

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

На правах рукопису

БОНДАРЕНКО ЮРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.313.024.33:537.876.41

ПОЛІПШЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ АСИНХРОННИХ  
ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З СУМІЖНИМИ  
СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Спеціальність 05.22.09 - електротранспорт

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник  
доктор технічних наук, професор  
Муха Андрій Миколайович

Дніпропетровськ – 2014

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕМС СУМІЖНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ.....	14
1.1 Аналіз процесів взаємопов'язаної роботи систем електрифікованих залізниць .....	14
1.1.1. Системи сигналізації, централізації та блокування...	14
1.1.2. Системи тягового електропостачання.....	17
1.2. Критерії електромагнітної сумісності та постановка задач дослідження.....	20
1.3. Висновки до першого розділу.....	27
РОЗДІЛ 2. ПЕРЕДУМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ПОДІБНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ СИСТЕМ.....	29
2.1. Передумови проведення експериментальних досліджень ...	29
2.2. Особливості визначення масштабних відношень контрольованих параметрів .....	40
2.3. Вибір та обґрунтування методів досліджень .....	43
2.4. Оцінка ступеню подібності систем .....	45
2.5. Визначення числових значень масштабних відношень контрольованих параметрів .....	59
2.6. Висновки до другого розділу.....	71
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ.....	72
3.1. Опис експериментальної установки .....	72
3.2. Фактори та загальні умови експериментального дослідження .....	80
3.3. Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції	

тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на системи СЦБ .....	87
3.4.Висновки до третього розділу.....	98
РОЗДІЛ 4. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННИХ ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	100
4.1.Моделювання мережі тягового електропостачання.....	102
4.2.Моделювання силової частини асинхронного тягового електроприводу.....	108
4.3.Моделювання системи керування з широтно-імпульсною модуляцією.....	109
4.4.Дослідження режиму перевантаження тягового електроприводу.....	115
4.5.Дослідження випадку відмови складових блоків тягового електроприводу.....	123
4.6.Дослідження впливу явища комутаційної асиметрії.....	134
4.7.Висновки до четвертого розділу.....	146
РОЗДІЛ 5. ПРОГНОЗОВАНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	148
5.1 Висновки до п'ятого розділу.....	150
ВИСНОВКИ.....	152
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	156
ДОДАТОК А. ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК ДЛЯ ЕЛЕКТРОВОЗУ 2ЭС10.....	169
ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТУЮЧІ КРИВІ РУХУ ЕЛЕКТРОВОЗУ 2ЭС10 ПО ЗАДАНОМУ ПРОФІЛЮ КОЛІЇ.....	181
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМС З СИСТЕМАМИ СЦБ У НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ АТЕП ЕРС ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	184
ДОДАТОК Г. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ	

ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТДП-12500/10ЖУ1.....	201
ДОДАТОК Д. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ.....	205

## ВСТУП

Електрифіковані залізниці займають особливе місце у системі залізничних перевезень. Застосування системи електричної тяги дозволяє значно знизити собівартість перевезень, підвищити швидкість та ефективність їх здійснення.

В рамках постійного зростання вартості паливно-енергетичних матеріалів розширення мережі електрифікованих залізниць є перспективним напрямком їх подальшого розвитку. Це передбачає використання більшої кількості електричного обладнання при забезпеченні достатнього рівня функціонування мережі в цілому.

Надійність функціонування електрифікованих залізниць у значній мірі визначається показниками взаємного впливу всіх систем, що входять до її складу: тягової мережі; мережі зовнішнього електропостачання; систем автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Електромагнітна сумісність (ЕМС) на залізничному транспорті, а в особливості на ділянках електрифікованих залізниць, є досить важливою складовою їх нормального функціонування. Свого часу цьому питанню приділяли значну увагу такі вчені, як Бадер М.П., Бочарников Ю.В., Бялонь А., Вісін М.Г., Гаврилюк В.І., Єрмоленко Д.В., Киржнер Д.Л., Лещов О.І., Макашева С.І., Наумов О.А., Сиченко В.Г., Сорин Л.Н., Финонченко Т.Е., Ходкевич А.Г., Щербак Я.В., Lewandowski M. та ін, основні результати роботи яких викладені у [1-16]. Зокрема у роботі [11] запропоновано методи поліпшення ЕМС залізниць постійного струму шляхом удосконалення систем живлення тягових підстанцій та модернізації способів активної фільтрації перешкод. Не зважаючи на це і на сьогоднішній день питання ЕМС підсистем залізничного транспорту залишається відкритим та актуальним.

Одним з головних джерел електромагнітного впливу є тягова мережа, яка є асиметричною за параметрами, та передає енергію з несинусоїдальними змінними або пульсуючими постійними струмами і напругами [17]. Її вплив на суміжні системи електрифікованих залізниць є досить значним, що головним чином пов'язано з наявністю у її структурі статичних перетворювачів електричної енергії.

Перетворення на тягових підстанціях, або на електрорухомому складі (ЕРС) електричної енергії змінного струму в енергію випрямленого струму та навпаки – за допомогою статичних напівпровідникових перетворювачів, пов'язано зі значним споживанням реактивної енергії цими агрегатами. Крім того, напівпровідникові перетворювачі відносяться до класу навантажень, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, та споживають з мережі несинусоїдальний струм, що спотворює криву напруги живлячих енергосистем. Несинусоїдальність та несиметрія живлячої напруги, в свою чергу, негативно впливають на якість випрямленої напруги – призводять до появи в останній додаткових гармонійних складових та до підвищеного електромагнітного впливу тягової мережі на суміжні слабкоструміві системи, особливо системи сигналізації, централізації та блокування (СЦБ). Це пов'язано з тим, що пристрої залізничної автоматики використовують у якості сигнальних кіл рейкові кола, що одночасно являються зворотнім проводом для протікання несинусоїдального тягового струму [1, 3].

Особливо гостро питання ЕМС постало з початком впровадження в експлуатацію на залізницях України ЕРС з асинхронним тяговим електроприводом (ЕРС з АТЕП) [14]. Однією з особливостей електроприводу таких тягових одиниць є застосування у його структурі статичного напівпровідникового перетворювача частоти. З точки зору ЕМС такий перетворювач при роботі генерує широкий спектр гармонік з частотами, що створюють перешкоди на вході апаратури рейкових кіл (РК) на частотах сигнального струму [2, 3, 9]. При цьому інтенсивність такого впливу

здебільшого визначається частотою модуляції вихідної напруги, що живить асинхронний двигун [19].

**Актуальність теми.** На теренах залізниць України застосовуються мережі тягового електропостачання змінного струму, напругою 25 кВ, та постійного – напругою 3 кВ. При цьому, з точки зору техніко-економічних показників, системи змінного струму є більш прийнятними [20, 21].

В той же час станом на 01.01.2011р. серед загальної експлуатаційної довжини електрифікованих залізниць України (9877 км) близько половини (4764 км) залишається електрифіковано постійним струмом [20, 22] і заміна цих ділянок ділянками змінного струму потребує значних капіталовкладень [23].

З урахуванням цього, на сьогоднішній день, одним з перспективних напрямків розвитку залізниць постійного струму є впровадження в експлуатацію ЕРС з АТЕП, основним елементом тягового електроприводу якого є вище згаданий статичний перетворювач частоти [24].

Застосування в основі функціонування АТЕП принципу широтно-імпульсної модуляції, з відповідними частотами формування вихідної напруги перетворювача, може бути причиною підвищеного електромагнітного впливу на суміжні системи. Так, експлуатаційні випробування електровозу ВЛ80а-751 дозволили встановити, що за різних параметрів руху амплітуди вищих гармонійних складових тягового струму, наприкладі діапазону 100-300 Гц, можуть становити від 2 % до 28 % діючого значення вхідного струму (відповідно від 17 А до 159 А) [25], що з точки зору електромагнітної взаємодії подібних тягових одиниць з системами СЦБ є неприпустимим. Випробування більш сучасного електровозу ДС-3 в цілому не виявили критичних перевищень амплітуд струмів перешкод [26]. Виключення складають лише короточасні перевищення при значних динамічних змінах потужності – до 35% відносно нормованих значень в діапазоні частот сигнального струму РК 25-175 Гц. Наведені результати

аналізу роботи ЕРС з АТЕП змінного струму, а також недостатній досвід експлуатації ЕРС з АТЕП постійного струму на залізницях України дозволяє вказати, що поява у структурі мережі тягового електропостачання постійного струму принципово нової, для неї, тягової одиниці може призвести до збільшення кількості відмов апаратури кіл СЦБ та, як наслідок, стати причиною порушення нормального функціонування залізниць[9, 18, 19, 20].

Питанням взаємодії ЕРС постійного струму з АТЕП з суміжними системами залізниць вже приділялась увага. Так автором проаналізовано роботи [3, 8, 11, 12, 16], в яких розглянуті питання впровадження активних фільтрів, гібридних фільтрів тощо. Останні, в своїй більшості, були присвячені поліпшенню показників ЕМС засобами систем тягового енергопостачання, зокрема режимами роботи обладнання тягових підстанцій, та стосувались, у своїй більшості, номінального режиму роботи обладнання ЕРС. Питання режимів роботи системи керування статичного перетворювача у цих роботах, а також його електромагнітний вплив на суміжні системи за неномінальних режимів роботи АТЕП розглянуті майже не були. З урахуванням цього задача поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами, за рахунок вибору раціональних діапазонів частот модуляції тягового перетворювача, є актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційну роботу виконано у відповідності з наступними державними програмами та науково-дослідними роботами:

– Державна цільова економічна програма енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243);

– Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012 – 2016 роки (затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 01.08.2011 р. № 840);

– «Дослідження впливу перетворювачів підвищеної частоти тягового приводу багатосистемних електровозів на лінії СЦБ та зв'язку електрифікованих залізниць» (№ ДР 0110U003608), у якій автор був виконавцем.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами електрифікованих залізниць.

Для досягнення поставленої мети необхідним є виконання наступного переліку завдань:

– проаналізувати сучасний стан проблеми забезпечення ЕМС суміжних систем електрифікованих залізниць;

– встановити критерії визначення ЕМС з урахуванням специфіки подальших досліджень;

– розробити експериментальну установку, що відтворює основні параметри роботи електровозів постійного струму та дозволяє досліджувати, з урахуванням масштабності, обрані контрольовані процеси, що супроводжують функціонування АТЕП;

– виконати експериментальні дослідження та надати рекомендації щодо поліпшення ЕМС АТЕП ЕРС постійного струму з системами СЦБ електрифікованих залізниць за умов його роботи у номінальному режимі;

– розробити імітаційну модель, що відтворює функціонування АТЕП у структурі мережі тягового електропостачання постійного струму та дозволяє провести дослідження неномінальних режимів його роботи.

– провести дослідження неномінальних режимів роботи АТЕП та надати рекомендації щодо поліпшення його ЕМС з системами СЦБ

електрифікованих залізниць постійного струму та мережею зовнішнього електропостачання;

– оцінити ефективність розроблених рекомендацій.

**Об’єкт дослідження** – процеси електромагнітної взаємодії суміжних систем електрифікованих залізниць постійного струму.

**Предмет дослідження** – асинхронні приводи електровозів постійного струму.

**Методи дослідження.** Під час виконання дисертаційної роботи для вирішення поставленого переліку задач було застосовано наступні методи:

– для встановлення ключових показників ЕМС, що відповідають умовам дослідження і відповідних умов та особливостей їх визначення здійснено аналітичний огляд системи діючих вітчизняних та європейських стандартів галузей електропостачання та електротранспорту, та попередніх наукових робіт в даному напрямку;

– створення експериментальної установки, що відтворює основні параметри роботи ЕРС з АТЕП та подальше експериментальне дослідження виконувалось з використанням принципів неповного фізичного моделювання, основ теорії подібності, теорії електричної тяги, елементів теорії механіки електроприводу, а також основних принципів виконання інженерного експерименту;

– аналіз отриманих результатів дослідження ЕМС з суміжними системами електрифікованих залізниць здійснювався з використанням методів гармонійного аналізу, шляхом застосування перетворення Фур’є, а також елементів теорії імовірності та математичної статистики. Обробку експериментальних даних здійснено з використанням ЕОМ.

– виконання досліджень взаємодії ЕРС з АТЕП з розглянутими системами у неномінальних режимах його роботи та обробка результатів здійснювались відповідно до принципів імітаційного моделювання з використанням програмного середовища MATLAB Simulink.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

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

Вперше встановлено закономірності впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на показники його ЕМС з системами СЦБ при номінальному режимі роботи, що дозволило оцінити ступінь електромагнітного впливу асинхронного приводу та розробити відповідні рекомендації щодо його зниження.

Вперше, за допомогою удосконаленої імітаційної моделі АТЕП, встановлено вплив частоти модуляції на показники ЕМС з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання при неномінальних режимах роботи тягового приводу. Це дає змогу розробити відповідні рекомендації щодо зниження негативного електромагнітного впливу АТЕП на зазначені системи за умови виникнення розглянутих у роботі неномінальних режимів. При цьому удосконалена модель, на відміну від існуючих, враховує особливості системи тягового електропостачання залізниць постійного струму, а також динамічні показники його функціонування в умовах руху ЕРС по перегону.

Вперше встановлено вплив на показники ЕМС явищ комутаційної асиметрії силових ключів тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму, що дозволяє врахувати їх вплив при розробці рекомендацій щодо зниження негативного електромагнітного впливу.

Отримав подальший розвиток метод визначення масштабних коефіцієнтів приведення окремих параметрів об'єктів електротягових систем, який, на відміну від існуючого, враховує значні розбіжності їх нелінійних характеристик, в тому числі струмових характеристик тягових електродвигунів ЕРС з АТЕП, що дозволяє досліджувати динамічні показники роботи систем електричної тяги на масштабних моделях.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Удосконалено методику визначення масштабних відношень подібних систем, що розширює можливості експериментальних досліджень ЕМС систем тягового енергоперетворення без порушення їх нормального функціонування.

Запропоновано і застосовано методику теоретичного визначення струмових характеристик тягових електродвигунів ЕРС з АТЕП, яка дозволяє здійснювати їх побудову у першому наближенні, що спрощує первинну оцінку ефективності функціонування ЕРС, з точки зору ЕМС з суміжними системами.

Розроблено імітаційну модель для дослідження ЕМС у номінальних та неномінальних режимах роботи ЕРС з АТЕП при живленні від мереж тягового електропостачання постійного струму з урахуванням динаміки зміни параметрів руху.

Надані рекомендації щодо вибору раціональних діапазонів частот модуляції перетворювача з точки зору покращення показників електромагнітної сумісності останнього із суміжними системами електрифікованих залізниць постійного струму, що дозволяє розширити можливості подальшого впровадження ЕРС з АТЕП.

Результати досліджень впроваджено у ДП«НВК«Електровозобудування» (м. Дніпропетровськ) та у навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна при вивченні дисциплін «Моделювання електромеханічних систем», «Електронна та перетворювальна техніка», «Електричні машини», «Мікропроцесорні пристрої», «Системи керування електроприводом» студентами 3-го та 4-го курсів спеціальності 7.05070204 – Електромеханічні системи автоматизації та електропривод.

### **Особистий внесок здобувача.**

Мета та задачі дослідження сформульовано автором спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні

дослідження, викладені в дисертаційній роботі, отримано здобувачем самостійно.

Всі публікації написано автором самостійно.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались на конференціях: V-ій «Транселектро 2011», м. Дніпропетровськ, 2011 р.; V-ій «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; 72-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; III-ій «Енергозбереження на залізничному транспорті», смт. Воловець, Закарпатської обл. 2012 р.; VI-ій «Транселектро 2012», м. Дніпропетровськ, 2012 р.; 73-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2013 р.; V-ій «Проблеми, перспективи та нормативно-правове забезпечення енергоресурсозбереження в житлово-комунальному господарстві», м. Алушта, 2013 р.; 74-ій «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2014 р.; V-ій «Енергозбереження на залізничному транспорті та у промисловості», смт. Воловець, Закарпатської обл. 2014 р.

### **Публікації.**

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 14 наукових працях, у тому числі: 5 – статті у фахових наукових виданнях, в тому числі роботи [80, 81, 92], опубліковані у виданнях, що входять до переліку міжнародної науково-метричної бази даних Index Copernicus; 1 – патент на корисну модель; 8 – у тезах доповідей та матеріалах конференцій.

### **Структура та обсяг роботи.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаної літератури та п'яти додатків. Основний текст роботи викладено на 127 сторінках. Дисертація містить 75 рисунків, 16 таблиць, 118 найменувань літературних джерел, розміщених на 13 сторінках та 5 додатків на 39 сторінках.

Повний обсяг дисертації складає 207 сторінок.

## РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕМС СУМІЖНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

### 1.1 Аналіз процесів взаємопов'язаної роботи систем електрифікованих залізниць

#### 1.1.1 Системи сигналізації, централізації та блокування

Серед загального переліку електричних систем електрифікованих залізниць, сукупна робота яких забезпечує їх функціонування, головну увагу завжди привертали кола СЦБ та тягового електропостачання. Робота таких кіл безперервно супроводжується наявністю електромагнітної взаємодії, що може бути причиною їх ненормального функціонування [1-13, 28].

Пристрої СЦБ служать для регулювання руху поїздів на перегонах і станціях залізниць та включають в себе систему автоблокування (АБ), автоматичну локомотивну сигналізацію (АЛС) та пристрої електричної централізації (ЕЦ) на станціях [28, 29, 30].

Основу функціонування кіл СЦБ складають РК, які виконують функції автоматичного контролю зайнятості та цілісності рейкових ниток ділянок колії, виключають можливість переведення стрілок під рухомим складом тощо [28, 29].

У теперішній час на ділянках електрифікованих залізниць застосовують кодові РК змінного струму з робочими частотами сигнального струму 25 та 50 Гц. РК постійного струму знаходять застосування лише на ділянках з автономною тягою, кількість яких в умовах розвитку залізниць постійно зменшується [28, 29].

Застосування РК тієї чи іншої робочої частоти визначається головним чином родом живлячої напруги тягової мережі. Так на ділянках, що електрифіковані постійним струмом на перегонах застосовуються кодові РК змінного струму з робочою частотою 50 Гц, на станціях – фазочутливі РК з

робочими частотами сигнального струму 25 та 50 Гц [28, 29, 30]. На ділянках електрифікованих залізниць змінного струму застосування знайшли РК, частота сигнального струму яких відрізняється від частоти 50 Гц – це системи з робочими частотами 25 та 175 Гц [28, 29, 30].

Подальший розвиток кіл СЦБ передбачає продовження вирішення низки проблем, що супроводжують їх функціонування, однією з ключових, серед яких, є їх електромагнітна взаємодія з суміжними системами електрифікованих залізниць. Окреме місце, при цьому, займає проблема електромагнітної взаємодії з ЕРС, зворотній тяговий струм якого протікає по рейкам, які одночасно є сигнальними лініями РК.

З початком впровадження в експлуатацію на залізницях країн СНД, зокрема у Російській Федерації, електровозів постійного струму з АТЕП свого вдосконалення почали зазнавати і технічні рішення, направлені на поліпшення їх ЕМС з суміжними системами, зокрема системами СЦБ. Так, з точки зору ЕРС, таким рішенням є застосування на вході АТЕП замість традиційного резонансного LC-фільтру гібридних фільтрів, створених на основі поєднання пасивних та активних фільтруючих компонентів [8, 11, 31]. Зокрема у роботі [31] запропоновано один з варіантів реалізації гібридного фільтру тягової асинхронної передачі ЕРС постійного струму (рис. 1.1).

Принцип дії такого гібридного фільтру полягає в тому, що для придушення низькочастотних як канонічних, так і неканонічних гармонік тягового струму використовується силовий активний фільтр (САФ) послідовного типу, а для придушення високочастотних гармонік тягового струму, обумовлених частотами ШІМ перетворювача і самого САФ, використовується індуктивність  $L$  силового пасивного LC-фільтру [11].

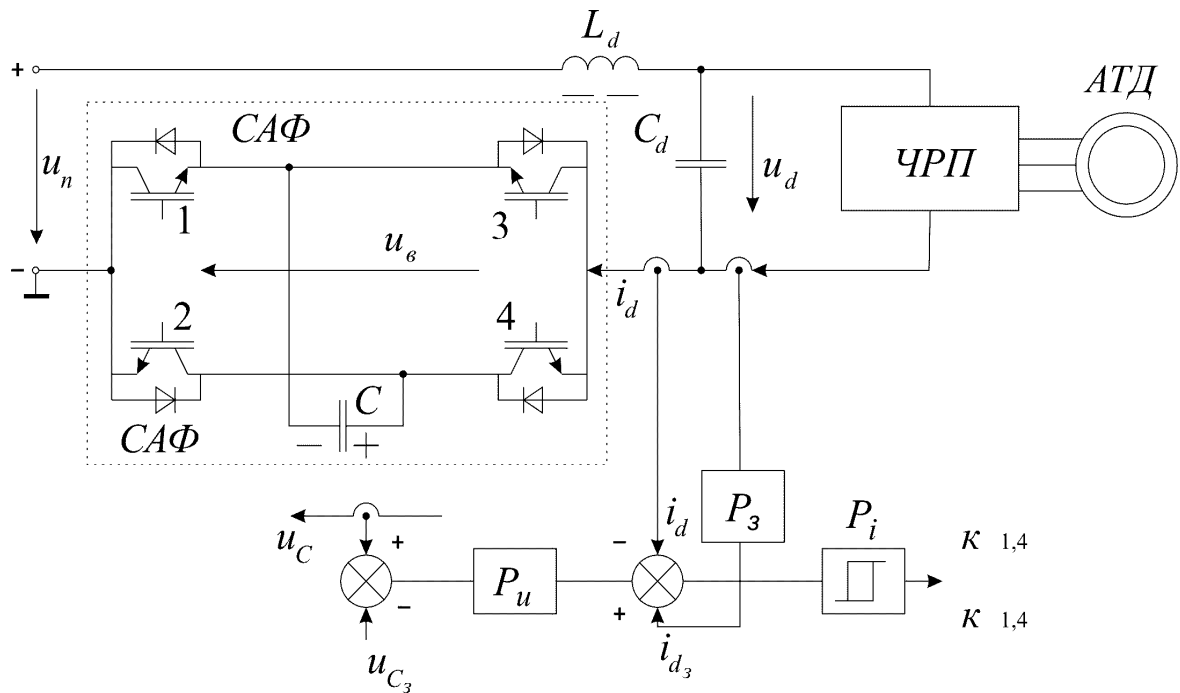


Рисунок 1.1 – Гібридний фільтр тягової асинхронної електропередачі ЕРС постійного струму

Основною перевагою фільтрів такого типу, у порівнянні з традиційними пасивними, є зменшені масо-габаритні показники, а також безумовно кращі показники фільтрації вищих гармонік. Проте, не зважаючи на це, впровадження таких систем, згідно [11], залишається актуальним питанням адже реального працездатного гібридного фільтру для ЕРС з АТЕП постійного струму поки що не створено.

З точки зору систем СЦБ основним напрямком вирішення проблеми забезпечення їх ЕМС з суміжними системами, на сьогоднішній день, є застосування тональних РК з робочими діапазонами частот сигнального струму від сотень Гц до одиниць кГц [28]. Використання сигнального струму тонального діапазону дозволяє значно підвищити ступінь захищеності РК від перешкод тягового струму, практично на порядок знизити споживану такими системами потужність, виконати централізоване розміщення апаратури та виключити взаємний вплив між суміжними РК [28]. Тобто такі системи є перспективними з точки зору їх подальшого впровадження.

Як видно з проведеного огляду проблема забезпечення ЕМС ЕРС з системами СЦБ на сьогоднішній день вирішується, здебільшого, шляхом внесення відповідних конструктивних змін або у структуру ЕРС, або ж у структуру РК шляхом застосування додаткових фільтрів та новітніх схемних рішень у системі енергоперетворення та передачі сигналів РК. При цьому коригуванню параметрів даних систем, без внесення конструктивних змін у їх структуру, увага майже не приділяється. Це підтверджує актуальність даного питання та вказує на необхідність проведення відповідних досліджень, основними з яких в роботі є дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП на системи СЦБ залізниць постійного струму та розробка рекомендацій щодо його зниження.

### 1.1.2 Системи тягового електропостачання

Іншою системою, яка може зазнавати негативного електромагнітного впливу з боку тягової мережі є система зовнішнього електропостачання. Перетворення електричної енергії на підстанціях та локомотивах призводить до появи у складі її вхідного струму та напруги вищих гармонійних складових, що можуть здійснювати негативний кондуктивний та електромагнітний вплив на роботу суміжного обладнання [1-13].

Загалом вплив тягового навантаження на якість електроенергії живлячих енергосистем оцінюється показниками несиметрії та несинусоїдальності струмів та напруг. Несиметрія струмів в енергосистемі, як правило не потребує прийняття спеціальних засобів щодо її симетрування, оскільки в потужних системах тягове навантаження становить не більше 10-15% їх загального навантаження [32].

Несиметрія напруги головним чином характеризується напругою зворотної послідовності, а ключовим методом її зниження є почергове

ввімкнення найменш завантажених фаз тягових підстанцій до різних фаз живлячих ліній електропередачі [32].

Ступінь несинусоїдальності струмів та напруг живлячих енергосистем визначається сукупністю у їх складі вищих гармонійних складових. Їх вплив на систему зовнішнього електропостачання є досить не значним і його, як правило, слід враховувати лише при визначенні заважаючого впливу тягової мережі на суміжні системи електрифікованих залізниць.

На сьогоднішній день, як і у випадку з системами СЦБ, головуючим напрямком поліпшення ЕМС тягової мережі з мережею зовнішнього електропостачання є встановлення активних або гібридних фільтрів [11, 33, 34]. Типова спрощена схема чисто активного фільтру наведена на рисунку 1.2 [33]. Вона включає в себе шунтуючий керований випрямляч з ємнісним навантаженням на боці постійного струму, що може бути ввімкнений через трансформатор паралельно нелінійному колу або через послідовно ввімкнений трансформатор по відношенню до лінії живлення.

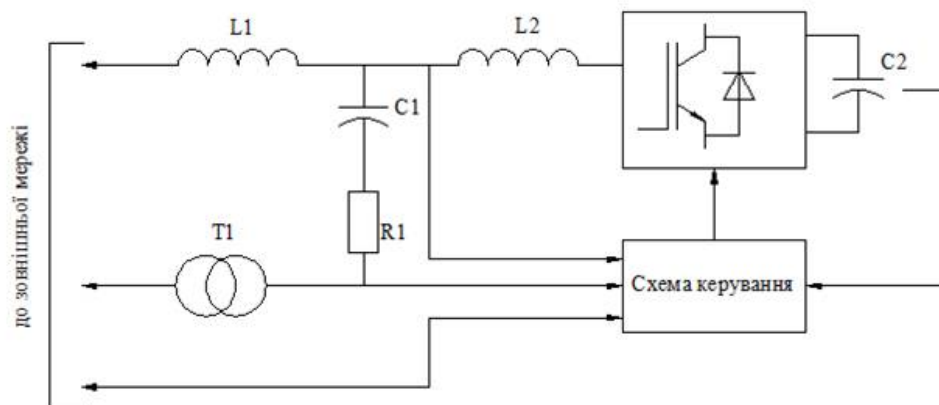


Рисунок 1.2 – Типова спрощена схема активного фільтру

Принцип дії такого фільтру полягає у генерації компенсуючого струму, що знаходиться у протифазі з гармоніками основного струму, шляхом керування силовою частиною схеми за допомогою системи керування, що реагує на миттєві значення струму навантаження.

Не зважаючи на значні переваги розглянутого типу фільтрів, у порівнянні з типовими пасивними, існує ряд положень які обмежують їх застосування. Згідно [11, 33] основним, серед таких положень є їх висока собівартість, що визначається значною миттєвою потужністю, що необхідна для забезпечення фільтрації вищих гармонік.

Даних недоліків позбавленні гібридні фільтри, застосування яких є більш перспективним [11, 33, 34], оскільки потужність їх активної частини, у порівнянні з чисто активними фільтрами, є на порядок нижчою. Як правило гібридні фільтри виконуються за схемою джерела напруги на основі ШІМ-перетворювача з включенням до їх складу пасивних R-L-C компонентів [33, 34]. Прикладом типової схеми фільтрів розглянутого типу є комбінація активного фільтру, трифазного трансформатора, пасивних LC-фільтрів 5-ї, 7-ї гармонік, а також фільтру верхніх частот (рис. 1.3).

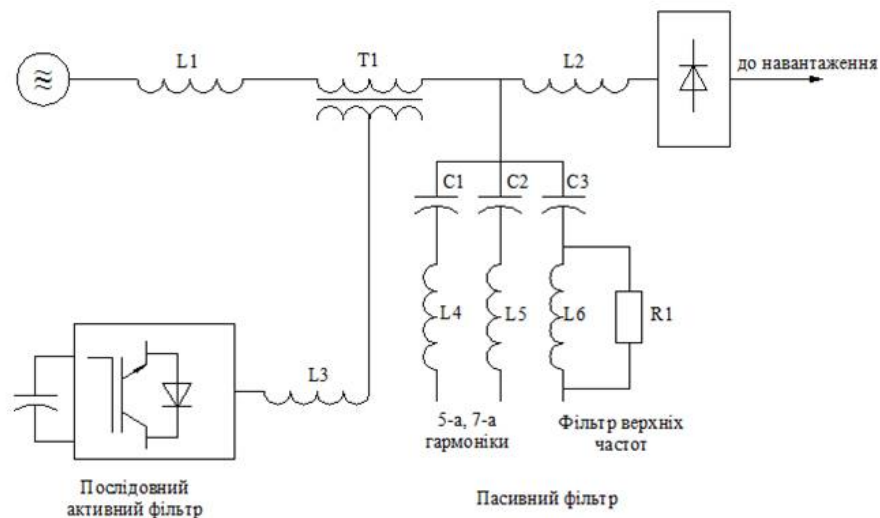


Рисунок 1.3 – Типова спрощена схема гібридного фільтру

З проведеного аналізу стає очевидним той факт, що проблемі ЕМС тягової мережі, в тому числі мережі постійного струму, з мережею зовнішнього електропостачання вже приділялось достатньо уваги. При цьому, як і у випадку з системами СЦБ, основними результатами досліджень, були відповідні схемні рішення, що стосуються поліпшення механізму

енергоперетворення на тягових підстанціях. Самі ж дослідження, як правило, виконувались лише для номінальних режимів роботи тягового навантаження. Поточні ж дослідження передбачають отримання у якості вихідних результатів рекомендацій щодо поліпшення ЕМС без застосування додаткових схемних рішень, а лише шляхом коригування параметрів тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму. При цьому сама специфіка досліджень полягає, головним чином, у оцінці електромагнітного впливу останнього на системи СЦБ, як основні системи, вплив перешкод тягового струму на які може бути причиною порушення нормального функціонування залізниць.

Між тим наявність постійного взаємозв'язку вище згаданих систем виявляє необхідність проведення аналогічних досліджень і з точки зору взаємодії перетворювача з мережею зовнішнього електропостачання, з точки зору впливу на показники якості напруги живлячих енергосистем. Проте, з урахуванням вказаного вище, такі дослідження пропонується проводити лише при неномінальних режимах роботи АТЕП, а також в першому наближенні – шляхом виконання імітаційного моделювання.

## 1.2 Критерії електромагнітної сумісності та постановка задач дослідження

Для виконання вказаного вище переліку експериментальних досліджень та досліджень з використанням імітаційного моделювання першочергово необхідним є визначення критеріїв, які б дозволили оцінити ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП з розглянутими суміжними системами. З точки зору систем СЦБ оцінку ефективності їх функціонування здійснюють з використанням відповідної нормативної бази, що встановлює допустимі норми для значень робочих параметрів. В нашому випадку таким нормативним документом є НБ ЖТ ЦТ 04-98 «Электровозы. Нормы

безопасности.» [35]. Даний стандарт визначає допустимі амплітуди струмів перешкод на кожній з частот пропускання для РК всіх типів, зведений перелік яких наведено у таблиці 1.1.

Оцінку ефективності мережі тягового електропостачання, в практиці досліджень [13, 14, 36, 37, 38, 39], здійснюють за відповідними показниками якості електроенергії, повний перелік яких та їх нормовані значення визначені ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», що визначає норми якості електричної енергії, а саме рівні електромагнітної сумісності для кондуктивних електромагнітних перешкод у системах електропостачання загального призначення [40].

Таблиця 1.1

## Допустимі значення амплітуд струмів перешкод

Частота сигнального струму, Гц	Допустимі параметри струму електровоза					
	Смуга частот, Гц	При безперервній дії (більше 0,3 с)		При імпульсній дії		
		Допустимий рівень перешкод, $A_{\text{эфф}}$	Характер впливу	Допустимий рівень перешкод, $A_{\text{эфф}}$	Тривалість імпульсу, с	Період проходження, с
25	19-31			11,6	менше 0,3	0,3...0,9
	19-31			26,6	менше 0,3	більше 0,9
	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				

Продовження таблиці 1.1

Діапазон ТРЦ-3						
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					
Діапазон ТРЦ-4						
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					

Згідно [40] показниками якості електричної енергії є:

- стале відхилення напруги  $dU_y$ ;
- розмах зміни напруги  $dU_t$ ;
- доза флікера  $P_t$ ;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності  $K_{0U}$ ;
- відхилення частоти  $Df$ ;
- тривалість провалу напруги  $Dt_{II}$ ;
- імпульсна напруга  $U_{ИМП}$ ;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги  $K_{ПЕР.U}$ .

При дотриманні зазначених норм забезпечується електромагнітна сумісність електричних мереж систем електропостачання загального призначення й електричних мереж споживачів електричної енергії (приймачів електричної енергії).

Оскільки напрямком подальших досліджень є вплив тягового статичного перетворювача частоти на роботу суміжних систем електрифікованих залізниць, серед представленого переліку критеріїв слід відокремити ті, джерелом яких є споживач з нелінійним та несиметричним навантаженням, а саме:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ;
- коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності  $K_{2U}$ ;
- коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності  $K_{0U}$ ;

Для будь яких існуючих схем електропостачання залізниць змінного струму, які живляться від районної трифазної мережі, характерними є проблема несиметричного навантаження фаз, що призводить до появи несиметрії напруги на шинах тягових підстанцій [4] та спотворення синусоїдальності струмів та напруг, за рахунок наявності у мережі нелінійного навантаження [13].

Перевагою системи живлення постійного струму є відносно невеликий вплив навантаження тягової мережі на суміжні лінії [4]. Для такої системи не є характерним явище несиметрії напруг, а відсутність на існуючому електрорухомому складі постійного струму статичних перетворювачів знижує показники несинусоїдальності струмів та напруг мережі. Даний факт не можна використовувати при оцінці ЕМС досліджуваного ЕРС через наявність у його складі вище згаданого статичного перетворювача частоти.

Отже серед визначених вище критеріїв, що у подальшому пропонуються до використання, єдиними, які задовольняють особливості дослідження, є коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ , та коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової напруги  $K_{U(n)}$ .

Крім зазначеного переліку критеріїв в роботі [38] запропоновано узагальнений показник  $K^V$ , отриманий на основі врахування сумісного

впливу асиметрії напруг за зворотною послідовністю та гармонійних складових напруги. Даний показник дозволяє більш комплексно визначати якість електричної енергії в мережах і системах проте в нашому випадку, через відсутність необхідності врахування несиметрії напруги, від його застосування відмовимось.

Визначення кожного з вказаних коефіцієнтів потребує фізичного виміру контрольованих величин, які залежать від того чи іншого показника та мають відповідний порядок виміру. Зокрема у роботі [38] запропоновано власний метод визначення оптимальних значень коефіцієнтів  $n$ -ої гармонійної складової напруги, що заснований на основі градієнтного методу оптимізації та може бути застосованим при певному складі гармонік та рівні асиметрії за зворотною послідовністю. В роботі [39] розроблено методику визначення вказаних показників якості електричної енергії, що ґрунтується на матричному методі моніторингу негативних процесів в електричних мережах шляхом відповідного аналізу вимірювальної інформації.

Не зважаючи на своє вдосконалення, дані подібні їм методи та методики в своїй основі спираються на стандарт, а тому подальше визначення обраних вище контрольованих показників ЕМС проводимо відповідно до методики останнього. Так, згідно [40], виміри коефіцієнтів  $K_U$  та  $K_{U(n)}$  виконують для міжфазних або фазних напруг трифазної системи живлення. При визначенні коефіцієнту  $K_{U(n)}$  спершу для кожного  $i$ -го спостереження за визначений період часу, що дорівнює 24 години, визначають діюче значення напруги  $n$ -ої гармоніки  $U_{(n)i}$ , та вказаний коефіцієнт у відсотках:

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1(i)}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

де  $U_{1(i)}$  - діюче значення напруги основної частоти.

З метою остаточного визначення даного контрольованого параметру, проводять усереднення отриманих результатів  $i$ -их спостережень на інтервалі часу, що дорівнює 3 с.:

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}}, \quad (1.2)$$

де  $N$  – кількість спостережень, що відповідно до додатку Е [40] має бути не менше 9.

Якість електричної енергії за коефіцієнтом  $n$ -ої гармонійної складової напруги вважають відповідною вимогам дійсного стандарту, якщо найбільше з усіх, обчислених протягом 24 годин, значень вказаних коефіцієнтів не перевищує гранично припустимого значення, а значення коефіцієнта  $K_{U(n)}$ , що відповідає імовірності 95% за встановлений період часу, не перевищує нормально допустимого значення [40].

Крім того, допускається визначати якість електричної енергії на відповідність нормам стандарту за сумарною тривалістю часу виходу розглянутого показника за нормально й гранично припустимі значення. В цьому випадку, якість електричної енергії за коефіцієнтом  $K_{U(n)}$  вважають відповідною вимогам [40], якщо сумарна тривалість вказаного вище часу становить не більше 5% від встановленого для спостережень періоду часу, тобто 1 год 12 хв, а за гранично припустимі значення - 0 % від цього періоду часу.

За аналогічною методикою проводять визначення коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ . Спершу, як і в попередньому випадку, проводять визначення вказаного параметру для кожного  $i$ -го спостереження протягом часу, що дорівнює 24 години, для чого

попередньо визначають діюче значення гармонійних складових напруги діапазону гармонік з 2-ї до 40-ї:

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}} \cdot 100. \quad (1.3)$$

При цьому, при визначенні даного показника якості електричної енергії допускається не враховувати ті гармонійні складові, відсоткова доля яких становить менше 0,1%.

Подальше визначення параметру, що розглядається, знову ж таки виконується методом усереднення отриманих значень коефіцієнтів  $K_{Ui}$  та виконується згідно вказаних вище умов:

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{Ui}^2}{N}}. \quad (1.4)$$

При цьому, умови, за яких якість електричної енергії за вказаним критерієм відповідає стандарту [40], залишаються аналогічними до визначених вище для коефіцієнту  $K_{U(n)}$ .

Визначені критерії дозволяють встановити ряд параметрів контроль за показниками яких буде лежати в основі виконання подальших досліджень, Це зворотній тяговий струм та напруга живлячої електромережі. При цьому визначення даних параметрів слід проводити з урахуванням особливостей експлуатації ЕРС, функціонування якого постійно супроводжується різноманітними динамічними навантаженнями та перехідними процесами [41, 42].

Проведений аналіз, дозволяє остаточно визначити перелік задач, вирішення яких буде складати основу виконання подальших досліджень [43, 44]:

- експериментальне дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на системи СЦБ електрифікованих залізниць при номінальному режимі його роботи;

- дослідження, шляхом виконання імітаційного моделювання, впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на вище згадані системи СЦБ та показники якості напруги мережі зовнішнього електропостачання при неномінальних режимах його роботи;

- розробити рекомендації щодо вибору частот модуляції які дозволяють досягти максимального поліпшення контрольованих показників ЕМС перетворювача з розглянутими системами з урахуванням вказаних режимів роботи останнього.

### 1.3 Висновки до першого розділу

За результатами проведеного аналізу:

- встановлено, що на сьогоднішній день одним з перспективних напрямків поліпшення ЕМС тягової мережі з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання є встановлення на ЕРС та підстанціях відповідно активних або гібридних фільтрів. В той же час можливості поліпшення даних показників без конструктивного втручання у систему енергоперетворення, шляхом коригування параметрів відповідного обладнання, увага майже не приділяється;

- ключовими системами, які зазнають найбільшого електромагнітного впливу від суміжних систем є СЦБ, а тому саме ним варто приділити значну частину досліджень ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму. Системи зовнішнього електропостачання, як правило зазнають

меншого впливу від дії перетворювачів ЕРС, проте такі висновки здебільшого стосуються номінальних режимів роботи останніх. З урахуванням цього постає необхідність проведення досліджень при неномінальних режимах роботи;

– як свідчить аналіз літературних джерел для визначення контрольованих показників ЕМС тягової мережі з мережею зовнішнього електропостачання (показників якості електроенергії) існує декілька методик, проте всі вони в своїй основі спираються на стандарт. А отже, в нашому випадку, для визначення вказаних показників доцільно використовувати саме стандартну методику;

## РОЗДІЛ 2. ПЕРЕДУМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ПОДІБНОСТІ ДОСЛІДЖУВАНИХ СИСТЕМ

### 2.1 Передумови проведення експериментальних досліджень

В основі виконання будь яких експериментальних досліджень лежить повне або часткове відтворення реальних процесів, що супроводжують функціонування того чи іншого обладнання або системи. В нашому випадку це передбачає відтворення реальних режимів руху ЕРС по перегонах.

Згідно [45, 46] функціонування будь якої тягової одиниці можливе у трьох режимах: режимі тяги – коли поїзд переміщується під дією сил, що створюються тяговими двигунами та за наявності зчеплення коліс з рейками; режимі вибігу – коли рух поїзда визначають сили опору, що діють на нього та режимі гальмування – коли поїзд рухається в умовах наявності штучно створеної гальмівної сили. При цьому кожен з вказаних режимів характеризується, в загальному випадку, своїми значеннями швидкості руху та струму, що споживається ЕРС, а відповідно і ТЕД.

Останній факт дає можливість реалізувати режими роботи реального ЕРС в масштабному вигляді ввівши поняття еквівалентного струму навантаження ТЕД  $I_{н\_екв}$  та еквівалентної частоти обертання  $n_{екв}$ . Дані показники являють собою відповідно струм навантаження асинхронного двигуна експериментальної установки, що у певному масштабному відношенні відповідає струмовому навантаженню ТЕД в режимі тяги та його частоту обертання, яка з урахуванням масштабності відображає зміну частоти обертання ТЕД зі зміною швидкості руху ЕРС.

В реальних умовах експлуатації рухомого складу, при веденні поїзду по перегону, зміна швидкості, а відповідно і сили тяги здійснюється локомотивною бригадою у відповідності до фактичних показників опору руху та ефективності гальм, шляхом перемикання позицій контролера

машиніста з забезпеченням необхідних величин прискорення та уповільнення. В залежності від конкретних умов частота зміни положення рукоятки контролера машиніста може досягати 60 раз на годину [42].

Ці, та вище вказані особливості роботи реального ЕРС дозволяють визначити перелік задач, що мають бути відтворені в процесі виконання експериментальних досліджень:

- відтворення процесу генерації тягового зусилля;
- відтворення динаміки зміни навантаження ЕРС з урахуванням зміни профілів колії;
- відтворення процесу керування ЕРС контролером машиніста в умовах зміни навантаження.

Для остаточного виконання експериментального дослідження є необхідним встановити зазначені вище параметри реальних режимів роботи ЕРС з урахуванням їх зміни в процесі руху в тому чи іншому режимі. Здійснити це можливо шляхом виконання тягового розрахунку, що дозволяє проаналізувати роботу тієї чи іншої тягової одиниці без безпосереднього втручання в її функціонування [42].

Виконання тягового розрахунку передбачає аналіз роботи ЕРС для попередньо визначеного профілю залізничної колії. В більшості випадків використання в якості останнього реально існуючого профілю залізничної колії або їх мережі призводить до необхідності виконання великої кількості розрахунків та, як наслідок, ускладнення процесу досліджень. В практиці аналізу функціонування тягових одиниць прийнято використовувати спосіб тягових розрахунків з використанням типових розрахункових профілів [42, 48]. Класифікація останніх та їх типові параметри наведено у табл. 2.1.

З метою раціоналізації досліджень та максимального охоплення діапазону навантажень ЕРС виконання тягового розрахунку, рекомендується здійснювати для найбільш тяжких та найбільш легких умов роботи тягової одиниці [42]. Основою для їх формування є елементи типових профілів I та

III, оскільки тип IV зустрічається порівняно рідко і його вплив на оцінку функціонування ЕРС незначний [42, 47].

Таблиця 2.1

## Класифікація розрахункових профілів та їх типові параметри

Ухил, ‰	Співвідношення протяжності ухилів, %, для профілів типу				Ухил, ‰	Співвідношення протяжності ухилів, %, для профілів типу			
	I	II	III	IV		I	II	III	IV
+11	-	-	-	8	-2	18	10	6	4
+10	-	-	-	14	-4	3	10	4	3
+9	-	-	10	-	-5	8	-	-	-
+8	-	-	14	14	-6	-	3	8	5
+7	-	6	-	-	-7	-	12	-	-
+6	-	12	6	6	-8	-	-	14	8
+5	5	-	-	-	-9	-	-	4	-
+4	5	9	5	4	-10	-	-	-	8
+2	16	10	9	6	-11	-	-	-	6
0	45	28	20	14					

Аналіз діючих профілів колії та досвід експлуатації ЕРС дозволили обрати ті ділянки, що є найбільш відповідними до визначених умов функціонування тягових одиниць. Повна структура колії одного з таких умовних профілів, що його пропонується використовувати в подальшому, наведено в [42].

В даному випадку ділянка відноситься до типу розрахункових профілів III, має протяжність 145 км з розрахунковим підйомом 9‰ та кривими радіусом  $R = 400$  м. Значна протяжність ділянки передбачає в подальшому обробку великої кількості даних. З метою їх зменшення пропонується дещо скоротити протяжність ділянки зі збереженням характеру тяжких умов функціонування ЕРС – забезпечити наявність затяжних підйомів та спусків.

Результуючий склад отриманої розрахункової ділянки наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

## Результуючий склад розрахункової ділянки

№ п/п	Відстань від початку профілю до кінця елемента $l_i$ , км	Довжина елемента профілю $\Delta l_i$ , км	Ухил $i$ , ‰
1	1,65	1,65	0,6
2	2,95	1,3	3,0
3	4,15	1,2	9,0
4	5,45	1,4	3,0
5	6,85	1,3	9,0
6	7,15	0,3	6,3
7	7,95	0,8	2,2
8	15,15	7,2	6,8
9	16,05	0,9	3,0
10	24,6	8,55	9,0
11	25,05	0,45	-2,4
12	25,95	0,9	1,3
13	36,23	10,28	7,8
14	37,15	0,92	2,1
15	42,78	5,63	7,6
16	45,02	2,24	-6,6
17	45,95	0,93	1,4
18	48,55	2,6	9,0
19	49	0,45	0,4
20	50,05	1,05	0

В загальному випадку тягові розрахунки передбачають виконання наступних задач [48-51]:

1. спрямлення і приведення профілю колії заданої ділянки;
2. розрахунок маси поїзду;
3. розрахунок і побудова діаграм удільних сил, що діють на поїзд в режимах тяги, вибігу та гальмування на площадці;
4. вирішення гальмівної задачі;
5. розрахунок та побудова кривих руху поїзду;
6. побудова кривих споживаного електровозом струму;
7. перевірка маси поїзду за нагрівом електрообладнання;
8. розрахунок витрат електроенергії на рух поїзду.

Враховуючи специфіку подальшого експериментального дослідження та необхідний діапазон вхідних даних достатнім є обмежити виконання тягового розрахунку пунктами 1-6.

В якості базового ЕРС для виконання тягового розрахунку приймемо електровоз типу 2ЭС10, як єдиний ЕРС постійного струму з АТЕП та перетворювачем частоти, деякий досвід експлуатації якого мається на залізницях України [24]. Вихідні дані для розрахунку, з урахуванням [48], наведено у таблиці 2.3. Параметри обраного ЕРС наведено у [52].

Таблиця 2.3

## Перелік вихідних даних для тягового розрахунку

Тип електровозу	2ЭС10
Напруга в контактній мережі	
в режимі тяги	3000 В
в режимі рекуперації	3300 В
Поїзд сформовано з чотириосних вагонів масою 72 т	
Тип гальмівних колодок	чавунні гребневі
Максимально допустима швидкість руху поїзду	120 км/год
Тип верхньої будови колії	безстикова
Повздовжній профіль ділянки	згідно табл. 2.2

Визначивши та охарактеризувавши вихідні розрахункові дані виконаємо тяговий розрахунок згідно до встановленого порядку та типової методики [48-51]. Порядок виконання наведено у додатку А.

Результатом розрахунку є діаграми питомих рівнодіючих сил, побудовані на основі отриманих даних для режимів тяги, вибігу та гальмування (рис. 2.1) з урахуванням відповідних масштабів [45].

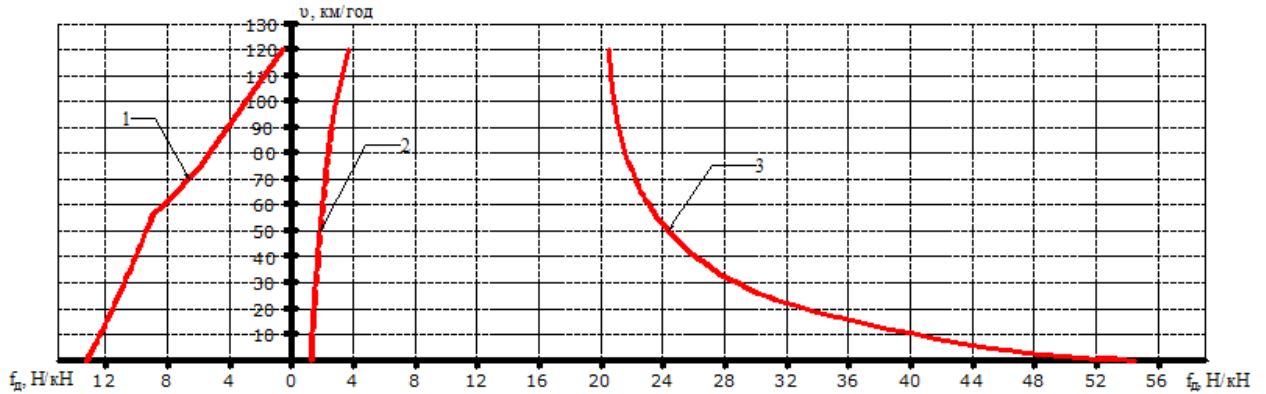


Рисунок 2.1 – Діаграми питомих рівнодіючих сил

На рис.2.1:

крива 1 – характеристика, що відповідає режиму тяги ЕРС;

крива 2 – характеристика, що відповідає режиму руху на вибігу;

крива 3 – характеристика, що відповідає режиму гальмування ЕРС;

Отримані графічні залежності є основою побудови кривих руху поїзду по заданому профілю залізничної колії – залежностей  $v = f(s)$  та  $t = \varphi(s)$  (Додаток Б), які в свою чергу дозволяють здійснити масштабний перехід від реальної швидкості руху ЕРС на ділянках до еквівалентної частоти обертання ТЕД  $n_{\text{екв}}$ .

В загальному випадку швидкість руху ЕРС, згідно [45, 46, 50] визначається як:

$$v = 1,8 \frac{D}{\mu} \omega_{ДВ}, \quad (2.1)$$

де:

$D = 1250$  мм - діаметр рухомих коліс;

$\mu = 3,44$  - передатне число зубчатої передачі;

З урахуванням, що  $\omega_{ДВ} = \frac{\pi n}{30}$  формула переходу від лінійної швидкості

ЕРС до частоти обертання ТЕД буде мати вигляд:

$$n = \frac{30v\mu}{1,8\pi D} \quad (2.2)$$

Графічна залежність, що характеризує вираз (2.2) наведена на рис. 2.2.

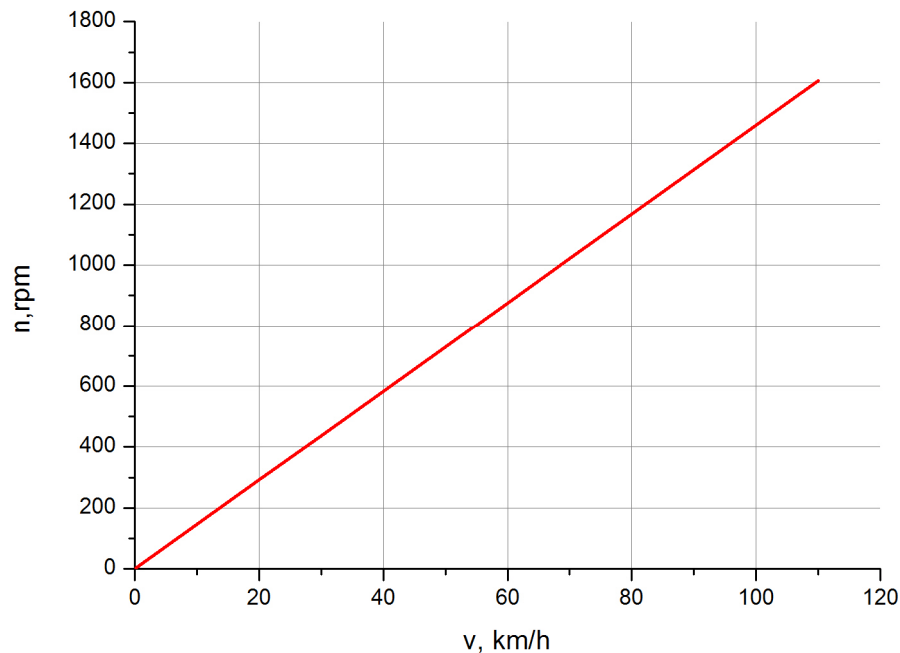


Рисунок 2.2 – Графік переходу від лінійної швидкості до частоти обертання ТЕД

Максимальна синхронна частота обертання тягових двигунів, встановлених на електровозах 2ЭС10 за максимальної швидкості руху становить 1800 об/хв. [52]. Двигун створеної установки дозволяє реалізувати більш високу частоту обертання – 3000 об/хв, що вимагає здійснення в процесі експериментального дослідження деяких швидкісних коригувань.

Реалізація масштабного переходу до еквівалентного струму навантаження  $I_{н\_екв}$  потребує застосування електротягової характеристики ТЕД, залежності  $v = f(I)$ .

В умовах відсутності у автора цієї характеристики для ТЕД електровозу 2ЭС10 пропонується використовувати термін «узагальнена струмова

характеристика», що характеризує струм, що споживається ЕРС в залежності від швидкості його руху та реалізованого тягового зусилля. Ця характеристика будується на підставі аналізу струмових характеристик існуючого ЕРС та може бути використана для отримання струмових характеристик ЕРС, що проектується у першому наближенні.

На рис. 2.3 наведено узагальнену струмову характеристику для електровозу ДСЗ з подібною до 2ЭС10 системою тягового електроприводу [48].

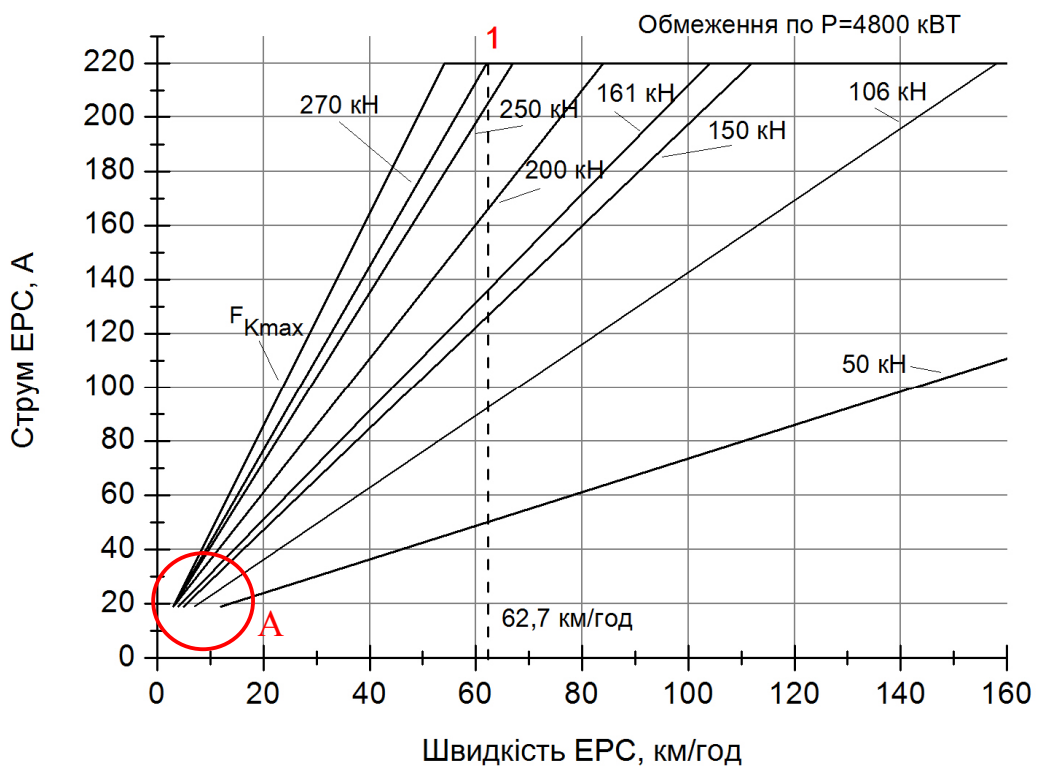


Рисунок 2.3 – Струмові характеристики для електровозу ДСЗ

Для цієї характеристики характерним є наявність двох ключових областей: області обмеження за потужністю тягових двигунів та точки номінального тривалого режиму (точка 1 на рис. 2.3). В номінальному тривалому режимі ЕРС працює в умовах реалізації номінальної сили тяги та номінальної потужності, що реалізується ТЕД. Реалізація номінальної потужності, в свою чергу, передбачає роботу останнього з відповідними

номінальними похідними параметрами (номінальними напругою, струмом, частотою тощо) які для розглянутого режиму роботи є визначеними (табл.2.4) [52]. Таким чином точка номінального тривалого режиму для ЕРС відповідає номінальному режиму роботи ТЕД, що вказує на можливість здійснення безпосереднього переходу від струмової характеристики тягової одиниці до залежності  $I = f(v)$  для ТЕД з урахуванням зміни величини споживаного струму.

Таблиця 2.4

Функціональні параметри номінального тривалого режиму роботи ТЕД електровозу 2ЭС10

Параметр номінального тривалого режиму	Значення параметру
Потужність тривалого режиму, кВт	1200
Частота обертання ротора, об/хв.	900
Напруга обмотки статора (фазна), В	2400
Номінальний струм (фазний), А	158
Частота струму, Гц	60
ККД	0,93
Коефіцієнт потужності	0,85

Такий перехід дозволяє отримати шукану залежність  $v = f(I)$  для ТЕД лише з урахуванням параметрів номінального тривалого режиму його роботи. При цьому особливістю роботи будь-якого ЕРС з АТЕП, в тому числі 2ЭС10, є використання системи плавного регулювання потужності [46, 48], що передбачає представлення його струмових характеристик, а відповідно й електротягових характеристик ТЕД, значеннями струмів, що відповідають обмеженням тягової характеристики [48].

Для побудови таких характеристик скористаємось рівнянням потужності.

В загальному вигляді потужність, що реалізується на ободі рухомих коліс визначається, як [45]:

$$P = 0,278vF_K, \quad (2.3)$$

а з урахуванням  $F_K = \frac{F}{N}$ :

$$P = 0,278v \frac{F}{N}. \quad (2.4)$$

У виразі (2.30):

$F$  – узагальнена сила тяги ЕРС;

$N$  – кількість тягових двигунів.

Приймаючи до уваги обмеження узагальненої струмової характеристики за потужністю, що реалізується ТЕД, а також приймаючи до уваги, що  $P = \omega M \eta_{ЗП} = P_{ДВ} \cdot \eta_{ЗП}$  [45], задача отримання шуканих характеристик зводиться до знаходження однієї точки – швидкості руху, що відповідає даному обмеженню за тієї чи іншої граничної сили тяги:

$$v = \frac{P_{ДВ} \cdot \eta_{ЗП} \cdot N}{0,278F}, \quad (2.5)$$

де  $P_{ДВ}$  – потужність, що реалізується на ободі однієї колісної пари.

Узагальнені струмові характеристики, отримані в результаті розрахунку, наведено на рис. 2.4. Отримані струмові характеристики є ідеалізованими характеристиками ТЕД, адже в реальних умовах, на прикладі електровозу ДСЗ, струм після переходу через точку номінального тривалого режиму не є постійним, а нелінійно зменшується з досягненням максимальної швидкості руху [53]. Тому при виконанні досліджень з метою спрощення приймаємо, що вказані характеристики після переходу через точку номінального тривалого режиму є незмінними.

Порівняння наведених характеристик з типовими характеристиками для ЕРС з АТЕП, наведеними в [48], вказує на наявність деякого їх неспівпадіння (області А та А' рис. 2.3, 2.4). При цьому даний факт не створює суттєвих перешкод в проведенні подальших досліджень, з урахуванням їх специфіки, а тому ним можна знехтувати.

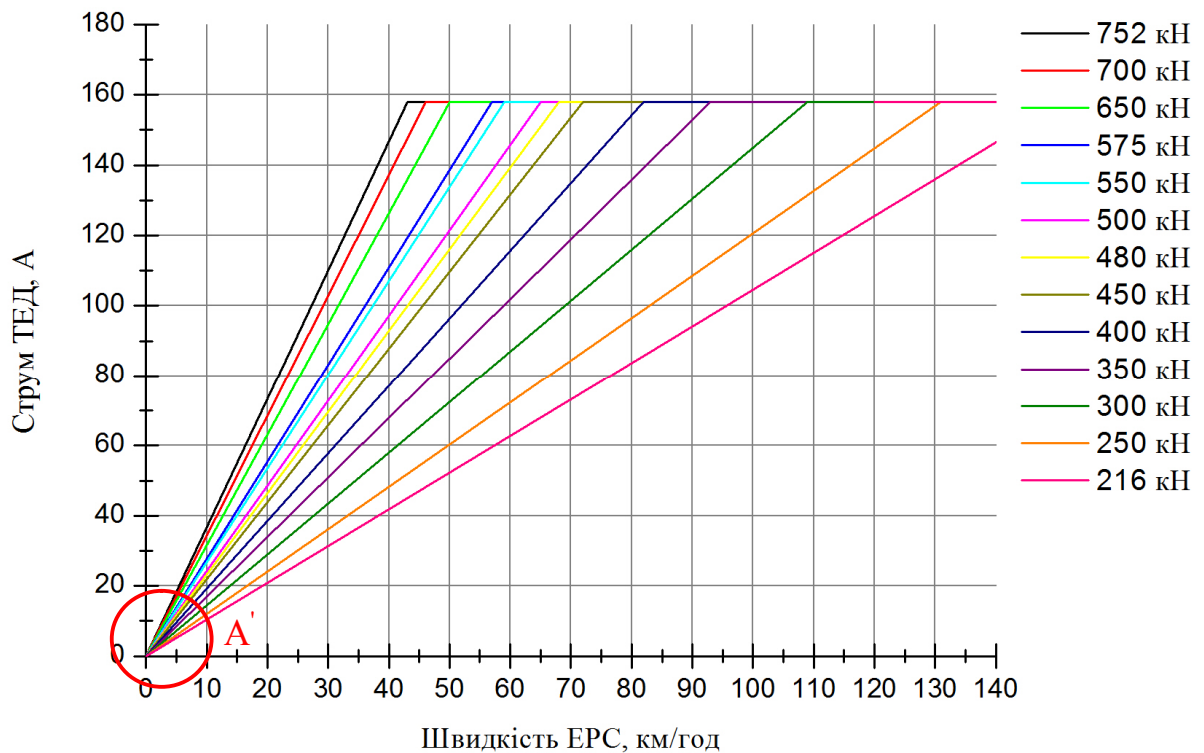


Рисунок 2.4 – Струмові характеристики для ТЕД електровозу 2ЭС10

Отримані характеристики дозволяють остаточно визначити споживаний ТЕД струм, проте для повноцінного здійснення масштабного переходу до  $I_{H\_екв}$ , з урахуванням методики визначення масштабних відношень, є необхідним застосування залежності  $I_1 = f(P_2)$ . В умовах відсутності у автора цієї залежності для ТЕД електровозу 2ЭС10, а також враховуючи той факт, що тяговий асинхронний двигун отримує живлення від АІН незалежно від рівня та виду напруги контактної мережі у першому наближенні приймаємо, що досліджуваний асинхронний тяговий привод ЕРС постійного струму побудовано з використанням тягового двигуна СТА1200У1 [48, 53] з

урахуванням його модифікації СТА1200А, який призначено для використання на російському електровозі 2ЭС10. З урахуванням останнього, остаточні струмові характеристики, що їх буде використано при виконанні досліджень, наведено на рис. 2.5.

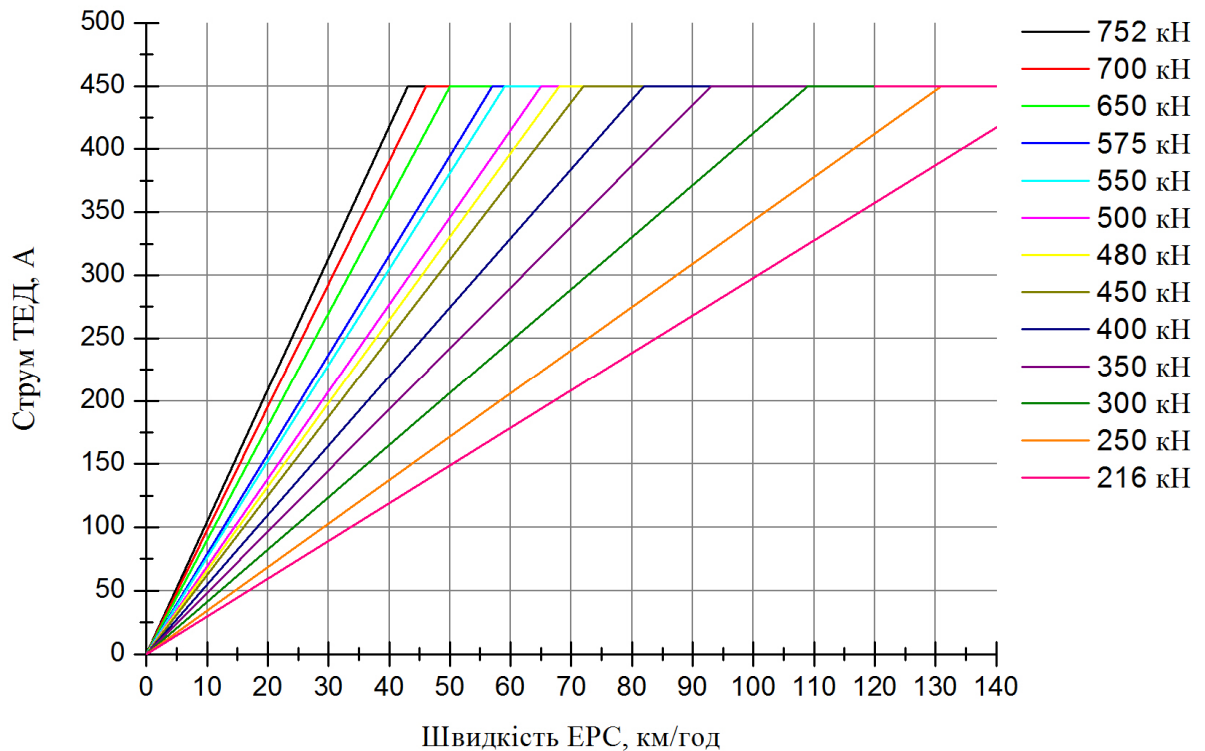


Рисунок 2.5 – Струмові характеристики для ТЕД електровозу 2ЭС10 з урахуванням параметрів СТА1200У1

## 2.2 Особливості визначення масштабних відношень контрольованих параметрів

Аналізуючи побудовану, за результатами тягового розрахунку, криву  $v = f(s)$  (додаток Б) з точки зору значень споживаного ТЕД струму, доцільним є розглянути ділянки (підйоми), де швидкість руху зростає, але не досягає усталеного значення, визначуваного відповідною величиною ухилу. Такими ділянками на вказаній кривій є:

- ділянка 4 – ухил 3 ‰, протяжність 1,4 км;

- ділянка 6 – ухил 6,3 ‰, протяжність 0,3 км;
- ділянка 7 – ухил 2,2 ‰, протяжність 0,8 км;
- ділянка 9 – ухил 3 ‰, протяжність 0,9 км;
- ділянка 12 – ухил 1,3 ‰, протяжність 0,9 км;
- ділянка 14 – ухил 2,1 ‰, протяжність 0,92 км.

На вказаних ділянках існує можливість їх подолання використовуючи не граничну, а проміжну тягову характеристику з відповідно меншою розрахунковою силою тяги, а отже і меншим значенням струму, що споживається ТЕД. Визначимо ці параметри для кожної з ділянок з урахуванням їх характеристик.

Припустимо, що при переході з ділянки 3 на ділянку 4 зі швидкістю 62 км/год машиністом здійснюється штучне зменшення тягового зусилля до значення, що забезпечує подолання ухилу 3 ‰ (ділянка 4). Згідно до характеристики питомих рівнодіючих сил для режиму тяги (рис. 2.1) розрахункова швидкість руху для подолання підйому у 3 ‰ становить 96 км/год, що відповідає розрахунковому тяговому зусиллю 325 кН. Враховуючи вказані параметри, а також використовуючи методику виконання тягового розрахунку (додаток А), визначимо максимальну масу поїзду, що може подолати даний підйом за вказаних умов. В результаті розрахунку отримано значення 5555,6 т, порівняння якого з раніше встановленим 5300 т вказує на можливість та доцільність подолання ділянки 4 з меншим тяговим зусиллям та меншою величиною споживаного струму.

Узагальнені результати розрахунків для всіх ділянок наведено у таблиці 2.5. Отримані результати розрахунку вказують на те, що в цілому всі визначені ділянки можливо подолати з меншою силою тяги та струмом, що реалізується ТЕД при збереженні тієї ж швидкості руху. Виняток складає лише ділянка 6. Для цієї ділянки критична маса поїзду, що може її подолати,

з урахуванням розрахункових параметрів ( $F_{кр} = 425$  кН,  $v_p = 73$  км/год), є меншою за задану, що вказує на необхідність реалізації більшого тягового зусилля.

Таблиця 2.9

## Результати розрахунків параметрів ділянок

№ ділянки	Ухил, ‰	Усталене значення швидкості руху для ділянки, км/год	Усталене значення тягового зусилля, кН	Швидкість на початку ділянки, км/год	Швидкість у кінці ділянки, км/год	Максимальна рухома маса, т	Задана розрахункова маса, т	Значення струму на початку ділянки, А	Значення струму у кінці ділянки, А	Значення струму для граничної характеристики, А
4	+3	96	325	62	73	5555,6	5300	275	335	450
6	+6,3	73	425	67	70	4971,7		н/д	н/д	
7	+2,2	100	300	70	76	5811,1		260	290	
9	+3	96	325	70	74	5555,6		315	330	
12	+1,3	110	250	56	67	5400,9		180	225	
14	+2,1	100	300	63	71	5811,1		230	255	

Реалізація більшого тягового зусилля призводить до переходу на більш «високу» характеристику (рис. 2.5) при якій на швидкості 69 км/год реалізується струм 450 А. Тобто здійснювати перехід на меншу силу тяги на даній ділянці недоцільно.

Встановлені параметри подолання ділянок (тягові зусилля та струми) є граничними та визначають діапазони можливих значень, що можуть бути штучно встановлені машиністом для подолання тієї чи іншої ділянки. Їх визначення дозволяє остаточно здійснити масштабний перехід від струму реального ТЕД до струму двигуна експериментальної установки ( $I_{н\_екв}$ ) і в подальшому провести експериментальне дослідження. При цьому, оскільки серед наведених ділянок найбільш тривалою, з точки зору часу її проходження, є ділянка 4 (додаток Б) автор вважає доцільним в ході

експериментальних досліджень обмежити відтворення всього процесу руху ЕРС по перегону лише вказаною ділянкою, та за можливості проаналізувати її за умови реалізації меншого тягового зусилля.

### 2.3 Вибір та обґрунтування методів досліджень

На сьогоднішній день в рамках дослідження будь яких явищ або процесів та вирішення прикладних задач широкого змісту набуває використання теорії подібності та моделювання [2, 3, 7, 8, 9, 13, 36, 37]. При цьому в більшості випадків використовується саме математичне моделювання, що передбачає собою створення системи диференційних рівнянь, котрі в найбільш наближеній формі характеризують поведінку досліджуваного об'єкта. Така методика досліджень безумовно має свої переваги, адже дозволяє проводити аналіз складних явищ або систем без безпосереднього втручання у їх функціонування.

Особливості роботи досліджуваних систем полягають у наявності значної кількості процесів характер яких досить складно описати за допомогою системи диференційних рівнянь. В таких умовах проведення досліджень з використанням математичного моделювання не є достатнім.

З урахуванням цього постає питання вибору такого методу досліджень, який би найбільш адекватно дозволив дослідити ті явища та процеси, що протікають в реальних системах та досягти максимальної відповідності результатів.

Загальна класифікація методів досліджень, які об'єднує в собі теорія подібності та моделювання, в залежності від повноти та точності реалізації досліджуваних процесів, наведена на рис. 2.6 [54, 55].



Рисунок 2.6 – Основна класифікація методів моделювання та подібності

Згідно до наведеної класифікації для виконання аналізу будь яких явищ або процесів, відповідно до вимог щодо результату, пропонується використовувати 1 з 6 груп методів моделювання:

- наглядне моделювання;
- символно-знакове моделювання;
- математичне уявне;
- натурне;
- фізичне;
- аналого-цифрове моделювання.

Серед даного переліку, з урахуванням наведеного вище, проведення подальших досліджень можливе лише з використанням тих груп методів моделювання, що відносяться до матеріального виду. При цьому особливої уваги заслуговують групи натурального та фізичного моделювання. Застосування аналого-цифрового моделювання не передбачає збереження фізики досліджуваного процесу, а полягає у його описі за допомогою математичних рівнянь [54, 55], що згідно визначеного не є достатнім.

Виконання натурального моделювання передбачає виконання досліджень безпосередньо на досліджуваному об'єкті при наявності штучно створених умов його функціонування [54, 55]. На думку автора перед проведенням натурних досліджень необхідно перевірити робочі гіпотези у лабораторних умовах на масштабних моделях.

При фізичному моделюванні дослідження проводяться на установках, що характеризуються фізичною подібністю з досліджуваним явищем або системою [54, 55]. Таким чином, за характеристиками моделі можна отримати всі характеристики оригіналу шляхом перерахунку через масштабні коефіцієнти. Останнє твердження вказує на доцільність використання фізичного моделювання при виконанні необхідних досліджень, а отже на необхідність створення фізичної моделі реальної системи. В нашому випадку це модель, що імітує функціонування тягового асинхронного електроприводу ЕРС постійного струму.

#### 2.4 Оцінка ступеню подібності систем

Однією з головних особливостей використання фізичної моделі є можливість отримання адекватних результатів необхідних досліджень, яка головним чином визначається ступенем подібності останньої до реальної системи. При використанні в якості методу дослідження фізичного моделювання достатнім для досягнення необхідної точності отриманих результатів є виконання умов неповного моделювання. При цьому ступінь подібності систем визначається подібністю ключових процесів або характеристик їх функціонування, що мають найбільшу значимість для даного конкретного дослідження [54].

Згідно до третьої теорії подібності, теорії М.В. Кирпичева та А.А. Гухмана [54, 56, 57], необхідними та достатніми умовами для створення

подібності являється пропорційність параметрів, що входять до умов однозначності та рівність критеріїв подібності співставляємих процесів.

В загальному вигляді процеси в досліджуваному об'єкті описуються за допомогою системи диференціальних рівнянь, що характеризують взаємодію між факторами та параметрами останнього. Таким чином, необхідною умовою подібності двох об'єктів є однаковий вигляд системи диференціальних рівнянь [54, 58], а отже однаковий характер взаємодії складових частин досліджуваних систем.

На рис. 2.7, 2.8 наведено принципову схему та узагальнену структурну схему енергоперетворення у системі тягового електропостачання постійного струму [59] з включенням до її складу електровозу з АТЕП.

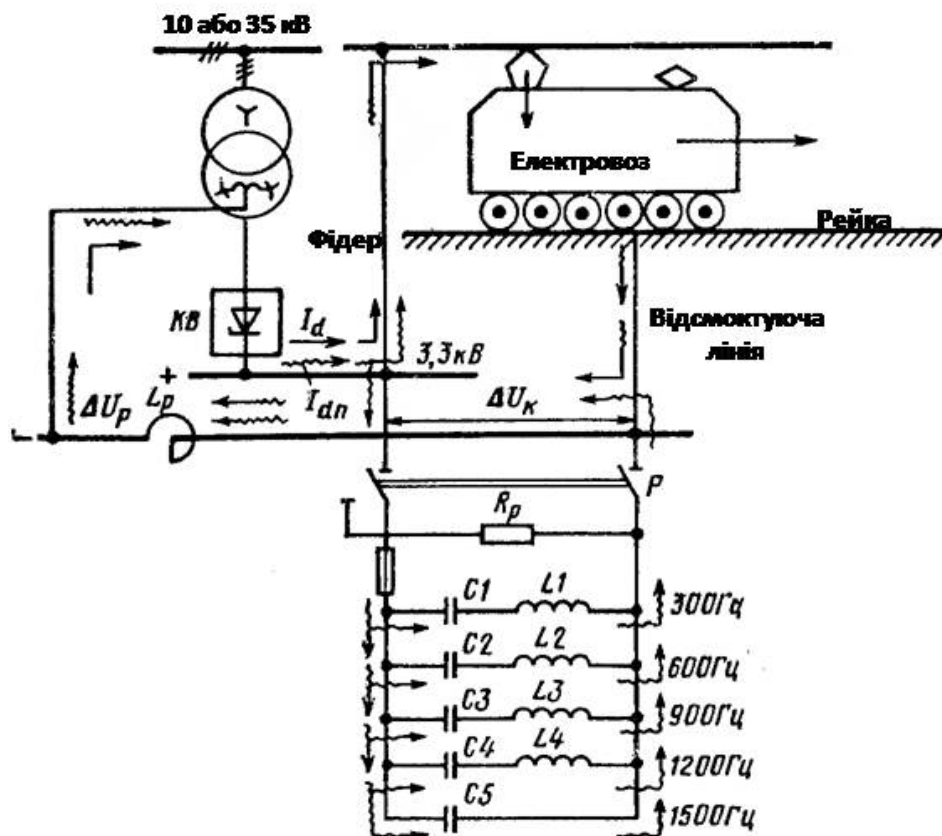


Рисунок 2.7 – Принципова схема енергоперетворення у системі тягового електропостачання постійного струму

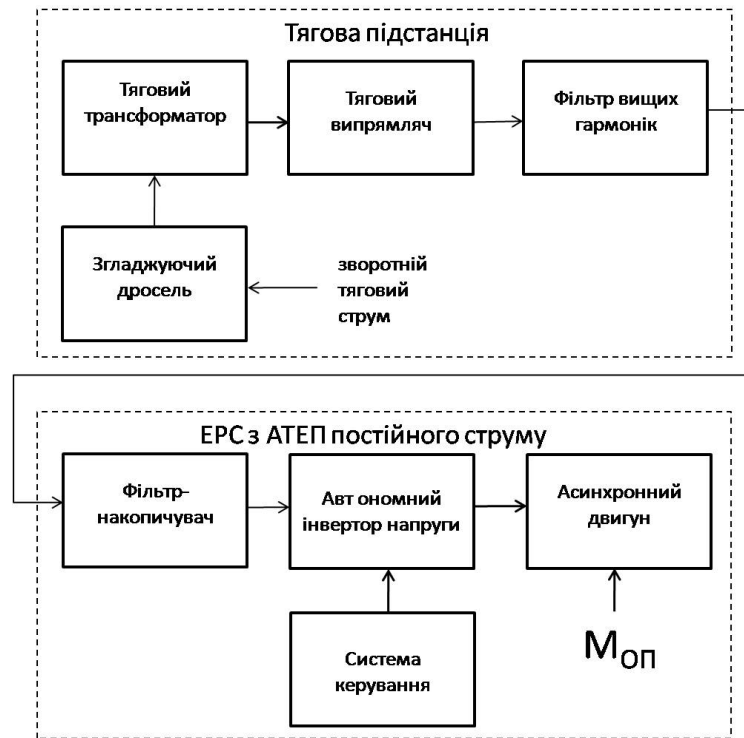


Рисунок 2.8 – Узагальнена структурна схема енергоперетворення у системі тягового електропостачання постійного струму

Очевидно, що робота кожної зі складових ланок наведеної системи описується відповідною системою диференціальних рівнянь, які характеризують процеси їх функціонування. З цієї точки зору можна зробити припущення, що задля забезпечення подібності фізичної моделі до реальної системи, в першому наближенні, достатнім є збереження послідовності процесу енергоперетворення, який в даному випадку реалізується за такою схемою (рис. 2.8): тяговий трансформатор – тяговий випрямляч (енергія змінного струму в енергію постійного струму); тяговий випрямляч – статичний перетворювач частоти ЕРС (енергія постійного струму в енергію змінного струму).

На рис. 2.9 наведено структурну схему експериментальної установки, що пропонується до реалізації, яка дозволить здійснити узагальнений аналіз досліджуваних процесів [60].

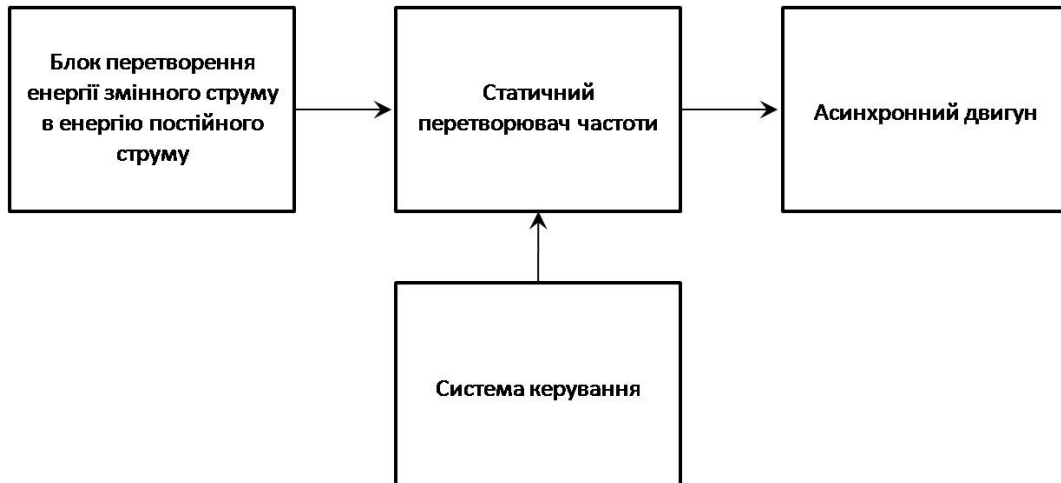


Рисунок 2.9 – Структурна схема експериментальної установки, що пропонується до реалізації

Перш ніж здійснювати детальний опис та аналіз складових частин наведеної структурної схеми, введемо деякі обмеження та припущення, які будемо приймати до уваги в подальшому при безпосередньому виконанні досліджень. Оскільки основною ідеєю роботи є оцінка можливості поліпшення показників ЕМС шляхом вибору частоти модуляції тягового статичного перетворювача, без розробки додаткових пристроїв фільтрації, доцільно розглянути повний спектр гармонік, що генерується останнім. З цієї точки зору приймаємо наступне:

- на тягових підстанціях замість більш ефективної 12-ти пульсової схеми випрямлення застосовано 6-ти пульсову схему;
- пасивні резонансні фільтри, що встановлені на виході тягового випрямляча підстанції та у вхідному колі силової частини ЕРС з АТЕП постійного струму відсутні (окрім вхідного LC фільтра-накопичувача);
- вхідні напруга та струм, що поступають на блок перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму – синусоїдальні;
- індуктивність контактної мережі не враховується.

Вказані припущення можливо враховувати виходячи з обраного методу досліджень – виконання неповного фізичного моделювання.

В наведеній структурній схемі реалізацію блоку перетворення енергії змінного струму в енергію постійного струму передбачається здійснювати за допомогою тиристорного агрегату АТ-320/230-УХЛЧ [61], яким обладнано одну з лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. Структурну функціональну схему агрегату наведено на рисунку 2.10.

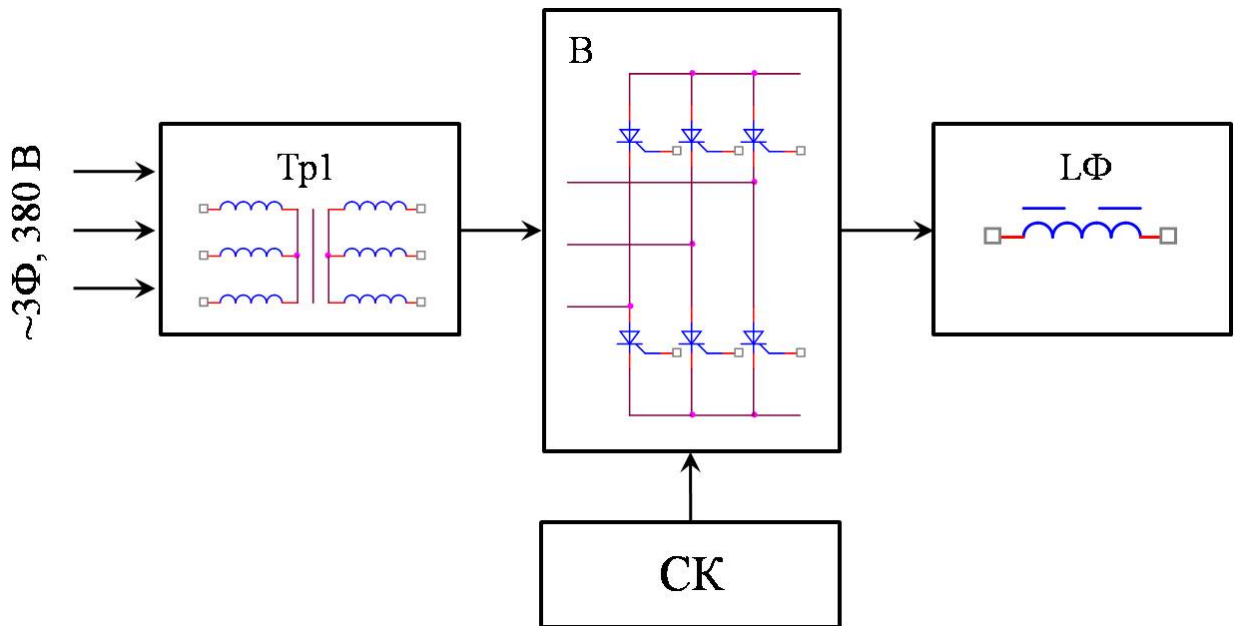


Рисунок 2.10 – Структурна функціональна схема тиристорного агрегату АТ-320/230-УХЛЧ

Як видно зі схеми механізм енергоперетворення агрегату, з урахуванням прийнятих вище припущень, є подібним, у першому наближенні, до механізму енергоперетворення тягової підстанції (рис. 2.8). Цей факт, а також те, що приведення подібності систем, більшою мірою передбачає приведення контрольованих параметрів ЕРС з АТЕП постійного струму, дозволяє повною мірою використовувати розглянуте обладнання для відтворення процесу первинного енергоперетворення.

В якості статичного перетворювача частоти передбачається використання типової моделі останнього, що застосовується у структурах промислових

частотно-регульованих приводів, та має можливість працювати при живленні від однофазної мережі. Типові структурна та принципова схеми таких пристроїв наведені на рисунках 2.11 та 2.12 [62, 63, 64].

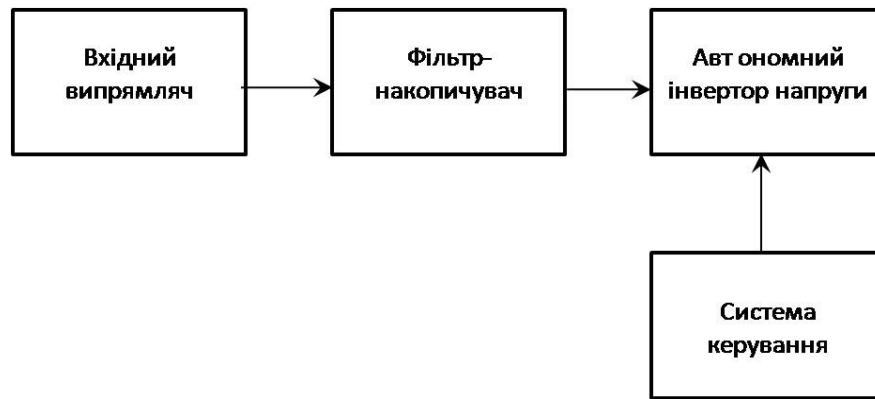


Рисунок 2.11 – Типова структурна схема промислового перетворювача частоти

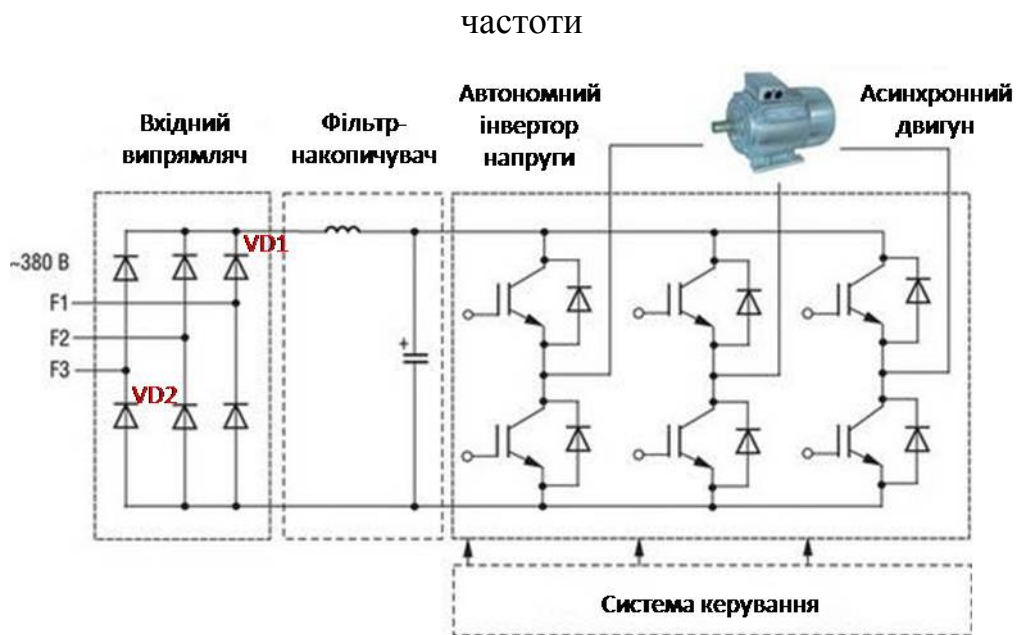


Рисунок 2.12 – Типова принципова схема промислового перетворювача частоти

Як видно з рис. 2.12 наведена принципова схема своєю більшою мірою є подібною до типової схеми тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму (рис. 2.13) [65]. Єдиною відмінністю даної схеми (рис. 2.12) є наявність вхідного трифазного випрямляча, який при живленні від

однофазної мережі працює у режимі однофазного [62]. Не зважаючи на це, оскільки живлення перетворювача частоти експериментальної установки передбачається здійснювати від мережі постійного струму, останній не буде брати участі у механізмі загального енергоперетворення, оскільки, за даних умов, в роботу буде включено лише його одне плече (діоди VD1, VD2, на рис. 2.12). Таким чином у першому наближенні схеми (рис. 2.12) та (рис. 2.13) є подібними.

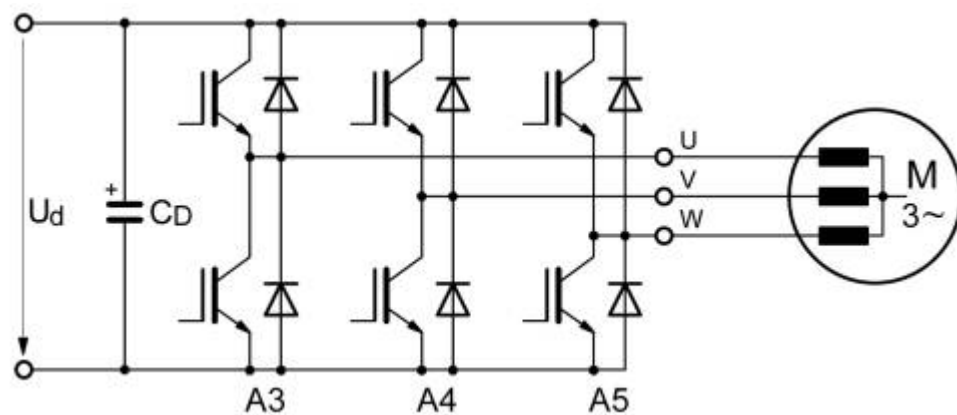


Рисунок 2.13 – Типова узагальнена принципова схема тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму

Подібність розглянутих елементів структурних схем, у сукупності з прийнятими припущеннями, дозволяє стверджувати і про подібність механізмів енергоперетворення що в свою чергу вказує на загальну подібність систем у першому наближенні. Для більш повної оцінки ступеню подібності двох систем є необхідним встановлення відповідних критеріїв подібності, що передбачає детальний аналіз функціональних залежностей між фізичними параметрами, які характеризують процеси в досліджуваних системах. Оскільки останні налічують у своєму складі декілька складових елементів, вони є складними. Згідно до першої додаткової теореми про подібність такі системи є подібними, якщо забезпечується подібність всіх складових елементів, які для них є спільними. Тобто постає задача

визначення та порівняння критеріїв подібності для спільних складових систем [54, 55].

В практиці вирішення задачі встановлення подібності існує два основних способи встановлення критеріїв подібності [55] – приведення рівнянь фізичного процесу до безрозмірного виду та з використанням  $\pi$ -теорему. Перший спосіб передбачає використання рівняння або системи рівнянь, що характеризують досліджувані процеси. Другий є більш універсальним, адже може бути застосованим і для випадків коли відомий лише перелік характерних параметрів об'єктів досліджень. Оскільки для деяких складових наведених систем прийнятними є різні режими роботи, які характеризуються різними системами диференціальних рівнянь, з точки зору спрощення досліджень використання другого способу знаходження критеріїв подібності є більш раціональним.

Аналіз наведених вище структурних схем дозволяє визначити ті складові їх частини, які є більшою мірою аналогічними. Оскільки експериментальні дослідження передбачають аналіз електромагнітного впливу частоти модуляції тягового перетворювача лише на системи СЦБ приведення подібності доцільно здійснювати лише для тих ланок обох систем, які характеризують функціонування АТЕП ЕРС постійного струму. В такому випадку складовими частинами обох систем, які є аналогічними і аналіз яких буде продовжено далі, є автономні інвертори напруги (АІН) та асинхронні двигуни. Розглянемо кожну з них.

В практиці аналізу процесів енергоперетворення в будь яких електричних системах основними рівняннями, що їх характеризують, є рівняння напруг [66, 67, 68]. Цей принцип дозволяє використовувати дані рівняння в якості базових при оцінці ступеню подібності систем.

В таблиці 2.10 наведено рівняння напруг для кожної зі складових реальної системи та моделі [19, 66, 67]. Для асинхронних двигунів замість рівнянь напруг наведені рівняння електрорушійних сил статора та ротора.

Таблиця 2.10

## Рівняння напруг складових елементів систем

Автономний інвертор напруги	
Модель	$U_S(k) = \mu U_d \sin\left(\left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{\varepsilon}\right)$
Реальна система	$U_S(k) = \mu U_d \sin\left(\left(k - \frac{1}{2}\right) \frac{\pi}{\varepsilon}\right)$
Асинхронний двигун	
Модель	$E_1 = 4,44k_{OB1}\omega_1 f_1 \Phi$ $E_2 = 4,44k_{OB2}\omega_2 f_1 s \Phi$
Реальна система	$E_1 = 4,44k_{OB1}\omega_1 f_1 \Phi$ $E_2 = 4,44k_{OB2}\omega_2 f_1 s \Phi$

Порівняння наведених рівнянь за складовими величинами та коефіцієнтами вказують на їх однаковість, а отже, при знаходженні критеріїв подібності, згідно до відповідної методики [54, 55], однаковими будуть і матриці розмірностей, що вказує на завідомо однаковість критеріїв подібності. В такому випадку, згідно [54-57], найпростішою необхідною умовою існування подібності залишається наявність пропорційності параметрів, що входять до умов однозначності.

З точки зору характеру досліджень, а також відповідно до специфіки моделювання електроенергетичних систем [54], таким параметром є їх встановлена потужність. Відповідно до цього, для остаточного встановлення подібності є необхідним здійснити приведення потужності пропонованої експериментальної установки до потужності реальної системи, тобто визначити відповідні масштабні коефіцієнти.

Для пояснення методики пошуку проведемо визначення шуканих коефіцієнтів для однієї зі складових розглянутих структурних схем – асинхронних двигунів. В даному випадку встановлення масштабних відношень здійснюється з урахуванням використання у складі розглянутих систем двигунів потужністю 750 Вт, на прикладі АИР71А2, що встановлені в

частотних приводах лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка» та 1200 кВт, на прикладі СТА1200У1, що використовується у складі тягового електроприводу ЕРС з АТЕП [69].

Складність визначення масштабних коефіцієнтів полягає у наявності значної розбіжності параметрів співставляємих об'єктів та нелінійності їх характеристик. В теорії подібності та моделювання [54, 58] подібність такого роду систем визначається з використанням другого додаткового положення про подібність шляхом побудови відносних характеристик нелінійних параметрів. В цьому випадку отримання необхідних масштабних відношень виконується з використанням характеристики, отриманої шляхом усереднення побудованих відносних характеристик. Останні являють собою графічні залежності, що характеризують зміну параметрів систем виражених у долях відносно деякої базисної величини [54].

На рис. 2.14 наведено графічні залежності виду  $I_1 = f(P_2)$  [68] побудовані для вказаних двигунів з урахуванням застосування другої додаткової теореми про подібність. В якості базисних параметрів в даному випадку прийнято номінальні струм та потужність відповідно.

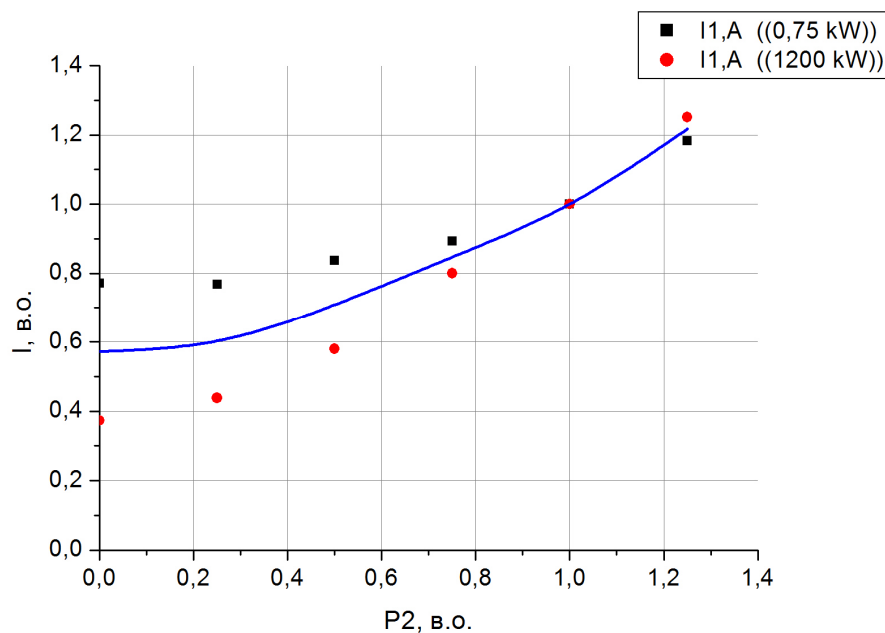
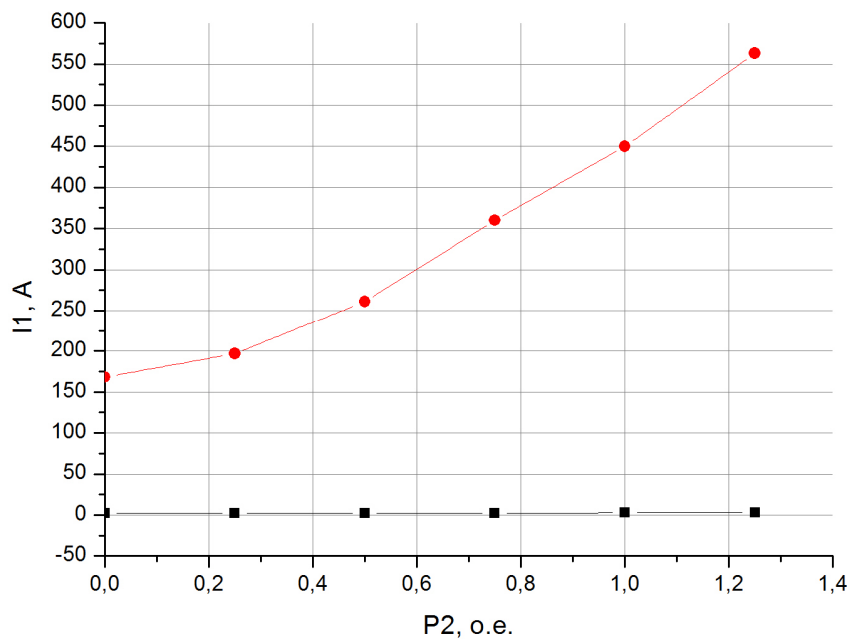


Рисунок 2.14 – Відносні характеристики асинхронних двигунів

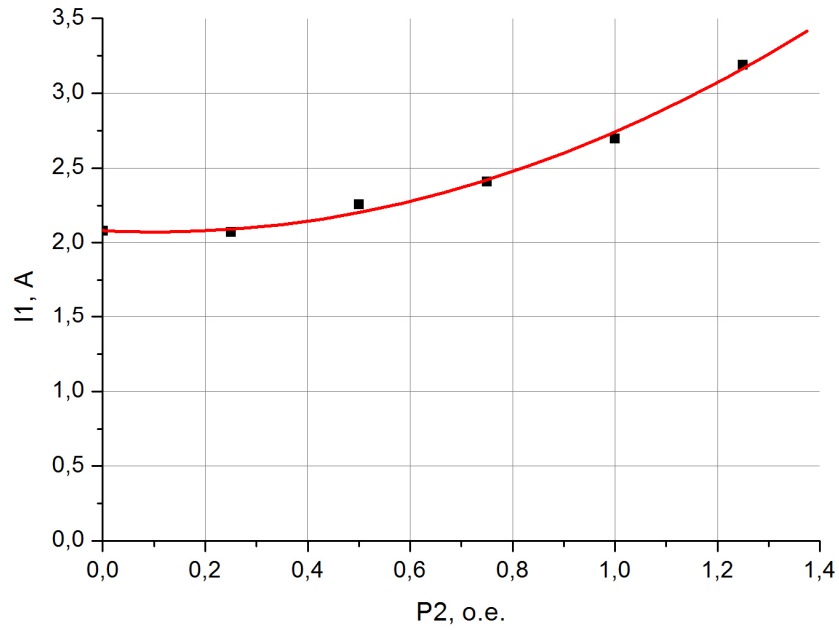
Аналіз даних графічних залежностей вказує на значне неспівпадіння відносних характеристик, що загалом не відповідає умовам застосування даного додаткового положення про подібність нелінійних систем [54]. Тому його використання є недоцільним.

В загальному випадку для отримання шуканих масштабних коефіцієнтів є необхідним виконати перехід від характеристик двигуна, потужністю 750 Вт до характеристик двигуна, потужністю 1200 кВт, здійснити який можливо шляхом їх інтерполяції деякими функціями [70].

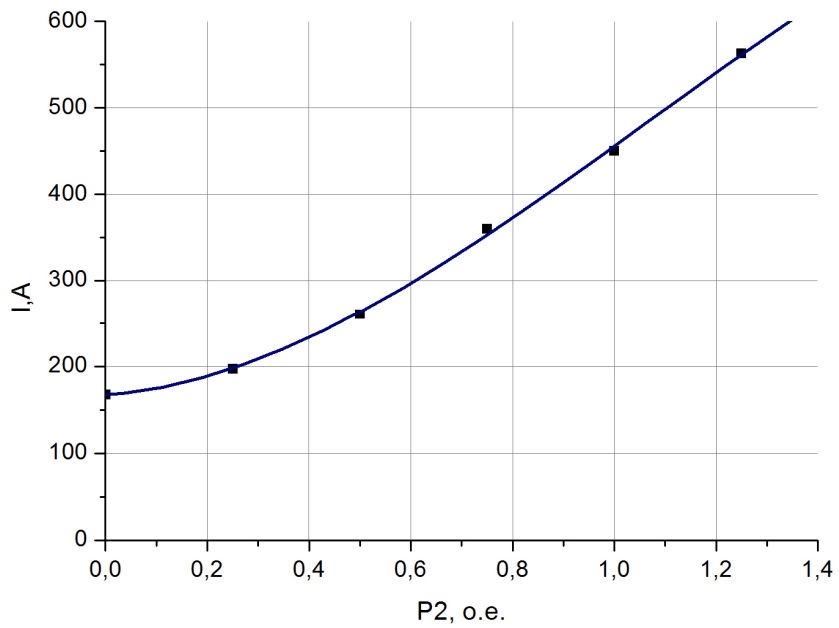
На рис. 2.15 наведено інтерпольовані характеристики двигунів моделі та оригіналу, побудовані в одній системі координат, а також характеристики кожного з двигунів окремо. Побудову характеристик здійснено за допомогою програмного середовища OriginPRO 8, що має вбудовану функцію інтерполяції графічних залежностей [71]. Побудову характеристик (рис. 2.14, рис. 2.15) здійснено з урахуванням [72, 73] для двигуна малої потужності, а також колової діаграми для двигуна СТА1200 [53].



a)



б)



в)

Рисунок 2.15 – Інтерпольовані залежності  $I_1 = f(P_2)$  для двигунів моделі та оригіналу

На рис. 2.15:

б) – характеристика двигуна АИР71А2;

в) – характеристика двигуна СТА1200У1.

Результатом інтерполяції наведених графічних залежностей є аналітичні вирази, які у подальшому можуть дозволити отримати масштабні коефіцієнти для всього діапазону потужностей:

для двигуна малої потужності:

$$I_{1M} = 2,08073 - 0,17117P_{2M} + 0,83006P_{2M}^2; \quad (2.6)$$

для двигуна великої потужності:

$$I_{1B} = 167,33333 + 39,20635P_{2B} + 363,04762P_{2B}^2 - 113,77778P_{2B}^3. \quad (2.7)$$

Отримані вирази пов'язують між собою значення струмів двигунів АИР71А2 потужністю 750 Вт та СТА1200У1 потужністю 1200 кВт, які є кінцевими ланками енергоперетворення розглянутих систем (рис.2.8, рис.2.9) є найбільш нелінійними елементами. Інші складові даних систем мають однакові рівняння з лінійними масштабними коефіцієнтами, як правило за напругою. Тому, в подальшому, загальний масштабний коефіцієнт для всієї системи приймаємо як добуток масштабних коефіцієнтів всіх складових ланок.

Для остаточного встановлення масштабних відношень необхідним є здійснити приведення потужностей всіх складових розглянутих систем, а також їх потужностей вцілому. З урахуванням цього, для прикладу розглянутих двигунів, отримуємо:

$$\begin{aligned} m_P &= \frac{P_{1OP}}{P_{1МОД}} = \frac{3 \cdot \frac{U_{1B}}{K_{ИВ.В}} \cdot I_{1B}(P_{2B}) \cdot \cos \varphi_{1B}(P_{2B})}{3 \cdot \frac{U_{1M}}{K_{ИВ.М}} \cdot I_{1M}(P_{2M}) \cdot \cos \varphi_{1M}(P_{2M})} = \\ &= \frac{K_{ИВ.М} \cdot U_{1B} \cdot I_{1B}(P_{2B}) \cdot \cos \varphi_{1B}(P_{2B})}{K_{ИВ.В} \cdot U_{1M} \cdot I_{1M}(P_{2M}) \cdot \cos \varphi_{1M}(P_{2M})} \end{aligned} \quad (2.8)$$

У виразі (2.8):

$K_{IHB.M}$ ,  $K_{IHB.B}$  – коефіцієнти перетворення за напругою для АІН системи малої та великої потужностей відповідно;

$U_{1M}$ ,  $U_{1B}$  – напруга живлення двигунів реальної системи енергоперетворення та експериментальної установки відповідно (вихідна напруга АІН);

$I_{1B}(P_{2B})$ ,  $I_{1M}(P_{2M})$  – аналітичні вирази апроксимації характеристик двигунів в загальному вигляді.

Складові виразу (2.8)  $\cos\varphi_{1B}(P_{2B})$  та  $\cos\varphi_{1M}(P_{2M})$  являють собою залежності між коефіцієнтом потужності та електромагнітною потужністю що реалізується обома двигунами відповідно. Їх визначення для даного рівняння пропонується здійснювати за аналогічною до визначення струму методикою, з використанням відповідних відносних характеристик (рис. 2.16, 2.17).

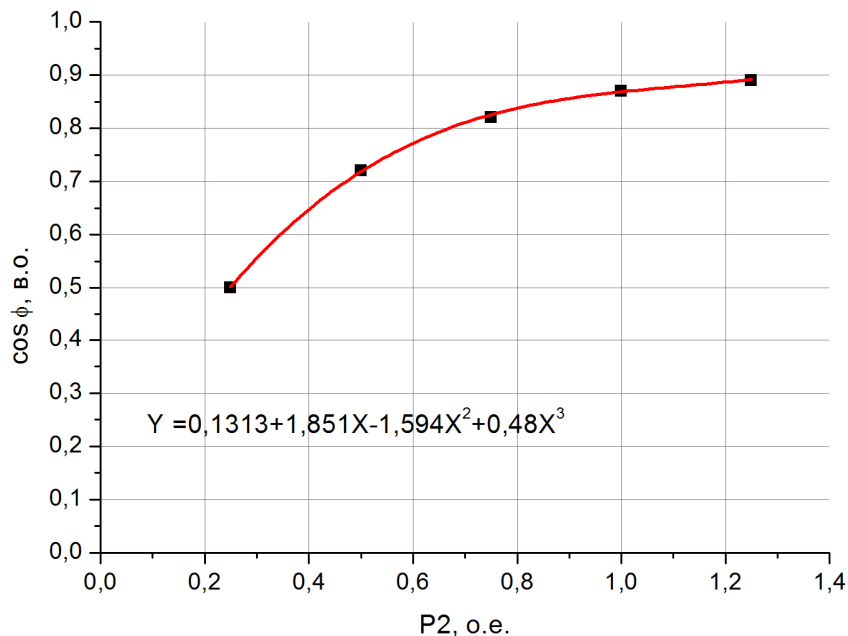


Рисунок 2.16 – Інтерпольована залежність  $\cos\varphi_{1M}(P_{2M})$  для двигуна

АІР71А2

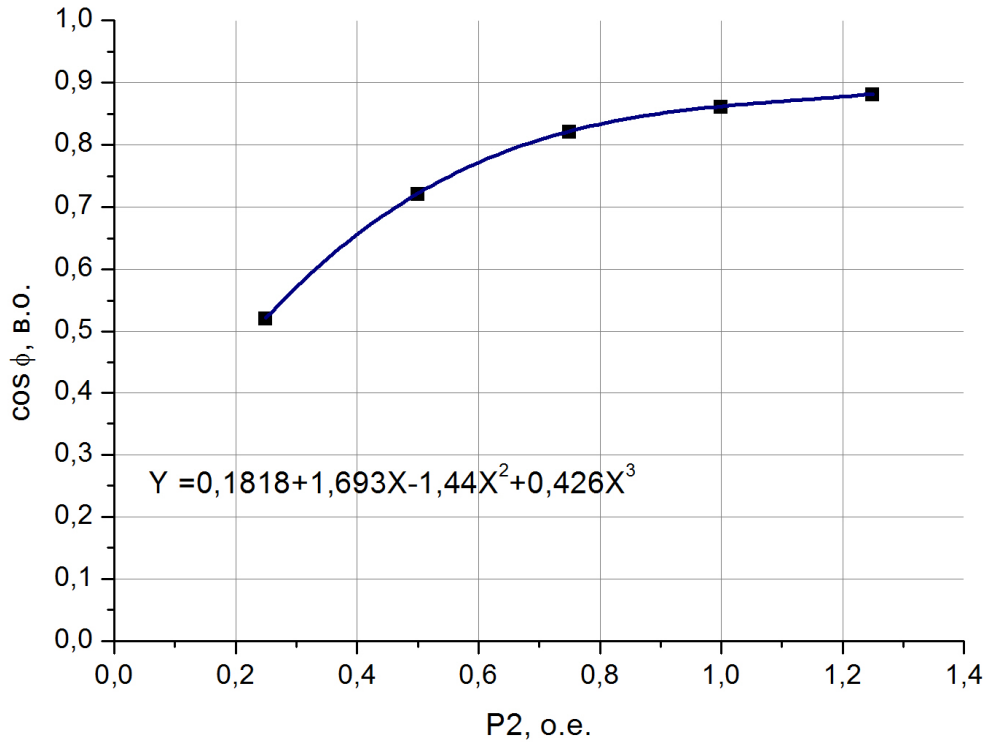


Рисунок 2.17 – Интерпольована залежність  $\cos \varphi_{1B}(P_{2B})$  для двигуна  
СТА1200У1

## 2.5 Визначення числових значень масштабних відношень контрольованих параметрів

Остаточно встановити наявність подібності систем, а в нашому випадку часткової подібності, можливо шляхом визначення масштабних відношень для визначення вхідного струму експериментальної установки. Для їх визначення використаємо визначене рівняння приведення потужностей. Для цього вираз (2.8) запишемо наступним чином:

$$\frac{U_{1OP} \cdot I_{1OP}}{U_{1МОД} \cdot I_{1МОД}} = \frac{K_{ИВ.М} U_{1B} \cdot I_{1B}(P_{2B}) \cdot \cos \varphi_{1B}(P_{2B})}{K_{ИВ.В} U_{1M} \cdot I_{1M}(P_{2M}) \cdot \cos \varphi_{1M}(P_{2M})}. \quad (2.9)$$

З рівняння (2.9) шукане значення струму реальної системи визначимо як:

$$I_{1OP} = \frac{K_{IHB.M} U_{1B} \cdot I_{1B}(P_{2B}) \cdot \cos \varphi_{1B}(P_{2B})}{K_{IHB.B} U_{1M} \cdot I_{1M}(P_{2M}) \cdot \cos \varphi_{1M}(P_{2M})} \cdot \frac{U_{1МОД} \cdot I_{1МОД}}{U_{1OP}}. \quad (2.10)$$

У рівнянні (2.10) присутні коефіцієнти перетворення за напругою для АН. Як правило в системах частотного керування асинхронними двигунами, як тяговими так і промислового призначення, такі пристрої працюють за принципом реалізації двополярної, дво- або трирівневої ШІМ [65, 69, 74]. З цієї точки зору, з метою спрощення, даними коефіцієнтами можна знехтувати:

$$I_{1OP} = \frac{U_{1B} \cdot I_{1B}(P_{2B}) \cdot \cos \varphi_{1B}(P_{2B})}{U_{1M} \cdot I_{1M}(P_{2M}) \cdot \cos \varphi_{1M}(P_{2M})} \cdot \frac{U_{1МОД} \cdot I_{1МОД}}{U_{1OP}}, \quad (2.11)$$

де  $U_{1МОД}$ ,  $U_{1OP}$  – діючі значення напруг живлення постійного струму експериментальної установки та реальної системи,  $I_{1МОД}$  – діюче значення вхідного струму експериментальної установки.

У рівнянні (2.11) не визначеними параметрами є напруги живлення асинхронних двигунів обох систем  $U_{1B}$  та  $U_{1M}$ , поточні значення яких є змінними та визначаються реалізацією відповідного закону частотного керування [68]. В цьому випадку, відповідно до [76], встановлення шуканих значень напруги здійснюють виходячи з умови підтримання сталості відповідних параметрів – моменту або потужності.

Згідно [76] в залежності від вимог електричної тяги можливо реалізувати два закони частотного керування: до розрахункової швидкості –  $U / f = const$ ; вище розрахункової швидкості –  $U / \sqrt{f} = const$ . Оскільки, за умовами експерименту, струмове навантаження ТЕД є змінним – змінною є і реалізована потужність, тобто знаходження шуканих величин необхідно здійснювати за умови реалізації закону частотного керування  $U / f = const$ . Визначимо шукані величини.

Відповідно до [76]:

$$M_{KP} = \pm \frac{3}{2} \cdot \frac{p_{II} \left( \frac{X_{\mu}}{X_1} \right)^2}{\omega_{0\_ЭЛ.Н}} \cdot \frac{1}{\sigma X_2} \left( \frac{E_a}{\omega_0} \right)^2, \quad (2.12)$$

або для двигунів великої потужності, без врахування активного опору обмотки статора:

$$M_{KP} = \pm \frac{3}{2} \cdot \frac{p_{II} \left( \frac{X_{\mu}}{X_1} \right)^2}{\omega_{0\_ЭЛ.Н} \sigma X_2} \cdot \frac{U_1^2}{\omega_0^2}, \quad (2.13)$$

У виразах (2.12) та (2.13):

$p_{II}$  – число пар полюсів двигуна;

$X_{\mu}$  – індуктивний опір контуру намагнічування;

$X_1$  – індуктивний опір обмотки статора;

$X_2$  – індуктивний опір обмотки ротора;

$\omega_{0\_ЭЛ.Н}$  – номінальна колова частота обертання поля статора;

$\sigma = 1 - \frac{X_{\mu}^2}{X_1 X_2}$  – коефіцієнт розсіювання двигуна;

$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{0\_ЭЛ}}{\omega_{0\_ЭЛ.Н}}$  – відносна колова частота обертання поля статора.

Аналізуючи наведені рівняння в першому наближенні можна прийняти:

$$M_{KP} = K \frac{U_1^2}{\omega_0}, \quad (2.14)$$

звідки:

$$U_1 = \bar{\omega}_0 \sqrt{\frac{M_{KP}}{K}} = \frac{\omega_{0\_ЭЛ}}{\omega_{0\_ЭЛ.Н}} \sqrt{\frac{M_{KP}}{K}} = \frac{f_1}{f_{НОМ}} \sqrt{\frac{M_{KP}}{K}}. \quad (2.15)$$

Останній вираз дозволяє визначити, що необхідною і достатньою умовою встановлення шуканого значення напруги, для будь якого значення частоти, є визначення  $M_{KP}$ , яке в свою чергу потребує попереднього встановлення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна  $X_1$ ,  $X_2$  та  $X_\mu$ . Для двигуна експериментальної установки АИР71А2, який є серійним двигуном вказані параметри наведено у [73]. Для тягового двигуна СТА1200У1 такі параметри потребують свого визначення.

Аналіз літературних джерел дозволив визначити декілька методик, що дозволяють здійснювати розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення асинхронних двигунів лише за даними каталогу або паспортними даними. Основні положення методик наведено у [72, 77, 78].

Серед наведеного переліку лише одна з методик дозволяє здійснювати розрахунок параметрів схеми заміщення для двигунів великої потужності, в тому числі тягових двигунів – методика Мощинського [72]. Виконання, з її використанням, попередніх розрахунків параметрів схем заміщення асинхронних двигунів різного діапазону потужностей підтверджує її ефективність для двигунів середньої та великої потужності – від 50-500 кВт та більше 500 кВт відповідно. Тобто вказана методика цілком може бути використана для встановлення шуканих параметрів схеми заміщення двигуна СТА1200У1.

Вихідні дані для виконання розрахунку наведено у таблиці 2.11 у відповідності до [53].

Таблиця 2.11

Вихідні дані для визначення шуканих параметрів схеми заміщення ТЕД  
СТА1200У1

Параметр	Значення параметру
Номинальна потужність $P_{НОМ}$ , Вт	1200000
Номинальна фазна напруга $U_{\Phi}$ , В	1079
Номинальна частота живлячої напруги $f_{НОМ}$ , Гц	56
Номинальний ККД $\eta_{НОМ}$	0,955
Номинальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{НОМ}$	0,88
Номинальне ковзання $s_{НОМ}$	0,015
Число фаз $m$	3
Число пар полюсів $p$	3
Коефіцієнт часткового навантаження $p_K$	0,25
Кратність максимального моменту $K_M$	2,85
Кратність пускового моменту $K_{II}$	1
Кратність пускового струму $K_i$	7
Коефіцієнт потужності за часткового навантаження $\cos \varphi_P$	0,52
ККД за часткового навантаження $\eta_P$	0,92

Користуючись вихідними даними згідно [72] визначимо значення номінального струму, струму за часткового навантаження та струму холостого ходу:

$$I_{1НОМ} = \frac{P_{НОМ}}{m U_{\Phi} \eta_{НОМ} \cos \varphi_{НОМ}} = \frac{1200000}{3 \cdot 1079 \cdot 0,955 \cdot 0,88} = 441,1 \text{ А.} \quad (2.16)$$

$$I_{1P} = \frac{P_{НОМ} \cdot p_K}{m U_{\Phi} \eta_P \cos \varphi_P} = \frac{1200000 \cdot 0,25}{3 \cdot 1079 \cdot 0,92 \cdot 0,52} = 193,7 \text{ А.} \quad (2.17)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1P}^2 - \left[ \frac{p_K(1-s_{НОМ})}{(1-p_K \cdot s_{НОМ})} I_{1НОМ} \right]^2}{1 - \left[ \frac{p_K(1-s_{НОМ})}{(1-p_K \cdot s_{НОМ})} \right]^2}} = 165,3 \text{ А.} \quad (2.18)$$

За визначеними значеннями струмів визначимо величину критичного ковзання:

$$s_K = s_{HOM} \cdot \frac{K_M + \sqrt{K_M^2 - [1 - 2 \cdot s_{HOM} \cdot \beta(K_M - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_{HOM} \cdot \beta(K_M - 1)} = 0,088, \quad (2.19)$$

де  $\beta = \frac{R_1}{C_1 R_2}$ , – коефіцієнт, що характеризує співвідношення між активними

опорами статорної та роторної обмоток. Згідно [53] його значення може варіюватись в досить широких межах  $0,6 < \beta < 2,5$ . В нашому випадку при визначенні  $s_K$  приймаємо  $\beta = 1$ , а його остаточне значення, згідно обраної методики, встановлюємо шляхом вирішення наступного рівняння:

$$\beta^2 + B\beta + C = 0. \quad (2.20)$$

У виразі (2.20)  $B$  та  $C$  деякі коефіцієнти, які визначаються наступним чином:

$$B = \frac{1}{s_{HOM}} + \frac{1}{s_K} - \frac{2A_0A_1}{s_{HOM}} = 54,906, \quad (2.21)$$

$$C = \frac{1}{s_{HOM}s_K} - A_0A_1 \left( \frac{1}{s_{HOM}^2} + \frac{1}{s_K^2} \right) = -34,935, \quad (2.22)$$

$$A_0 = \frac{(I_{1HOM} \cos \varphi_{HOM} - I_0 \cos \varphi_0)}{U_\Phi} = 0,354, \quad (2.23)$$

$$A_1 = \frac{mU_\Phi^2(1 - s_{HOM})}{2C_1K_MP_{HOM}} = 0,49, \quad (2.24)$$

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2K_i I_{1HOM}} = 1,027. \quad (2.25)$$

Визначення перерахованих вище коефіцієнтів з урахуванням (2.20) дозволяє остаточно визначити значення коефіцієнту  $\beta$ :  $\beta = 0,629$ .

Використовуючи встановлене значення коефіцієнту співвідношення опорів остаточно визначимо шукані значення параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна СТА1200У1:

$$R_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = 0,04 \text{ Ом}. \quad (2.26)$$

$$R_1 = C_1 R_2 \beta = 0,026 \text{ Ом}. \quad (2.27)$$

$$X_1 = 0,42 X_H = 0,195 \text{ Ом}. \quad (2.28)$$

$$X_2' = 0,58 \frac{X_H}{C_1} = 0,262 \text{ Ом}. \quad (2.29)$$

$$X_\mu = \frac{\sqrt{\left(U_\phi \cos \varphi_{HOM} - R_1 I_{1HOM}\right)^2 + \left[U_\phi \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi_{HOM})^2} - X_1 I_{1HOM}\right]^2}}{I_0} = 6,237 \text{ Ом}. \quad (2.30)$$

У виразах (2.28), (2.29)  $X_H = \gamma C_1 R_2 = 0,464 \text{ Ом}$ , де:

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_K}\right) - \beta^2} = 11,371. \quad (2.31)$$

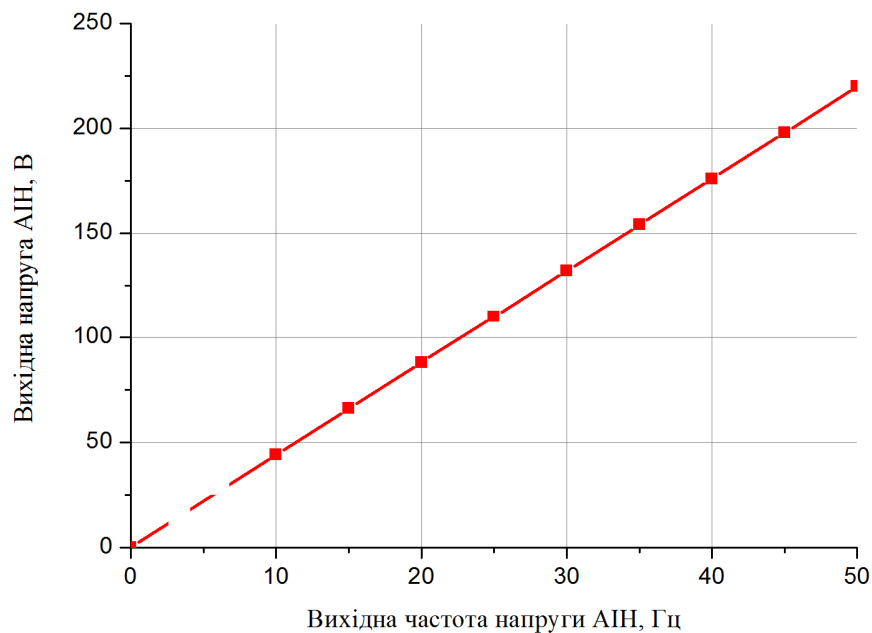
Узагальнені значення параметрів схем заміщення двигунів великої та малої потужностей наведено у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12

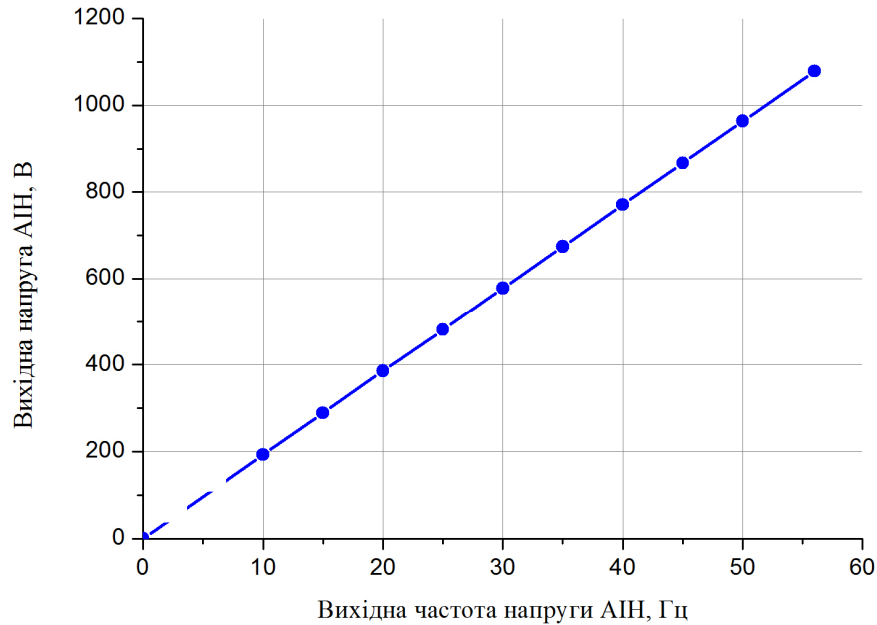
Значення параметрів схем заміщення двигунів АИР71А2 та СТА1200У1

Тип двигуна	Параметр				
	$R_1$ , Ом	$R_2'$ , Ом	$X_1$ , Ом	$X_2'$ , Ом	$X_\mu$ , Ом
АИР71А2	0,12	0,064	0,052	0,077	2,6
СТА1200У1	0,026	0,04	0,195	0,262	6,237

Отримані параметри дозволяють визначити значення  $M_{KP}$  та, відповідно, встановити шукані величини вихідних напруг АІН  $U_{1B}$  та  $U_{1M}$  для будь яких значень вихідної частоти останніх користуючись виразами (2.12-2.15). Результати розрахунку у вигляді вольт-частотних характеристик наведено нижче (рис. 2.18).



а)



б)

Рисунок 2.18 – Вольт-частотні характеристики керування двигунами

На рис. 2.18:

- а) – ВЧХ керування двигуном АІР71А2;
- б) – ВЧХ керування двигуном СТА1200У1.

Проведені розрахунки дозволяють остаточно визначити числові значення масштабних відношень між струмами реальної системи та моделі. Для перевірки можливості точного визначення вхідного струму реальної системи проведемо розрахунок останнього для номінального режиму руху ЕРС.

В номінальному тривалому режимі руху швидкість локомотива відповідає номінальній частоті обертання ТЕД. Оскільки в дисертаційній роботі прийнято, що в якості останніх на модельованому ЕРС постійного струму встановлено двигуни типу СТА1200У1, двигуни електровозу змінного струму ДСЗ, в якості швидкості номінального тривалого режиму приймемо 62,7 км/год (рис. 2.3). Цій швидкості відповідає частота обертання 1138 об/хв [53]. Оскільки двигуни моделі та оригіналу мають різну кількість пар полюсів (відповідно 1 та 3) частоти вихідної напруги для живлення ТЕД будуть різними:

$$- \text{ для СТА1200У1 } f = \frac{pn}{60} = \frac{3 \cdot 1138}{60} = 56,9 \approx 57 \text{ Гц};$$

$$- \text{ для АИР71А2 } f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 1138}{60} = 18,9 \approx 19 \text{ Гц};$$

Вказаним частотам відповідає своя напруга живлення ТЕД (рис. 2.18) – 1079 В для двигуна СТА1200У1 та 90 В для двигуна АИР71А2.

За номінальної швидкості двигун СТА1200У1 розвиває номінальну потужність 1200 кВт, що відповідає номінальному струму 450 А (рис. 2.15). Очевидно, що в даному випадку потужність, що реалізується двигуном АИР71А2 не буде номінальною, оскільки оберти двигуна становлять 1138 об/хв замість 3000 об/хв, а напруга живлення 90 В замість 220 В. За цих умов, оскільки двигун АИР71А2 працює за умови реалізації перетворювачем частоти закону  $U / f = const$  (сталості моменту), його потужність буде визначатись як:

$$\frac{P'_{2M}}{P_{2M\_НОМ}} = \frac{M' \cdot \omega'}{M_{НОМ} \cdot \omega_{НОМ}} = \frac{\frac{M' \pi n'}{30}}{\frac{M_{НОМ} \pi n_{НОМ}}{30}} = \frac{M' n'}{M_{НОМ} n_{НОМ}}, \quad (2.32)$$

де  $n' = 1138$  об/хв.

З урахуванням останнього, прийнявши, що  $M' = M_{НОМ} = const$ :

$$P'_{2M} = \frac{1138}{3000} P_{2M\_НОМ} = 0,38 P_{2M\_НОМ} = 0,38 \cdot 750 = 285 \text{ Вт}. \quad (2.33)$$

За даної реалізованої потужності, відповідно до залежності  $I_1 = f(P_2)$  (рис. 2.15), струм, що споживається двигуном АИР71А2 становить 2,1 А. Коефіцієнти потужності двигунів (рис. 2.16, 2.17) відповідно становлять 0,65 для двигуна малої потужності та 0,86 для тягового двигуна СТА1200У1.

Враховуючи всі наведені значення проміжних розрахункових величин реальне значення струму, відповідно до (2.11), буде становити:

$$I_{1OP} = \frac{1079 \cdot 450 \cdot 0,86}{90 \cdot 2,1 \cdot 0,65} \cdot \frac{220 \cdot I_{1МОД}}{3300} = 226,6 I_{1МОД}, \quad (2.34)$$

В даному випадку отриманий розрахунковий коефіцієнт дозволяє визначати шуканий вхідний струм реальної системи з відтворенням реальної лінійної швидкості руху ЕРС за рахунок вибору однакової частоти обертання ротора ТЕД. При цьому рівність частот вихідної напруги не враховується. В той же час не слід забувати, що дослідження ЕМС передбачає, в першу чергу, аналіз генерованого спектру гармонік, який, згідно до аналогічних досліджень для мережі змінного струму [79], формується в залежності від значення частоти вихідної напруги та частоти модуляції. З урахуванням цього в роботі при відтворенні швидкості руху доцільно замість відтворення однакових частот обертання ТЕД здійснювати відтворення однакових частот вихідної напруги. За таких умов, очевидно, значення вхідного струму, отримане у результаті перерахунку буде значно меншим:

$$I_{1OP} = \frac{1079 \cdot 450 \cdot 0,86}{220 \cdot 2,4 \cdot 0,87} \cdot \frac{220 \cdot I_{1МОД}}{3300} = 60,6 I_{1МОД}. \quad (2.35)$$

З урахуванням вказаного вище, щодо відтворення частот вихідної напруги, останній вираз і будемо використовувати для отримання приведених значень вхідного струму [80].

Отримані розрахункові співвідношення є справедливими лише за умови руху ЕРС по номінальній тяговій характеристиці, зі споживанням однакового струму у 450 А за умови зміни швидкості, відповідно до ділянки 4 профілю руху, що розглядається. При цьому, як показали попередні розрахунки, дану ділянку за заданої маси поїзду можливо подолати з меншою силою тяги за

тієї ж швидкості (табл. 2.9). Проведемо аналіз можливості експериментального відтворення такого режиму ведення.

В загальному випадку на етапі розгону до розрахункової швидкості регулювання частоти обертів ротора ТЕД здійснюється, як вже неодноразово вказувалось, за умови реалізації закону частотного керування  $U / f = U_{НОМ} / f_{НОМ} = const$ , що відповідає умові підтримання сталого  $M_{КР}$ , який відповідає заданому (обраному) тяговому зусиллю  $F$ . При чому відношення  $U_{НОМ} / f_{НОМ}$  є сталим лише для конкретного значення сили тяги, а відповідно і  $M_{КР}$  – критичного моменту ТЕД. Таким чином, у відповідності до виразу (2.5) потужність що реалізується ТЕД за однієї і тієї ж швидкості руху (а відповідно і частоти) буде змінюватись, провокуючи тим самим і зміну напруги живлення ТЕД. В цьому випадку використовувати наведені вольт-частотні характеристики (рис. 2.18) для визначення вихідних напруг АІН  $U_{1В}$  та  $U_{1М}$ , що входять до складу виразу (2.11), неможливо, адже їх побудова здійснена лише для одного, номінального, значення  $M_{КР}$ , що відповідає реалізації номінальної сили тяги. Вирішити цю проблему можливо шляхом побудови додаткових ВЧХ для значень  $M_{КР}$ , що відповідають різним значенням тягових зусиль  $F$ , проте технічно (в умовах експериментального дослідження) таку реалізацію здійснити досить складно. Так, оскільки кожному значенню  $M_{КР}$  відповідає своє співвідношення  $U_{НОМ} / f_{НОМ}$  у складі майбутньої експериментальної установки необхідно мати двигун спеціального виконання у якому б за одного і того ж значення номінальної напруги можливо встановити декілька значень номінальної вихідної частоти. За використання стандартного двигуна, на прикладі АІР71А2 можливо відтворити в повній мірі та в усьому діапазоні швидкостей лише номінальні характеристики – тягову, струмову, вольт-частотну тощо. Це і визначає обмеження поточних досліджень.

Встановлення масштабних відношень, у сукупності з попереднім визначенням критеріїв подібності дозволяє остаточно стверджувати, що розглянуті системи, з урахуванням прийнятих припущень та в певному обмеженні параметрів, є подібними. Такий висновок підтверджує можливість створення фізичної моделі відповідно до розглянутої схеми (рис. 2.9), а також отримання з її допомогою адекватних результатів подальших досліджень.

## 2.6 Висновки до другого розділу

За результатами проведеного аналізу та відповідних розрахунків у другому розділі дисертаційної роботи:

- отримано структурну схему, що є основою експериментальної установки для дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на показники ЕМС з системами СЦБ;

- запропоновано удосконалену методику визначення масштабних відношень для нелінійних систем, які мають у своїй структурі однакові складові, але різні граничні параметри, тобто є завідома подібними;

- теоретично встановлено можливі режими роботи реальної системи та на їх основі визначено діапазони вхідних параметрів експериментальної установки, реалізація яких є основою проведення експериментального дослідження.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

### 3.1 Опис експериментальної установки

Відповідно до попередньо встановлених задач, а також розробленої структурної схеми (рис. 2.11) було створено експериментальну установку, що імітує роботу ЕРС постійного струму з АТЕП [81, 82], принципову електричну схему якої наведено на рис. 3.1. Загальний вигляд установки наведено на рис. 3.2.

Основу експериментальної установки складають статичний перетворювач частоти та асинхронний двигун, функціональне призначення яких – забезпечення створення необхідного тягового зусилля, а відповідно і виконання першої з визначених вище задач. В якості статичного перетворювача частоти обрано модель Hitachi SJ100-NFE [87]. Такий вибір пояснюється відносно невеликою вартістю, у порівнянні з перетворювачем аналогічної потужності ATV61H075M3 від Schneider Electric та більш високою надійністю, у порівнянні з перетворювачами компанії INVT [63, 64].

Головною особливістю будь якого сучасного промислового перетворювача частоти є можливість регулювання широкого спектру параметрів та реалізація різних законів частотного керування, в тому числі векторного керування. В нашому випадку ключовим змінним параметром, що визначає хід проведення подальших досліджень є частота модуляції вихідної напруги, яка на сьогоднішній день, для даних пристроїв, може змінюватись в досить широких межах – від 0,5 до 16 кГц.

Даний параметр є визначним при оцінці показників ЕМС адже від нього залежить якість вихідної напруги та струму, що живлять асинхронний двигун (рис. 3.3), а отже і спектр генерованих перешкод.

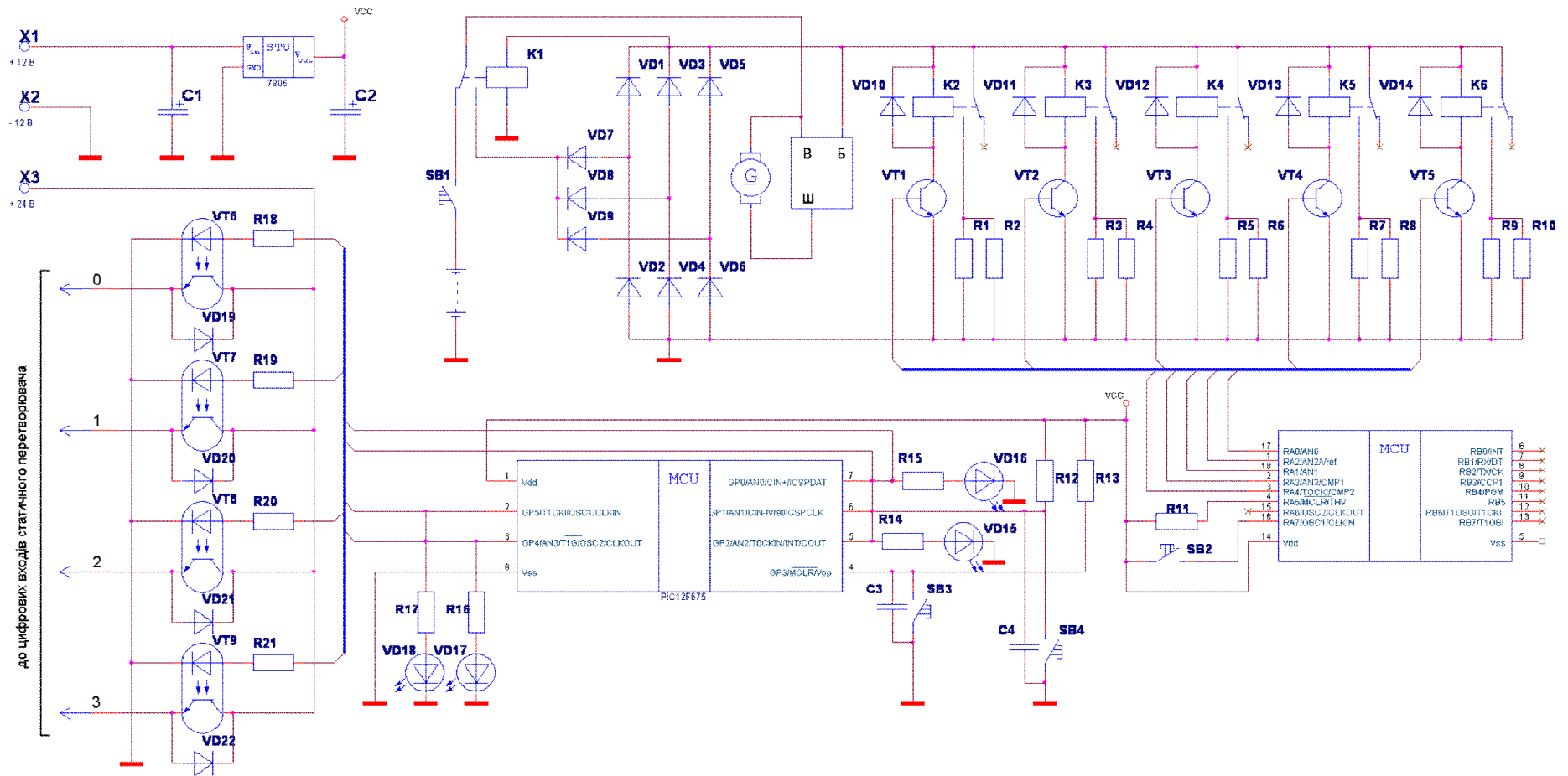


Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема створеної експериментальної установки

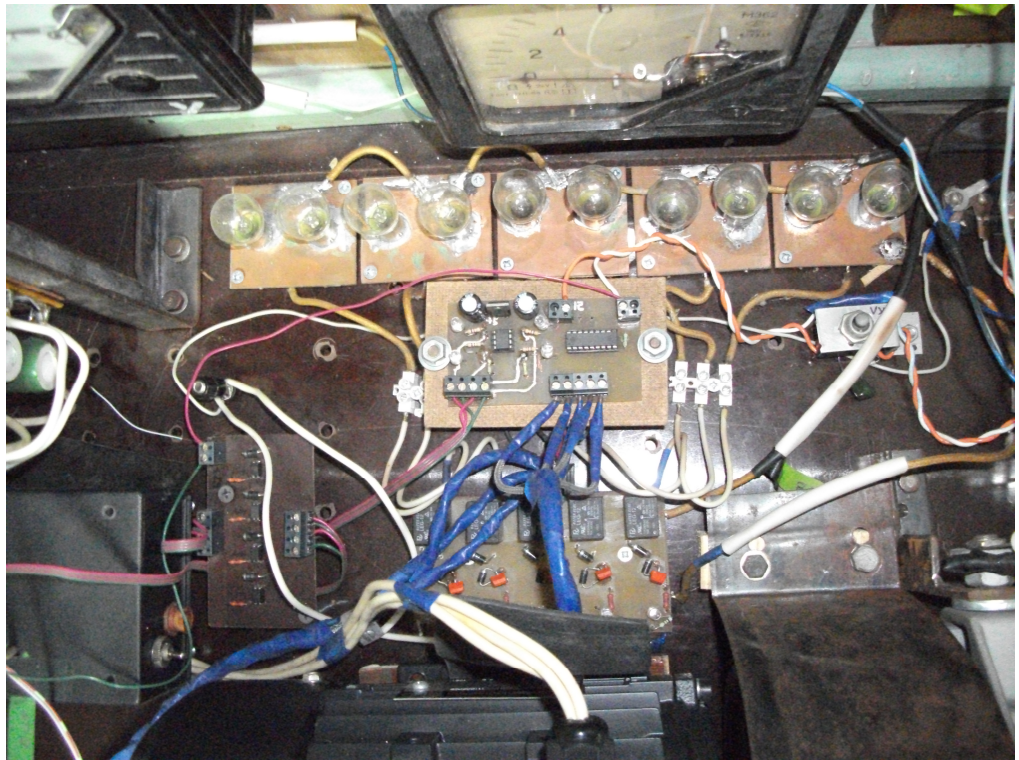
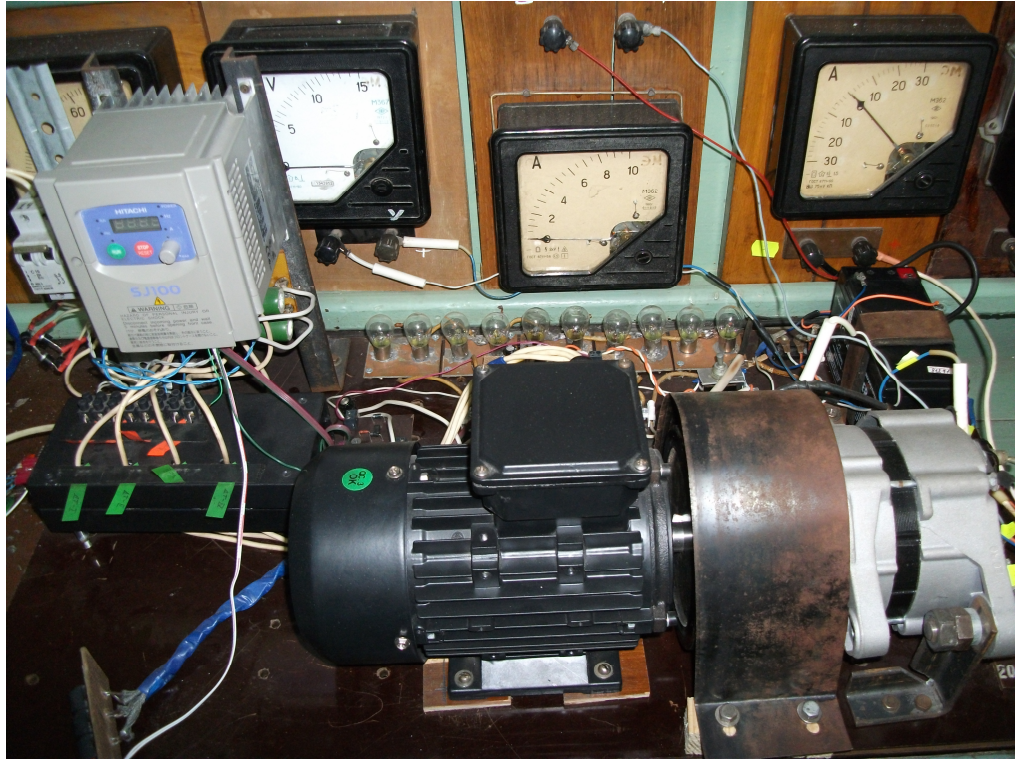
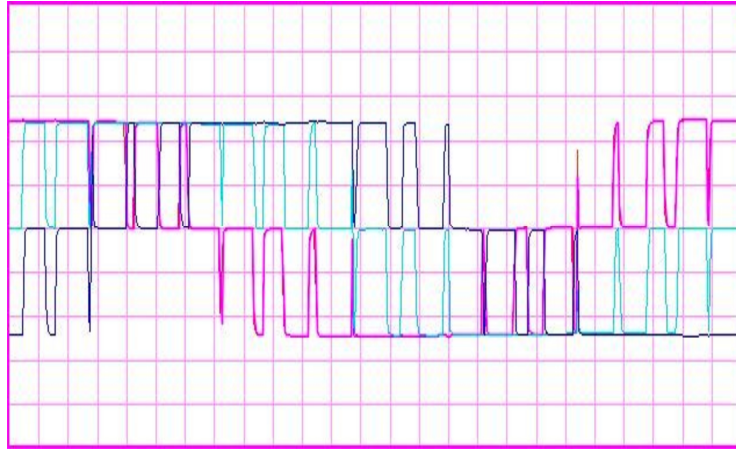
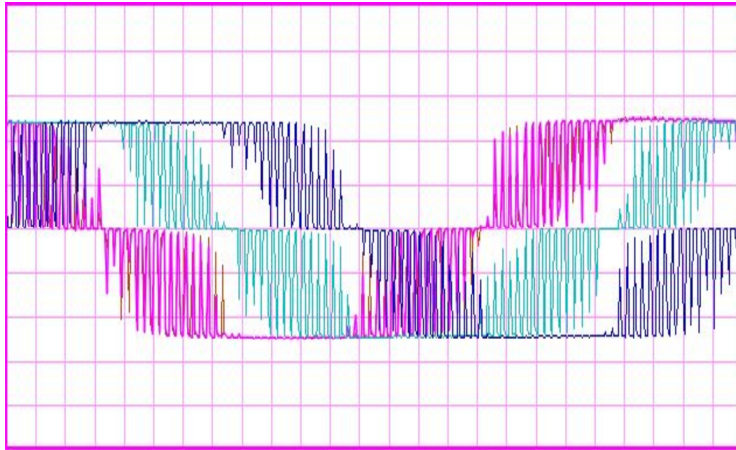


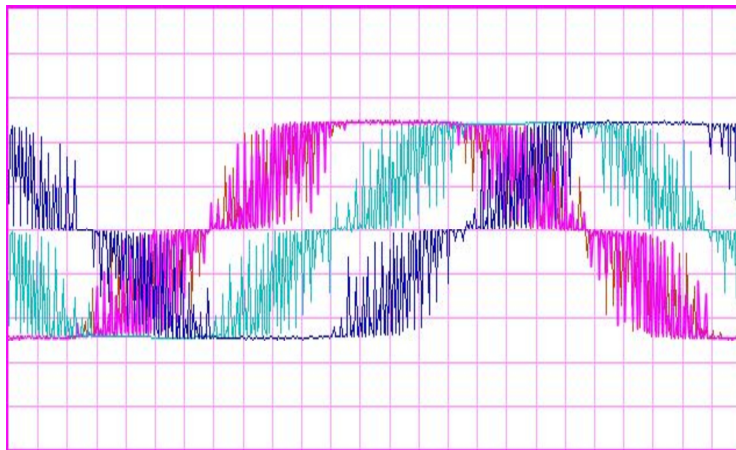
Рисунок 3.2 – Загальний вигляд експериментальної установки



а)



б)



в)

Рисунок 3.3 – Осцилограми зміни вихідної напруги ПЧ за різних частот модуляції: а – 1 кГц; б – 5 кГц; в – 10 кГц

Окремо варто відмітити можливість реалізації даними пристроями режимів рекуперативного та динамічного гальмування. Така їх особливість дозволяє, в процесі моделювання, в повній мірі реалізувати режими гальмування ЕРС та оцінити характер електромагнітних процесів, що супроводжують даний режим.

Загалом, серія SJ100 перетворювачів частоти фірми Hitachi призначена для регулювання швидкості асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором потужністю 0,2...4,0 кВт. В нашому випадку використовується перетворювач типу SJ100-007NFE. Дана модель дозволяє регулювати швидкість асинхронних двигунів потужністю до 0,75 кВт при максимальній струмовій навантаженості двигуна до 4 А [62]. При цьому контроль за зміною швидкості здійснюється за допомогою вбудованого до ПЧ енкодера, який змінює частоту вихідних імпульсів зі зміною частоти обертання ротора (рис. 3.4).

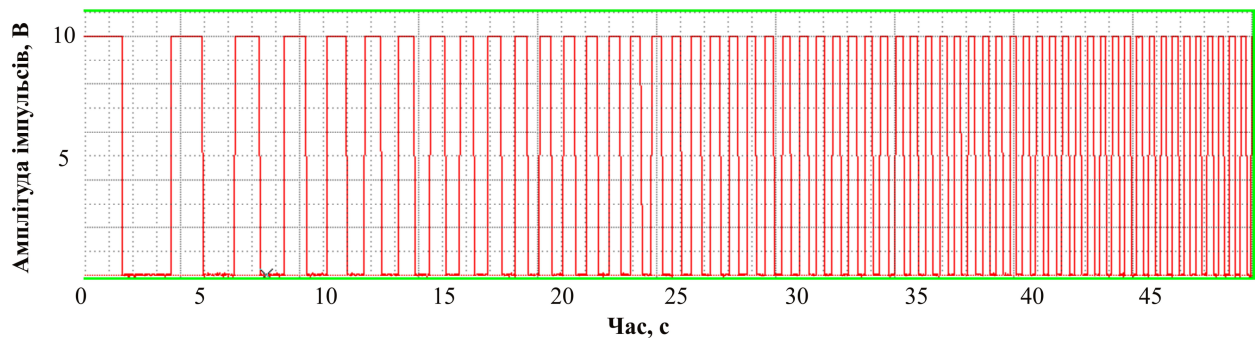


Рисунок 3.4 – Осцилограма вихідного сигналу енкодера

Hitachi SJ100-007NFE обладнаний низкою релейних, аналогових та цифрових входів, що дозволяє використовувати систему зворотного зв'язку для здійснення керування роботою перетворювача та всієї системи в цілому. Тим самим створюється можливість для реалізації задачі здійснення процесу керування ЕРС контролером машиніста.

З урахуванням параметрів перетворювача в якості асинхронного двигуна, що під'єднаний до його вихідних клем обрано модель типу АІР71А2 [83] потужністю 750 Вт, з номінальною частотою обертів ротора 2820 об/хв. Такий вибір дозволяє повною мірою охопити діапазон можливих навантажень, а отже отримати більш широкий спектр даних.

В ході розробки моделі постало питання реалізації необхідного моменту опору. В реальних умовах експлуатації ЕРС опір електромагнітному моменту, що розвивається тяговим двигуном, здійснюється через систему сил опору руху, в тому числі сил тертя кочення. При цьому зміна сил опору призводить до зміни величини моменту опору, що діє на валу двигуна. Це є причиною відповідної зміни електромагнітного моменту  $i$ , як наслідок, зміни споживаного електродвигуном струму. Даний факт є основою реалізації процесу повторення опору руху ЕРС, що діє в реальних умовах.

Його реалізацію, виконано з використанням генератору типу 37.3701 [84], що встановлений на вал обраного асинхронного двигуна. Такий вибір, на відміну від традиційної системи [85], обумовлений можливістю реалізації значного струмового навантаження останнього (до 55 А) а відповідно і досягнення максимального моменту опору асинхронного двигуна. При цьому генератор постійного струму, який дозволив би реалізувати навантаження такого порядку, наприклад 2ПН112МУХЛ4 [83], є більшим за габаритними розмірами, а тому вимагає застосування додаткової системи передач.

Генератор типу 37.3701 являє собою трифазну синхронну машину з вбудованим блоком випрямляча та електронним регулятором напруги. Наявність останнього дозволяє підтримувати постійність напруги на виході, а відповідно і струмову завантаженість всієї системи, що є додатковою перевагою у порівнянні з машиною постійного струму.

Збудження генератора, в момент запуску виконується шляхом короткочасного під'єднання акумуляторної батареї до клеми «В» електронного регулятора напруги через кнопку SB1. Після досягнення

номінальної частоти обертання обмотка збудження відключається від батареї за допомогою електромагнітного реле К1, і живиться напругою генератора від трьох додаткових діодів VD7...VD9. При цьому керування регулятором здійснюється через вивід «Б», підключений до «плюсової» клеми вихідної напруги генератора «30» [84]. Згаданий вище вбудований блок випрямляча реалізований на діодах VD1...VD6 та являє собою трифазну мостову схему випрямлення.

Для створення струмового навантаження генератора та відповідного гальмівного моменту на валу асинхронного двигуна до складу структури даної системи введено блок навантажень, основу якого складають пасивні електричні елементи. В нашому випадку в якості останніх використано лампи розжарювання потужністю 20 Вт, об'єднані в паралельні гілки з однаковим струмовим навантаженням. Кожна з паралельних гілок містить коло комутації, реалізоване на електромагнітних реле К2...К6, що дозволяє реалізувати динаміку зміни навантаження генератора, а відповідно і всієї системи. Приклад зміни струму навантаження генератора наведено на рис. 3.5.

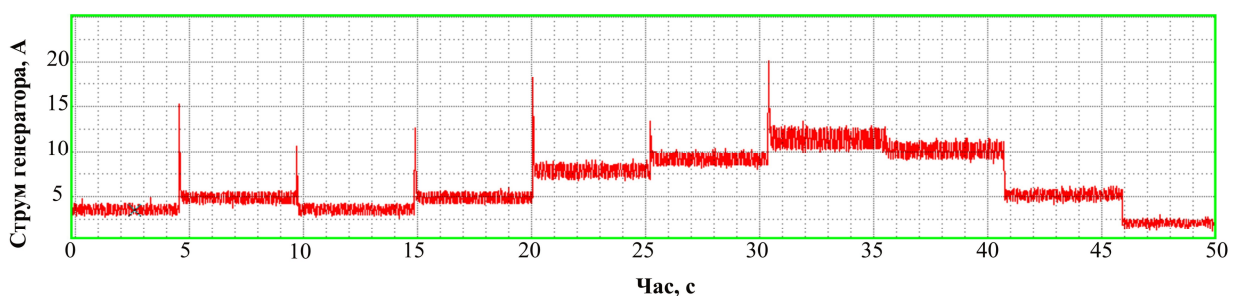


Рисунок 3.5 – Осцилограми зміни струму навантаження генератора

Керування послідовністю ввімкнення реле здійснюється додатковою системою керування, реалізованою на транзисторах VT1...VT5 та мікроконтролері серії PIC16F628 [86]. Узагальнений алгоритм роботи останнього наведено на рис. 3.6.

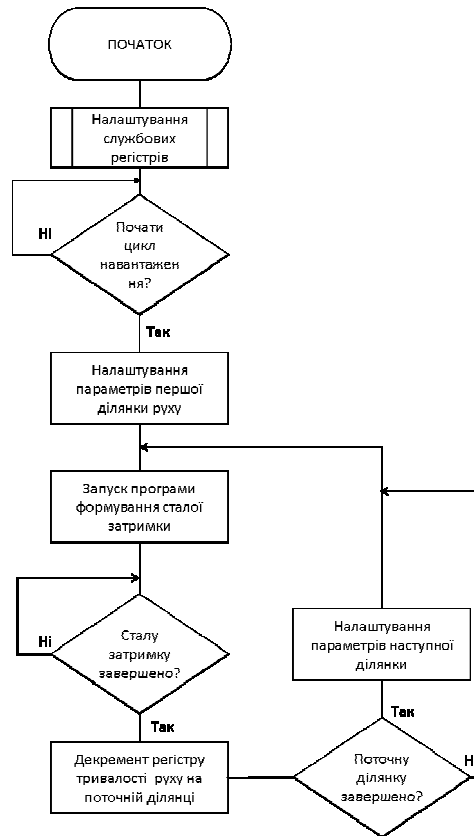


Рисунок 3.6 – Алгоритм роботи системи керування блоком навантаження

Використання транзисторів, що працюють в ключовому режимі, ввімкнених в коло котушки керування реле обумовлено відносно низькою струмопропускною здатністю виводів мікроконтролера. Так максимальна величина струму порту вводу/виводу становить лише 25 мА [86], у той час як струм, що протікає через котушку реле – 35 мА.

Для реалізації імітації процесу зміни швидкості руху контролером машиніста в умовах динамічної зміни навантаження до складу створеної установки введено окрему систему, в основі роботи якої лежить використання, як і у попередньому випадку, мікропроцесорної системи керування. В даному випадку її реалізація здійснена на мікроконтролері серії PIC12F675 [87], алгоритм роботи якого наведено на рис. 3.7.

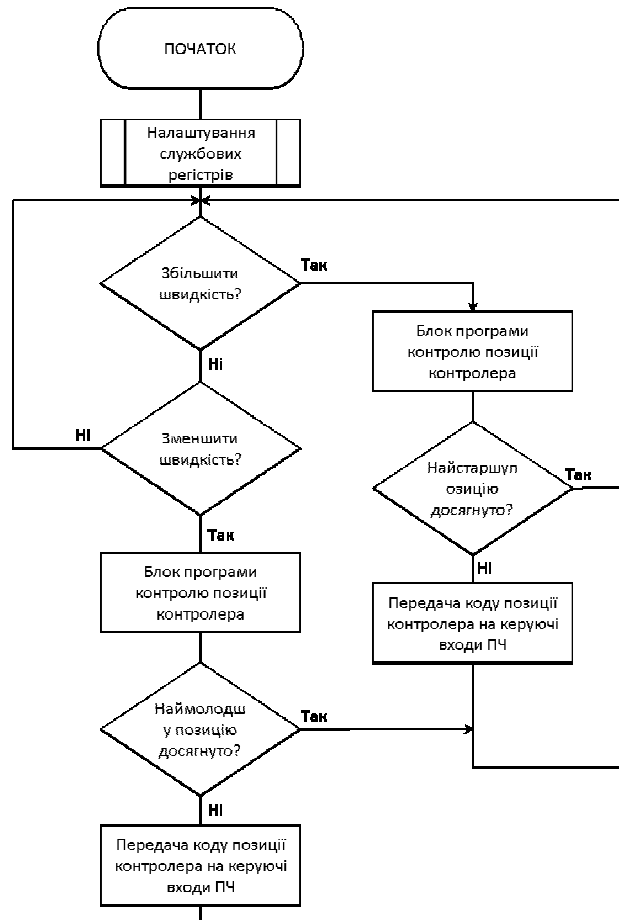


Рисунок 3.7 – Алгоритм роботи системи керування Блоком 3

Вибір мікроконтролера молодшого сімейства обумовлено необхідністю реалізації вузького кола задач – передачі стану порту вводу/виводу на керуючі входи перетворювача частоти, без використання додаткових апаратних засобів (таймерів, аналого-цифрових перетворювачів тощо). При цьому максимальна довжина коду керування, відповідно до функціональних можливостей перетворювача частоти [62], складає 4 біти двійкового коду, в той час як гранична можливість контролера становить 6 бітів. Це вказує на відсутність необхідності використання контролерів більш старшого сімейства з більшою розрядністю портів вводу/виводу.

Додатково до складу даної системи введено мережу оптоелектронної розв'язки. Таке рішення забезпечує надійну узгодженість роботи різноманітних оптоелектронних кіл, сприяє реалізації односторонньої

передачі сигналів та, що найголовніше, забезпечує високу стійкість до впливу перешкод [88], що в умовах роботи статичних перетворювачів будь якої потужності є актуальним.

З метою практичної перевірки відповідності створеної експериментальної установки визначеним до неї вимогам здійснено візуалізацію процесів, що супроводжують її функціонування, шляхом її запуску та контролю відповідних параметрів. В результаті цього отримано осцилограму зміни струму системи в умовах динамічної зміни навантаження (рис. 3.8).

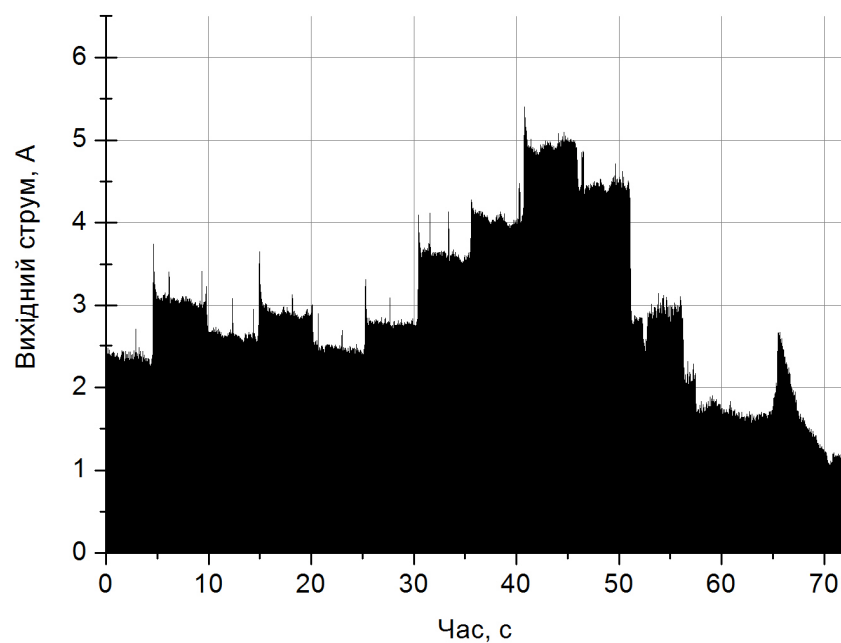


Рисунок 3.8 – Осцилограма зміни струму системи

Наведена осцилограма підтверджує можливість експериментальної реалізації динаміки функціонування ЕРС, а отже створена експериментальна установка цілком може бути застосована для подальших досліджень.

### 3.2. Фактори та загальні умови експериментального дослідження

Безпосереднє виконання експериментального дослідження з використанням створених моделей досліджуваних систем є ключовим етапом

досліджень. При цьому правильне планування експерименту, з точки зору його раціональності, дозволяє встановити раціональний час його проведення, зменшити можливі похибки, отримати оптимальну кількість даних для отримання тих чи інших закономірностей та досягти максимального контролю за зовнішніми та внутрішніми впливами [89-92].

Згідно [89] планування експерименту – комплекс дій направлених на ефективну постановку дослідів, що передбачає виконання наступної послідовності етапів:

- встановлення мети експерименту;
- встановлення умов проведення експерименту – визначення переліку необхідного обладнання, вибір виду випробувань тощо;
- виявлення та вибір вхідних та вихідних параметрів;
- встановлення необхідної точності результатів вимірів;
- формування плану та безпосереднє проведення експерименту – визначення кількості та порядку випробувань, способу реєстрації даних тощо;
- статистична обробка результатів експерименту;
- аналіз та розробка рекомендацій на основі отриманих результатів.

Серед представленого ряду задач, найскладнішою є формування плану та безпосереднє проведення експерименту. Даний етап передбачає виконання наступного ряду завдань:

- визначення інтервалів відліку експериментальних даних;
- визначення необхідної кількості дослідів;
- безпосереднє проведення експерименту, шляхом врахування впливу всіх значущих факторів та умов функціонування досліджуваної системи.

Визначення кінцевої сукупності експериментальних точок є необхідним та важливим етапом планування експерименту. Існує два основних критерії, на основі яких здійснюється вибір експериментальних точок [90]:

– за відотною точністю даних на різних ділянках області досліджуваних значень. В багатьох випадках отримані дані мають неоднакову точність на різних ділянках області досліджуваних значень. В такому випадку кількість експериментальних точок, що викликає найбільший сумнів, збільшують, користуючись загальним правилом, що пов’язує підвищення точності з числом додаткових відліків [90] – 4 точки дають вдвічі більшу точність, а 9 – втричі більшу точність ніж одна;

– за характером експериментальної функції. В більшості інженерних експериментів характер експериментальної функції повністю або частково відомий. В таких випадках найбільш доцільно обрати план експерименту з однаковим інтервалом між експериментальними точками. Проте такий підхід не завжди себе виправдовує, особливо для процесів, характер яких змінюється протягом експерименту. В таких випадках прийнятним є розділення експериментальних функцій на ділянки з однаковою зміною значень даних функцій, з послідовним визначенням інтервалів відліку експериментальних даних.

Так, в загальному випадку, якщо  $\Delta S$  – ділянка експериментальної кривої, то для будь якої неперервної диференційованої функції загальний вираз для  $\Delta S$  має вигляд [90]:

$$\Delta S = \left[ 1 + \left( \frac{dY}{dX} \right)^2 \right]^{1/2} \Delta X. \quad (3.1)$$

З метою узагальненої оцінки характеру досліджуваних процесів здійснено їх попередній аналіз за різних варіацій параметрів моделі досліджуваної системи. В результаті отримано осцилограми зміни струму у вхідному контурі системи для випадків коли остання знаходиться у стані

спокою (рис. 3.10) або функціонує з відповідними налаштуваннями зі змінним навантаженням (рис. 3.11).

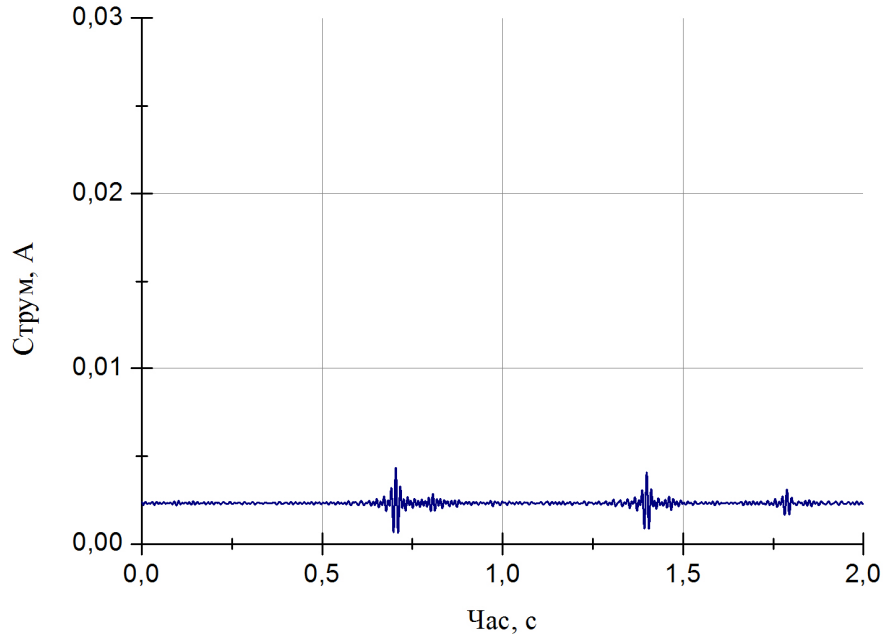


Рисунок 3.10 – Осцилограми зміни струму у вхідному контурі – система знаходиться у стані спокою

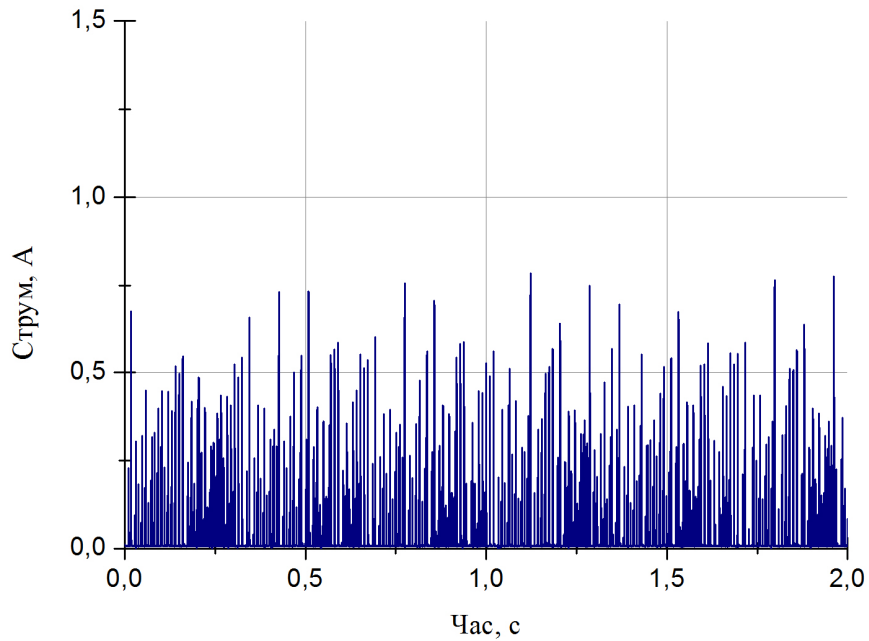


Рисунок 3.11 – Осцилограми зміни струму у вхідному контурі – система функціонує зі змінним навантаженням

Аналіз отриманих осцилограм не дозволяє дійти однозначних висновків щодо можливості використання одного з вказаних критеріїв вибору експериментальних точок, а тому пропонується використовувати загальноприйняте положення щодо розділення експериментальної функції на однакові інтервали точок відліку.

В загальному випадку оцінка впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП, не зважаючи на різні методи досліджень, здійснюється для двох окремих систем, що, відповідно до встановленого вище (розділ 1), характеризуються окремими критеріями оцінки ЕМС. З вказаного витікає, що й вибір однакових інтервалів відліку вихідних даних досліджень, для кожної з систем, варто обирати окремо.

З точки зору мережі зовнішнього електропостачання, дослідження якої буде проводитись за допомогою імітаційного моделювання, такий інтервал є визначеним. Згідно стандартної методики [40] необхідна періодичність реєстрації проміжних вихідних даних, коефіцієнтів  $K_{U_i}$  та  $K_{U(n)i}$ , становить не менше 9 значень останніх за кожні 3с спостережень, тобто 3 значення коефіцієнтів за 1с або 0,33с. Враховуючи, що загальний час визначення критеріїв ЕМС становить 24 години [40] загальна кількість експериментальних даних становить:

$$N = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_{ИТ}} = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60}{0,33} = 261818, \quad (3.2)$$

де  $t_1$  – кількість годин в одній добі,  $t_2$  – кількість хвилин в одній годині,  $t_3$  – кількість секунд в одній хвилині,  $t_{ИТ}$  – час визначення проміжних коефіцієнтів  $K_{U_i}$  та  $K_{U(n)i}$ .

Визначена кількість експериментальних даних є досить значною з точки зору їх подальшої обробки, що є неприйнятним згідно теорії раціонального планування експерименту [89, 90]. Встановлення раціональної кількості

експериментальних даних можливе за рахунок зміни інтервалу реєстрації проміжних вихідних даних та зменшення загального часу проведення експерименту шляхом встановлення раціональної кількості дослідів.

Оскільки дослідження ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання не є першочерговою задачею, вирішення якої передбачається здійснювати лише у першому наближенні шляхом виконання імітаційного моделювання, аналіз вихідних даних пропонується здійснювати комплексно – без розділення на часові діапазони. Інтервал реєстрації вихідних даних для оцінки ЕМС тягового перетворювача з системами СЦБ буде встановлено у подальшому, в процесі безпосереднього виконання експериментального дослідження та імітаційного моделювання відповідно.

Згідно теорії математичної статистики, кількість дослідів, які необхідно здійснити для отримання закономірності, що дозволяє найбільш повно охарактеризувати будь яке фізичне явище, становить [58, 89, 90]:

$$N = \sigma^k = 5^1 = 5, \quad (3.3)$$

де:  $\sigma$  – кількість експериментальних точок, які необхідно зняти для забезпечення достовірності дослідів;  $k=1$  – число величин, що підлягають зміні при проведенні дослідів. В нашому випадку такою величиною є частота модуляції вихідної напруги перетворювачем частоти ЕРС з АТЕП [4, 19, 20];  $\sigma = 5$  – мінімальна кількість експериментальних точок, що дозволяє забезпечити достовірність дослідів [58].

Здійснений аналіз умов проведення подальших експериментальних досліджень дозволяє остаточно визначити перелік необхідного обладнання, використання якого дозволить забезпечити максимальну повноту даних та точність результатів. Головним інструментом для виконання досліджень є створена експериментальна установка, що імітує роботу тягового

асинхронного електроприводу ЕРС постійного струму. Не зважаючи на необхідність контролю основних параметрів (струму та напруги у її вхідному контурі) існує можливість для здійснення додаткового аналізу процесів на проміжних ланках енергоперетворення. Даний факт, а також те, що проведення досліджень передбачає аналіз даних графічного характеру, вимагає використання поряд з пристроями безпосереднього контролю (амперметрів, вольтметрів) електронного осцилографу.

В якості такого пристрою пропонується використовувати модуль зчитування аналогових та цифрових даних ADA1406, багатоканальний 14-розрядний аналого-цифровий перетворювач якого дозволяє здійснювати обробку вхідних даних одночасно з 8 диференційних каналів або 16 каналів з загальною «землею» [93]. Це розширює можливості контролю, у разі потреби, додаткових параметрів, а можливість підключення до ПК через інтерфейс USB створює умови для прискорення обробки експериментальних даних. Варто зауважити, що функціональні можливості осцилографа не дозволяють здійснювати його безпосереднє підключення до силового кола, а тому в якості первинного джерела зчитування інформації додатково до контрольованих кіл під'єднано блок датчиків (рис. 3.12).

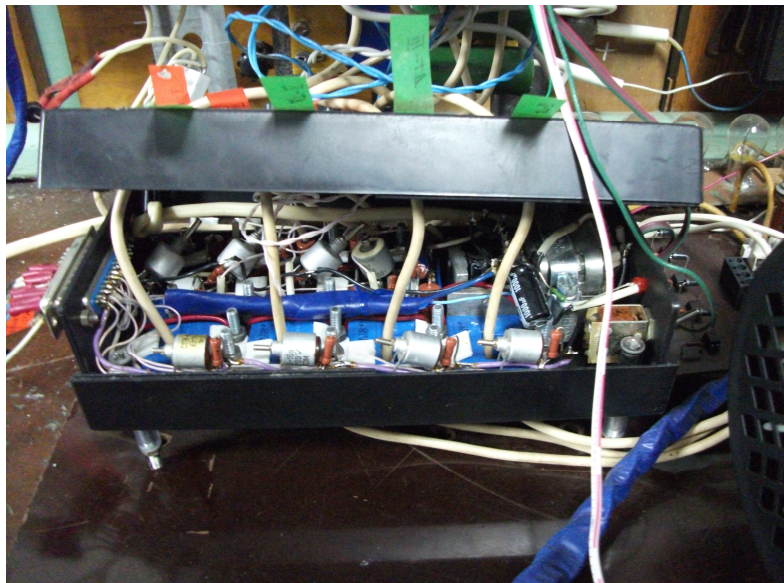


Рисунок 3.12 – Блок датчиків експериментальної установки

Даний блок містить у своєму складі датчики напруги (типу LV25-P) та струму (типу LA100-P), дію яких засновано на використанні ефекту Холла. Параметри датчиків наведено у [94].

### 3.3 Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на системи СЦБ

Відповідно до визначених методики та порядку реалізації експериментальних досліджень, проведемо дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на системи СЦБ [43]. Основу таких досліджень складає аналіз впливу частоти модуляції на спектр генерованих вищих гармонійних складових струму в умовах реалізації руху по визначеній ділянці профілю (табл. 2.9, розділ 2).

Технічні можливості створеної експериментальної установки дозволяють здійснювати зміну вказаного параметру в досить широких межах (0,5...16 кГц) з кроком в 0,1 кГц. При цьому, аналіз робочих параметрів тягових статичних перетворювачів сучасного ЕРС з АТЕП, як постійного так і змінного струму, дозволив встановити, що, не зважаючи на технічні можливості сучасних силових вентилів [20, 95], максимальна робоча частота модуляції останніх не перевищує значення 2 кГц та знаходиться в межах 0,45...2 кГц [65, 69]. Ці значення дозволяють внести відповідні обмеження у процес експериментального дослідження.

В якості прикладу оцінку впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму проведемо для значення 0,5 кГц за умов реалізації руху ЕРС по обраній ділянці (ділянка 4) кривої руху  $v = f(s)$ , побудованої за результатами тягового розрахунку (додаток Б). Дана ділянка характеризується постійним значенням споживаного струму 450 А, що відповідає номінальному струму двигуна АИР71А2 2,4 А, зміною швидкості руху ЕРС від 62 до 73 км/год (табл. 2.9), що у перерахунку на

частоту обертання ротора ТЕД становить 900-1050 об/хв та відповідає вихідній частоті напруги живлення 45-52,5 Гц. Тривалість руху по ділянці становить 78 с (додаток Б).

На рис. 3.13 наведено осцилограму зміни струму вхідного контуру експериментальної установки отриманої за умови реалізації останньою режиму руху ЕРС за вказаних вище умов. Попередній аналіз отриманої осцилограми, на наявність вищих гармонійних складових, дозволив отримати узагальнений спектр гармонік струму (рис. 3.14).

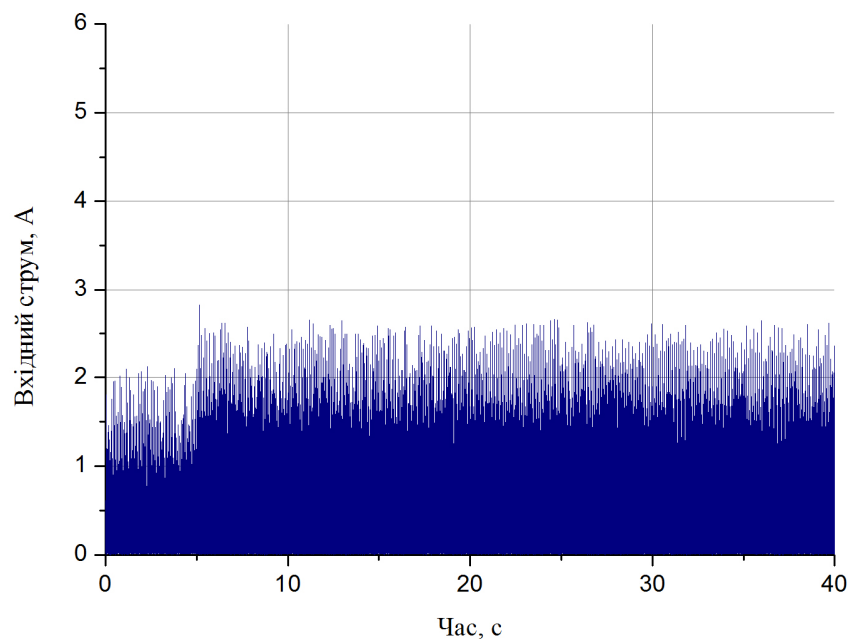


Рисунок 3.13 – Експериментальна осцилограма зміни струму вхідного контуру експериментальної установки

Отриманий спектр гармонійного розподілу не дозволяє зробити однозначних висновків щодо кондуктивного впливу перетворювача частоти на системи СЦБ через низку причин.

По-перше, аналіз отриманої осцилограми вхідного струму вказує на необхідність розділення останньої на ділянки з однаковим часовим інтервалом. В нашому випадку це передбачає виокремлення ділянок з

однаковою вихідною частотою напруги АІН, визначення яких потребує встановлення інтенсивності зміни останньої.

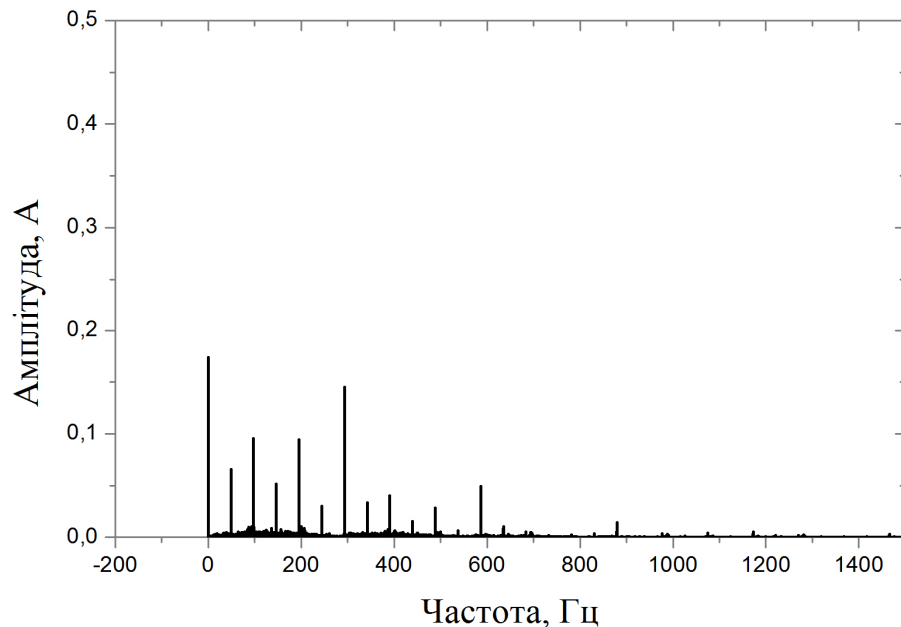


Рисунок 3.14 – Узагальнений спектр гармонік струму вхідного контуру експериментальної установки за частоти модуляції 0,5 кГц

В загальному випадку інтенсивність зміни вихідної частоти можливо визначити, як:

$$\varepsilon_P = \left| \frac{f_{\text{ПОЧ}} - f_{\text{КІН}}}{t_P} \right|. \quad (3.4)$$

У виразі (3.4):

$f_{\text{ПОЧ}}$ ,  $f_{\text{КІН}}$  – відповідно значення вихідних частот АІН на початку та в кінці ділянки руху;

$t_P$  – час руху по ділянці.

В умовах експериментального дослідження розгляд процесу руху ЕРС було обмежено ділянкою 4 профілю руху (додаток Б) параметри якої приймаємо в якості базових. З цієї точки зору для остаточного визначення

шуканого значення  $\varepsilon_P$  необхідним є встановлення значень вихідних частот АІН  $f_{Поч}$  та  $f_{Кін}$ . Приймаючи до уваги, що в загальному випадку, залежності між швидкістю обертання ротора ТЕД, вихідною частотою напруги АІН, а також лінійною швидкістю руху ЕРС є лінійними (рис. 2.2) [75], а максимальному значенню частоти вихідної напруги відповідає максимальне значення лінійної швидкості руху (120 км/год відповідає 146,5 Гц) отримаємо:

$$\varepsilon_P = \left| \frac{f_{Поч} - f_{Кін}}{t_P} \right| = \left| \frac{45 - 52,5}{78} \right| = 0,096 \text{ Гц/с.} \quad (3.5)$$

Отримане значення  $\varepsilon_P$  відповідає зміні частоти вихідної напруги на 1 Гц кожні 10,42 с. що і визначає тривалість однієї досліджуваної ділянки.

По-друге, наведені значення амплітуд потребують масштабного перерахунку. З урахуванням методики, наведеної у розділі 2, алгоритм такого перерахунку є наступним:

1. Використовуючи струмову характеристику встановлюємо значення споживаного ТЕД струму виходячи з діапазону зміни швидкостей для даної конкретної ділянки руху ЕРС.

2. Користуючись рівняннями апроксимації (вирази 2.6, 2.7, розділ 2) встановлюємо значення споживаного струму електродвигуна експериментальної установки, що відповідає реальному струму ТЕД.

3. Знаючи величини споживаного струму обох систем визначаємо відносні значення потужностей, що реалізуються двигунами, за якими встановлюємо значення коефіцієнтів потужності  $\cos \varphi_{1B}(P_{2B})$  та  $\cos \varphi_{1M}(P_{2M})$  (рис. 2.16, 2.17, розділ 2).

4. Враховуючи діапазон зміни швидкості руху ЕРС на даній конкретній ділянці встановлюємо діапазони зміни частоти обертання ТЕД та

електродвигуна моделі, відповідно до якого визначаємо значення вихідних частот напруги АІН.

5. Користуючись вольт-частотними характеристиками керування двигунами (рис. 2.18) визначаємо значення вихідної напруги АІН для кожної з систем.

6. Використовуючи вираз (2.11, розділ 2) з урахуванням коефіцієнту невідповідності  $K_{HB}$  остаточно встановлюємо шукане значення вхідного струму.

В якості прикладу застосування наведеного алгоритму проведемо розрахунок значення реального струму системи для початкової точки 4-ї ділянки профілю руху ЕРС. Для даної точки початкове значення швидкості руху становить 62 км/год, що відповідає значенню споживаного ТЕД струму, з урахуванням обмежень експерименту, становить 450 А. У перерахунку на струм двигуна експериментальної установки це значення становить 2,4 А. За даних струмів обидва двигуна працюють з номінальною потужністю, а отже коефіцієнти потужності відповідно дорівнюють:  $\cos \varphi_{1B}(P_{2B}) = 0,86$ ;  $\cos \varphi_{1M}(P_{2M}) = 0,87$ . Швидкості 62 км/год відповідає частота обертання ротора ТЕД 900 об/хв (рис. 2.2), що визначає частоту вихідної напруги АІН на рівні 45 Гц. Оскільки, за прийнятими умовами дослідження, вихідні частоти АІН обох систем приймаються однаковими значення вихідних напруг останніх відповідно становлять: для реальної системи – 920 В; для експериментальної установки – 215 В. Значення повного струму експериментальної установки (відповідно до рис. 3.13) приймаємо на рівні 1,8 А. Крім останнього варто зазначити, що визначений діапазон зміни частоти живлячої напруги (45-52,5 Гц) є допустимим для двигуна серії АІР [96], а тому може бути відтвореним створенною експериментальною установкою.

З урахуванням наведених даних остаточно значення  $I_{1OP}$  становить:

$$I_{1OP} = \frac{920 \cdot 450 \cdot 0,86}{215 \cdot 2,4 \cdot 0,87} \cdot \frac{220 \cdot 1,8}{3300} = 95 \text{ A.} \quad (3.6)$$

З урахуванням масштабності узагальнений гармонійний аналіз отриманої осцилограми наведено на рис. 3.15.

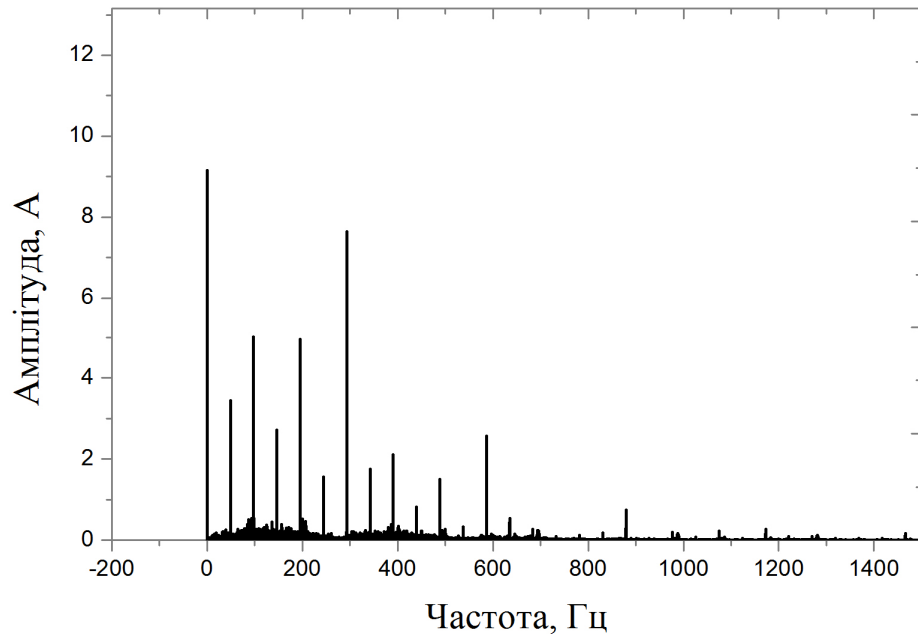


Рисунок 3.15 – Узагальнений гармонійний аналіз осцилограми струму з урахуванням масштабності

З урахуванням отриманого значення інтенсивності зміни вихідної частоти АН проаналізуємо більш детально перший з часових діапазонів (5-15с) осцилограми зміни струму системи, що розглядається (рис. 3.13). В даному випадку початок часового діапазону відрізняється від нульового значення та становить 5с, що дозволяє відділити від процесу дослідження ділянку осцилограми зі струмом холостого ходу системи. В узагальненому вигляді результат гармонійного аналізу вказаного часового діапазону наведено на рисунку 3.16.

Отриману картину гармонійного розподілу, з урахуванням специфіки поточного дослідження, доцільно розділити на окремі досліджувані ділянки,

межі яких визначаються у відповідності до смуг частот пропускання сигнального струму РК (табл. 1.1). Остаточні результати аналізу першого часового діапазону (5-15с) наведено на рисунку 3.17.

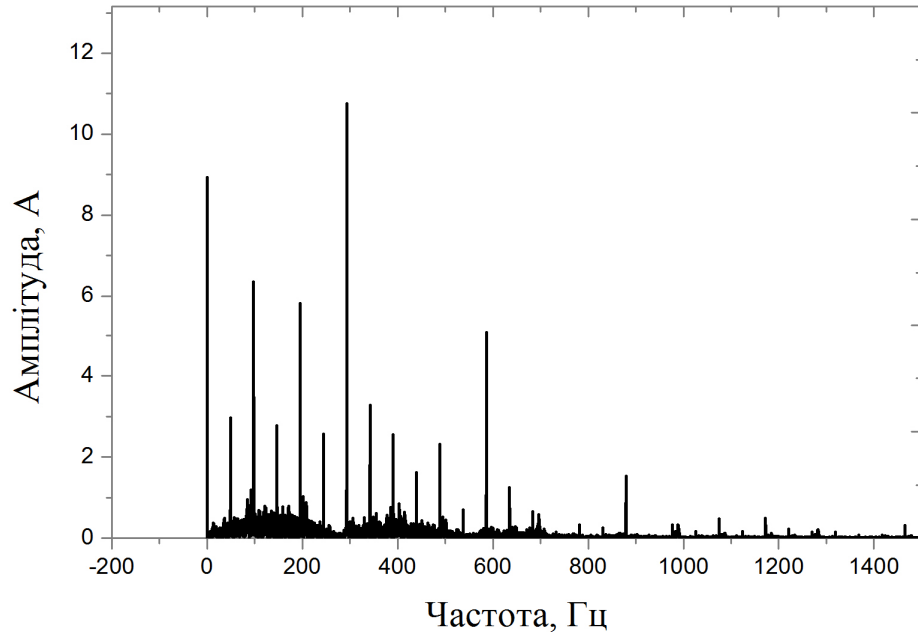
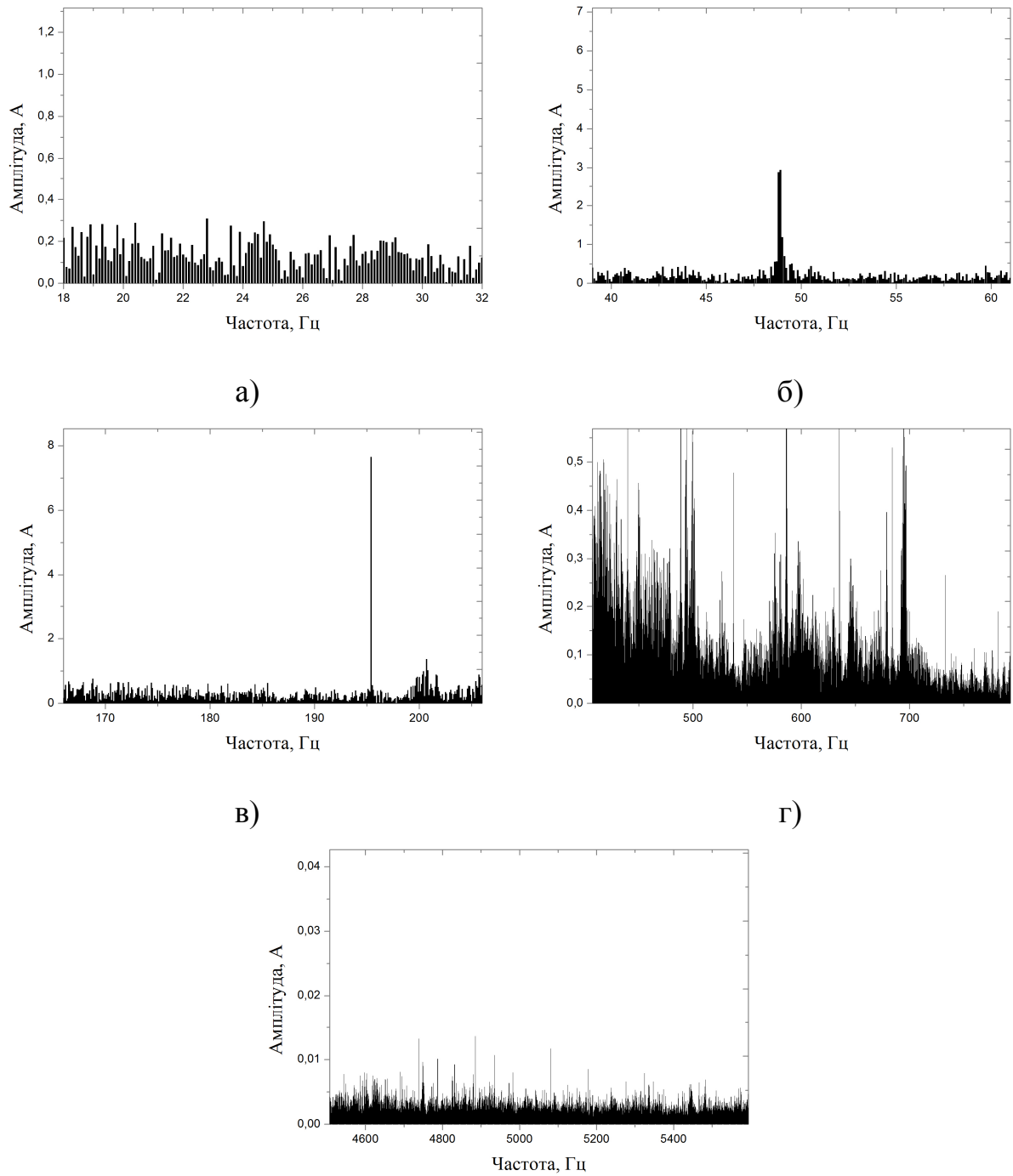


Рисунок 3.16 – Гармонійний склад струму системи ділянки 5-15с при частоті модуляції 0,5 кГц.

Як видно з отриманих результатів найбільшого кондуктивного впливу зазнають РК, що працюють на частотах тонального діапазону ТРЦ-3 (420-780 Гц) смуга пропускання частот сигнального струму яких є найбільш насиченою вищими гармонійними складовими (рис. 3.17, г). В даному випадку такий характер впливу є сукупним та пояснюється не лише наявністю у складі досліджуваної системи перетворювача частоти а й особливостями випрямлення напруги трифазним мостовим випрямлячем (рис. 2.10), що генерує гармонійні складові кратні 300 Гц [65].

Даний факт вносить деяку складність в оцінку впливу перетворювача частоти на РК із сигнальним струмом вказаного діапазону частот. У зв'язку з цим її виконання пропонується здійснювати шляхом додаткового узагальненого порівняльного аналізу подібних спектрів для всіх частот модуляції.



д)  
Рисунок 3.17 – Результати гармонійного аналізу часового діапазону 5-15с.

На рис.3.17:

- а) – смуга частот пропускання сигнального струму 25 Гц;
- б) – смуга частот пропускання сигнального струму 50 Гц;

- в) – смуга частот пропускання сигнального струму 175 Гц;
- г) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-3;
- д) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-4;

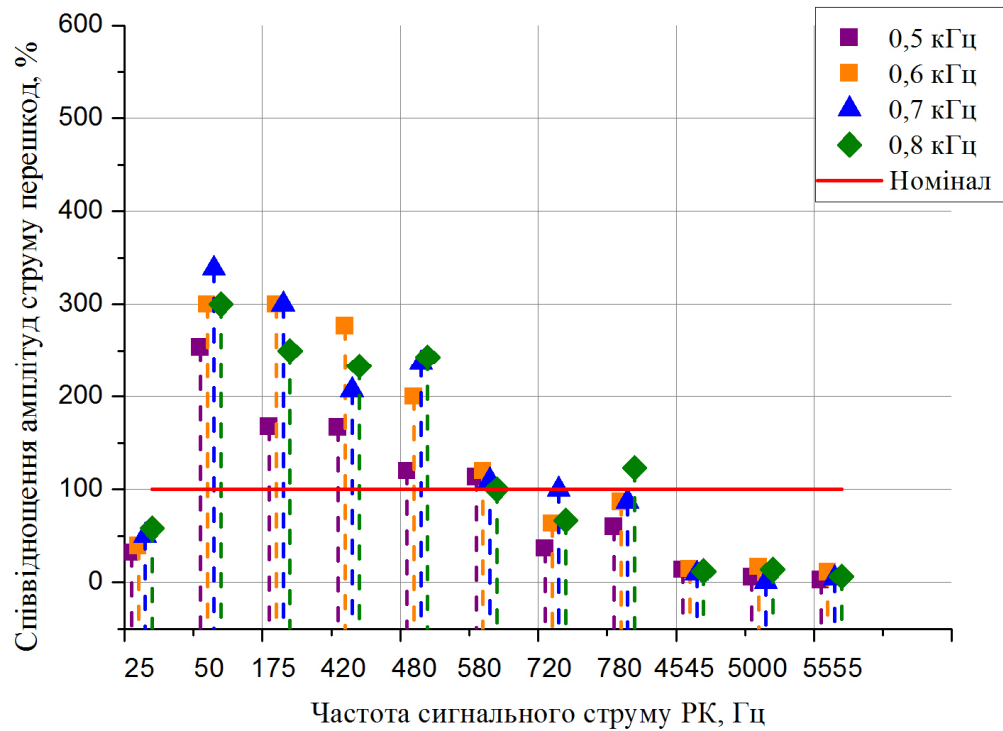
Окрім частот тонального діапазону, значного кондуктивного впливу, за частоти модуляції 0,5 кГц, зазнають РК з частотою сигнального струму 50 Гц значення відповідної амплітуди струму перешкоди для яких значно перевищує нормоване. Аналогічно до розглянутого вище здійснено аналіз решти осцилограм для частот модуляції 0,6...2 кГц, що розглядаються за умовами дослідження. Результати аналізу наведені у додатку В.

Результатом проведеного аналізу є отримані залежності зміни амплітуд струмів перешкод (рис. 3.18), що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ та дозволяють здійснювати налаштування частот модуляції тягового статичного перетворювача в залежності від робочої частоти сигнального струму РК. При цьому під поліпшенням в роботі прийнято не перевищення вказаними показниками своїх нормованих значень або їх середньо-відсоткову зміну відносно нормованих значень [35].

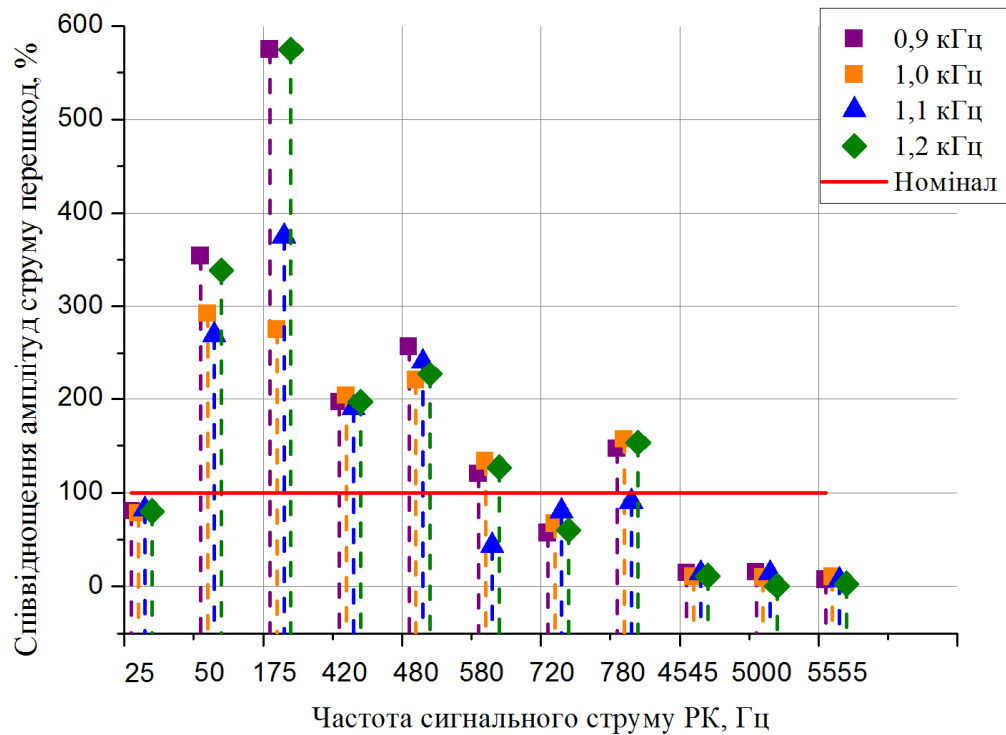
Користуючись отриманими залежностями (рис. 3.18, додаток В), з точки зору поліпшення показників ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму, можна вказати, що серед досліджуваного діапазону частот модуляції не виявлено жодної, яка б задовольняла умовам безперешкодної роботи РК всіх діапазонів частот сигнального струму. Так, для РК частотного діапазону 25 Гц найбільш рекомендованими до застосування є частоти модуляції 0,5 кГц та 0,6 кГц, за яких спостерігається зниження амплітуд струмів перешкод до рівня 32-39% від нормованих значень.

Безперешкодна робота РК тонального діапазону з частотами сигнального струму 580 Гц, 720 Гц та 780 Гц може спостерігатись за умови застосування

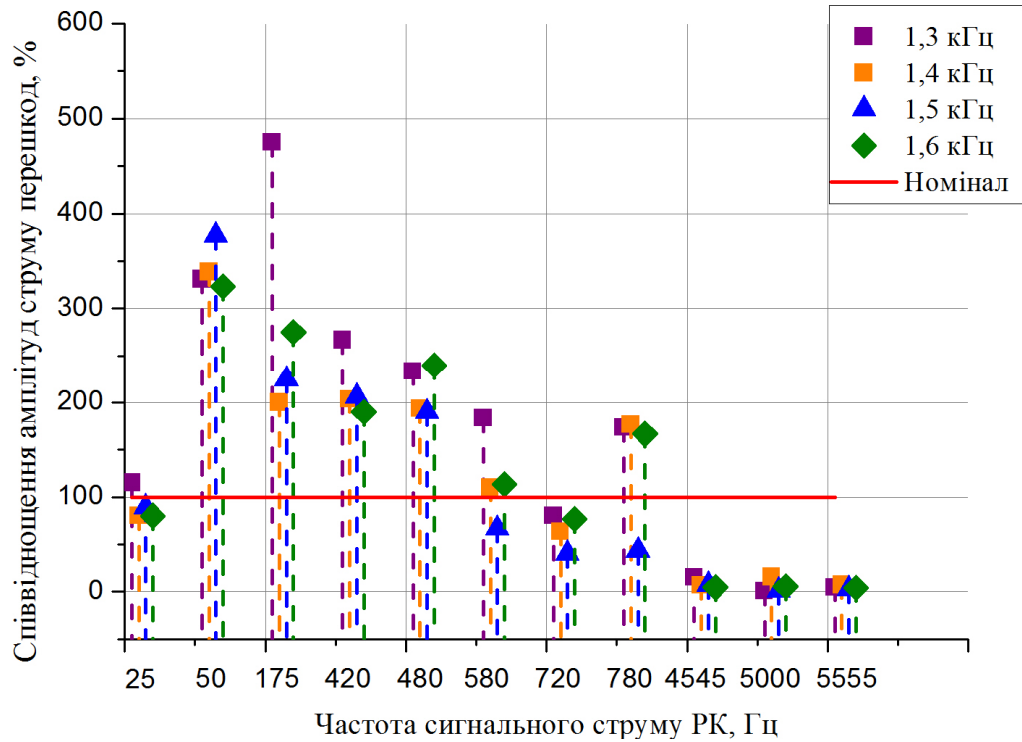
частот модуляції: 0,5 кГц, 1,5 кГц, 1,9 кГц – для РК 720 Гц; 1,1 кГц, 1,5 кГц – для РК 580 Гц; 0,5 кГц, 1,5 кГц – для РК 780 Гц.



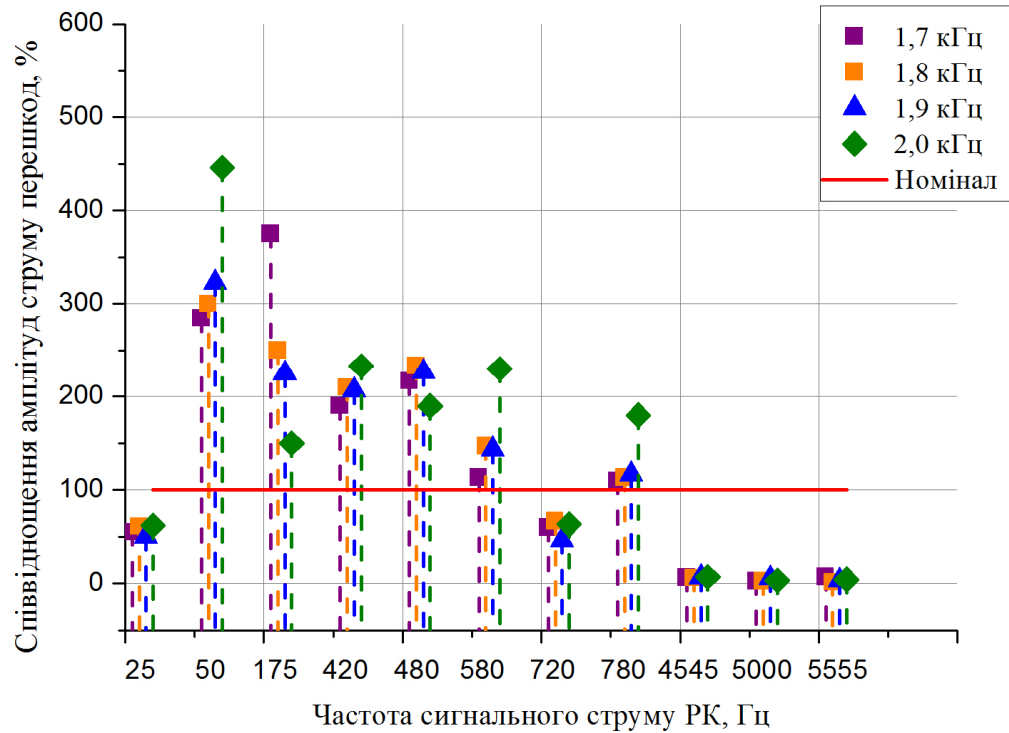
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.18 – Залежності зміни струмів перешкод, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ

Такий висновок підтверджується зафіксованим можливим зниженням амплітуд струмів перешкод, відносно нормованих значень, до рівня 43-67% для РК 580 Гц, 37-48% для РК 720 Гц та 43-60% для РК 780 Гц.

Для РК з робочими частотами 50 Гц, 175 Гц та 420 Гц серед розглянутого діапазону частот модуляції не виявлено жодної частоти, яка б повноцінно задовольняла умови безперешкодної роботи систем СЦБ з точки зору їх ЕМС з ЕРС з АТЕП. Не зважаючи на це існує ряд частот за яких перевищення нормованих значень контрольованих показників ЕМС є найнижчим і які наближено можливо рекомендувати в якості робочих за умови експлуатації розглянутого ЕРС з вказаними РК. Дані частоти та характерні для них показники ЕМС наведено нижче:

РК 175 Гц – частота модуляції 2 кГц (перевищення нормованих значень на рівні 50%);

РК 420 Гц – частота модуляції 0,5 кГц (перевищення нормованих значень на рівні 67%);

### 3.4 Висновки до третього розділу

Отримані результати досліджень дозволяють зробити відповідні висновки, щодо впливу перетворювача частоти на показники функціонування систем СЦБ та можливості їх поліпшення шляхом зміни частоти модуляції. Так, найбільш вразливими до дії перешкод є РК, що працюють на частотах 50 Гц, 175 Гц та частотах тонального діапазону ТРЦ-3 – 420-780 Гц. За умови сукупної взаємодії АТЕП ЕРС постійного струму з вказаними РК найбільш рекомендованими частотами модуляції тягового перетворювача частоти є: 0,5 кГц та 0,6 кГц – для РК 25 Гц; 0,5 кГц, 1,1 кГц, 1,5 кГц та 1,9 кГц – для ТРЦ-3 з частотами 580 Гц та 780 Гц. Застосування вказаних частот модуляції дозволяє досягти відносного зниження амплітуд струмів перешкод на вказаних діапазонах, а отже поліпшення ЕМС розглянутого ЕРС з системами

СЦБ, до рівнів: 32-39% від нормованих значень – для РК 25 Гц; 43-67%, 37-48%, та 43-60% від нормованих значень для РК 580-780 Гц відповідно. Для РК з іншими частотами сигнального струму частот модуляції які б повноцінно задовольняли умовам безперешкодної роботи систем СЦБ з точки зору їх ЕМС з ЕРС з АТЕП постійного струму встановлено не було.

## РОЗДІЛ 4. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННИХ ПРИВОДІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити вплив частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на системи СЦБ при функціонуванні останнього у номінальному режимі. В той же час функціонування об'єктів залізничного транспорту характеризується різноманітними режимами роботи, що відрізняються від номінального та супроводжуються значними відхиленнями робочих параметрів електрообладнання від своїх номінальних значень.

До таких режимів, з точки зору функціонування тягових одиниць, відносять [97, 98]:

- коротке замикання електричних кіл;
- обрив живлячих мереж (обрив однієї з фаз тягового асинхронного двигуна);
- відмову складових елементів блоків тягового електроприводу, в тому числі внаслідок порушення функціонування системи керування;
- перевантаження тягового електроприводу.

Вказані режими, як правило, характеризуються наявністю значних величин струмів та короткочасних перенапруг. Їх виникнення може бути причиною появи додаткових гармонійних складових або підвищення амплітуд вже існуючих та, як наслідок, призводити до порушення функціонування суміжного обладнання електрифікованих залізниць з точки зору ЕМС – в нашому випадку обладнання РК. З цієї точки зору постає задача провести дослідження, щодо прийнятності до застосування розглянутого діапазону частот модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП за умови виникнення неномінальних режимів.

Серед представленої переліку режимів особливої уваги, з точки зору подальших досліджень, заслуговують ті, що не призводять до миттєвого

відключення тягового електрообладнання. Тому автором пропонується обмежити подальші дослідження лише останніми двома режимами, але їх розгляд здійснити і для систем СЦБ, і для мережі зовнішнього електропостачання.

Окрім неномінальних режимів роботи, як показали дослідження для мереж змінного струму [79], значний вплив на виникнення гармонійних складових струму здійснює процес комутації силових вентилів АІН, а саме явище комутаційної (динамічної) асиметрії [79]:

- фазова асиметрія – виникає у трифазному АІН, за умови неврівноваженості навантаження однієї з фаз;
- верхня/нижня асиметрія – виникає у випадках невідповідності комутаційних властивостей «верхніх» у плечі силових вентилів до «нижніх»;
- позиційна асиметрія – є наслідком невідповідності комутаційних параметрів силових ключів одного плеча.

Такий додатковий гармонійний вплив потребує свого дослідження і для мереж постійного струму, що і пропонується здійснити.

З точки зору аналізу процесів, що супроводжують будь які неномінальні режими, виконання досліджень здійснюють, як правило, за допомогою математичного або імітаційного моделювання, одним з шляхів виконання якого є використання програмного середовища MATLAB Simulink [99, 100].

Аналіз літературних джерел вказує на наявність значної кількості варіантів реалізації імітаційних моделей АТЕП або його окремих складових, як правило – тягових автономних інверторів [5, 20, 101, 102]. Не зважаючи на це такі моделі не забезпечують повноцінності досліджень, адже їх основою є реалізація статичного режиму роботи об'єкту моделювання з фіксованими значеннями вихідної напруги та частоти [103].

В той же час, аналіз отриманих експериментальних даних вказує на необхідність відтворення динаміки функціонування досліджуваних систем, що вимагає створення відповідних імітаційних моделей. У первинному

вигляді це передбачає відтворення механізму функціонування складових елементів експериментальної установки, реальної системи, а отже визначає необхідність побудови наступних підмоделей:

- моделі мережі тягового електропостачання;
- моделі АТЕП, його силової частини;
- моделі системи керування з ШІМ.

Оскільки імітаційне моделювання, за своєю суттю не дозволяє врахувати всіх факторів впливу на систему [54, 57], в тому числі зовнішніх факторів, подальшу оцінку впливу частот модуляції на показники ЕМС пропонується здійснювати якісно. Як і у випадку з експериментальною установкою діапазон зміни вхідного параметру (частоти модуляції) приймаємо однаковим, порядок аналізу вихідних даних – узагальненим, без детального розділення на часові діапазони.

В нашому випадку імітаційне моделювання передбачає виконання досліджень в умовах динаміки роботи системи, що не вимагає повноцінного відтворення тривалості руху ЕРС по обраній ділянці профілю руху. З цієї точки зору, в рамках подальших досліджень, пропонується обмежити тривалість моделювання часом зміни частоти вихідної напруги на 1 Гц зі збереженням встановленої інтенсивності зміни 0,096 Гц/с.

#### 4.1 Моделювання мережі тягового електропостачання

Модель системи тягового електропостачання визначається переліком задач, що потребують свого вирішення в процесі виконання досліджень. В нашому випадку побудова імітаційної моделі такої системи передбачає відтворення функціонування лише деяких її складових частин, а саме електричних параметрів контактної мережі та основних елементів тягової підстанції постійного струму (тягових трансформатора та випрямляча) [104].

З точки зору першої складової імітаційної моделі практика виконання досліджень аналогічного характеру вказує на можливість її відтворення, у першому наближенні, через значення активного опору  $R_{км}$  та індуктивності  $L_{км}$  [20, 102].

Згідно [102] вказані параметри визначаються наступним чином:

$$L_{км} = l \cdot L_0; \quad (4.1)$$

$$R_{км} = R_{ТП} + (R_{КД} + R_P) \cdot l. \quad (4.2)$$

У виразах (4.1), (4.2):

$l$  – довжина фідерної зони контактної мережі. Відповідно до [102] максимальне значення даного параметру для магістральних залізниць постійного струму становить 20 км;

$L_0$  – питома індуктивність контактної мережі. Для залізниць постійного струму  $L_0 \approx 0,12 \text{ мГн/км}$  [105];

$R_{ТП}$  – еквівалентний опір тягової підстанції;

$R_{КД}$  – питомий активний опір контактного дроту;

$R_P$  – опір рейкової мережі.

Приймаючи, що  $(R_{КД} + R_P)$  становить приблизно 0,055 Ом/км [102],  $R_{ТП} = 2$  Ом [105], а ЕРС знаходиться на половині довжини фідерної зони ( $l = 10$  км) значення вказаних параметрів контактної мережі:

$$L_{км} = 10 \cdot 0,12 = 1,2 \text{ мГн}; \quad (4.3)$$

$$R_{км} = 2 + 0,055 \cdot 10 = 2,55 \text{ Ом}. \quad (4.4)$$

Другу складову імітаційної моделі системи тягового електропостачання виконаємо, як і у випадку з експериментальним дослідженням, шляхом відтворення структури енергоперетворення тягової підстанції постійного струму (рис. 2.8) у середовищі Matlab Simulink. При цьому, як і у випадку з експериментальним дослідженням, дію пасивних фільтрів, а відповідно їх наявність у системі, не враховуємо. В якості базової схеми моделювання приймемо наступну (рис 4.1) [59]:

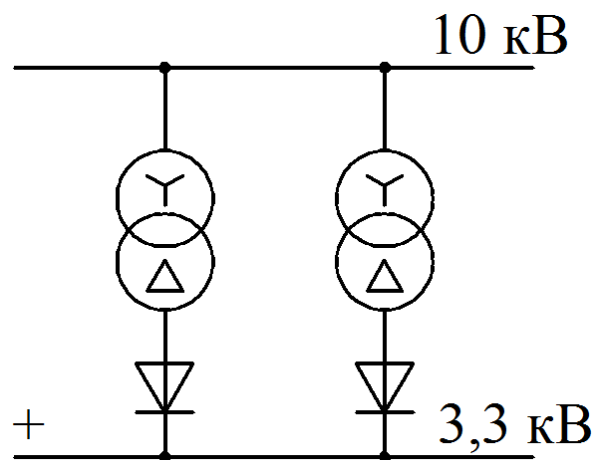


Рисунок 4.1 – Базова схема моделювання системи тягового електропостачання

Узагальнена імітаційна модель наведена на рисунку 4.2.

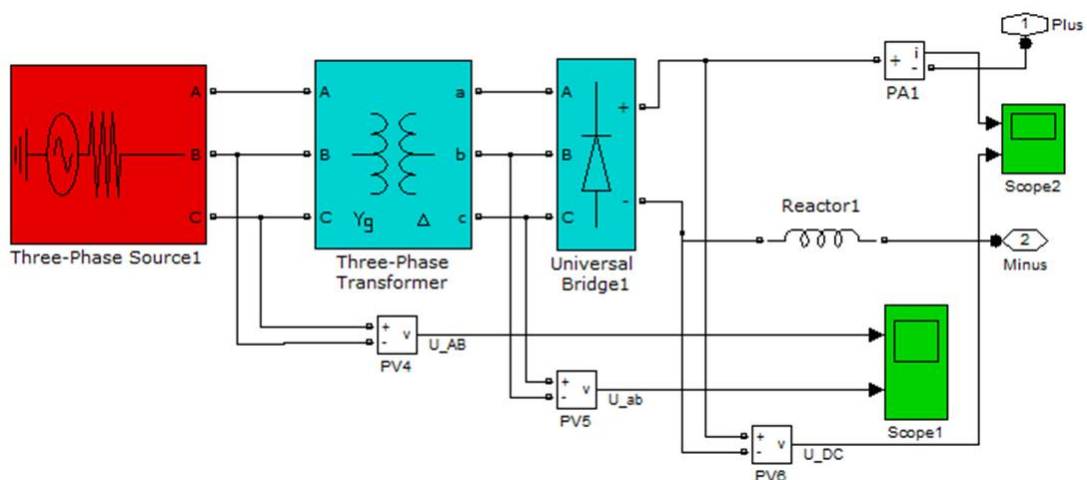


Рисунок 4.2 – Імітаційна модель системи тягового електропостачання постійного струму

Основою моделі є блок Three-Phase Transformer, що імітує роботу трифазного двообмоткового трансформатора. В нашому випадку в якості бази імітаційного моделювання такого об'єкту прийнято трансформатор ТДП-12500/10ЖУ1 з класом напруги 10 кВ [106, 107], що призначений для роботи у сукупності з трифазною мостовою схемою випрямлення [108]. Остання в моделі представлена блоком Universal Bridge1 до мінусової шини якого під'єднано згладжуючий реактор (елемент Reactor). В якості параметрів останнього в імітаційній моделі використано параметри реактора СРОСЗ-3200МУХЛ4 з номінальним значенням струму 3200 А та індуктивністю 0,5 мГн [107].

Блок Three-Phase Source імітує функціонування системи зовнішнього електропостачання, представленої у вигляді еквівалентної схеми заміщення – ідеального джерела синусоїдальної напруги та лінії електропередач (ЛЕП). Повноцінне використання даної моделі, як моделі системи тягового електропостачання, потребує уточнення параметрів схем заміщення трансформатора та зовнішньої мережі напругою 10 кВ. Згідно [109] за умови якщо довжина ЛЕП не перевищує 300-400 км її можливо представити спрощеною схемою заміщення, яка у випадку зі вказаним рівнем напруги буде мати вигляд:

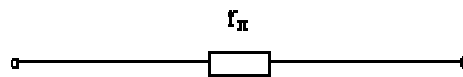


Рисунок 4.3 – Схема заміщення ЛЕП напругою 10 кВ

В даному випадку схема заміщення являє собою значення активного опору живлячої лінії, яке визначається як:

$$r_{л} = r_0 \cdot l \quad (4.5)$$

У виразі (4.5):

$r_0$  – питомий опір дроту ЛЕП при 20°C;

$l$  – довжина ЛЕП.

Приймаючи, відповідно до [34], що середнє значення питомого опору дроту становить  $r_0 = 0,29$  Ом/км, а довжина ЛЕП – 200 км значення активного опору живлячої лінії становить:

$$r_{Л} = 0,29 \cdot 200 = 58 \text{ Ом} \quad (4.6)$$

З точки зору трансформатора, його схема заміщення, а відповідно і розрахунок її параметрів, є більш складними. Останній, як правило, здійснюють для Т-подібної схеми заміщення з використанням номінальних параметрів, а також параметрів холостого ходу (ХХ) та короткого замикання (КЗ) [68, 110]. Для обраного типу трансформатора такі параметри наведено у таблиці 4.1. Порядок виконання розрахунку схеми заміщення наведено у додатку Г.

Таблиця 4.1

Параметри трансформатора ТДП-12500/10ЖУ1

Параметр	Значення параметру
Номінальна потужність $S_{НОМ}$ , кВА	11800
Номінальна лінійна напруга обмотки ВН $U_{1Н}$ , В	10000
Номінальна лінійна напруга обмотки НН $U_{2Н}$ , В	2444
Втрати потужності ХХ $P_X$ , кВт	16
Втрати потужності КЗ $P_K$ , кВт	72,5
Струм ХХ $I_X$ , %	1,1
Напруга КЗ $u_K$ , %	7
Схема з'єднання обмоток	Y/Δ

В даному випадку значення напруги вторинної обмотки  $U_{НН\_Л}$  розраховане виходячи зі значення випрямленої напруги 6-пульсового

мостового випрямляча 3,3 кВ через наявність значних розбіжностей даного параметру у паспортних даних вказаних вище джерел:

$$U_{HH\_Л} = \frac{U_d}{1,35} = \frac{3300}{1,35} = 2444 \text{ В}; \quad (4.7)$$

Проведені розрахунки (додаток Г) дозволяють остаточно встановити шукані параметри Т-подібної схеми заміщення трансформатора ТДП-12500/10ЖУ1, значення яких наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Встановлені параметри схеми заміщення трансформатора  
ТДП-12500/10ЖУ1

Параметр	$r_1$	$r_2$	$x_1$	$x_2$	$r_0$	$x_0$
Значення параметру, Ом	0,026	0,005	0,294	0,053	95	764
Значення параметру, в.о.	0,009	0,002	32,6	5,89	33,7	84888

Значення параметрів у відносних одиницях наведені з метою забезпечення можливості їх застосування в якості параметрів блоку Three-Phase Transformer. Їх перерахунок здійснено через значення базового опору  $R_B$  та базової індуктивності  $L_B$  (враховуючи, що  $x = \omega L$ ) у відповідності з [111] за наступною схемою:

$$R_B = \frac{U_{1\Phi}^2}{S_{НОМ}} = \frac{(5774)^2}{11800 \cdot 10^3} = 2,82 \text{ Ом}, \quad (4.8)$$

$$L_B = \frac{R_B}{2\pi f_{НОМ}} = \frac{2,82}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,009 \text{ Гн}, \quad (4.9)$$

$$R[\text{в.о.}] = \frac{R[ОМ]}{R_B}, \quad (4.10)$$

$$L[\text{в.о.}] = \frac{L[Гн]}{L_B}. \quad (4.11)$$

#### 4.2 Моделювання силової частини асинхронного тягового електроприводу

Моделювання силової частини АТЕП, в загальному вигляді, передбачає моделювання роботи системи «тяговий перетворювач частоти – асинхронний двигун». Цей факт визначає основну структуру імітаційної моделі, загальний вигляд якої, розробленої у відповідності до вказаного вище, наведено на рисунку 4.4.

Основу імітаційної моделі складають два функціональні блоки – Invertor1 та Asynchronous Machine. Блок Invertor1 являє собою підсистему, що імітує функціонування трифазного АІН «зібраного» з використанням в якості ключових елементів IGBT-транзисторів. Внутрішній вміст блоку наведено на рисунку 4.5.

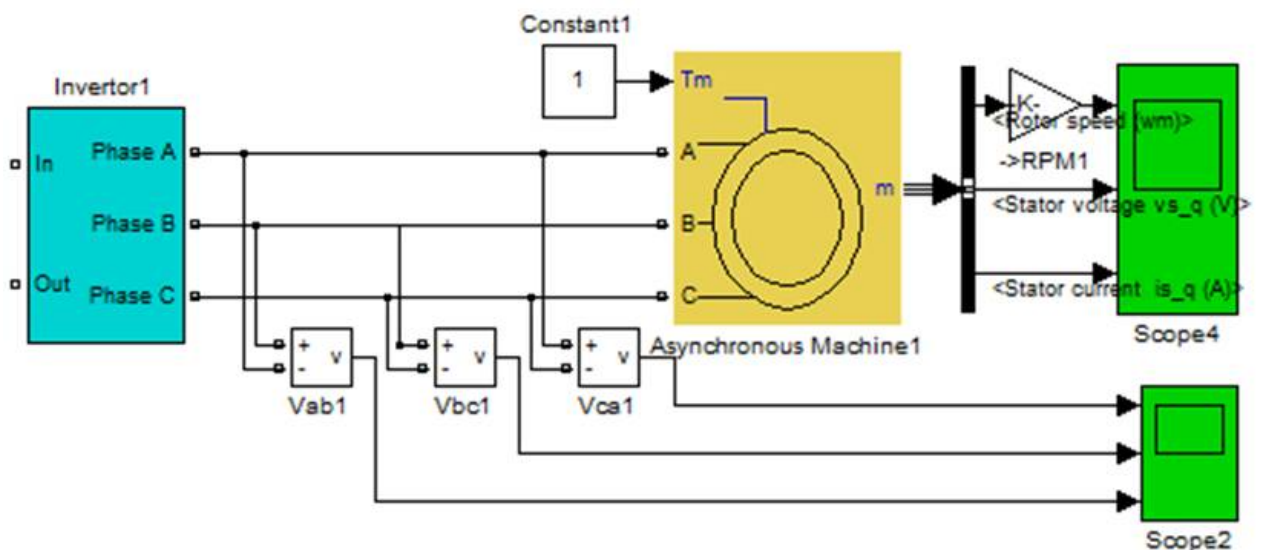


Рисунок 4.4 – Імітаційна модель силової частини АТЕП

Для забезпечення максимальної точності відтворення реального процесу енергоперетворення даним блоком здійснено його налаштування шляхом визначення, відповідно до рекомендацій [99, 100, 111], параметрів снабберних кіл моделей силових ключів (IGBT1-IGBT6).

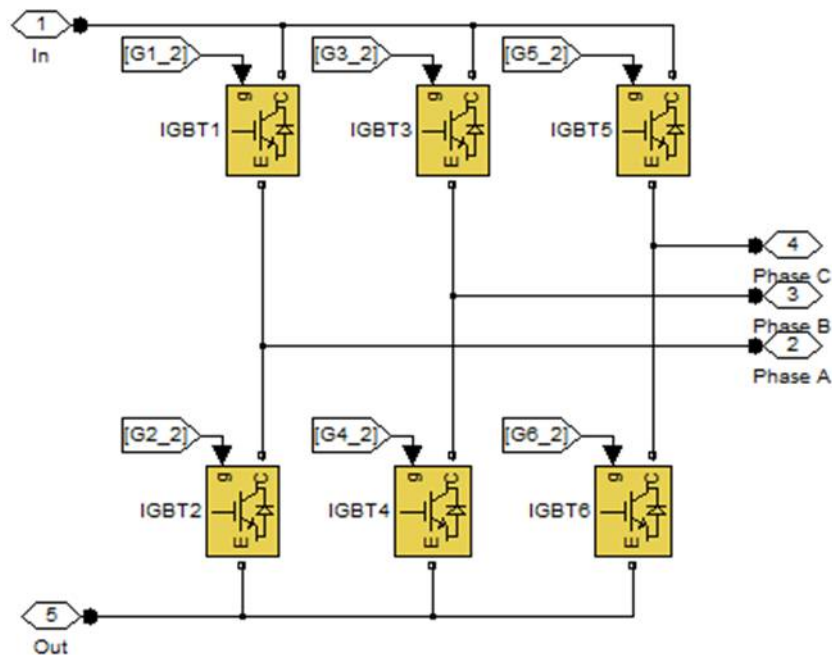


Рисунок 4.5 – Вміст блоку Invertor1

Блок Asynchronous Machine імітує процес функціонування асинхронного двигуна. Як і у випадку з трансформатором даний блок є визначальним і потребує додаткових налаштувань шляхом введення значень параметрів схеми заміщення. Оскільки базовим об'єктом імітаційного моделювання для даного блоку є тяговий двигун СТА1200У1 шукані параметри є визначеними і не потребують додаткового розрахунку (табл.2.12, розділ 2).

#### 4.3 Моделювання системи керування з широтно-імпульсною модуляцією

Деяка складність створення імітаційної моделі системи керування з ШІМ полягає у необхідності відтворення динаміки функціонування АТЕП –

відтворення зміни параметрів руху ЕРС по досліджуваних ділянках профілю (табл.2.9, розділ 2). З точки зору системи керування це передбачає реалізацію необхідної інтенсивності зміни вихідної частоти напруги АІН (3.5), а отже і зміни швидкості руху ЕРС.

В загальному випадку моделювання роботи будь-яких систем з ШІМ зводиться до відтворення сукупного функціонування двох субблоків – блоку генерації пилкоподібного сигналу, частота якого визначає частоту модуляції, та блоку генерації модулюючої функції, в нашому випадку синусоїди [112]. З урахуванням цього імітаційна модель розглянутої системи, розроблена в середовищі Matlab Simulink, буде мати наступний вигляд (рис. 4.6).

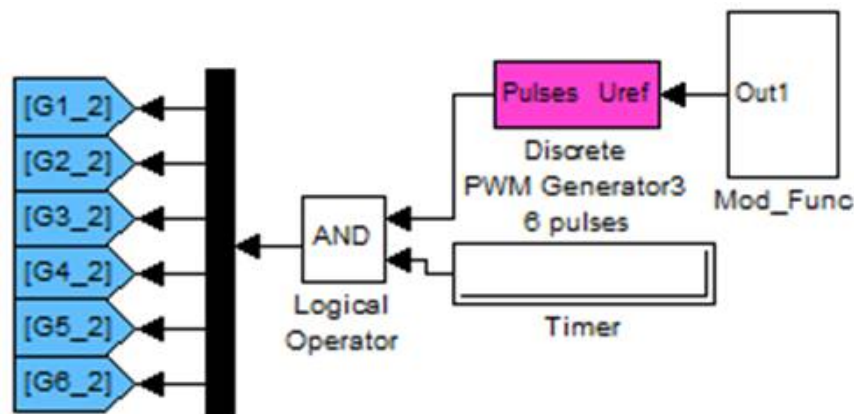


Рисунок 4.6 – Імітаційна модель системи керування з ШІМ

Основу моделі складає блок Discrete PWM Generator 6 pulses, призначенням якого є генерація імпульсів керування силовими вентилями імітаційної моделі трифазного АІН. Даний блок містить у своєму складі генератор пилкоподібного сигналу, вихідна частота якого (частота модуляції) може бути змінена шляхом внутрішніх налаштувань.

Вхідне коло Discrete PWM Generator 6 pulses представлено блоком Mod\_Func, що виконує роль генератора модулюючої функції. Внутрішній вміст даного блоку наведено на рисунку 4.7.

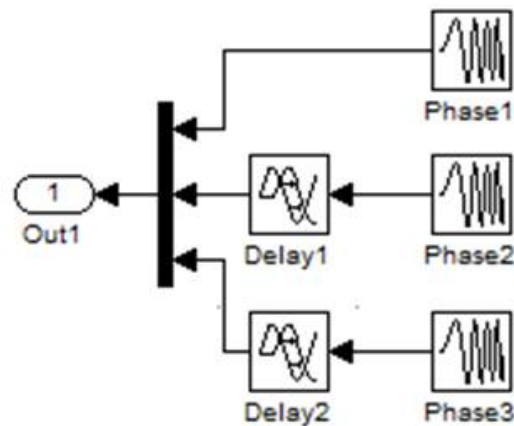


Рисунок 4.7 – Складові елементи блоку Mod\_Func

Блоки Phase (рис. 4.7) здійснюють генерацію трьох синусоїдальних сигналів, частота яких може змінюватись на задану величину за вказаний проміжок часу, реалізуючи при цьому необхідну інтенсивність зміни вихідної частоти напруги АІН. Для забезпечення зсуву фаз вказаних сигналів на  $120^\circ$  та  $240^\circ$  відповідно на виході блоків Phase2 та Phase3 встановлено блоки Delay, які стримують початок генерації синусоїдальних сигналів другої та третьої «фази» на відповідні, до величин зсуву, проміжки часу.

Єдиним недоліком розробленої імітаційної моделі є відсутність двох фаз модулюючих функцій на початковому етапі моделювання, що призводить до некоректної генерації імпульсів керування силовими ключами АІН (рис. 4.8). Для компенсації вказаного недоліку в систему введений блок Timer, що реалізує (через блок логічного оператора «И») затримку генерації керуючих імпульсів на час, що відповідає максимальному фазному зсуву  $240^\circ$ .

Узагальнений вигляд імітаційної моделі, побудованої з використанням вказаних складових частин, а також з урахуванням всіх вище згаданих особливостей, наведено на рисунку 4.9.

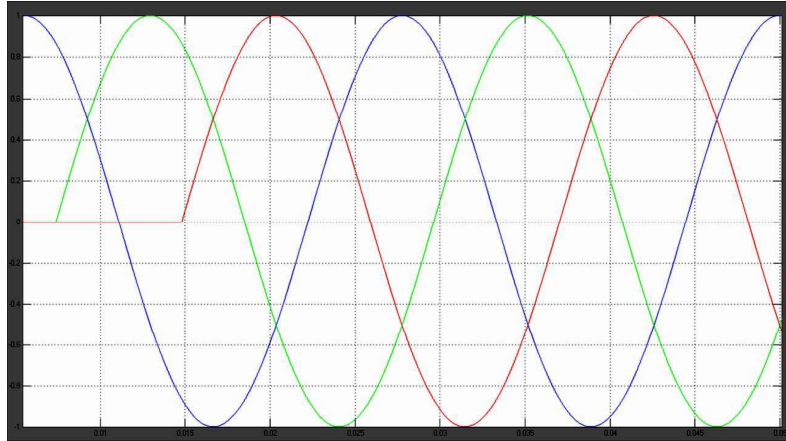


Рисунок 4.8 – Модулюючі функції блоку Mod\_Func

В даному випадку, з метою спрощення, деякі складові частини моделі об'єднано у підсистеми – STE (імітаційна модель системи тягового електропостачання) та PWM\_Switch (імітаційна модель системи керування з ШІМ).

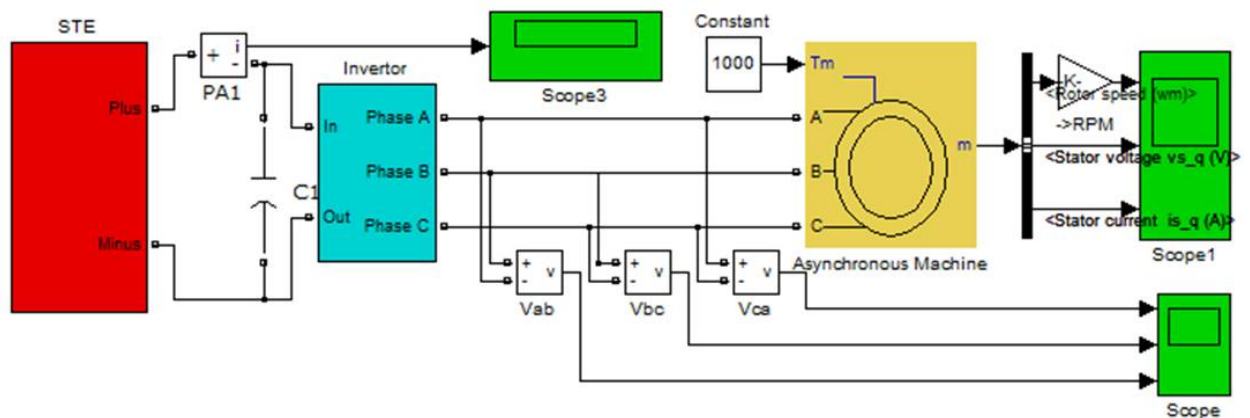


Рисунок 4.9 – Узагальнена імітаційна модель досліджуваної системи

Для оцінки працездатності моделі, як і у випадку з експериментальною установкою, проведено візуалізацію її роботи з попереднім розглядом та аналізом ключових процесів, що в подальшому підлягають дослідженням.

Як критерій відповідності моделі, в даному випадку прийнято однаковість, у першому наближенні, характеристик та особливостей зміни контрольованих параметрів (струму та напруги) за умови зміни зовнішніх

факторів – вихідної частоти та навантаження. Результати візуалізації моделі наведено нижче (рис.4.10-4.12).

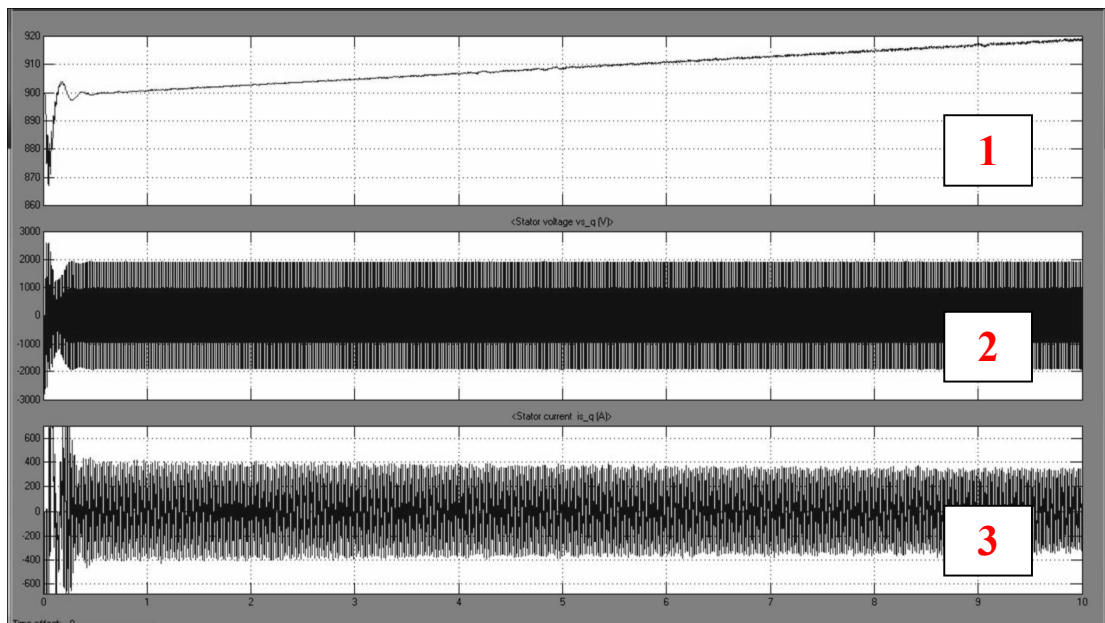


Рисунок 4.10 – Результати моделювання роботи тягового асинхронного двигуна

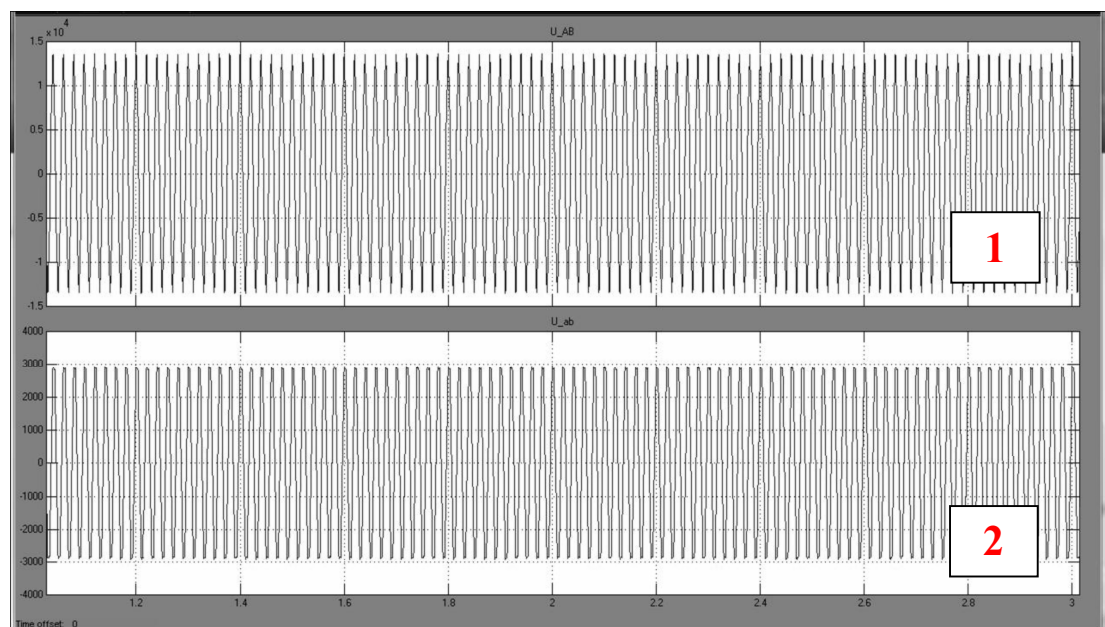


Рисунок 4.11 – Результати моделювання роботи тягового трансформатора

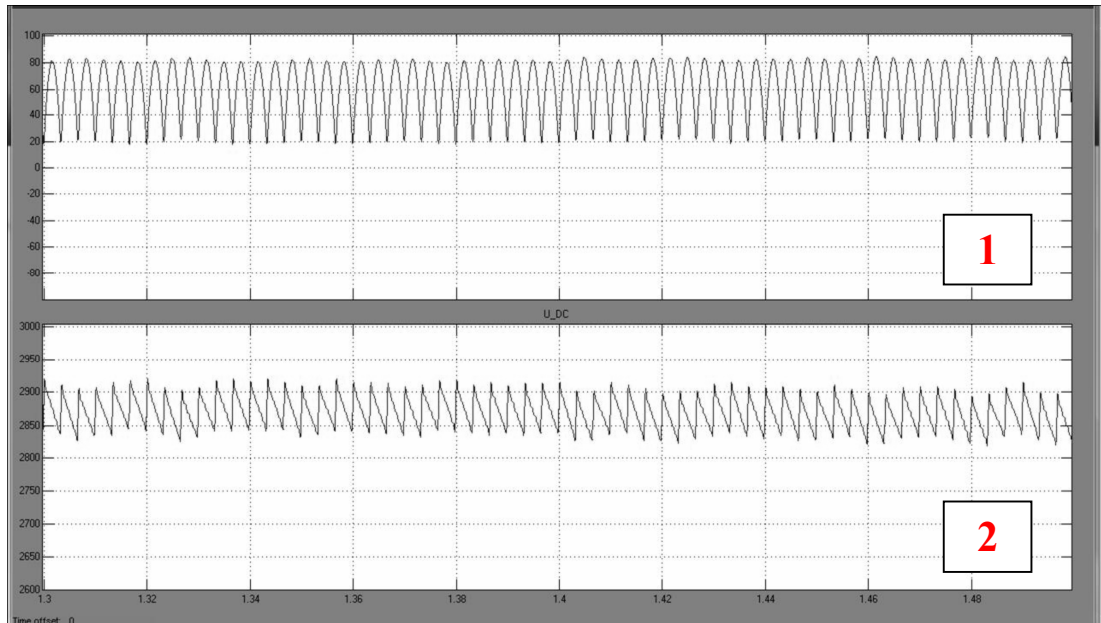


Рисунок 4.12 – Результати моделювання роботи тягового випрямляча

На рис. 4.10:

- 1 – осцилограма зміни частоти обертання асинхронного двигуна;
- 2 – осцилограма зміни напруги живлення асинхронного двигуна;
- 3 – осцилограма зміни струму статора.

На рис. 4.11:

- 1 – осцилограма зміни напруги первинної обмотки трансформатора;
- 2 – осцилограма зміни напруги вторинної обмотки.

На рис. 4.12:

- 1 – осцилограма зміни вхідного струму АТЕП;
- 2 – осцилограма зміни випрямленої напруги випрямляча системи тягового електропостачання.

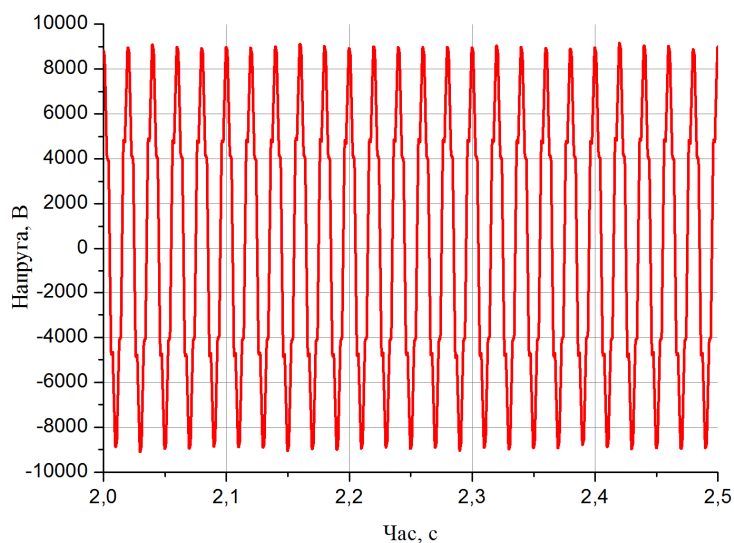
Порівнюючи отримані осцилограми змін контрольованих величин з загальновідомими даними [59, 66, 68], а також приймаючи до уваги значення показників динаміки роботи, що моделюються, стає очевидним, що модель є відповідною. Так, наприклад, частота обертів двигуна змінюється з 900 об/хв до 920 об/хв, що відповідає зміні частоти вихідної напруги АІН з 45 Гц до 46 Гц, за 10 с зі збереженням заданої інтенсивності 0,096 Гц/с (рис. 4.10, 1).

Відповідність моделі до реальної системи дозволяє повноцінно використовувати її для виконання вказаного вище переліку досліджень.

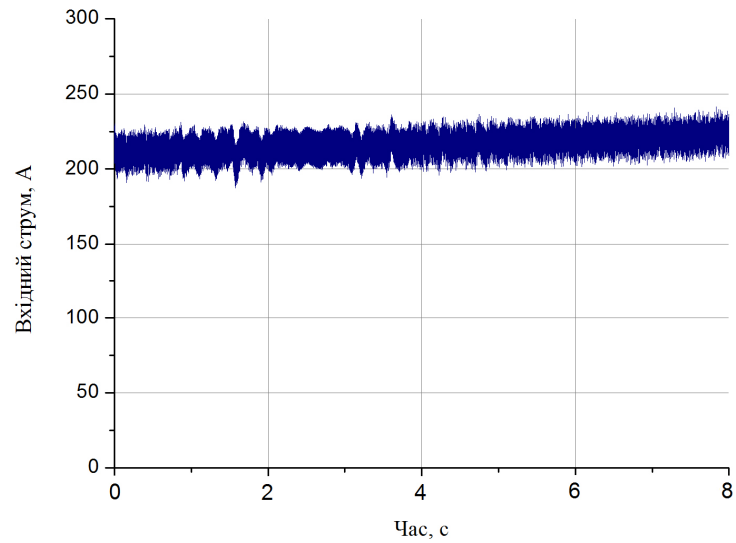
#### 4.4 Дослідження режиму перевантаження тягового електроприводу

Для імітації режиму перевантаження ТЕД, за допомогою блоку завдання моменту на валу Constant1 (рис. 4.9), встановимо таке значення останнього за якого двигун працює на межі «перекидання» зі збереженням заданої інтенсивності зміни швидкості руху ЕРС. В якості прикладу, як і при експериментальному дослідженні, подальший аналіз контрольованих процесів усіх досліджень здійснюємо для частоти модуляції 0,5 кГц (рис. 4.13). Для оцінки спектру генерованих перешкод проведемо аналіз з використанням перетворення Фур'є (рис. 4.14, 4.15).

Аналогічно до наведеного прикладу здійснено аналіз контрольованих параметрів для частот модуляції діапазону 0,6-2 кГц. За результатами аналізу, як і у випадку експериментального дослідження, побудовано залежності, що характеризують ступінь поліпшення ЕМС (рис. 4.16-4.18).



а)



б)

Рисунок 4.13 – Результати імітаційного моделювання режиму перевантаження

На рис. 4.13:

а – осцилограма зміни вхідної напруги імітаційної моделі мережі тягового електропостачання;

б – осцилограма зміни випрямленого струму імітаційної моделі мережі тягового електропостачання.

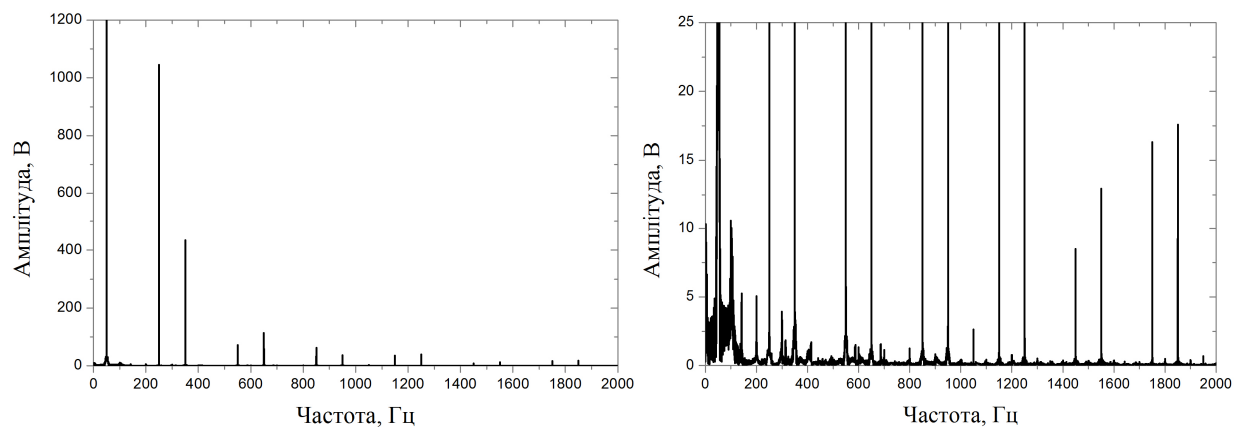


Рисунок 4.14 – Гармонійний аналіз осцилограми напруги

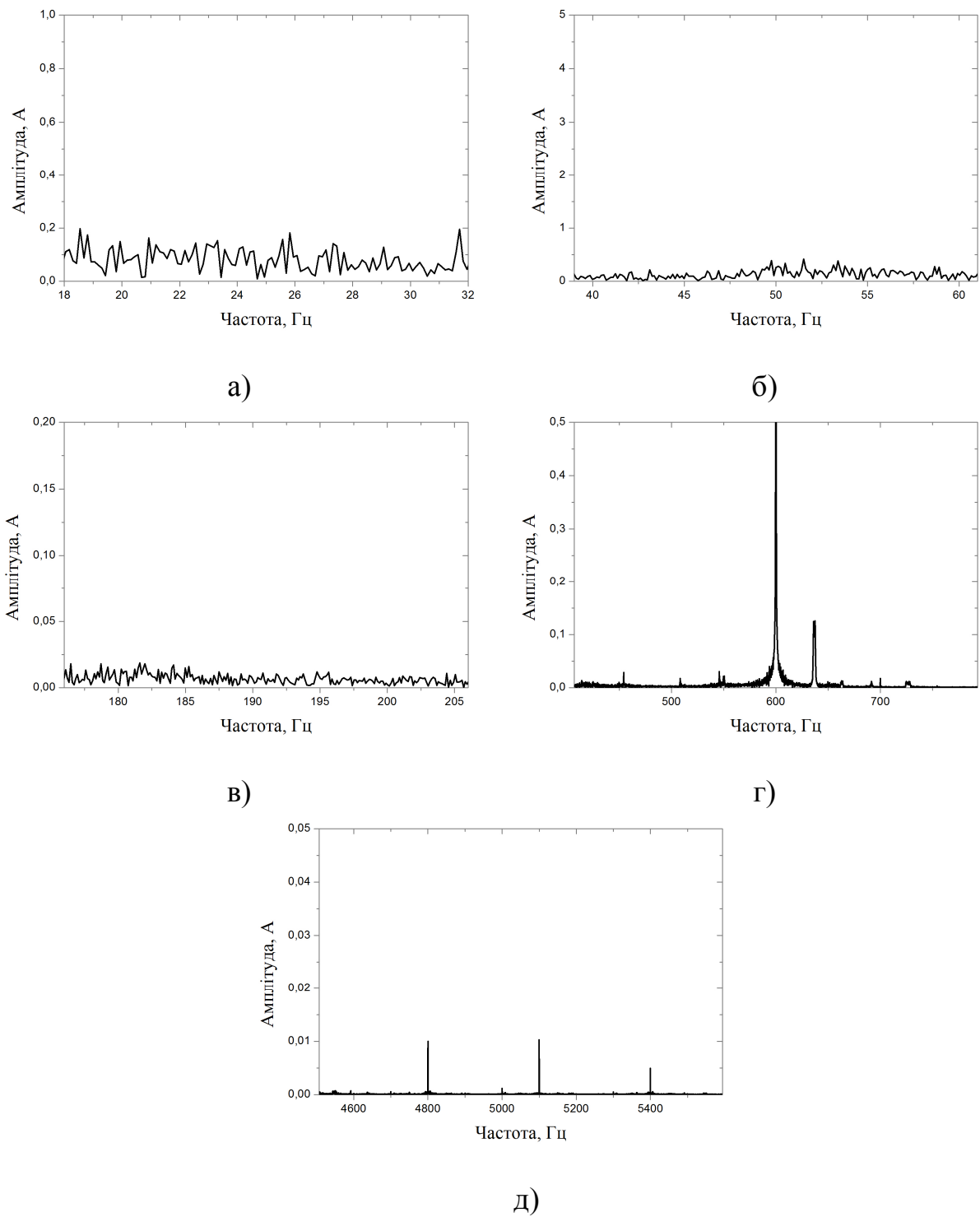
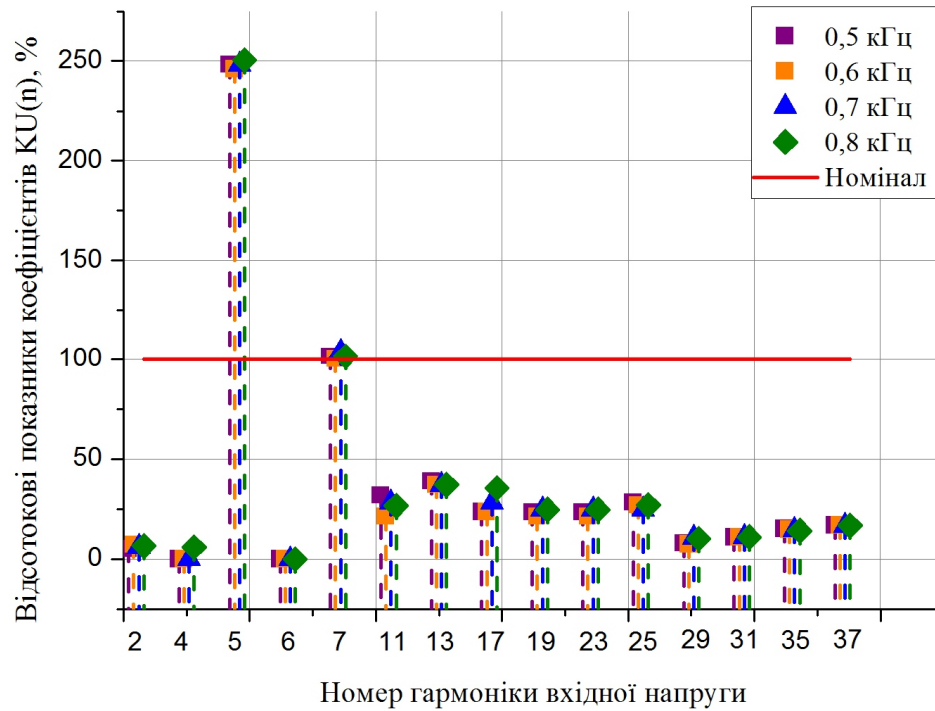


Рисунок 4.15 – Гармонійний аналіз осцилограми струму

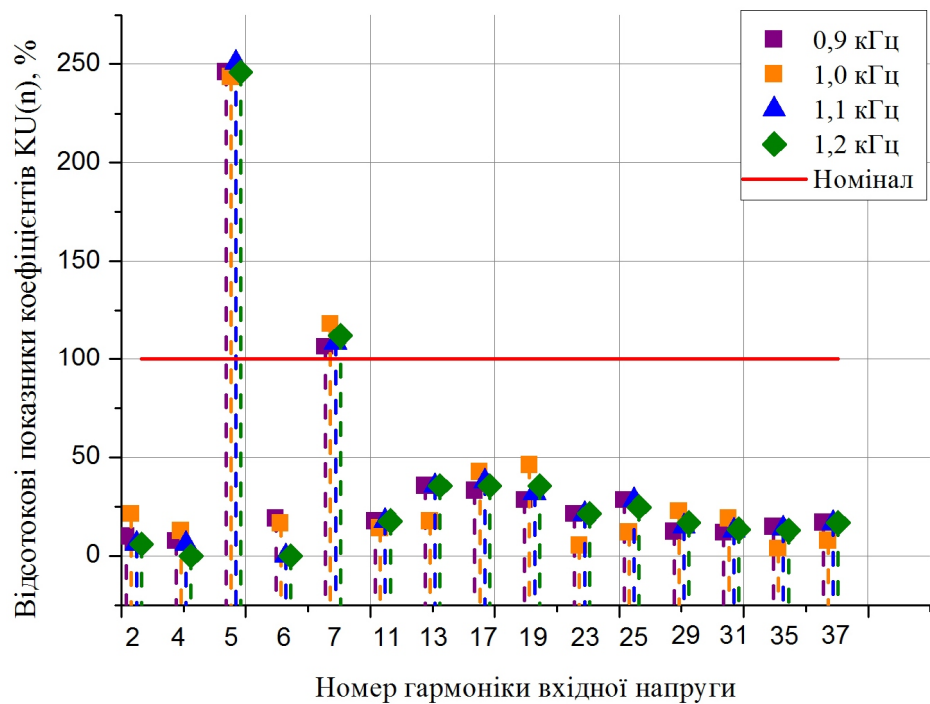
На рис.4.15:

- а) – смуга частот пропускання сигнального струму 25 Гц;
- б) – смуга частот пропускання сигнального струму 50 Гц;

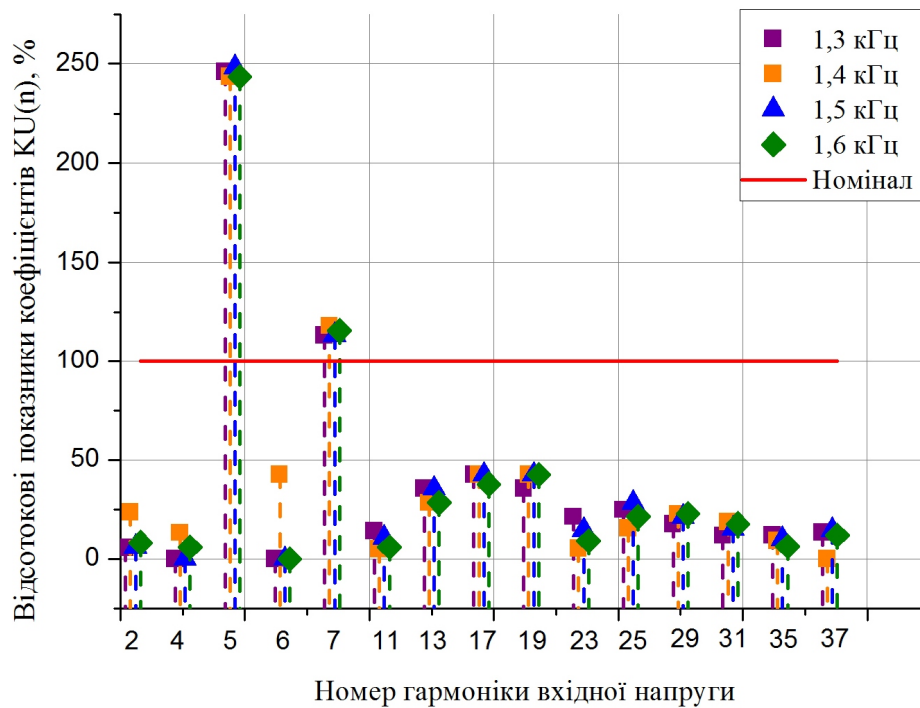
- в) – смуга частот пропускання сигнального струму 175 Гц;  
 г) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-3;  
 д) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-4;



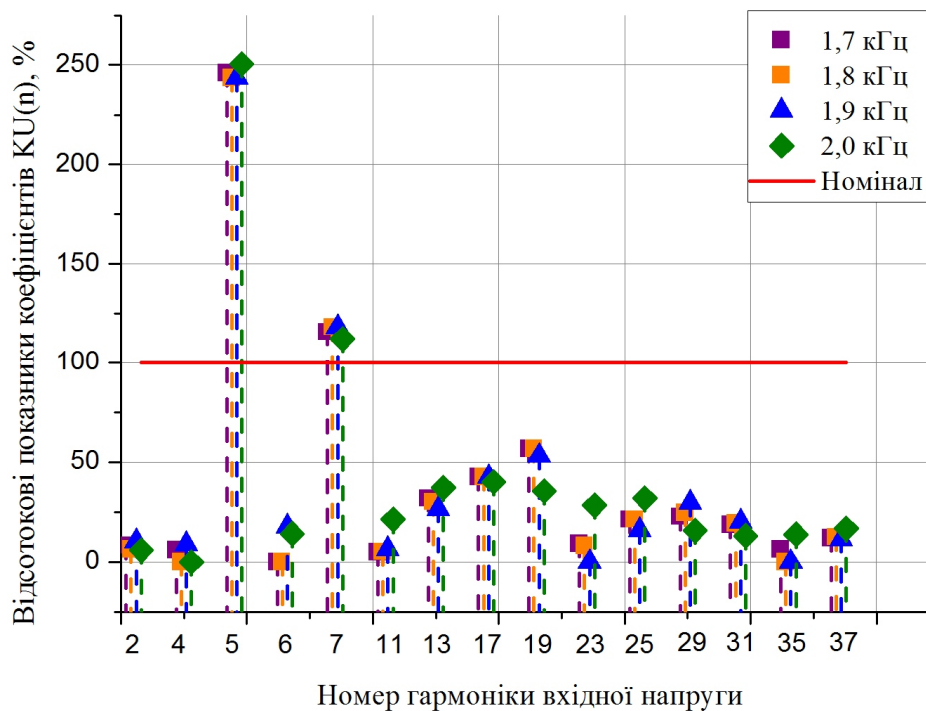
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.16 – Залежності зміни показників  $K_{U(n)}$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при режимі перевантаження

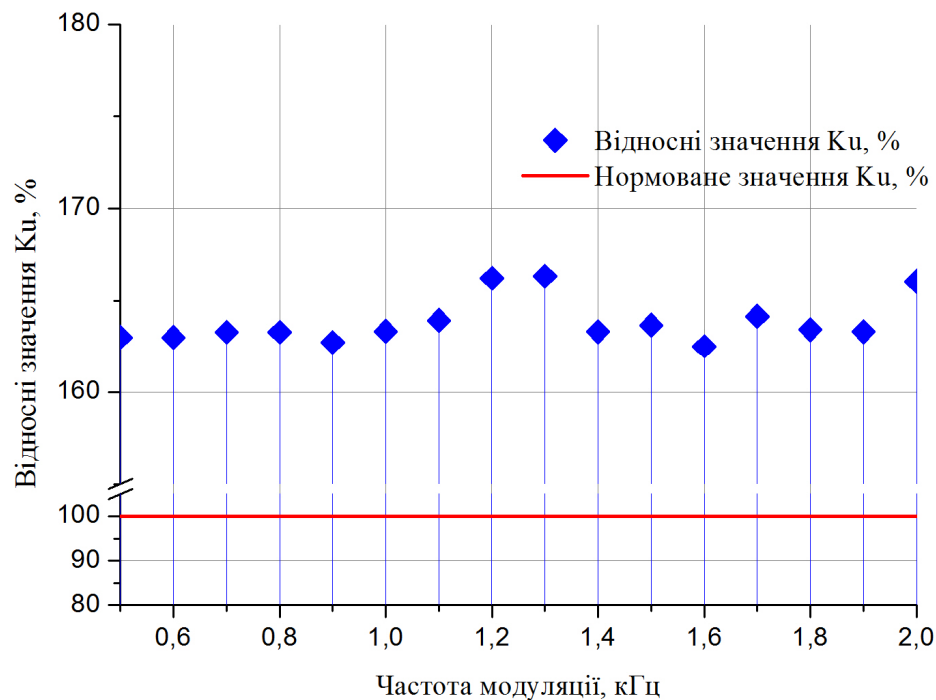
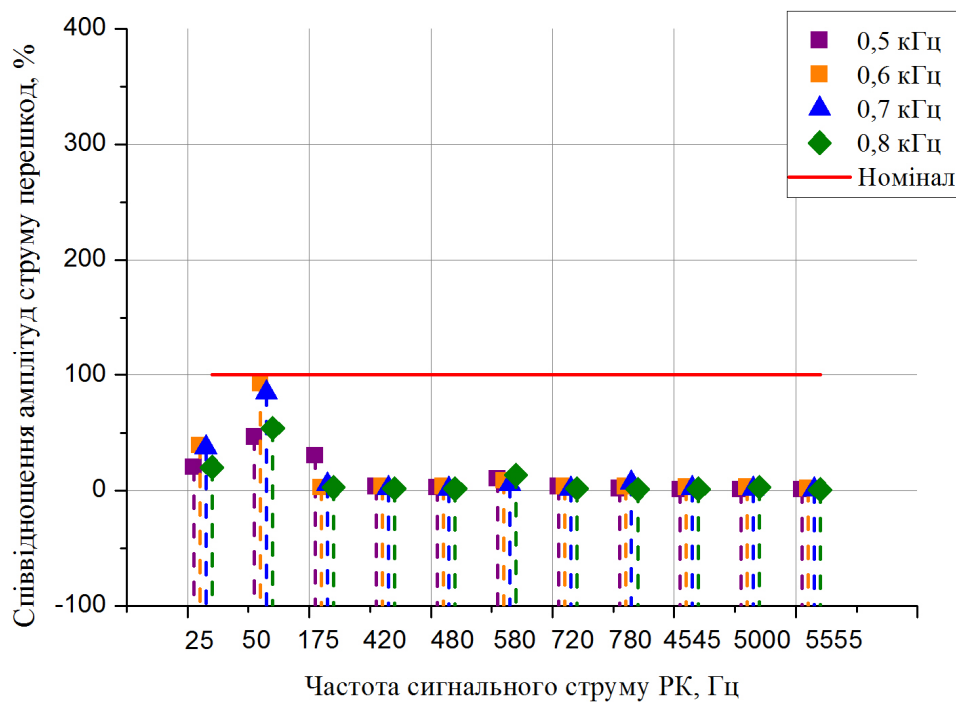
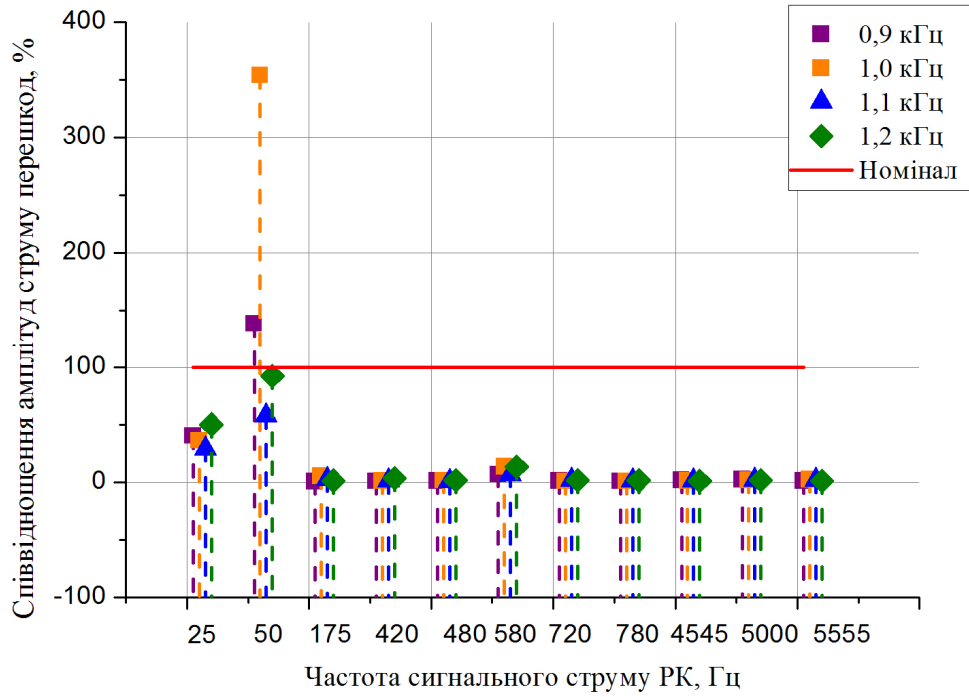


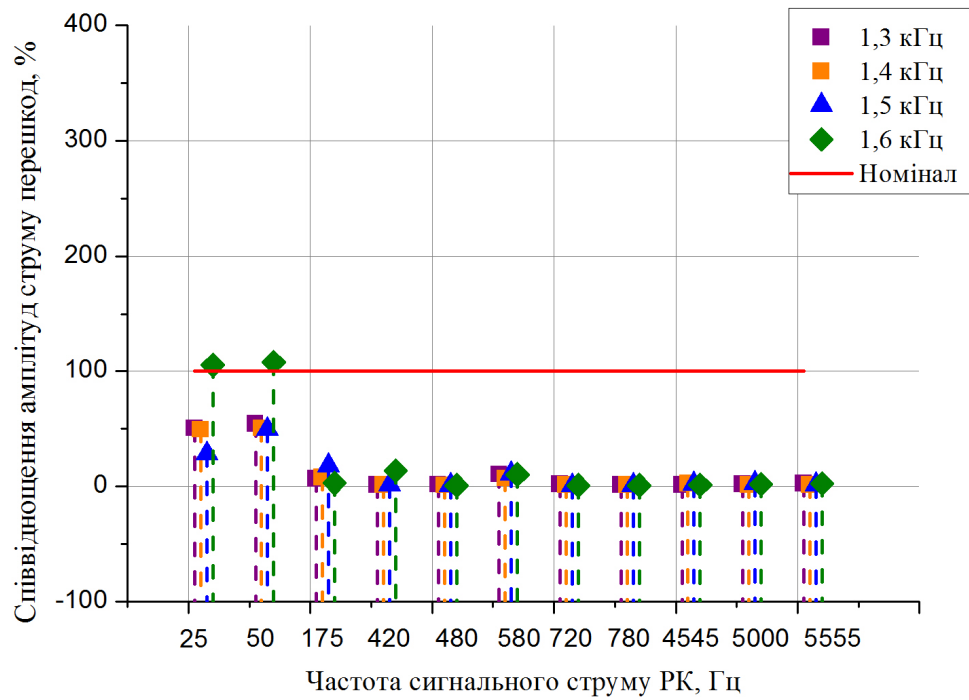
Рисунок 4.17 – Залежності зміни показника  $K_U$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при режимі перевантаження



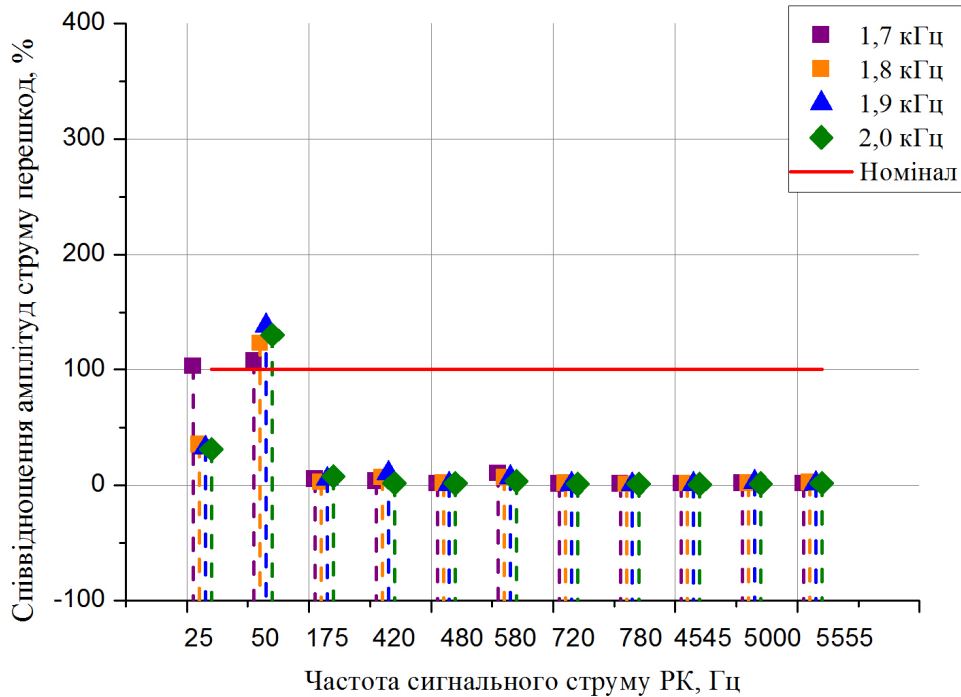
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.18 – Залежності зміни струмів перешкод, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ при режимі перевантаження

За отриманими результатами можна зробити наступні висновки, щодо зміни контрольованих показників ЕМС та ступеню їх поліпшення, в залежності від застосування тієї чи іншої частоти модуляції, при роботі АТЕП ЕРС постійного струму в режимі перевантаження:

– з точки зору мережі зовнішнього електропостачання, серед розглянутого діапазону частот модуляції автором не встановлено такої, за якої б контрольовані показники ЕМС знаходились на прийнятному рівні (не вище нормованих значень). В той же час отримані результати дозволили встановити, що за умови виникнення режиму перевантаження найбільшої зміни, з точки зору коефіцієнтів  $K_{U(n)}$ , зазнають 5-а та 7-а гармоніки, значення даного показника яких досягають рівня 250% та 118% відносно своїх нормованих значень відповідно. Все вище вказане не дозволяє

розробити рекомендації, щодо вибору частоти модуляції, проте визначає необхідність поліпшення процесу енергоперетворення на тягових підстанціях для виключення вказаних складових з гармонійного спектру вхідної напруги.

– з точки зору систем СЦБ, при виникненні режиму перевантаження АТЕП ЕРС постійного струму, найбільш вразливими до дії перешкод є РК, що працюють на частотах сигнального струму 25 Гц та 50 Гц. Відповідно до отриманих результатів, найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції, з вказаними РК за розглянутого режиму роботи, є 0,8 кГц, 1,3 кГц та 1,5 кГц за яких спостерігається зниження відповідних амплітуд струмів перешкод до рівня 20-28% (для РК 25 Гц) та 49-54% (для РК 50 Гц) відносно свої нормованих значень.

#### 4.5 Дослідження випадку відмови складових блоків тягового електроприводу

В якості базового процесу відмови складового блоку електроприводу промодельюємо часткову відмову системи керування силовими вентилями АІН. В даному випадку імітація процесу відмови реалізується, на базі моделі системи керування з ШІМ, шляхом переривання подачі керуючих імпульсів на один з «силових вентилів» блоку Inverter за рахунок додаткового встановлення блоків логічного оператора «И» та таймеру (Timer 3). Видозмінена імітаційна модель, що реалізує вказане вище наведена на рисунку 4.19.

З урахуванням видозмін моделі проведемо аналіз контрольованих процесів у відповідності до попередніх досліджень. Результати аналізу наведено на рисунку 4.20.

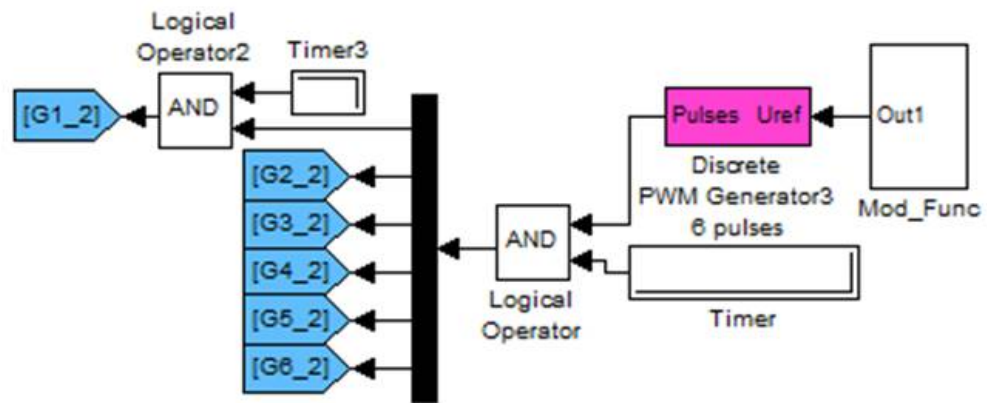
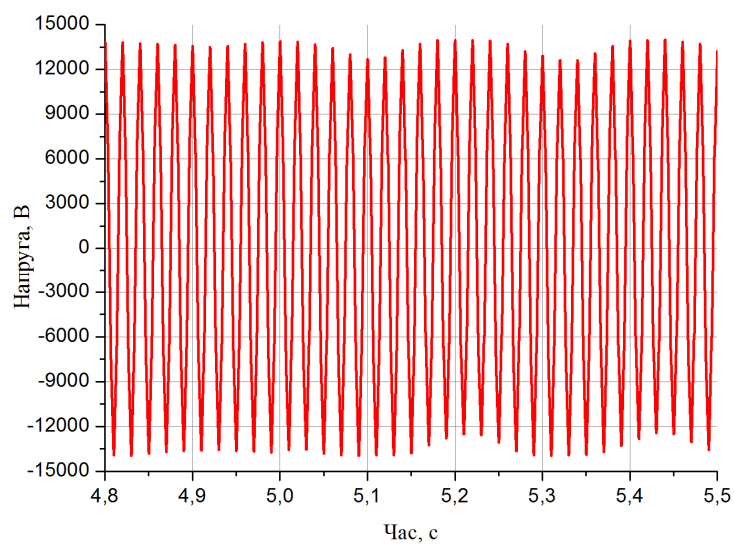
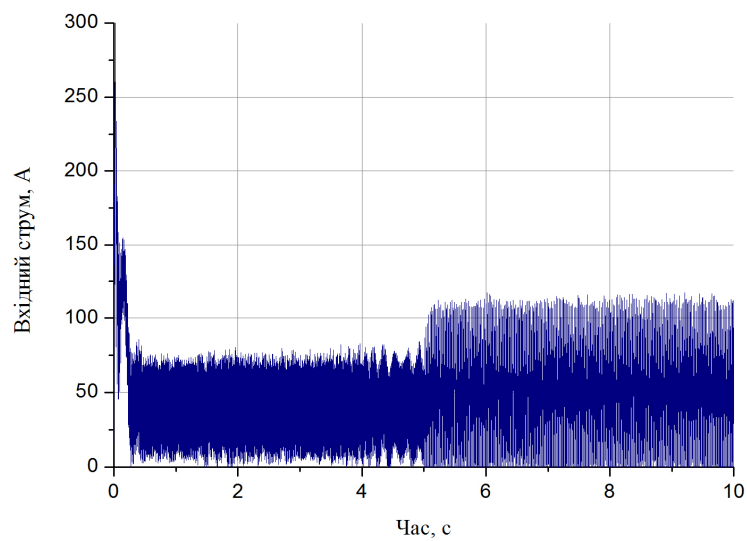


Рисунок 4.19 – Видозмінена імітаційна модель системи керування з ШІМ



а)



б)

Рисунок 4.20 – Результати імітаційного моделювання часткової відмови системи керування за частоти модуляції 0,5 кГц

Як видно з отриманих результатів після відключення одного з «силових вентилів» АІН (на п'ятій секунді) характер зміни контрольованих параметрів різко змінюється. Оскільки до моменту відключення останній не відрізняється від попередньо розглянутого режиму перевантаження в подальшому, при гармонійному аналізі, доцільно розглянути лише ті ділянки осцилограм, що відповідають даному аварійному режиму. Аналіз осцилограми напруги наведено на рисунку 4.21.

Отриманий результат вказує на значне «насичення» гармонійного спектру вхідної напруги системи неканонічними гармоніками, амплітуди яких, за реальних умов, можуть досягати значних величин та, загалом, сприяти погіршенню показників якості електричної енергії [43].

Поточний результат відноситься лише до частоти модуляції 0,5 кГц. З метою здійснення узагальненої оцінки впливу розглянутого режиму, проведемо аналогічні дослідження для частот модуляції діапазону, що лишився. Результати наведено на рисунках 4.21 та 4.22

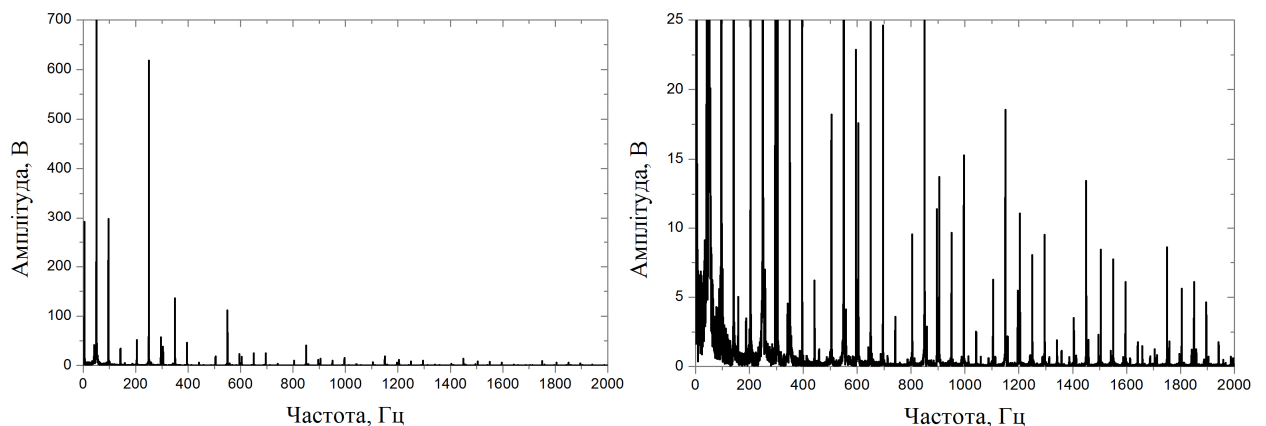


Рисунок 4.20 – Аналіз осцилограми напруги для частоти модуляції 0,5 кГц за часткової відмови системи керування

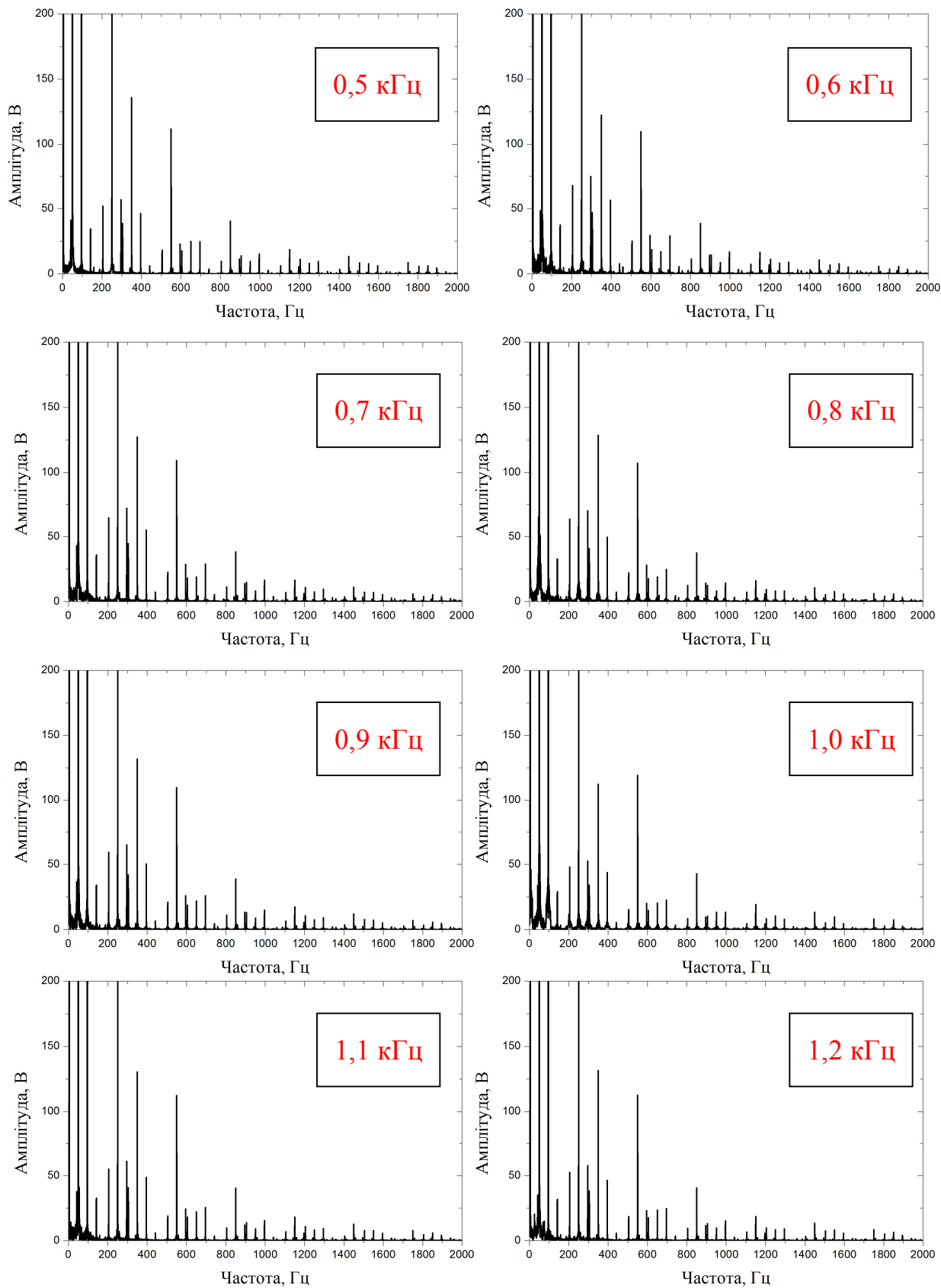


Рисунок 4.21 – Узагальнені результати гармонійного аналізу вхідної напруги за часткової відмови системи керування для частот модуляції 0,5-1,2 кГц

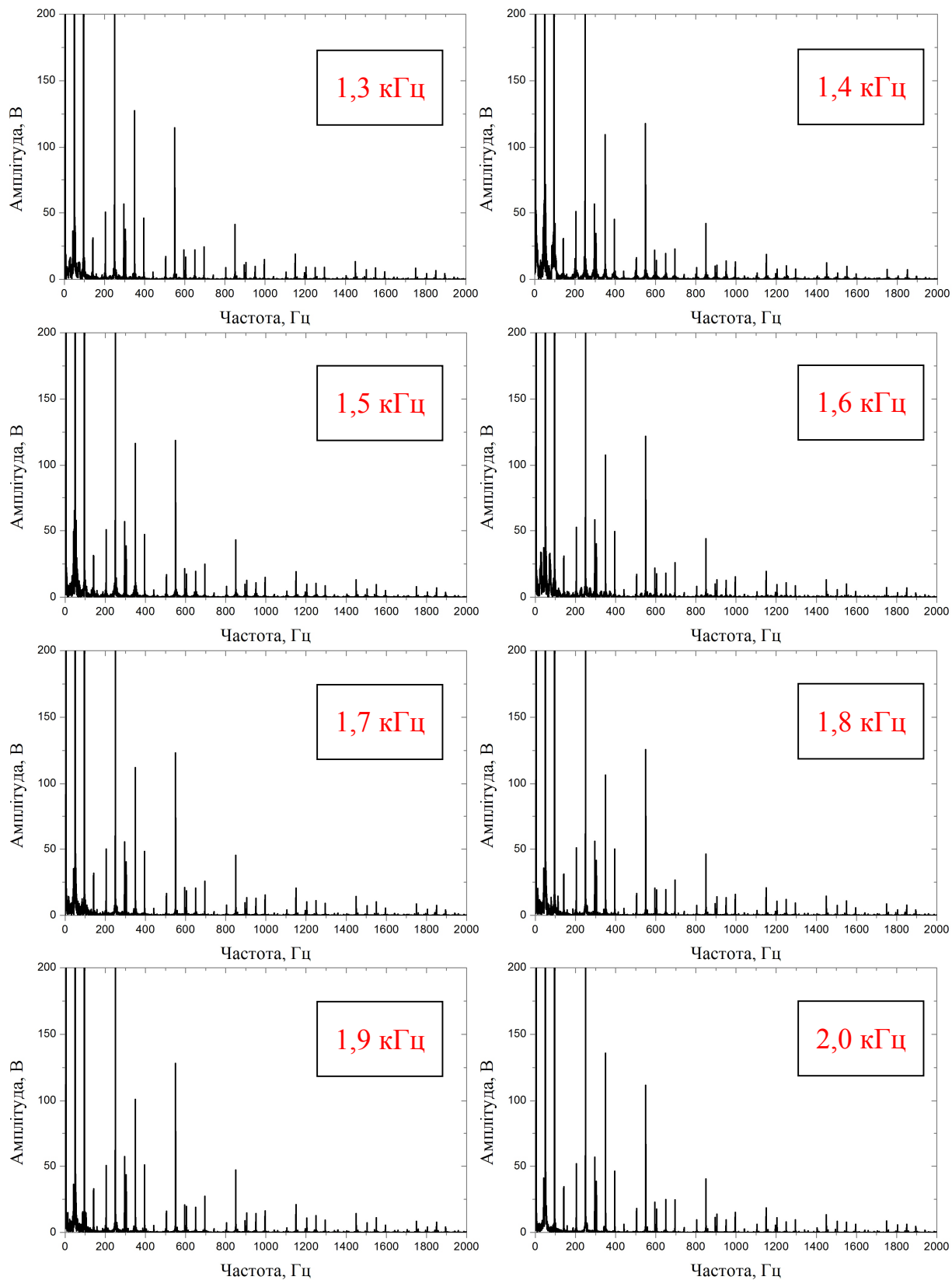


Рисунок 4.22 – Узагальнені результати гармонійного аналізу вхідної напруги за часткової відмови системи керування для частот модуляції 1,3-2 кГц

Аналогічно до осцилограми напруги здійснено аналіз осцилограми струму (рис. 4.23).

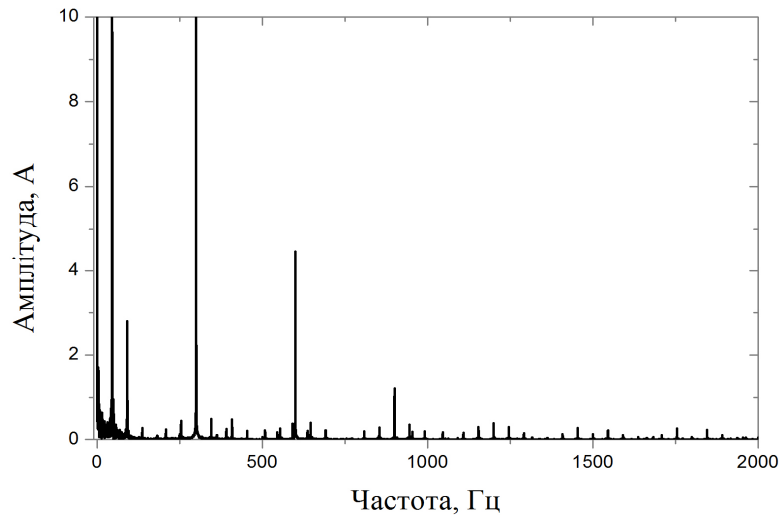
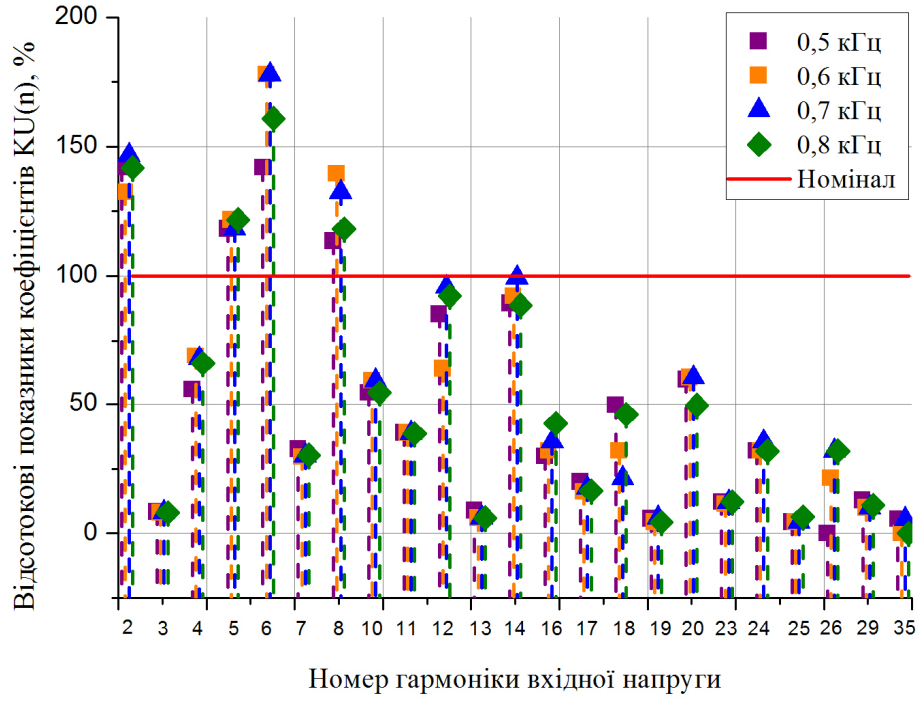


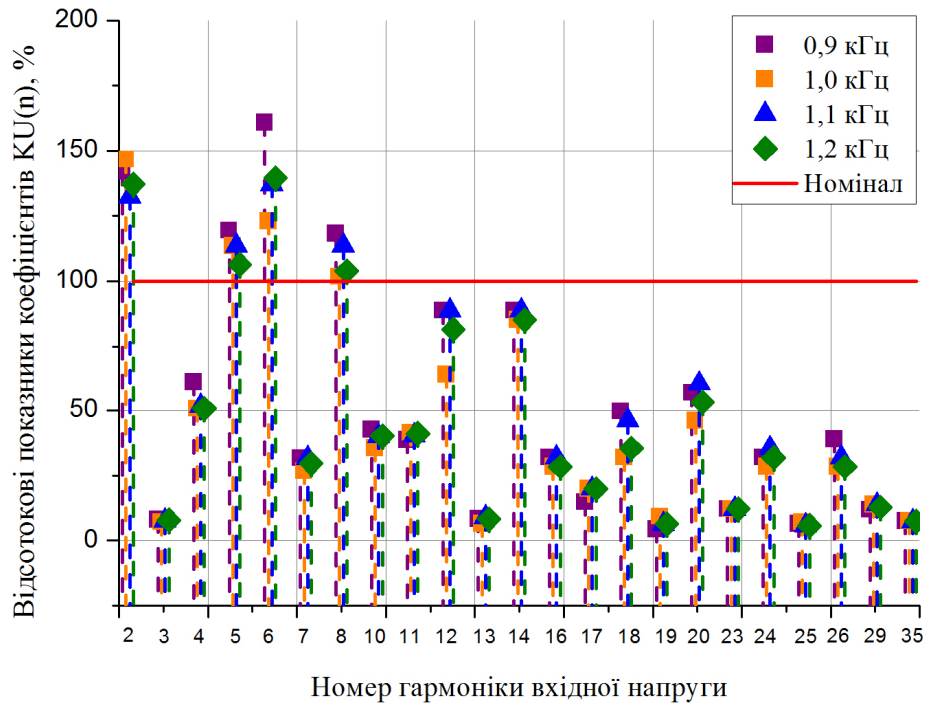
Рисунок 4.23 – Аналіз осцилограми струму для частоти модуляції 0,5 кГц за часткової відмови системи керування

Залежності, що характеризують поліпшення контрольованих показників ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму, для розглянутого режиму часткової відмови системи керування, наведені на рисунках 4.24-4.26.

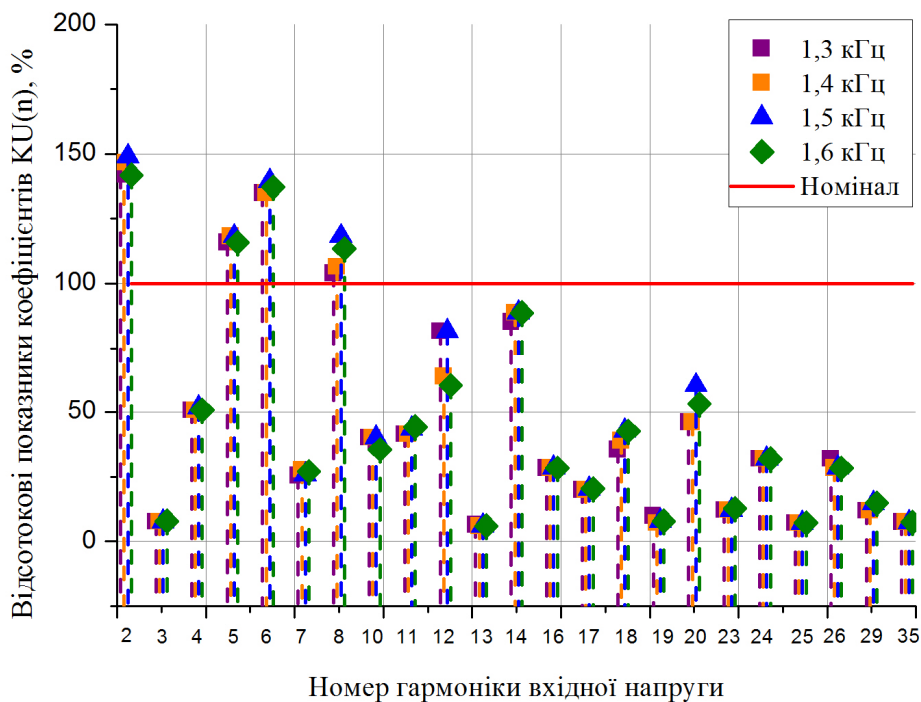
Аналіз отриманих залежностей дозволяє вказати, що режим часткової відмови системи керування тяговим перетворювачем ЕРС з АТЕП постійного струму є потенційно найвпливовішим режимом з точки зору контрольованих показників ЕМС для мереж зовнішнього електропостачання. Його виникнення призводить до розширення спектру вищих гармонійних складових, що супроводжується відповідним погіршенням коефіцієнтів  $K_U$  та  $K_{U(n)}$  (до рівнів 150% відносно нормованих значень).



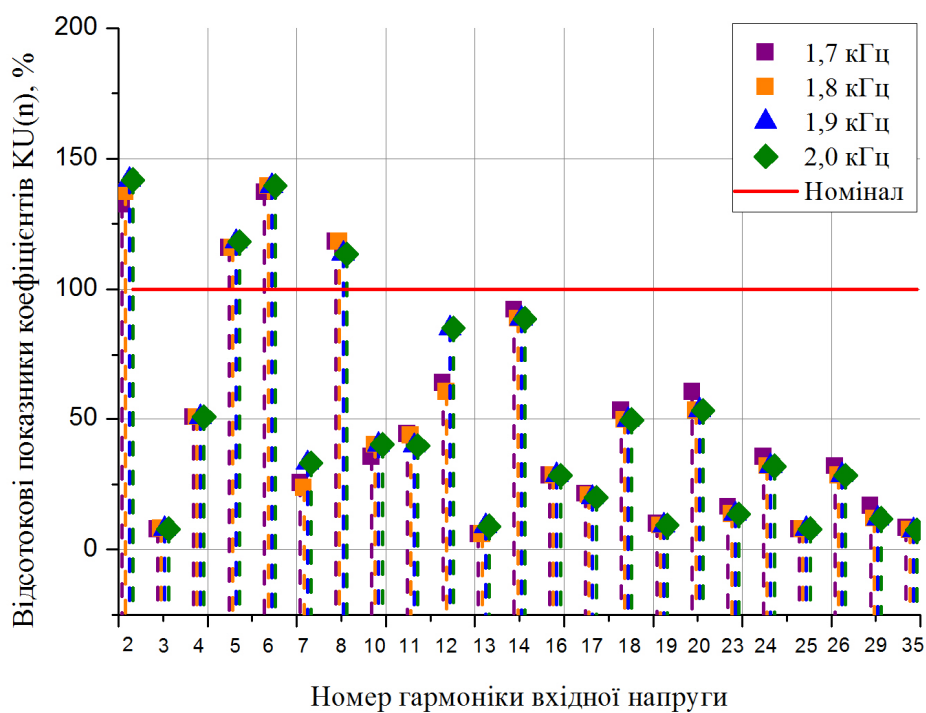
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.24 – Залежності зміни показників  $K_{U(n)}$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при режимі часткової відмови системи керування

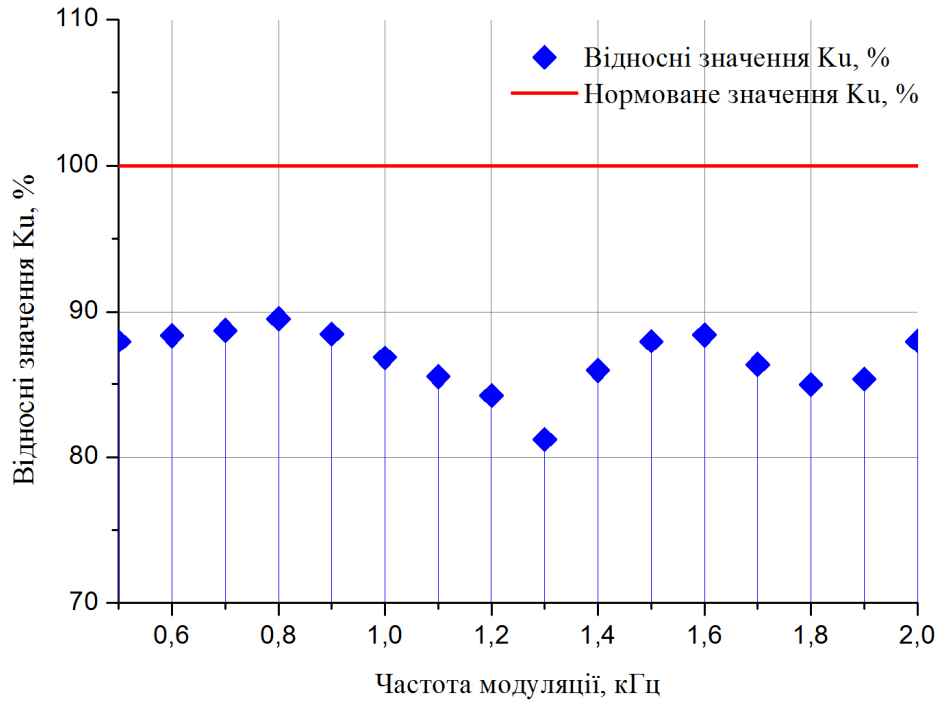
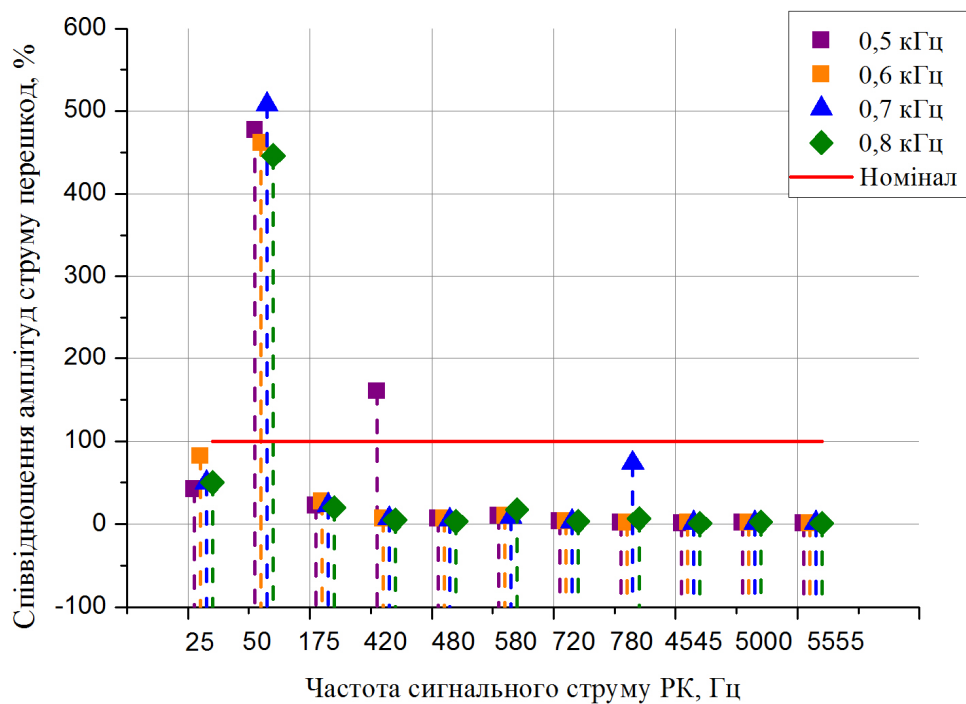
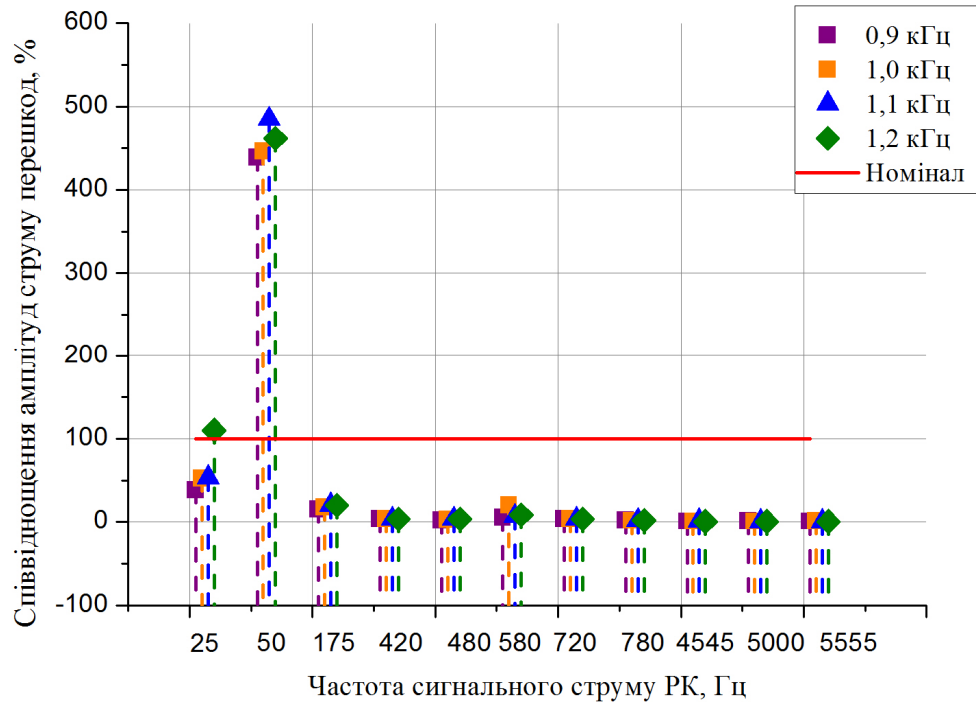


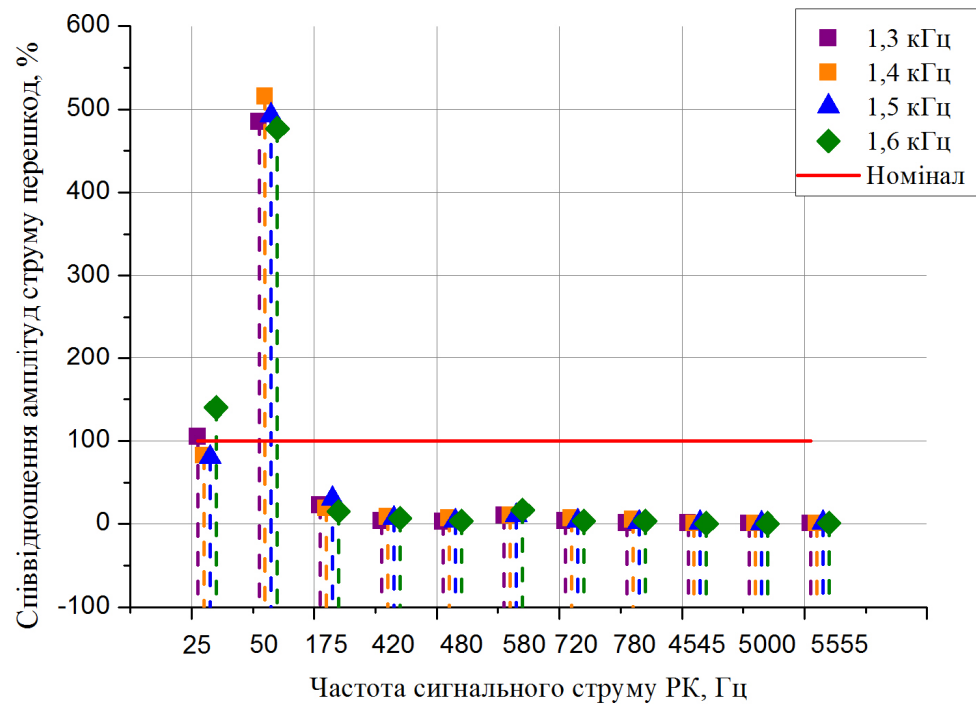
Рисунок 4.25 – Залежності зміни показника  $K_U$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при режимі часткової відмови системи керування



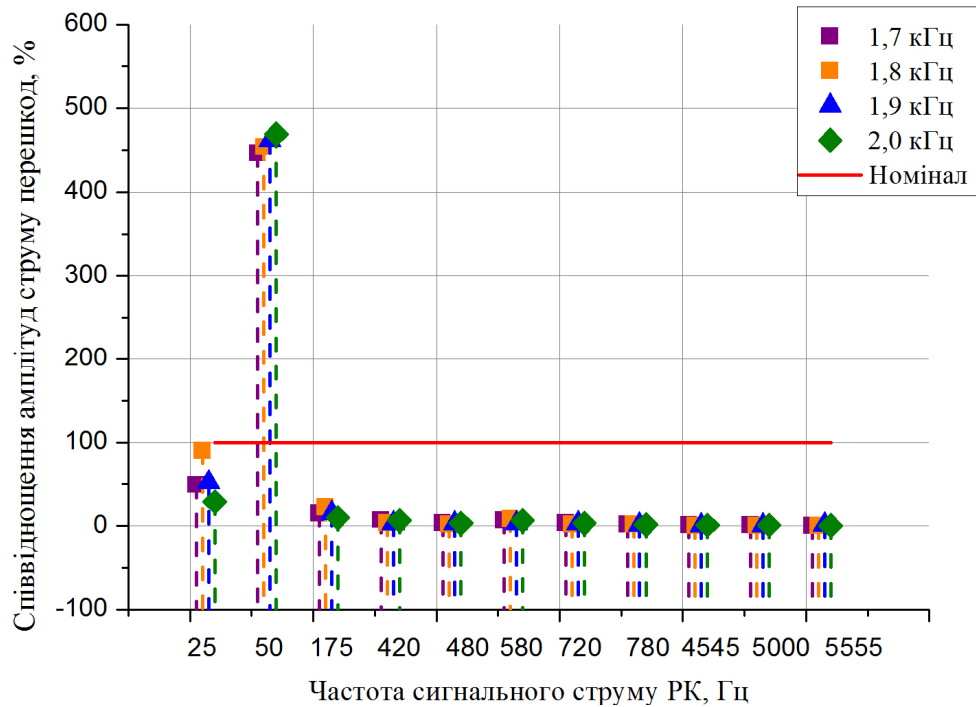
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.26 – Залежності зміни струмів перешкод, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ при режимі часткової відмови системи керування

Як показали дослідження за даного ненормального режиму зміною частоти модуляції можливо досягти суттєвого потенційного поліпшення лише одного з контрольованих показників ЕМС – коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ . З цієї точки зору найбільш рекомендованою до застосування частотою модуляції є 1,3 кГц за якої спостерігається потенційне поліпшення вказаного показника до рівня 81% відносно свого нормованого значення.

Щодо систем СЦБ вплив даного ненормального режиму, у порівнянні з режимом перевантаження, обмежується суттєвим зростанням амплітуди гармоніки з частотою 50 Гц – до рівня 500% відносно нормованого значення. При цьому зміна частоти модуляції, у межах розглянутого діапазону 0,5-2 кГц, не призводить до суттєвих змін амплітуди даної гармоніки, у зв'язку з чим рекомендації щодо поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з

системами СЦБ обмежуються необхідністю здійснення відповідних налаштувань фільтрів, або застосування РК з іншими робочими частотами сигнального струму.

#### 4.6 Дослідження впливу явища комутаційної асиметрії

Для обмеження перехідних перенапруг, що спостерігаються при комутації силових вентилів АІН, в більшості випадків застосовуються спеціальні снабберні конденсатори, що розміщені безпосередньо у структурі IGBT-модулю [113, 114]. Правильність розрахунку та підбору складових елементів снабберного кола багато в чому визначає комутаційні можливості не лише кожного з силових ключів, за рахунок зниження динамічних втрат, а й перетворювача в цілому.

Одним з показників правильності підбору параметрів та коректного функціонування снабберних кіл є зниження амплітуд небажаних пульсацій струму та напруги та, як наслідок, кондуктивного та індуктивного впливу на суміжні системи [114].

Тривала експлуатація та вплив аварійних режимів роботи тягового електрообладнання можуть бути причиною відхилення параметрів останнього від номінальних, в тому числі параметрів снабберних кіл силових вентилів АІН. Відповідно до вказаного вище це може спричинити погіршення показників електромагнітної сумісності досліджуваних систем, аналіз яких, за вказаних умов, і буде здійснено в подальшому.

Для імітації процесів комутаційної асиметрії здійснимо зміну параметрів снабберних кіл «силових вентилів» блоку Invertor1 імітаційної моделі силової частини АТЕП (рис. 4.4) на 50%, відповідно: IGBT1 – для імітації позиційної асиметрії; IGBT1, IGBT3, IGBT5 – для імітації верхньої/нижньої асиметрії.

Результати аналізу контрольованих процесів для кожного з видів асиметрії, відповідно до передумов проведення досліджень, наведені на рисунках 4.27, 4.28.

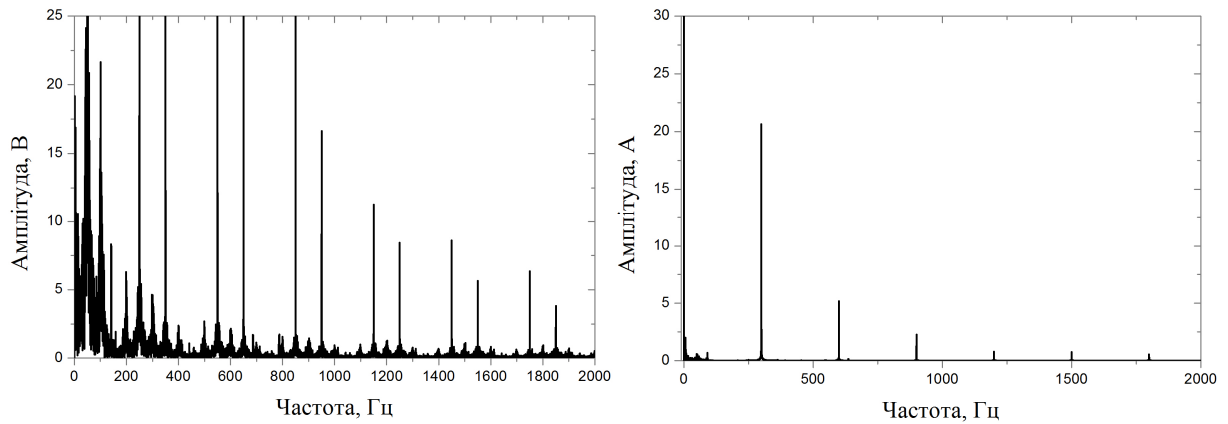


Рисунок 4.27 – Результати аналізу контрольованих процесів у випадку наявності позиційної асиметрії

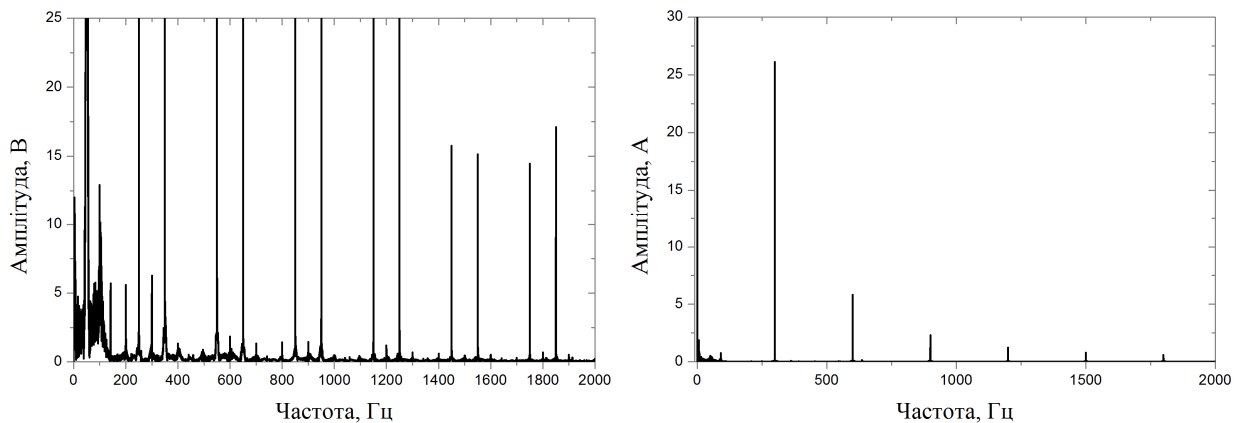


Рисунок 4.28 – Результати аналізу контрольованих процесів у випадку наявності верхньої/нижньої асиметрії

Як видно з отриманих результатів гармонійний спектр вхідної напруги, у порівнянні з режимом перевантаження, змінюється мало. Здебільшого зміни стосуються амплітуд неканонічних гармонік, генерованих випрямлячами тягових підстанцій – в данному випадку  $n = 6k \pm 1$ , де  $k = 1, 2, 3, \dots$ . У зв'язку з цим, для мереж зовнішнього електропостачання подальший аналіз зміни контрольованих показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму, при

наявності комутаційної асиметрії, пропонується здійснювати опираючись лише на амплітуди даних гармонійних складових. Результати аналізу, у вигляді залежностей зміни контрольованих показників  $K_U$  та  $K_{U(n)}$ , наведені на рисунках 4.29-4.32.

З отриманих результатів можна зробити висновки, що з точки зору мережі зовнішнього електропостачання вплив розглянутих явищ комутаційної асиметрії силових ключів тягового перетворювача АТЕП ЕРС постійного струму на показники ЕМС, з урахуванням попередніх результатів, є незначним. Головним чином його здійснюють випрямлячі тягових підстанцій, що, в даному випадку, генерують вищі гармонійні складові порядку  $n = 6k \pm 1$ .

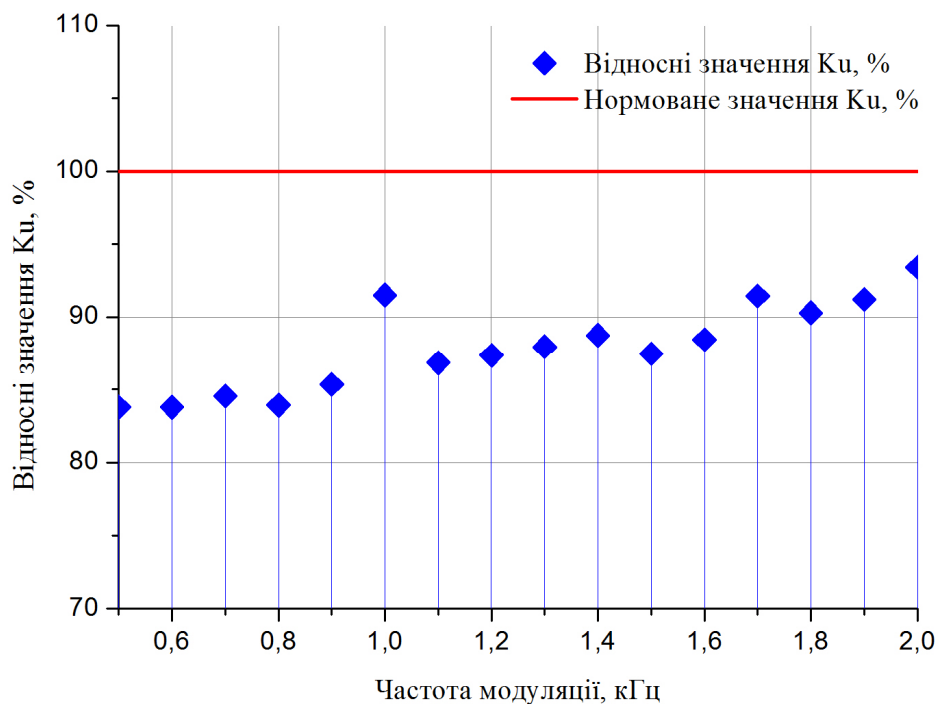
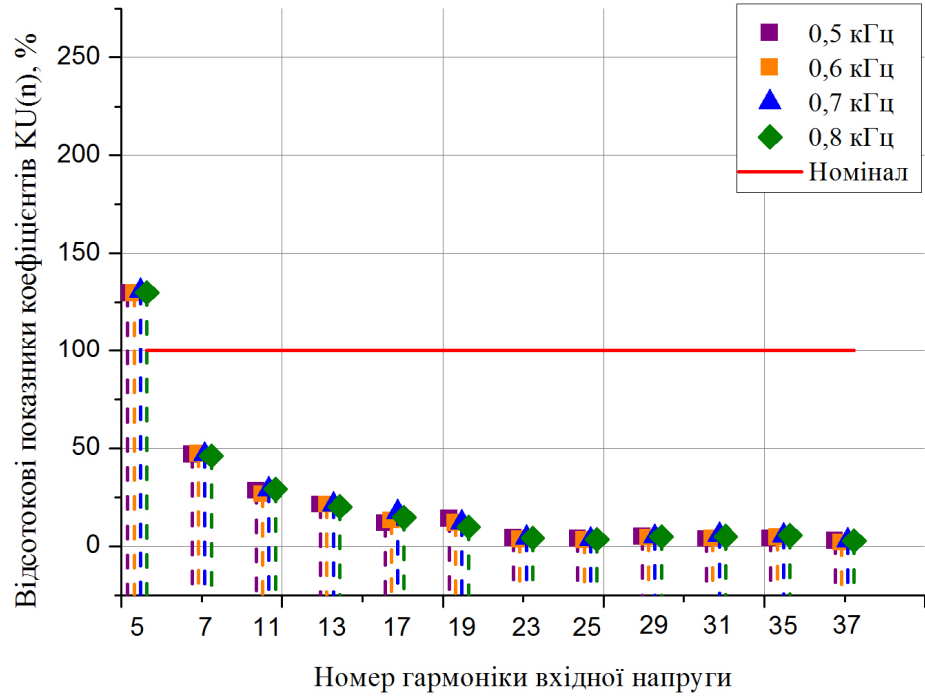
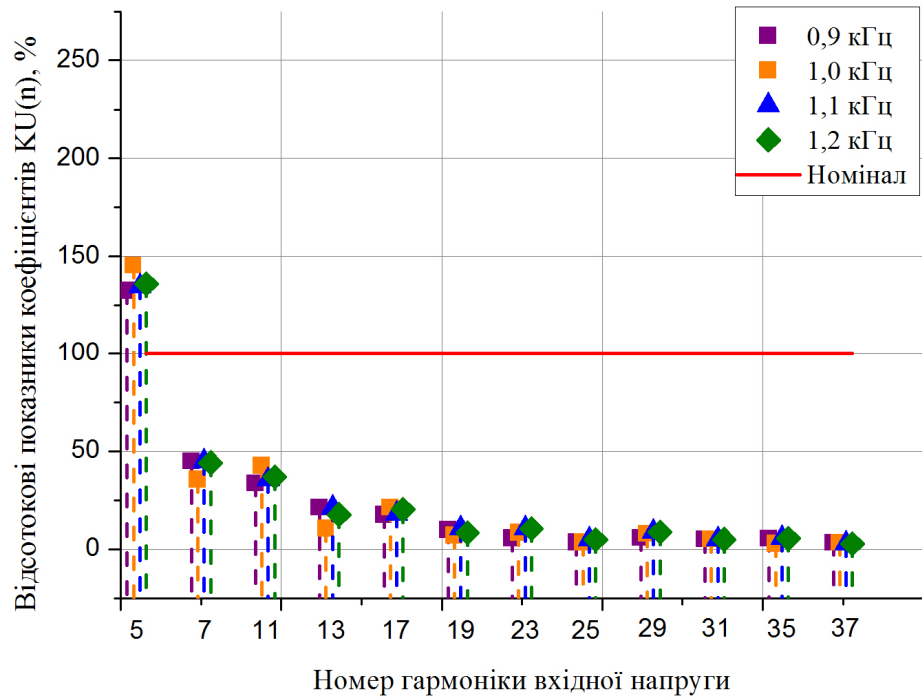


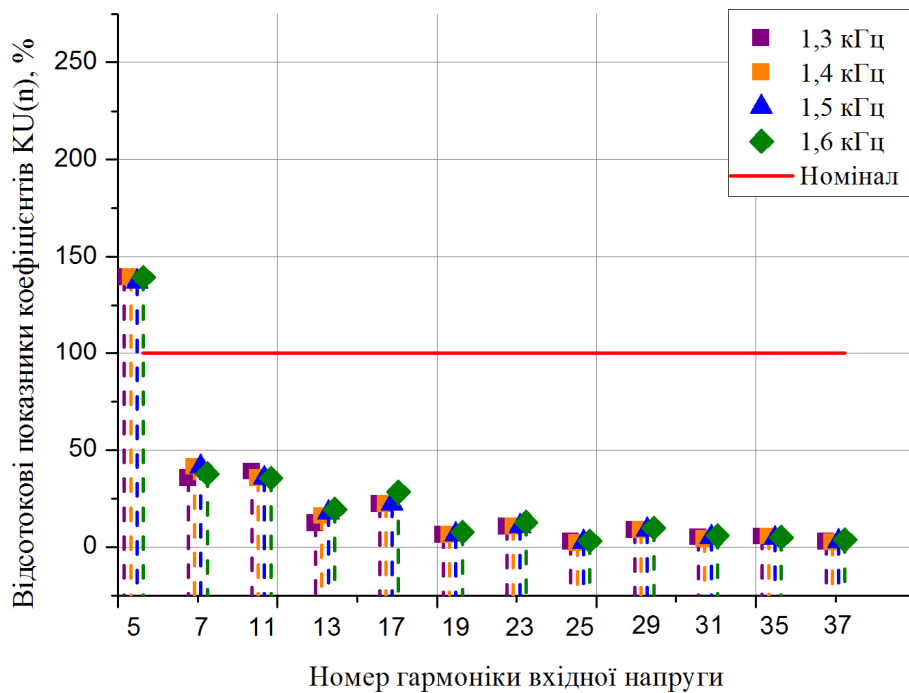
Рисунок 4.29 – Залежності зміни показника  $K_U$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при наявності позиційної асиметрії



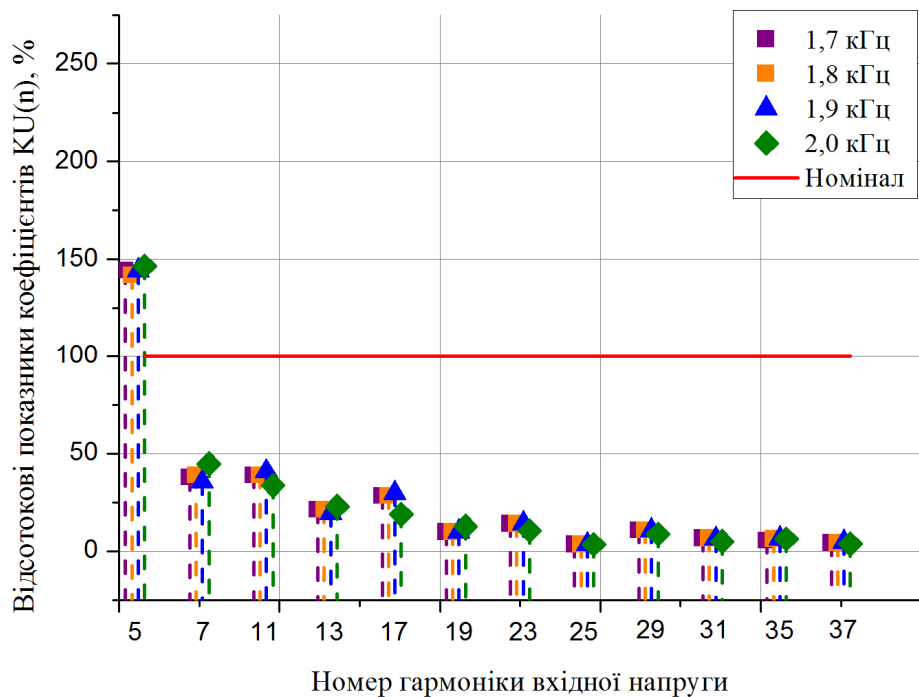
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.30 – Залежності зміни показника  $K_{U(n)}$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при наявності позиційної асиметрії.

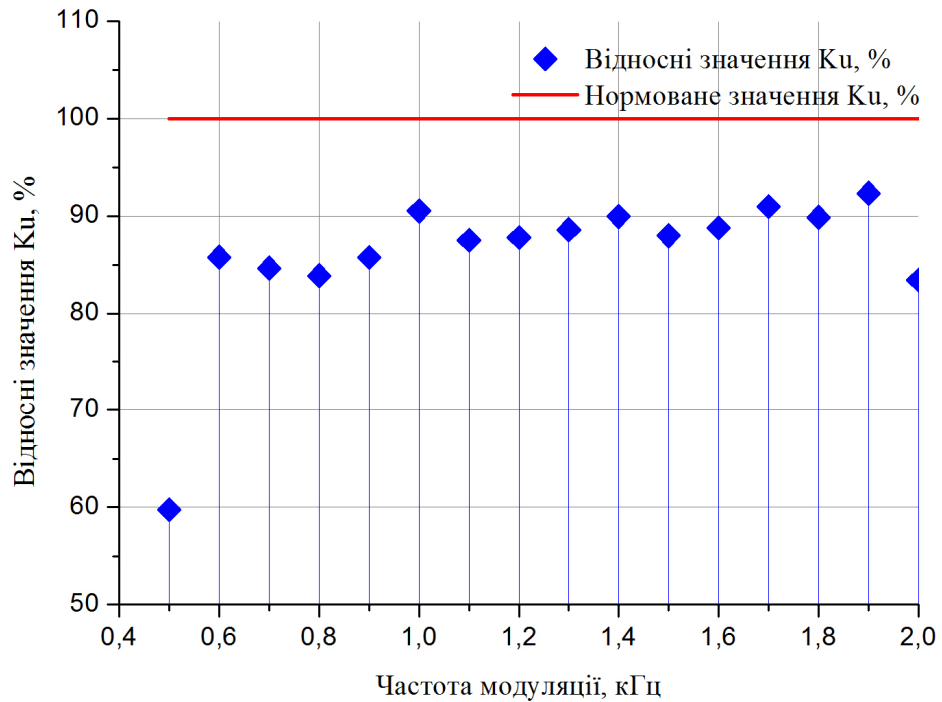
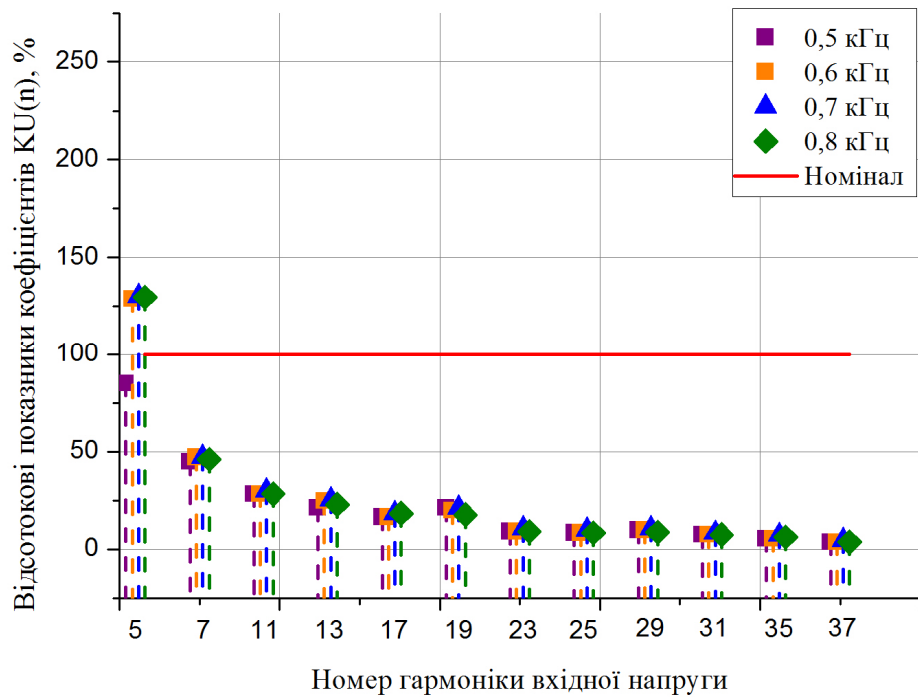
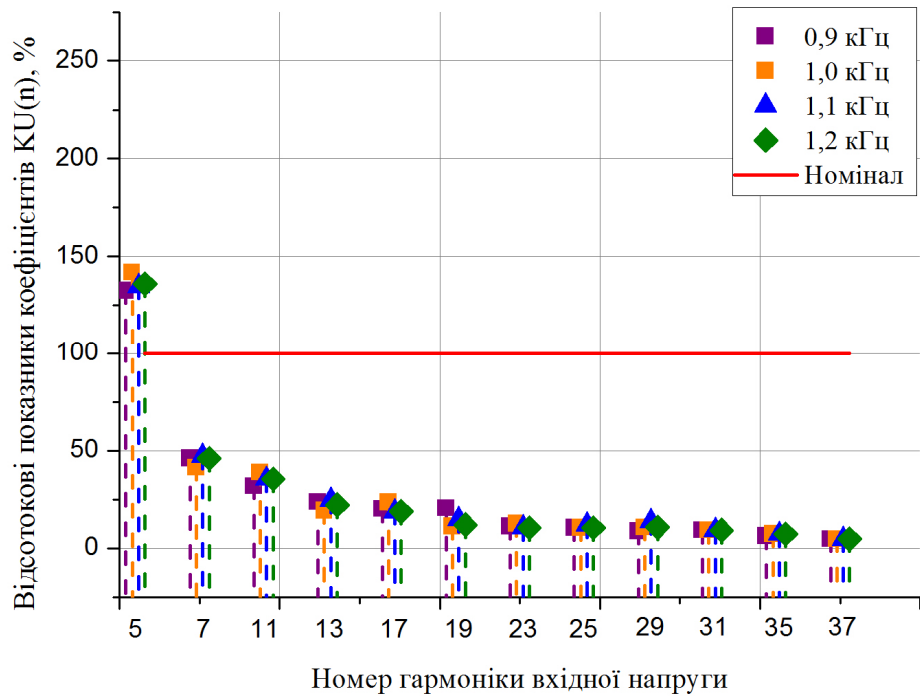


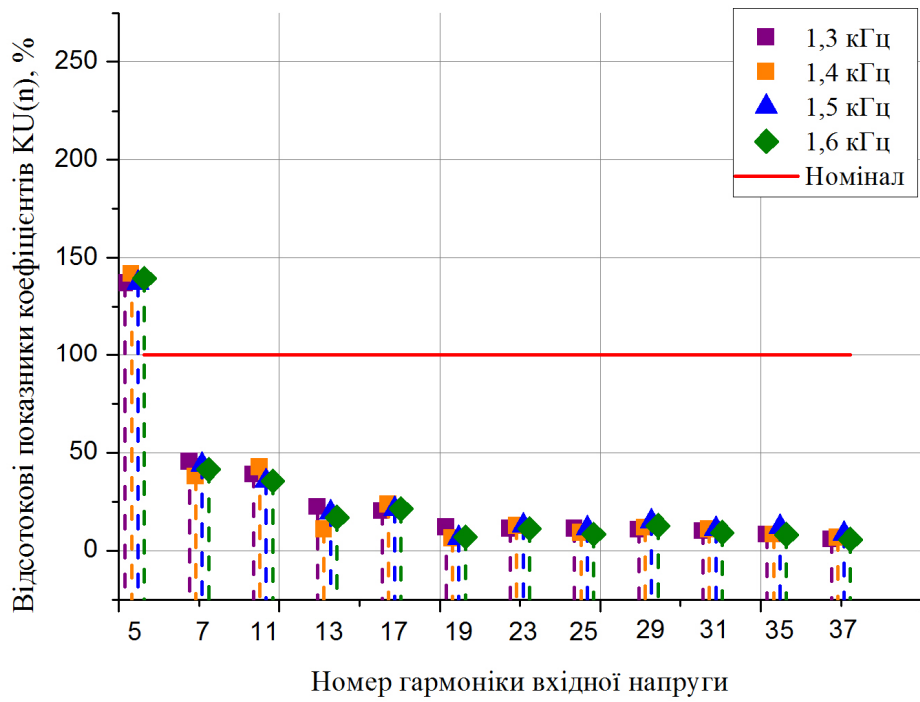
Рисунок 4.31 – Залежності зміни показника  $K_U$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при наявності верхньої/нижньої асиметрії



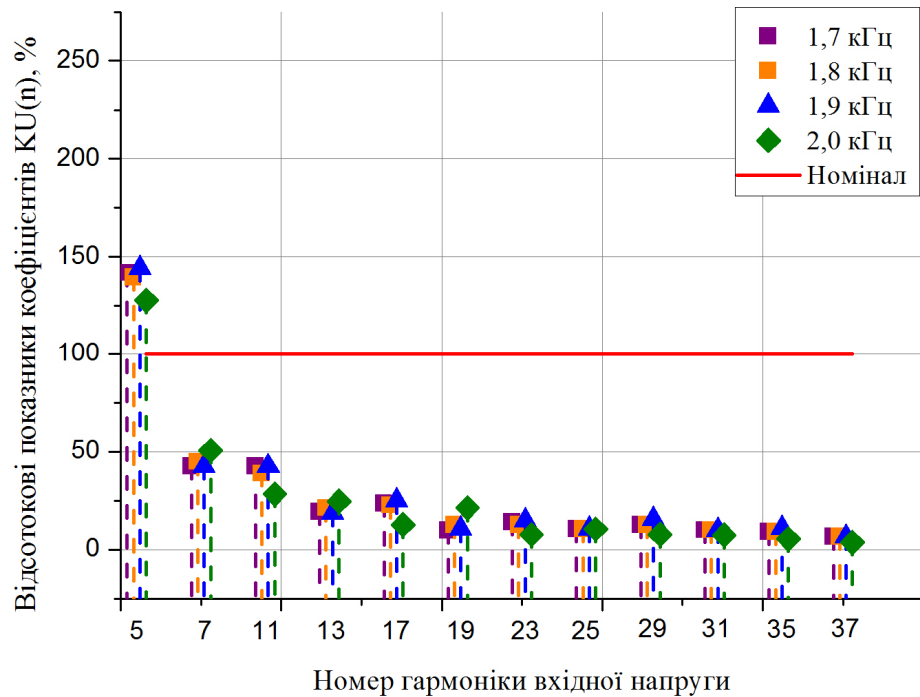
а)



б)



в)



г)

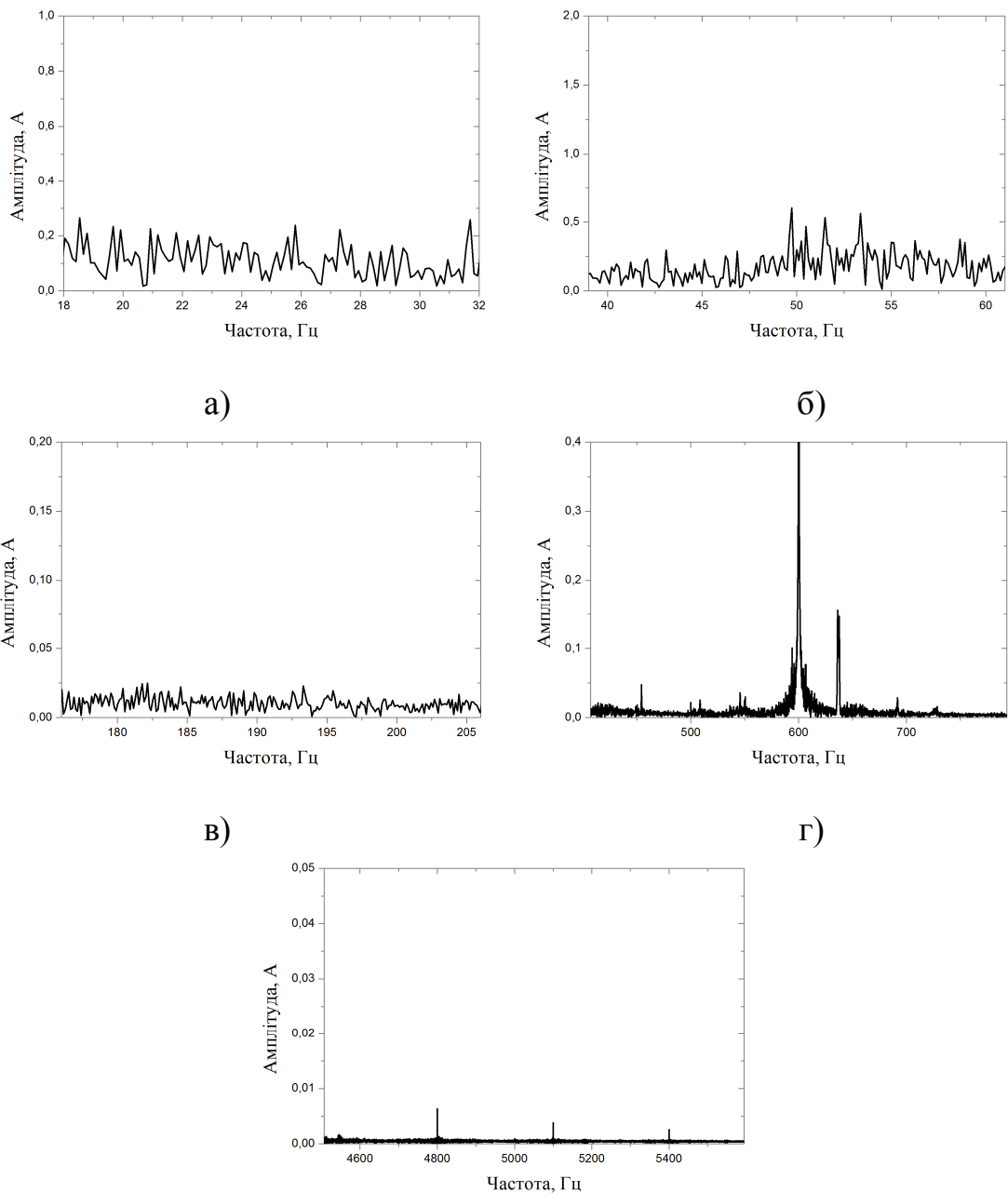
Рисунок 4.32 – Залежності зміни показника  $K_{U(n)}$ , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання при наявності верхньої/нижньої асиметрії.

Продовжуючи аналіз можна вказати, що характер такого впливу, а отже і відповідні показники ЕМС, можуть змінюватись в залежності від виду комутаційної асиметрії та значення частоти модуляції, що підтверджується отриманими залежностями. З цієї точки зору доцільно застосовувати більш низьку частоту модуляції. З цієї точки зору найбільш рекомендованою до застосування є частота модуляції 0,5 кГц за якої спостерігається потенційне поліпшення контрольованих показників ЕМС з мережею зовнішнього електропостачання до рівнів:

- 75% (коефіцієнт  $K_U$ ) відносно нормованих значень при позиційній асиметрії;

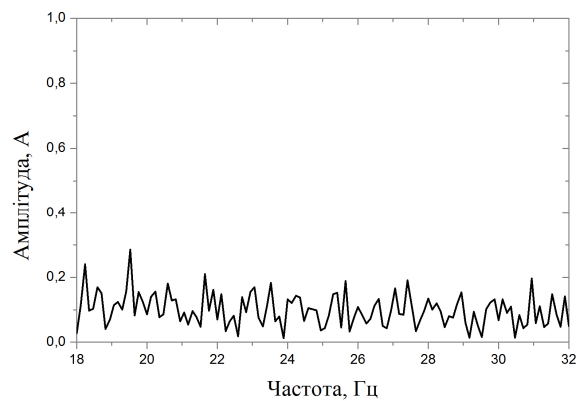
- 60% (коефіцієнт  $K_U$ ) та 81% (коефіцієнт  $K_{U(n)}$ ) відносно нормованих значень при комутаційній асиметрії.

Для систем СЦБ аналіз поліпшення показників ЕМС, у вигляді зміни амплітуд струмів перешкод, здійснено для РК з частотами сигнального струму 50 Гц та 25 Гц, які, за результатами попереднього аналізу (рис. 4.33, 4.34), зазнають найбільшого впливу АТЕП ЕРС постійного струму при виникненні явищ комутаційної асиметрії.

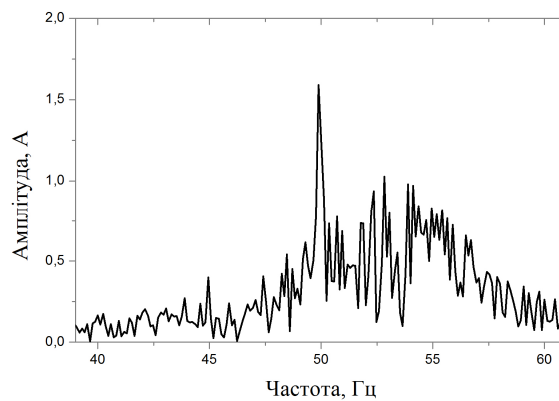


д)

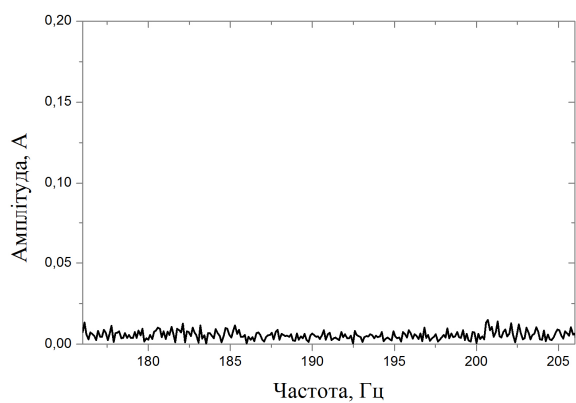
Рисунок 4.33 – Результати попереднього аналізу осцилограми струму за наявності позиційної асиметрії



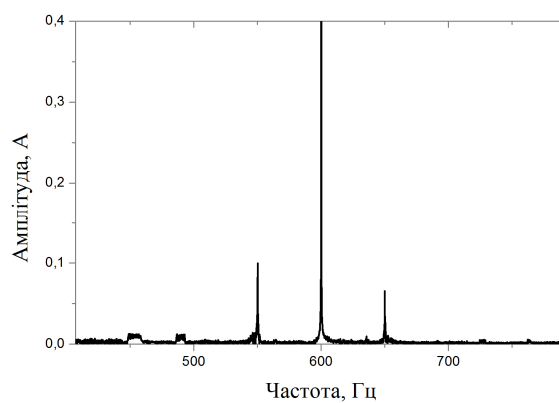
а)



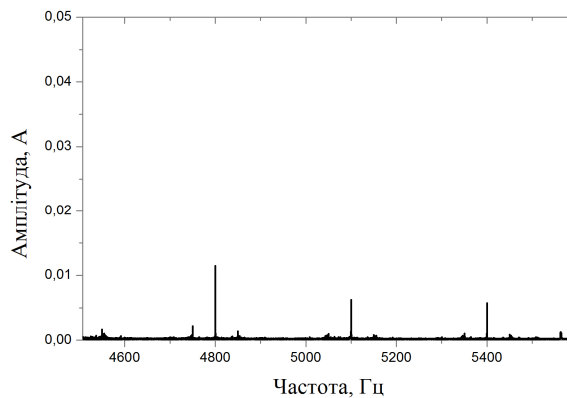
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.34 – Результати попереднього аналізу осцилограми струму за наявності верхньої/нижньої асиметрії

На рисунках 4.33, 4.34:

- а) – смуга частот пропускання сигнального струму 25 Гц;
- б) – смуга частот пропускання сигнального струму 50 Гц;

- в) – смуга частот пропускання сигнального струму 175 Гц;
- г) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-3;
- д) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-4;

Залежності, що характеризують зміну амплітуд струмів перешкод для відокремлених вище РК, а відповідно і ступінь поліпшення їх ЕМС з тяговим перетворювачем АТЕП ЕРС постійного струму, за умови виникнення явищ комутаційної асиметрії, наведено на рисунках 4.35, 4.36.

Згідно останніх залежностей для систем СЦБ, на відміну від мережі зовнішнього електропостачання, в умовах виникнення будь якої, з розглянутих, комутаційної асиметрії найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції є 0,8 кГц, 1,1 кГц, 1,5 кГц та 2 кГц. За цих значень частот спостерігається потенційне поліпшення контрольованих показників ЕМС, з точки зору зниження контрольованих амплітуд струмів перешкод, до рівня 42%-50% відносно своїх нормованих значень.

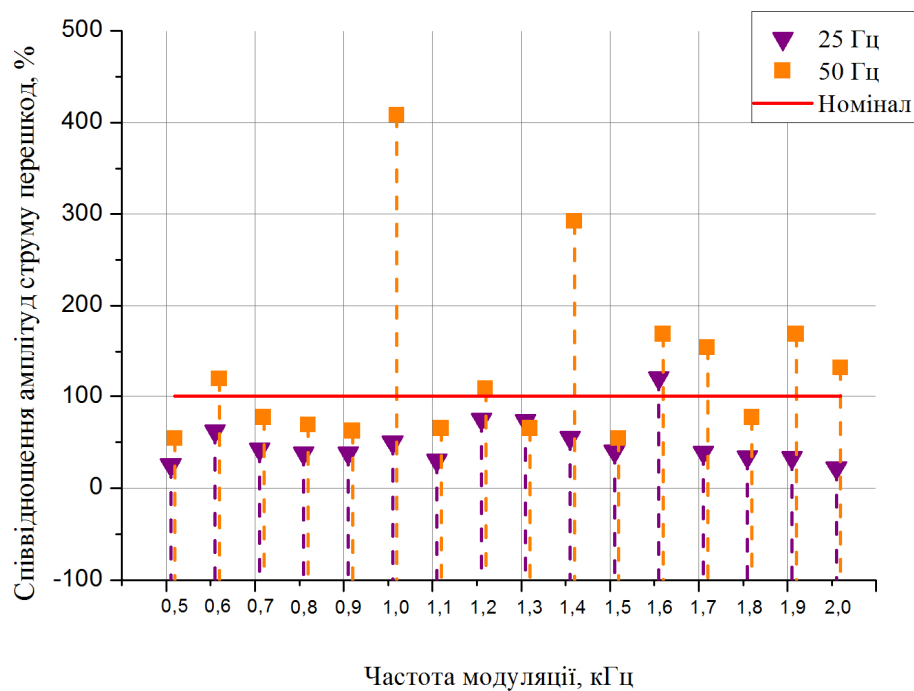


Рисунок 4.35 – Залежності зміни струмів перешкод, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ за наявності позиційної асиметрії

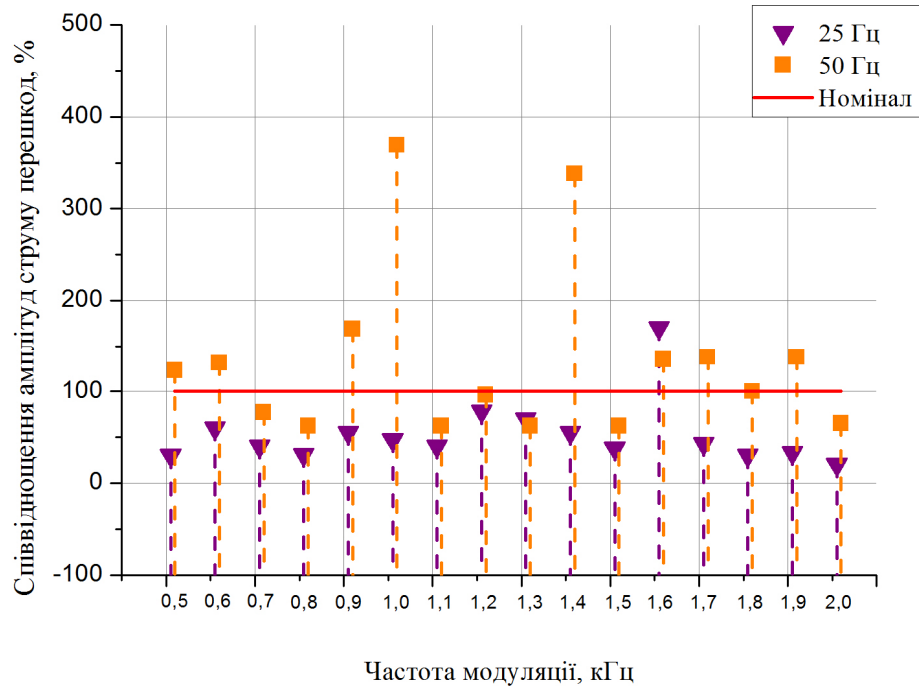


Рисунок 4.36 – Залежності зміни струмів перешкод, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ за наявності верхньої/нижньої асиметрії

Оскільки, серед наведених рекомендованих значень частот модуляції, з точки зору взаємодії перетворювача АТЕП ЕРС постійного струму з системами СЦБ, відсутня та, що є найбільш рекомендованою з точки зору взаємодії з мережею зовнішнього електропостачання у випадку виникнення розглянутих явищ комутаційної асиметрії можливо рекомендувати частоту модуляції 0,8 кГц. Її застосування призводить до потенційного погіршення, за будь якого, з розглянутих видів комутаційної асиметрії, лише одного з контрольованих показників ЕМС – коефіцієнту  $K_{U(n)}$  для п'ятої гармоніки вхідної напруги (до рівня 130% відносно нормованого значення), уникнути якого можливо за рахунок покращення процесу енергоперетворення на тягових підстанціях.

#### 4.7 Висновки до четвертого розділу

За результатами імітаційного моделювання неномінальних режимів роботи АТЕП ЕРС постійного струму можна зробити відповідні висновки, щодо зміни контрольованих показників ЕМС та ступеню їх поліпшення за рахунок відповідного вибору частоти модуляції:

1. З точки зору взаємодії АТЕП ЕРС постійного струму з системами СЦБ, при виникненні режиму перевантаження, найбільш вразливими до дії перешкод є РК з робочими частотами сигнального струму 25 Гц та 50 Гц. З цієї точки зору, за розглянутого режиму роботи АТЕП, найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції є 0,8 кГц, 1,3 кГц та 1,5 кГц за яких спостерігається зниження відповідних амплітуд струмів перешкод до рівня 20-28% (для РК 25 Гц) та 49-54% (для РК 50 Гц) відносно свої нормованих значень.

2. При виникненні режиму часткової відмови системи керування, серед розглянутого діапазону частот модуляції не виявлено такої, яка б задовольняла умовам безперешкодної роботи розглянутих РК. У зв'язку з цим рекомендації щодо можливості поліпшення контрольованих показників ЕМС є узагальненими та обмежуються необхідністю здійснення відповідних налаштувань фільтрів тягових підстанцій, або застосування РК з іншими робочими частотами сигнального струму.

3. З точки зору взаємодії АТЕП ЕРС постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання, як при режимі перевантаження так і при режимі часткової відмови системи керування, частоти модуляції, яка була б прийнятною до застосування, з точки зору поліпшення контрольованих показників ЕМС встановлено не було. Єдиною частотою, за якої спостерігається відносне потенційне поліпшення лише показника  $K_U$  (до рівня 81% відносно нормованого значення) є 1,3 кГц, проте вважати її рекомендованою до застосування не доцільно.

4. У випадку виникнення явищ комутаційної асиметрії, з точки зору взаємодії АТЕП ЕРС постійного струму як з мережею зовнішнього електропостачання так і з системами СЦБ, найбільш рекомендованою до застосування частотою модуляції є 0,8 кГц. За її застосування спостерігається відносне потенційне поліпшення показника  $K_U$  до рівня 75% при позиційній асиметрії та 84% при верхній/нижній асиметрії (відносно нормованих значень), а також зниження амплітуд струмів перешкод для кіл СЦБ (з РК 25 Гц та РК 50 Гц) до рівня 42%-50% відносно своїх нормованих значень.

## РОЗДІЛ 5. ПРОГНОЗОВАНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Отримані результати досліджень (розділи 3, 4) дозволили встановити, що в своїй більшості від впливу режимів роботи системи керування тяговим статичним перетворювачем ЕРС з АТЕП, з точки зору ЕМС, найбільш залежними системами електрифікованих залізниць постійного струму є РК. Їх відмова, як відомо, призводить до порушення графіку руху поїздів, що, в свою чергу, призводить до значних економічних втрат [115].

З цієї точки зору, враховуючи перспективу подальшого впровадження на залізницях постійного струму України ЕРС з АТЕП, проведемо прогнозовану оцінку ефективності роботи РК в умовах суміжного функціонування з вказаним типом тягових одиниць.

Для виконання поставленої вище задачі, попередньо, проведемо оцінку ефективності роботи РК залізниць змінного струму до та після впровадження в експлуатацію ЕРС з АТЕП. Так, згідно [116], у період з 2004 по 2005 рік загальна кількість відмов пристроїв СЦБ та зв'язку, які викликали порушення графіку курсування поїздів, зменшилася на 5,2 %. В той же час єдиною залізницею, серед переліку залізниць України, для якої характерним було збільшення кількості відмов була Південно-Західна – 120 (2005 рік) проти 79 (2004 рік). При цьому близько 19 % (23 відмови) відмов виникло у результаті несвоєчасного спрацювання пристроїв СЦБ або з інших, не встановлених, причин.

Можна припустити, що така зміна кількості відмов саме на вказаній залізниці пов'язана з початком впровадження в експлуатацію у 2004 році ЕРС з АТЕП – електровозу змінного струму ДС3 [117].

Станом на 2005 рік чисельність електровозів ДС3, що курсують на Південно-Західній залізниці становила 10 одиниць з перспективою подальшого збільшення до 37 [118]. З урахуванням цього, у першому

наближенні, можна припустити, що поява такої ж кількості ЕРС з АТЕП на залізницях постійного струму призведе до аналогічного зростання кількості відмов пристроїв СЦБ – до рівня 19 % (23 відмови) відносно загальної кількості.

Вказане збільшення кількості відмов приймемо в якості базового для виконання подальшого аналізу, вважаючи, що даний показник досягається за умови роботи статичного перетворювача ЕРС з АТЕП за найменш прийнятних для кожної РК частот модуляції. Оскільки результати попередніх досліджень (розділ 3, розділ 4) не дозволили виявити єдиної частоти модуляції, яка була б прийнятною до застосування з усіма РК, подальший аналіз проводимо лише для рекомендованих значень останніх.

Так, для РК з частотою сигнального струму 25 Гц, згідно отриманих результатів, найбільш рекомендованими до застосування є частоти модуляції 0,5 кГц та 0,6 кГц. За даних значень частот спостерігається зниження амплітуд струмів перешкод, у середньому на 64% по відношенню до нормованих значень. Таке зниження, в першому наближенні, приймемо в якості імовірного зменшення кількості відмов пристроїв СЦБ при наявності електромагнітного впливу з точки зору тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму.

З урахуванням останнього, а також базового значення кількості відмов, за умов застосування РК з частотою сигнального струму 25 Гц нове оціночне значення кількості відмов пристроїв СЦБ з причини їх несвоєчасного спрацювання або з інших, не встановлених, причин становить:  
 $23 \cdot (1 - 0,64) = 8,28 \approx 8$  відмов.

Аналогічно до РК 25 Гц здійснено оцінку РК з частотою сигнального струму тонального діапазону – 580-780 Гц. Для РК діапазону ТРЦ-3 аналіз поліпшення ступеню безвідмовності роботи здійснено за умови застосування частоти модуляції 1,5 кГц, що для них є загально-рекомендованою.

Узагальнені результати аналізу поліпшення роботи пристроїв СЦБ, з точки зору зменшення кількості відмов, при застосуванні РК, що аналізуються, наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Узагальнені результати аналізу поліпшення роботи пристроїв СЦБ

Тип РК, що застосовується	Рекомендовані частоти модуляції, кГц	Нове оціночне значення кількості відмов, од.
25 Гц	0,5 кГц; 0,6 кГц	15
ТРЦ-3 (580 Гц)	1,5 кГц	13
ТРЦ-3 (720 Гц)	1,5 кГц	10
ТРЦ-3 (780 Гц)	1,5 кГц	11

З урахуванням результатів аналізу середнє оціночне зменшення кількості відмов пристроїв СЦБ з наведених вище причин, відносно прийнятого базового значення у 23 відмови, може становити:

$$\left(1 - \frac{(15 + 13 + 10 + 11) / 4}{23}\right) \cdot 100\% = 46,7\%. \quad (5.1)$$

Відносно ж загальної кількості відмов, даний показник становить:

$$19 - \left(\frac{(15 + 13 + 10 + 11) / 4}{120} \cdot 100\%\right) = 8,8\%. \quad (5.2)$$

Останнє значення і приймаємо в якості шуканої прогнозованої ефективності від впровадження результатів досліджень.

### 5.1 Висновки до п'ятого розділу

Проведені дослідження підтвердили результати, отримані в попередніх розділах дисертаційної роботи, з точки зору прогнозованої ефективності, а саме – використання рекомендованих частот модуляції вихідної напруги тягового статичного перетворювача ЕРС з АТЕП не призводить до здійснення критичного негативного впливу на показники експлуатаційної роботи залізниць.

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, в якій вирішено актуальну науково-технічну проблему поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами електрифікованих залізниць за рахунок вибору раціональних діапазонів частот модуляції тягового перетворювача.

Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Аналіз сучасного стану проблеми забезпечення ЕМС суміжних систем електрифікованих залізниць показав, що остання не є новою і продовжує бути актуальною як на залізницях постійного так і змінного струмів. Вирішенню даної проблеми загалом присвячено велику кількість робіт, в тому числі роботи, що пов'язані з дослідженням електромагнітної взаємодії ЕРС з АТЕП як постійного так і змінного струмів. Не зважаючи на це відсутність значного досвіду експлуатації вказаних тягових одиниць на українських залізницях постійного струму вимагає подальшого проведення досліджень. Оскільки основним джерелом впливу ЕРС з АТЕП на суміжні системи є тяговий статичний перетворювач частоти, що генерує вихідну напругу живлення тягового двигуна за допомогою ШІМ, в якості об'єкту досліджень обрано саме його.

2. Найбільшого впливу зі сторони ЕРС з АТЕП зазнають системи СЦБ та тягового електропостачання, функціонування яких повинно відповідати діючим стандартам. Аналіз суміжної роботи цих систем з ЕРС з АТЕП, дозволив визначити критерії, що дозволяють оцінити ефективність його роботи, з точки зору ЕМС, за умови експлуатації на залізницях постійного струму. До таких критеріїв відносяться: коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ ; коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової

напруги  $K_{U(n)}$ ; допустимі амплітуди струмів перешкод для РК різного діапазону робочих сигнальних струмів.

3. Серед існуючих методів досліджень одним з найбільш відповідних є фізичний експеримент. З використанням основних принципів теорії подібності розроблена експериментальна установка, що імітує функціонування АТЕП ЕРС постійного струму та дозволяє відтворити реальні параметри режиму його руху на типовому профілі з точки зору струмового навантаження та лінійної швидкості, приведеної до вихідної частоти тягового перетворювача. В ході розробки запропоновано методику визначення масштабних відношень між параметрами моделі та реальної системи тягового електропостачання постійного струму, з урахуванням ЕРС з АТЕП, основою якої є застосування залежностей  $I_1 = f(P_2)$  двигунів моделі й оригіналу та струмових характеристик ТЕД.

4. За допомогою експериментальної установки здійснено дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на показники ЕМС з системами СЦБ при роботі вказаного рухомого складу в номінальному режимі. В результаті досліджень встановлено ті значення частоти модуляції, які є найбільш рекомендованими до застосування, з точки зору взаємодії з системами СЦБ, а саме: 0,5 кГц та 0,6 кГц – для РК 25 Гц; 0,5 кГц, 1,1 кГц, 1,5 кГц та 1,9 кГц – для ТРЦ-3 з частотами 580 Гц та 780 Гц. Застосування вказаних частот модуляції дозволяє досягти відносного зниження амплітуд струмів перешкод на вказаних діапазонах, а отже поліпшення ЕМС розглянутого ЕРС з системами СЦБ, до рівнів: 32-39% від нормованих значень – для РК 25 Гц; 43-67%, 37-48%, та 43-60% від нормованих значень для РК 580-780 Гц відповідно. Для РК з іншими частотами сигнального струму частот модуляції які б повноцінно задовольняли умовам безперешкодної роботи систем СЦБ з точки зору їх ЕМС з ЕРС з АТЕП постійного струму встановлено не було.

5. Розроблено удосконалену імітаційну модель, яка, на відміну від існуючих, відтворює функціонування АТЕП у структурі системи тягового електропостачання залізниць постійного струму з урахуванням їх особливостей, а також динамічні показники роботи ЕРС в умовах руху по перегону. За допомогою цієї моделі досліджено вплив частоти модуляції на обґрунтовані показники ЕМС в неномінальних режимах роботи АТЕП – в режимі перевантаження та режимі часткової відмови системи керування з ШІМ.

6. Згідно з результатами імітаційних досліджень встановлено, що за умови виникнення режиму перенавантаження, з точки зору системи СЦБ, найбільш вразливими до дії перешкод є РК з робочими частотами сигнального струму 25 Гц та 50 Гц. В цьому випадку найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму є 0,8 кГц, 1,3 кГц та 1,5 кГц за яких спостерігається зниження відповідних амплітуд струмів перешкод до рівня 20-28% (для РК 25 Гц) та 49-54% (для РК 50 Гц) відносно свої нормованих значень.

7. При виникненні режиму часткової відмови системи керування у порівнянні з режимом перевантаження, спостерігається суттєве зростання амплітуди гармоніки з частотою 50 Гц – до рівня 500% відносно нормованого значення. При цьому зміна частоти модуляції, у межах розглянутого діапазону 0,5-2 кГц, не призводить до суттєвих змін її амплітуди, у зв'язку з чим рекомендації щодо поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ є узагальненими та обмежуються необхідністю здійснення відповідних налаштувань фільтрів, або застосування РК з іншими робочими частотами сигнального струму.

З точки зору взаємодії ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання, за вказаних неномінальних режимів зміною частоти модуляції вдається досягти відносного поліпшення лише одного з

контрольованих показників ЕМС – коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої напруги  $K_U$  (до рівня 81% відносно свого нормованого значення) за частоти модуляції 1,3 кГц. При цьому вважати дану частоту рекомендованою до застосування не доцільно через відносне перевищення деяких коефіцієнтів  $K_{U(n)}$  своїх нормованих значень на рівні 150%. Як і у випадку з системами СЦБ останній факт дозволяє розробити лише узагальнені рекомендації щодо поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з мережею зовнішнього електропостачання. В даному випадку вони обмежуються необхідністю покращення процесу енергоперетворення на тягових підстанціях.

8. У випадку виникнення явищ комутаційної асиметрії, з точки зору взаємодії АТЕП ЕРС постійного струму, як з мережею зовнішнього електропостачання так і з системами СЦБ, найбільш рекомендованою до застосування частотою модуляції є 0,8 кГц. За її застосування спостерігається відносне потенційне поліпшення показника  $K_U$  до рівня 75% при позиційній асиметрії та 84% при верхній/нижній асиметрії (відносно нормованих значень), а також зниження амплітуд струмів перешкод для кіл СЦБ (з РК 25 Гц та РК 50 Гц) до рівня 42%-50% відносно своїх нормованих значень.

9. Загалом, на підставі комплексного аналізу результатів проведених досліджень в якості рекомендованої частоти модуляції доцільно прийняти 1,5 кГц.

10. При врахуванні наданих рекомендацій по застосуванню частот модуляції визначених діапазонів, з урахуванням режимів роботи АТЕП ЕРС постійного струму, максимальна середня прогнозована ефективність від впровадження результатів роботи, з точки зору зменшення кількості відмов пристроїв СЦБ становить 8,8 %.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения с линиями связи, устройствами железнодорожной автоматики и питающими электросетями: Диссертация доктора технических наук. – М.: МИИТ, 1999. – 471 с.

2. Бочарников Ю.В. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и аппаратуры рельсовых цепей при воздействии через питающие и сигнальные цепи: Диссертация кандидата технических наук. – М.: МИИТ, 2008. – 176 с.

3. Бялонь А. Обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава постоянного тока нового поколения с устройствами железнодорожной автоматики в условиях польских железных дорог: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. – М., 2003. – 28 с.

4. Вісін М.Г. Підвищення електромагнітної сумісності рейкових кіл з електрорухомим складом подвійного живлення з асинхронними тяговими двигунами та тяговою мережею / М.Г. Вісін, Д.О. Забаріло // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2012. – №40. – С.75–82.

5. Гаврилюк В.І. Розробка математичної моделі для дослідження електромагнітних завад тягових перетворювачів з асинхронним двигуном / В.І. Гаврилюк, В.І. Щека // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2010. – №31. – С.221–225.

6. Ермоленко Д.В. Показатели электромагнитной совместимости и методы её обеспечения в системе электрической тяги переменного тока: Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук. – М., 1999. – 41 с.

7. Киржнер Д.Л. Электромагнитная совместимость статических преобразователей частоты вагонов метрополитена с асинхронными тяговыми двигателями с системами сигнализации блокировки и автоматического регулирования скорости: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. – Москва, 1986. – 24 с.

8. Лещёв А.И. Обеспечение электромагнитной совместимости электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в системе электрической тяги постоянного тока: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. – Москва, 2003. – 28 с

9. Макашева С.И. Влияние рекуперативного торможения на качество электрической энергии по напряжению и эффективность работы системы тягового электроснабжения: Диссертация кандидата технических наук. – Хабаровск, 2002. – 163 с.

10. Наумов А.А. Электромагнитная совместимость тяговых сетей электрифицированных железных дорог с рельсовыми цепями при пропуске поездов повышенного веса и длины: Диссертация кандидата технических наук. – М., 2003. – 197 с.

11. Сиченко В.Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту: Дисертація доктора технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 396 с.

12. Сорин Л.Н. Выбор рациональных параметров фильтров ЭПС постоянного тока с асинхронными тяговыми двигателями / Л.Н. Сорин // Электротехника. – 2004. – №8. – С. 58–65.

13. Финонченко Т.Э. Повышение качества электроэнергии в линиях "два провода–рельс" в условиях электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока: Диссертация кандидата технических наук. – Ростов–на–Дону, 2006. – 153 с.

14. Ходкевич А.Г. Улучшение условий электромагнитной совместимости тяговой сети переменного тока с рельсовыми цепями автоблокировки на

участках бесстыкового пути. – Диссертация кандидата технических наук. – Омск, 2006. – 152 с.

15. Щербак Я.В. Теоретичні основи і методи регулювання субгармонік напівпровідникових перетворювачів електроенергії.: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. – Харків, 2002. – 40 с.

16. Lewandowski, M. Method of calculations of current harmonics in a current taken from 3kV DC network by a traction vehicle with asynchronous drive. // *Przeglad Elektrotechniczny*, Volume 86, Issue 6, June 2010, Pages 270–275.

17. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость / Бадер М.П. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.

18. Ласевецький В.С. Електровоз змінного струму з асинхронними тяговими двигунами / В.С. Ласевецький // *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. – 2011. – №121. – С.86–88 с.

19. Литовченко В.В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S-преобразователями / В.В. Литовченко // *Электротехника*. – 1993. – №5. – С.23–31.

20. Муха А.М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів: Дисертація доктора технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 362 с.

21. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Марквардт К.Г. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

22. Статистичні дані залізниць України [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.uz.gov.ua/about/general\\_information/](http://www.uz.gov.ua/about/general_information/)

23. Муха А.М. Структурні схеми тягових перетворювачів для багатосистемних електровозів з асинхронним тяговим приводом / А.М. Муха // *ГЕМтаА*, Вид-во: НГУ. – 2009. – №82. – С.13–21.

24. Новини прес-центру Укрзалізниці [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://uz.gov.ua/press\\_center/up\\_to\\_date\\_topic/356360/](http://uz.gov.ua/press_center/up_to_date_topic/356360/).

25. Шумейко В.В. Возможность уменьшения пульсаций выпрямленного тока в асинхронном тяговом приводе / В.В. Шумейко // *Исследования*

электродвигателей электроподвижного состава железных дорог. Сборник научных трудов ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, 1984. – 72 с.

26. F.0500 / F.0628. Протокольная запись: DC-3 прототип. Результаты измерений паразитного тока до 1000 Гц для СДЕ. – Siemens AG, 2008.

27. Victor, M. Преобразование энергии на электроподвижном составе переменного тока с помощью трансформатора повышенной частоты / M. Victor // Железные дороги мира. – 2006. – №9. – С.49–53.

28. 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?PHPSESSID=hf16jk6ej4r8qlirbmiqkdt5r1&action=profile;u=1;area=showposts;sa=topics;start=80>

29. Кондратьева Л. А. Устройства железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для техникумов ж/д тр–та / Л. А. Кондратьева. – М.: Транспорт, 1983. – 232 с.

30. Казаков А. А. Станционные устройства автоматики и телемеханики: учебник для техникумов ж/д тр–та / А. А. Казаков, В. Д. Бубнов, Е. А. Казаков. – М.: Транспорт, 1990. – 431 с.

31. Хворост Н.В., Гончаров Ю.П., Чурсина Ю.В. Силовые активные фильтры для систем частотно–регулируемого привода на электрическом транспорте // Технічна електродинаміка. Тем.вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2006. –Част.1. – С. 19 – 26.

32. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1 / [под ред. К.Г. Марквардта]. – М.: Транспорт, 1980 – 256 с.

33. Алексеев Б.А. Активные фильтры высших гармоник / Б.А. Алексеев // Электро. – 2007. – №3. – С.28–32.

34. Колб А.А. Гибридные фильтры в устройствах управления качеством электроэнергии / А.А. Колб // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 3. – С. 250–253.

35. ЖТ ЦТ 04–98 Электровозы. Нормы безопасности. – М., 1998. – 88 с.
36. Разгонов С.А. Підвищення надійності роботи рейкових ланцюгів в умовах впливу перешкод тягового струму та нестабільності напруги в мережі живлення: Дисертація кандидата технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 178 с.
37. Ягуп К.В. Подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції: Дисертація кандидата технічних наук. – Харків: ХП, 2008. – 203 с.
38. Кузнєцов В.Г. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах / В.Г. Кузнєцов, О.Г. Шполянський, Н.А. Яремчук // Технічна електродинаміка. – 2011. – №3. – С. 46–52.
39. Ванько В. Методика оцінки якості електроенергії в мережах / В. Ванько // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2005. – № 544. – С. 19–25.
40. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М., 1998. – 31 с.
41. Электрическая тяга на рубеже веков: сб. науч. тр. / [под ред. А.Л. Лисицына]. – М.: Интекст, 2000. – 256 с.
42. Режимы работы магистральных электровозов / [под ред. О.А. Некрасова] – М.: Транспорт, 1983. – 231 с.
43. Бондаренко Ю.С. Вибір критеріїв для оцінки електромагнітної сумісності тягових перетворювачів перспективних електровозів / Ю.С. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2012. – №42. – С.85 – 89.
44. Бондаренко Ю.С. Питання електромагнітної сумісності перетворювача багатосистемного електровозу / Ю.С. Бондаренко // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро–2011»: міжнар. наук. – практ. конф., 19–21 грудня 2011 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2011.

45. Гетьман Г.К. Теория электрической тяги: моногр. Т1 / Гетьман Г.К. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.
46. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги: 2-е изд. / Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. – М.:Транспорт, 1983. – 328 с.
47. Баранов А.М. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий. / Баранов А.М., Козлов В.Е., Фельдман Э.Д. – М.:Транспорт, 1964. – 196 с.
48. Гетьман Г.К. Теория электрической тяги Т.2 / Гетьман Г.К. – Д.: Издательство Маковецкий, 2011. – 364 с.
49. Правила тяговых расчётов для поездной работы / [Гребенюк П.Т., Долганов А.Н., Некрасов О.А. и др.] – М.: Транспорт, 1985. – 287 с
50. Осиппов С.И. Основы электрической и тепловозной тяги. Учебник для техникумов ж.-д. транспорта / С.И. Осипов. – М.: Транспорт, 1985. – 408 с.
51. Бабичков А.М. Тяга поездов и тяговые расчёты / Бабичков А.М., Гурский П.А., Новиков А.П. – М.: Транспорт, 1971. – 280 с.
52. Электровоз грузовой постоянного тока с асинхронными тяговыми двигателями. Руководство по эксплуатации. Описание и работа. Основные параметры и характеристики электровоза. Электрические схемы. Электрические машины. Часть 1 ЭЭС10.00.000.000 РЭ.
53. ТХ 218.1039. Протокол квалификационных испытаний асинхронного двигателя СТА–1200У1. – Харьков. – ГП «Электротяжмаш», 2008.
54. Веников В. А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): 2-е изд. / Веников В. А. – М.: Высш.шк., 1976. – 479 с.
55. Бабаков М.Ф. Методы машинного моделирования в проектировании электронной аппаратуры. / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов. – Харьков: Изд-во ХАИ, 2001. – 90 с.
56. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. / Гухман А.А. – М.: Высшая школа, 1973. – 296 с.

57. Кирпичев М.В. Математические основы теории подобия. / М.В. Кирпичев, П.К. Конаков. – М.Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – 106 с.
58. Бойко, Н.Г. Теория и методы инженерного эксперимента: курс лекций / Н.Г. Бойко, Т.А. Устименко. – Донецк: ДНТУ, 2009 – 155 с.
59. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. / Прохорский А.А. – М.: Транспорт, 1983. – 496 с.
60. Бондаренко Ю.С. Експериментальне дослідження електромагнітної сумісності перетворювача багатосистемного електровозу з системами електрифікованих залізниць. / Ю.С. Бондаренко // Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро–2012»: міжнар. наук. – практ. конф., 25–28 вересня 2012 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2012
61. Агрегат тиристорный АТ–320/230–УХЛЧ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ОАН.140.009. – 1972.
62. Преобразователи частоты Hitachi: инструкция по эксплуатации серия SJ100–...NFE/HFE. – ВЭМЗ–СПЕКТР, 1999. – 82 с.
63. Обзор компаний – производителей преобразователей частоты. Выбор преобразователя [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.combarco.ru/production/converter/converters\\_makers.php](http://www.combarco.ru/production/converter/converters_makers.php).
64. Новости приводной техники. Фирмы производители частотных преобразователей [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.privod-news.ru/june/firms.htm>.
65. Тяговый преобразователь SIVAC E23–3000–1DC–2ST–1STm–oR. Инструкция по эксплуатации. – Siemens AG, 2010. – 106 с.
66. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи / Бурков А.Т. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.
67. Богрый В.С. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. / В.С. Богрый, А.А. Русских. – М.: Энергия, 1972. – 184 с.
68. Безрученко В.Н. Электрические машины / Безрученко В.Н. – К.: Вища школа, 1980. – 215 с.

69. Соколов Ю. Н. Электровоз ДСЗ. Устройство, управление, обслуживание: конспект [для лок. бригад] / Соколов Ю. Н. – К.: КУЕТТ, 2011. – 299 с.
70. Бондаренко Ю.С. Спрощена методика встановлення подібності нелінійних систем / Ю.С. Бондаренко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 15–16 травня 2014 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2014. – С. 130.
71. Богданов А.А. Визуализация данных в Microcal Origin. / Богданов А.А. – М.: Альтекс–А, 2003. – 104 с.
72. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество. – 1998. – №4. – С.38–42
73. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. / [Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А.] – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
74. Преобразователь частоты. Устройство, принцип работы, схемы управления и расчёты преобразователя частоты, и инвертора. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.eti.su/articles/elektroprivod/elektroprivod\\_776.html](http://www.eti.su/articles/elektroprivod/elektroprivod_776.html)
75. Безрученко В.Н. Тягові електричні машини електрорухомого складу: навч. посіб. / Безрученко В.Н., Варченко В.К., Чумак В.В. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – 252 с.
76. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. / Соколовский Г.Г. – М.: АСАДЕМА, 2006. – 265 с.
77. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчёта параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным / М.С. Макеев, А.А. Кувшинов // Вектор науки ТГУ. – 2013. – №1(23). – С.108–112.
78. Усольцев А.А. Определение параметров схемы замещения АД по справочным данным. / А.А. Усольцев // СПб: СПбГУ ИТМО. – 2006 [Электр. ресурс]. Режим доступа: [http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op\\_ad.pdf](http://ets.ifmo.ru/usolzev/wopros/op_ad.pdf)

79. Hans Bängtsson. Harmonic Mitigation in Traction Drives. Lunds Universitet 1999. [Електрон. ресурс]. Режим доступу:<http://www.iea.lth.se/publications/Theses/LTH-IEA-1021b.pdf>.

80. Бондаренко Ю.С. Передумови експериментального дослідження електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу в структурі системи тягового електропостачання постійного струму / Ю.С. Бондаренко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2014. – №3(51). – С.42–50.

81. Бондаренко Ю. С. Експериментальна установка для дослідження електромагнітної сумісності тягових статичних перетворювачів електрорухомого складу з системами електрифікованих залізниць / Ю.С. Бондаренко // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 31. – С.101–108 с.

82. Патент UA 80282 МПК (2006.01) G01R 31/34 Стенд для випробування частотно–регульованих асинхронних двигунів / Бондаренко Ю.С.; заявник та власник Дніпропетр. нац. ун–т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № заявки u 2012 12237; дата заявки 29.10.2012; дата публікації 27.05.2013. Бюл. №10.

83. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / [под. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова] – М.:Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

84. Автомобили «Спутник» ВАЗ 2108, –2109:устройство и ремонт / [Вершигора В.А., Игнатов А.П., Новокшенов К.В., Пятков К.Б.] – М.:Транспорт, 1992. – 240 с.

85. Котеленц Н.Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н.Ф. Котеленц, Н.Л. Кузнецов. – М., Высшая школа, 1988. – 232 с.

86. PIC16F628.Однокристалльные 8–разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.microchip.ru/files/d-sheets-rus/pic16f62x.pdf>.

87. PIC12F675.Однокристалльные 8–разрядные FLASH CMOS микроконтроллеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.microchip.ru/files/d–sheets–rus/pic12f629\\_675.pdf](http://www.microchip.ru/files/d–sheets–rus/pic12f629_675.pdf).

88. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники / Гершунский Б.С. – К.: Вища школа, 1987. – 422 с.

89. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. / Шенк Х. – М.: Мир, 1972. – 385 с.

90. Красовский Г.И. Планирование эксперимента. / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Мн.: Изд–во БГУ, 1982. – 302 с.

91. Бондаренко Ю.С. Ресурсозберігаючі технології дослідження електромагнітної сумісності тягових перетворювачів. / Ю.С. Бондаренко // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: міжнар. наук. – техн. конф., 9–11 квітня 2013 р.: тези доп. – Кременчуг: КрНУ, 2013

92. Бондаренко Ю.С. Особливості експериментального дослідження електромагнітної сумісності статичних перетворювачів електрорухомого складу. / Ю.С. Бондаренко// Збірник наукових праць ДонІЗТ – Донецьк: Видавництво ДонІЗТ, 2012. – №32. – С.130 – 136.

93. Модуль ввода–вывода аналогових и дискретних сигналов ADA 1406: руководство пользователя.

94. Техническая документация на датчики тока и напряжения LEM [Электрон. ресурс] / Режим доступа: <http://www.lem.com/docs/products>

95. Некоторые тенденции в развитии приборов и устройств силовой электроники / Г.В. Грабовецкий, С.А. Харитонов, Е.Б. Преображенский [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – №9. – С.921–928

96. ГОСТ 52776–2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики – М., 2007. – 75 с.

97. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты. / Мусин А.М. – М.: Колос, 1979. – 112 с.

98. Черная В.О. Исследование аварийных ситуаций в тяговых электроприводах постоянного тока с использованием сетей Петри / В.О. Черная, А.В. Ярошинский // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: міжнар. наук. – техн. конф., 2010 р.: тези доп. – Кременчуг: КрНУ, 2010. – 447–448.

99. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. / Лазарев Ю. – К.: Издательская группа BHV, 2005. – 512 с.

100. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink./ Черных И.В. – М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. – 288 с.

101. Раджибаев Д.О. Применение электровозов с четырёхквadrантным преобразователем на железных дорогах Узбекистана: Автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 2011. – 16 с.

102. Преобразовательные устройства электропоездов с асинхронными тяговыми двигателями. / [Солодунов А.М., Иньков А.М., Коваливкер Ю.М., Литовченко В.В.] – Рига: Зинатне, 1991. – 351 с.

103. Бондаренко Ю.С. Питання розробки математичної моделі асинхронного тягового електроприводу електровозів постійного струму. / Ю.С. Бондаренко // Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості: міжнар. наук. – практ. конф., 11–13 червня 2014 р.: тези доп. – смт. Воловець, Закарпатської обл., 2014

104. Бондаренко Ю.С. Особливості моделювання електромагнітного впливу тягового статичного перетворювача на системи електрифікованих залізниць. / Ю.С. Бондаренко // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: міжнар. наук. – практ. конф., 23–23 травня 2013 р.: тези доп. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – С. 120.

105. Большая энциклопедия транспорта: в 8 т. Т. 4. Железнодорожный транспорт / [гл.редактор Н.С. Конарев]. – М.: Научное из-во «Большая Российская энциклопедия». – 2003. – 1039 с.

106. Энергоспецкомплект. Трансформаторы масляные преобразовательные. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.energospes.ru/catalog/product/550>

107. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.2 / [под ред. К.Г. Марквардта] – М.: Транспорт, 1981 – 392 с.

108. Тяговые подстанции. / [Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г.] – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

109. Цыганков В.М. Организация и управление электрическими системами. Конспект лекций. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/23620/>

110. Вольдек А.И. Электрические машины. / Вольдек А.И. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

111. Дьяконов В.П. Simulink 5/6/7: Самоучитель / Дьяконов В.П. – М.: ДМК–Пресс, 2008. – 784 с.

112. Кунцевич В.М. Нелинейные системы управления с частотно– и широтно–импульсной модуляцией. / В.М. Кунцевич, Ю.Н. Чеховой. – Харьков: Коммунист, 1970. – 340 с.

113. Joachim Lamp. IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification. SEMIKRON Application Notes AN–7006. SEMIKRON INTERNATIONAL GmbH, 2008. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.semikron.com/service–support/downloads/detail/semikron–application–note–an–7006–igbt–peak–voltage–measurement–and–snubber–capacitor–specification–en–2008–03–17–rev00.html>

114. Колпаков А.И. IGBT – инструкция по эксплуатации / А.И. Колпаков // Силовая Электроника. – 2007. – № 1. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.power–e.ru/pdf/2007\\_01\\_17.pdf](http://www.power–e.ru/pdf/2007_01_17.pdf)

115. Наказ Укрзалізниці №164–Ц «Про заходи щодо забезпечення безпеки руху в поїзній і маневровій роботі на залізничному транспорті» від 03.03.2010 [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://scbist.com/dokumenty–ukrzel–znic/21610–nakaz–164c–pro–zahodi–schodo–zabezpechennya–bezpeki–>

ruhu-v-po-zn-i-manevrov-i-robot-na-zal-znichnomu-transport.html#post128431.

116. Аналіз експлуатаційної роботи господарств галузі сигналізації та зв'язку за 9 місяців 2005 року / Головне управління систем безпеки та комунікацій. – К., 2005. – 59 с.

117. Украинский локомотив XXI века // Сделано в Украине. – 2004. – №22. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.madein.dp.ua/view.aspx?type=ja&lang=1&jaid=522>

118. Головні новини Укрзалізниці 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.uz.gov.ua/press\\_center/latest\\_news/archive/main\\_news/219367/](http://www.uz.gov.ua/press_center/latest_news/archive/main_news/219367/)

ДОДАТОК А

ТЯГОВИЙ РОЗРАХУНОК ДЛЯ ЕЛЕКТРОВОЗУ 2ЭС10

### А.1 Розрахунок та побудова діаграм питомих рівнодіючих сил

Згідно [45] запропонований для використання розрахунковий профіль вже є спрямленим та приведеним, що дозволяє виключити даний пункт з поточного розрахунку.

Визначення маси поїзду будемо здійснювати за умови руху останнього з усталеною швидкістю по розрахунковому підйому, тобто в розрахунковому режимі роботи ЕРС [75, 77, 78]. Згідно [75] розрахунковий підйом – найбільш тяжкий (за крутизною) в обраному напрямку руху підйом, протяжність якого достатня для того, щоб швидкість поїзду в режимі тяги досягла усталеного значення. Тобто в більшості випадків це підйом, що має найдовшу протяжність та характеризується найбільшою крутизною. Згідно табл. 3 таким умовам відповідає підйом на ділянці 10 протяжністю 8550 м з ухилом 9‰, що його пропонується використати в якості розрахункового.

Розрахунковий режим роботи ЕРС – це режим навантаження, що забезпечує рух поїзду розрахункової маси по розрахунковому підйому [75]. Він характеризується двома параметрами – розрахунковою силою тяги  $F_{кр}$  та розрахунковою швидкістю  $v_p$ . Згідно рекомендацій [75, 77, 78] та відповідних технічних даних обраного типу ЕРС [79] прийmemo:  $F_{кр} = 575 \text{ кН}$ ,  $v_p = 56 \text{ км/год}$ .

Для визначення критичної зчіпної маси поїзду згідно [75, 77, 78] попередньо визначимо основний питомий опір руху електровозу та вагонів при розрахунковому режимі роботи, приймаючи що поїзд сформовано виключно з чотириосних вагонів масою  $m_{04} = 72 \text{ т}$  з підшипниками кочення:

$$\omega'_0(v) = 1,9 + 0,008v_p + 0,00025v_p^2 = 3,132 \text{ Н/кН} \quad (\text{A.1})$$

$$\omega_{04}'' = \omega_0'' = 0,7 + \frac{3 + 0,1v_p + 0,0025v_p^2}{q_{04}} = 1,613 \text{ Н/кН}, \quad (\text{A.2})$$

де  $q_{04} = \frac{72}{4} = 18 \text{ т}$  – сила натиску на вісь колісної пари.

Остаточно критичну масу поїзду визначимо як [75]:

$$m_c = \frac{0,102F_{кр} \cdot 10^3 - m_{л} \cdot (\omega_0' + i_p)}{\omega_0'' + i_p} = 5297,4 \text{ т}, \quad (\text{A.3})$$

де  $m_{л} = 200 \text{ т}$  – маса локомотиву [78]. Округлюючи отримане значення згідно з вимогами [76] до 50 т остаточно отримаємо  $m_c = 5300 \text{ т}$ .

Для остаточного визначення зчіпної маси поїзду здійснимо перевірку його на можливість зрушення з місця на прямих ділянках профілю та на розрахунковому підйомі. Згідно [79] сила тяги електровозу 2ЭС10 при зрушенні з місця становить  $F_{кр} = 752 \text{ кН}$ . Для прямої ділянки профілю питомий опір при зрушенні з місця з урахуванням типу вагонів визначається як:

$$\omega_{тр4} = \omega_{тр} = \frac{28}{q_{04} + 7} = 1,12 \text{ Н/кН} \quad (\text{A.4})$$

З урахуванням останнього виразу критична маса поїзду за умовою зрушення з місця на прямій ділянці профілю становить:

$$m_{тр} = \frac{0,102F_{кр} \cdot 10^3}{\omega_{тр} + i_{тр}} - m_{л} = 68285,7 \text{ т} \quad (\text{A.5})$$

Порівняння розрахованої максимальної зчіпної маси поїзду з отриманою за виразом (А.3) вказує на відповідність останньої умовам зрушення на прямих ділянках профілю.

Для встановлення можливості зрушення з місця на підйомі визначимо крутизну найбільшого підйому, що може бути подоланий поїздом встановленої маси:

$$i_{\text{тр}} = \frac{0,102F_{\text{ктр}} \cdot 10^3}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} - \omega_{\text{тр}} = 13 \text{ ‰} \quad (\text{A.6})$$

Отриманий результат вказує на можливість подолання поїздом встановленої маси будь якого підйому досліджуваного профілю колії. З урахуванням останнього остаточно приймаємо  $m_{\text{с}} = 5300 \text{ т}$ .

Враховуючи вимоги [76] виконаємо розрахунок та побудову діаграми питомих рівнодіючих сил що діють на ЕРС в усіх режимах його функціонування [71]. В режимі тяги за умови відсутності гальмівної сили загальне рівняння питомих рівнодіючих сил, що діють на поїзд визначається як:

$$i_{\text{тр}} = \frac{0,102F_{\text{ктр}} \cdot 10^3}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} - \omega_{\text{тр}} = 13 \text{ ‰} \quad (\text{A.7})$$

$$f_y(v) = f_k(v) - \omega_0(v), \quad (\text{A.8})$$

де  $f_k(v)$  – питома сила тяги ЕРС,  $\omega_0(v)$  – питомий основний опір руху поїзду в режимі тяги.

Згідно [75] вказані величини визначаються як:

$$f_k(v) = \frac{0,102F_k(v)}{m_{\text{л}} + m_{\text{с}}} \quad (\text{A.9})$$

$$\omega_0(v) = \frac{m_L \omega_0'(v) + m_C \omega_0''(v)}{m_L + m_C} \quad (\text{A.10})$$

У виразі (А.9) величина  $F_K(v)$  являє собою тягову характеристику електровозу 2ЭС10 (рис.А.1).

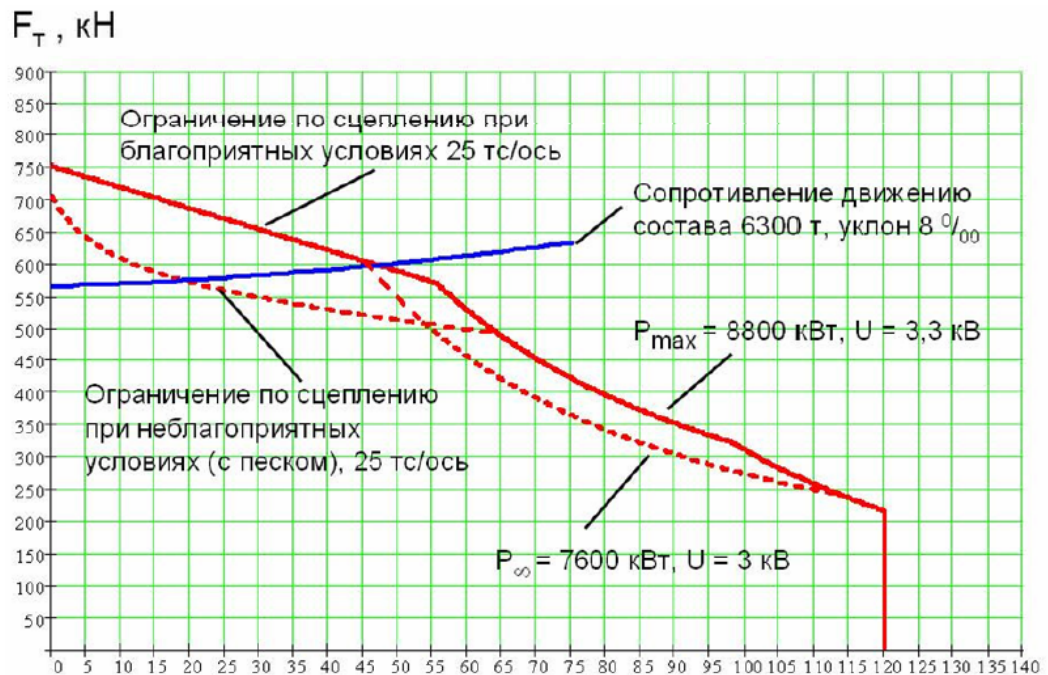


Рисунок А.1 – Тягова характеристика електровозу 2ЭС10

У виразі (А.10) величини  $\omega_0'(v)$ ,  $\omega_0''(v)$  – відповідно питомий основний опір руху локомотива та вагонів. Беручи до уваги, що поїзд, за умовами розрахунку, повністю сформовано з чотириосних вагонів –  $\omega_0''(v) = \omega_{04}''(v)$ .

З урахуванням останнього твердження вказані величини для режиму тяги визначаються як [77]:

$$\omega_0'(v) = 1,9 + 0,008v + 0,00025v^2 \quad (\text{A.11})$$

$$\omega_0''(v) = \omega_{04}''(v) = 0,7 + \frac{3 + 0,1v + 0,0025v^2}{q_{04}} \quad (\text{A.12})$$

Для всіх режимів функціонування ЕРС розрахунок діаграм питомих рівнодіючих сил здійснюється для швидкості руху не вище 80 км/год згідно зі встановленими умовами тягового розрахунку. Результати розрахунку діаграми питомих рівнодіючих сил для режиму тяги наведено нижче (табл.А.1).

Таблиця А.1

## Питомі рівнодіючі сили в режимі тяги

$v$ , км/год	$\omega_0'$ , Н/кН	$\omega_0''$ , Н/кН	$\omega_0'''$ , Н/кН	$F_k$ , кН	$f_k$ , Н/кН	$f_y$ , Н/кН
0	1,9	0,867	0,905	752	14,074	13,17
10	2,005	0,936	0,975	720	13,475	12,5
20	2,16	1,033	1,075	685	12,82	11,746
30	2,365	1,158	1,203	655	12,259	11,056
40	2,62	1,311	1,359	625	11,697	10,338
50	2,925	1,492	1,544	588	11,005	9,461
56	3,132	1,613	1,669	576	10,78	9,111
60	3,28	1,7	1,758	530	9,919	8,161
65	3,476	1,815	1,876	490	9,171	7,295
70	3,685	1,936	2	450	8,422	6,422
75	3,906	2,065	2,132	420	7,861	5,728
80	4,14	2,2	2,271	400	7,486	5,215
85	4,386	2,342	2,417	375	7,018	4,601
90	4,645	2,492	2,571	352	6,588	4,017
95	4,916	2,648	2,731	338	6,326	3,595
100	5,2	2,811	2,899	312	5,839	2,94
105	5,496	2,981	3,074	280	5,24	2,167
110	5,805	3,158	3,255	260	4,866	1,611
115	6,126	3,342	3,445	240	4,492	1,047
120	6,46	3,533	3,641	220	4,117	0,477

Аналогічно до попереднього здійснимо розрахунок питомих рівнодіючих сил для режимів вибігу та гальмування.

В режимі вибігу загальне рівняння питомих рівнодіючих сил [71] містить лише складову питомого основного опору руху поїзду в режимі вибігу, яка визначається за виразом:

$$\omega_{0x}(v) = \frac{m_l \omega_x(v) + m_c \omega_0''(v)}{m_l + m_c} \quad (\text{A.13})$$

Визначення вказаної величини потребує розрахунку питомого основного опору електровозу в режимі вибігу  $\omega_x(v)$ , що визначається за виразом:

$$\omega_x(v) = 2,4 + 0,009v + 0,00035v^2 \quad (\text{A.14})$$

Результати проведених розрахунків для режиму вибігу наведено у таблиці А.2.

Таблиця А.2

Питомі рівнодіючі сили в режимі вибігу

$v$ , км/год	$\omega_x$ , Н/кН	$\omega_0$ , Н/кН	$\omega_{0x}$ , Н/кН
0	2,4	0,867	0,923
10	2,525	0,936	0,994
20	2,72	1,033	1,095
30	2,985	1,158	1,225
40	3,32	1,311	1,385
50	3,725	1,492	1,574
56	4,002	1,613	1,701
60	4,2	1,7	1,792
65	4,464	1,815	1,912
70	4,745	1,936	2,039
75	5,044	2,065	2,174
80	5,36	2,2	2,316
85	5,694	2,342	2,465
90	6,045	2,492	2,622
95	6,414	2,648	2,786
100	6,8	2,811	2,957

105	7,204	2,981	3,136
110	7,625	3,158	3,322
115	8,064	3,342	3,516
120	8,52	3,533	3,716

Для розрахунку діаграми питомих рівнодіючих сил в режимі гальмування попередньо визначимо розрахунковий гальмівний коефіцієнт  $\vartheta_p$  та розрахунковий коефіцієнт тертя гальмівних колодок  $\varphi_{кр}$ . Оскільки на заданій ділянці профілю максимальна крутизна ухилу не перевищує 20‰ розрахунок коефіцієнту  $\vartheta_p$  виконуємо без врахування гальмівних засобів локомотива [75, 76]:

$$\vartheta_p = \frac{0,102(n_4 K_{p4})}{m_c} = 0,397, \quad (A.15)$$

де  $n_4 = 4 \frac{m_c}{m_{04}} = 292$  - кількість гальмівних осей поїзду, без врахування

тягової одиниці,  $K_{p4} = 70$  кН – сила натиску гальмівних колодок на вісь [72].

Порівняння отриманого значення розрахункового гальмівного коефіцієнту з допустимим  $\vartheta_p > 0,33$  [72] вказує на відповідність забезпечення умов безпеки руху поїздів.

Для встановлених швидкостей руху визначимо коефіцієнт  $\varphi_{кр}$  за наступним виразом:

$$\varphi_{кр}(v) = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100}. \quad (A.16)$$

На основі отриманих величин визначимо величину питомої гальмівної сили:

$$b_k(v) = 1000 \varphi_p \varphi_{кр}(v) \quad (\text{A.17})$$

Проведені попередні розрахунки дозволяють встановити остаточне значення питомих рівнодіючих сил для режиму гальмування. Результати розрахунків наведено в таблиці А.3.

Таблиця А.3

## Питомі рівнодіючі сили в режимі гальмування

$v$ , км/год	$\varphi_{кр}$ , Н/кН	$b_k$ , Н/кН	$\omega_{0x}$ , Н/кН	$0,5b_k + \omega_{0x}$ , Н/кН	$b_k + \omega_{0x}$ , Н/кН
0	0,27	107,1	0,923	54,473	108,023
10	0,198	78,54	0,994	40,264	79,534
20	0,162	64,26	1,095	33,225	65,355
30	0,14	55,692	1,225	29,071	56,917
40	0,126	49,98	1,385	26,375	51,365
50	0,116	45,9	1,574	24,524	47,474
56	0,111	43,967	1,701	23,685	45,668
60	0,108	42,84	1,792	23,212	44,632
65	0,105	41,58	1,912	22,702	43,492
70	0,102	40,46	2,039	22,269	42,499
75	0,099	39,458	2,174	21,903	41,632
80	0,097	38,556	2,316	21,594	40,872
85	0,095	37,74	2,465	21,335	40,205
90	0,093	36,998	2,622	21,121	39,62
95	0,092	36,321	2,786	20,947	39,107
100	0,09	35,7	2,957	20,807	38,657
105	0,089	35,129	3,136	20,701	38,265
110	0,087	34,602	3,322	20,623	37,924
115	0,086	34,113	3,516	20,572	37,629
120	0,085	33,66	3,716	20,546	37,376

## А.2. Вирішення гальмівної задачі

За результатами розрахунку питомих рівнодіючих сил в режимі гальмування (табл.А.3) побудуємо діаграму питомих рівнодіючих сил для режиму екстреного гальмування (рис. А.2).

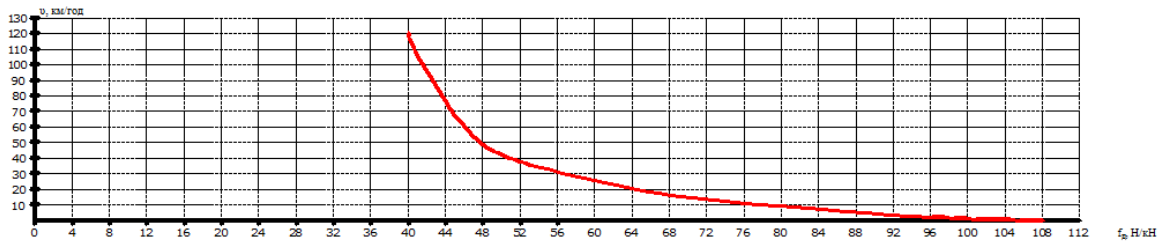


Рисунок А.2 – Діаграма питомих рівнодіючих сил для режиму екстреного гальмування.

Використовуючи отриману графічну залежність, у відповідності до методики [75], побудуємо криві швидкості  $v = f(S)$  для ухилів, значення крутизни яких, з урахуванням розрахункового профілю, лежать в межах  $6,6\% \leq i \leq 9\%$ . Результати побудови наведено на рисунку А.3.

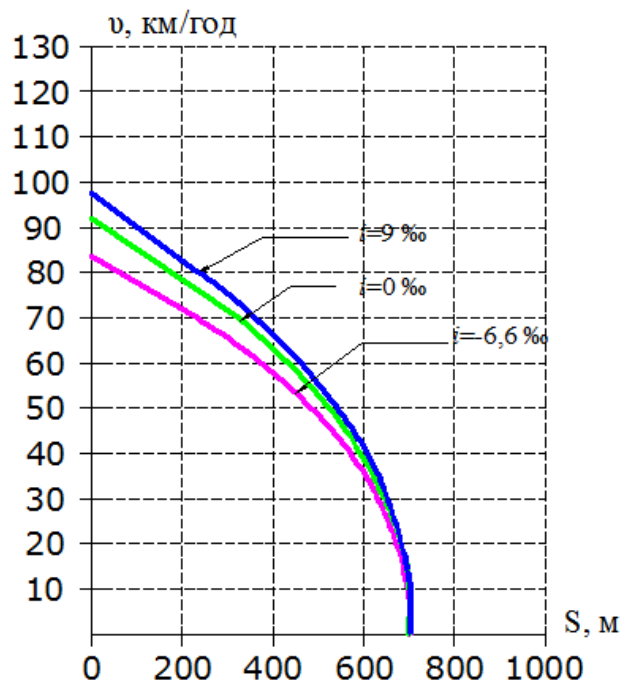


Рисунок А.3 – Криві інтенсивності гальмування

Отримані залежності дозволяють визначити допустимі швидкості руху на будь-якій ділянці профілю, включаючи визначені, що потребує попереднього встановлення підготовчого гальмівного шляху. Згідно [75] підготовчий гальмівний шлях визначається як:

$$S_{II} = 0,278v_{HT}t_{II} \quad (\text{A.18})$$

де  $v_{HT}$  – швидкість початку гальмування,  $t_{II}$  – час підготовки гальм до дії.

Оскільки, за визначеними умовами тягового розрахунку, максимальна швидкість руху не перевищує 80 км/год, саме це значення приймемо у якості швидкості початку гальмування.

Значення  $t_{II}$  визначається виходячи з кількості гальмівних осей поїзду [75]. В нашому випадку таких осей 292, а отже:

$$t_{II} = 10 - \frac{15i}{1000g_p \varphi_{кр}(v)} = 10 - \frac{15i}{b_k(v)}. \quad (\text{A.19})$$

Підставляючи у даний вираз значення  $b_k(v)$ , яке для швидкості 80 км/год становить 38,556 Н/кН, а отримані значення  $t_{II}$  у вираз (A.18) отримаємо значення підготовчого гальмівного шляху для кожного з визначених ухилів:

а) ухил -6,6 ‰ –  $S_{II} = 302$  м;

б) ухил 0 ‰ –  $S_{II} = 223$  м;

в) ухил 9,0 ‰ –  $S_{II} = 145$  м.

Отримані значення  $S_{II}$  дозволяють побудувати залежності підготовчого шляху від швидкості руху, а також отримати результуючу графічну залежність допустимої швидкості руху від ухилу для всього діапазону ділянок профілю, що розглядається (рис. А.4, рис. А.5).

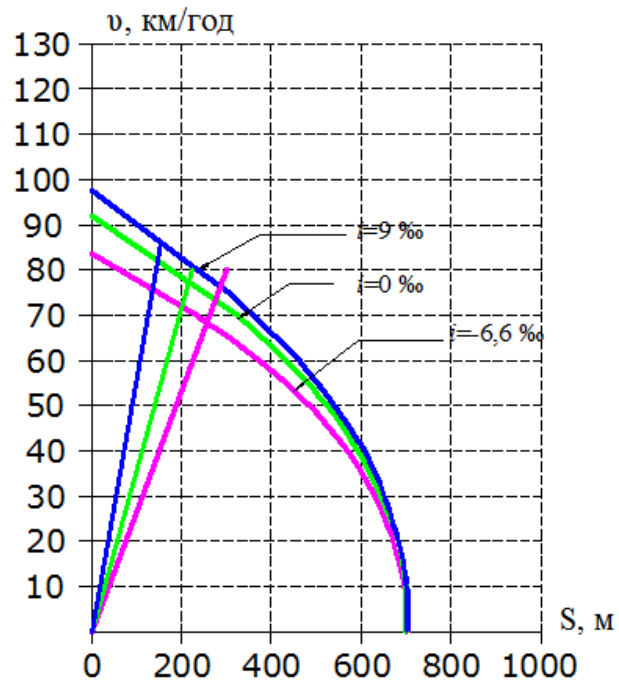


Рисунок А.4 – Криві інтенсивності гальмування з урахуванням графіків підготовчого шляху

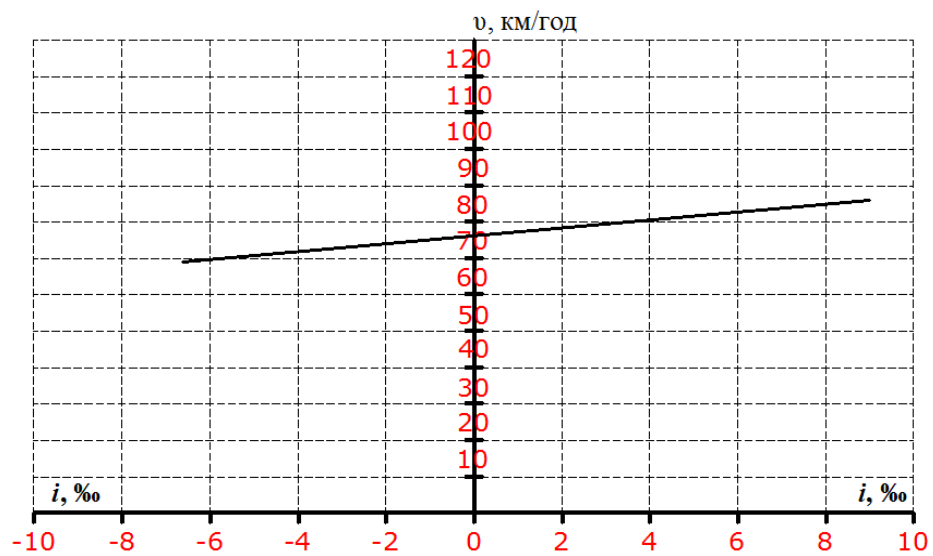
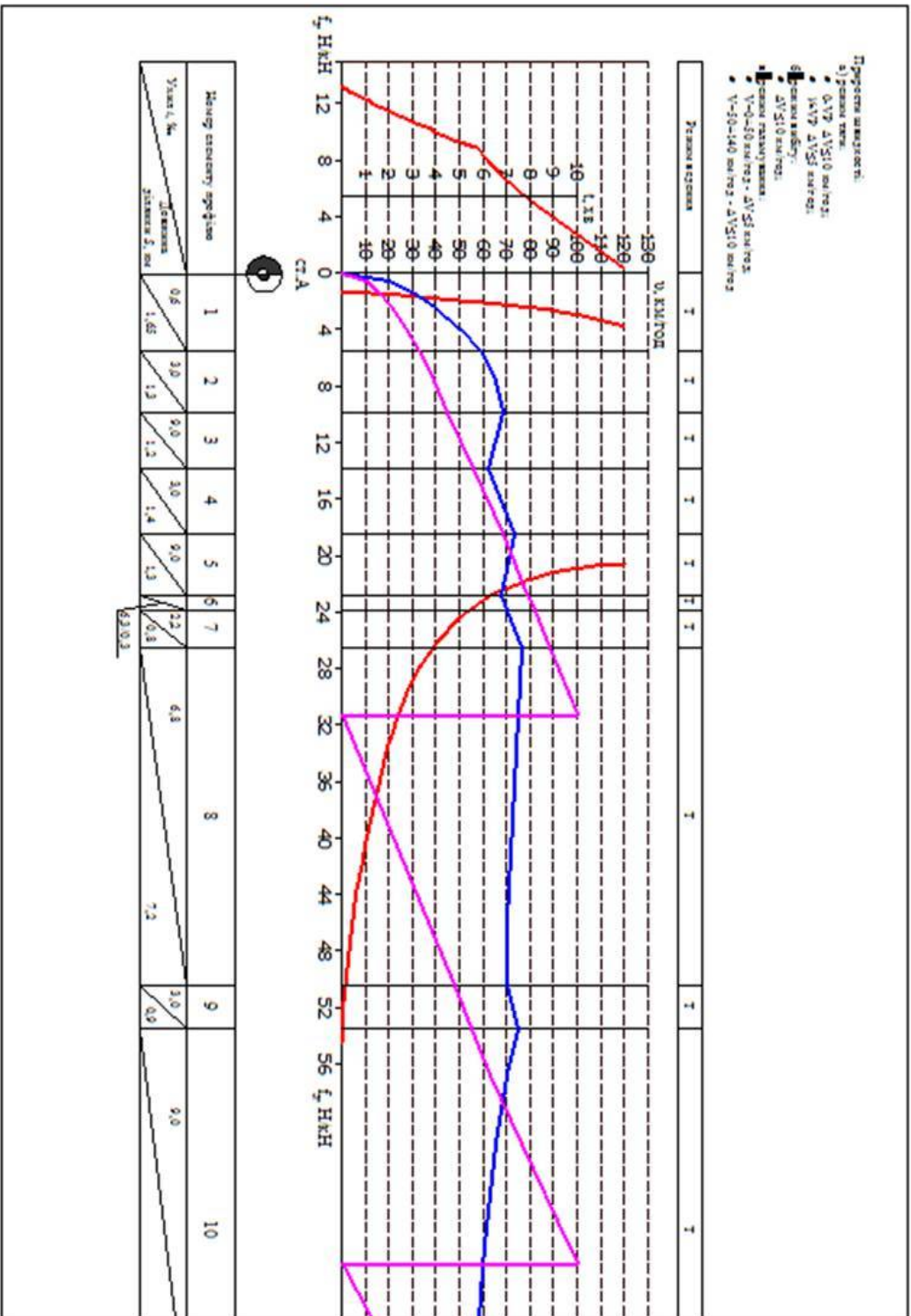
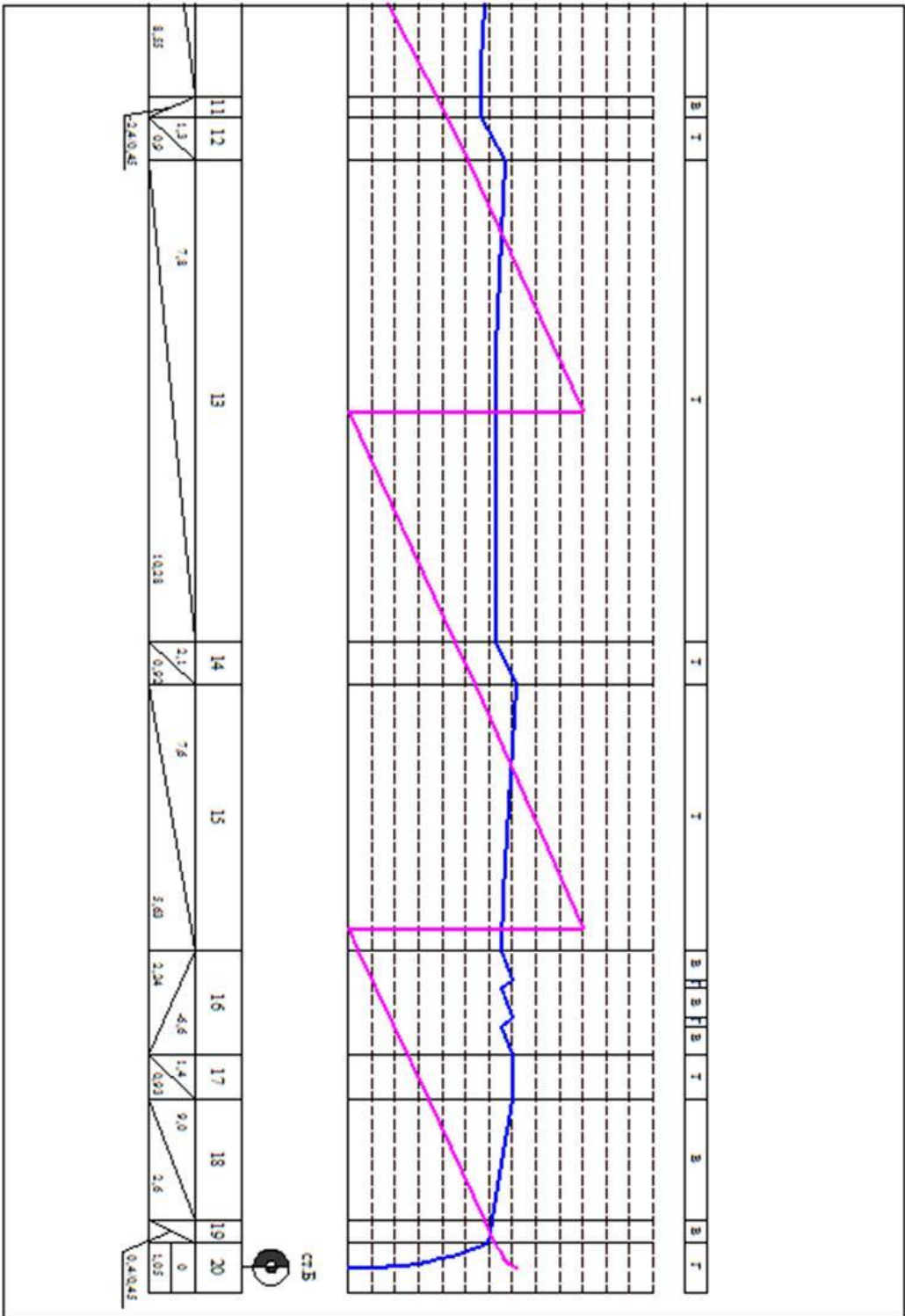


Рисунок А.5 – Залежність допустимої швидкості руху від ухилу профілю

ДОДАТОК Б

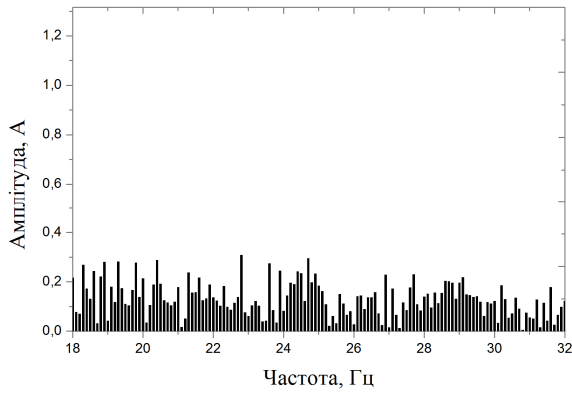
РЕЗУЛЬТУЮЧІ КРИВІ РУХУ ЕЛЕКТРОВОЗУ 2ЭС10 ПО ЗАДАНОМУ  
ПРОФІЛЮ КОЛІЇ



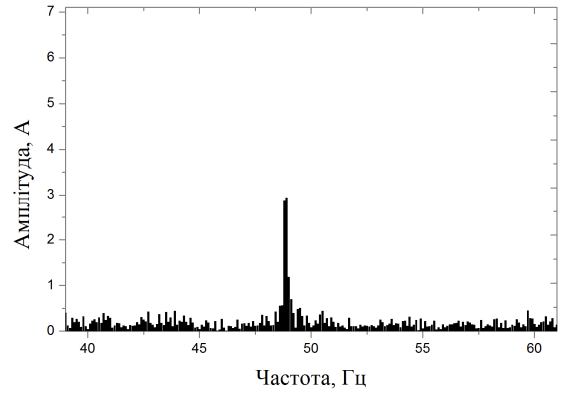


ДОДАТОК В

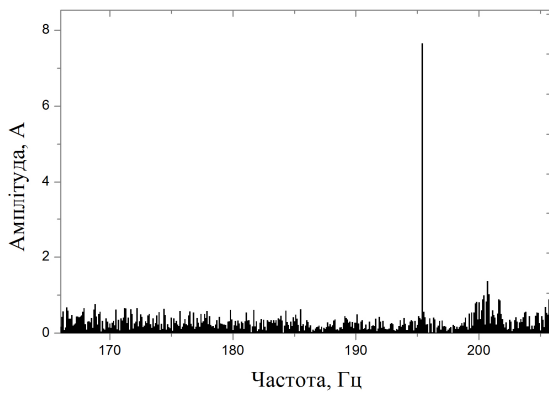
РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМС З СИСТЕМАМИ СЦБ У  
НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ АТЕП ЕРС ПОСТІЙНОГО СТРУМУ



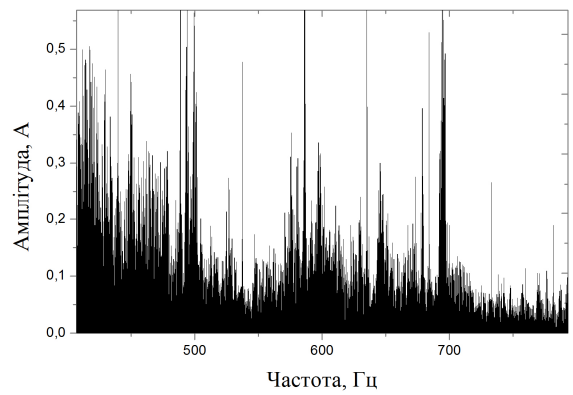
ПК 25 Гц



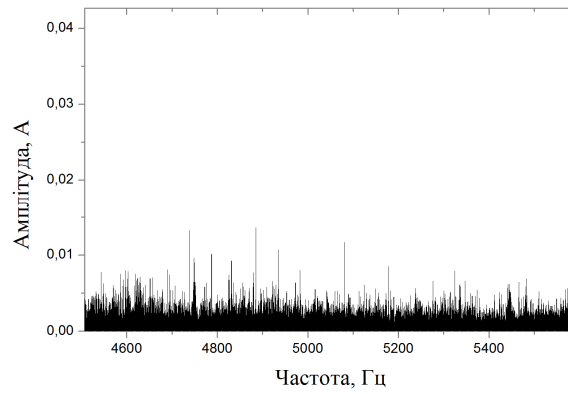
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



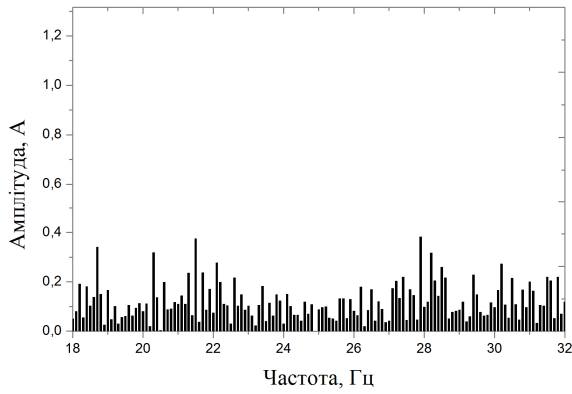
ТРЦ-3



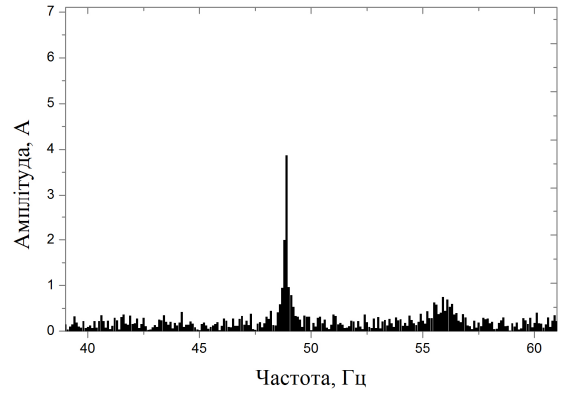
ТРЦ-4

Рисунок В.1– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

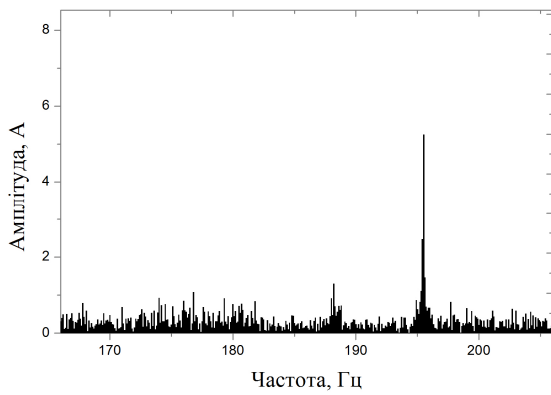
0,5 кГц



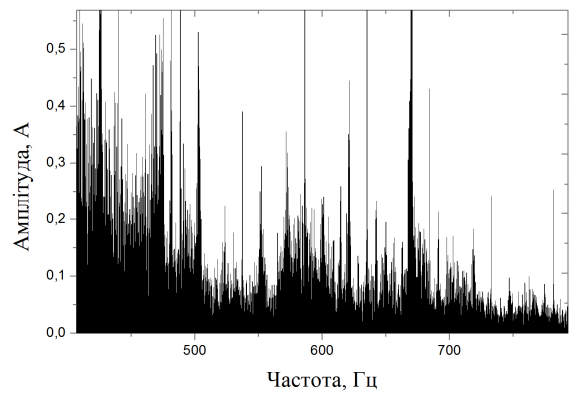
ПК 25 Гц



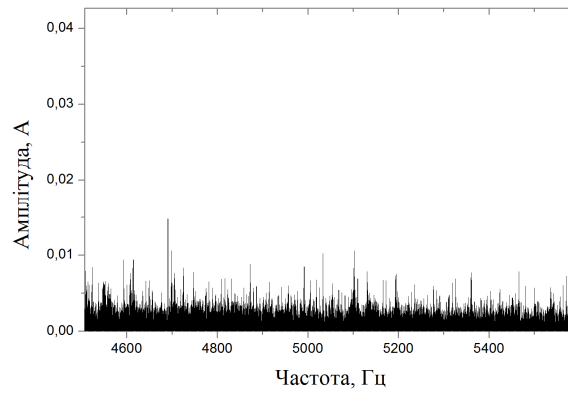
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



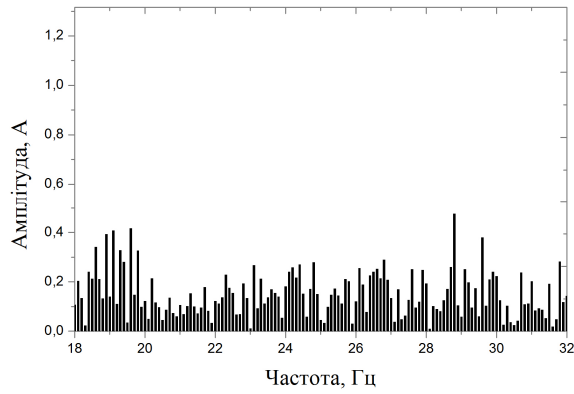
ТРЦ-3



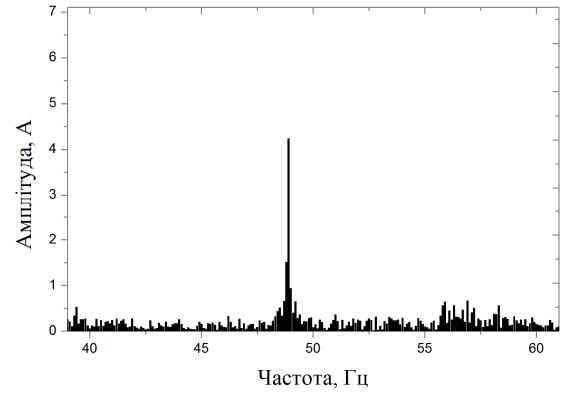
ТРЦ-4

Рисунок В.2– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

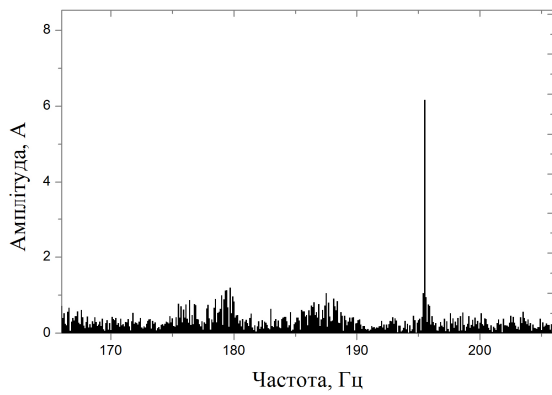
0,6 кГц



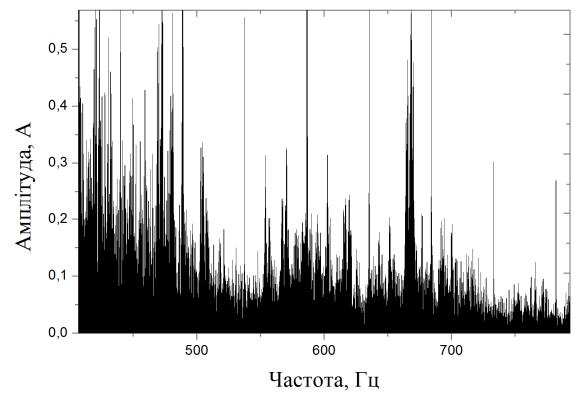
ПК 25 Гц



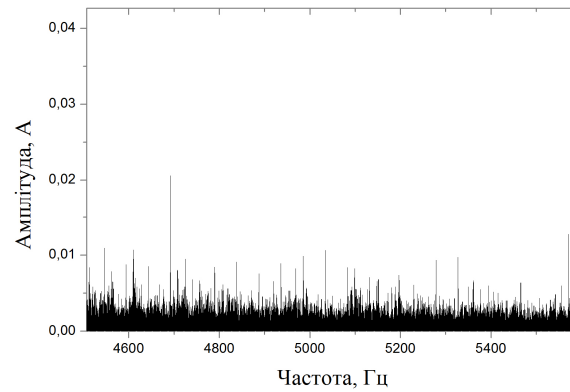
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



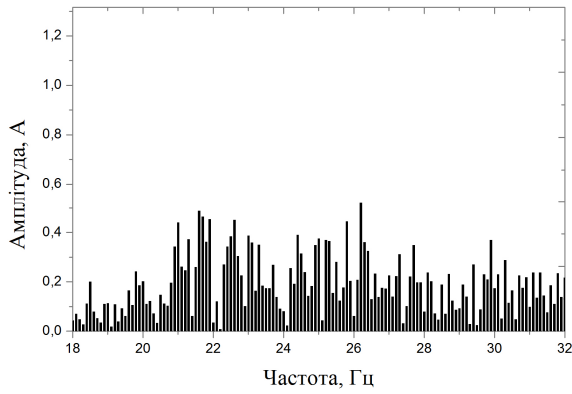
ТРЦ-3



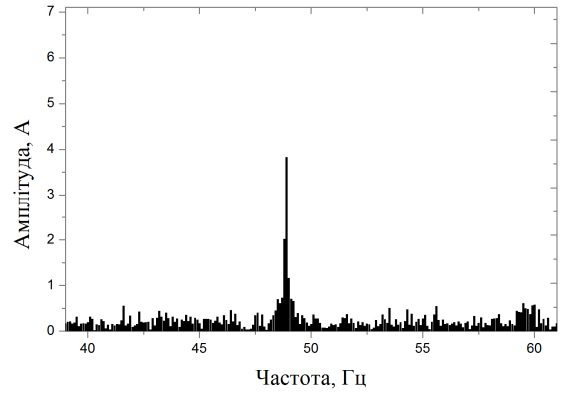
ТРЦ-4

Рисунок В.3— Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

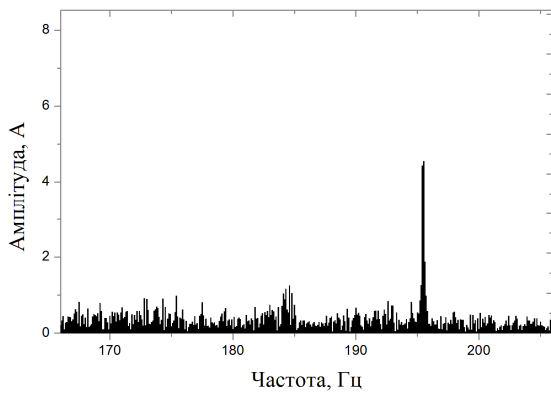
0,7 кГц



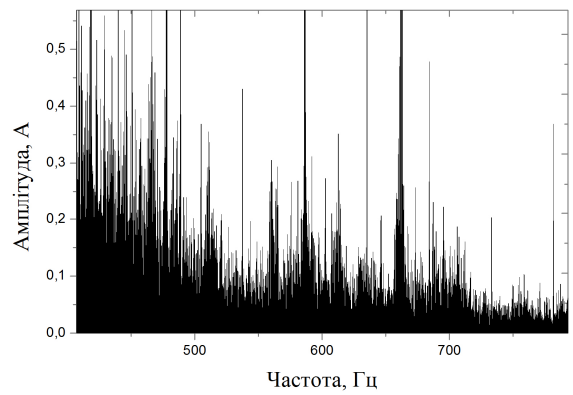
ПК 25 Гц



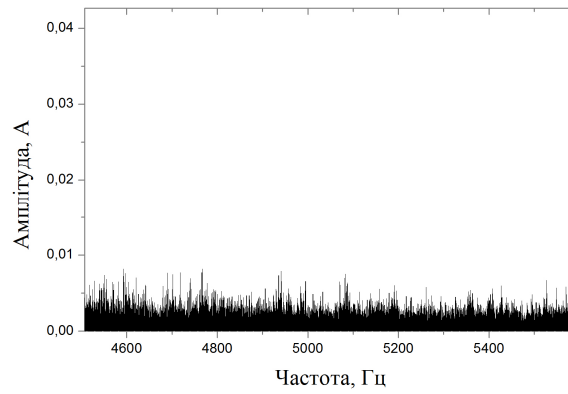
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



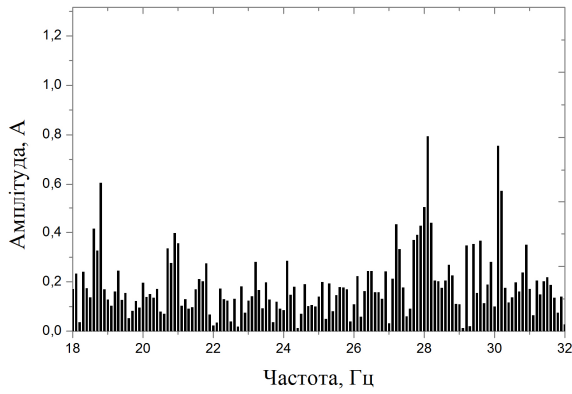
ТРЦ-3



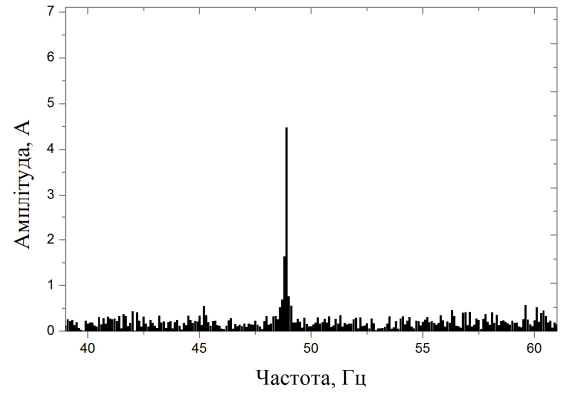
ТРЦ-4

Рисунок В.4— Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

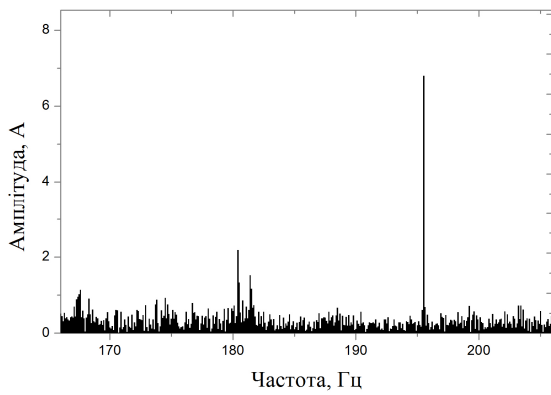
0,8 кГц



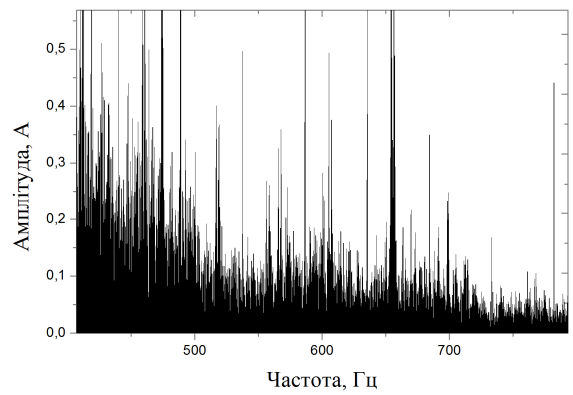
ПК 25 Гц



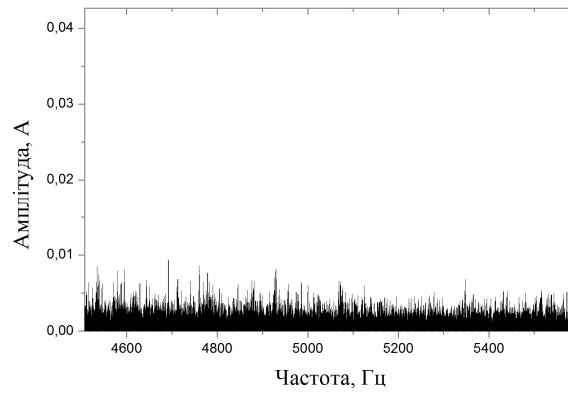
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



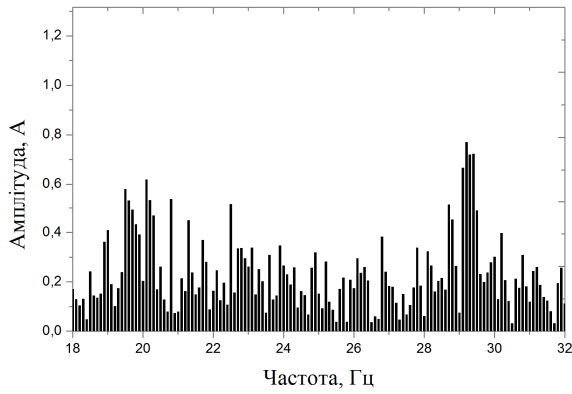
ТРЦ-3



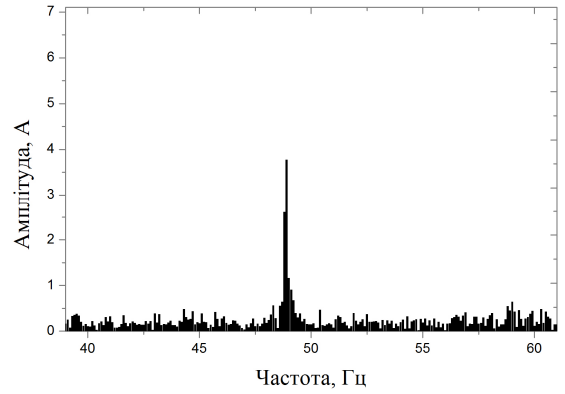
ТРЦ-4

Рисунок В.5– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

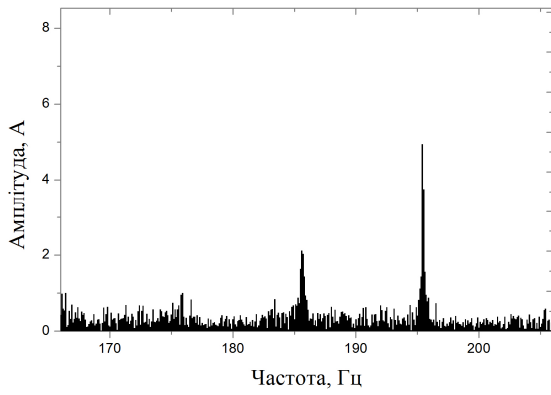
0,9 кГц



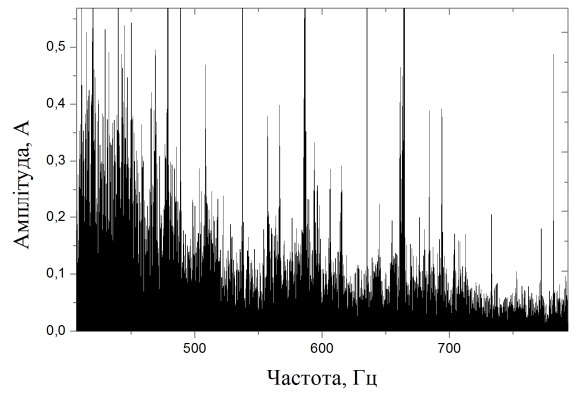
ПК 25 Гц



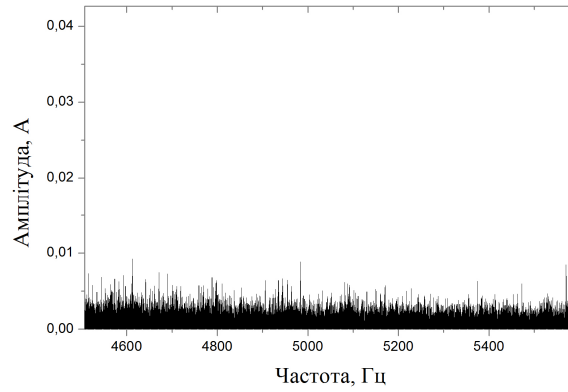
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



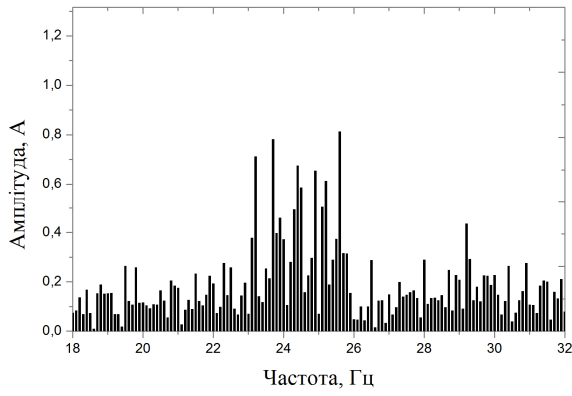
ТРЦ-3



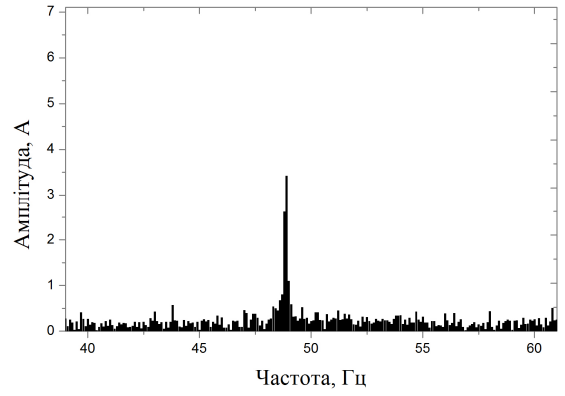
ТРЦ-4

Рисунок В.6– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

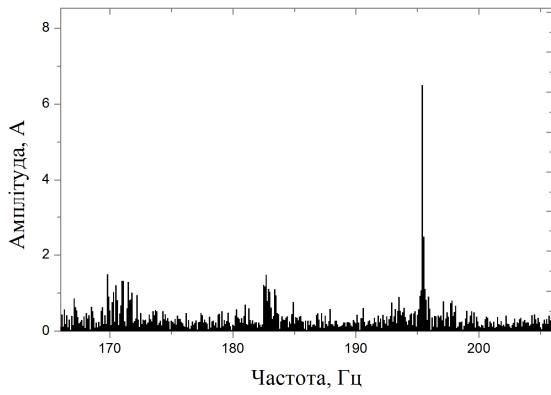
1,0 кГц



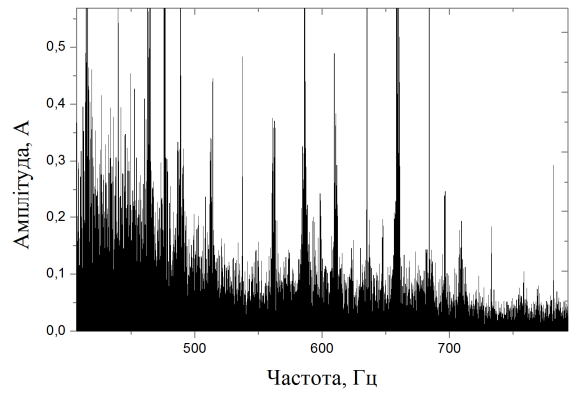
РК 25 Гц



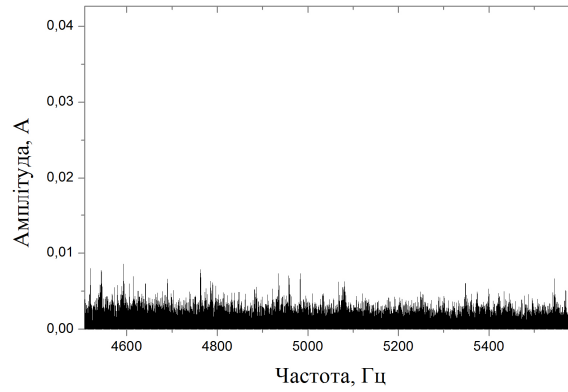
РК 50 Гц



РК 175 Гц



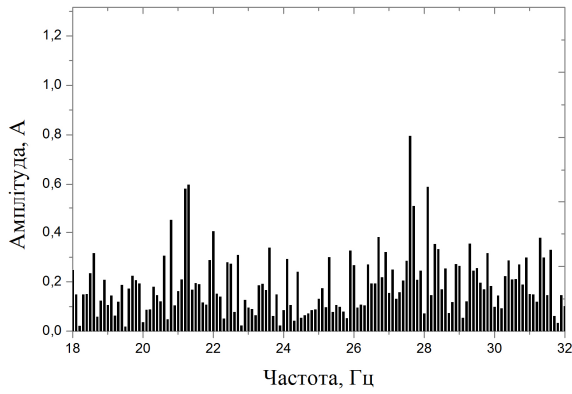
ТРЦ-3



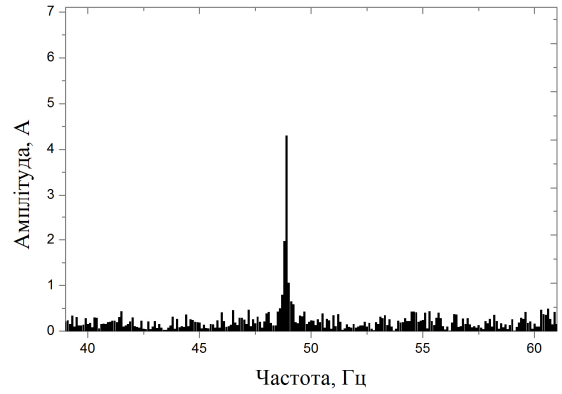
ТРЦ-4

Рисунок В.7– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

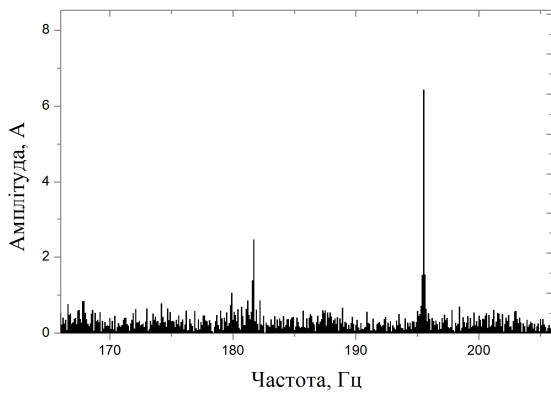
1,1 кГц



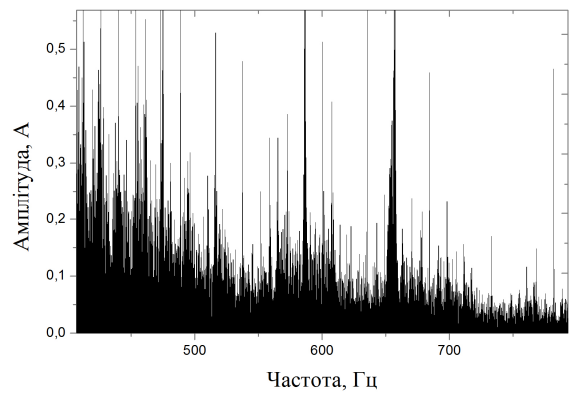
ПК 25 Гц



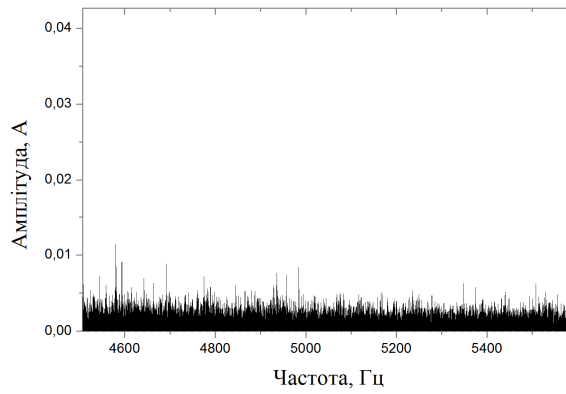
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

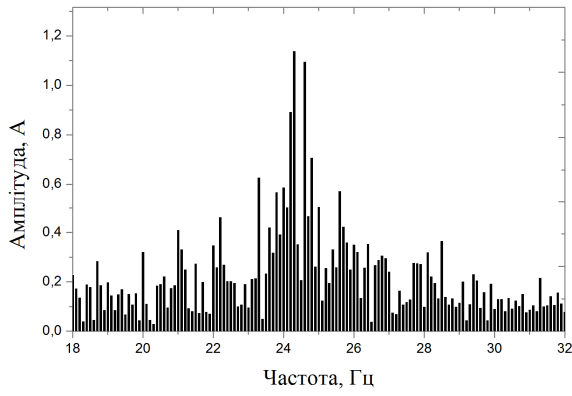


ТРЦ-3

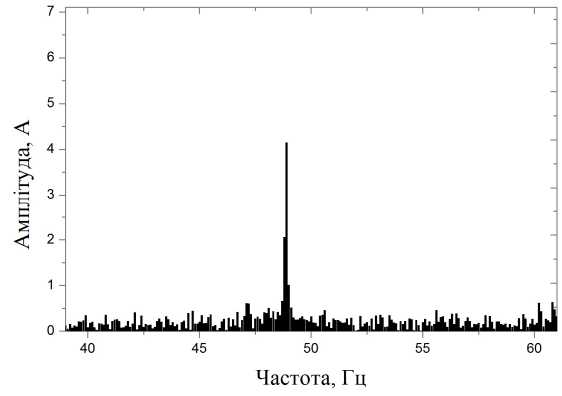


ТРЦ-4

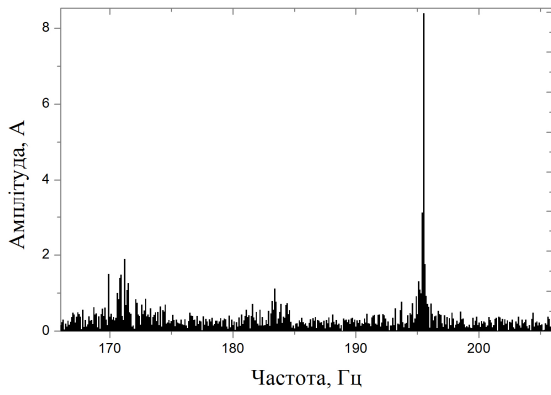
Рисунок В.8— Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,2 кГц



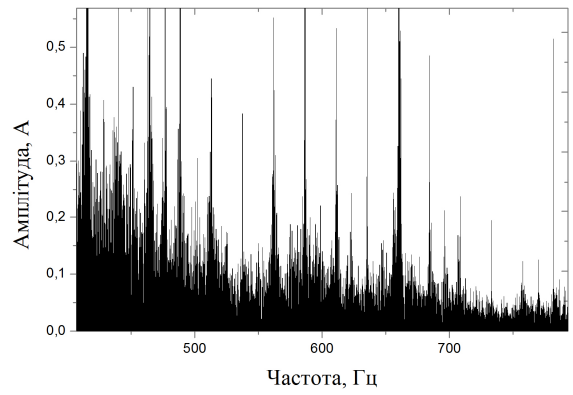
ПК 25 Гц



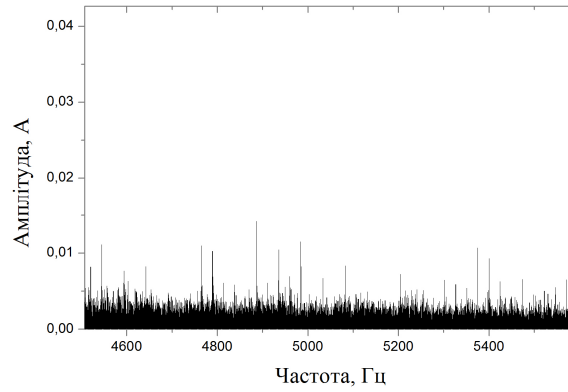
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



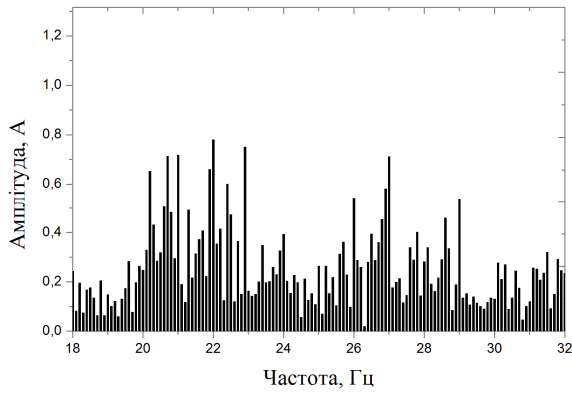
ТРЦ-3



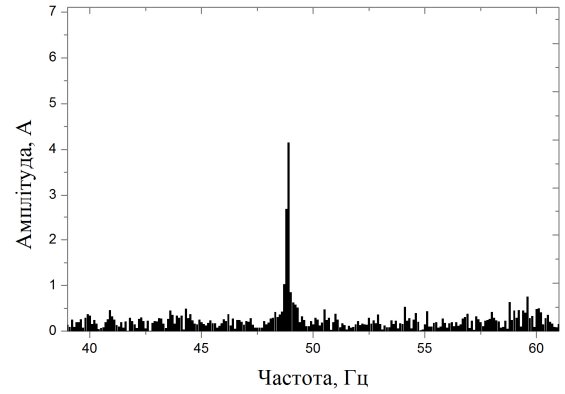
ТРЦ-4

Рисунок В.9– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції

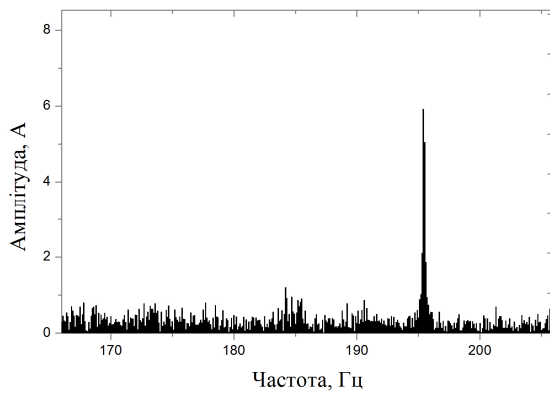
1,3 кГц



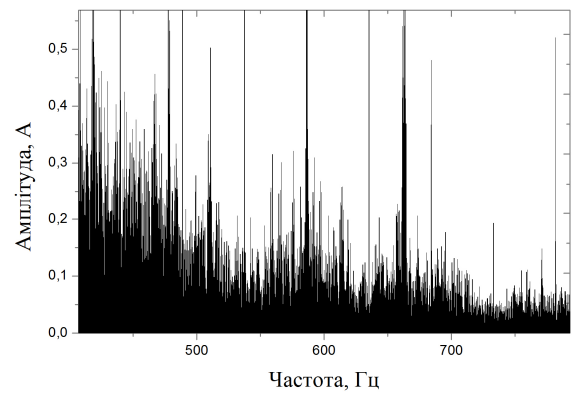
ПК 25 Гц



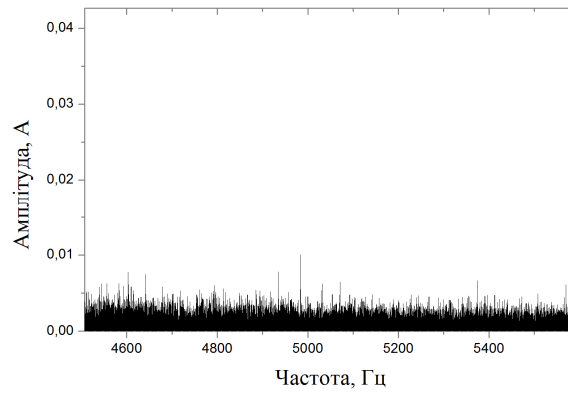
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

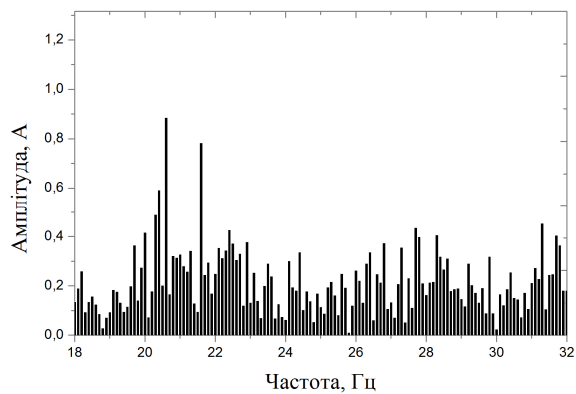


ТРЦ-3

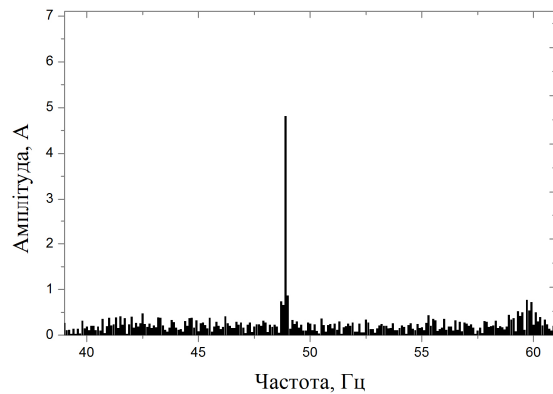


ТРЦ-4

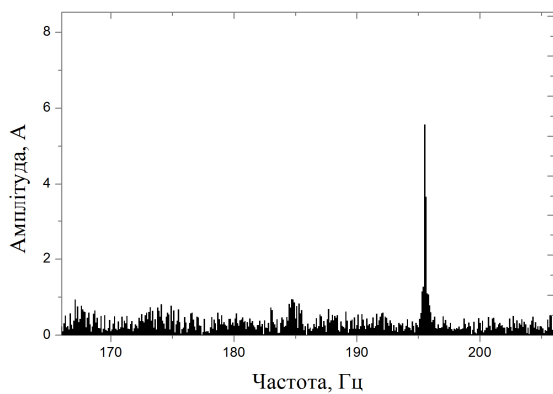
Рисунок В.10– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,4 кГц



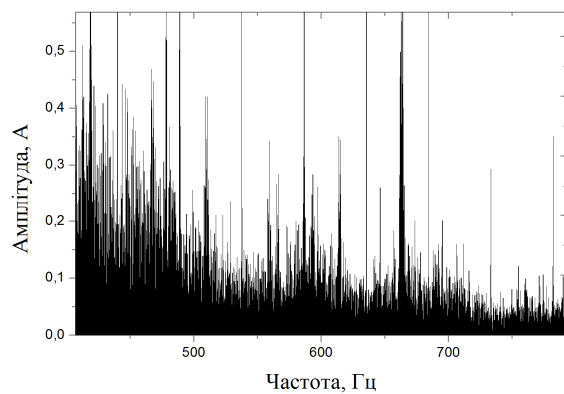
ПК 25 Гц



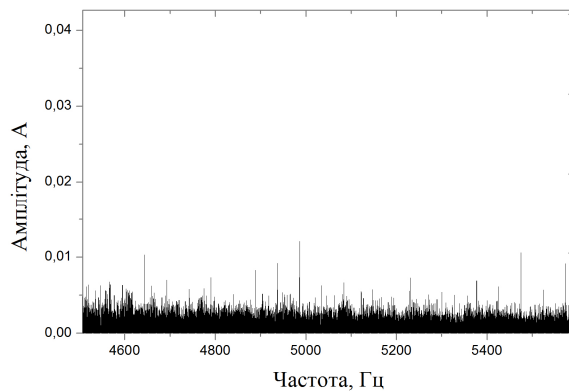
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

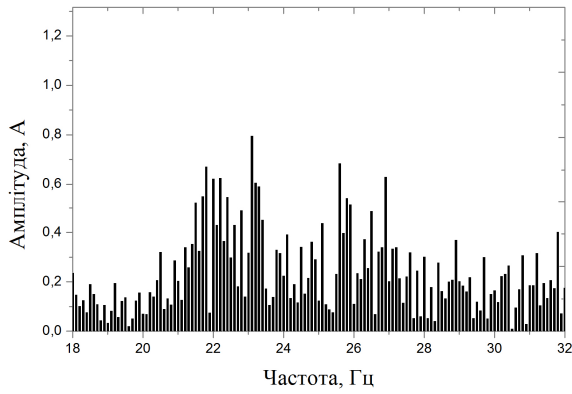


ТРЦ-3

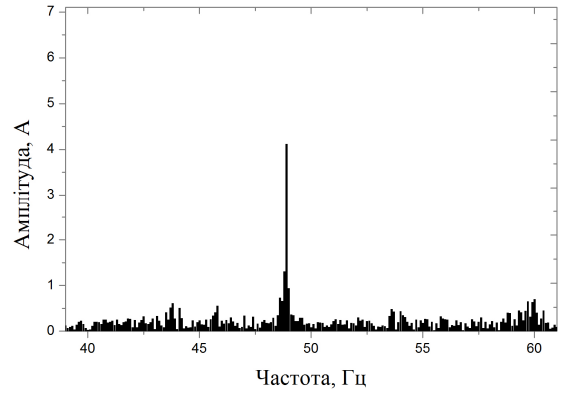


ТРЦ-4

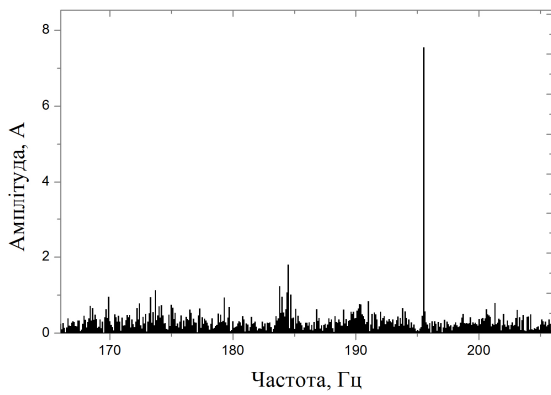
Рисунок В.11– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,5 кГц



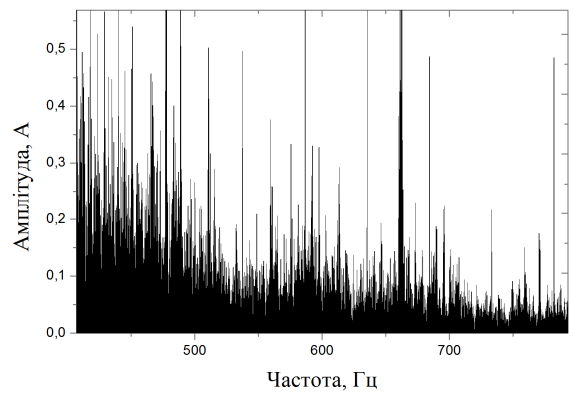
ПК 25 Гц



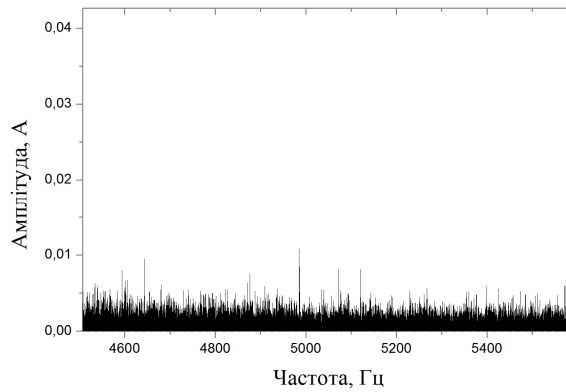
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

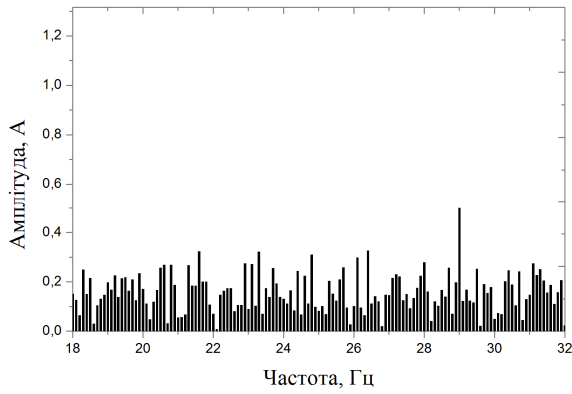


ТРЦ-3

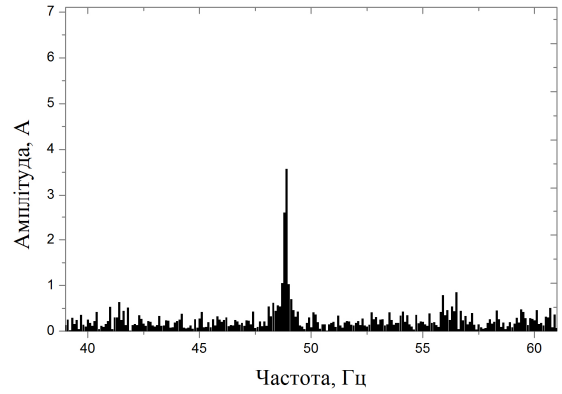


ТРЦ-4

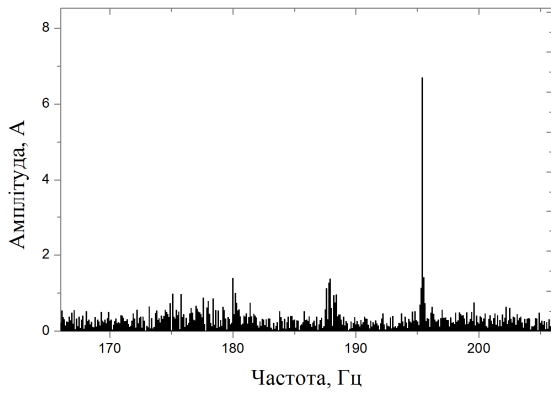
Рисунок В.12– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,6 кГц



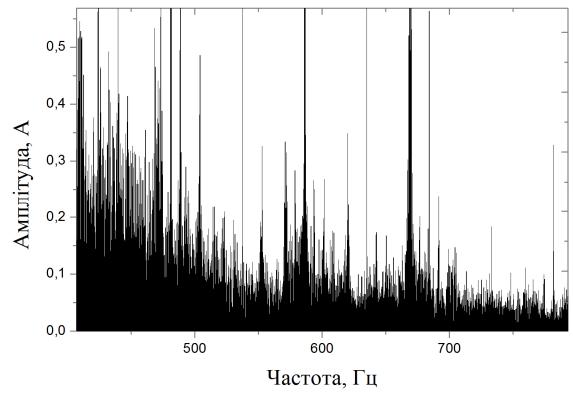
ПК 25 Гц



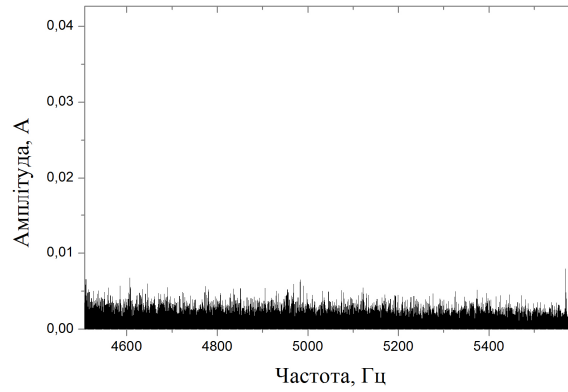
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

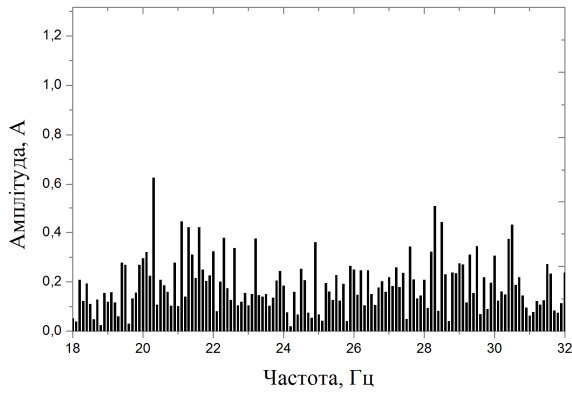


ТРЦ-3

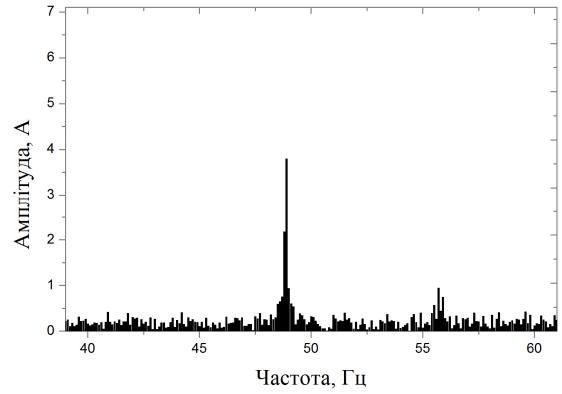


ТРЦ-4

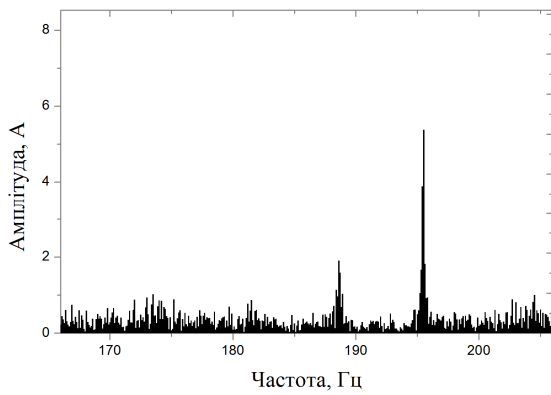
Рисунок В.13– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,7 кГц



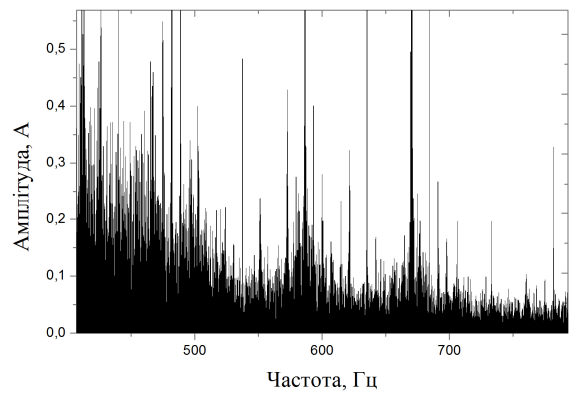
ПК 25 Гц



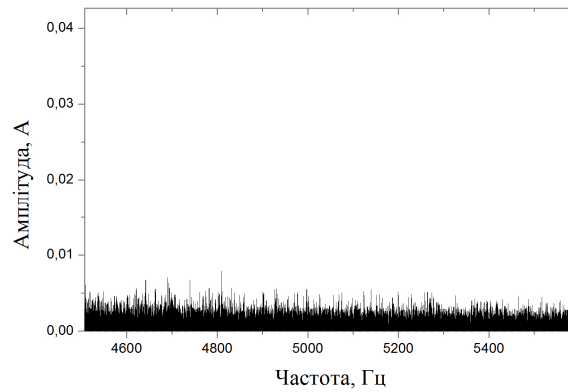
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

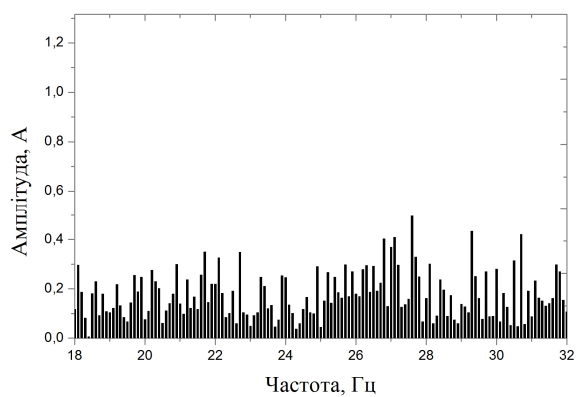


ТРЦ-3

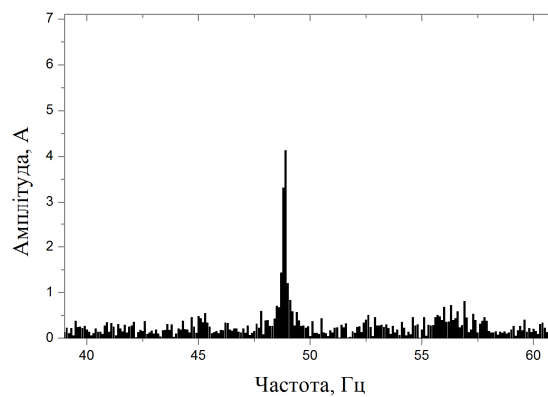


ТРЦ-4

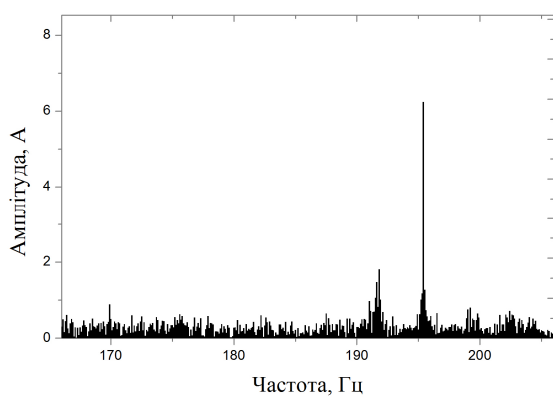
Рисунок В.14– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,8 кГц



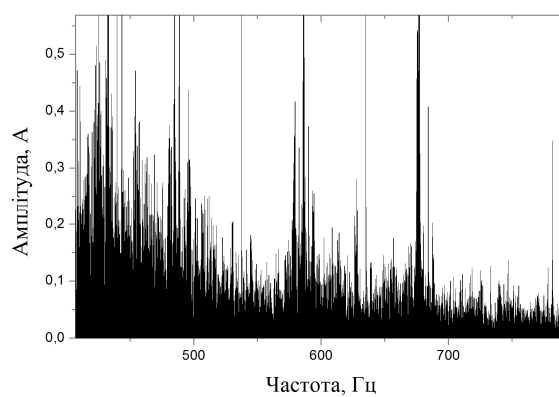
ПК 25 Гц



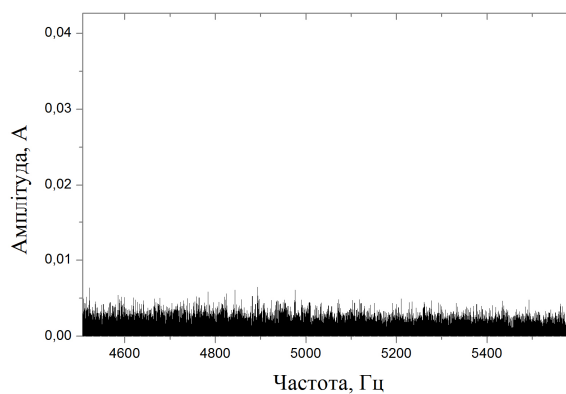
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц

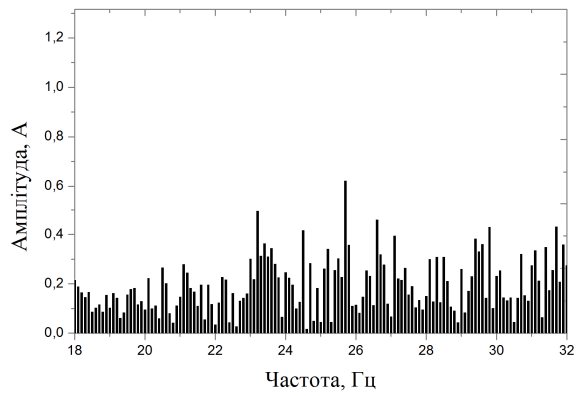


ТРЦ-3

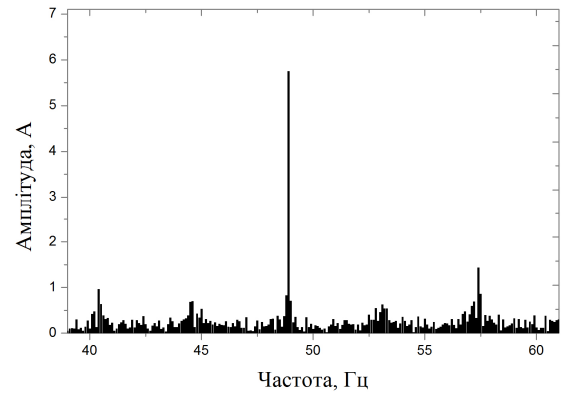


ТРЦ-4

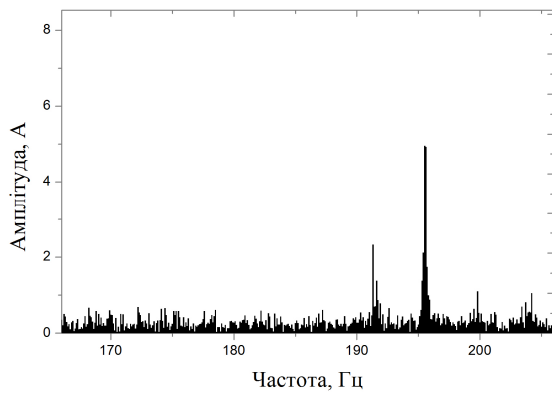
Рисунок В.15– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 1,9 кГц



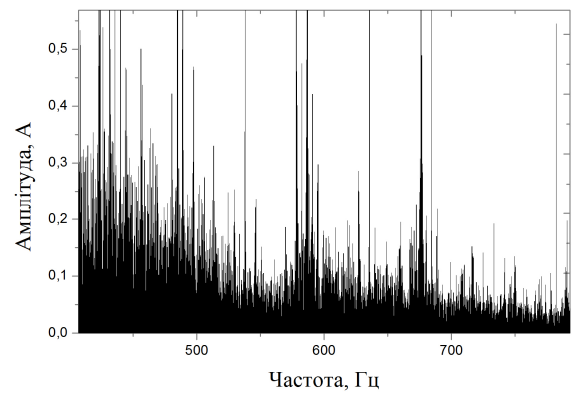
ПК 25 Гц



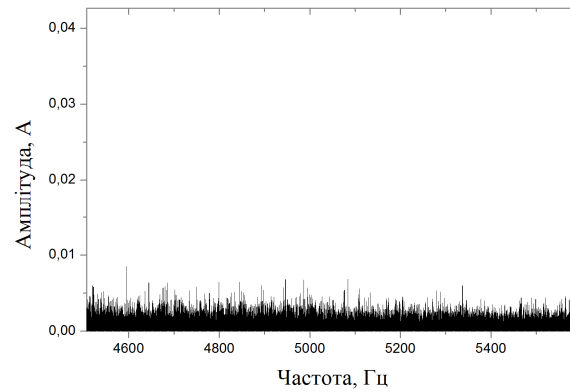
ПК 50 Гц



ПК 175 Гц



ТРЦ-3



ТРЦ-4

Рисунок В.16– Результати гармонійного аналізу струму для частоти модуляції 2,0 кГц

ДОДАТОК Г

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТЯГОВОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ТДП-12500/10ЖУ1

Таблиця Г.1

## Параметри трансформатора ТДП-12500/10ЖУ1

Параметр	Значення параметру
Номінальна потужність $S_{НОМ}$ , кВА	11800
Номінальна лінійна напруга обмотки ВН $U_{1H}$ , В	10000
Номінальна лінійна напруга обмотки НН $U_{2H}$ , В	2444
Втрати потужності ХХ $P_X$ , кВт	16
Втрати потужності КЗ $P_K$ , кВт	72,5
Струм ХХ $I_X$ , %	1,1
Напруга КЗ $u_K$ , %	7
Схема з'єднання обмоток	Y/ $\Delta$

Згідно до порядку розрахунку шуканих параметрів схеми заміщення [114] першочергово визначимо значення номінальних струмів та напруг, а також фазні струми, напруги та потужності холостого ходу та короткого замикання. Враховуючи схеми з'єднання обмоток останні визначимо як:

$$U_{1\Phi} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{10000}{1,732} = 5774 \text{ В}; \quad (\text{Г.1})$$

$$U_{2\Phi} = U_{2H} = 2444 \text{ В}; \quad (\text{Г.2})$$

$$I_{1\Phi} = I_{1H} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{11800 \cdot 10^3}{1,732 \cdot 10000} = 682 \text{ А}; \quad (\text{Г.3})$$

$$I_{0\Phi} = I_{1\Phi} \frac{I_X}{100} = 682 \cdot \frac{1,1}{100} = 7,5 \text{ А}; \quad (\text{Г.4})$$

$$P_{0\Phi} = \frac{P_X}{m} = \frac{16000}{3} = 5333 \text{ Вт}; \quad (\text{Г.5})$$

$$I_{K\Phi} = I_{1H} = 682 \text{ А}; \quad (\text{Г.6})$$

$$P_{K\Phi} = \frac{P_K}{m} = \frac{72500}{3} = 24167 \text{ Вт.} \quad (\text{Г.7})$$

$$U_{K\Phi} = U_{1\Phi} \frac{u_K}{100} = 5774 \cdot \frac{7}{100} = 404 \text{ В;} \quad (\text{Г.8})$$

У виразах (4.12), (4.14)  $m = 3$  – число фаз.

Отримані значення наведених параметрів є базовими для визначення величин активного та індуктивного опорів первинної, вторинної обмоток та кола намагнічування, які, з урахуванням загальноприйнятих припущень щодо розрахунку схеми заміщення трансформатора [112], визначаються як:

$$r_1' \approx r_2' = \frac{1}{2} r_K; \quad (\text{Г.9})$$

$$r_2' = r_2 k^2; \quad (\text{Г.10})$$

$$x_1' \approx x_2' = \frac{1}{2} x_K; \quad (\text{Г.11})$$

$$x_2' = x_2 k^2; \quad (\text{Г.12})$$

$$r_0 = \frac{P_{0\Phi}}{I_{0\Phi}^2}; \quad (\text{Г.13})$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}; \quad (\text{Г.14})$$

У виразах (Г.9-Г.12, Г.14):

$r_K$ ,  $x_K$  – відповідно активний та індуктивний опори короткого замикання;

$r_2', x_2'$  – приведені до первинної обмотки активний та індуктивний опори вторинної обмотки;

$$k = \frac{U_{1\Phi}}{U_{2\Phi}} = \frac{5774}{2444} = 2,36 \quad - \quad \text{коефіцієнт приведення} \quad (\text{коефіцієнт}$$

трансформації трансформатора);

$z_0$  – повний опір кола намагнічування.

Розрахуємо вказані параметри:

$$r_K = \frac{P_{K\Phi}}{I_{K\Phi}^2} = \frac{24167}{682^2} = 0,052 \text{ Ом}; \quad (\text{Г.15})$$

$$r_0 = \frac{P_{0\Phi}}{I_{0\Phi}^2} = \frac{5333}{7,5^2} = 95 \text{ Ом}. \quad (\text{Г.16})$$

Для визначення значень індуктивних опорів попередньо встановимо значення повних опорів  $z_K$  та  $z_0$  відповідно:

$$z_K = \frac{U_{K\Phi}}{I_{K\Phi}} = \frac{404}{682} = 0,59 \text{ Ом}. \quad (\text{Г.17})$$

$$z_0 = \frac{U_{1\Phi}}{I_{0\Phi}} = \frac{5774}{7,5} = 770 \text{ Ом}. \quad (\text{Г.18})$$

З урахуванням отриманих значень шукані індуктивні опори становлять:

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} = \sqrt{(0,59)^2 - (0,052)^2} = 0,588 \text{ Ом}; \quad (\text{Г.19})$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} = \sqrt{(770)^2 - (95)^2} = 764 \text{ Ом}; \quad (\text{Г.20})$$

ДОДАТОК Д

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Радник директора  
ДП «НВК«Електрозовобудування»  
з наукових питань, канд. техн. наук,  
академік ТАУ

 В.К. Варченко  
2014 р.

## АКТ

Про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Бондаренка Юрія Сергійовича: «Поліпшення електромагнітної сумісності  
асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними систе-  
мами електрифікованих залізниць»

м. Дніпропетровськ \_\_\_\_\_ 2014 р.

Цей акт складений про те, що у ДП «НВК«Електрозовобудування», при-  
йняті до розгляду на предмет впровадження деякі матеріали, викладені у ди-  
сертації Бондаренка Ю.С., щодо визначення робочих частот модуляції тяго-  
вого статичного перетворювача електрорухомого складу постійного струму з  
асинхронним тяговим електроприводом з точки зору можливості поліпшення  
його електромагнітної сумісності з системами СЦБ.

Головний конструктор



А.Я. Гривнак

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна



Б.С. Боднар

2014 р.

## АКТ

Про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи Бондаренка Юрія Сергійовича: «Поліпшення електромагнітної сумісності асинхронних приводів електровозів постійного струму з суміжними системами електрифікованих залізниць»

м. Дніпропетровськ

\_\_\_\_\_ 2014 р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, викладені у дисертації Бондаренка Ю.С.

1. Імітаційне моделювання асинхронних електроприводів та їх складових частин за допомогою MATLAB Simulink (дисципліна «Моделювання електромеханічних систем», для студентів 4-го курсу спеціальності 7.05070204).
2. Розробка експериментальної установки, що імітує функціонування тягового асинхронного електроприводу (дисципліни «Електронна та перетворювальна техніка», «Електричні машини», «Мікропроцесорні пристрої», «Системи керування електроприводом», для студентів 3-го та 4-го курсів спеціальності 7.05070204)

Декан факультету  
«Електрифікація залізниць»,  
докт.техн.наук, доцент

А.М. Афанасов

