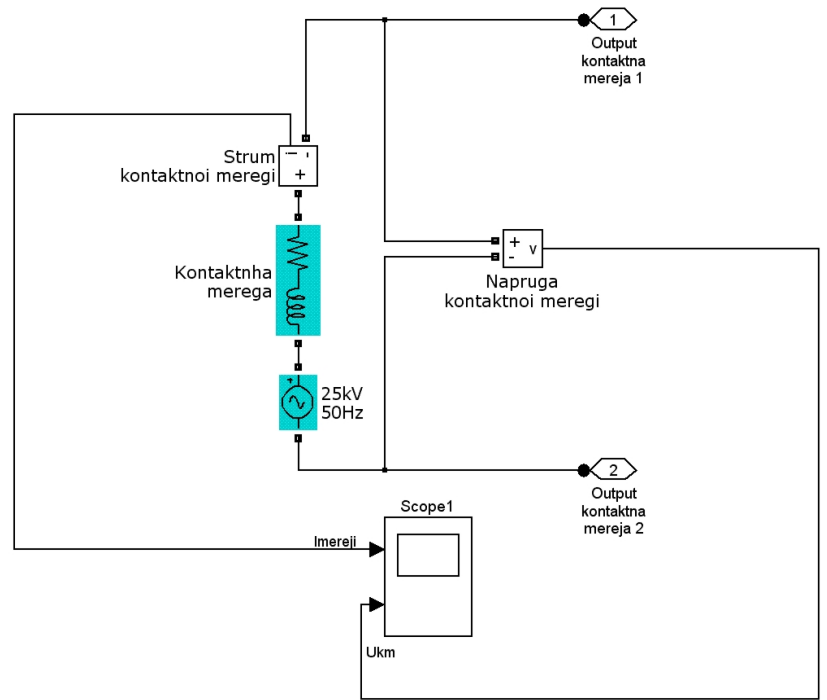


Рис. Н.7. Модель контактної мережі змінного струму напругою 25 кВ 50 Гц.

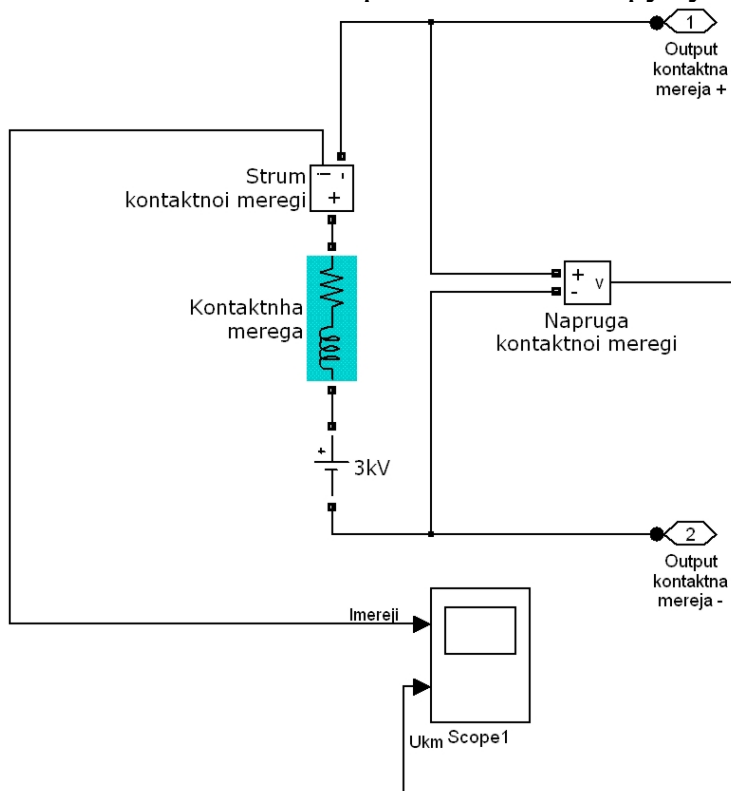


Рис. Н.8. Модель контактної мережі постійного струму напругою 3 кВ.

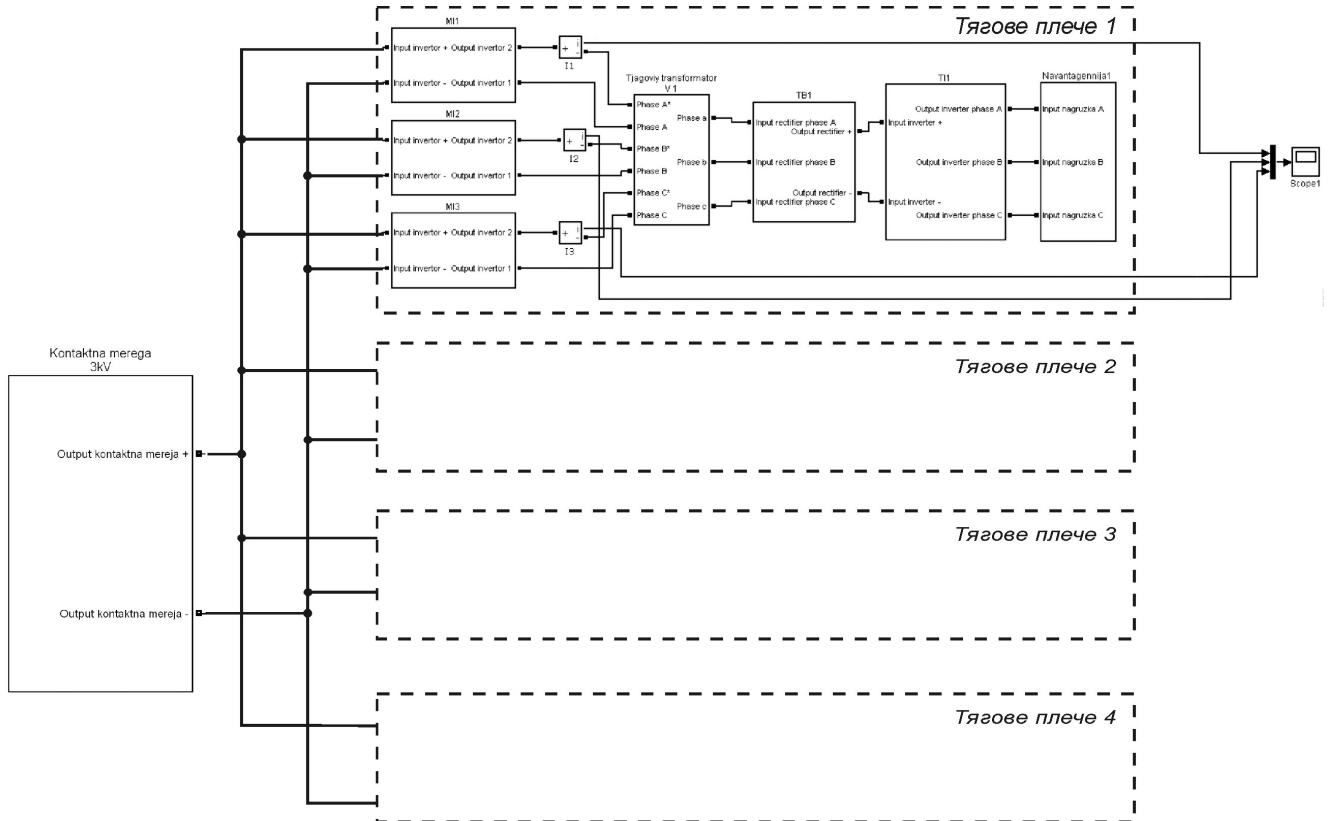


Рис. Н.9. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М1-3Ф-4мЗа при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

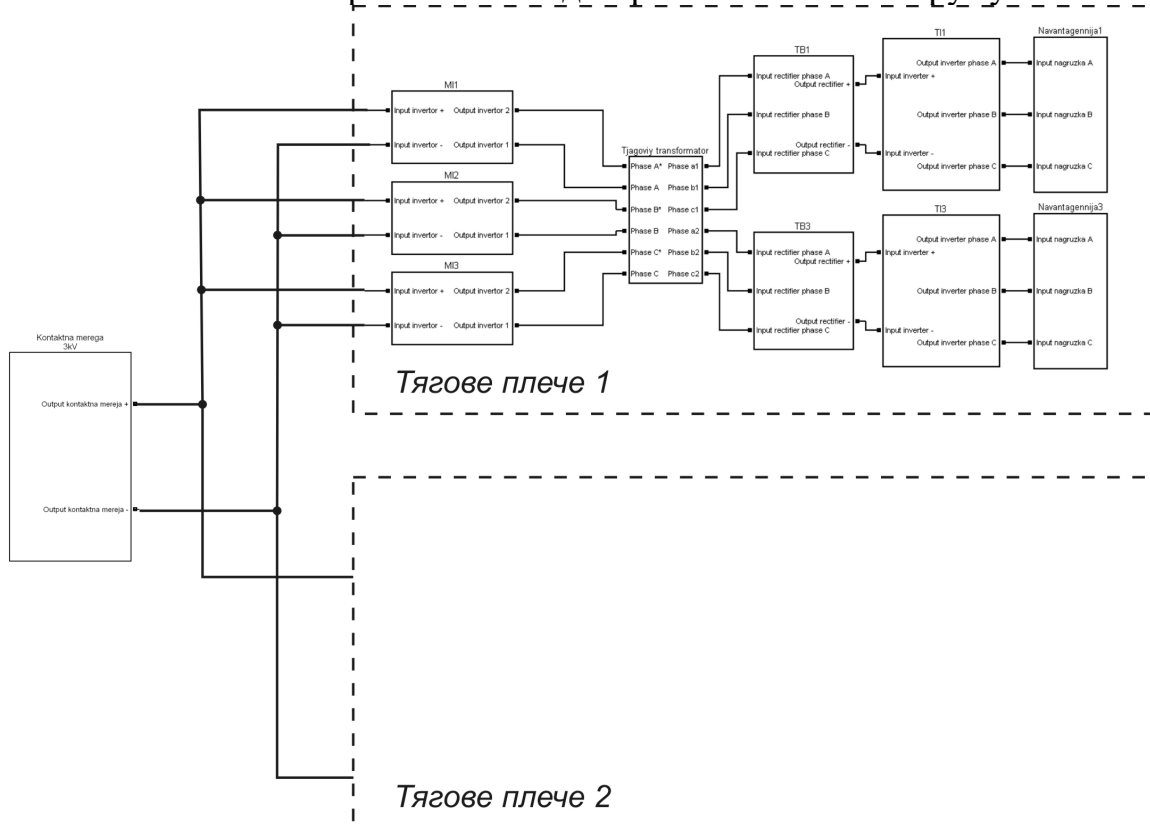


Рис. Н.10. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М2-3Ф-2мЗа при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

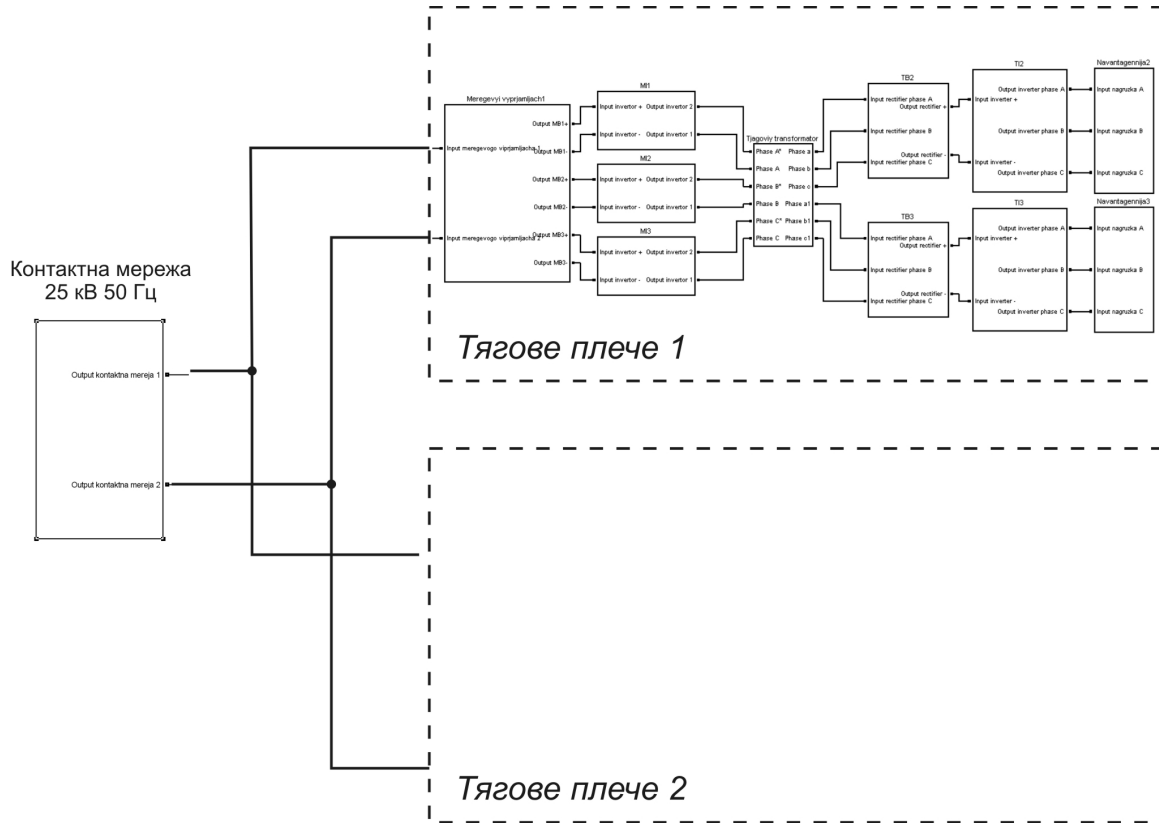


Рис. Н.11. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4А-М2-3Ф-2м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц..

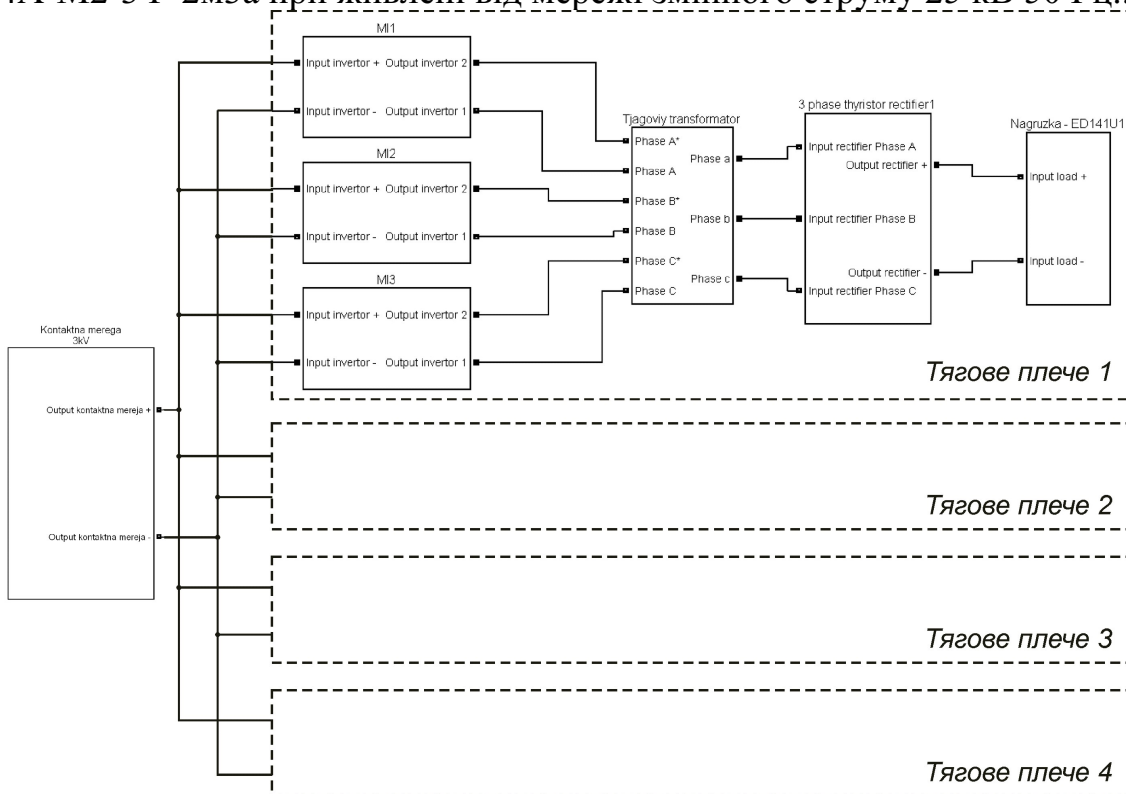


Рис. Н.12. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4Т-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

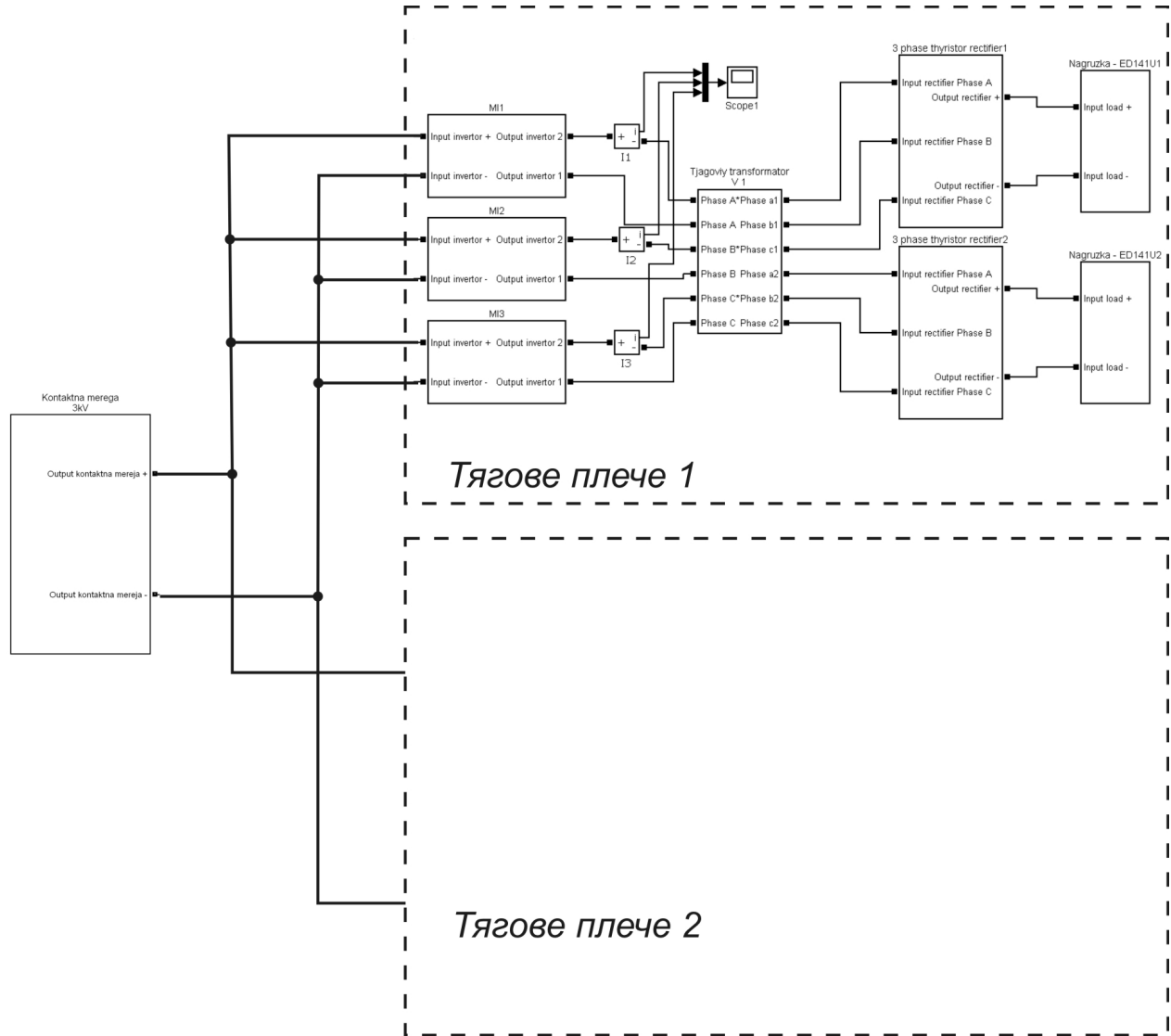


Рис. Н.13. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4Т-М2-3Ф-2м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

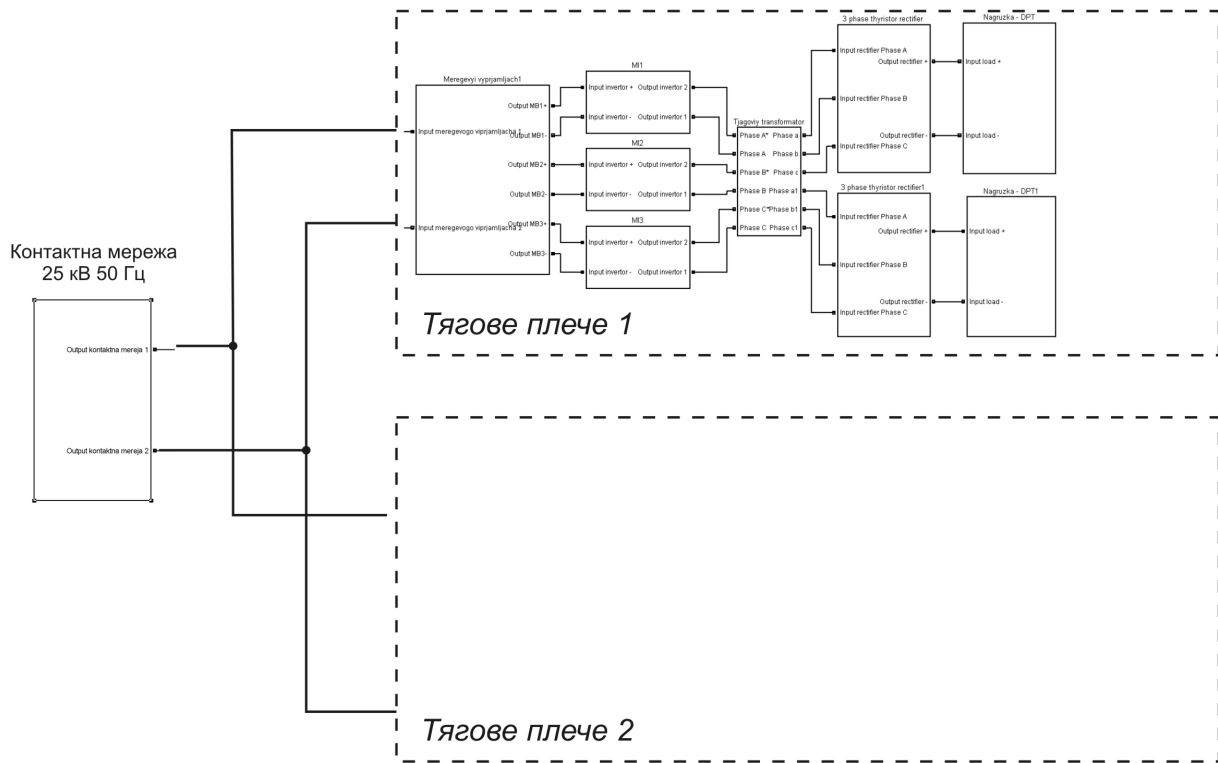


Рис. Н.14. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 4Т-М2-3Ф-2м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

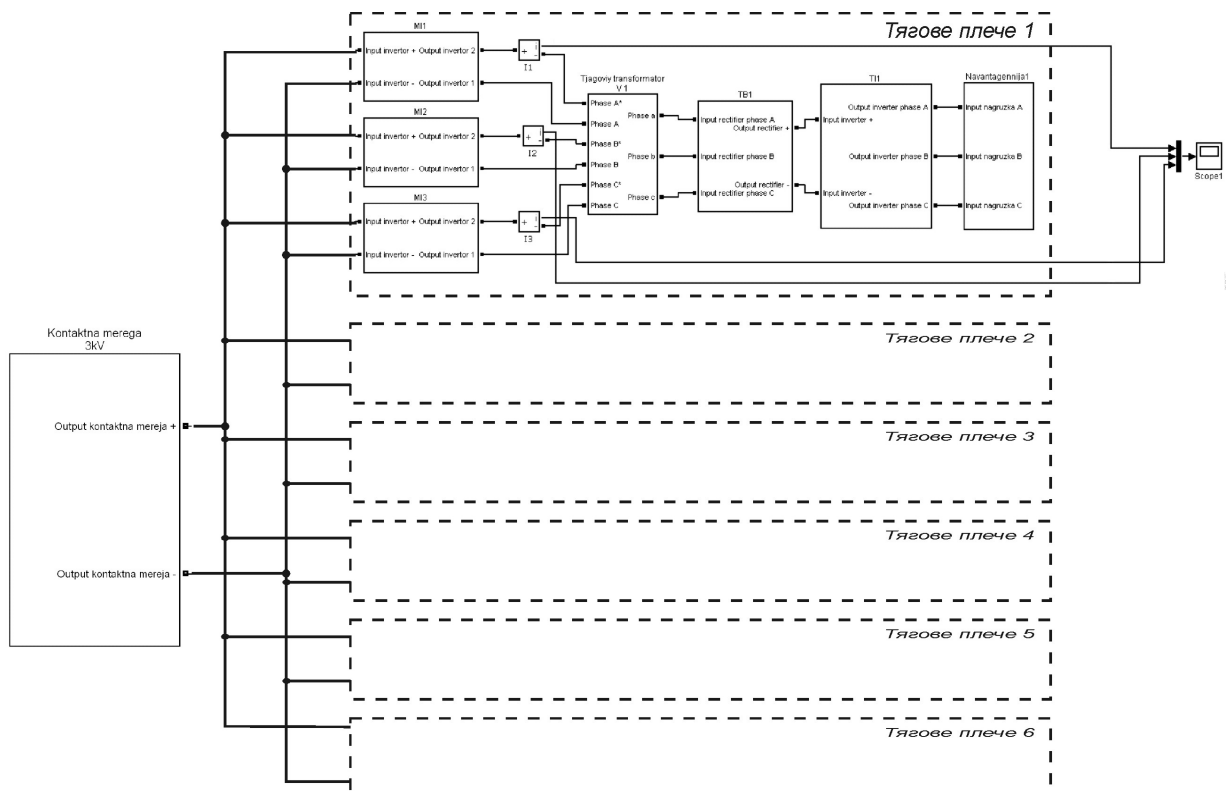


Рис. Н.15. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-М1-3Ф-6м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

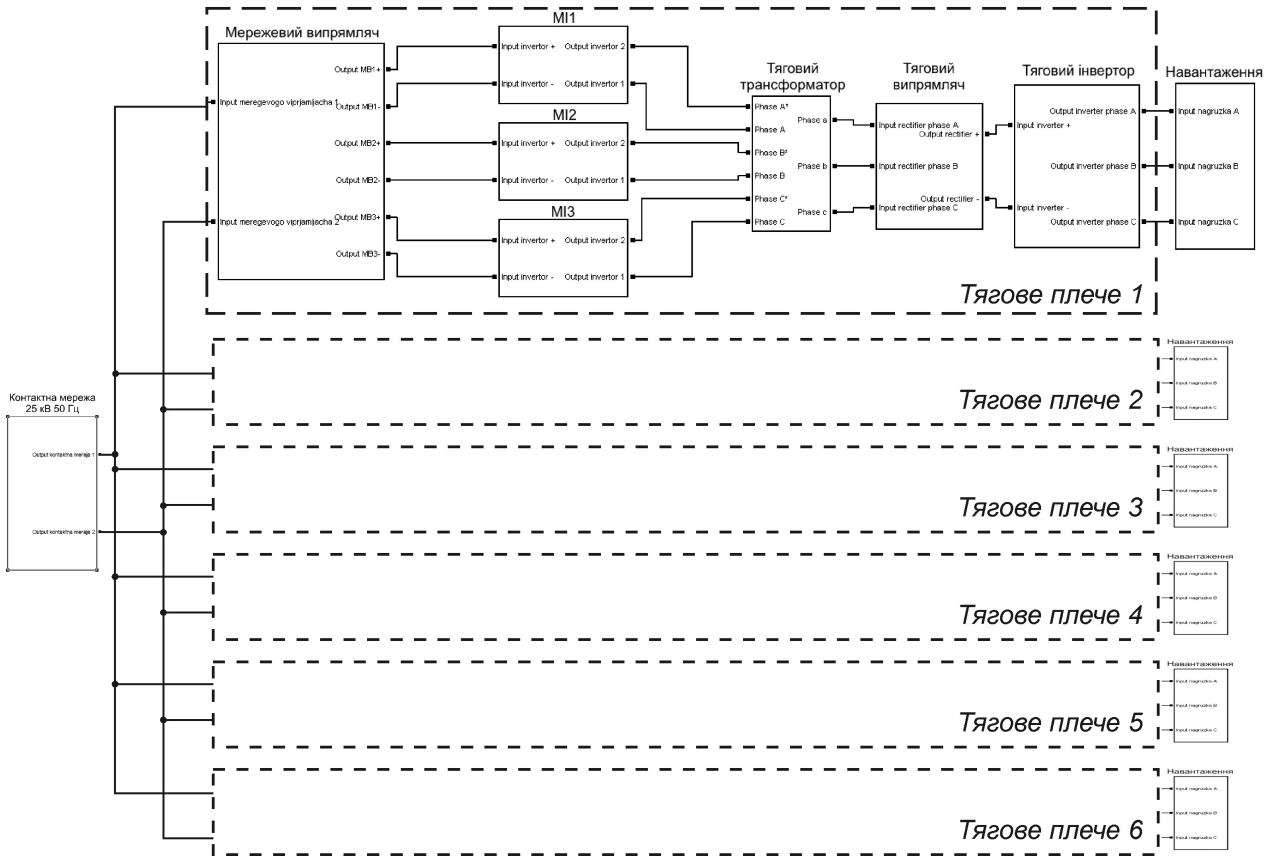


Рис. Н.16. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-М1-3Ф-6м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

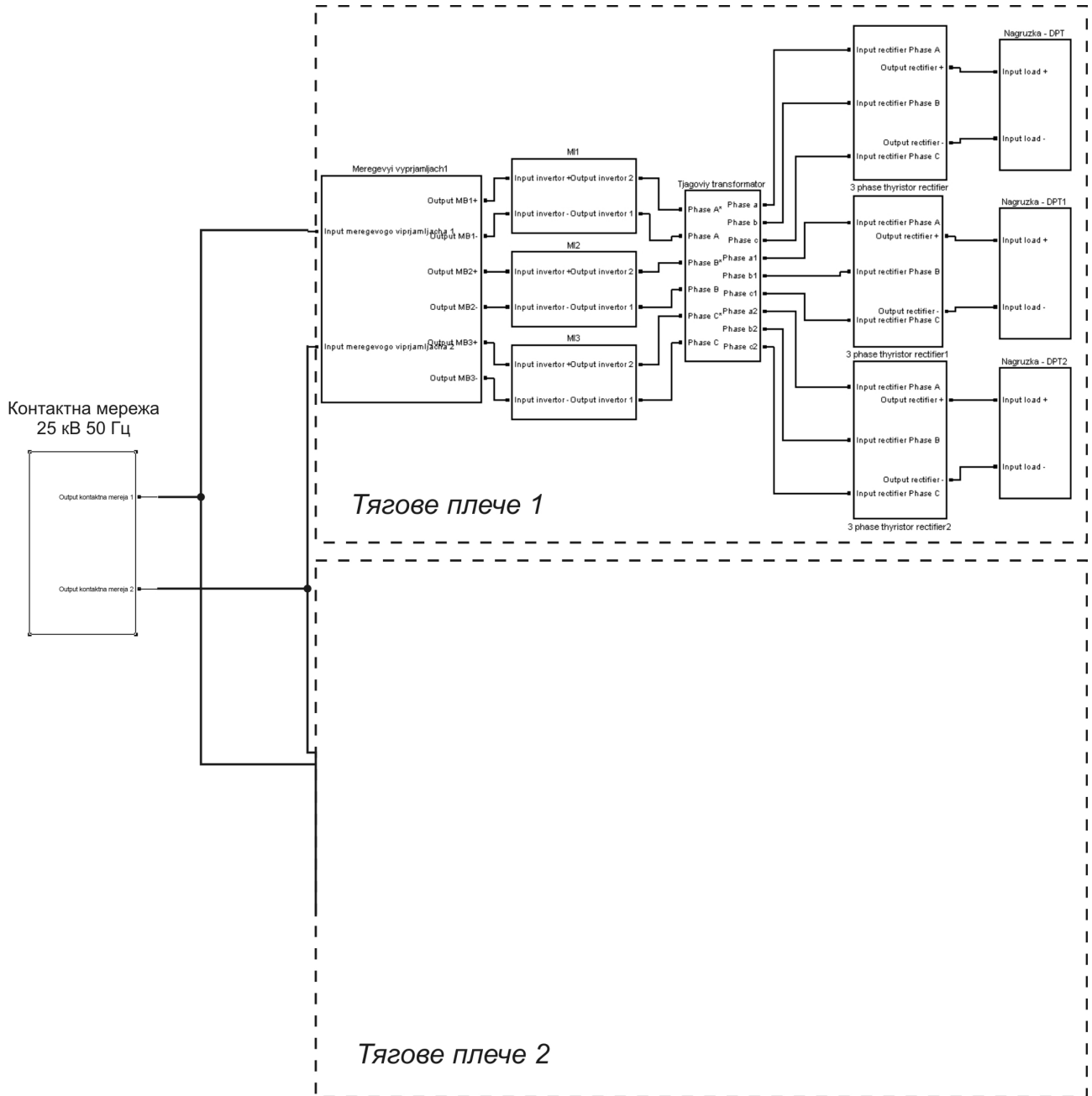


Рис. Н.17. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6Т-М3-3Ф-2М3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

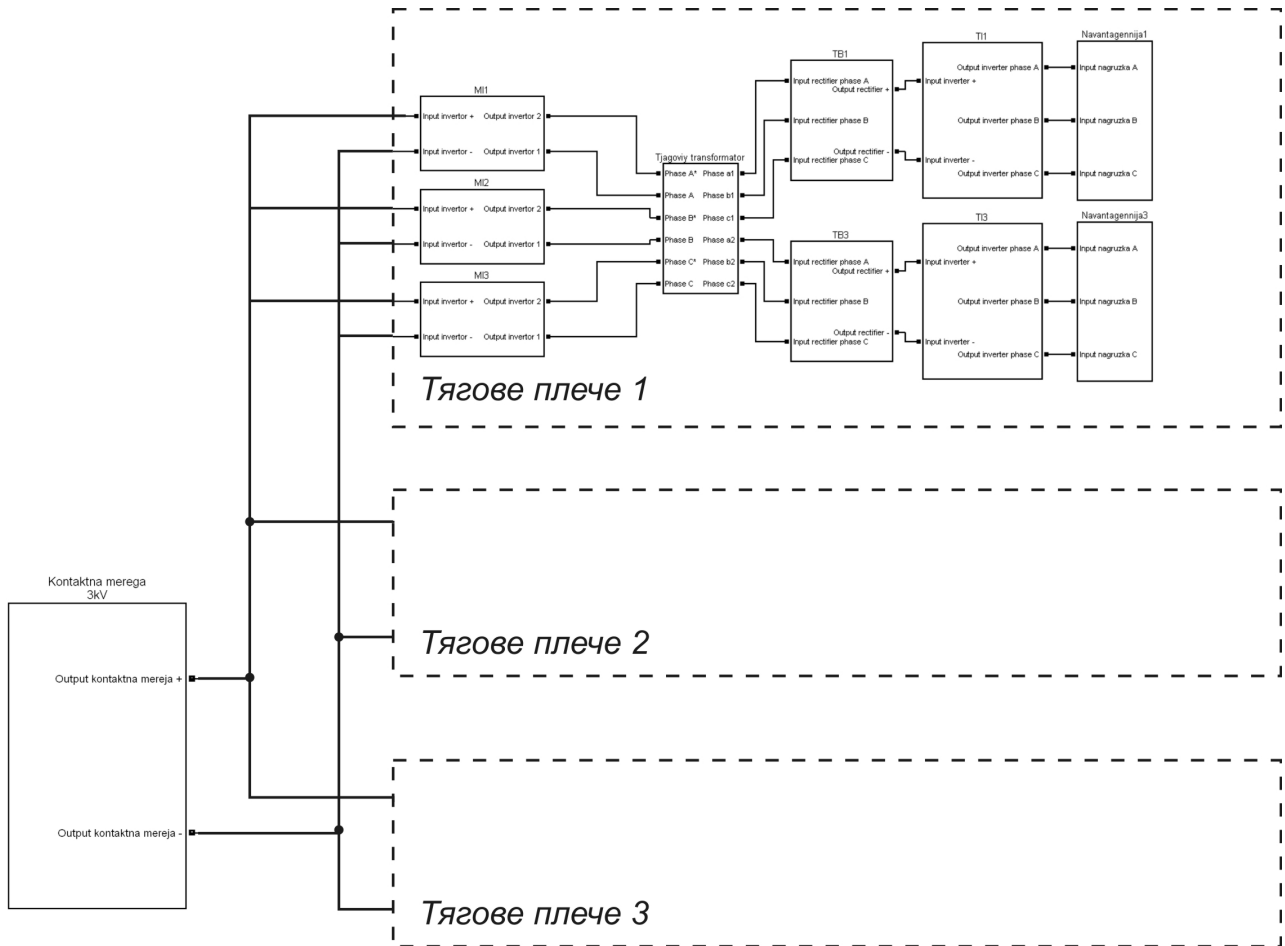


Рис. Н.18. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

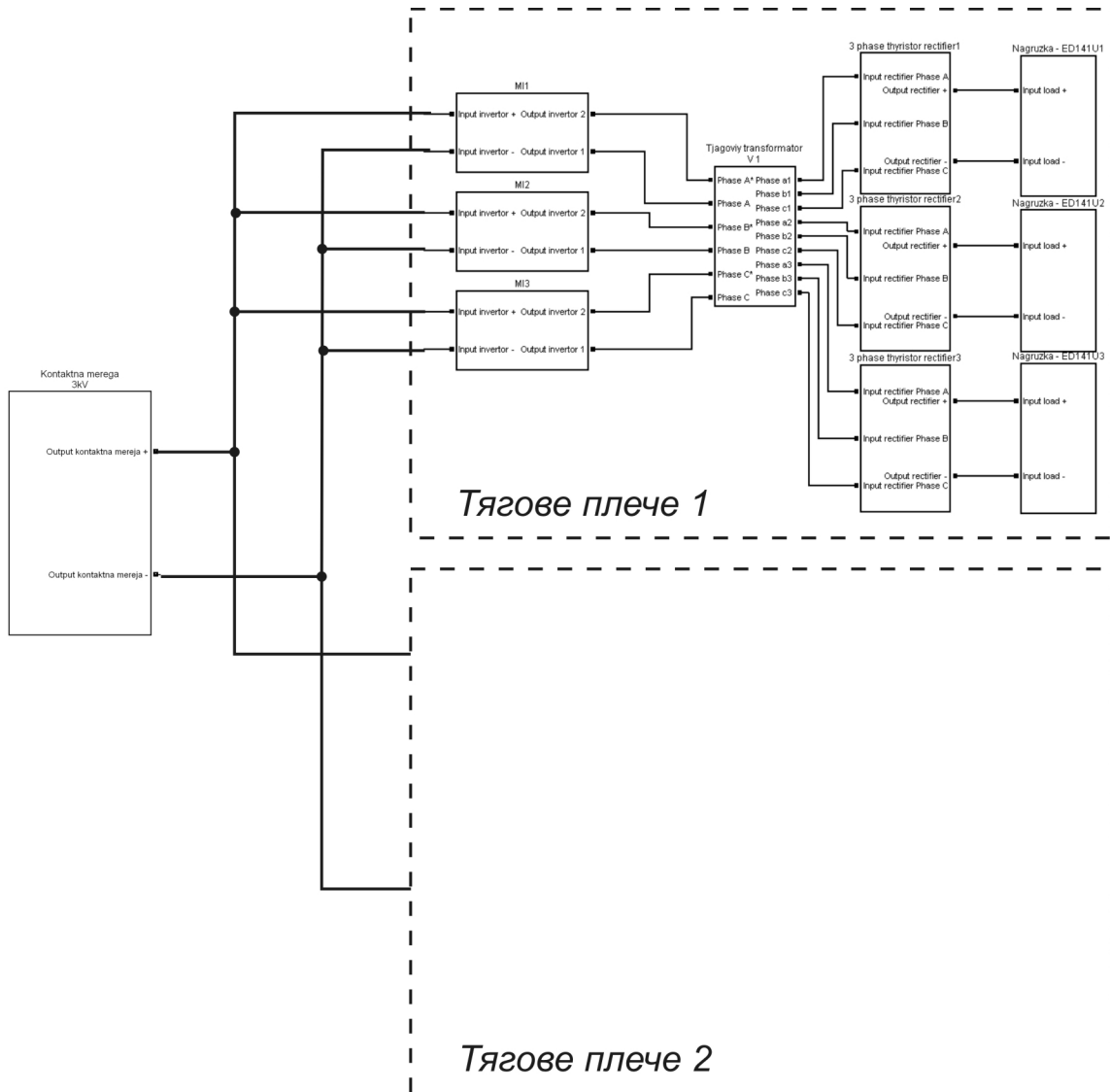


Рис. Н.19. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-МЗ-3Ф-2мЗа при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

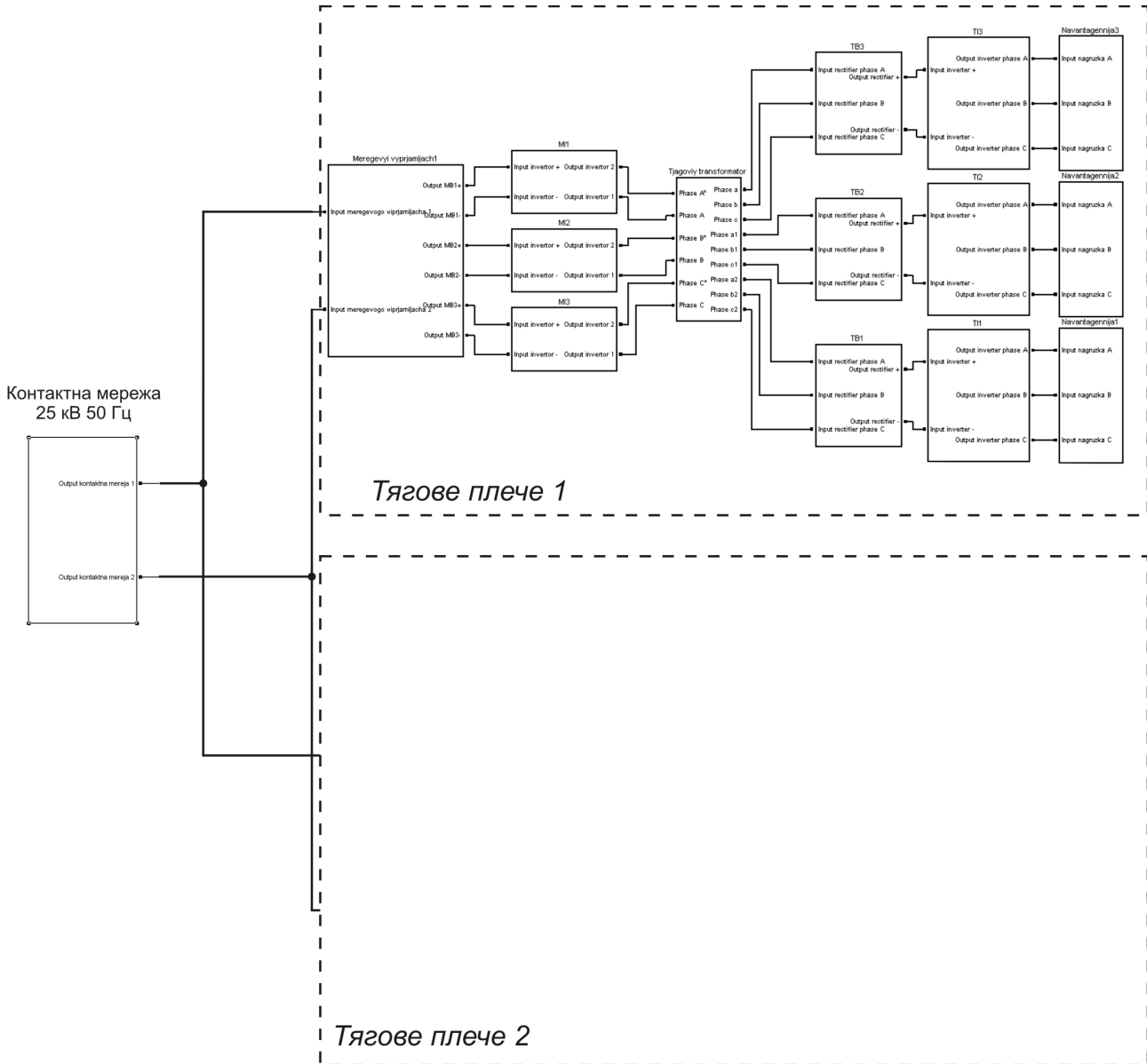


Рис. Н.20. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-МЗ-3Ф-2М3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

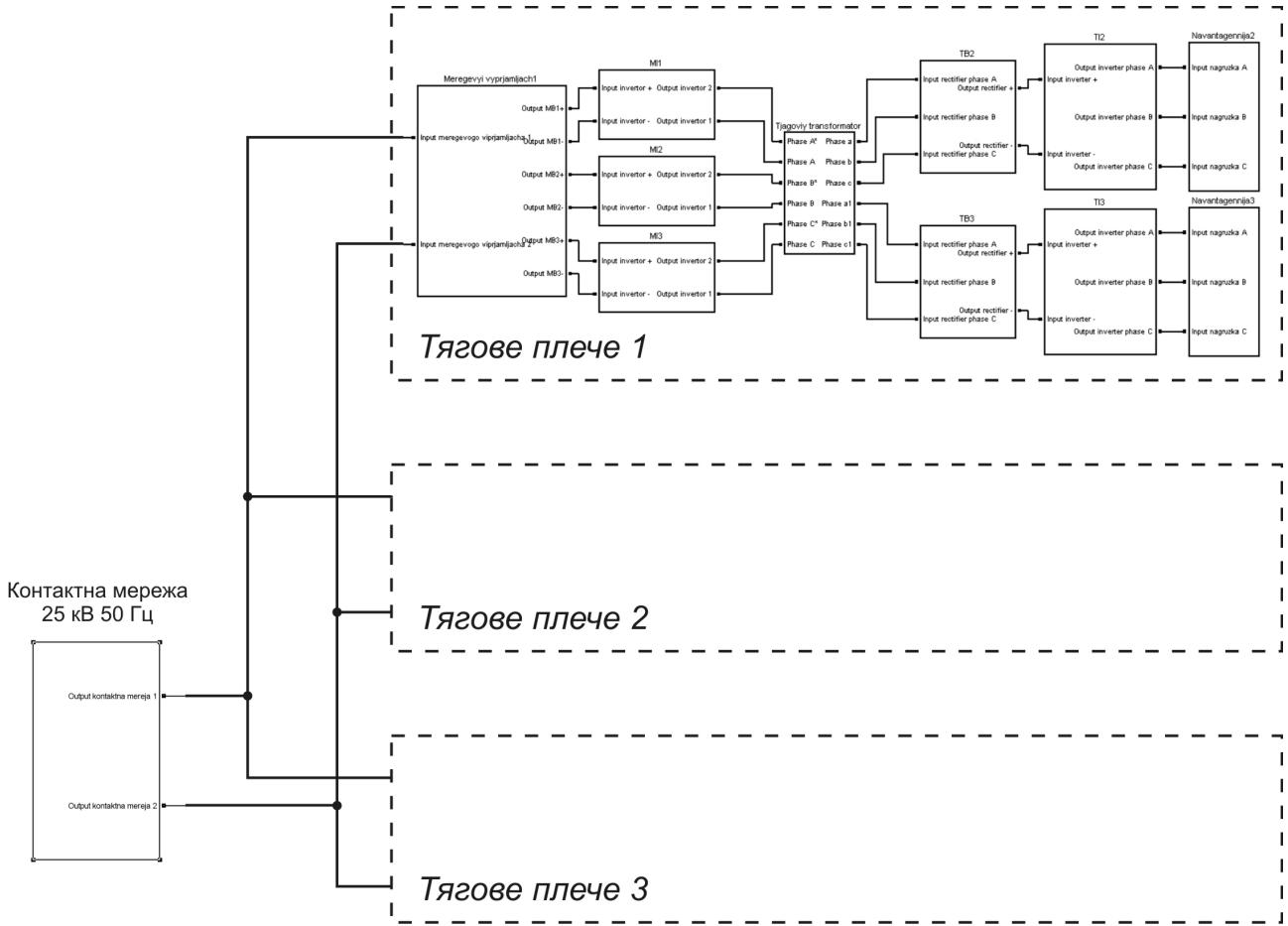


Рис. Н.21. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

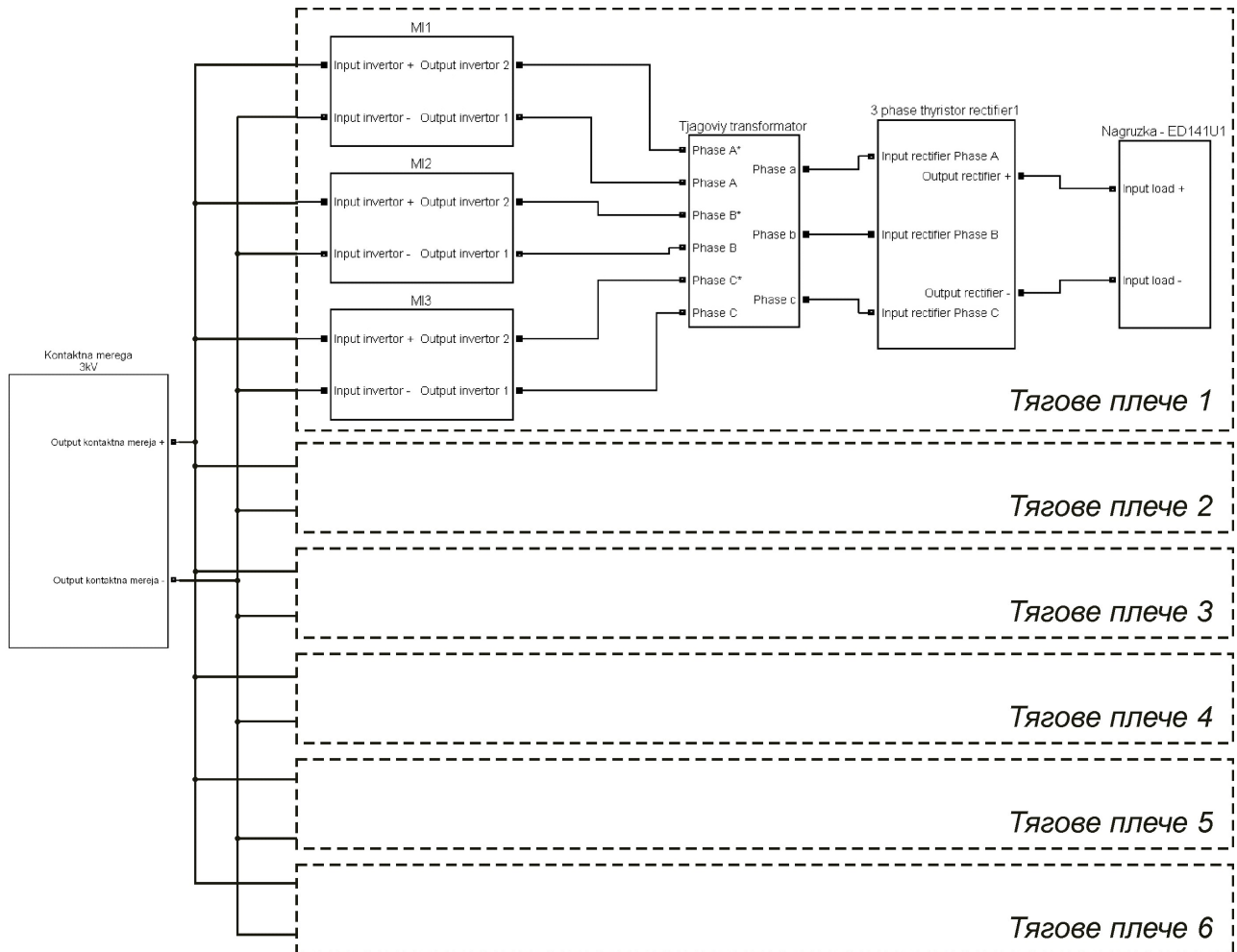


Рис. Н.22. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6Т-М1-3Ф-6м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

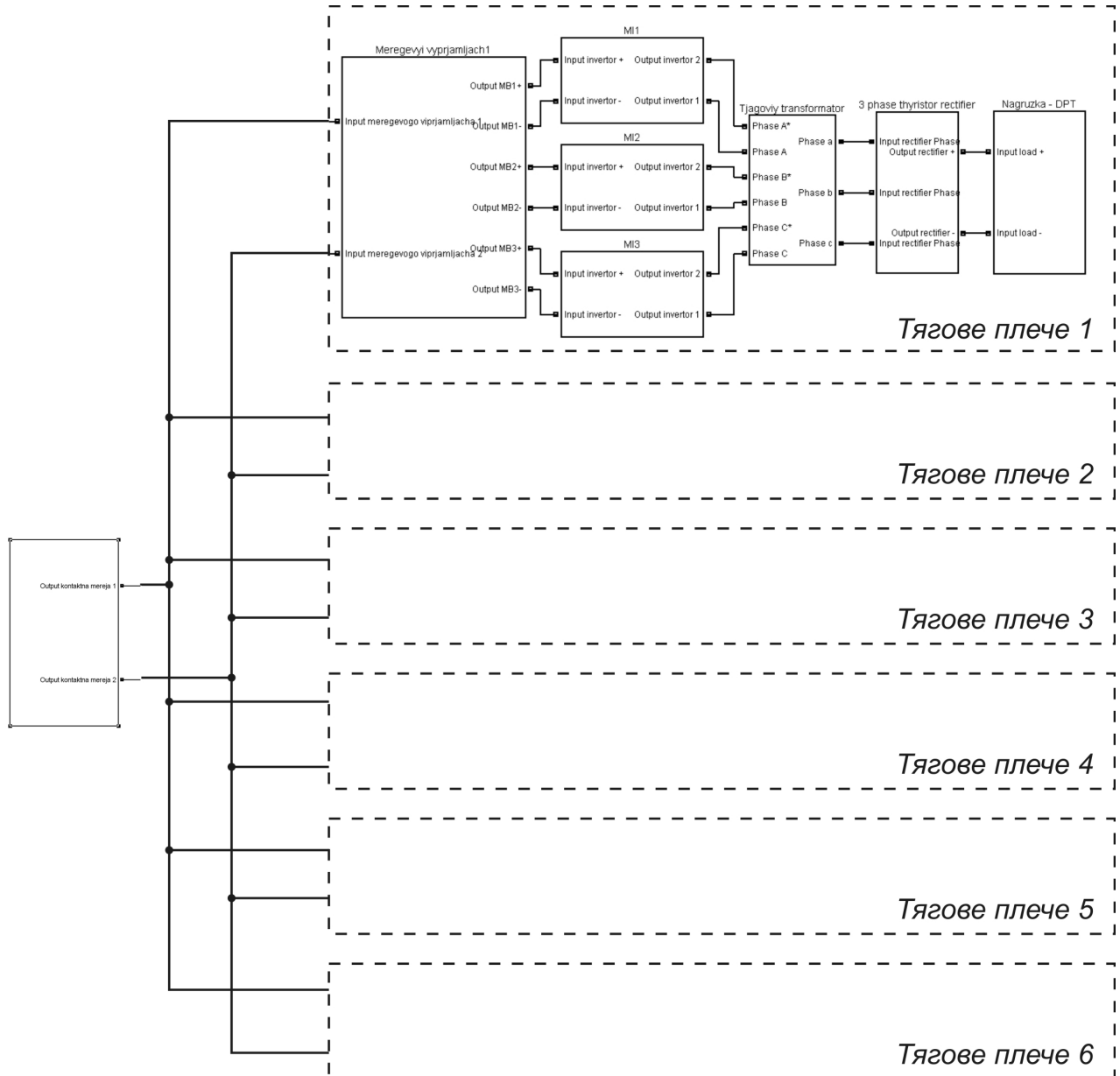


Рис. Н.23. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6Т-М1-3Ф-6м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

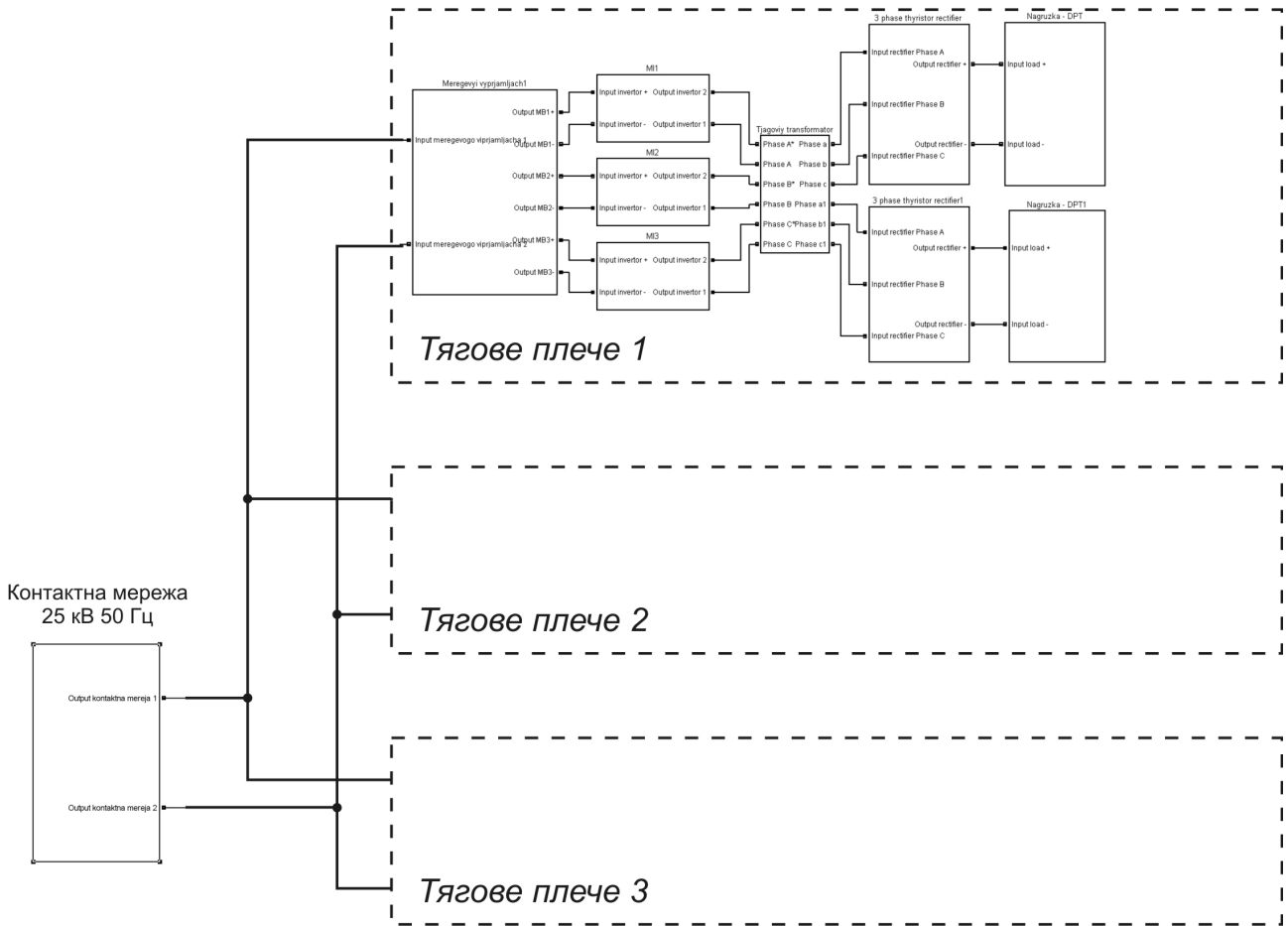


Рис. Н.24. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6Т-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц.

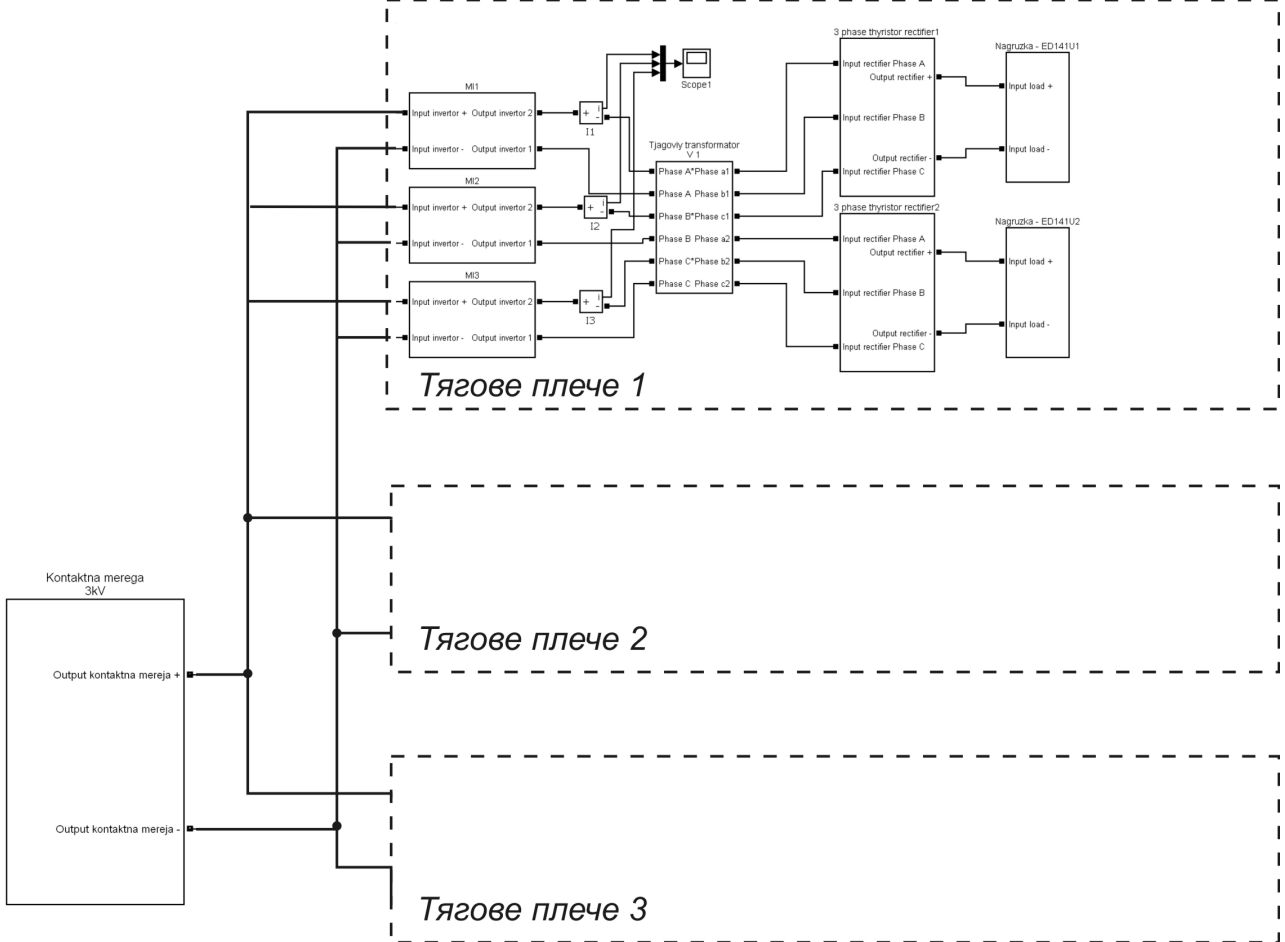


Рис. Н.25. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6Т-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

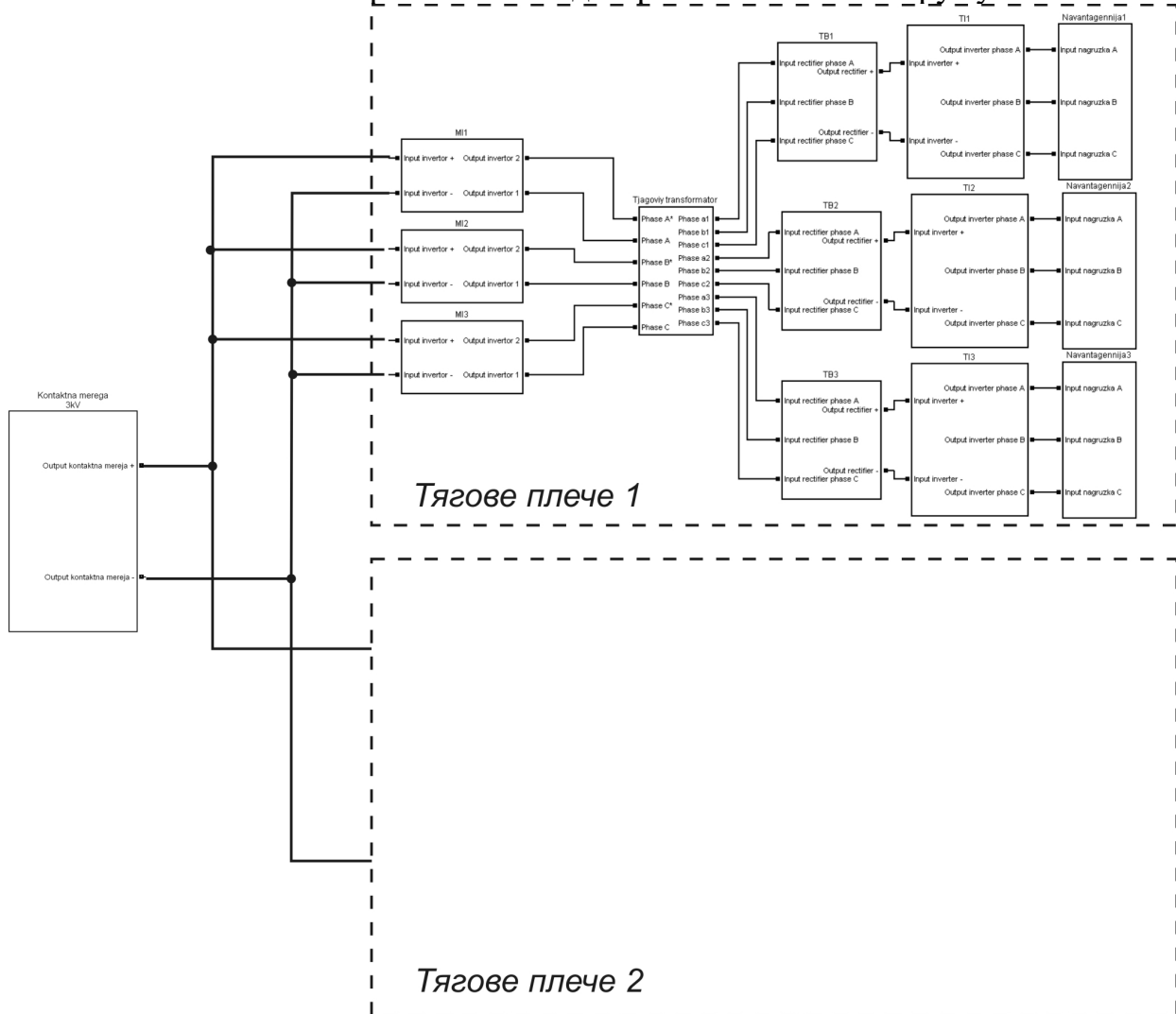


Рис. Н.26. Модель для імітаційного моделювання статичного перетворювача 6А-М3-3Ф-2м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ.

Додаток П

Рівень нормованих гармонік вхідного струму перетворювачів різних типів

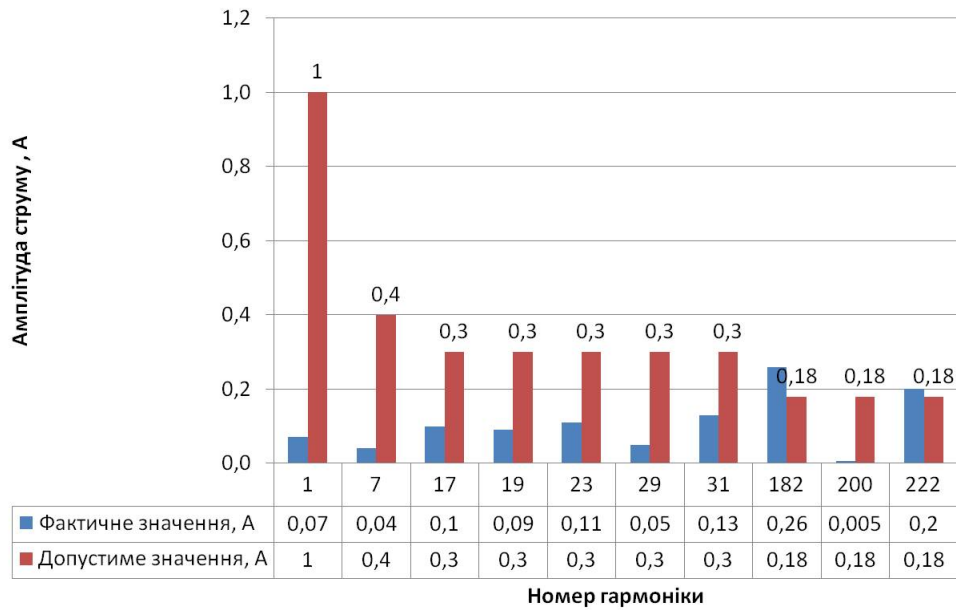


Рис. П.1. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4А-М2-3Φ-2м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

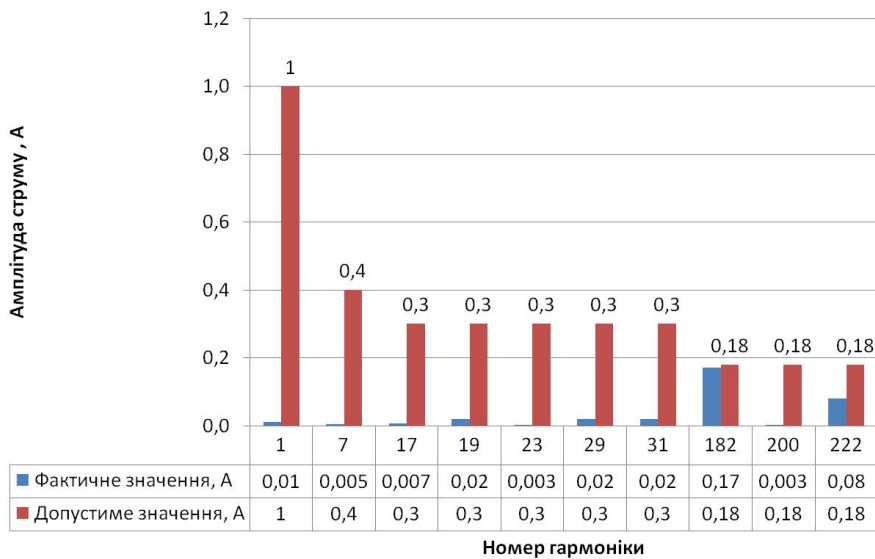


Рис. П.2. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4Т-М1-3Φ-4м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

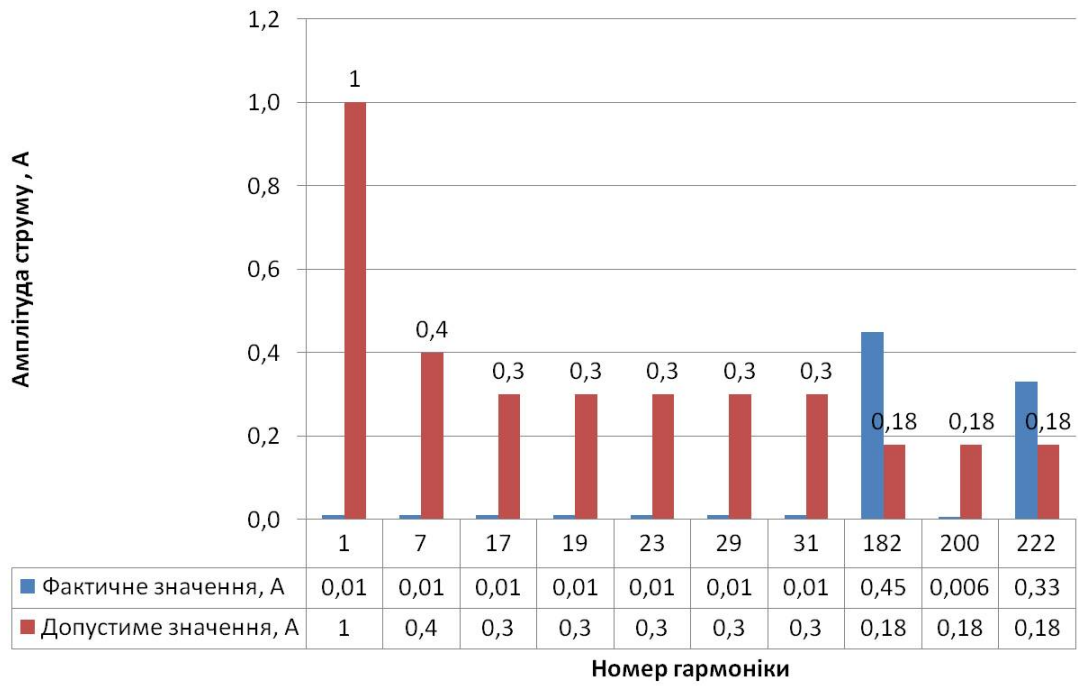


Рис. П.3. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4Т-М2-3Φ-2м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

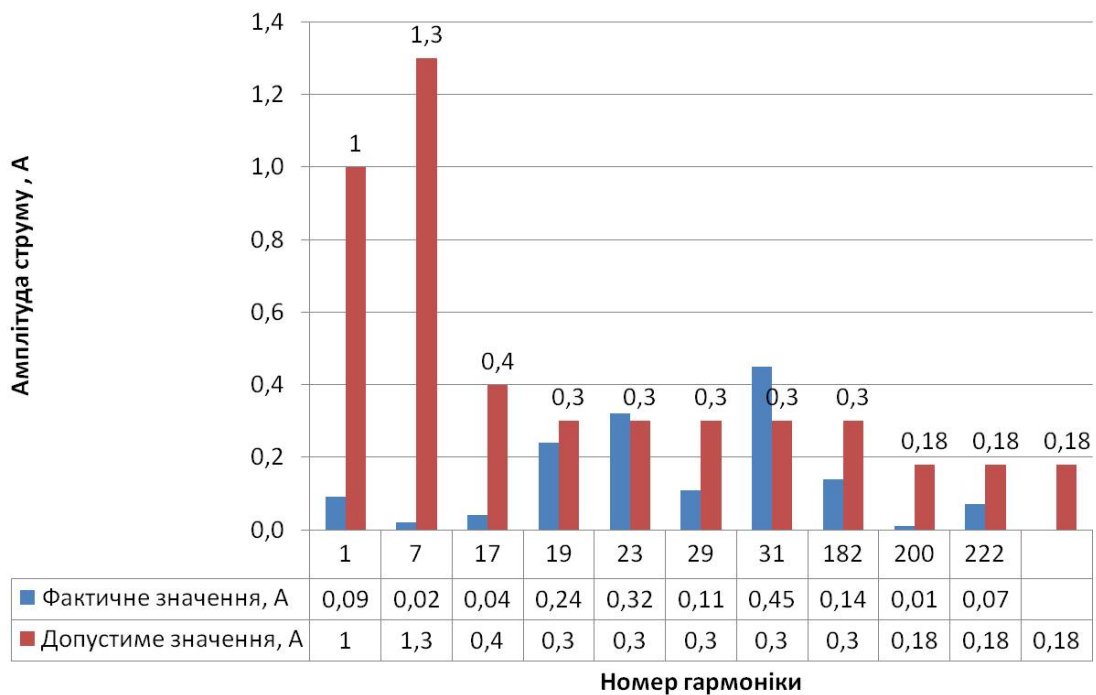


Рис. П.4. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6А-М1-3Φ-6м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

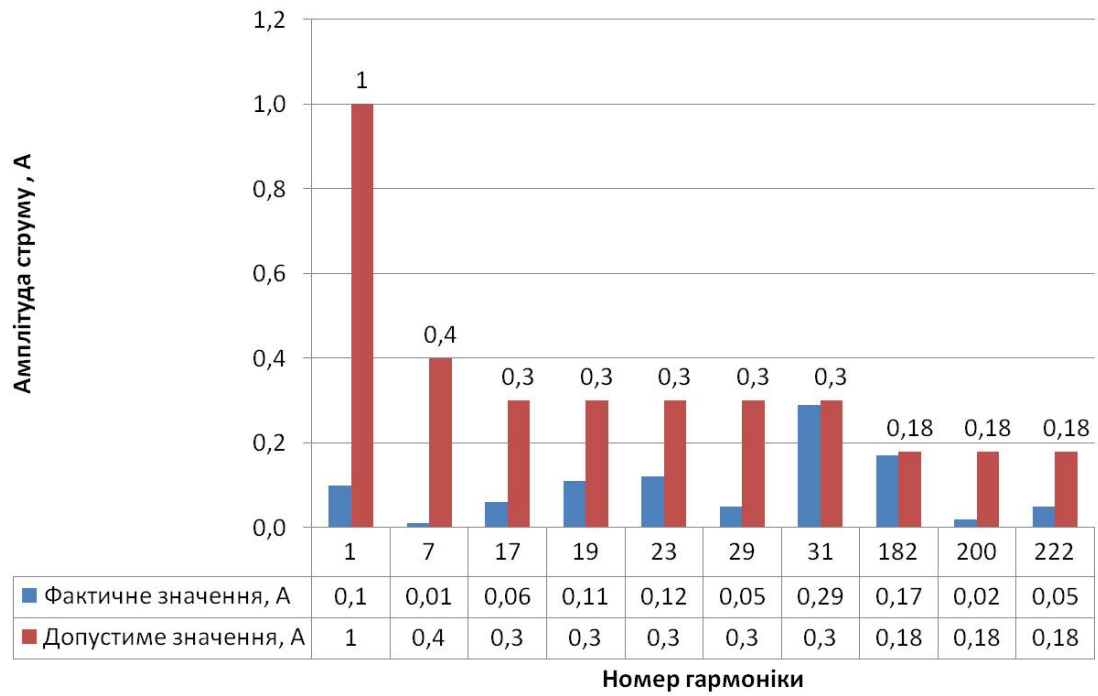


Рис. П.5. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6А-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

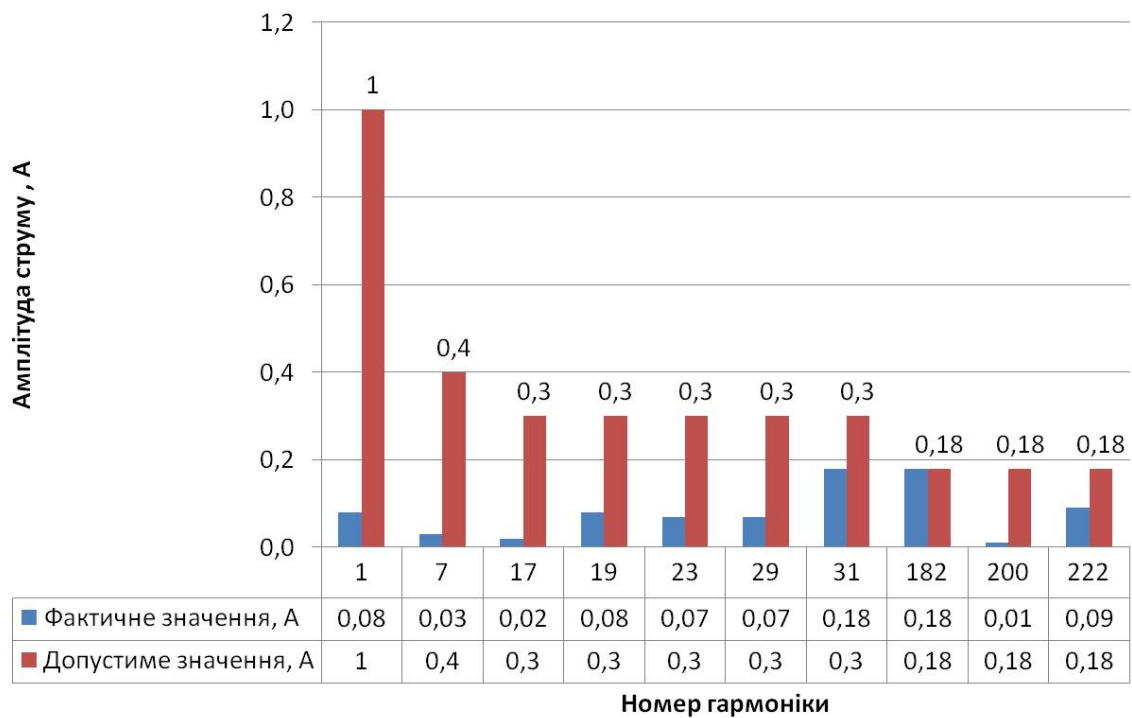


Рис. П.6. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6А-М3-3Ф-2м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

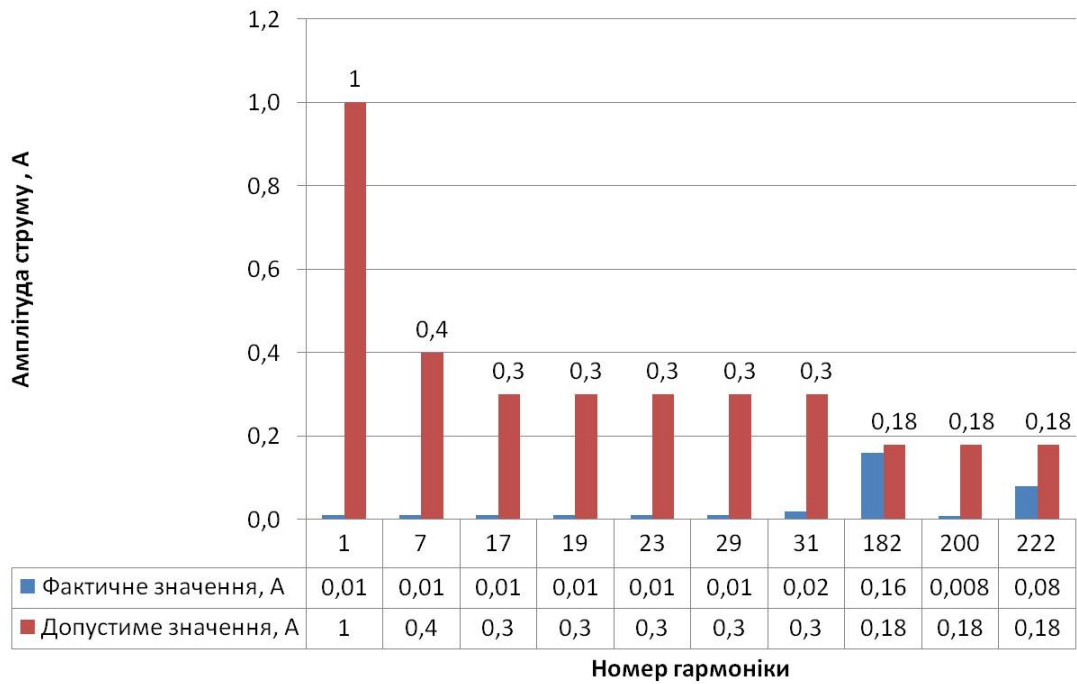


Рис. П.7. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6Т-М1-3Φ-6м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

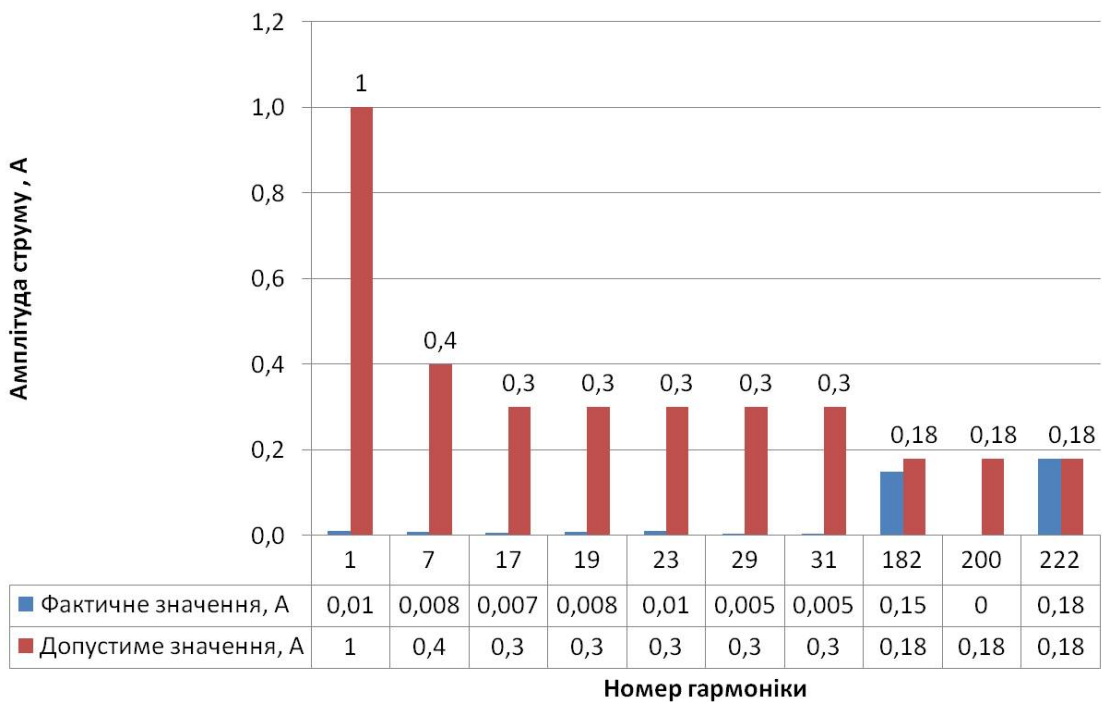


Рис. П.8. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6Т-М2-3Φ-3м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

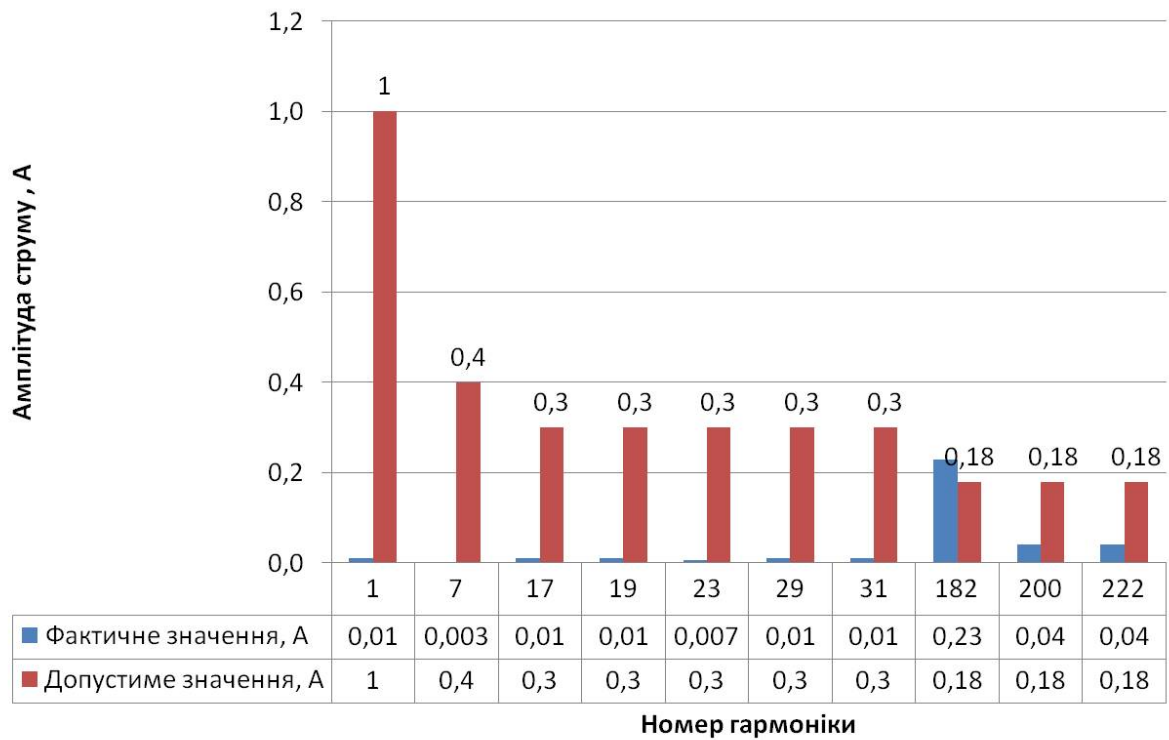


Рис. П.9. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6Т-МЗ-3Ф-2м3а при живленні від мережі змінного струму 25 кВ 50 Гц з їх допустимими значеннями.

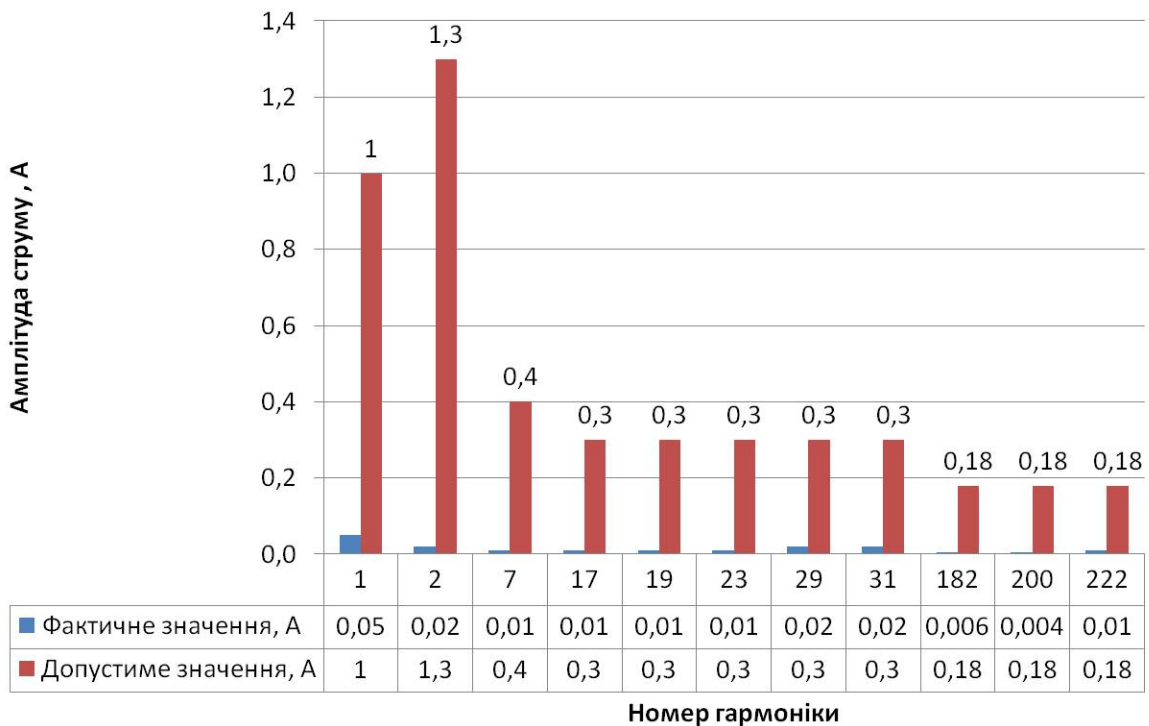


Рис. П.10. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4А-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

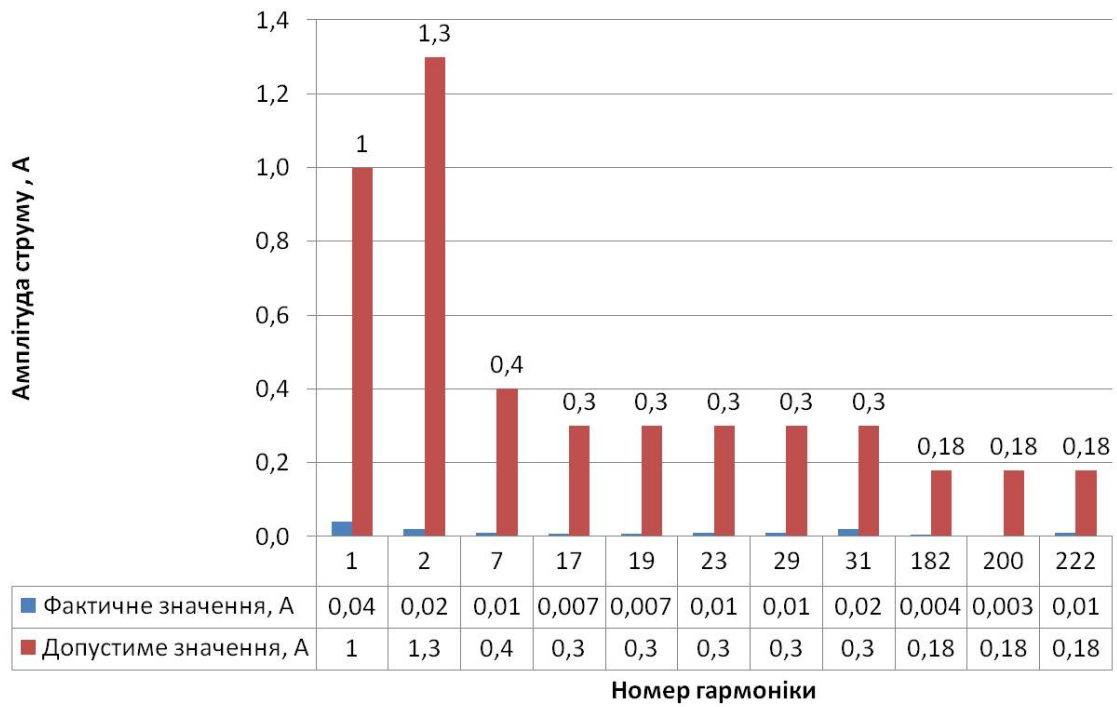


Рис. П.11. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4А-М2-3Ф-2м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

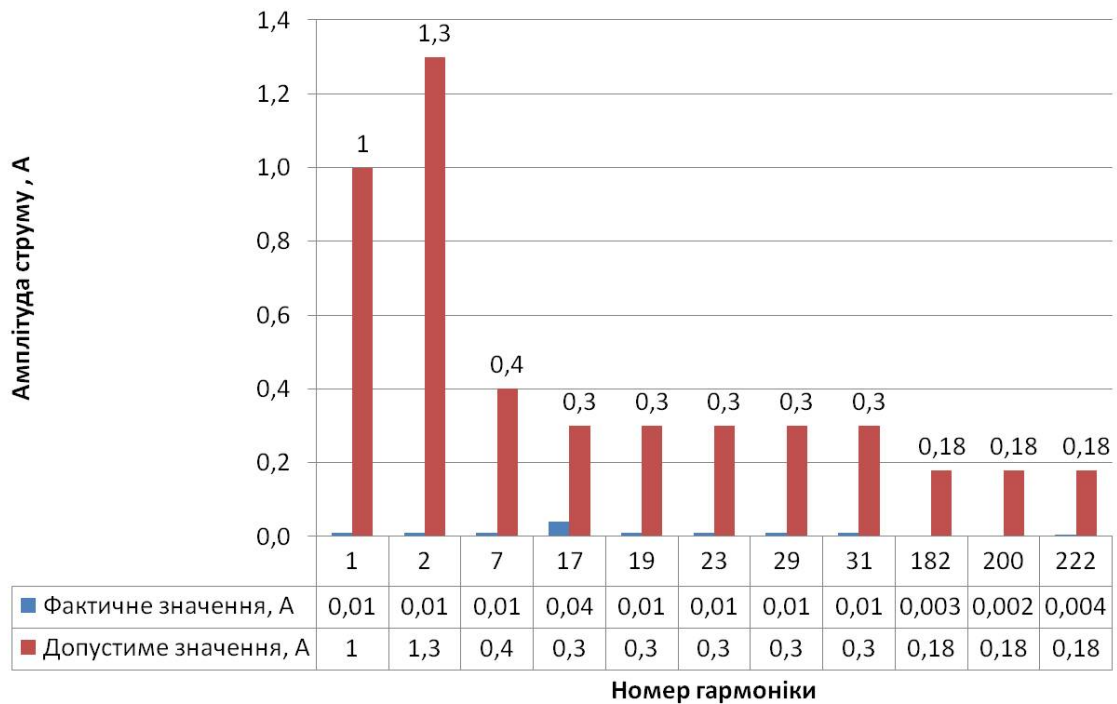


Рис. П.12. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4Т-М1-3Ф-4м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

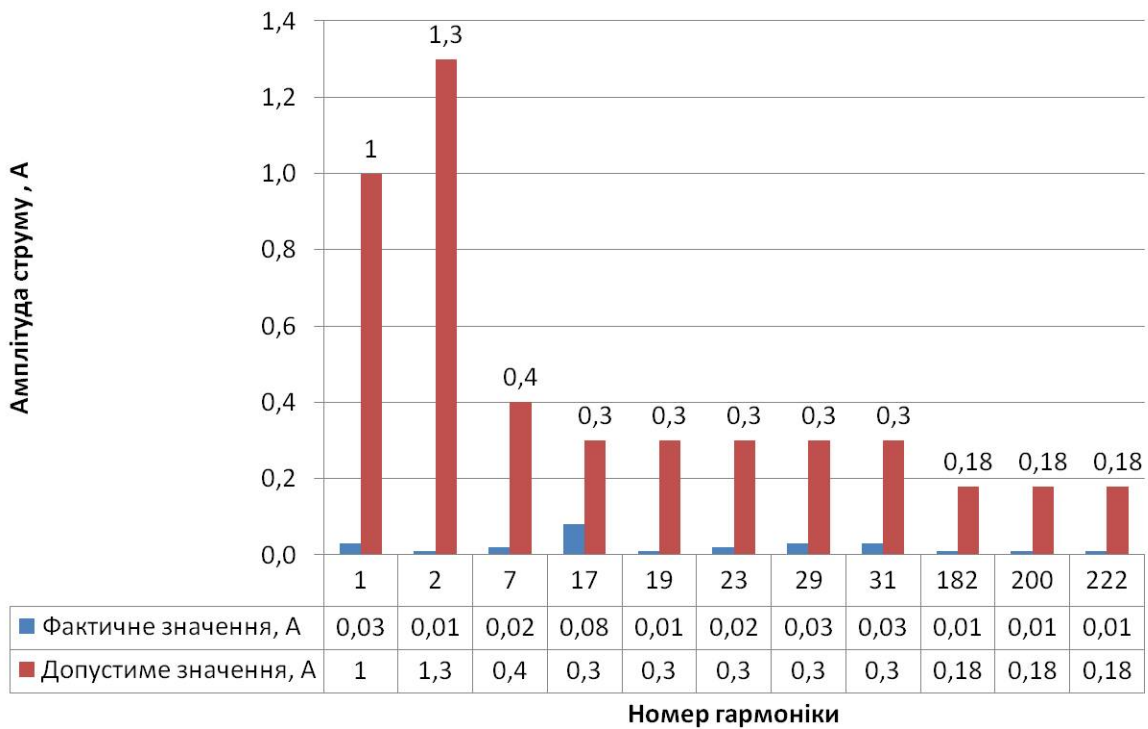


Рис. П.13. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 4Т-М2-3Ф-2м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

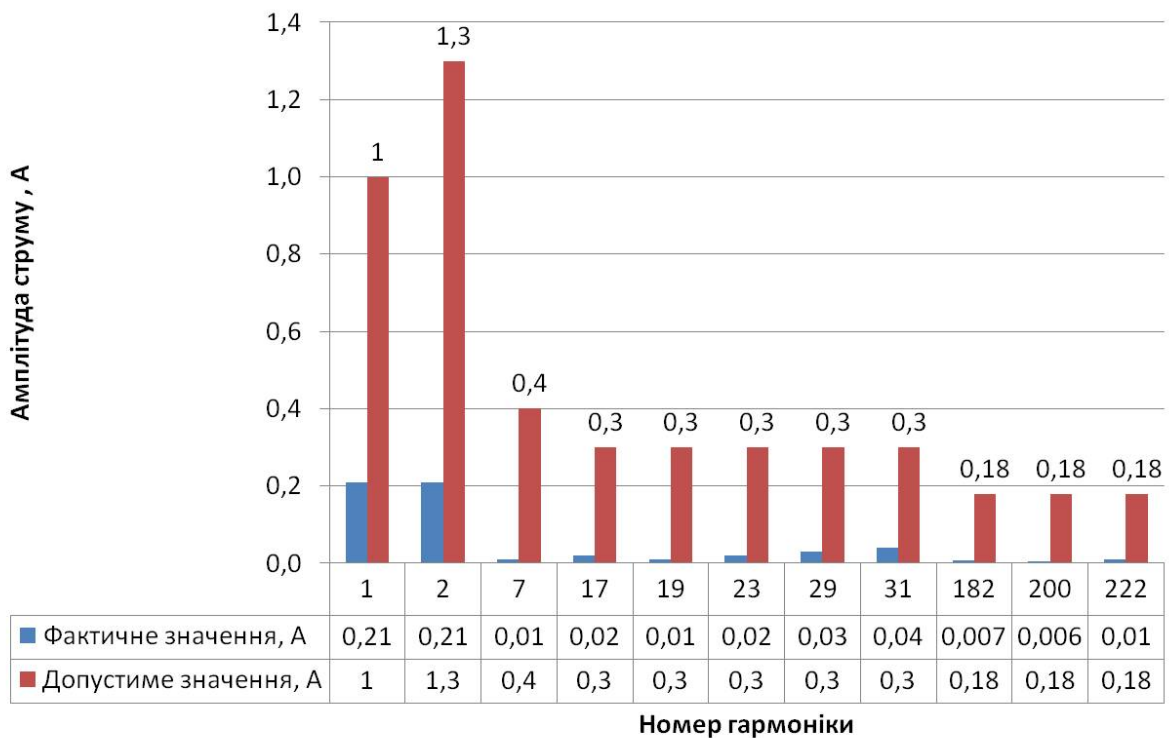


Рис. П.14. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6А-М1-3Ф-6м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

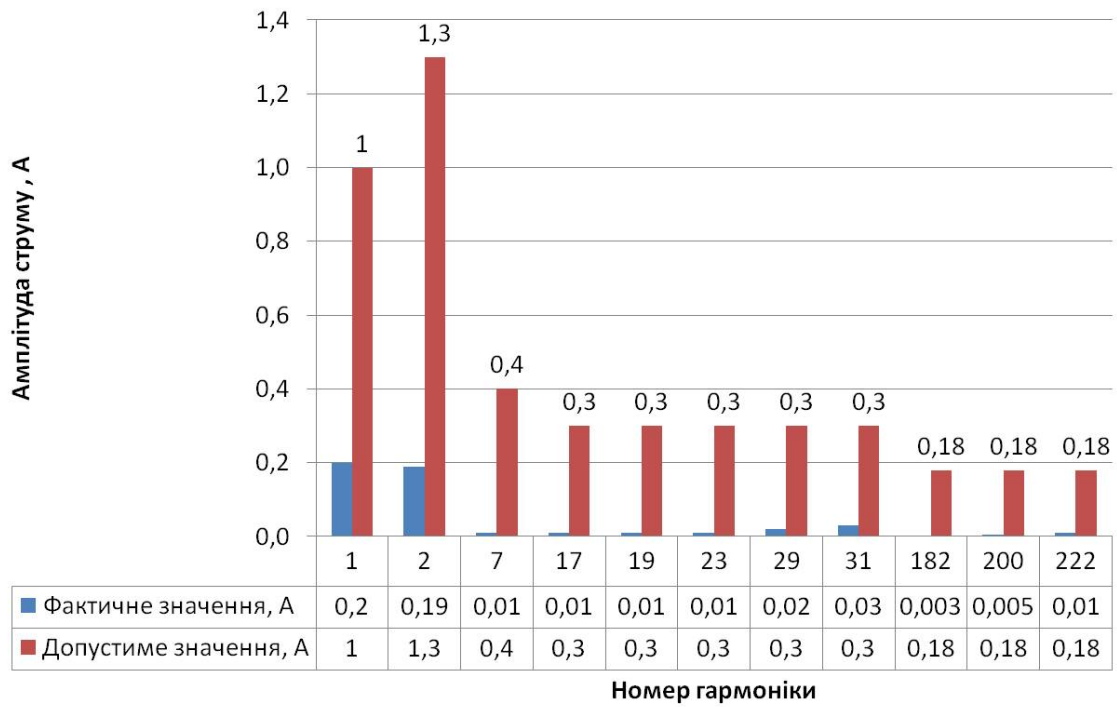


Рис. П.15. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6А-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

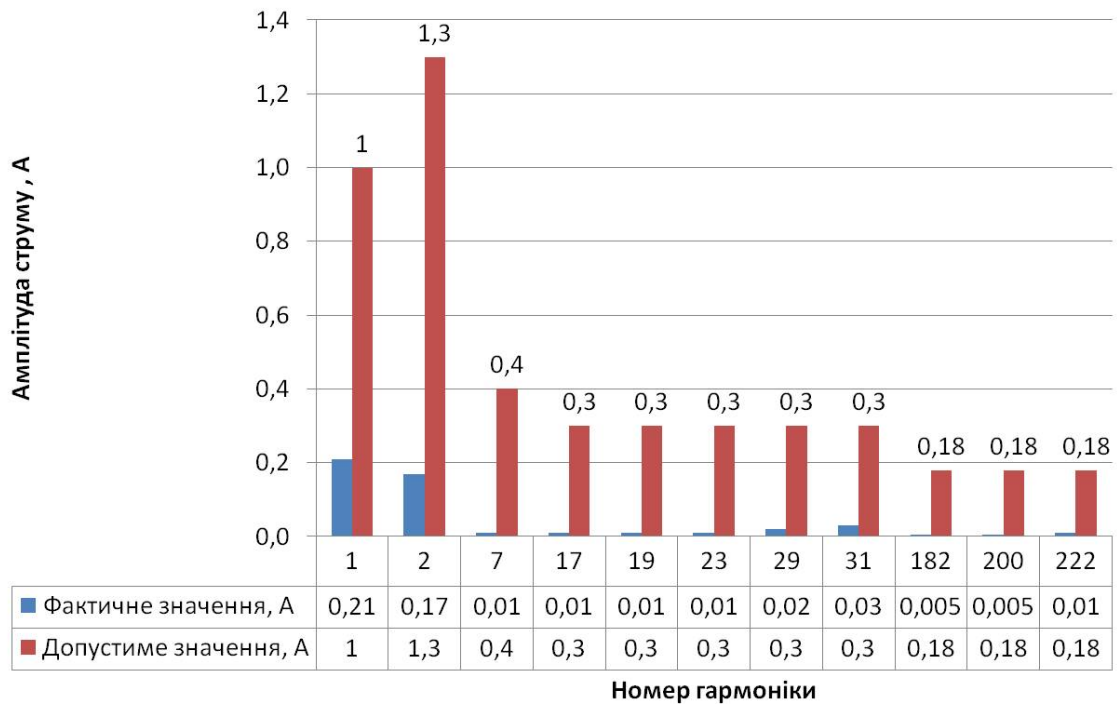


Рис. П.16. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6А-М3-3Ф-2м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

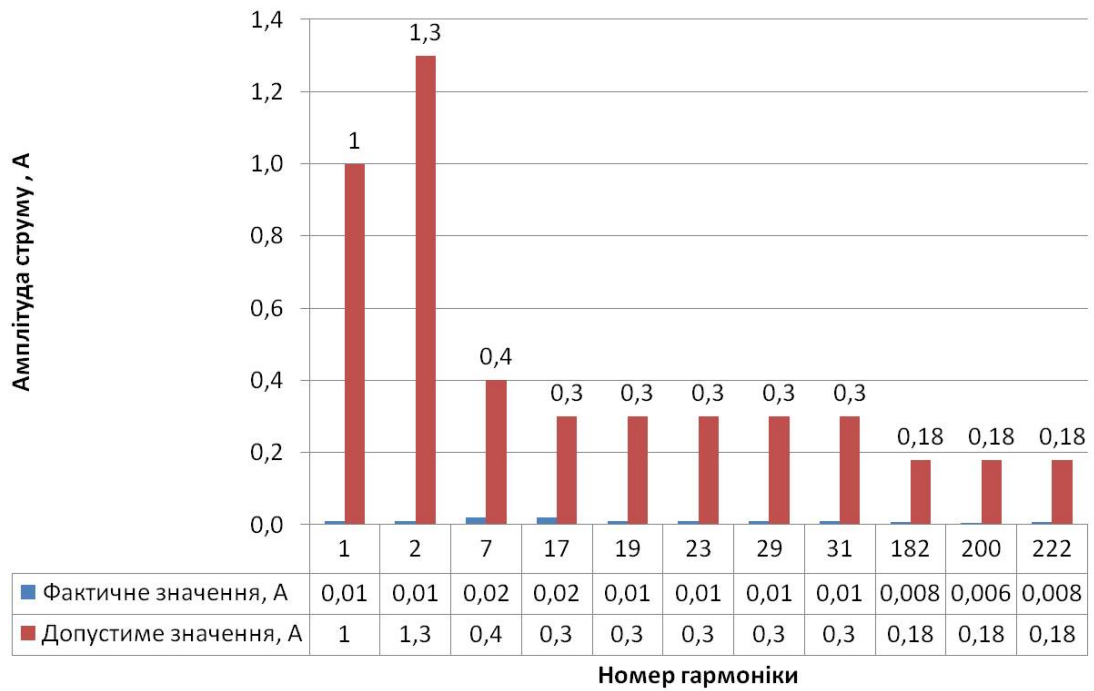


Рис. П.17. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6Т-М1-3Ф-6м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

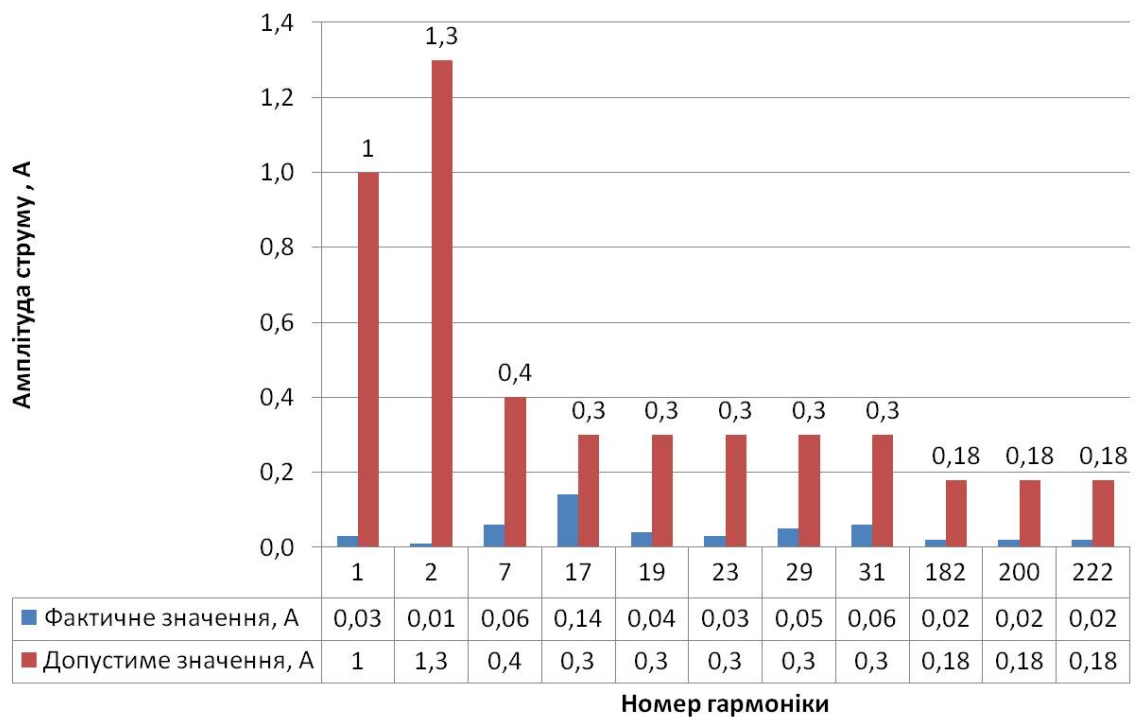


Рис. П.18. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6Т-М2-3Ф-3м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

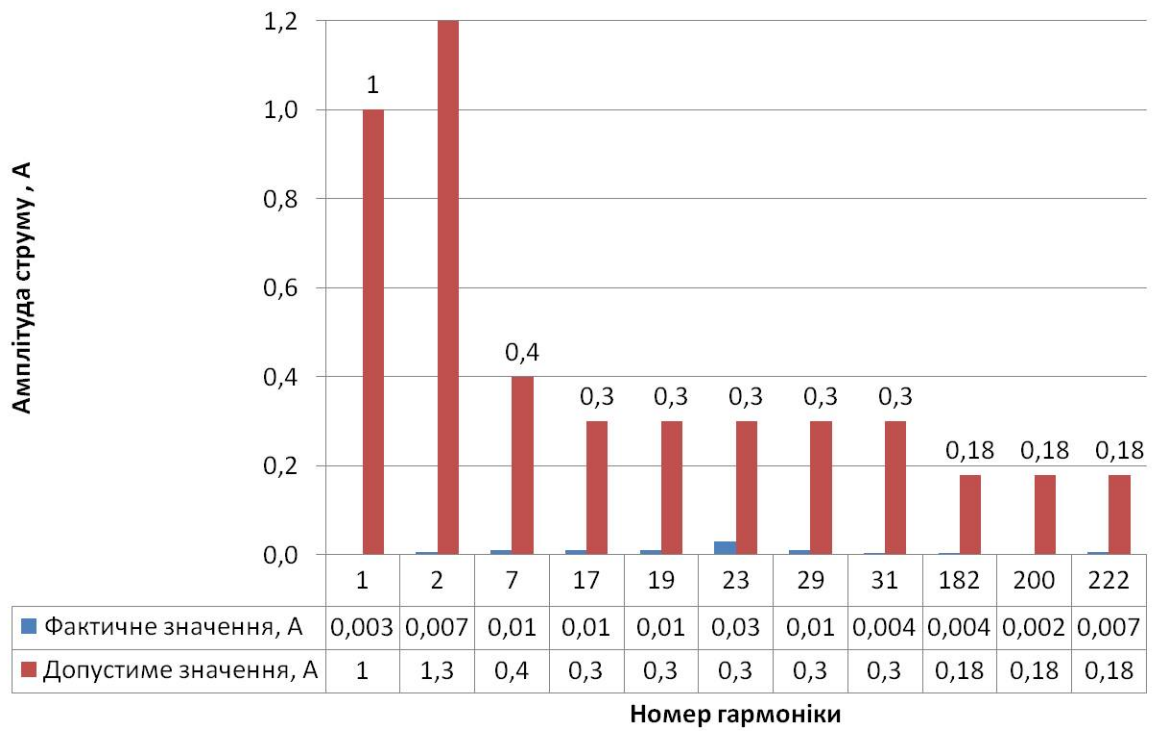


Рис. П.19. Порівняння рівня нормованих гармонік вхідного струму перетворювача типу 6Т-М3-3Ф-2м3а при живленні від мережі постійного струму 3 кВ з їх допустимими значеннями.

Додаток Р

Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер Головного
управління локомотивного
господарства «Укрзалізниці»



Ткаченко Є.В.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Мухи Андрія
Миколайовича „Розвиток наукових основ створення тягових електропередач
багатосистемних електровозів”

м. Київ

«21» червня 2011 р.

Цей акт складений про те, що Головним управлінням локомотивного господарства «Укрзалізниці» прийняті для розгляду на предмет впровадження наукові результати, викладені в докторській дисертації Мухи А.М., а саме рекомендації щодо:

- використання багатосистемного електрорухомого складу, що дозволить збільшити плечі роботи електровозів та електропоїздів, зменшити втрати часу для заміни електровозів на станціях стикування різних енергосистем, привести ремонтно-експлуатаційну базу усіх депо та заводів до єдиної системи, спростити підготовку ремонтно-експлуатаційного складу підприємств залізничного транспорту;

- використання тягових трансформаторів підвищеної частоти з підвищеним значенням ККД та впровадження гібридних напівпровідникових ключів, які мають відносно низьке значення електричних втрат;

- вибору елементної бази статичного перетворювача багатосистемного електровозу з урахуванням його потужності та системи охолодження при забезпеченні мінімальних габаритних розмірів перетворювача.

Начальник технічного відділу

Головного управління локомотивного
господарства «Укрзалізниці»

Косовець С.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер ВАТ «Запорізький
електровозоремонтний завод» С. В. Федюченко

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Мухи Андрія
Миколайовича „Розвиток наукових основ створення тягових електропередач
багатосистемних електровозів”

м. Запоріжжя

«20» червня 2011 р.

Цей акт складений про те, що в ВАТ «Запорізький електровозоремонтний завод» прийняті для розгляду на предмет впровадження результати, викладені в докторській дисертації Мухи А.М., а саме запропоновану структуру тягової електропередачі для багатосистемного електровозу, яка складається з двох частин:

- мережевий контур, який відповідає за взаємодію з контактною мережею. Наявність цього контуру є особливістю запропонованої структури та забезпечує реалізацію багатосистемності електровозу. Основними складовими частинами цього контуру є випрямляч (для режиму роботи з контактною мережею змінного струму), інвертор та тяговий трансформатор підвищеної частоти;

- тяговий контур, який живить тяговий двигун. До складу цього контуру входить випрямляч та інвертор (при використанні асинхронних тягових двигунів).

Головний технолог ВАТ «Запорізький
електровозоремонтний завод»



О. М. Мазікін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
д.т.н., професор



Б.Є. Боднар

про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Мухи Андрія Миколайовича „Розвиток наукових основ створення тягових
електропередач багатосистемних електровозів”

м. Дніпропетровськ

«15» червня 2011 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені в дисертації Мухи А.М.:

1. Аналіз схемних рішень сучасних тягових статичних перетворювачів багатосистемних електровозів (дисципліна «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів», розділ «Статичні перетворювачі рухомого складу залізниць», для студентів четвертого курсу спеціальності 7.05070204 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»).

2. Дослідження по покращенню ККД статичних перетворювачів (дисципліна «Силові перетворювачі автоматизованих електроприводів», розділ «Енергетичні показники статичних перетворювачів», для студентів четвертого курсу спеціальності 7.05070204 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»).

Начальник НМУ університету,
к.т.н., доцент

О. О. Матусевич

Професор каф. АЕП, д.т.н.,
професор

Л. В. Дубинець