

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

На правах рукопису

БОСИЙ ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.331:621.31.03

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Науковий консультант –
доктор технічних наук, професор
Сиченко Віктор Григорович

Дніпро – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. СТАН ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. МЕХАНІЗМИ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	20
1.1 Ефективність функціонування транспортного сектору держави	20
1.2 Шляхи підвищення ефективності електроенергетичних систем	28
1.3 Необхідні передумови для розвитку інтелектуальних технологій в електроенергетиці	37
1.4 Систематизація методів розрахунку режимів електропостачання систем електричної тяги	43
1.5 Розвиток технологій енергоефективного електропостачання електрифікованих залізниць	48
1.6 Висновки до розділу 1. Постановка задач дослідження.....	62
2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ	64
2.1. Фізичні процеси споживання електричної енергії в системах тягового електропостачання	65
2.2. Обґрунтування необхідності та припущень розроблюваної моделі. Постановка задачі.....	67
2.3. Методика розрахунку миттєвих схем для систем підтримання постійної потужності	70
2.4. Оцінка точності методів розрахунку	86
2.5. Електричний розрахунок систем тягового електропостачання в просторово-часових координатах	88
2.6. Узагальнення та систематизація розроблених методів	99
2.7. Особливості розрахунку розподілених систем тягового електро- постачання	109
2.8. Висновки до розділу 2.....	117
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРО- ПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ	120
3.1. Методологія проведення експериментальних досліджень	120
3.2. Системна оцінка показників якості електроенергії двох систем електричної тяги.....	126
3.3. Оцінка режимних перетікань потужності	146

3.4. Оцінка адекватності розробленого методу розрахунку на підставі експериментальних даних	168
3.5. Аналіз енергетичних складових, зумовлених спотвореннями синусоїдності.....	171
3.6. Висновки до розділу 3	187
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ НАПРУГИ НА СИСТЕМУ ОБЛІКУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	190
4.1. Особливості електроспоживання тяговими підстанціями постійного струму	190
4.2. Баланс електричної енергії тягових підстанцій постійного струму при роботі за несиметричної первинної напруги	191
4.3. Виробничо-економічні аспекти експлуатації систем обліку електроенергії.....	199
4.4. Дослідження роботи електронних лічильників при заниженій якості електроенергії.....	204
4.5. Висновки до розділу 4.....	211
5. НАУКОВІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	213
5.1 Постановка задачі.....	213
5.2 Принципи визначення керуючої послідовності впливів для пунктів підсилення тягової мережі.....	214
5.3 Розподілена система синхронних вимірювань електричних величин.....	225
5.4 Дослідження можливості застосування штучних нейронних мереж до визначення керуючої послідовності впливів	233
5.5 Висновки до розділу 5.....	238
6. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ШЛЯХОМ УЗГОДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО І ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	240
6.1. Постановка задачі.....	240
6.2. Особливості протікання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання змінного струму	241
6.3. Взаємодія системи тягового з системою зовнішнього електропостачання	248
6.4. Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності.....	256

6.5. Методика розрахунку оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності	266
6.6. Висновки до розділу 6	269
7. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ	272
7.1. Комп'ютерно-інтегрована система електричної тяги	272
7.2. Техніко-економічне обґрунтування варіантів удосконалення системи електричних вимірювань для тягових підстанцій	288
7.3. Оцінка економічної ефективності застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі	296
7.4. Висновки до розділу 7	301
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	302
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	306
ДОДАТОК А. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МОДЕЛІ В ПАКЕТІ МАТНСАД	330
ДОДАТОК Б. ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	356
ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	387

ВСТУП

Актуальність теми

Транспортна інфраструктура будь-якої розвиненої країни відіграє важливу роль в економічному, соціальному та стратегічному значеннях. Українські залізниці мають в своєму розпорядженні близько 22 тис. км та забезпечують до 80 % вантажних і до 50 % пасажирських перевезень [1]. Перевезення залізничним транспортом в енергетичному балансі України займають частку споживання електроенергії на рівні 4 %, при цьому від 2,8 до 3,5 % загального балансу електроенергії безпосередньо витрачається на електричну тягу [2]. За всю історію експлуатації залізничного транспорту в Україні частка електрифікованих залізниць із загальної експлуатаційної довжини залізничних колій постійно збільшується, складаючи на цей час близько 10 тис. км, що у відношенні до загальної експлуатаційної довжини складає 47 % [3]. Постійне збільшення протяжності електрифікованих залізниць протягом останніх років обумовлене перевагами, які полягають у тому, що питомі витрати електричної тяги менше від тепловозної у 1,8-2,2 рази [2].

За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії. При цьому, вантажонапруженість залізниць України в 3-5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн [1]. Історично так склалось, що в Україні застосовується два види електричної тяги – постійного та змінного струму, що створює технічні складності при експлуатації та перепони у широкому впровадженні високошвидкісного руху та збільшенні обсягів вантажних перевезень.

На даний час залізниці України представлені шістьма суб'єктами господарювання, які володіють залізничною інфраструктурою та розподілені за територіальним принципом, а саме Львівська, Південно-Західна, Одеська, Південна, Донецька, Придніпровська залізниці та інші підприємства і організації єдиного виробничого-технологічного комплексу, що забезпечують перевезення вантажів і пасажирів. На межах розділу експлуатаційної діяльності

залізниць виникають спірні питання, пов'язані з особливістю споживання електричної енергії електрорухомим складом, недосконалістю системи обліку електричної енергії та режимами напруги в системі електропостачання.

Електричну енергію залізниці отримують з оптового ринку електроенергії, використовуючи при її передачі до тягових підстанцій електричні мережі суміжних ліцензіатів, які підпорядковані адміністративно-територіальному поділу. У зв'язку з цим, в межах залізниць та декількох суміжних ліцензіатів оптового ринку електроенергії додатково виникають проблеми, пов'язані з режимами електропостачання.

Безпосередньо для електротягового рухомого складу відхилення режиму напруги від нормальних умов обмежують провізну і пропускну спроможності, викликають не виправдані втрати електроенергії в тягових мережах та, в цілому, ускладнюють виробничо-господарську діяльність електрифікованих залізниць. Так, на ділянках постійного струму фактична величина напруги, в першу чергу, обмежує технологічну можливість пропуску заданої кількості електрорухомого складу і перевезення встановленої вагової норми, що визначаються за умовами безпеки руху. Для ділянок, електрифікованих змінним струмом, окрім зазначеного вище, відмінності у модулях та кутах зсуву фаз напруг призводить до виникнення транзитних перетікань потужності. В таких випадках для електроенергії, закупленої на одній тяговій підстанції, створюються умови перетікання транзитом тяговою мережею і передачі районним споживачам іншої підстанції або, навіть, в первинну мережу. А оскільки на підставі діючих договірних відносин грошових компенсацій за транзитні перетоки суміжні ліцензіати оптового ринку не виконують, тому виникає надлишок закупленої електроенергії, який погіршує фінансово-економічні показники роботи залізниць та в окремих випадках зумовлює створювати додаткове секціонування контактної мережі, що технологічно порушує нормально встановлені схеми живлення.

Енергоефективність функціонування електрифікованих залізниць прийнято оцінювати рівнем технологічних втрат в пристроях

електропостачання. За умови відсутності автоматизованої системи обліку електроенергії на тягу поїздів, залізницями періодично проводяться експерименти по визначенню технологічних втрат в тяговій мережі, які для залізниць змінного струму складають 5-8 %, для постійного – 14-17 %, а в окремих випадках – до 24 % [2]. Через те, що в загальноенергетичному балансі України втрати електроенергії при її передачі та транспортуванні оцінюються на рівні 11 % [4], а прийнятним рівнем європейські країни вважають 6-8 % [5-6], можна зробити висновок, що система електричної тяги постійного струму має відносно низьку ефективність та нездатна за рівнем втрат конкурувати з системою змінного струму і, як наслідок, в загальнодержавному енергетичному балансі погіршує статистичні показники роботи транспортного сектору.

Перевезення електричним транспортом, незважаючи на вказані факти, в умовах нестійкої вартості енергоносіїв завжди виявляються найбільш рентабельними через закладену можливість диверсифікації виду первинних енергетичних ресурсів. По при цьому, на всьому шляху транспортування електроенергії від джерела до кінцевого споживача будуть наявні втрати деякої її частини, що є технологічно необхідним для забезпечення загального процесу передачі. З урахуванням того, що з кожною наступною ланкою передачі електроенергії накопичується рівень її втрат, то найбільшої актуальності набуває проблема зниження втрат та підвищення ефективності безпосередньо для кінцевого споживача електроенергії, який для електрифікованого залізничного транспорту є просторово-розподіленим та постійно змінюється у часі.

Розпочата експлуатація на залізницях України сучасного швидкісного рухомого складу наочно показала проблеми та обмеження, які містяться в інфраструктурі залізниць. В частині режиму електропостачання це стосується технічних обмежень за величиною та постійною часу споживання тягової потужності. Окрім цього, поступове впровадження інтелектуально керованих джерел альтернативної енергетики, в тому числі, і з приєднанням до тягових

мереж, з одного боку викликає проблеми узгодженості режимів їх роботи, а з іншого відкриває нові можливості у пошуку оптимальних розподілів потоків потужностей при живленні систем електричної тяги.

Таким чином, забезпечення енергоефективних режимів електропостачання в сучасних умовах експлуатації електрифікованих залізниць є актуальною проблемою і потребує наукового вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана відповідно до таких державних програм:

1) Державна Програма енергонезалежності, ухвалена указом Президента України № 5/2015 Про стратегію сталого розвитку «Україна – 2020» від 12.01.2015 р., в частині впровадження 100 відсотків обов'язкового комерційного обліку споживання енергоресурсів;

2) Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині:

- розвитку електроенергетичної галузі;
- розширення пропускної спроможності залізничних коридорів.

3) Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970), в частині

– підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на внутрішньому і зовнішньому ринку транспортних послуг;

- зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів;

4) Постанова Верховної Ради України «Про програму діяльності Кабінету Міністрів України» № 26-VIII від 11.12.2014 р. стосовно:

розділу 6 «Нова продовольча політика», а саме розвиток портової та залізничної інфраструктури для нарощування експорту (2015-2019 роки);

розділу 7 «Нова політика енергетичної незалежності», а саме інтеграція української енергосистеми в мережу європейських енергосистем ENTSO-E та

підвищення енергоефективності за рахунок реалізації проектів з використанням альтернативних джерел енергії (Clean Energy).

Обрані дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за наступними темами:

– «Розробка систем енергопостачання об'єктів залізничного транспорту з використанням новітніх схемних і проектних рішень», № держреєстрації 0111U009393;

– «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного струму», № держреєстрації 0113U007949;

– «Дослідження якості електроенергії нетягових споживачів, які живляться від ліній «два проводи – рейка», № держреєстрації 0115U003922;

– «Дослідження транзиту потужності тяговою мережею при відхиленнях режиму напруги тягової підстанції змінного струму», № держреєстрації 0115U003919;

– «Дослідження режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій постійного струму та в тяговій мережі в умовах гірського перевалу», № держреєстрації 0115U003921;

– «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», № держреєстрації 0115U002311;

– «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії», № держреєстрації 0115U003918;

– «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем», № держреєстрації 0116U006982.

Результати дисертаційної роботи отримано в результаті виконання вказаних досліджень, у яких дисертант виступав керівником, виконавцем і співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованого залізничного транспорту за рахунок створення керуючої послідовності впливів, яка забезпечує оптимальний перерозподіл потоків потужності в системах тягового електропостачання, а також шляхом узгодження режимів взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань:

1. Виконати аналіз стану проблеми енергоефективності режимів електропостачання залізничного транспорту, дослідити механізми ефективного використання електроенергії.

2. Розвинути метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання для коректного визначення режиму напруги при наявності на електрорухомому складі систем стабілізації тягової потужності.

3. Розробити метод розрахунку систем тягового електропостачання на основі просторово-часового уявлення електричних величин, з урахуванням керованих елементів в системах електричної тяги.

4. На основі експериментальних даних системно проаналізувати режими роботи систем тягового електропостачання постійного та змінного струму та дослідити вплив спотворень якості електроенергії на енергетичні характеристики і точність систем обліку.

5. Розробити наукові основи інтелектуального управління режимом напруги в системі електропостачання тяги постійного струму за рахунок визначення керуючої послідовності впливів на пристрої тягового електропостачання.

6. Удосконалити методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

7. Розробити алгоритми для застосування розроблених методів у програмному продукті для інтелектуалізації процесу електропостачання в системах електричної тяги.

Об'єкт дослідження – процес електропостачання в системах електричної тяги електрифікованих залізниць.

Предмет дослідження – енергоефективність режимів роботи системи тягового електропостачання.

Методи дослідження. В роботі використано: аналіз літературних та електронних джерел для визначення стану енергоефективності електропостачання електрифікованих залізниць; баланс потужностей та узагальнення закономірностей для розвитку методів розрахунку режимів систем тягового електропостачання; експериментальні вимірювання, спектральний, статистичний аналіз для порівняння енергоефективності систем тягового електропостачання; дослідження на фізичних моделях для визначення впливу режимів напруги на систему обліку та енергетичні характеристики випрямлячів; принципи розрахунків та оптимізації в просторово-часових координатах для визначення керуючої послідовності впливів на пункти підсилення тягової мережі постійного струму; основи теорії енергообмінних процесів для нелінійних кіл та принципи параметризації при узгодженні взаємодії систем зовнішнього і тягового електропостачання; техніко-економічний аналіз для обґрунтування засобів підвищення енергоефективності.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які отримані в дисертації, обґрунтовані та достовірні оскільки експериментальні дослідження коректно поставлені та кваліфіковано виконані, розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує 5 %; дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики; більшу частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

Основні наукові положення

1. Для створення умов підвищення енергоефективності процесів електропостачання електрифікованих залізниць необхідно втрати потужності в тягових мережах розглядати як добуток просторово-розподілених адитивних функцій спаду напруги та струму в контактній мережі, що дозволяє застосувати принцип суперпозиції до формалізації цільової функції при оптимізації режимів електропостачання та в аналітичному вигляді описати дисипативний процес виникнення втрат електроенергії в системах тягового електропостачання.

2. Створення керуючої послідовності впливів на пункти підсилення всередині міжпідстанційної зони при мінімізації добутку двовимірних функцій спаду напруги і струму в контактній мережі та представлення закономірності зміни опору тягової мережі у вигляді неперервної функції дозволяє підвищити енергоефективність та оптимізувати режими електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму.

3. Ефективність функціонування електрифікованих залізниць доцільно підвищувати шляхом узгодження взаємодії системи зовнішнього і тягового електропостачання, яка для електротяги змінного струму досягається переведенням транзитних перетікань потужності між підстанціями в реактивні за рахунок направлення вирівнювального струму за бісектрисою кута між векторами однойменних напруг первинної мережі, а для електротяги постійного струму – врахуванням реального профілю навантаження при дискретному визначенні потужності компенсуючого пристрою в аргументах цільової функції.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

1) запропоновано функцію опору тягової мережі та отримано аналітичні вирази у вигляді квадратичних залежностей з урахуванням питомого опору тягової мережі та координат вузлів з'єднання контактних підвісок відносно довжини ділянки, які дозволяють застосувати формальний підхід та перейти від дискретного до неперервного розрахунку систем

тягового електропостачання незалежно від схеми живлення та місцевих особливостей електрифікованих ділянок залізниць;

2) сформульовано задачу оптимального керування для процесу електропостачання тяги постійного струму за критерієм мінімуму втрат потужності в системі електропостачання з урахуванням наявності на ділянці керованих пунктів підсилення, що дозволило розробити нову систему підтримки стабільного рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу;

3) запропоновано концепцію комплексного дослідження для тягових підстанцій електрифікованих залізниць, яка передбачає одночасне врахування часових залежностей основних показників якості електроенергії та додатково коефіцієнтів спотворення і фазових портретів струмів навантаження для окремих класів первинної напруги підстанцій, що дозволило порівняти енергоефективність систем тягового електропостачання постійного і змінного струму з урахуванням спотворень якості електроенергії та вмісту неактивних складових повної потужності.

Дістали подальшого розвитку та удосконалені:

4) метод фіксованої вихідної потужності для аналізу режимів системи електричної тяги, який за допомогою аналітичного виразу враховує принцип споживання постійної потужності, що відрізняється можливістю прямого безітераційного розрахунку та дозволяє коректно визначати показники режиму системи електропостачання для нових типів електровозів з функцією стабілізації тягової потужності;

5) метод обчислення керуючої послідовності впливів з використанням штучних нейронних мереж, в основу якого покладено тришарову структуру персептрону з кількістю вхідних нейронів, що дорівнює кількості точок вимірювання напруги в контактній мережі, одним прихованим шаром та з кількістю вихідних нейронів, що визначається кількістю керованих пунктів підсилення на ділянці, який дозволяє використання розроблених методів визначення керуючої послідовності впливів в системах реального часу за

неповної інформації на підставі лише дискретного розподілу спаду напруги в контактній мережі;

б) методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання, які вплив параметрів поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності на рівень транзитних перетікань потужності в системах електричної тяги змінного струму описують системою рівнянь в параметричному вигляді, що дозволяє залежно від кута зсуву фаз векторів напруги суміжних тягових підстанцій зменшити активні транзитні перетікання потужності шляхом їх переведення у реактивну площину;

7) метод визначення потужності компенсуючих пристроїв для сторони змінної напруги тягових підстанції постійного струму, який враховує фактичний профіль споживання електроенергії, обсяги недокомпенсованої і перекомпенсованої реактивної електроенергії та, за умови застосування статичних пристроїв компенсації, дозволяє знизити видатки, пов'язані з перетіканнями реактивної електроенергії;

Практичне значення одержаних результатів

Отримані в дисертації результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили:

1) використати у практиці проектування електричних мереж систем електропостачання залізничного транспорту удосконалений метод розрахунку систем тягового електропостачання з представленням величин у просторово-часових координатах та визначенням інтегральних характеристик і автоматизованим врахуванням впливаючих факторів;

2) запропонувати систему стабілізації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу постійного струму, яка в залежності від поїзної ситуації дозволяє зменшити втрати електроенергії в контактній мережі електрифікованих ділянок з 14-17% до 7-8,5% від споживання електроенергії на тягу, з одночасною можливістю технічного обліку втрат електричної енергії в тяговій мережі;

3) визначити параметри пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності для мінімізації транзитних перетікань електричної енергії з 4 МВт до 100-160 кВт між тяговими підстанціями змінного струму, які працюють в умовах відхилення кута зсуву фаз до 10 електричних градусів між однойменними напругами в системі зовнішнього електропостачання;

4) визначити потужності компенсуючих пристроїв для сторони змінної напруги тягових підстанцій постійного струму, які в умовах нерівномірних профілів добового навантаження дозволяють забезпечити максимальне зниження плати за перетікання реактивної електроенергії за умови її нарахування суб'єктам господарювання.

Дослідний зразок розробленого пристрою вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних придатний до застосування в реальних умовах на тягових підстанціях або електрорухомому складі. Використання пристроїв у вигляді розподіленої системи вимірювань дозволяє, окрім моніторингу режиму напруги в реальному часі, визначити поточні втрати електроенергії в тяговій мережі.

Створений програмний продукт для розрахунку режимних показників систем тягового електропостачання дозволяє на стадіях передпроектних досліджень визначати необхідні характеристики для ділянок, що підлягають електрифікації, в умовах неповної інформації, а для експлуатації – оцінювати технічні обмеження та аналізувати складові втрат в пристроях електропостачання.

Розроблені методики та підходи підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць прийнято до використання службами електропостачання регіональних філій «Одеська залізниця», «Південна залізниця» та Департаментом електрифікації та електропостачання ПАТ «Укрзалізниця», а також ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект» та ТОВ «Деметра Л».

Результати роботи у вигляді фізичних моделей випрямляча тягової підстанції постійного струму, пристрою плавної компенсації реактивної потужності, пристрою вимірювання напруги та комп'ютерної програми, впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Робота у складі проекту отримала фінансування на підставі конкурсного відбору науково-технічних розробок молодих учених Міністерства освіти і науки України у 2016 р., чим також підтверджується її практична значимість.

Особистий внесок здобувача

Постановка мети та розробка задач дослідження виконані спільно з науковим консультантом. Отримані наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать: [8] – концепція та схемна реалізація системи моніторингу напруги в тяговій мережі; [10] – статистичний аналіз показників якості електроенергії, розрахунки складових повної потужності для системи постійного та змінного струму; [11] – методологія виконання розрахунків, виведення формул та їх узагальнення до різних схем живлення; [12] – розділи монографії з комплексного аналізу якості електроенергії в системі електричної тяги змінного струму, обліку електроенергії у несинусоїдних режимах тягових підстанцій, розробки технічних засобів підвищення якості електричної енергії в системах змінного струму; [13] – розробка схем підключення засобів вимірювальної техніки для дослідження електромагнітних процесів; [14] – виведення теоретичних співвідношень функцій втрат потужності для різних схем живлення; [15] – розробка імітаційної моделі та виконання варіантних розрахунків для різних графіків руху поїздів; [16] – теоретичні дослідження та отримання квадратичних функцій струморозподілу; [17] – розробка алгоритму

пошуку мінімуму цільової функції з використанням імітаційної моделі системи тягового електропостачання; [20] – розробка схеми проведення натурних досліджень, узагальнення результатів спектрального аналізу осцилограм випрямленої напруги; [21] – теоретичні викладки та узагальнення отриманих співвідношень розрахунку струму підсилюючого пункту тягової мережі; [22] – постановка експериментальних вимірювань похибок лічильників електроенергії, аналіз та узагальнення результатів; [29] – формалізація аналітичних виразів для розрахунку режиму напруги; [30] – розробка схем проведення вимірювань та вимірювального пристрою, обробка результатів вимірювання; [33] – реалізація алгоритмів розрахунку втрат потужності з можливістю коригування графіку руху поїздів; [35] – принцип генерації додаткової потужності підсилюючим пунктом на основі розподіленої системи синхронних вимірювань напруги в контактній мережі; [36] – розробка концепції побудови програмного продукту, реалізація алгоритмів багатопотокових обчислень і основних класів системи моделювання; [37] – аналіз особливостей функціонування оптового ринку електроенергії стосовно електропостачання електрифікованих залізниць; [39] – багатоваріантні обчислення режимів виконання графіку руху поїздів, аналіз зниження втрат потужності в тяговій мережі; [40] – узагальнення способів коригування графіку руху поїздів для зменшення експлуатаційних витрат; [41] – отримання розрахункових формул для різних варіантів підсилення тягової мережі постійного струму; [43] – формалізація цільової функції та вибір методу оптимізації; [44] – аналіз результатів вимірювання режиму напруги; [46] – розрахункові формули з визначення функції опору тягової мережі на двоколійних ділянках; [48] – визначення та ранжування факторів, що впливають на втрати електроенергії в контактній мережі; [50] – розробка схемних рішень фізичного макету; [51] – синтез перетворювача сигналів для розширення можливостей вимірювального приладу; [53] – формулювання критеріїв та обмежень для роботи системи стабілізації; [54] – аналіз результатів проведених вимірювань; [55] – аналіз причин та наслідків від виникнення вирівнювальних

струмів в тяговій мережі; [56] – розрахунки варіантів зниження транзиту потужності тяговою мережею; [57] – розробка схемних рішень для одночасного вимірювання в колі постійного і змінного струму.

Роботи [7, 9, 18, 19, 23-28, 31, 32, 34, 38, 42, 45, 47, 49, 52] написані самостійно, без співавторів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на наступних вітчизняних та міжнародних конференціях: VI Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту» ТРАНСЕЛЕКТРО-2012 (Місхор, 2012 р.), IV Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2013 р.), II Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ-2013 (Вінниця, 2013), 11th International Conference «Modern Electric Traction» MET'2013 (Warsaw, 2013), International Conference «Reliability of railway and possibilities to increase it» (Warsaw, 2013), 74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2014), V Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2014), VII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту» «ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» (Одеса, 2014), International Conference «Najnowsze technologie w transporcie szynowym» (Warsaw, 2014), VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2015), VIII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту» «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015» (Одеса, 2015), Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» (Київ, 2015), III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2015» (Вінниця, 2015), Міжнародна науково-практична конференція «Силова електроніка та енергоефективність» (Харків, 2015), 4th International

Conference «Advanced rail technologies» (Warsaw, 2015), VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель, 2015).

В повному обсязі дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та науковому семінарі в Instytutu Kolejnictwa (Інститут залізничного транспорту, Польща).

Публікації

Основні положення дисертації опубліковано у 25 основних працях, з них: 2 – статті у журналах, що індексуються Scopus [7, 8]; 3 – статті в закордонних виданнях [9-11]; 1 – монографія, 19 – статті у фахових виданнях, і 26 додаткових, з них 2 – патенти на корисну модель, 2 – свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма), 6 – додаткові статті, 16 – тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура дисертації

Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 396 сторінок, серед них 225 рисунків за текстом, з них 75 рисунків розташовано на 30 окремих сторінках, 24 таблиці за текстом, список використаних джерел з 307 найменувань – на 24 сторінках, додатки – на 67 сторінках. Основний текст роботи викладено на 275 сторінках.

РОЗДІЛ 1

**СТАН ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.
МЕХАНІЗМИ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

1.1 Ефективність функціонування транспортного сектору держави

Транспортний сектор є необхідною складовою для функціонування і сталого розвитку економіки держави. Працюючи у тісній взаємодії з виробництвом і споживанням, транспорт є каталізатором активності економіки і руху товарно-матеріальних потоків, підтримує мобільність робочої сили та задовольняє потреби населення у перевезеннях. Розвинена транспортна інфраструктура створює контури території і є базою для територіального розподілу праці, обумовлює динамічність і ефективність соціально-економічного розвитку як окремих регіонів, так і країни в цілому.

Сучасний стан транспортної галузі України переживає період глибокої системної кризи. Зазначене обумовлюється наявною системою управління транспортним комплексом, станом виробничо-технічної бази і технологічним рівнем організації перевезень, який за багатьма параметрами не відповідає потребам суспільства та європейським стандартам якості надання транспортних послуг, перешкоджає підвищенню ефективності функціонування та потребує докорінного реформування та модернізації.

На думку експертів [1], транспортна галузь досі не одержала комплексного розвитку, в основу якого покладені сучасна прогресивна організаційна структура та ефективна економічна модель розвитку, побудована на принципах конкуренції, запровадженні ефективних механізмів державного регулювання ринку, використанні інституту державно-приватного партнерства в реалізації крупних інвестиційних проектів, активізації інновацій в транспортній сфері, інтеграції національної транспортної системи до європейської та азійської транспортних систем,

підвищення конкурентоздатності національної транспортної системи на світовому ринку обслуговування транснаціональних маршрутів.

За всю історію функціонування залізниць України частка електрифікованих залізниць із загальної експлуатаційної довжини залізничних колій, починаючи з 1980 р. і до цього часу постійно збільшується (рис. 1.1), складаючи станом на 2014 р. близько 10 000 км, що у відношенні до загальної експлуатаційної довжини складає 47 % [3]. Головною передумовою постійного збільшення електрифікованих залізниць протягом останніх 35 років є те, що питомі витрати електричної тяги менше від тепловозної у 1,8-2,2 рази [2].

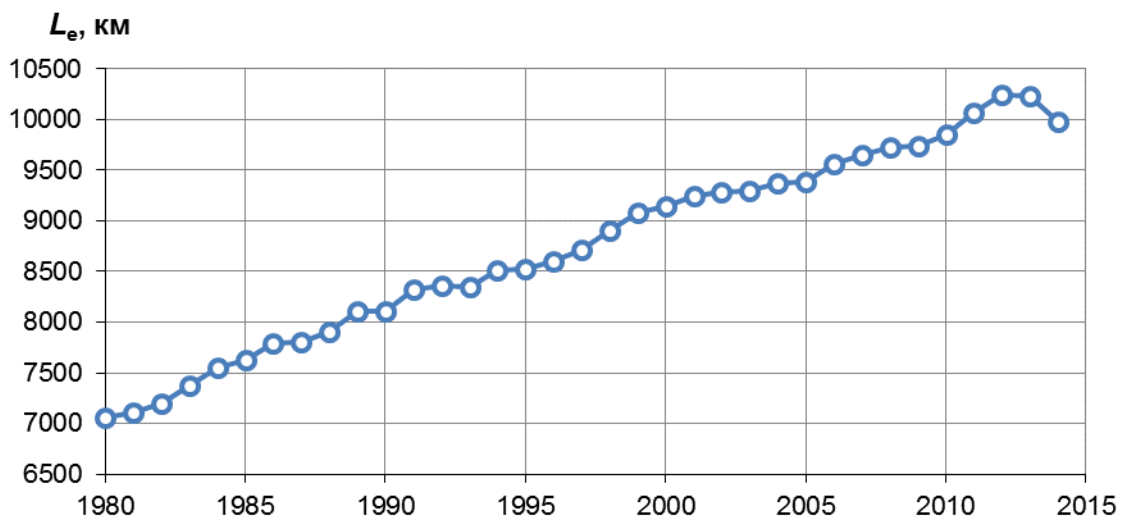


Рис. 1.1. Динаміка електрифікації залізниць України за роками

Динаміка обсягів вантажних і пасажирських перевезень в Україні у розрізі видів транспорту відображає характерні періоди нестабільності, які є наслідком кризових явищ в економіці країни (рис. 1.2). Загальні обсяги перевезень вантажів за останні роки знижуються, у порівнянні з максимальними показниками, які зафіксовані 2007 р., залізничні перевезення скоротились майже на 32 %. Криза в економіці та складна обстановка на сході України негативно позначається на показниках роботи транспортної галузі. Дохідна частина від перевезень на залізничному транспорті на 90 % формується транспортуванням вантажів.

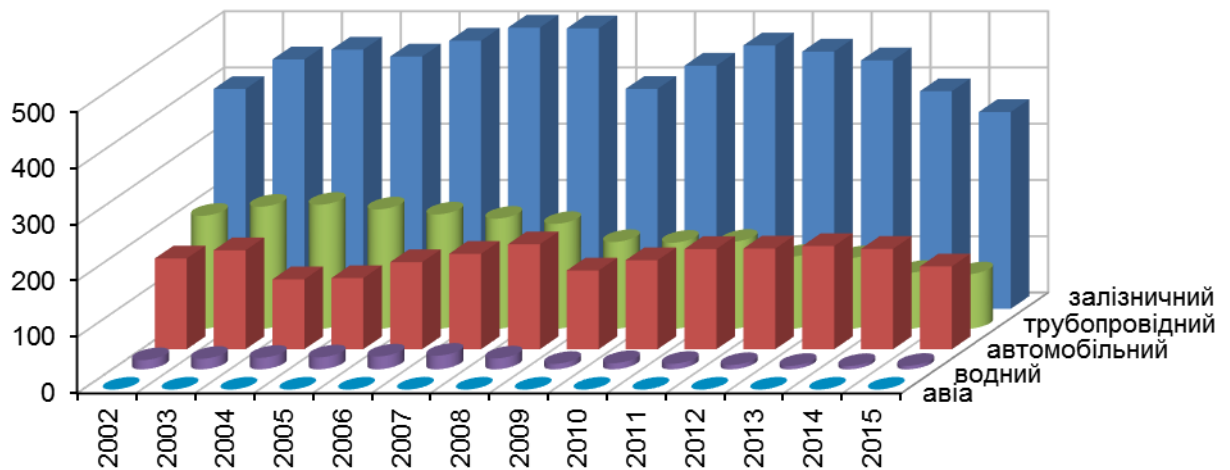


Рис. 1.2. Вантажні перевезення за видами транспорту, млн. т.

Структура вантажних перевезень за останні 10 років у межах України визначається наступним чином: залізничні – 57 %, трубопровідний та автомобільний – 20-21 %, водний – до 2 %, авіаційний – менше 1 %. Для порівняння, в країнах Євросоюзу залізничні вантажні перевезення складають лише 10,5 % [6]. За вантажообігом (рис. 1.3) залізничні перевезення займають провідне місце – до 55 %, у порівнянні з трубопровідним – до 35 %, автомобільним – 8-9 %, водним – до 2,5 % та авіа транспортом – менше 1 %.

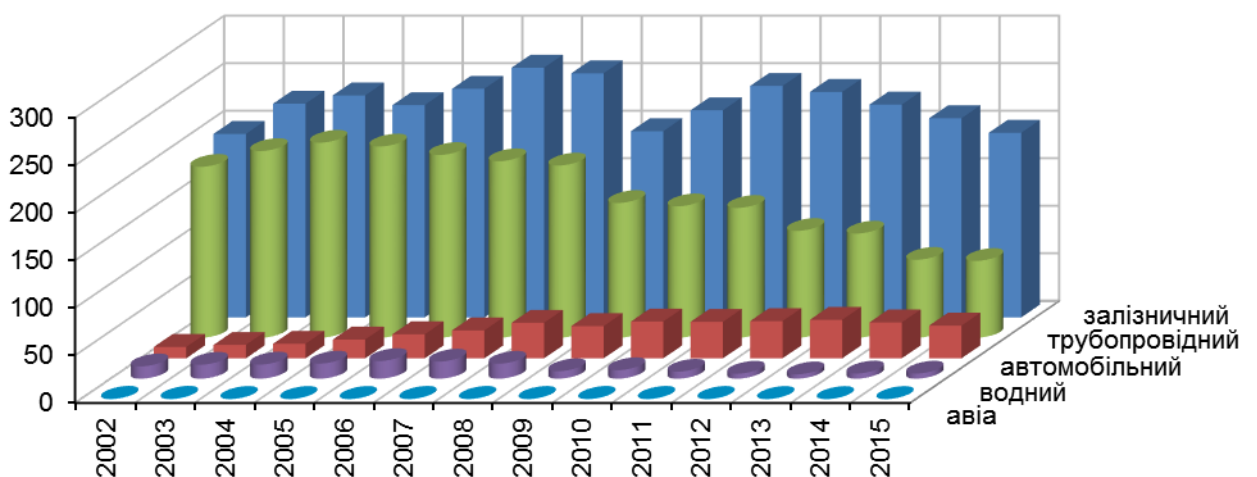


Рис. 1.3. Вантажообіг за видами транспорту, млрд. т-км

Відображаючи загальноекономічні тенденції, падіння обсягів вантажних перевезень демонструють практично всі види транспорту, за винятком автомобільного. У загальній структурі перевезень вантажів залізничний транспорт становить найбільшу частку, що суттєво впливає на динаміку перевезень вантажів в цілому по Україні.

За абсолютною чисельністю перевезених пасажирів (рис. 1.4) на першому місці традиційно знаходиться автомобільний транспорт – 51 %, далі міський електротранспорт – 43 %, залізничний – 6 %, водний та авіа – до 1 %.

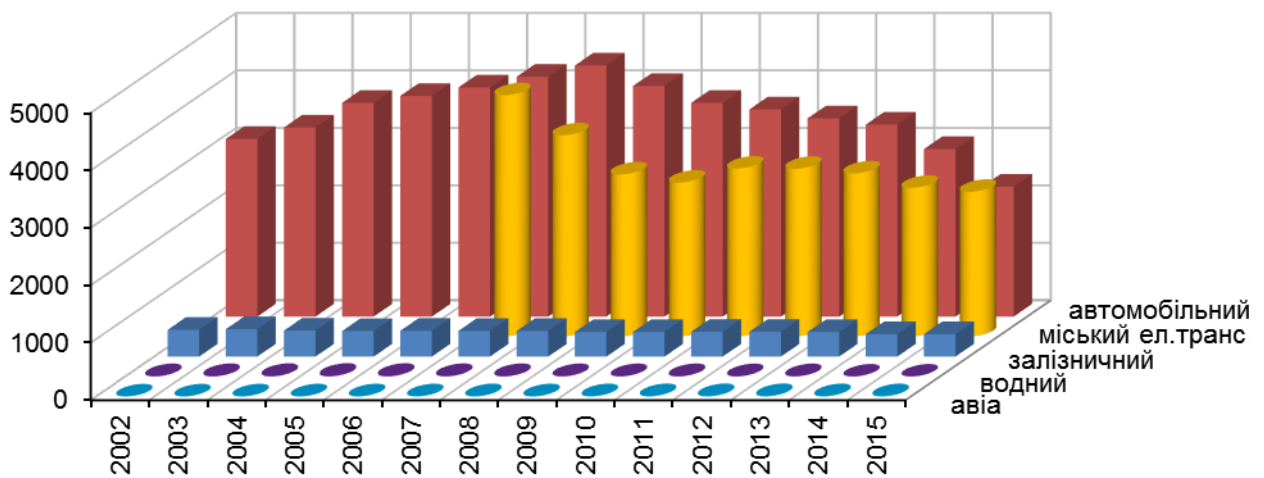


Рис. 1.4. Пасажирські перевезення за видами транспорту, млн. пас.

За пасажирообігом (рис. 1.5) залізничний транспорт складає найближчу конкуренцію автомобільному – 37 % проти 40 %. Міський електротранспорт – 14,5 %, авіаційний – 9 %, водний – менше 1 %. Загалом пасажиропотоки останні роки мають негативну динаміку залізничних та автомобільних перевезень, яка пояснюється скороченням попиту на транспортні послуги населення внаслідок зменшення їхніх доходів, зростанням тарифів на проїзд, а також переорієнтацією частини пасажирів на послуги нелегальних перевізників. Міський електричний транспорт останні роки демонструє зниження 2-3% за рахунок перевезень трамваями і тролейбусами, на відміну від метрополітенів, які користується стабільно високим попитом населення.

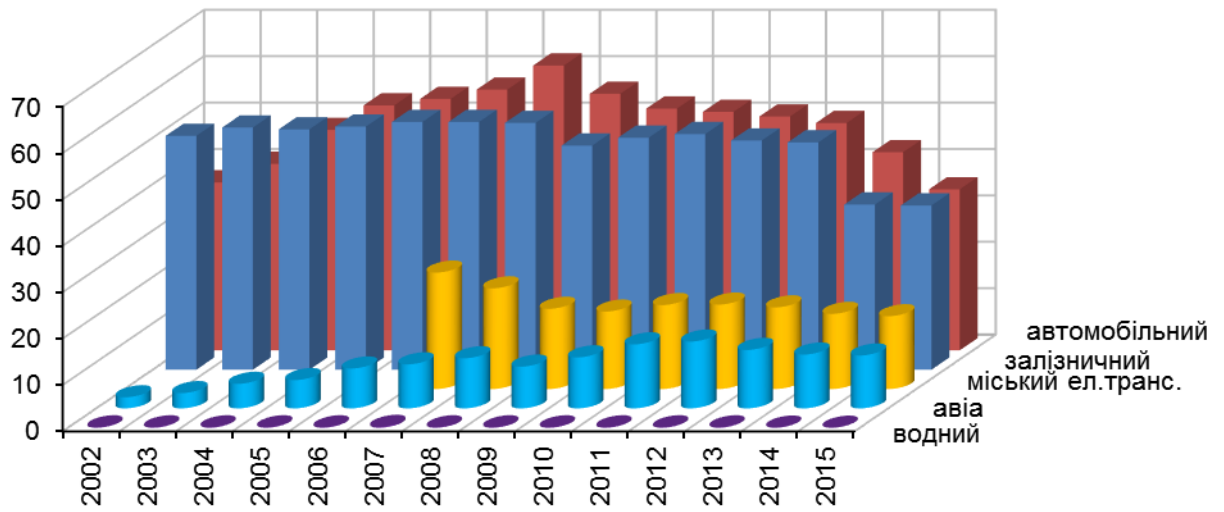


Рис. 1.5. Пасажирообіг за видами транспорту, млрд. пас-км

Питома вага електричної тяги в енерговитратах на залізничному транспорті складає близько 80 %. У собівартості залізничних перевезень енергетична складова сьогодні оцінюється на рівні 21...25 % і має тенденцію до зростання. Так, не зважаючи на коливання за роками обсягів споживання електроенергії (рис. 1.6), вартість спожитих її обсягів постійно зростає (рис. 1.7).



Рис. 1.6. Обсяги споживання електроенергії залізницями України



Рис. 1.7. Вартість спожитої активної та реактивної електроенергії

Слід зазначити, що з 2011 року від ліцензованої діяльності залізниць в якості постачальників електроенергії вартість реактивної електроенергії відноситься до сукупного доходу Укрзалізниці.

Однією з причин зростання вартості спожитої електроенергії на загальному фоні зниження обсягів перевезень є постійне підвищення тарифів на електроенергію (рис. 1.8). Так, у порівнянні з 2007 р. тариф на електроенергію 1-го класу зріс більше ніж у 4 рази.

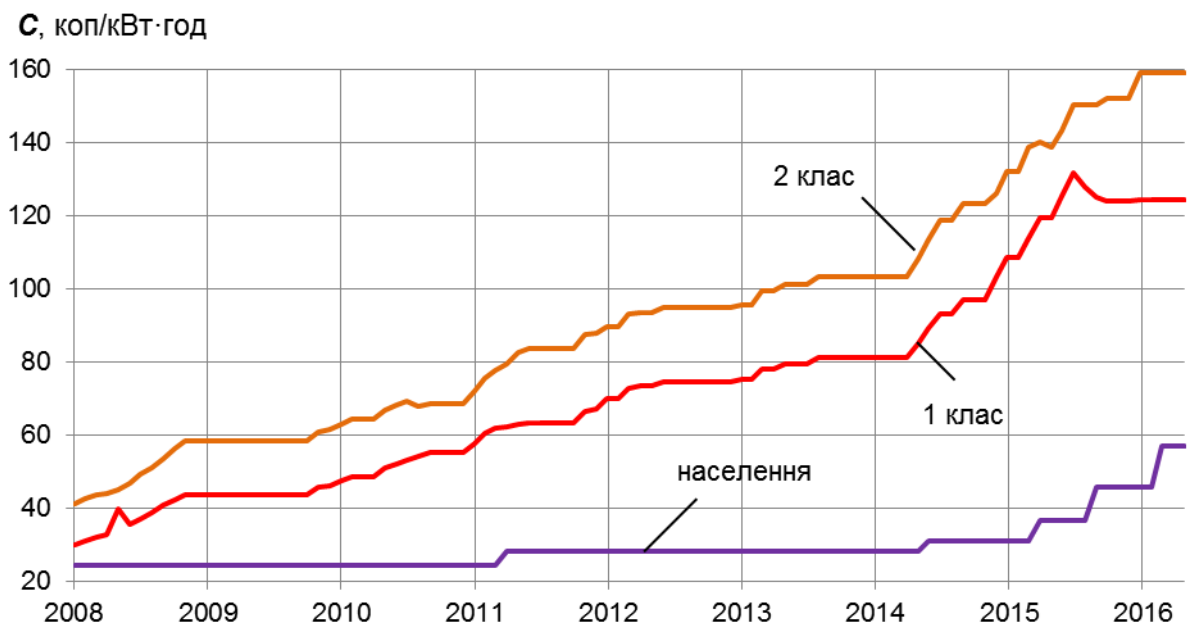


Рис. 1.8. Динаміка зміни тарифів на електроенергію

Окрім підвищення вартості електроенергії значний вплив на сукупну вартість електроенергії має рівень втрат в системах електропостачання. В загальнодержавному енергетичному балансі втрати енергетичних ресурсів при транспортуванні та розподіленні складають від 3,1 % до 3,5 %. Серед цих втрат найбільшу частку мають втрати електроенергії, на них припадає до 52 % усіх втрат, на теплову енергію – 25 %, природний газ – 14 %, вугілля і торф – 9 %, нафта і нафтопродукти – менше 1 % [4].

На фоні зниження енергоспоживання в країні, відносні втрати електроенергії останні роки незначно знижуються і сягають величини 10,7..11,9 %. В розрізі систем електропостачання залізничного транспорту рівень технологічних втрат відповідно до статистики [2] змінюється в досить широких межах, від 5 до 24 %. Найменшим рівнем втрат (5-8 %) характеризуються ділянки залізниць, електрифіковані змінним струмом. Ділянки з системою постійного струму, мають втрати, що більше середнього рівня в балансі України, а саме 14-16 %, і подекуди до 24 %. Оскільки для розвинених країн оптимальним рівнем втрат електроенергії вважається рівні 6-8 % [5], то для залізничного транспорту і, насамперед, для систем електричної тяги постійного струму повинні бути якомога скоріше запропоновані радикальні заходи підвищення енергетичної ефективності.

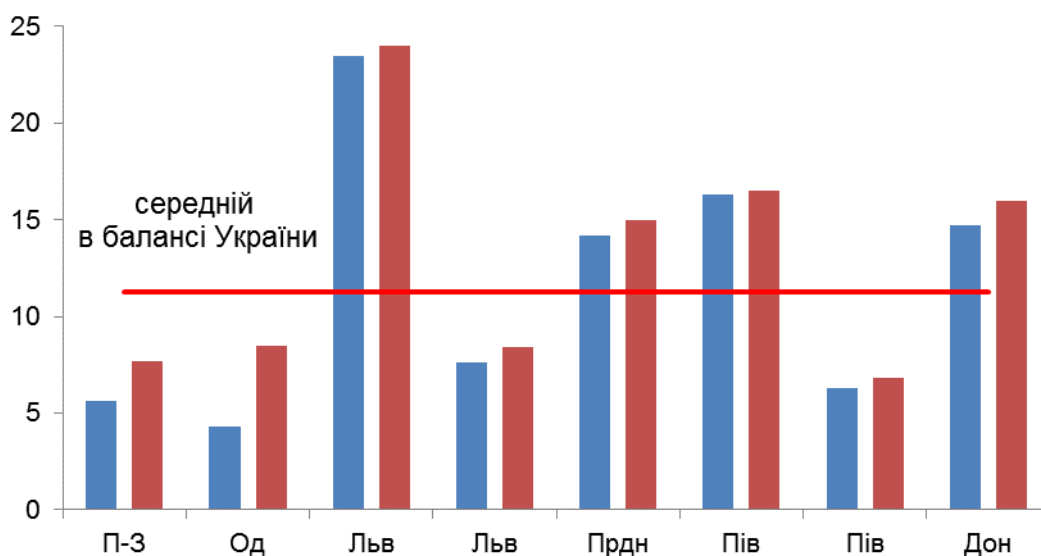


Рис. 1.9. «Умовні втрати» по залізницям відповідно до середнього по Україні

Окремо слід зазначити про складність обліку електроенергії на тягу в умовах залізниць та, як наслідок, достовірність обліку втрат електроенергії в пристроях тягового електропостачання. Всі тягові підстанції на головних приєднаннях обладнані сучасними системами комерційного обліку електроенергії. Проте цього не можна сказати про тягові одиниці електрорухомого складу. Використання застарілих схемних рішень при вимірюванні та невідповідність приладів вимогам до комерційного обліку електроенергії унеможливають оперативне проведення контролю і аналізу причин раціонального використання електроенергії на тягу поїздів. Тому для аналізу ефективності систем електричної вдаються до поняття «умовних втрат», які можуть і не відповідати фізичній суті протікаючих процесів, а лише орієнтовно визначають втрати електричної енергії.

Таким чином, в ефективності функціонування транспортного сектору держави головну роль відіграють залізниці, ефективність функціонування яких за рівнем втрат майже у два рази гірше розвинених європейських країн. Крім цього енергетика країни має потенціал для розвитку технологій ефективного транспортування та розподілення.

Базові праці в галузі енергозбереження та оптимізації режимів електроенергетичних систем належать науковим школам під керівництвом таких учених як Arrilaga J., Веніков В.А., Vollen M., Wu J., Гриб О. Г., Денисюк С.П., Jenkins N., Еканаяке Я., Жежеленко І.В., Yokoyma A., Кириленко О.В., Liyanage K., Лежнюк П.Д., McGranaghan M.F., Півняк Г.Г., Садовий О.В., Сегеда М.С., Сенько В.І., Сокол Є.І., Стогній Б. С., Шидловський А.К., Щерба А.А. та інших.

Значний внесок в розв'язання теоретичних і прикладних проблем підвищення енергоефективності, зокрема на залізничному транспорті, зробили такі учені як Андрієнко П.Д., Аржанніков Б.О., Бабаєв М.М., Бардушко В.Д., Браташ В.О., Герман Л.А., Гетьман Г.К., Гончаров Ю.П., Далека В.Х., Доманський В.Т., Закарюкін В.П., Костін М.О., Кузнецов В. Г., Мамошин Р.Р., Марикін А.Н., Марквардт К.Г., Мірошніченко Р.І., Mizitis M.,

Мокін Б.І., Панасенко М.В., Почаєвець Е.С., Rojek A., Сінчук О.М., Скалозуб В.В., Стасюк О. І., Hafer G., Хворост М.В., Черемісін В.Т., Szelag A., Щербак Я.В. та інші.

Основна увага в роботах учених приділяється стратегічним та концептуальним напрямкам розвитку транспортної енергетики, але розв'язання проблеми енергоефективності режиму електропостачання електрифікованих залізниць з урахуванням здійснення керуючої послідовності впливів в режимі реального часу залишається невирішеним.

1.2 Шляхи підвищення ефективності електроенергетичних систем

Початок ХХІ століття фахівці характеризують як створення нової енергетичної цивілізації, в основу якої покладено енергоефективність, інтелектуальні енергетичні системи, децентралізацію енергетики та застосування нових джерел генерації енергії. Спостерігається перехід від галузевої до системної організації електроенергетики за рахунок підвищення структурності, а саме заміни об'єднаної електроенергетичної системи інтелектуальною електроенергетикою на базі концепції Smart Grid [58-82]. Принципово переосмислюється енергетична політика в розвинених країнах світу, яка тепер підпорядковується екологічним і соціальним вимогам, економічній і організаційній стійкості та безпеки.

Передумови переосмислення енергетичної політики полягають у зміні домінуючих видів енергії в залежності від розвитку технологічного прогресу: вугілля – до 1930 р., нафта – 1930-1970 рр., атомна енергія – після 1970 р., газ – після 1970 р., нетрадиційні та відновлювальні джерела – після 2010 р.

Розвиток електроенергетики промислово розвинених країн світу можна умовно розділити на три характерні етапи з нечіткими за часом межами [58].

Перший етап розвитку відноситься до першої половини минулого сторіччя, коли електрична енергія внаслідок цілого ряду переваг перед іншими видами енергії стала прискореними темпами завойовувати провідні позиції в технологічних процесах багатьох галузей економіки країн світу.

У зв'язку зі зростаючими потребами електричної енергії стояло завдання будівництва потужних для того часу електростанцій з можливістю передачі електроенергії на великі відстані. На цьому етапі мали місце лише локальні джерела електроенергії невеликої потужності для забезпечення потреб окремих господарств.

Другий етап характеризувався тим, що разом з удосконаленням технологій виробництва, перетворення та передачі електроенергії почали формуватись сучасні електроенергетичні системи. За часом цей етап умовно відноситься до другої половини минулого сторіччя, коли були створені потужні електроенергетичні об'єднання. На цьому етапі виявилась потреба в дослідженні складних науково-технічних проблем системного характеру, без вирішення яких неможливо було забезпечити нормальне функціонування електроенергетичної системи. В результаті отримали розвиток дослідження режимів роботи систем і перехідних процесів у них, теорії статичної та динамічної стійкості, теорії релейного захисту і автоматики та ряд інших.

На цьому етапі в Радянському Союзі, у спадщину від якого електроенергетика України отримала частину міждержавної енергосистеми, переважав основоположний принцип розвитку електроенергетики – концентрація виробництва електроенергії на великих електростанціях при централізованому електропостачанні та керуванні режимами роботи об'єднаної енергосистеми. Виконанню цього принципу багато в чому сприяла існуюча на той час форма власності засобів виробництва.

З кінця минулого сторіччя виконується перехід до ринкових відносин, наслідком яких стали зміни деяких положень і принципів розвитку електроенергетики. Насамперед, це господарче роз'єднання суб'єктів єдиного технологічного процесу генерації, передачі, розподілу та споживання електроенергії. Потім, розділ інтересів створених суб'єктів ринку за підтриманням надійності роботи енергетичних об'єктів і отримання прибутку, що значно ускладнює вирішення задач забезпечення надійного енергопостачання численних споживачів енергії. І, нарешті, постійний тиск

ринку на економію витрат, намагання до зниження резервів і запасів усіх видів, повнота використання енергетичного обладнання, комерційні вимоги до режиму роботи електроенергетичної системи і обмеження до його зміни, що значно ускладнюють керування системою.

В даний час стан електроенергетичної системи характеризується збільшенням попиту на електроенергію при посиленні політики енергозбереження, в структурі електроенергетичної системи міститься значна частка обладнання і апаратури з великим терміном експлуатації, робота операторів системи стала більш напруженою через скорочення часу на вирішення непередбачуваних ситуацій, збільшилась значимість комп'ютеризації процесів керування у функціонуванні електроенергетичної системи.

Розвиток енергосистем країн колишнього Радянського Союзу у порівнянні з зарубіжними країнами має характерні відмінності [71]. Так у цих енергосистемах відставання мережевого будівництва і нестача резервів генеруючих потужностей компенсувалися розвитком системи централізованого диспетчерського керування і засобів протиаварійної автоматики. Функція регулювання реактивної потужності залишалась переважно за електростанціями. Крім того, для цих енергосистем була притаманна необхідність передачі активної потужності на досить великі відстані.

В енергосистемах зарубіжних країн, що у більшості випадків включають короткі повітряні лінії, навпаки, кожна із систем проводить керування на локальному рівні, підтримуючі необхідні резерви потужності та забезпечуючи необхідний рівень надійності енергопостачання. Це дозволяє, маючи розгалужену мережу всередині енергосистеми, надійно працювати без централізованого диспетчерського керування і протиаварійної автоматики. В той же час, зв'язки між окремими енергосистемами залишались досить «слабкими». Перехід до ринкових відносин на рівні прямих договорів передбачає можливість купівлі-продажу електроенергії в різних

енергосистемах, що призводить до завантаження «слабких» зв'язків між енергосистемами і, як наслідок, може спричинити виникнення системних аварій, що і відбулося в ряді країн.

Приведені зміни та вказані фактори спільно з розвитком комп'ютерних технологій, досягненнями в області інформаційних та мережевих технологій, інформаційно-керуючих систем з одного боку та розвитку ринкових відносин в енергетиці з іншого обумовлюють якісно новий стрибок у ефективності енергоспоживання й стають передумовами нового етапу розвитку – інтелектуальної енергетики. Широкого розвитку набула концепція «розумної ефективності», яка відображає інтелектуальну взаємодію ціноутворення, виробничих процесів і ефективного використання енергоресурсів та в широких колах відома під назвою Smart Grid.

Системою Smart Grid прийнято вважати повністю автоматизовану енергетичну систему, яка одночасно забезпечує двосторонні потоки електричної енергії та режимної інформації між генеруючими об'єктами та споживачами. За допомогою використання новітніх технологій Smart Grid системи доповнюють електроенергетичну системи «штучним розумом», що дозволяє різко підвищити її ефективність функціонування. За експертними оцінками застосування Smart Grid систем дозволяє також знизити споживання електричної енергії та підвищити надійність електропостачання.

Стратегія розвитку «інтелектуальних» мереж передбачає насамперед розробку стандартів для забезпечення сумісності інтелектуальних систем і пристроїв, що забезпечують керування режимами енергосистем, створення умов для обміну інформацією і забезпечення, при цьому, високого рівня надійності. Розвиток технологічної електро- та комунікаційно-інформаційної структури дозволить динамічно оптимізувати системні операції та забезпечити керування попитом за безпосередньою участю кінцевого споживача. Архітектура інтелектуальної електроенергетичної системи в загальному виді являє собою окрему структуру взаємодіючу між складовими її частинами зі складною топологією зв'язків.

Спрощено із врахуванням принципів мультиагентного керування [63] нова електроенергетика являє собою не тільки силову, а й єдину ергатичну енергоінформаційну систему за участю людини, як особи, що приймає не поточні рішення, а координуючі рішення щодо рішень мультиагентної системи керування та оцінює ризики дії такої системи (рис. 1.10).

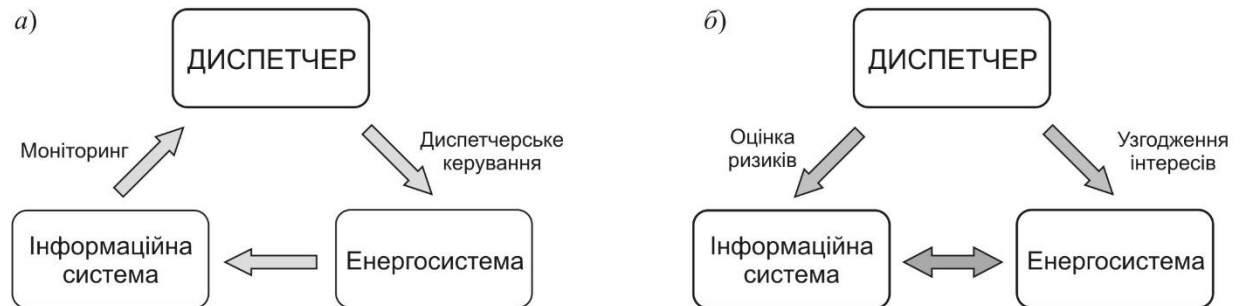


Рис. 1.10. Способи керування енергетичними системами:

а – ієрархічне керування; б – мультиагентне керування

Узагальнено інтелектуальними можна вважати модернізовані електроенергетичні мережі, що використовують інформаційно-комунікаційну систему для автоматичного збирання даних та реагування на таку інформацію у тріаді «генерація – мережа – навантаження» з метою покращення ефективності, економічності та стійкості виробництва, розподілу та споживання електроенергії. За таких умов виникає реальна конкуренція не між різними постачальниками і централізованим розподілом потужності та електроенергії, а між децентралізованими і централізованими системами енергопостачання. В обох випадках зберігається системний принцип, коли споживач і виробник об'єднуються або безпосередньо в рамках однієї організаційно-технологічної системи, або за допомогою регіональних енергосистем з єдиним балансом потужностей. При цьому енергетичний самобаланс таких систем доповнюється можливістю міжсистемних перетоків, які оптимізуються на основі конкуренції між власними і кредитними енергетичними та фінансовими ресурсами [82].

Слід відзначити, що термін «Smart Grid» більш точний [75, 88], ніж термін «інтелектуальні» або «розумні» електроенергетичні системи, оскільки

включає в собі не тільки інтелект, але й зручність, безпеку та комунікабельність. Під «розумною» розуміється енергоефективна система, яка адекватно та оптимально реагує на будь-які зовнішні та внутрішні технологічні збурення, забезпечуючи при цьому зручність, екологічність та безпеку для довкілля та суспільства. Таким чином, інтелектуалізація електроенергетики в частині впровадження новітніх інформаційних технологій управління, захисту та моніторингу стану обладнання і систем для підвищення керованості енергосистем є однією з важливіших тенденцій розвитку електричних мереж XXI ст.

Саме поняття SMART – Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology означає самоконтролюючу, аналізуючу та звітуючу технологію. Разом з терміном Smart Grid свого часу використовувались терміни Future Grid, Empowered Grid, Wise Grid, Modern Grid, IntelliGrid, однак саме термін Smart Grid став загальноживаним. Тому і з'явилося гасло: «Розумні мережі – Розумна енергетика – Розумна економіка», а термін Smart Grid окремими дослідниками трактується рівнозначним терміну «Світ після нафти».

Історично термін Smart Grid належав спочатку до систем розподілу електроенергії. Сьогодні цей термін набув ознак торгової марки щодо розробок у сфері генерації, передачі, розподілу та споживання електроенергії. Спочатку ж вважалось, що Smart Grid – це автоматизована система, яка автоматично відслідковує та розподіляє потоки електроенергії для досягнення максимальної ефективності використання електроенергії.

Основою інтелектуалізації електроенергетичних систем є підвищення автокерованості на основі нових інформаційних технологій, застосування новітніх системних силових пристроїв FACTS, автоматизованих цифрових систем управління а також систем контролю стану обладнання в режимі реального часу.

Фахівці в [67] виділяють три рівні інтелектуалізації електроенергетичних систем: верхній – інтелектуалізація енергосистеми в цілому, як єдиної мегасистеми; середній – інтелектуалізація комплексів

обладнання; нижній – інтелектуалізація окремих видів силового обладнання і технологічних комплексів споживачів. Усі три рівні пов'язані між собою, інтелектуальну електроенергетичну систему слід розглядати як єдиний технологічний комплекс, що складається з електростанцій, магістральних і розподільчих електричних мереж, пристроїв локального електропостачання споживачів, спеціальних системних пристроїв, а також сучасних систем управління, працюючих в режимі реального часу та взаємопов'язаних між собою. Образно «розумну» енергосистему представляють у вигляді деякого єдиного організму, який спирається на подвійну основу: інтелектуальне силове обладнання та інформаційну інфраструктуру.

Інструментами адаптивного підлаштування до внутрішніх та зовнішніх технологічних змін середовища є силові пристрої FACTS (пристрої гнучкої передачі електроенергії змінним струмом) та електронні пристрої тонкого налаштування IED (інтелектуальні електронні пристрої). Інтелектуальні електронні пристрої багатофункціональні та використовуються, в перше чергу, в якості процесорів та засобів автоматизації. Пристрої IED виконують збір даних, виконують додаткові розрахунки та реалізують логіку прийнятого алгоритму. В додаток до поточних значень ці прилади записують інформацію про стан, експлуатаційні характеристики та історію об'єкту. Управління енергосистеми виконується з центру обробки інформації, що включає базу даних, технологічні системи управління, операторів та диспетчерів. Таким чином, «розумна» енергосистема незалежно від її рівня складає єдиний інтелектуальний технологічний комплекс.

Реалізація концепції Smart Grid має на меті досягнення цільових показників стосовно керування критичними перетіканнями в енергосистемі, зниження пікових навантажень та підвищення надійності електропостачання, підвищення системної ефективності використання енергетичних ресурсів, підвищення частки використання розосереджених та відновлювальних джерел енергії. Наведений підхід до інтелектуальних електроенергетичних систем відповідає баченню Smart Grid й у провідних країнах світу.

Наприклад, у США розуміння Smart Grid визначено у прийнятому ще 2007 р. документі «Про енергетичну незалежність та безпеку» («Energy Independence and Security Act»).

Створення Smart Grid – це модернізація усього комплексу генерації та досилання електроенергії на основі удосконаленого управління, захисту, оптимізації технологічних елементів електроенергетичної системи у їх взаємозв'язку – від централізованої і розосередженої генерації, передачі електроенергії високою напругою, її розподілу, систем автоматизації, пристроїв накопичення та компенсації безпосередньо до кінцевих споживачів.

Оскільки системи Smart Grid оперують двосторонніми потоками електроенергії та інформації, то їх реалізація передбачає перехід до системи розподілених обчислень та комунікацій для забезпечення доставки інформації в режимі реального часу, а також розрахунок миттєвого балансу попиту і пропозиції електроенергії в будь-якій точці.

Основні параметри Smart Grid засновані на результатах роботи американського науково-дослідного центру EPRI у програмі IntelliGrid [72], проектах Modern Grid Initiative (MGI) [73] та Grid Wise Architectural Council (GWAC) [74]. В цих роботах сформульовані бачення, архітектурні принципи, обмеження, переваги, необхідні технології та технічна політика стосовно Smart Grid.

Концептуально модель Smart Grid, прийнята у США, включає в собі сім основних елементів: генерація електроенергії, передача, розподіл, споживачі, ринок, управління та сервісне обслуговування, які пов'язані потоками передачі електроенергії та інформації. Визначені стандартизовані вимоги до всіх складових моделі Smart Grid та сформована дорожня карта її реалізації. Відзначаються п'ять основних переваг Smart Grid: надійність і якість електропостачання за рахунок покращення керованості, безпека, енергозбереження, високий рівень екології, економічність.

Ключовими технологічними інструментами для формування Smart Grid є: інтелектуальне силове обладнання, комунікації на основі сучасних автоматизованих систем, бази даних, автоматизовані системи попередження несанкціонованого доступу до управління, програмно-апаратні комплекси.

До системних силових пристроїв перш за все відносяться FACTS – статичні тиристорні компенсатори, керовані поздовжні компенсатори, фазоповоротні трансформатори, керовані реактори, вставки постійного струму і т. ін. Ці пристрої здатні забезпечувати векторне керування параметрів мережі та якість електропостачання.

На сьогодні інтелектуальним слід називати обладнання, яке забезпечує максимально можливий контроль стану всіх його систем, самодіагностування та видача рекомендацій у випадку розвитку пошкоджень, при цьому пристрої повинні забезпечувати автоматичний режим управління своїми підсистемами, в тому числі і з віддалених центрів управління з повним контролем правильності виконання команд. Важливою новою властивістю інтелектуального обладнання є можливість роботи його систем управління, захисту, моніторингу не лише за вертикаллю, але й за горизонталлю через зв'язок з іншим обладнанням. Існує два основні напрями у створенні інтелектуального обладнання підвищеної керованості.

Перший – розробка систем управління обладнанням, у якій інформація сприймається від первинних датчиків, здійснюється моніторинг стану обладнання і управління підсистемами за визначеним алгоритмом, оцінюється ресурс роботи і готовність оперативних кіл. Аналіз вхідної інформації і виконання обладнанням необхідних операцій виконується за алгоритмами, що враховують процеси, які виникають в обладнанні та зовнішні впливи.

Другий напрям створення інтелектуального обладнання – оснащення його сучасними датчиками підвищеної функціональності і точності з можливістю передачі цифрових сигналів. Застосовувані методи вимірювання параметрів повинні оцінюватись критеріями, що враховують вартість

пристроїв, лінійність передачі та частотний діапазон, стійкість до зовнішнього впливу та відповідність вимогам релейного захисту.

Таким чином, можна підсумувати, що практично єдиним способом подальшого підвищення ефективності електроенергетичних систем є розвиток інтелектуальних Smart Grid технологій, для якого першочергового значення набуває моніторинг стану об'єктів енергосистеми з наступним коригуванням режиму роботи елементів електроенергетичних систем, що за оцінками може ефект до 20 % збільшення пропускної спроможності.

1.3 Необхідні передумови розвитку інтелектуальних технологій для зниження втрат електроенергії

Сучасний стан енергетики в промислово-розвинених країнах світу характеризуються тенденціями зростання навантажень, об'єднанням електричних мереж різних компаній, неоптимальним розподілом потужності в неоднорідних мережах, ринковими відносинами в електроенергетиці, використанням найбільш дешевих джерел електроенергії, системними аваріями та екологічними вимогами при спорудженні нових об'єктів [84]. Окрім вказаного, слід відзначити, по-перше, широке застосування засобів силової електроніки, а також збільшення потужності пристроїв, що використовують електронні системи; по-друге, появу споживачів, що ставлять жорсткі вимоги до якості електричної енергії.

Загальний напрям вирішення цих проблем полягає у збільшенні пропускної спроможності окремих ліній та перерізів, керуванні потоками потужності, стабілізації напруги у вузлах електричної мережі, усуненні спотворень якості електроенергії. Для вирішення вказаних задач необхідні системи моніторингу та спеціальні пристрої, яким останнім часом приділяється велика увага, чому сприяє успішний розвиток силової електроніки.

Поняття моніторингу в електроенергетиці зовсім нове і заслуговує певного уточнення. В іноземних публікаціях це поняття з'явилося в середині

минулого сторіччя тільки по відношенню до довкілля. У зв'язку із все більш широкою інформатизацією діяльності людства виникла потреба у введенні такого поняття і для інших сфер діяльності, в тому числі і для електроенергетики. Моніторинг в енергетиці – спеціально організоване систематичне автоматичне спостереження за технологічними процесами в енергетиці з оцінкою або без оцінки їхнього стану. Принциповим у визначення є те, що моніторинг вже розглядається і як спостереження, так і спостереження та оцінка стану. При цьому під оцінкою стану вважається не тільки поточна оцінка, а і ретроспективний аналіз та прогнозування стану [75].

Результатом моніторингу є інформація у вигляді показань, даних, суджень, графіків тощо, яка відображає як результати спостереження поточного стану, так і одержану оцінку технічного та технологічного стану енергетики в різноманітних умовах експлуатації, що дуже важливо при технологічних порушеннях та аваріях.

Сучасні системи моніторингу режимних параметрів електроенергетичних систем WAMS (Wide Area Measurement System), у яких на об'єктному рівні все більше застосовуються пристрої синхронізованих вимірювань векторів напруги PMU (Phasor Measurement Units), надають якісно нові можливості для вирішення задач керування режимами електроенергетичних систем та їх об'єднань [82]. Так, зокрема, покращується спостережність електроенергетичної системи, та, разом з іншими вимірюваннями режимних параметрів, надається інформація системним операторам для візуалізації чи використовується для вирішення задач аналізу та оцінки стану електроенергетичної системи.

В окрему наукову задачу виділяються критерії та методи розстановки пристроїв PMU [78], від яких залежить як можливість виявлення оперативно-диспетчерським персоналом випадків виникнення аномальних режимних ситуацій, так і можливість рішення актуальних задач керування режимами електроенергетичних систем в режимі реального часу. При виборі місць розстановки PMU керуються технічними міркуваннями [82], які зазвичай не

підкріплюються формальними обґрунтуваннями та не сприяють їх оптимальному розташуванню.

Як відомо, встановлення пристроїв PMU на об'єктах електроенергетичних систем тягне за собою організацію каналів передачі відповідної інформації до центру керування. Вказані затрати, безумовно, окупаються, якщо інформація забезпечує вирішення актуальних задач ефективного використання пропускної спроможності контрольованих перерізів основної мережі електроенергетичної системи. Досягнення максимальної рентабельності від впровадження пристроїв PMU можливе при багатоцільовому і системному характері використання виданої інформації для рішення усієї сукупності задач керування електроенергетичними системами.

За думкою фахівців [82], створення системи WAMS в Україні повинно підпорядковуватись вирішенню першочергових задач оперативного керування енергетичними об'єднаннями та завершуватись створенням проблемно-орієнтованої системи моніторингу режимів. До таких задач відносяться оцінка допустимості поточних режимів та попередження небезпечного збільшення амплітуд низькочастотних коливань режимних параметрів, що призводить до коливального порушення стійкості енергетичних об'єднань. Вказані задачі актуальні для багатьох електроенергетичних систем зі слабкими як міжсистемними, так і внутрішньо системними зв'язками, оскільки обмеження величин перетоків активної потужності в перерізах основної мережі є тим фактором, який може створювати істотний вплив на розташування резервів активної потужності та ціноутворення на ринку електроенергії.

Інформативність вимірювання кутів зсуву фаз режимних величин давно відома і результати цих вимірювань використовують у різних системах регулювання і керування режимами електроенергетичних об'єднань. Але більшість розробок орієнтовані на локальні об'єкти і райони енергосистем, що обумовлюється традиційною проблемою забезпечення синхронізації і точності вимірювань та до недавнього часу практичною відсутністю засобів

передачі інформації з віддалених об'єктів. Зі створенням систем WAMS забезпечується рішення наведеної проблеми, і тому разом з отриманням у центрі керування синхронізованих вимірювань векторів напруги з'являються можливості практичної реалізації повномасштабних задач керування режимами електроенергетичних систем.

В сучасному етапі розвитку систем керування технологічними процесами широко застосовуються інформаційні технології [86], в тому числі й з використанням формалізованих знань, методів та засобів штучного інтелекту. Проблема інтелектуалізації керування в електроенергетиці пов'язана, в першу чергу, зі створенням проблемно-орієнтованих програмних систем, наділених властивостями інтелектуальності. Для сучасного етапу розвитку інтелектуальних систем характерним є створення гібридних систем [88], в яких в різних поєднаннях експертні системи, засоби математичного моделювання, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми та ін. Дослідження шляхів побудови та розвитку інтелектуальних систем моніторингу проводяться в багатьох розвинених країнах світу, проте вітчизняні розробки скоріше є винятком і обмежуються частковою реалізацією систем моніторингу на основі реєстрації інформації або інформаційно-довідковими системами щодо поточного стану об'єкту.

Особливої актуальності процес прийняття рішень при оперативному керуванні набуває при постійному дефіциті часу [76], з чого випливає, що використання нових технологій лише для передачі і обробки інформації у випадку керування енергетичними об'єктами оперативним персоналом не посилює інтелектуальних можливостей електроенергетичних мереж в цілому. Для вирішення таких задач відомі системи підтримки прийняття рішень, які поєднують у собі дві важливі функції – відображення оперативної інформації та інформації про режимні параметри, які безпосередньо не вимірюються. Для реалізації останньої застосовують підсистему моделювання режимів на основі математичної формалізації задач. Сучасні досягнення при розробці систем підтримки прийняття рішень дозволили

використовувати їх у складі інтегрованих систем автоматизованого керування технологічними процесами електроенергетичних об'єднань, що підвищує оперативність та правильність прийняття рішень в різних режимах експлуатації.

Таким чином, можна відзначити, що для розвитку інтелектуальних технологій є, насамперед, розробка доступних технічних засобів деталізованого моніторингу стану електроенергетичної системи. Ефективна реалізація моніторингу, як правило, ускладнюється через те, що дослідні об'єкти утворюють розподілену систему. В цьому випадку для проведення вимірювань вимагається велика кількість датчиків та канали передачі інформації з високою пропускнуою спроможністю.

Оскільки параметри функціонування подібних систем являють собою адитивні суміші відповідних параметрів окремо взятих систем, автором [83] пропонується можливість спрощення системи моніторингу за рахунок вимірювання лише на граничних терміналах дослідної системи з подальшою декомпозицією адитивної суміші сигналів об'єктів. Операцію декомпозиції пропонується виконувати на підставі даних про закони функціонування об'єктів, що входять до складу системи. Результатом декомпозиції виступає інформація про режими роботи об'єктів на певному відрізку часу, яка отримується на виходу розробленого адаптивного фільтру.

Проблему керування електроенергетичної системи фахівці відносять до фундаментальних науково-технічних проблем, актуальність якої підтверджуються системними аваріями. Ефективне керування такими динамічними макросистемами є складним і не завжди адекватним для існуючих методів автоматичного керування. Традиційні алгоритми керування склались більше півстоліття тому і використовуються нині. Свого часу ці алгоритми показали свою ефективність, але їх застосування поряд із підвищенням вимог до електроенергетичних систем та розвиток науково-технічного прогресу вимагають пошуку нових шляхів удосконалення процесів управління.

Перспективним автор [77] вважає застосування синергетичного підходу для вирішення проблем структурної складності електроенергетичної системи, багаторежимності функціонування та виявлення нелінійних властивостей в окремих режимах. Базові принципи синергетичного підходу полягають у положеннях нелінійної динаміки та термодинаміки безповоротних процесів і є інтегральними по відношенню до нейронних мереж, нечіткої логіки, теорії хаосу та кібернетики. Не дивлячись на переваги, синергетичний підхід не отримав розповсюдження в якості методу керування складними технічними системами, оскільки його базовим принципом є стихійна самоорганізація, що не завжди підлягає технічній реалізації.

Для ефективного застосування ідей синергетики в керуванні вимагається принципово новий перехід від непередбачуваної поведінки системи за алгоритмом дисипативної структури до направленої руху уздовж бажаних різноманіть – аттракторів, до яких підлаштовуються всі інші параметри динамічної системи. Одним із напрямів синергетики є системи штучного інтелекту. Нейронні мережі, які відокремились в окремий напрям, отримали широке розповсюдження [77] через здатність адаптуватись до різного роду ситуаційним задачам контролю та керування.

Нейромережеві технології тісно переплітаються з обчислювальними технологіями на принципах нечіткої логіки, нечітких нейронних мереж, розділах теорії ймовірностей, еволюційних та генетичних алгоритмів. Окрім вказаних напрямків нейромережевих технологій розвивається напрям автономного штучного інтелекту на принципах адаптивного керування і динамічної оптимізації.

Таким чином, необхідною передумовою розвитку інтелектуальних технологій управління режимів електроспоживання є розробка систем моніторингу та розвиток методів розрахунку з можливістю здійснення керованих впливів на основі підходів штучного інтелекту.

1.4 Систематизація методів розрахунку режимів електропостачання систем електричної тяги

Системи тягового електропостачання у порівнянні з загальнопромисловими електроенергетичними системами володіють специфікою, яка обумовлює насамперед складності в розрахунках систем електричної тяги. Рухомі навантаження, потужність яких в нормальних режимах роботи на даний час може сягати 10 МВт, складність схем живлення розподілених у просторі тягових мереж, яка позначається на різних режимах напруги залежно від розташування навантажень, та різні режими роботи самих навантажень практично унеможливають створення узагальненого методу розрахунку.

Окремо можна зазначити, що протікаючі електромагнітні процеси в силових колах систем електричного транспорту мають місце як в колах з нелінійними елементами, який ускладнюється наявністю потужності спотворення, що змушує для обґрунтування такого явища звертатись до поняття неактивної потужності, визначення якої отримало декілька теоретичних підходів, проте залишається предметом дискусій вчених та наукових шкіл. В залежності від потреб може використовуватись інтегральний підхід до визначення складових повної потужності, прикладом чого є визначення потужності Фрізе [141], недоліком якої є неможливість застосування в системах керування реального часу через невизначеність всередині періоду основної частоти, проте саме цю потужність наділяють більш змістовним фізичним змістом [142]. З практичної точки зору для розрахунку втрат потужності [143] може бути корисним метод еквівалентної синусоїди, а при необхідності визначення втрат на окремих гармонійних складових – застосування частотних методів визначення складових потужності, які можуть і не мати фізичного сенсу. Через необхідність створення систем керування компенсацією в реальному часі одним із перших Н. Акагі запропоновано визначення миттєвої реактивної потужності [144],

яке знайшло розповсюдження і для трифазних систем електропостачання зі створенням сучасної $p-q-r$ теорії реактивної потужності [145].

Актуальне у енергетиці питання якості електричної енергії часто пов'язують з різними характеристиками напруги та струму. Так, у роботі [146] досліджено електроенергетичний обмін між енергетичною системою і тяговою мережею через ступінь спотворення синусоїдності напруги та струму на високій і низькій сторонах перетворювальних трансформаторів.

Електромагнітна взаємодія між пасивними та активними елементами у несинусоїдних колах залежить від їх параметрів, значення яких знаходиться у функціональній залежності від електричних величин, але у практичних роботах при дослідженні об'єктів з'єднаних з енергетичною системою доводиться мати справу зі спотвореними кривих струму та напруги, коливанням, відхиленням напруги та іншими порушеннями якості електричної енергії, що не викликані роботою досліджуваного об'єкта. Наприклад, відносно системи зовнішнього електропостачання тягове навантаження постійного струму, за рахунок перетворення трифазної системи в однофазну, є симетричним.

Робота випрямлячів за симетричної живлячої напруги була предметом дослідження у роботах багатьох вчених [147-150]. Проте, вплив несиметричного режиму на якість вихідної напруги випрямлячів, з точки зору балансу електричної енергії залишається досі мало вивченим процесом.

На підстанціях постійного струму, широко розповсюдження набули потужні 6-пульсні та 12-пульсні випрямлячі, нормальна робота яких та суміжних з ними пристроїв залежить від характеристик підведеної напруги. Разом з тим, розвиток електрорухомого складу у напрямку підвищення швидкості та вантажоперевезень потребує відповідних заходів з боку підвищення вимог до якості споживаної ними електричної енергії.

Свої особливості з точки зору гармонійних спотворень має система тягового електропостачання змінного струму.

Так, в статтях [152-153] досить оригінально поставлена парадигма «реактивної потужності» в колах з несинусоїдними величинами. Визначні науковці в роботах [154–155] також застосовують поняття «активних» та «обмінних потужностей» до аналізу перехідних, квазіперехідних, коливальних та хвильових процесів в системах тягового електропостачання. Досить перспективним є напрям визначення активних та обмінних характеристик нелінійного навантаження на основі експериментальних даних, застосований в роботі [156]. В більш ранній роботі [157] приділяється увага отриманню активних та обмінних характеристик споживача електроенергії, які дозволяють оцінити енергетичну ефективність його роботи та визначити миттєві параметри схеми заміщення цього споживача.

Складність та важливість задачі розрахунку систем тягового електропостачання підтверджується великою кількістю методів, які створені у різні часи для її вирішення [160]. Умовно розроблені методи розділяються на три групи.

Перша група методів (автори М. М. Костромітін, О. Б. Лебедев, Л. Г. Абелішвілі, Г. Г. Марквардт) розрахована на визначення не миттєвих, а усереднених величин. У другій групі методів (автори В. А. Тімофеев, Б. Г. Кузнецов) необхідне уточнення досягається послідовними наближеннями, перше з яких виконується з врахуванням тільки спаду напруги до розрахункового поїзду, або цього ж спаду, помноженого на коефіцієнт, який наближено враховує вплив супутніх поїздів. Третя група методів ґрунтується на ідеї одночасного розрахунку всіх навантажень (автори В. А. Кісляков, Б. А. Бесков). З розвитком електронно-обчислювальної техніки подальшого поширення здобули метод послідовних наближень (розроблений М. Я. Пузановим) та метод одночасного моделювання (впроваджений М. Б. Улановським).

У методі послідовних наближень ув'язування неперервних змін напруги, швидкості і сили тяги одного електровозу та врахування взаємного

впливу струмів інших поїздів відбувається повторними перерахунками. Для зменшення їх кількості використані деякі методи прискорення збіжності.

У методі одночасного розрахунку зміна координат, швидкостей і струмів усіх електровозів враховується одразу, для чого питомі прискорюючі та гальмівні сили уведені до формул рішення рівнянь руху разом зі своїми похідними. Останні отримуються диференціюванням для випадку неперервної зміни змінних і прогнозуванням на середину наступного кроку.

Обидва методи принципово придатні для будь-якого роду струму, але історично так склалось, що метод послідовних наближень застосовувався для постійного, а метод одночасного розрахунку – для змінного струму.

У всіх розглянутих методах тягове навантаження прийнято замінювати джерелом ідеального струму. Таке припущення спрощує електричні розрахунки миттєвих схем, оскільки задача зводиться до розрахунку струморозподілу за заданими величинами струмів та наступні розрахунки напруги на підставі заданої е.р.с. на шинах тягових підстанцій. На підставі такого підходу досить просто розраховуються відомі класичні залежності зміни струмів фідерів та напруги на струмоприймачі електровозу для різних схем живлення [161].

Врахування взаємозв'язку напруги на струмоприймачі електровозу і характеристик електрорухомого складу актуальне для випадків, коли система управління самого електрорухомого складу не передбачає стабілізації тягової потужності [162, 163]. Це стосується усього електрорухомого складу постійного і однофазно-постійного струму з колекторними тяговими двигунами, що експлуатується на залізницях України.

Основи теорії розрахунку параметрів систем тягового електропостачання на території пост радянського простору були закладені професором Марквардтом К. Г., яким виконано узагальнення та класифікація всіх можливих методів розрахунку для систем тягового електропостачання [175, 176]. В теорії К. Г. Марквардта методи розрахунків розділяються на імовірнісні та детерміновані (з використанням графіків руху поїздів). При

цьому, головну роль відіграє методика розрахунку миттєвих схем. При розробці концепції теорії керованого тягового електропостачання свій вклад внесли професори Аржанніков Б. О. та Марикин О. М. [164, 177]. При цьому кожен з дослідників спирається на відомі положення щодо розподілу струмів у різних схемах живлення контактної мережі, не виконуючи узагальнення та перегляду безпосередньо методики розрахунку миттєвих схем, що і наводиться у сучасній літературі по електропостачанню залізниць [178].

Розвиток сучасної елементної бази дозволяє побудувати потужні одиниці електрорухомого складу, система управління яких дозволяє стабілізувати значення тягової потужності. В такому випадку зміна режиму напруги на струмоприймачі за інших рівних умов руху призведе лише до зміни складових первинного струму електровозу, що в свою чергу, вплине на витрати електроенергії, ККД та коефіцієнт потужності електрорухомого складу без впливу на тягово-енергетичні характеристики [163].

У підтвердження тому виступають і сучасні дослідження з розробки керованого електропостачання на електрифікованих залізницях постійного струму [164]. В них, зокрема вказується, що збільшення середньої напруги на струмоприймачі електровозу на 20 % призводить до зниження середнього струму електровозу на 9-17 %, і зниження втрат електроенергії в тяговій мережі на 2 % у відношенні до витрат електричної енергії тяговими двигунами.

На підставі вищевикладеного зрозуміло, що розрахунки систем тягового електропостачання, які виконувались з припущенням того, що реалізована електрорухомим складом потужність визначається лише значенням струму при номінальній напрузі, підлягають уточненню. Крім цього, одночасна експлуатація і сучасного і наявного електрорухомого складу призводить до погіршення умов роботи останнього в частині впливу режиму напруги на тягово-енергетичні характеристики.

Існуючі раніше окремі програми розрахунку систем тягового електропостачання не в повній мірі враховували всі фактори і специфіку

конкретних ділянок залізниць до появи пакету програм Nord для тягових і електричних розрахунків у сфері проектування і експлуатації систем тягового електропостачання. Крім цього, широкого розповсюдження набули спеціалізовані розробки засобів моделювання систем тягового електропостачання Fazonord, Flow3, Fazonord-Розрахунки, Fazonord-Якість (Крюков А. В., Закарюкін В. П.), Іркутського державного університету шляхів сполучення [168]; КОРТЕС (Марський В. Є.) Науково-дослідного інституту залізничного транспорту (ВНДІЗТ) [169].

Подібні розробки проводились також і Дніпропетровським національним університетом залізничного транспорту (ДНУЗТ), зокрема PrEns (Савіч Я. Ю.) [182] з подальшим розвитком в роботах [170-172]; Матрікс (Мицко Р.С.) [173] з подальшим розвитком в систему Поток (Калашников К. О.) [174].

Деякі науковці при моделюванні окремих режимів роботи систем тягового та зовнішнього електропостачання використовують універсальні засоби моделювання OrCAD, TCAD, MatLAB, LabView, які мають потужні бібліотеки моделювання пристроїв загальної енергетики, та в яких, нажаль, проблемно врахувати повністю специфіку систем тягового електропостачання.

1.5 Розвиток технологій енергоефективного електропостачання електрифікованих залізниць

На електрифікованих залізницях світу, довжина яких складає близько 240 тис. км, розповсюдження отримали три системи електричної тяги, які відрізняються між собою родом струму в контактній мережі: система постійного струму; система змінного струму зниженої частоти 16 ²/₃, 20, 25 Гц; система змінного струму промислової частоти 50 (60) Гц. Найбільша питома вага у загальній довжині залізниць припадає на залізниці, електрифіковані промисловою частотою 50 Гц і напругою 25 кВ – 40,5 %. На електрифіковані залізниці постійного струму напругою 3,0 кВ і 1,5 кВ

припадає відповідно 35,2 % та 7,8 %, а на електрифіковані залізниці системою змінного струму зниженої частоти $16 \frac{2}{3}$ Гц напругою 15 кВ – 14,6 % загальної довжини електрифікованих залізниць.

Історія електрифікації залізниць [249] починається будівництвом наприкінці ХІХ ст. першої залізниці Балтимор – Огайо (США) довжиною 115 км з системою електрифікації постійного струму напругою 600 В, з використанням електрорухомого складу з колекторними двигунами постійного струму послідовного збудження. В Російській імперії першими будівниками електричної залізниці були українські інженери, випускники Петербургського інституту інженерів шляхів сполучення Дмитренко П.П. та Дубелір Г.Д. Під їх керівництвом було виконане проектування та в 1901 році побудована залізниця, електрифікована системою постійного струму, довжиною 20,6 км, що з'єднувала м. Лодзь у приміському сполученні.

Подальший розвиток систем тягового електропостачання постійного струму відбувався в основному тільки шляхом підвищення напруги в контактній мережі. Так, прийнята концепція першого етапу (20-і – 40-і роки минулого сторіччя) масової електрифікації залізниць світу базувалась на системі постійного струму напругою 1200 В та 1500 В. Концепція другого етапу масової електрифікації залізниць світу (30-і – 60-і роки минулого сторіччя) базувалась вже на системі постійного струму напругою 3000 В.

Слід відмітити, що структурно система тягового електропостачання постійного струму напругою 1,5 кВ та 3,0 кВ відрізняється лише відстанню між тяговими підстанціями: в першому випадку 15-20 км, у другому 25-30 км.

Широке використання системи постійного струму на першому та другому етапах масової електрифікації залізниць обумовлено головною перевагою, що полягає у можливості безпосереднього приєднання до тягової мережі електродвигунів постійного струму послідовного збудження, електромеханічні характеристики яких найбільшою мірою відповідають вимогам тяги і які на початок електрифікації були серійно освоєні

електротехнічною промисловістю. До недоліків систем електричної тяги постійного струму в першу чергу відноситься невеликий рівень напруги в контактній мережі. Ця обставина при зростаючих потужностях електрорухомого складу обумовлює підвищені втрати електроенергії та напруги в елементах систем тягового електропостачання, що призводить до зниження пропускної і провізної спроможності електрифікованих залізниць.

Виконані в 60-х роках минулого сторіччя в СРСР, Італії та Польщі науково-технічні роботи по створенню системи електричної тяги постійного струму напругою 6 кВ і вище не призвели до позитивних результатів через складність, громіздкість, низьку надійність та більшу вартість тягового високовольтного обладнання електрорухомого складу з колекторними двигунами постійного струму, що мають конструктивне обмеження робочої напруги на рівні 1500-1650 В (в існуючому колісному габариті).

Принципово альтернативний спосіб електрифікації використано німецькими фахівцями, які наприкінці XIX ст. розробили систему змінного струму зниженої частоти $16 \frac{2}{3}$ Гц напругою 15 кВ. Для цієї системи електроенергія підводиться за допомогою трансформаторних підстанцій, що розташовані на відстані 40-50 км і понижують високу напругу однофазного змінного струму, що надходить від спеціальних електростанцій однофазного струму до рівня 15 кВ. Використання зниженої частоти дозволило використати на електрорухомому складі колекторні двигуни однофазного струму послідовного збудження, характеристики яких для електричної тяги забезпечувались рівнем розвитку електротехніки. В даний час систему електричної тяги зниженої частоти $16 \frac{2}{3}$ Гц напругою 15 кВ застосовують на електрифікованих залізницях Німеччини, Швеції, Швейцарії, Австрії, Норвегії. Головна перевага цієї системи, що полягає у відносно високому рівні напруги, нівелюється низькими коефіцієнтами потужності та тяги електрорухомого складу з колекторними двигунами змінного струму (0,8-0,88 в номінальному режимі, 0,3-0,4 при троганні з місця, коефіцієнт тяги годинного режиму 0,17-0,19). Тому ця система отримала обмежене

розповсюдження в періоди першого і другого етапів масової електрифікації залізниць.

Освоєння в 40-х роках минулого сторіччя електротехнічною промисловістю виробництва силових напівпровідникових приладів дозволило підвищити ефективність електрорухомого складу однофазного змінного струму за рахунок використання тягових колекторних електродвигунів пульсуючого струму, що за характеристиками незначно поступались тяговим колекторним електродвигунам постійного струму. Це технічне досягнення вирішувало задачу створення ефективного електрорухомого складу змінного струму промислової частоти 50 (60) Гц при будь-якому високому рівні напруги в контактній мережі. Тому в основу концепції третього етапу електрифікації залізниць (50-і – 90-і роки минулого століття) покладена система електричної тяги промислової частоти 50 Гц напругою 25 кВ.

Високе значення напруги в контактній мережі визначає її переваги: більшу відстань між підстанціями (40-60 км), менший переріз проводів контактної мережі. Зовнішнє електропостачання забезпечується як і в системі постійного струму від трифазних електричних мереж, тягові підстанції перетворюються в прості понижуючі підстанції, контактна мережа – в лінію електропередачі підвищеної напруги, а сам електрорухомий склад – в підстанцію з глибоким вводом. Недоліком є те, що однофазне тягове навантаження в системі змінного струму промислової частоти викликає нерівномірне завантаження фаз системи зовнішнього електропостачання. Проте ряд заходів, таких як застосування на тягових підстанціях компенсуючих пристроїв та підключення знижуючих трансформаторів з чергуванням фаз дозволяє певним чином знизити несиметрію напруг.

В історичному аспекті, початок електрифікації в Україні пов'язаний з уведенням у 1938 р. в експлуатацію одноколіїної ділянки Запоріжжя – Кривий Ріг Придніпровської залізниці, електрифікованої системою постійного струму напругою 3 кВ. Масова електрифікація залізниць України

приходиться на другу половину ХХ ст. (середина 50-х років). На початковому періоді вона проводилась тільки у рамках концепції другого етапу електрифікації, а саме в рамках системи постійного струму напругою 3 кВ. Цією системою були електрифіковані Південна, Придніпровська та Донецька залізниці. Електрифікація залізниць України в рамках концепції третього етапу розпочалась тільки в першій половині 60-х років минулого століття і отримала широке розповсюдження на Південно-Західній та Одеській залізницях. Електрифікація Львівської залізниці в цей період проходила як у рамках концепції другого етапу (у напрямку західної границі), так і у рамках концепції третього етапу (у напрямку Південно-Західної залізниці).

Станом на кінець ХХ ст. в Україні у приблизно рівних частках за родами струму було електрифіковано більше 9 тис. км залізничних ліній, що складало близько 40 % від загальної довжини залізниць країни.

Проблема вибору системи електричної тяги та удосконалення її підсистем на усіх етапах електрифікації залізниць була в центрі наукових дискусій та прийняття інженерних рішень. Кожна із концепцій відображала той рівень розвитку електротехніки, який був досягнутий на початку кожного з її етапів. Визначальними факторами при виборі типу системи електричної тяги були тяговий електропривод електрорухомого складу та пристрої перетворення параметрів електроенергії.

Заміна тягових колекторних електродвигунів безколекторними (асинхронні та синхронні), застосування вискоефективних статичних перетворювачів електроенергії змінного струму в постійний і навпаки на основі повністю керованих напівпровідникових приладів, створення швидкодіючих систем мікропроцесорної автоматики для управління перетворенням і споживанням електроенергії складають основу концепції четвертого етапу електрифікації залізниць, викликаного необхідністю організації швидкісного та високошвидкісного руху.

Для першої високошвидкісної залізниці Нью – Токайдо (Японія) довжиною 515 км, яка була введена в експлуатацію 1964 року, в її системи електричної тяги були закладені рішення, що визначались концепцією третього етапу електрифікації, а саме тяговий електропривод постійного струму з випрямно-трансформаторним регулюванням, централізована структура електроживлення контактної мережі від тягових підстанцій з трансформаторним перетворенням трифазної напруги в однофазну промислової частоти.

Фактично про четвертий етап електрифікації залізниць світу було оголошено в 70-х роках минулого сторіччя шляхом затвердження планів створення мережі високошвидкісних залізниць в Японії (Сінкансен), Європі (Європолітен) та США (Амтрак). Саме ці плани засновувались на новому типі електрорухомого складу – електровозах та електропоїздах з безколекторними тяговим електроприводом і структурою системи електричної тяги, що придатна для організації розподіленого живлення контактної мережі на основі статичних перетворювачів з високовольтними напівпровідниковими приладами та мікропроцесорними системами керування.

Кінцеве затвердження четвертого етапу електрифікації відбулось у 80-90 роки минулого сторіччя освоєнням виробництва високошвидкісних поїздів з бесколекторними двигунами: серії 300 мотор-вагонної тяги (Японія) і серій TGV (Франція), ICE (Німеччина) локомотивної тяги та введенням в експлуатацію тягових перетворювальних підстанцій в м. Бремен та м. Карлсфельде (Німеччина) потужністю 100/132 МВА, що принципово дозволяють реалізувати структуру системи тягового електропостачання з розподіленим живленням контактної мережі для усіх типів систем електричної тяги.

Впровадження швидкісного руху, збільшення вагових норм поїздів обумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць. Нерідко провізну здатність діючих ділянок електрифікованих системою постійного струму 3,0 кВ, обмежують пристрої електропостачання. До числа таких обмежень відносяться зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для нормальної експлуатації значення 2700 В (для швидкісного руху 2900 В) і нагрів проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності. Зниження напруги на струмоприймачі знижує швидкість руху поїздів, а при збереженні споживаної потужності відбувається збільшення струму електровоза і втрат електричної енергії в тяговій мережі.

З урахуванням того, що в Україні, так само як і на залізницях країн світу, за системою постійного струму електрифіковано близько половини ліній з електричною тягою, очевидно, що необхідна реконструкція системи електричної тяги постійного струму, спрямована на підвищення пропускної і провізної здатності з максимальною реалізацією переваг цієї системи та з мінімальними додатковими капітальними вкладеннями.

Досвід розробок і дослідження наукових і навчальних інститутів, ряду залізниць, зарубіжних організацій і фірм показує, що усунення обмежень по напрузі і струмовим навантаженням в контактній мережі системи тягового електропостачання 3,0 кВ може бути вирішене з найменшими витратами за допомогою систем і пристроїв підвищення та автоматичного регулювання випрямленої напруги. Очевидно, що для цього умовах необхідний новий технологічний процес передачі електричної енергії – шляхом управління перерозподілом потужності тягових підстанцій. Іншими словами, потрібна узгоджена спільна робота сусідніх тягових підстанцій, тобто створення системи керованого електропостачання. До числа основних завдань керованої системи електропостачання, розробленої професором Аржанніковим Б.О. [164, 185], відносяться: регулювання напруги в контактній мережі, зниження вирівнювальних струмів на міжпідстанційних

зонах електрифікованих ділянок до мінімальної величини, забезпечення надійного рекуперативного гальмування автоматичним зниженням напруги на шинах сусідніх тягових підстанцій, обмеження допустимих струмів навантаження проводів контактної мережі за рахунок їх перерозподілу між сусідніми тяговими підстанціями.

Реконструкція системи електропостачання постійного струму шляхом використання існуючого та впровадження нового перспективного обладнання тягових підстанцій, в тому числі нових типів перетворювальних трансформаторів і вольтододавальних пристроїв з безконтактним автоматичним регулюванням випрямленої напруги складає основу для побудови керованої системи електропостачання електричної тяги постійного струму.

Потрібно відзначити, що існуючі нині системи живлення тягової мережі недостатньо ефективні і економічні, незважаючи на різні способи їх підсилення. Справа в тому, що добове завантаження діючих потужних тягових підстанцій при забезпеченні графіку інтенсивного руху потягів не перевищує 20-25 %, при цьому втрати енергії в тяговій мережі при пікових навантаженнях збільшуються і досягають 10-15 % від спожитої енергії. Тому, головним обмежуючим чинником є використання системи централізованого електропостачання.

На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови систем розподіленого живлення, у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення тягової мережі [41]. Запропонованим раніше роботам, окрім іншого, властивий загальний недолік – автори розглядають пристрої підсилення як окремі елементи системи електропостачання без можливості управління кожним з них в режимі реального часу в єдиній системі інтелектуального електропостачання. Зараз також проводяться дослідження з розробки методологічних підходів до побудови та розрахунку інтелектуальної системи тягового електропостачання розподіленого типу для наступного визначення закону управління окремими підсилюючими

пунктами при роботі у складі такої системи електропостачання, що забезпечує необхідний режим напруги в тяговій мережі при мінімізації втрат [41].

Синтез такої системи вимагає вирішення декількох завдань:

- побудова системи децентралізованого (розподіленого) живлення шляхом вибору кількості пунктів живлення та місць їх установки, потужності, елементної бази і схемотехніки, розробки методології розрахунку системи і її елементів;
- побудова схеми зовнішнього електропостачання розподіленої системи тягового електропостачання.

Для вирішення поставленого завдання в літературних джерелах [186, 202] пропонується декілька видів енергетичних каналів зовнішнього електропостачання: постійного і змінного струму, підвищеної напруги і частоти, і інші. Зростаючий дефіцит енергоресурсів ставить завдання досліджувати можливість використання незалежних (альтернативних) джерел електричної енергії для живлення пристроїв підсилення тягової мережі. До питань, підлягаючих рішенню слід віднести:

- тип джерела поновлюваної електричної енергії;
- компенсація впливу погодних умов на рівень генерованої енергії;
- схемотехніка, компоновання і елементна база;
- техніко-економічне обґрунтування їх застосування з прив'язкою до надійності забезпечення живлення тягового навантаження з необхідними енергетичними характеристиками.

Варіант структури системи електропостачання залізниці постійного струму, що використовує сонячні генератори електричної енергії, встановлені на земельній смузі відчуження залізниці приведений в роботі [41]. В цій роботі показано, що нормований рівень напруги для швидкісного руху витримується, при цьому, як показують попередні розрахунки, втрати електричної енергії зменшуються до 50 % при зменшенні витрат на тягу майже на 20 %.

Удосконалення режиму напруги в тяговій мережі може бути здійснено при застосуванні регулювання напруги та її контролю по довжині зони живлення.

Аналіз науково-технічної і патентної літератури дозволяє зробити висновок, що нині пристрої автоматичного регулювання напруги розвиваються по двох основних напрямках:

- створення нової техніки управління режимом напруги;
- оптимальне регулювання із застосуванням електронної і мікропроцесорної техніки.

Для стабілізації і регулювання напруги на шинах тягових підстанцій і в окремих точках тягової мережі ділянок, електрифікованих на постійному струмі, розроблені пристрої для перемикання відгалужень обмоток знижувальних трансформаторів під навантаженням (РПН), перетворювальні трансформатори із ступінчастим і безконтактним регулюванням, випрямні агрегати з безконтактним регулюванням напруги і регульовані вольтододавальні пристрої (ВДП). Регульовані ВДП призначені для підвищення і регулювання напруги як на шинах тягових підстанцій, так і в окремих точках тягової мережі. У останньому випадку вони доповнюються підстанціями невеликої потужності, що живляться від ліній електропередачі 10 кВ. Розроблене і серійно випускається силове устаткування для регулювання напруги тягових перетворювальних трансформаторів за схемою з реакторним мостом на первинній стороні трансформатора з логічним блоком автоматичного управління режимом напруги ШАУН. У основу регулювання закладена вимога забезпечення наперед заданої напруги на струмоприймачі електровоза. На сьогодні запропонована ціла низка інших алгоритмів регулювання напруги, основою яких є контроль зміни тягового навантаження [187]. На сьогоднішній день в пристроях, що виконують стабілізацію напруги в якості керівного параметру також використовується величина споживаного струму. При підвищенні напруги на струмоприймачі електровоза порівняння споживання електричної енергії тяговими

двигунами, дає підставу стверджувати, що, через малість зміни споживання електричної енергії, відхилення середньої напруги на струмоприймачі електровоза в діапазоні від 0 до 350 В практично не впливає на витрату електричної енергії на тягу [177]. А це, у свою чергу, не пред'являє особливих вимог до системи автоматичного регулювання по підтримці напруги на струмоприймачеві електровоза з високою точністю: основною вимогою є необхідність забезпечення зміни напруги в завданому діапазоні. Звідси виникає задача створення нового алгоритму функціонування пунктів підсилення при регулюванні напруги в тяговій мережі у єдиній системі інтелектуального управління та регуляторів напруги з застосуванням широтно-імпульсної модуляції на сучасних силових компонентах типу IGBT-структур.

Окрім підсилення тягових мереж постійного струму, важливим інструментом енергозбереження в електроенергетичних системах завжди були і будуть пристрої компенсації реактивної потужності, оскільки технологічний процес будь-якого підприємства передбачає роботу електричних машин, які в свою чергу зумовлюють перетікання реактивної потужності.

Для системи електричної тяги змінного струму розвиток сучасних пристроїв компенсації реактивної потужності має превалююче значення. Основні концепції розвитку пристроїв компенсації реактивної потужності для зменшення двох основних недоліків системи змінного струму виконані в роботі [185]. Необхідні удосконалення полягають у одночасному розгляді задач зниження перетікань реактивної потужності та симетрування тягових навантажень.

Тягові підстанції електрифікованих залізниць постійного струму з точки зору перетікань реактивної електроенергії також не є винятком, але мають певну специфіку протікаючих електроенергетичних процесів. Специфіка полягає у застосуванні трифазних випрямних пристроїв, які виконуються за 6- чи 12-пульсними схемами, та крім випрямного режиму

роботи на ділянках з гірським профілем, можуть працювати в інверторних режимах. Крім того, характер навантаження тягових підстанцій є нерівномірним, залежить від багатьох факторів і в кожному конкретному випадку повинен бути врахований при виборі параметрів системи тягового електропостачання.

Нерозглянутим питанням, з точки зору цілісності картини застосування пристроїв компенсації реактивної потужності в сучасних умовах, є розробка методики визначення необхідної потужності компенсуючих пристроїв для забезпечення максимально можливого зниження плати за перетікання реактивної електроенергії

Виникнення реактивної потужності в системі тягового електропостачання постійного струму викликане процесами комутації вентилів при перемиканні між фазами напруги та зумовлене наявністю індуктивного опору як у колі випрямленого струму так і в системі зовнішнього електропостачання. Певні особливості створюють і наявні спотворення форми кривої первинного струму.

В якості джерел реактивної потужності на тягових підстанціях постійного струму найбільш ефективні установки поперечної ємнісної компенсації і компенсовані випрямні або випрямно-інверторні агрегати з штучною комутацією.

Безпосереднє підключення батарей установок поперечної ємнісної компенсації до шин 6, 10 чи 35 кВ тягових підстанцій постійного струму, як правило, неприпустимо, оскільки при цьому можливе резонансне посилення однієї з вищих гармонік струму, що генеруються перетворювачами.

Для уникнення подібних резонансних явищ, послідовно з конденсаторами включають реактори відповідної індуктивності. Для умов тягових підстанцій постійного струму індуктивність реактора вибирається з таким розрахунком, щоб резонансна частота L - C віток у кожній фазі складала близько 240 Гц, тобто була близькою до частоти 5-ої гармоніки в мережевому струмі перетворювачів. В цьому випадку установка компенсації

є фільтром струмів 5-ої гармоніки. Деяке відхилення резонансної частоти фільтру від частоти ідеального налаштування (250 Гц) прийняте з урахуванням можливої в експлуатації зниження ємності конденсаторів. Такі пристрої, призначені одночасно для фільтрації гармонік і компенсації реактивної потужності основної частоти, отримали назву фільтро-компенсуючих пристроїв.

Для фільтро-компенсуючих пристроїв найбільш переважною схемою з'єднання фаз є в зірку з ізольованою нейтраллю. На основі базисної установки пристроїв можуть бути реалізовані два варіанти схеми із з'єднанням в трикутник фаз всієї установки або тільки фаз конденсаторної батареї.

Перша установка фільтро-компенсуючого пристрою 10 кВ потужністю 3 квар для тягових підстанцій постійного струму була розроблена ВНДІЗТ і введена в експлуатацію на Свердловській залізниці [206].

Реактивна потужність, будучи потужністю обміну між джерелом і споживачем електроенергії, не виконує корисної механічної роботи, а лише завантажує всі елементи системи, викликаючи при цьому додаткові втрати активної потужності, втрати напруги, знижує потужність обладнання, тобто погіршує показники роботи системи електропостачання. У зв'язку з цим пояснюється техніко-економічна необхідність застосування конденсаторних пристроїв поблизу споживача, зокрема, і на тягових підстанціях.

Сумарна потужність компенсуючих пристроїв електрифікованої ділянки характеризує ступінь компенсації реактивної потужності й оснащеність ділянки компенсуючими пристроями. Під ступінню компенсації реактивної потужності розуміють відношення наявних потужностей до найбільшої реактивної потужності навантаження. Оснащеність ділянки прийнято характеризувати відношенням потужностей компенсуючих пристроїв до найбільшої активної потужності навантаження. Недостатня оснащеність компенсуючими пристроями призводить до недопустимих відхилень напруги.

Рядом особливостей відрізняється робота на електрифікованих залізницях з несинусоїдними струмами і напругами. Пристрої поперечної компенсації компенсують реактивну потужність першої гармоніки, і саме на цю величину слід орієнтуватись при виборі потужності. Разом з тим, оскільки компенсуючі пристрої для надійної роботи доповнюються фільтром у вигляді послідовного з'єднання конденсаторів з реактором, одночасно з компенсацією реактивної потужності відбувається фільтрація гармонік струму.

Реактивне тягове навантаження підстанції постійного струму залежить від наступних основних чинників:

- ступені завантаження перетворюючих агрегатів;
- різниці між фактичним значенням напруги на шинах 6; 10 і 35 кВ і номінальним паспортним значенням напруги мережевих обмоток перетворюючих трансформаторів;
- типу перетворюючих трансформаторів (напруги короткого замикання і струму холостого ходу).

Впливати на ступінь завантаження окремих випрямних агрегатів і таким чином знижувати споживану ними реактивну потужність можна, змінюючи автоматично кількість одночасно працюючих агрегатів залежно від навантаження. Технічно таке регулювання може здійснюватись застосуванням пристроїв автоматичного включення і відключення резерву (АВОР) на підставі критичної точки перетину кривих струму навантаження, при якому споживання реактивної потужності однакове як при роботі одного, так і двох агрегатів [206].

Проте жоден зі способів регулювання реактивної потужності для тягових підстанцій постійного струму не знайшов розповсюдження, в першу чергу, через великі капітальні вкладення та незначну економію коштів з огляду на невелике значення перетікань реактивної електроенергії тяговими підстанціями постійного струму.

1.6 Висновки до розділу 1. Постановка задач дослідження

З огляду на розгалуженість та протяжність систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць, які представлені шістьма суб'єктами господарювання, що в свою чергу володіють інфраструктурою та розподілені за територіальним принципом, актуальним є впровадження інтелектуальних технологій до керування режимами їх роботи. Через те, що кінцевий споживач в системі тягового електропостачання постійно змінює свої параметри у часі та просторі та нерідко на межах залізниць виникають спірні питання, пов'язані з особливістю споживання електричної енергії електрорухомим складом, недосконалістю системи обліку електричної енергії та режимами напруги в системі електропостачання. Електричну енергію станом всі залізниці України отримують з оптового ринку електроенергії, користуючись при її передачі до тягових підстанцій послугами транзиту акціонерних компаній, які розподілені територією країни за адміністративно-територіальним поділом, що додатково вносить складнощі при вирішенні спірних питань та пошуку причин їх виникнення.

З приведенного огляду можна зробити висновок про актуальність проблеми підвищення енергоефективності електрифікованого залізничного транспорту за рахунок зниження втрат електричної енергії в елементах систем електропостачання при її передачі до електрорухомого складу.

Наявний рівень технологічних втрат в системах тягового електропостачання для існуючих на даний час режимів електропостачання не задовольняє сучасним вимогам. В системах електричної тяги змінного струму, які характеризуються рівнем втрат 5-8 %, створюються умови для транзитних перетікань потужностей, які не правильно враховуються системою обліку та спричиняють додаткові витрати на закупівлю електроенергії. В системах постійного струму з рівнем втрат 14-17 % наявні відхилення напруги на струмоприймачах електрорухомого складу, які обмежують провізну і пропускну спроможності електрифікованих ділянок залізниць та, в цілому, ускладнюють виробничо-господарську діяльність.

Сучасний технологічний прогрес на даному етапі розвитку вичерпав майже усі можливості удосконалення силової частини електроенергетичного обладнання, тому подальший розвиток та підвищення енергоефективності електроенергетичних систем забезпечується поєднанням досягнень силової електроніки та інформаційних технологій у вигляді концепції Smart Grid.

Таким чином, можна визначити задачі, які необхідно вирішити:

8. Розвинути метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання для коректного визначення режиму напруги при наявності на електрорухомому складі систем стабілізації тягової потужності.

9. Розробити метод розрахунку систем тягового електропостачання на основі просторово-часового уявлення електричних величин, з урахуванням керованих елементів в системах електричної тяги.

10. На основі експериментальних даних системно проаналізувати режими роботи систем тягового електропостачання постійного та змінного струму та дослідити вплив спотворень якості електроенергії на енергетичні характеристики і точність систем обліку.

11. Розробити наукові основи інтелектуального управління режимом напруги в системі електропостачання тяги постійного струму за рахунок визначення керуючої послідовності впливів на пристрої тягового електропостачання.

12. Удосконалити методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

13. Розробити алгоритми для застосування розроблених методів у програмному продукті для інтелектуалізації процесу електропостачання в системах електричної тяги.

Отримані в першому розділі результати аналізу проблеми енергоефективності електропостачання залізничного транспорту опубліковано в роботах [8, 10, 31].

РОЗДІЛ 2

**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
З УРАХУВАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ**

Розрахунок систем тягового електропостачання є важливим етапом у проектуванні електрифікованих залізниць. Результати розрахунків безпосередньо впливають на капітальні витрати, які визначають вартість необхідного обладнання. Вартість обладнання, в свою чергу, визначається на підставі розрахованих параметрів систем тягового електропостачання. Поряд із загальнопромисловими системами, системи тягового електропостачання володіють характерними відмінностями, які виключають застосування загальновідомих методик розрахунку проектних параметрів. Внаслідок відсутності сучасних обчислювальних можливостей при розробці методів розрахунку систем тягового електропостачання, вони були значно спрощені, що тягне за собою деякий запас потужності для уникнення впливу неврахованих факторів.

Сучасні тенденції розвитку технологічного процесу вимагають більш точних методів розрахунку параметрів технічних систем, які, в першу чергу, визначатимуть необхідність застосування і параметри силового обладнання, і, у кінцевому випадку, будуть позначатися на капітальних витратах при реалізації проектів. Поступове впровадження нових інтелектуально-керованих пристроїв в електроенергетиці та, зокрема, на залізничному транспорті, позначається на тому, що існуючі методи розрахунку не дають можливості коректно розрахувати та оцінити режими електроспоживання, які матимуть місце при роботі таких пристроїв. До таких пристроїв можна віднести, наприклад, сучасні перетворювачі електрорухомого складу, що здатні підтримувати постійну тягову потужність при змінах первинної живлячої напруги, керовані пристрої підсилення тягових мереж, інверторні системи фотоелектричних джерел, що здатні підтримувати максимально можливу потужність фотоелементу при зміні сонячної радіації та інші.

Система тягового електропостачання електрифікованих ділянок залізниць є складною системою, у якій процес електропостачання тягового навантаження протікає під впливом великої кількості факторів детермінованого та стохастичного характеру. Для оцінки пропускної спроможності та плануванні заходів підсилення існуючих технічних засобів визначальними факторами є типи поїздів, їх вага, кількість на фідерній зоні, схема пропуску, міжпоїзний інтервал, і т. ін. На ділянках обертання швидкісних поїздів і поїздів підвищеної ваги система тягового електропостачання повинна володіти відповідною навантажувальною здатністю. При слідуванні таких поїздів істотно збільшуються струмові навантаження в системі, і, відповідно, більш інтенсивно проходить нагрівання обладнання, знижується рівень напруги в контактній мережі, збільшуються втрати електроенергії та ускладнюються умови роботи релейного захисту.

Електричні розрахунки систем електричної тяги постійного та змінного струму окрім специфіки електротягового навантаження мають принципові особливості, пов'язані з природою протікання процесів в колах постійного чи змінного струму. Так, в системі постійного струму за технічними умовами живлення і секціонування виходить, що всі тягові підстанції електрифікованої ділянки працюють на одну мережу. В практичних розрахунках, зазвичай, методика обмежується однією міжпідстанційною зоною, що викликає неточності. Система ж змінного струму характеризується, насамперед, активно-індуктивним характером імпедансу, індуктивно-зв'язаними колами та необхідністю врахування електромагнітних процесів при роботі різних за своєю структурою перетворювачів електрорухомого складу.

2.1. Фізичні процеси споживання електричної енергії в системах тягового електропостачання

Будь-яке перетворення електричної енергії в системах тягового електропостачання зумовлене процесами випрямлення чи трансформації

електроенергії на тягових підстанціях та безпосередньо на електрорухомому складі. Для більшості підстанцій системи постійного струму характерна двоступенева трансформація через ускладнення у виготовленні трифазних випрямлячів на напругу вище 35 кВ та масового їх впровадження, проте саме за цієї системи виконується більш ефективно перетворення енергії, ніж в системі змінного струму. Для порівняння в системі змінного струму коефіцієнт потужності однофазного випрямляча електровозу за даними експлуатації змінюється в межах $\lambda = 0,8..0,7$ і навіть нижче, в системі постійного струму коефіцієнт потужності випрямлячів тягових підстанцій значно вище $\lambda = 0,9..0,94$ [207]. На змінному струмі тягові підстанції виконують одинарну трансформацію отриманої з первинної мережі електроенергії, а подальше її перетворення до напруги, придатної для живлення електроприводу виконується з енергії однофазного змінного струму перетворювачами електрорухомого складу.

Крім того, на електрифікованих залізницях однофазного змінного струму унаслідок низького коефіцієнту потужності на електрорухомому складі та активно-індуктивного характеру опору тягової мережі мають місце більші втрати напруги у абсолютному вираженні ніж в системі постійного струму. Так, номінальне проектне відхилення напруги на струмоприймачеві електрорухомого складу від напруги на шинах тягової підстанції для змінного струму складає $\delta U_{\sim} = 27,5 - 25 = 2,5$ кВ, а для постійного $\delta U_{=} = 3,3 - 3,0 = 0,3$ кВ. У відношенні до номінальної напруги на шинах підстанції відхилення напруги для обох систем становить 9,1 %

Нестаціонарний характер електричних навантажень, який створюється електрорухомим складом в системі електропостачання, та їх здатність переміщуватись у просторі відносно тягових підстанцій призводять до залежності напруги і споживання струму від характеру руху поїздів та особливостей електрифікованої ділянки. Напруга безпосередньо на струмоприймачах електровозів коливається в досить широких межах, що примушує враховувати зміни режиму напруги через дві основні причини.

По-перше, швидкість електровозів з тяговими двигунами послідовного збудження при фіксованій силі тяги і позиції регулювання змінюється практично пропорційно, що в результаті впливає на виконання графіку руху поїздів.

По-друге, розрахунок режимів системи тягового електропостачання, який базується на даних тягових розрахунків, вимагає тісного ув'язування процесів розподілу та споживання електричної енергії.

Взаємодія електрорухомого складу з системою тягового електропостачання є досить складним процесом, який проявляється в тому, що в системі рівнянь змінюється як координата, так і швидкість руху поїзда. В свою чергу, струми залежать від швидкості руху і отриману таким чином миттєву схему можна розрахувати, але застосувати результати розрахунку до процесу руху поїзда не можна через неможливість зарані передбачити зміни швидкості, координати та профілю, що входять до цієї ж системи диференціальних рівнянь руху поїздів.

2.2. Обґрунтування необхідності розроблюваної моделі. Постановка задачі

Розрахунки систем тягового електропостачання в якості складних систем в залежності від поставленої задачі повинні враховувати багато різноманітних факторів, від яких залежать обрані методи і способи розрахунку та які, в свою чергу, будуть впливати на об'єми та швидкість розрахунку. Зазвичай моделі системи тягового електропостачання застосовуються або для отримання числових характеристик електричних величин при проектуванні ділянки електрифікованої залізниці або для оптимізації режимів роботи існуючих ділянок, чи при впровадженні нових пристроїв електропостачання чи для аналізу ефективності, а в окремих випадках, і при виникненні ненормальних режимів експлуатації.

Таким чином, на етапі проектування ділянок моделі необхідні для розрахунку проектних показників систем тягового електропостачання стосовно режимів напруги, втрат потужності, ККД, пропускної спроможності

ділянки, тощо. За наявності резервів чи невизначеностей на цьому етапі можливе використання оптимізаційних розрахунків стосовно вибору чи коригування параметрів системи тягового електропостачання з метою покращення показників роботи.

На етапі експлуатації моделі можуть застосовуватись для оптимізації режимів напруги з врахуванням особливостей систем зовнішнього електропостачання, розрахунку наявних показників систем тягового електропостачання з подальшим вибором варіантів підсилення чи коригування обраних на етапі проектування параметрів, аналізу ефективності роботи ділянок електрифікованих залізниць на підставі обробки великих масивів експериментальних даних, проведення повнофакторних експериментів та узагальнення результатів.

Проблемною частиною розрахунку режимів в системах тягового електропостачання є особливості в розрахунку миттєвих схем, методи розрахунку яких недостатньо узагальнені та складно підлягають автоматизації при розробці засобів моделювання, оскільки застосовують громіздкі апарати теорії графів і матриць, багатополісників чи фазних координат [248].

Висуємо припущення, що недостатньо проаналізовані та узагальнені методики розрахунку миттєвих схем в системах тягового електропостачання створюють складність через необхідність враховувати зміну параметрів тягового навантаження в часі і просторі. Такий підхід умовно можна назвати методикою від загального до окремого. Якщо ж виконувати дослідження навпаки – від окремого до загального, тобто визначити концепцію розрахунку систем тягового електропостачання таким чином, що в залежності від просторово-часового стану тягового навантаження змінюються і параметри системи тягового електропостачання, отримаємо нові аналітичні функції, які дозволять розвинути методи розрахунку систем тягового електропостачання з послідовним впровадженням у сучасні засоби моделювання.

Таким чином, необхідно розробити методику розрахунку миттєвих схем, яка дозволить виконувати електричні розрахунки системи тягового

електропостачання на підставі вихідної потужності електрорухомого складу, враховуючи можливість її постійного споживання при переміщенні тягового навантаження у просторі.

Впровадження методики у програмний продукт повинно дозволяти виконувати розрахунки на підставі вихідних даних у вигляді графіку руху, тягових розрахунків або режимних карт, схеми живлення та секціонування ділянки, даних режимів напруги системи зовнішнього електропостачання. Виконання електричних розрахунків системи тягового електропостачання в просторово-часових координатах повинно включати в себе функції розподілу струму, спаду напруги та втрат потужності в контактній мережі. Оптимізаційні розрахунки повинні включати пошук оптимального рівня напруги на тягових підстанціях, пошук кількості та місця встановлення підсилюючих пунктів, визначення законів управління керованими підсилюючими пунктами, пристроями компенсації реактивної потужності на змінному струмі, розрахунки параметрів режиму системи електропостачання, а саме показники якості електричної енергії, величини напруги, струму, кутів зсуву фаз, втрати в елементах системи електропостачання.

Розроблена модель повинна реалізовуватись у вигляді програмного комплексу, який виконуватиме розрахунок режимних показників системи тягового електропостачання для залізниць постійного та змінного струму, а саме значень фідерних і первинних струмів, розподілу струмів в контактній мережі, втрат напруги, потужності, витрат електричної енергії та основних показників якості електроенергії в системі тягового електропостачання з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії; виконання оптимізаційних розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

Далі приводяться результати узагальнення та перегляду наукових аспектів, що детальніше аналізують та узагальнюють методики розрахунку

протікаючих в системах тягового електропостачання процесів. Узагальнення стосуються застосуванню просторово-часового уявлення електричних величин в системах тягового електропостачання, більш точному врахуванню режиму напруги при споживанні електрорухомим складом постійної потужності, врахуванню в системі електропостачання силових елементів з керованими параметрами та особливостей розрахунку систем тягового електропостачання в якості розподілених.

2.3. Методика розрахунку миттєвих схем для систем підтримання постійної потужності

Для розробки методики розрахунку миттєвих схем, у яких тягове навантаження задане потужністю, дослідимо закономірності зміни параметрів електроенергетичних процесів для відомих схем живлення контактної мережі, взявши за основу баланс потужностей для кожної миттєвої схеми. З огляду на простоту тривіальність розрахунків консольної схеми живлення та її неспроможність забезпечити номінальний режим напруги при збільшених навантаженнях і реалізації швидкісного руху, теоретичні викладки для неї не виконуються.

Розглянемо баланс потужностей для двосторонньої схеми постійного струму за умови прослідування одного електрорухомого навантаження з постійною споживаною потужністю P (рис. 2.1). Для спрощення подальших викладок поточну координату розташування навантаження $x(t)$ позначатимемо як x , пам'ятаючи про її залежність від часу t .

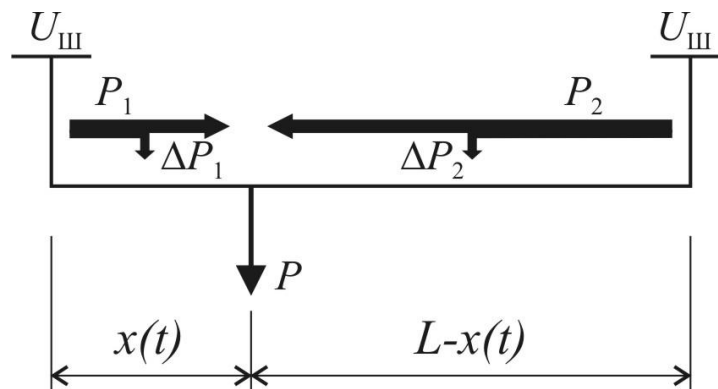


Рис. 2.1. Розрахункова схема для двосторонньої схеми живлення

Напругу на шинах тягових підстанцій вважатимемо постійною і рівною для двох суміжних підстанцій. Тоді для будь-якого моменту часу для заданих умов, справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_2 - \Delta P_2, \quad (2.1)$$

де P_1, P_2 – потужності, які віддаються першою та другою підстанціями;
 $\Delta P_1, \Delta P_2$ – втрати потужності в тяговій мережі, які виникають при передачі основної потужності P .

Нехай в деякий момент часу струм електровозу матиме значення I , а напруга на струмоприймачі – U , тобто споживана електровозом потужність $P = U \cdot I$. Інші складові балансу потужностей для цього моменту часу матимуть вигляд

$$P = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2 + U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - x) \cdot I_2^2, \quad (2.2)$$

де I_1, I_2 – струми фідерів відповідно першої та другої підстанції;

$U_{\text{ш}}$ – напруга на шинах тягової підстанції, В;

r_0 – питомий опір тягової мережі, Ом/км;

x – поточна координата розташування навантаження, км;

L – довжина міжпідстанційної зони, км.

Використовуючи відомі формули струморозподілу для двосторонньої схеми, отримаємо

$$P = U_{\text{ш}} I \frac{L-x}{L} - r_0 \cdot x \cdot I^2 \frac{(L-x)^2}{L^2} + U_{\text{ш}} I \frac{x}{L} - r_0 \cdot (L-x) \cdot I^2 \frac{x^2}{L^2}. \quad (2.3)$$

Спростуючи рівняння та групуємо величини відносно невідомої I , отримаємо рівняння

$$P = U_{\text{ш}} I - r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right) I^2. \quad (2.4)$$

Таким чином, з останнього виразу видно, що споживана електровозом потужність має дві складові: перша з них визначається добутком струму та номінальної напруги (у випадку розташування поблизу шин тягової

підстанції), а друга визначає втрати потужності при її передачі від шин тягової підстанції до будь-якої точки тягової мережі. В загальному випадку можна стверджувати, що при необхідності споживання заданої потужності в довільній точці тягової мережі струм електровоза буде збільшуватись на величину, що визначає необхідні для передачі цієї потужності втрати, відносно струму, визначеного для номінальної напруги.

Для більшої зручності подальших викладок введемо поняття функції опору, для даної схеми живлення

$$f(x) = r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2.5)$$

яка фізично визначає закономірність зміни опору для даної схеми живлення при зміні розташування навантаження. Для випадку консольної схеми живлення функція опору матиме вигляд $f(x) = r_0 \cdot x$.

Переписавши рівняння (2.4) з врахуванням (2.5) та вирішивши його відносно струму, відкидаючи корінь рівняння, який не має фізичного сенсу, матимемо

$$P = U_{\text{ш}} I - f(x) I^2, \quad (2.6)$$

$$I(x) = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P(x)}}{2f(x)}. \quad (2.7)$$

Фактично, чисельник виразу (2.7) визначає падіння напруги, яке створюється при споживанні заданої потужності в будь-якій точці тягової мережі. У порівнянні з традиційним методом розрахунку, де потужність задається струмом для номінальної напруги, на практиці можуть мати місце суттєві відмінності тягових струмів в залежності від фактичних значень напруги.

Проаналізуємо, як зміняться електричні розрахунки для даної схеми живлення при прослідкуванні одного поїзду, який в одному випадку задається постійним струмом для номінальної напруги, а в другому – постійною потужністю. Розрахунки проведемо для типової ділянки постійного струму довжиною 20 км, з питомим опором тягової мережі 0,05 Ом/км та середньою

швидкістю руху 60 км/год. Напругу на шинах обох тягових підстанцій вважатимемо рівною 3,3 кВ а внутрішніми опорами підстанцій знехтуємо.

В результаті розрахунків отримаємо наступні сімейства кривих струмів парних (рис. 2.2, а) та непарних фідерів (рис. 2.2, б) відносно трьох значень потужностей, а саме 3.3 МВт, 6.0 МВт і 8.0 МВт відповідно. Аналогічно розрахункам струмів фідерів, виконані розрахунки напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 2.3) для вказаних потужностей.

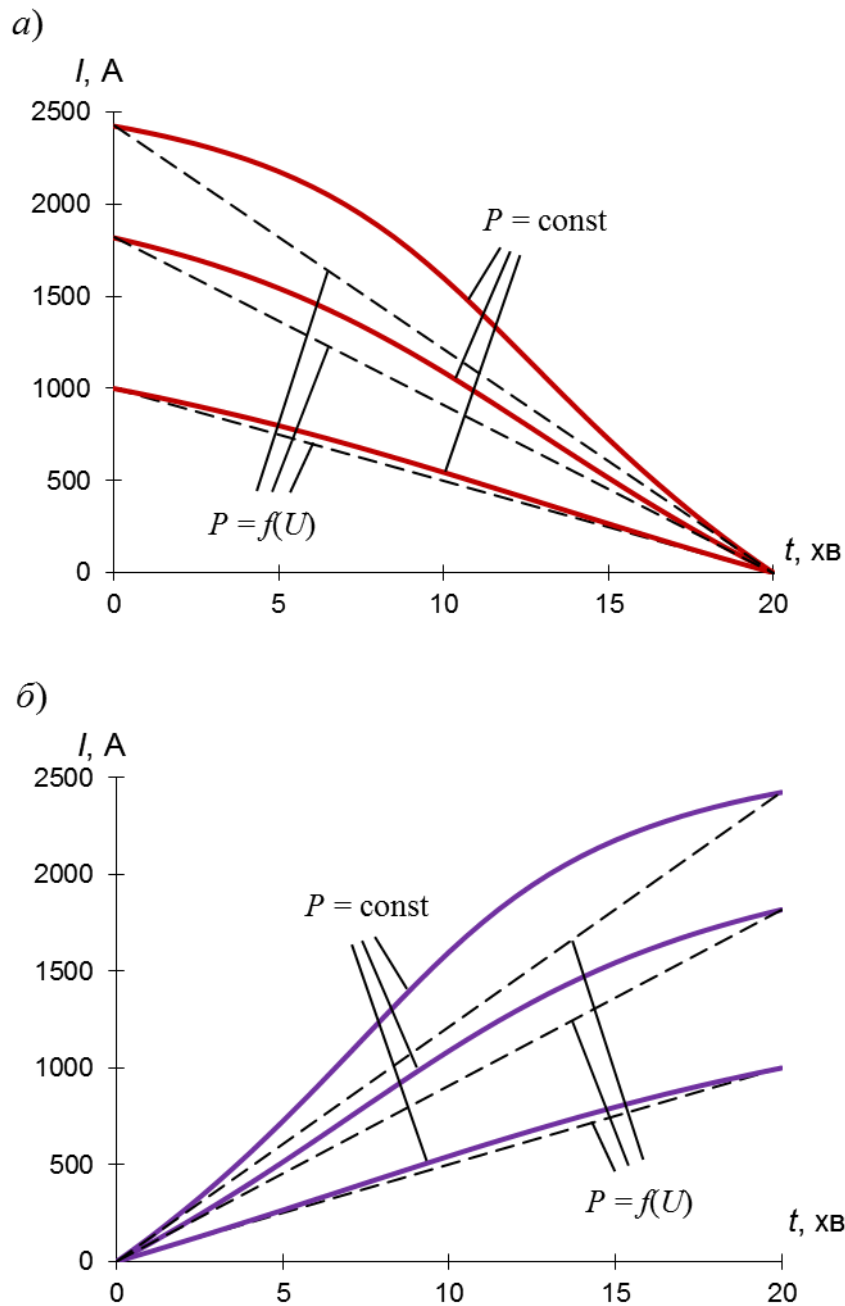


Рис. 2.2. Сімейства струмів фідерів двосторонньої схеми живлення за двома методами розрахунку

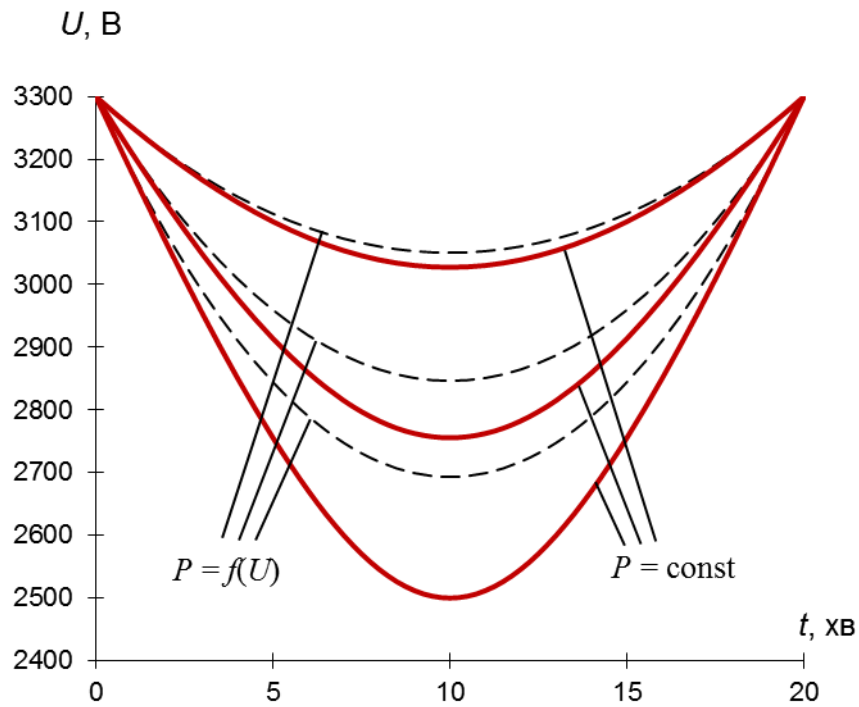


Рис. 2.3. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для двосторонньої схеми, визначені різними методами

Як видно з аналізу приведених залежностей, максимальні відмінності розрахункових величин спостерігаються в середині міжпідстанційної зони, при чому зі збільшенням потужності їх відносні значення збільшуються.

Для вузлової схеми живлення з виконанням поставлених умов структура балансу потужностей дещо ускладниться. Через можливість дзеркального відтворення, при узагальненні достатньо розглянути розташування навантаження на будь-якій колії між підстанцією та постом секціонування (рис. 2.4).

Отже, для будь-якого моменту часу, справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_5 - \Delta P_5, \quad (2.8)$$

де, в свою чергу,

$$P_5 = P_2 - \Delta P_2 + P_3 - \Delta P_3 + P_4 - \Delta P_4. \quad (2.9)$$

Приймаючи споживану електровозом потужність $P = U \cdot I$, визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2; \quad P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_C \cdot I_3^2; \quad P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot (I_2 + I_3 + I_4)^2,$$

де I_1, I_2, I_3, I_4 – струми фідерів відповідно першої (1, 3) та другої (2, 4) підстанції.

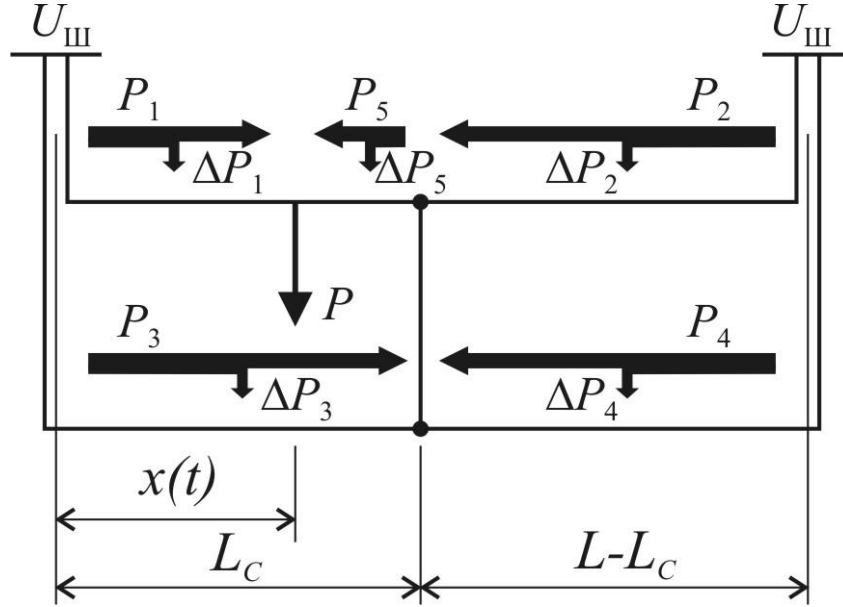


Рис. 2.4. Розрахункова схема для вузлової схеми живлення

Використовуючи формули розподілу струмів для вузлової схеми живлення, матимемо

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} \cdot x \right) - r_0 \cdot x \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} \cdot x \right)^2;$$

$$P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I \left(\frac{L - L_C}{2LL_C} \cdot x \right) - r_0 \cdot L_C \cdot I^2 \left(\frac{L - L_C}{2LL_C} \cdot x \right)^2;$$

$$P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2.$$

Користуючись (2.9), визначимо по-черзі складові рівняння (2.8), а саме

$$P_1 + P_5 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = U_{\text{ш}} I \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} x + \frac{x}{2L} + \frac{L - L_C}{2LL_C} x + \frac{x}{2L} \right) = U_{\text{ш}} I;$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \left[x \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} x \right)^2 + (L - L_C) \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + \right.$$

$$\left. + L_C \left(\frac{L - L_C}{2LL_C} x \right)^2 + (L - L_C) \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + (L_C - x) \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2 \right].$$

Спрощуючи вираз у дужках, отримаємо

$$\Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \left[x - \left(\frac{L + L_C}{2LL_C} \right) x^2 \right].$$

Таким чином, повертаючись до рівняння (2.8), матимемо

$$P = U_{\text{ш}} I - r_0 I^2 \left[x - \left(\frac{L + L_C}{2LL_C} \right) x^2 \right].$$

Виконавши заміну виразу у дужках на функцію опору $f(x)$, матимемо отримане раніше рівняння (2.6) та аналогічний виразу (2.7) розв'язок.

У випадку знаходження поїзду за постом секціонування, зміниться структура функції опору $f(x)$ тягової мережі таким чином, що в загальному вигляді будемо мати

$$f(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \left(\frac{L + L_C}{2LL_C} \right) x^2, & 0 \leq x \leq L_C; \\ \frac{L \left(x - \frac{L_C}{2} \right)}{L - L_C} - \frac{\left(L - \frac{L_C}{2} \right) x^2}{L(L - L_C)}, & L_C \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2.10)$$

За результатами розрахунків для вузлової схеми живлення і прийнятих на початку потужностей, можна отримати наступні сімейства струмів парних (рис. 2.5, а) та непарних фідерів (рис. 2.5, б). Аналогічним чином отримані залежності напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 2.6) для вказаних потужностей.

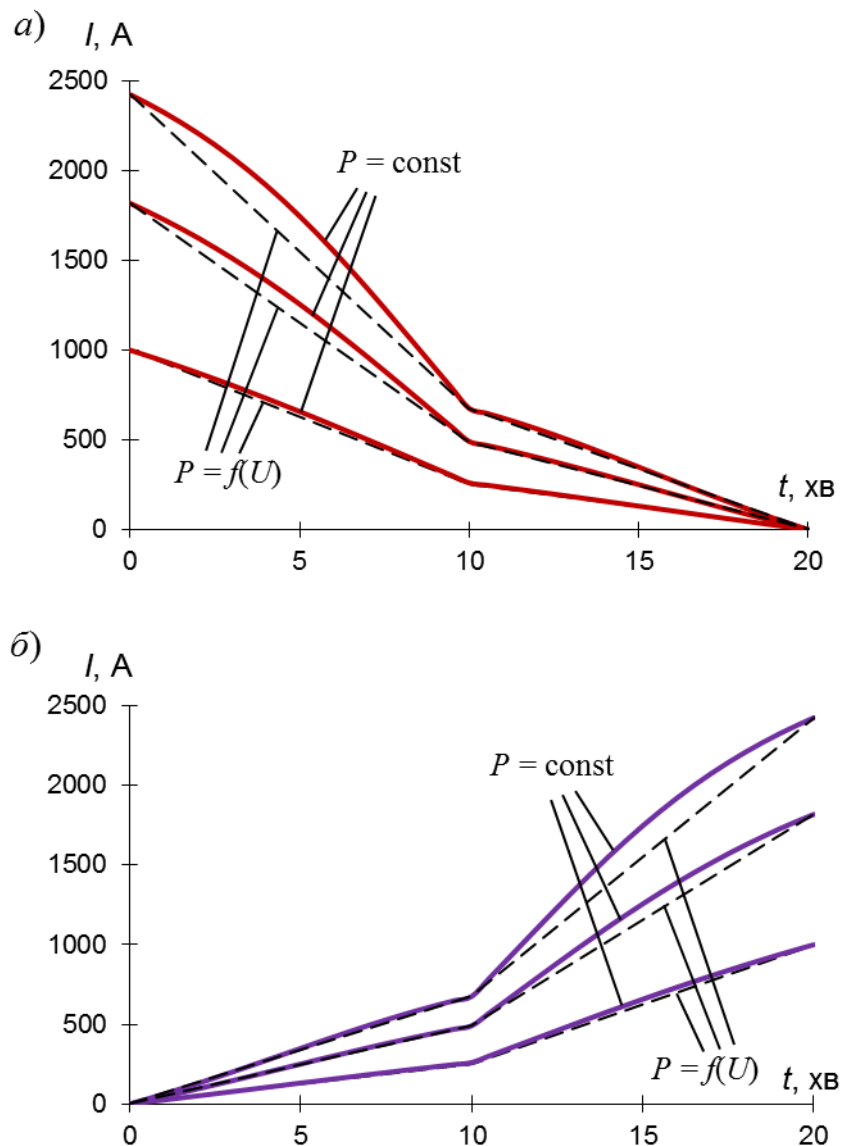


Рис. 2.5. Сімейства струмів попутних фідерів вузлової схеми живлення за двома методами розрахунку

Як видно з приведених залежностей, для вузлової схеми живлення максимальні відмінності розрахункових величин спостерігаються не в середині міжпідстанційної зони, а зміщені на $1/3$ відносно координати поста секціонування.

Паралельна схема живлення матиме ще більше ускладнену структуру розподілу потужностей. Для досягнення поставленого завдання необхідно розглянути два випадки розташування навантаження відносно пунктів паралельного з'єднання контактних підвісок та поста секціонування.

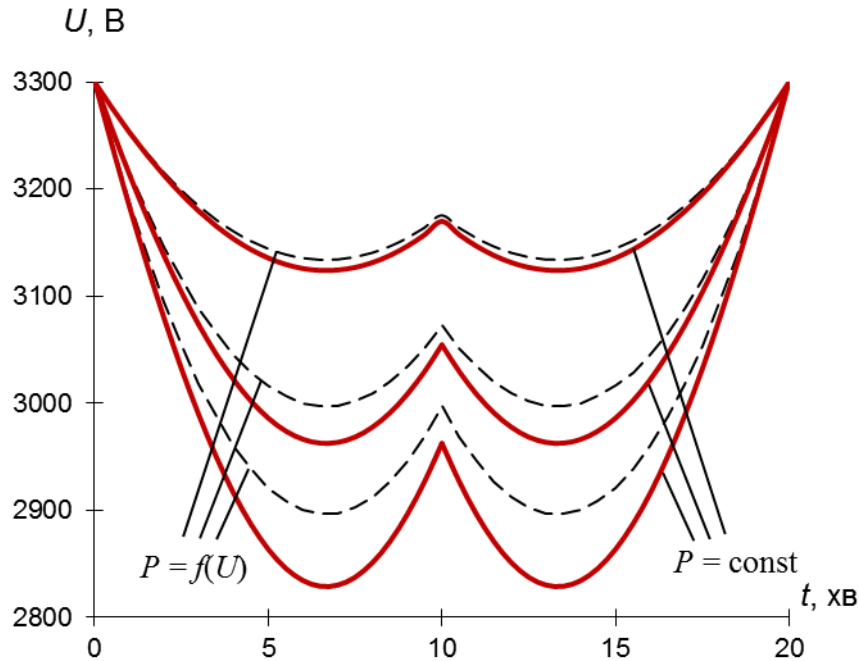


Рис. 2.6. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для вузлової схеми, визначені двома методами

З огляду на поздовжню симетричність та можливість дзеркального відтворення схеми, достатньо розглянути випадки знаходження навантаження до першого пункту та між першим пунктом і постом секціонування (рис. 2.7). Таким чином, для першого випадку (рис. 2.7, а) в кожен момент часу справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_5 - \Delta P_5, \quad (2.11)$$

де

$$P_5 = P_2 - \Delta P_2 + P_3 - \Delta P_3 + P_4 - \Delta P_4. \quad (2.12)$$

Вважаючи, що споживана електровозом потужність визначається як $P = U \cdot I$, визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2; \quad P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I_2^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2; \quad P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I_4^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_{C1} - x) \cdot (I_2 + I_3 + I_4)^2,$$

де I_1, I_2, I_3, I_4 – струми фідерів першої (1, 3) та другої (2, 4) підстанції.

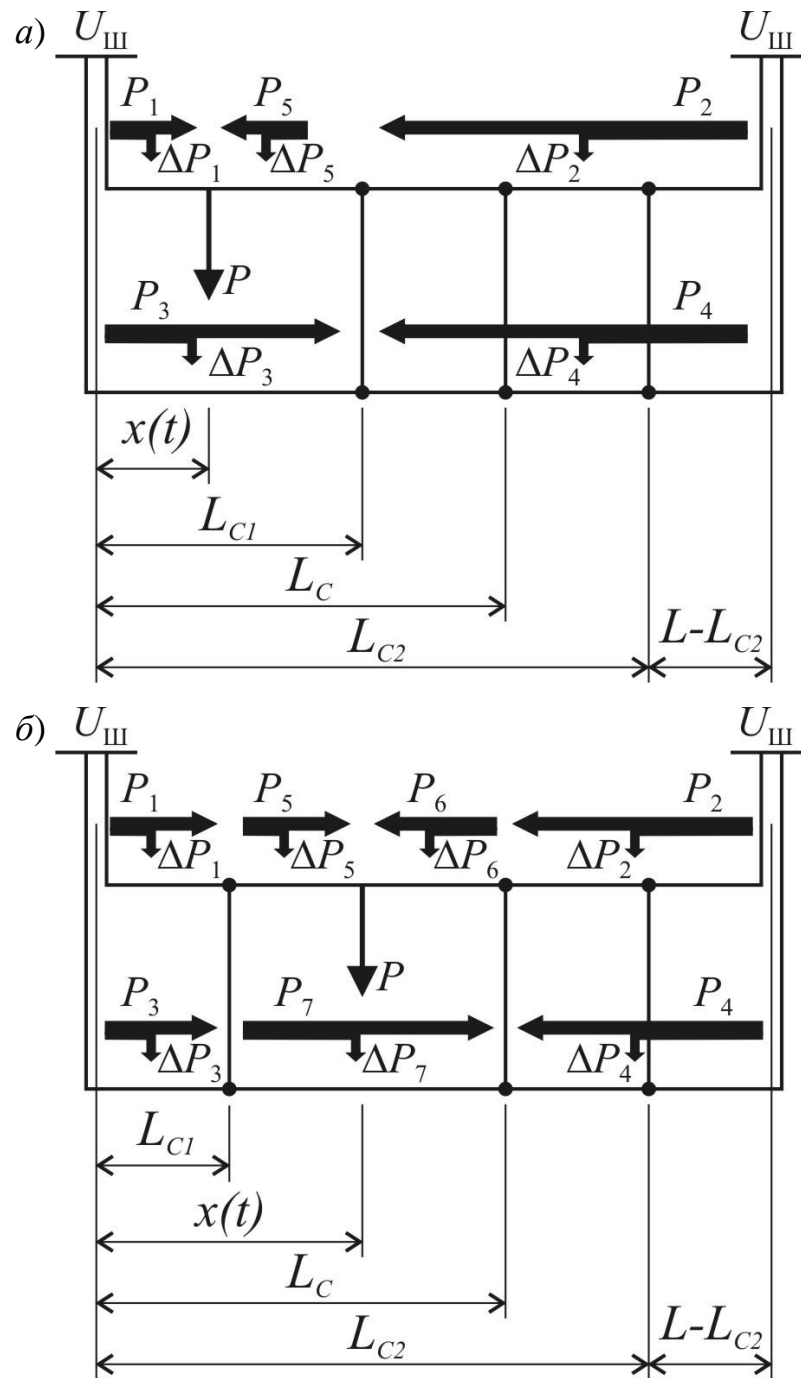


Рис. 2.7. Розрахункові схеми для паралельної схеми живлення

Беручи за основу формули розподілу струмів для вузлової схеми живлення та відповідно змінюючи їх до паралельної, матимемо

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{III} I \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right) - r_0 \cdot x \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2;$$

$$P_2 - \Delta P_2 = U_{III} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{III}} I \left(\frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right) - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I^2 \left(\frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2;$$

$$P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{III}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_{C1} - x) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2.$$

Користуючись (2.12), визначимо по-черзі складові рівняння (2.11), а саме

$$P_1 + P_5 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = U_{\text{III}} I \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} x + \frac{x}{2L} + \frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} x + \frac{x}{2L} \right) = U_{\text{III}} I;$$

$$\begin{aligned} \Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \times & \left[x \cdot \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2 + (L - L_{C1}) \cdot \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + \right. \\ & \left. + L_{C1} \cdot \left(\frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2 + (L - L_{C1}) \cdot \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + (L_{C1} - x) \cdot \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Спрощуючи вираз у дужках, отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \times & \left[x - x^2 \left(\frac{1}{L} + \frac{3}{4L_{C1}} - \frac{L_{C1}}{4L_C^2} - \frac{L_{C1}}{2LL_C} \right) - \right. \\ & \left. - x^3 \left(\frac{1}{4L_C^2} - \frac{1}{4L_{C1}^2} + \frac{1}{2LL_C} - \frac{1}{2LL_{C1}} \right) \right]. \end{aligned}$$

Тобто, функція опору для паралельної схеми живлення при знаходженні навантаження між першою підстанцією та пунктом паралельного з'єднання підвісок матиме вигляд

$$\begin{aligned} f(x) = r_0 \left[x - x^2 \left(\frac{1}{L} + \frac{3}{4L_{C1}} - \frac{L_{C1}}{4L_C^2} - \frac{L_{C1}}{2LL_C} \right) - \right. \\ \left. - x^3 \left(\frac{1}{4L_C^2} - \frac{1}{4L_{C1}^2} + \frac{1}{2LL_C} - \frac{1}{2LL_{C1}} \right) \right]. \end{aligned}$$

При переміщенні навантаження за перший пункт паралельного з'єднання підвісок зміниться структура розподілу потужностей (рис. 2.7, б). Тому перепишемо баланс потужностей та структуру його складових, а саме

$$P = P_5 - \Delta P_5 + P_6 - \Delta P_6, \quad (2.13)$$

де

$$P_5 = P_1 - \Delta P_1 + P_3 - \Delta P_3 - P_7; \quad (2.14)$$

$$P_6 = P_2 - \Delta P_2 + P_4 - \Delta P_4 + P_7 - \Delta P_7. \quad (2.15)$$

Пам'ятаючи, що споживана електровозом потужність визначається як $P = U \cdot I$, визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_1^2; \quad P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2; \quad P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (x - L_{C1}) \cdot I_5^2; \quad \Delta P_6 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I_6^2; \quad \Delta P_7 = r_0 \cdot (L_C - L_{C1}) \cdot I_7^2;$$

$$P_7 = U_{C1} I_7; \quad U_{C1} = U_{\text{ш}} - I_1 \cdot r_0 \cdot L_{C1}.$$

В свою чергу,

$$I_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I; \quad I_3 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I; \quad I_2 = \frac{x}{2L} I; \quad I_4 = \frac{x}{2L} I;$$

$$I_7 = (I_1 + I_3) \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} - (I_2 + I_4) \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})};$$

$$I_5 = (I_1 + I_3) \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})}; \quad I_6 = (I_2 + I_4) \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})}.$$

Використовуючи (2.14), визначимо по-черзі складові рівняння (2.13), а саме

$$P_5 + P_6 = U_{\text{ш}} I_1 + U_{\text{ш}} I_3 - U_{C1} I_7 + U_{\text{ш}} I_2 + U_{\text{ш}} I_4 + U_{C1} I_7.$$

На підставі формул струморозподілу можна перетворити отримане рівняння наступним чином

$$P_5 + P_6 = U_{\text{ш}} I \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L} \right] = U_{\text{ш}} I.$$

$$\Delta P_5' + \Delta P_6' = \Delta P_1 + \Delta P_3 + \Delta P_5 + \Delta P_2 + \Delta P_4 + \Delta P_6 + \Delta P_7.$$

$$\begin{aligned}
\Delta P_5' + \Delta P_6' &= r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_1^2 + r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2 + r_0 \cdot (x - L_{C1}) \cdot I_5^2 + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2 + \\
&+ r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2 + r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I_6^2 + r_0 \cdot (L_C - L_{C1}) \cdot I_7^2. \\
\Delta P_5' + \Delta P_6' &= r_0 \cdot L_{C1} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I \right)^2 + r_0 \cdot L_{C1} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I \right)^2 + \\
&+ r_0 \cdot (x - L_{C1}) \times \left(\left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I \right) \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\
&+ r_0 \cdot (L - L_C) \cdot \left(\frac{x}{2L} I \right)^2 + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot \left(\frac{x}{2L} I \right)^2 + \\
&+ r_0 \cdot (L_C - x) \cdot \left(\left(\frac{x}{2L} I + \frac{x}{2L} I \right) \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\
&+ r_0 (L_C - L_{C1}) \left[\left(\frac{I}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{I}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right) \times \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} - \left(\frac{x}{2L} I + \frac{x}{2L} I \right) \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})} \right]^2. \\
\Delta P_5' + \Delta P_6' &= r_0 \cdot I^2 \left[L_{C1} \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right)^2 + (x - L_{C1}) \times \left(1 - \frac{x}{L} \right)^2 \left(\frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \right. \\
&+ 2(L - L_C) \cdot \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + (L_C - x) \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^2 \left(\frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\
&\left. + (L_C - L_{C1}) \left(\left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} - \frac{x}{L} \cdot \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 \right].
\end{aligned}$$

В результаті, остаточно отримаємо

$$f(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \frac{x^2}{2L} - \frac{x^2}{2L_{C1}}, & 0 \leq x \leq L_{C1}; \\ -\frac{x^2 - 2L_C x + L_C L_{C1}}{2L_C - 2L_{C1}} - \frac{L_C x^2 - L_{C1} x^2}{2L(L_C - L_{C1})}, & L_{C1} \leq x \leq L_C; \\ \frac{x^2 - 2L_{C2} x + L_C L_{C2}}{2L_C - 2L_{C2}} - \frac{L_C x^2 - L_{C2} x^2}{2L(L_C - L_{C2})}, & L_C \leq x \leq L_{C2}; \\ -\frac{(L - x) \cdot (LL_{C2} - 2Lx + L_{C2} x)}{2L(L - L_{C2})}, & L_{C2} \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2.16)$$

За результатами розрахунків паралельної схеми живлення для прийнятих умов отримані наступні сімейства струмів парних (рис. 2.8, *a*) та непарних фідерів (рис. 2.8, *б*). Подібним чином отримані залежності напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 2.9).

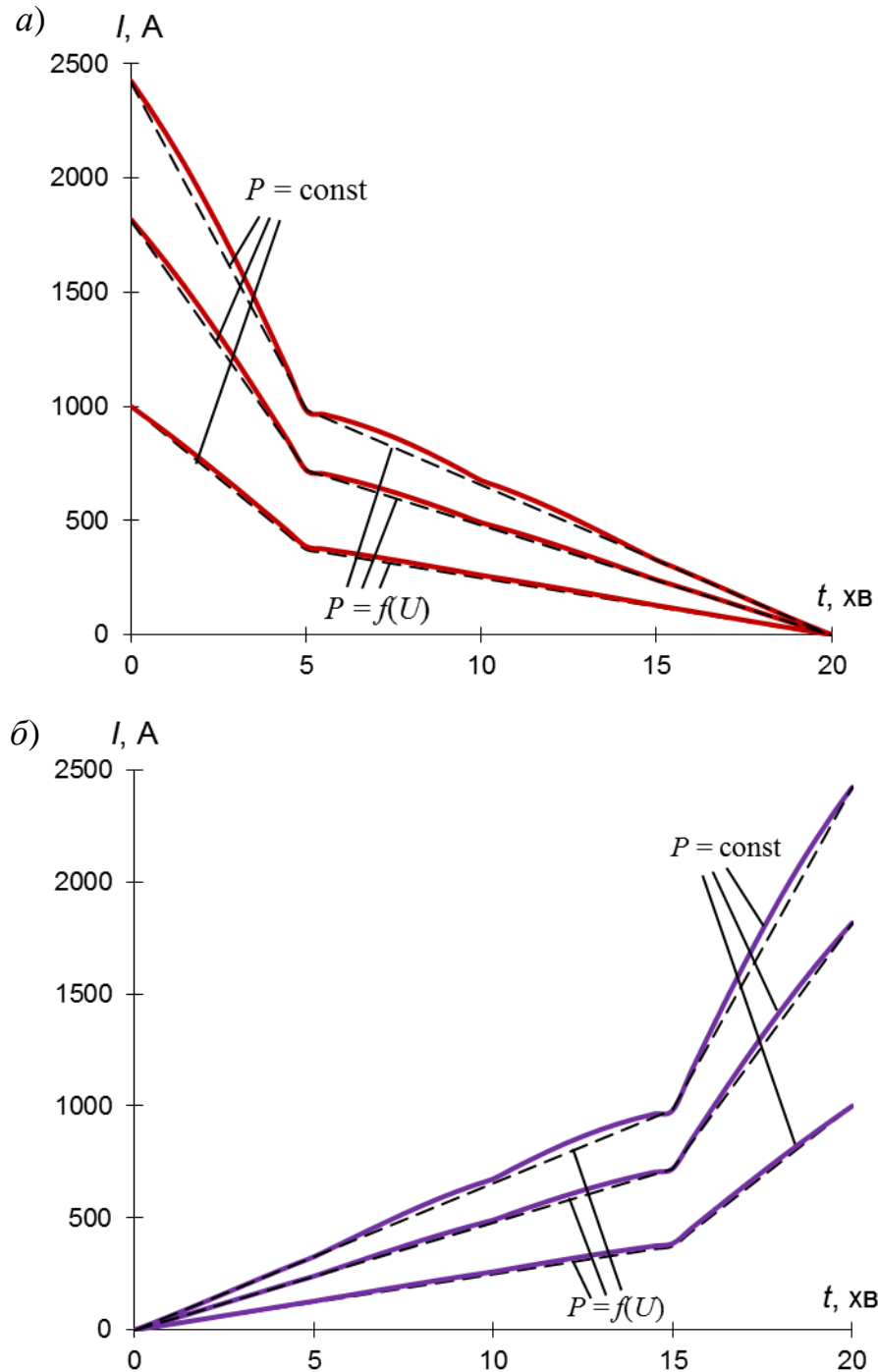


Рис. 2.8. Сімейства струмів попутних фідерів паралельної схеми живлення за двома методами розрахунку

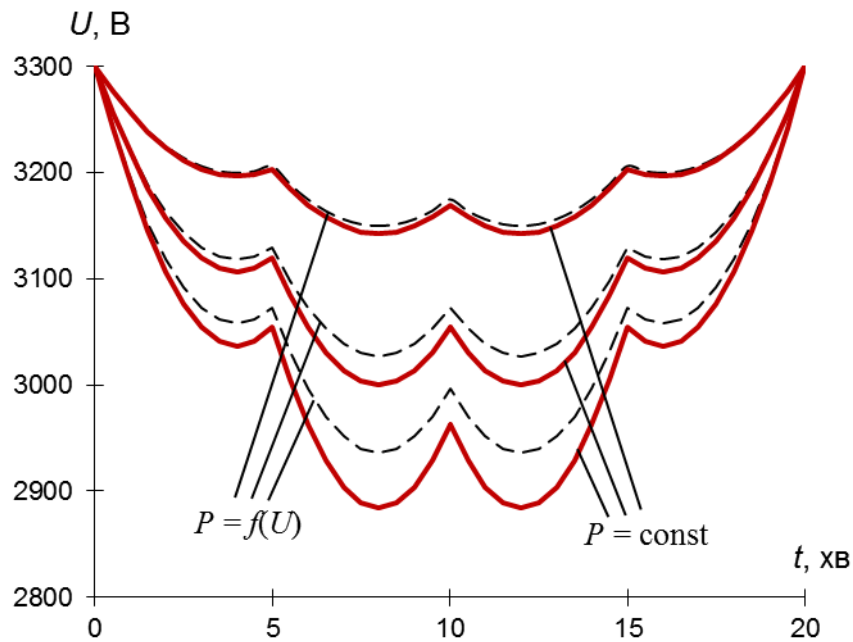


Рис. 2.9. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для паралельної схеми, визначені двома методами

Виконаємо перевірку відповідності балансу електричної енергії для прийнятих вихідних даних і потужності споживання електровозом на рівні 3,3 МВт. Для чого обчислимо фактичну потужність, спожиту електровозом, як добуток напруги на струмоприймачі та струму для кожної схеми живлення, а за отриманими формулами функцій опору $f(x)$ – втрати потужності в контактній мережі, як добуток квадрату струму електровозу на відповідно функцію опору, тобто

$$\Delta P = I^2 \cdot f(x). \quad (2.17)$$

Як видно з рис. 2.10, потужність електровозу для кожного моменту часу виходить постійною, а змінюються лише втрати в залежності від схеми живлення. При цьому, постійність потужності забезпечується збільшенням споживаного електровозом струму з врахуванням фактичного зниження напруги на струмоприймачеві. Таким чином, значення потужності 3,3 МВт за класичного підходу до розрахунку миттєвих схем відповідає випадку, коли напруга на струмоприймачеві підтримується за допомогою стороннього джерела потужності на рівні 3,3 кВ при споживанні струму в 1000 А.

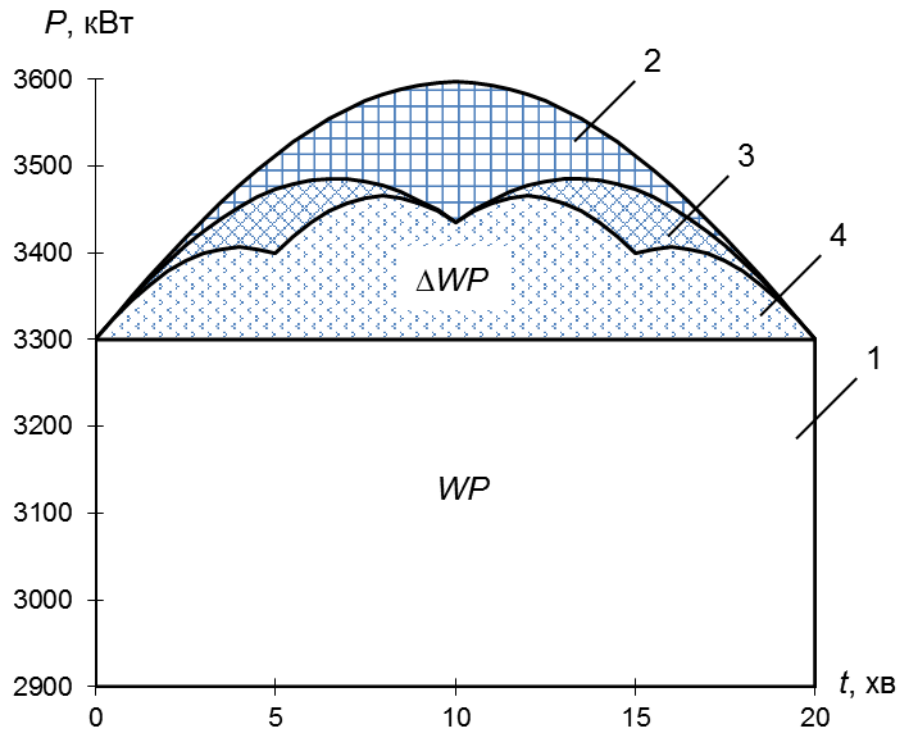


Рис. 2.10. Складові балансу електричної енергії при споживанні постійної потужності 3,3 МВт: 1 – споживання навантаженням; 2 – втрати для двосторонньої схеми живлення; 3 – те ж для вузлової; 4 – те ж для паралельної

Для зручності розрахунків розроблену методику можна розглядати як коригування струму електротягового навантаження в частині його збільшення на величину покриття втрат в системі електропостачання, які в загальному випадку залежать від багатьох факторів, а для прийнятих припущень, повторюють форму відомих залежностей втрат потужності для різних схем живлення (рис. 2.11). В свою чергу, характерні форми втрат потужностей для різних схем живлення при споживанні одного значення струму впливають з функціональних залежностей зміни опору системи тягового електропостачання відносно струмоприймача електрорухомого складу, які визначаються формулами (2.5), (2.10) та (2.16).

Таким чином, розроблена методику розрахунку миттєвих схем дозволяє визначити у будь-який момент часу для заданої схеми живлення струм електровозу, що відповідатиме споживанню необхідної потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачі електровозу.

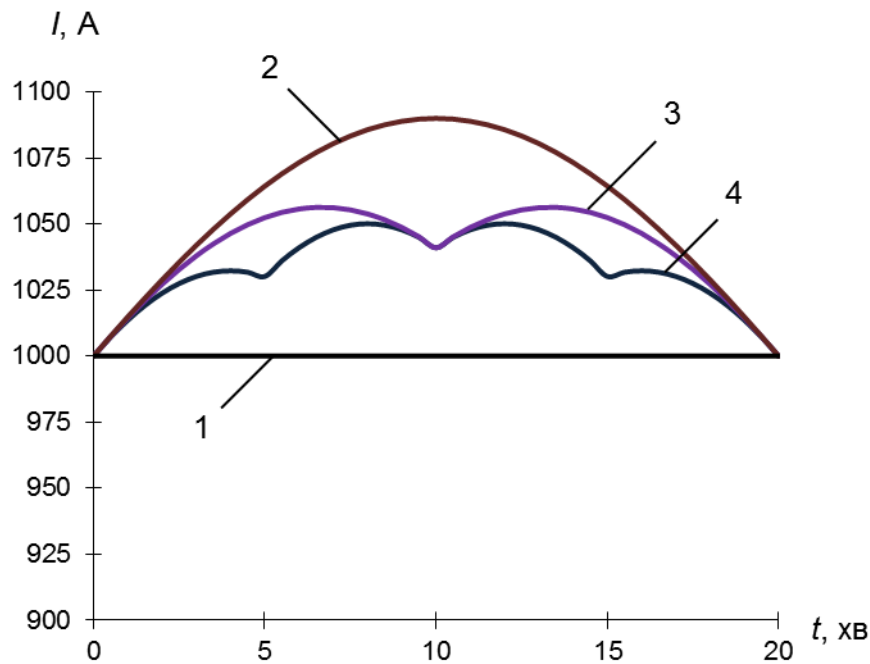


Рис. 2.11. Збільшення струму електровозу відносно базового значення при споживанні постійної потужності 3,3 МВт: 1 – базове значення струму; 2 – двостороння схема; 3 – вузлова схема; 4 – паралельна схема

2.4 Оцінка точності методу розрахунку

Виконаємо оцінку точності удосконаленого методу розрахунку, в якому тягове навантаження розглядається в якості джерела постійної потужності. Нехай для типової міжпідстанційної зони постійного струму потужність, що реалізується електрорухомим складом змінюватиметься від 0 до 10 МВт. В першому випадку для існуючого методу розрахунку миттєвих схем струм навантаження визначається в діапазоні потужностей згідно з номінальною напругою в контактній мережі 3,0 кВ. Для методу зі споживанням постійної потужності задається номінальна напруга на шинах тягових підстанцій величиною 3,3 кВ.

Таким чином, струм електровозу за першим методом визначається відношенням потужності до номінальної напруги в контактній мережі

$$I = \frac{P}{U_{\text{ном}}},$$

а за другим – за допомогою отриманої формули (2.7).

Порівняння методів розрахунку виконаємо шляхом співставлення мінімальних напруг, що в виникають в різних точках в залежності від схем живлення. Похибку оцінимо відношенням різниці розрахованих напруг до напруги за другим методом, тобто

$$\delta_U = \frac{|U_1 - U_2|}{U_2} \cdot 100 \% .$$

Результати розрахунку похибки визначення напруги приведені на рис. 2.12, з якого видно, в діапазоні потужностей до 8 МВт похибка визначення напруги не перевищує 5 %. Для потужностей електрорухомого складу більше 8 МВт і двосторонньої схеми живлення похибка перевищує 5 %.

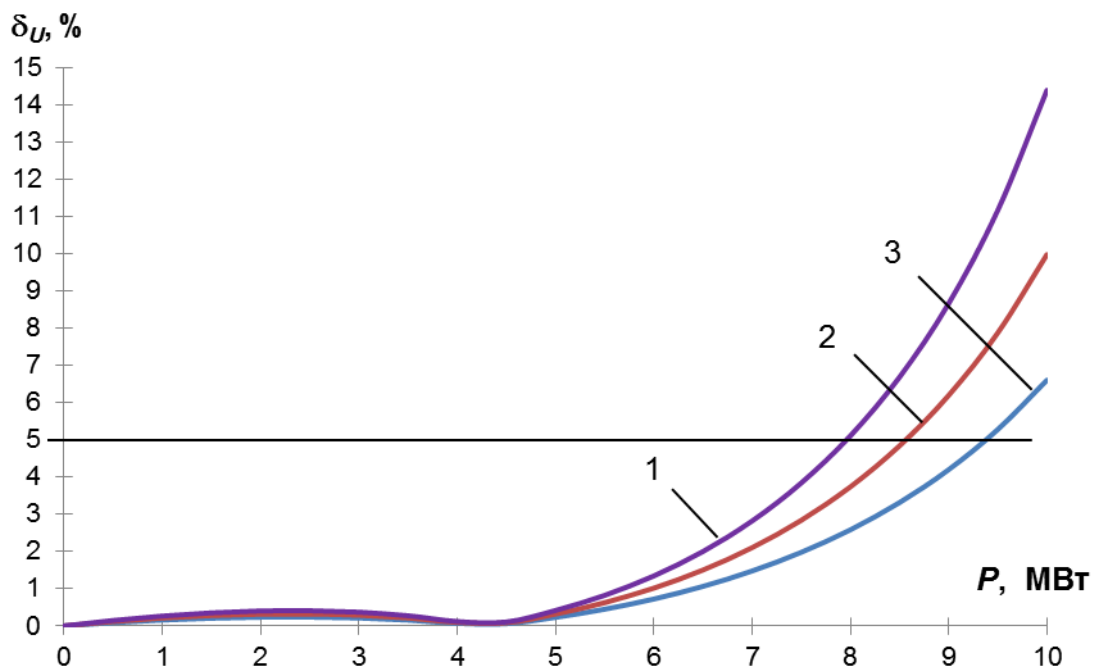


Рис. 2.12. Похибка розрахунку напруги для схем живлення:

1 – двостороння; 2 – вузлова; 3 – паралельна

Точність визначення напруги на лімітуючий блок-ділянці має велике значення стосовно визначення пропускної спроможності та врахуванні обмежень, що вносяться пристроями тягового електропостачання. Так, визначене мінімальне значення напруги на рівні 2800 В за класичним методом у випадку споживання постійної потужності, наприклад, 8 МВт матиме фактичне значення 2660 В, що не відповідатиме діючим вимогам.

2.5. Електричний розрахунок систем тягового електропостачання в просторово-часових координатах

З проведеного в першому розділі аналізу слідує, що найбільш узагальнюючим є отримання результатів в просторово-часових координатах, без яких неможливе виконання оптимізаційних розрахунків системи тягового електропостачання в аналітичному виді. Саме просторово-часове уявлення всіх електричних величин, які необхідні для розрахунків систем тягового електропостачання, дозволить побудувати інтелектуальні системи керування режимами систем тягового електропостачання з метою зниження втрат електроенергії та підвищення енергоефективності.

Просторово-часова модель системи тягового електропостачання ґрунтується на аналітичному описі основних електричних процесів функціями двох змінних, взаємозв'язок між якими визначається графіком руху поїздів $x_{\Gamma}(n, t)$ (рис. 2.12), що визначає графікову координату кожного окремого поїзду з номер n у будь-який момент часу t . Використовуючи інші вихідні у вигляді профілю потужності електровозу, параметрів системи зовнішнього та тягового електропостачання визначаються кусочно-задані функції двох змінних, які являють собою залежності розподілу струмів та втрат напруги в контактній мережі у часі та просторі.

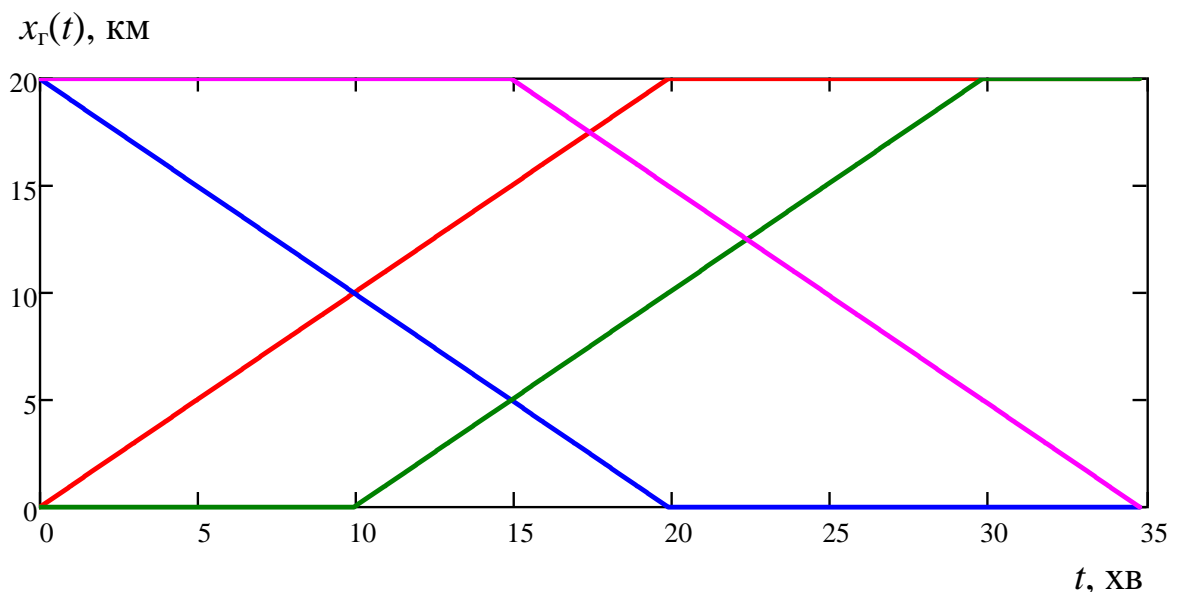


Рис. 2.12. Приклад розрахункового графіку руху поїздів

Для можливості аналітичного розрахунку миттєвих схем використаємо метод функцій струморозподілу, який полягає у визначенні значень функції струморозподілу $\varphi(x)$ в кожній точці з координатою x тягової мережі, значення якої в свою чергу показує частку струму електровозу I_e , що споживається фідером контактної мережі I_f тягової підстанції

$$\varphi_x = \frac{I_f}{I_e}. \quad (2.18)$$

Іншими словами, помноживши значення функції струморозподілу в координаті місцезнаходження електровозу на струм, що споживає електровоз, отримуємо струм фідера тягової підстанції. При знаходженні декількох електровозів на фідерній зоні можна застосувати метод суперпозиції, оскільки отримані результати будуть використані лише в лінійній частині системи тягового електропостачання, а в інших – в якості першого наближення при знаходженні точки режиму роботи.

Отримання значень функцій струморозподілу для класичних схем живлення (консольна, двостороння, вузлова, повного паралельного з'єднання, петлева) значних труднощів не викликає. Струм фідера без врахування вирівнювального струму, в такому випадку, визначається як добуток відповідної функції струморозподілу на струм поїзду в поточній координаті x . Для двосторонньої схеми матимемо

$$I_{\Phi 1}(x) = I \frac{L-x}{L}; \quad I_{\Phi 2}(x) = I \frac{x}{L}.$$

де L – довжина ділянки, км.

Вузлова схема живлення характеризується струморозподілом

$$I_{\Phi 1}(x) = I \times \begin{cases} 1 - \frac{L+l_C}{2Ll_C}x, & 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_C \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 2}(x) = I \times \begin{cases} \frac{L-l_C}{2Ll_C}x, & 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L}\right), & l_C \leq x \leq L; \end{cases}$$

$$I_{\Phi 3}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, 0 \leq x \leq l_C; \\ 1 - \frac{(2L - l_C)(L - x)}{2L(L - l_C)}, \\ l_C \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 4}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, 0 \leq x \leq l_C; \\ \frac{l_C(L - x)}{2L(L - l_C)}, l_C \leq x \leq L; \end{cases}$$

де l_C – розташування поста секціонування, починаючи від першої підстанції, км.

Струми фідерів паралельної схеми живлення визначаються

$$I_{\Phi 1}(x) = I \times \begin{cases} 1 - \frac{L + l_{\Pi 1}}{2Ll_{\Pi 1}}x, \\ 0 \leq x \leq l_{\Pi 1}; \\ \frac{1}{2}\left(1 - \frac{x}{L}\right), \\ l_{\Pi 1} \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 2}(x) = I \times \begin{cases} \frac{L - l_{\Pi 1}}{2Ll_{\Pi 1}}x, \\ 0 \leq x \leq l_{\Pi 1}; \\ \frac{1}{2}\left(1 - \frac{x}{L}\right), \\ l_{\Pi 1} \leq x \leq L; \end{cases}$$

$$I_{\Phi 3}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, 0 \leq x \leq l_{\Pi 2}; \\ 1 - \frac{(2L - l_{\Pi 2})(L - x)}{2L(L - l_{\Pi 2})}, \\ l_{\Pi 2} \leq x \leq L; \end{cases} \quad I_{\Phi 4}(x) = I \times \begin{cases} \frac{x}{2L}, 0 \leq x \leq l_{\Pi 2}; \\ \frac{l_{\Pi 2}(L - x)}{2L(L - l_{\Pi 2})}, \\ l_{\Pi 2} \leq x \leq L; \end{cases}$$

де $l_{\Pi 1}, l_{\Pi 2}$ – координати пунктів паралельного з'єднання підвісок, починаючи від першої підстанції, км.

Струми фідерів у часі (рис. 2.16) визначаються суперпозицією окремих часток від кожного поїзду відповідно до графіку руху з врахуванням вирівнювального струму. Для скорочення в подальшому приводяться викладки для непарного фідера першої підстанції та для парного наступної, тобто

$$I_{\Phi 1}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_1(x_{\Gamma}(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_2(x_{\Gamma}(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) + I_{\text{вир}}(t);$$

...

(2.19)

$$I_{\Phi 4}(t) = \sum_{i=1}^{n_1} \varphi_4(x_{\Gamma}(2i-1, t)) I_{\Pi}(2i-1, t) + \sum_{i=1}^{n_2} \varphi_3(x_{\Gamma}(2i, t)) I_{\Pi}(2i, t) - I_{\text{вир}}(t),$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ – функції струморозподілу відповідно до номеру фідера першої (1, 2) та наступної (3, 4) тягової підстанції;

$I_{\Pi}(n, t)$ – функція результатів тягових розрахунків для поїзду з номером n у момент часу t ;

$2i-1, 2i$ – визначають номери напарного та парного поїзду;

n_1, n_2 – кількість поїздів відповідно на першій та другій колії.

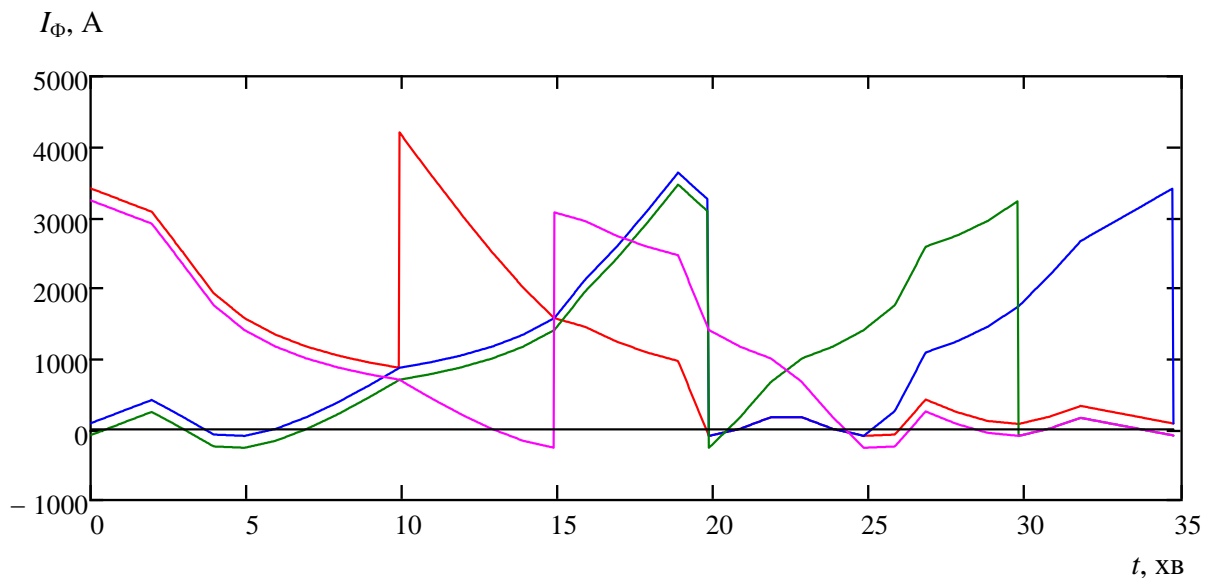


Рис. 2.16. Результати розрахунку струмів фідерів

За допомогою отриманих струмів фідерів та графіку руху поїздів визначається функція розподілу струмів в контактній мережі. Для цього спочатку визначається струморозподіл у заданій схемі живлення від одного навантаження, наприклад для першої колії вузлової схеми живлення

$$I_{K1}(n,t,x) = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), x \in [0; x_{\Gamma}(n,t)]; \\ -[I_{\Phi 2}(n,t) + I_{\Phi 3}(n,t) + I_{\Phi 4}(n,t)], x \in (x_{\Gamma}(n,t); l_C]; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n,t) \in [0; l_C]; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), x \in [0; l_C]; \\ I_{\Phi 1}(n,t) + I_{\Phi 2}(n,t) + I_{\Phi 4}(n,t), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n,t)]; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x \in (x_{\Gamma}(n,t); L]; \\ x_{\Gamma}(n,t) \in (l_C; L]; \\ n = 2i - 1; \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), x \in [0; l_C]; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x \in (l_C; L]; \\ n = 2i. \end{array} \right. \end{array} \right. , \quad (2.20)$$

Тут $I_{\Phi 1}(n,t)..I_{\Phi 4}(n,t)$ – струм кожного фідера (1.4) від поїзда з номером n у момент часу t .

Далі за допомогою принципу суперпозиції визначається розподіл струмів в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням вирівнювальних струмів. Наприклад, для контактної мережі першої колії

$$I_{K1}(t,x) = \sum_{i=1}^{n_1} I_{K1}(2i-1,t,x) + \sum_{i=1}^{n_2} I_{K1}(2i,t,x) + I_{\text{вир}}(t). \quad (2.21)$$

На рис. 2.17-2.18 приведені графічні інтерпретації отриманої функції $I_{K1}(t,x)$ для фіксованого моменту часу та для конкретної координати відповідно.

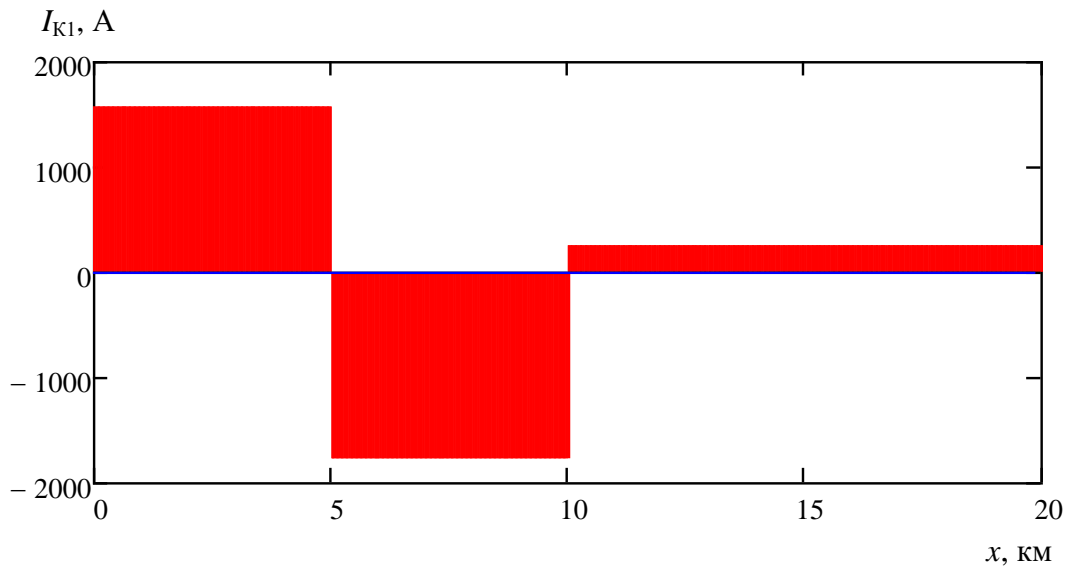


Рис. 2.17. Розподіл струмів в контактній мережі в момент часу $t = 5$ хв

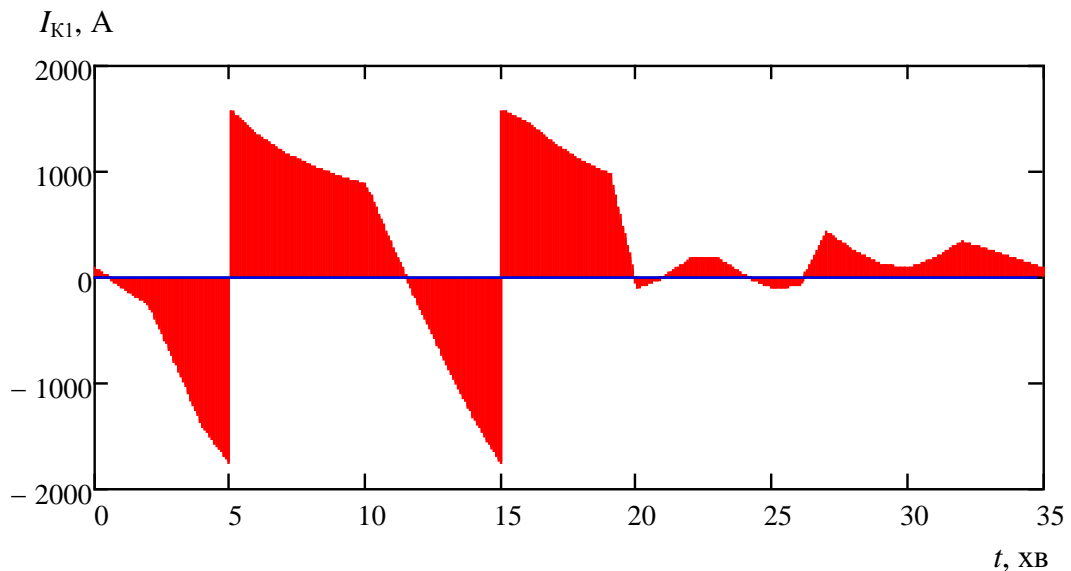


Рис. 2.18. Часова залежність струму в контактній мережі
для координати $x = 5$ км

Визначення функції розподілу втрат напруги передбачає використання функції розподілу струмів в контактній мережі з накопичуючим домноженням на відповідну відстань та питомий опір мережі. При накопиченні використовується рекурсивний підхід, тобто визначення розподілу втрат напруги наступного інтервалу використовує втрату напруги попереднього. Формалізований запис функції розподілу втрат напруги в контактній мережі першої колії матиме вигляд

$$\begin{aligned}
& \Delta U_{K1}(n,t,x) = \\
& = r_0 \times \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n,t,x) \cdot x, x \in [0; x_{\Gamma}(n,t)]; \\ \Delta U_{K1}(n,t, x_{\Gamma}(n,t)) + I_{K1}(n,t,x)(x - x_{\Gamma}(n,t)), x \in (x_{\Gamma}(n,t); l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n,t, l_C) + I_{K1}(n,t,x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \\ x_{\Gamma}(n,t) \in [0; l_C]; \end{array} \right. , \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n,t,x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n,t, l_C) + I_{K1}(n,t,x)(x - l_C), x \in (l_C; x_{\Gamma}(n,t)]; \\ \Delta U_{K1}(n,t, x_{\Gamma}(n,t)) + I_{K1}(n,t,x)(x - x_{\Gamma}(n,t)), x \in (x_{\Gamma}(n,t); L]; \\ x_{\Gamma}(n,t) \in (l_C; L]; \end{array} \right. , \\ n = 2i - 1; \\ \left\{ \begin{array}{l} I_{K1}(n,t,x) \cdot x, x \in [0; l_C]; \\ \Delta U_{K1}(n,t, l_C) + I_{K1}(n,t,x)(x - l_C), x \in (l_C; L]; \end{array} \right. , \\ n = 2i. \end{array} \right.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

За аналогією з функцією розподілу струмів в контактній мережі визначається розподіл втрат напруги в контактній мережі від усіх поїздів та з врахуванням впливу вирівнювальних струмів, а саме

$$\Delta U_{K1}(t,x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{K1}(2i-1,t,x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{K1}(2i,t,x) + I_{\text{вир}}(t) \cdot r_0 \cdot x. \tag{2.23}$$

Графічний вигляд функції $\Delta U_{K1}(t,x)$ приведений на рис. 2.19-2.20 також для фіксованого моменту часу та певної координати.

Добуток за модулем просторово-часових функцій розподілу втрат напруги та струмів в контактній мережі визначає розподіл втрат потужності

$$\Delta P_K(t,x) = |I_{K1}(t,x) \cdot \Delta U_{K1}(t,x)| + |I_{K2}(t,x) \cdot \Delta U_{K2}(t,x)|. \tag{2.24}$$

Інтегрування функції розподілу втрат потужності за координатою простору визначає миттєве значення втрат потужностей в системі електропостачання, а за координатою часу – розподіл втрат електроенергії уздовж розрахункової ділянки.

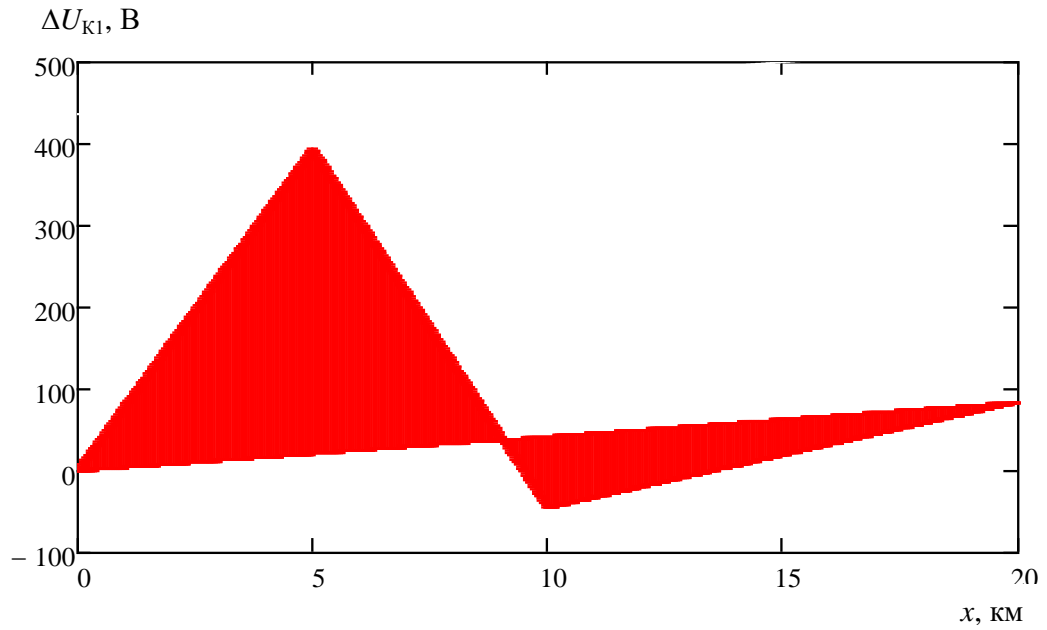


Рис. 2.19. Розподіл втрат напруги в контактній мережі в момент часу $t = 5$ хв

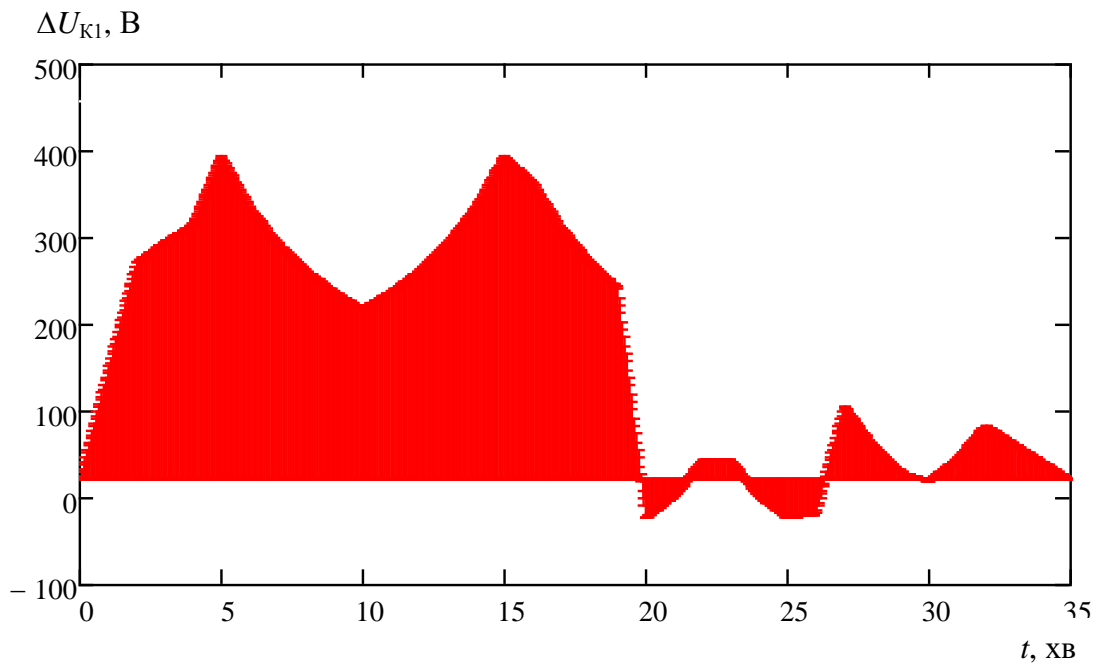


Рис. 2.20. Часова залежність втрати напруги в контактній мережі
для координати $x = 5$ км

Подвійне інтегрування функції розподілу втрат потужності визначає втрати електроенергії на розрахунковий ділянці за період розрахунку.

$$\Delta P_K(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx; \quad \Delta P_K(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_K(t, x) dt; \quad (2.25)$$

$$\Delta W = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx dt. \quad (2.26)$$

Втрати потужності та електроенергії в графічній інтерпретації приведені на рис. 2.21.

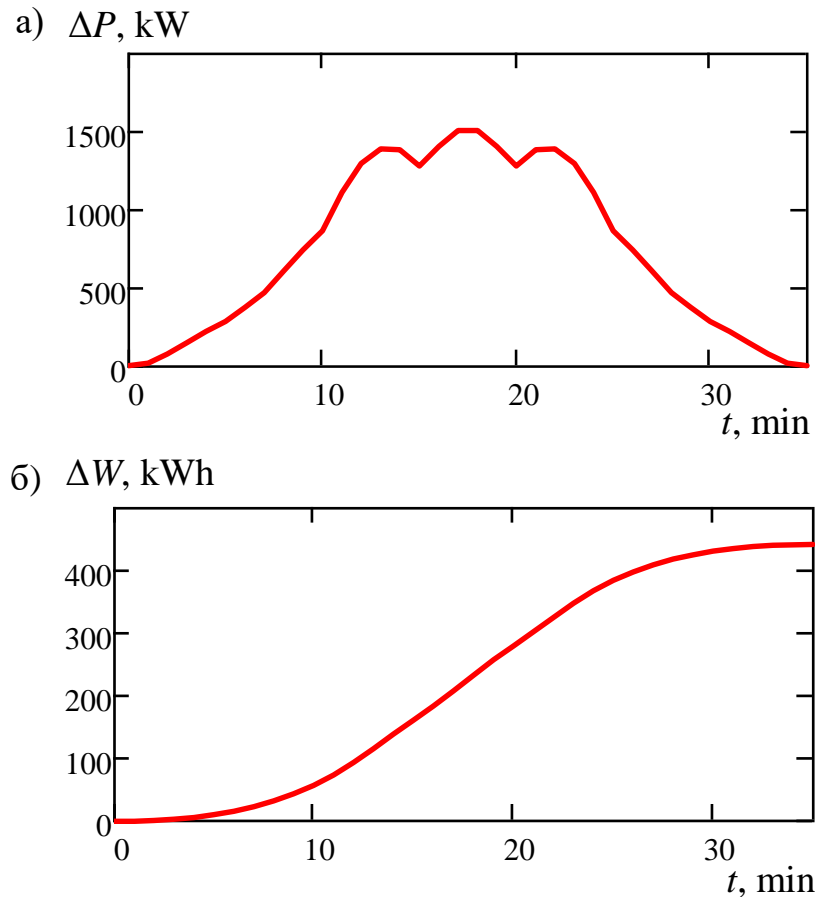


Рис. 2.21. Часові залежності втрат потужності (а) та втрат електроенергії (б)

Всі приведені розрахункові величини можуть бути представлені також у вигляді тривимірних просторів стану досліджуваної системи. Так на рис. 2.22 – 2.24 показані двопараметричні залежності розподілу струмів, втрат напруги та втрат потужності в контактній мережі.

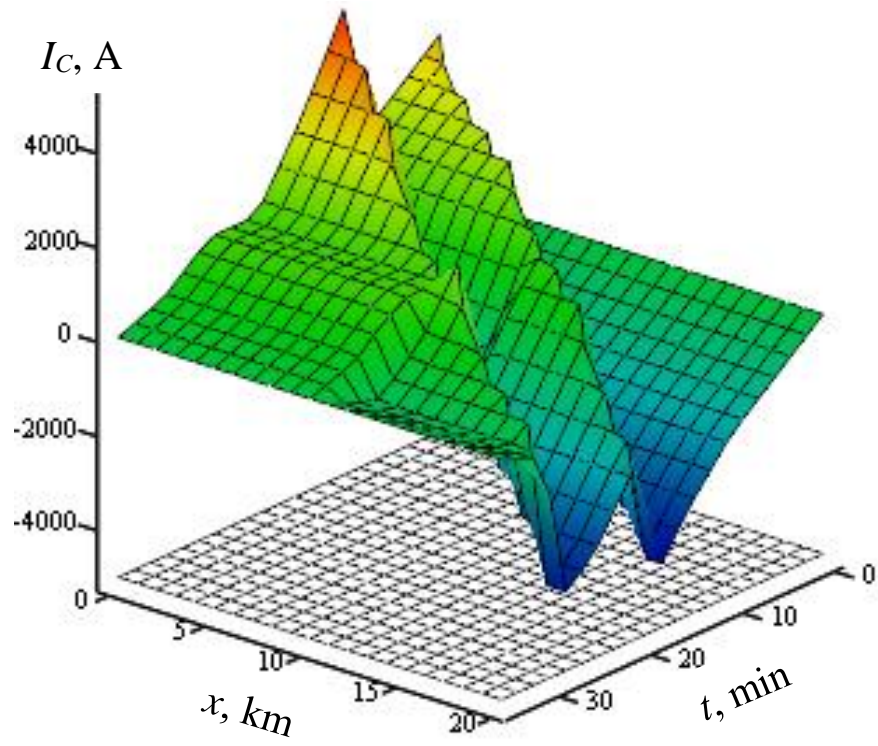


Рис. 2.22. Тривимірна функція розподілу струмів в контактній мережі

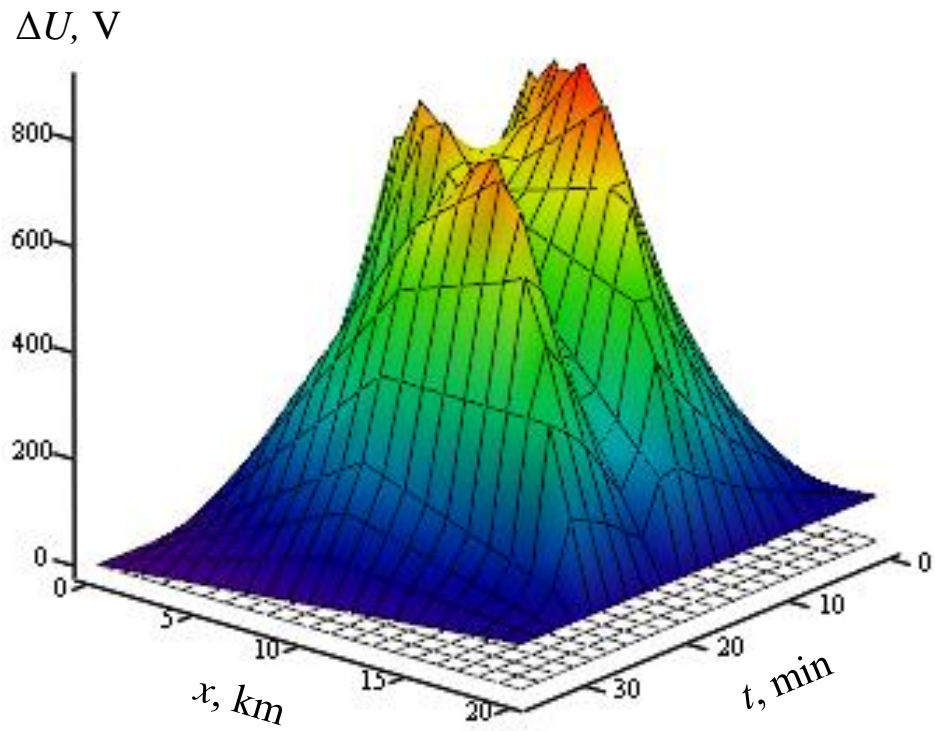


Рис. 2.23. Тривимірна функція розподілу втрат напруги в контактній мережі

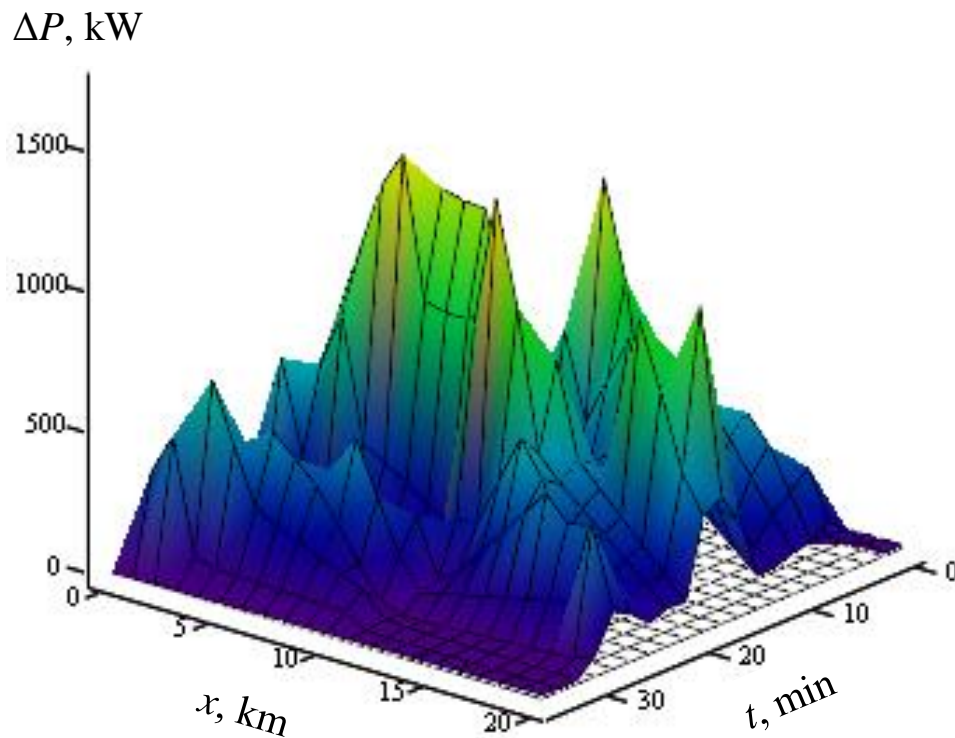


Рис. 2.24. Тривимірний розподіл втрат потужності в контактній мережі

Приведені математичні викладки реалізовані у вигляді алгоритму в середовищі MathCAD (додаток А) та в окремому програмному продукті *iSET*, написаному в середовищі Delphi (розділ 7).

Програма передбачає три режими роботи:

- 1) загальний розрахунок системи тягового електропостачання;
- 2) параметричної оптимізації;
- 3) оптимізації керуванням.

Функціонування програмного продукту базується на узагальненій структурі просторово-часової моделі системи тягового електропостачання (рис. 2.25). Результати розрахунків отримуються у вигляді графіків струмів фідерів тягових підстанцій, напруги на струмоприймачах електровозів та втрат потужності в тяговій мережі, епюр струму, втрат напруги та потужності в тяговій мережі.

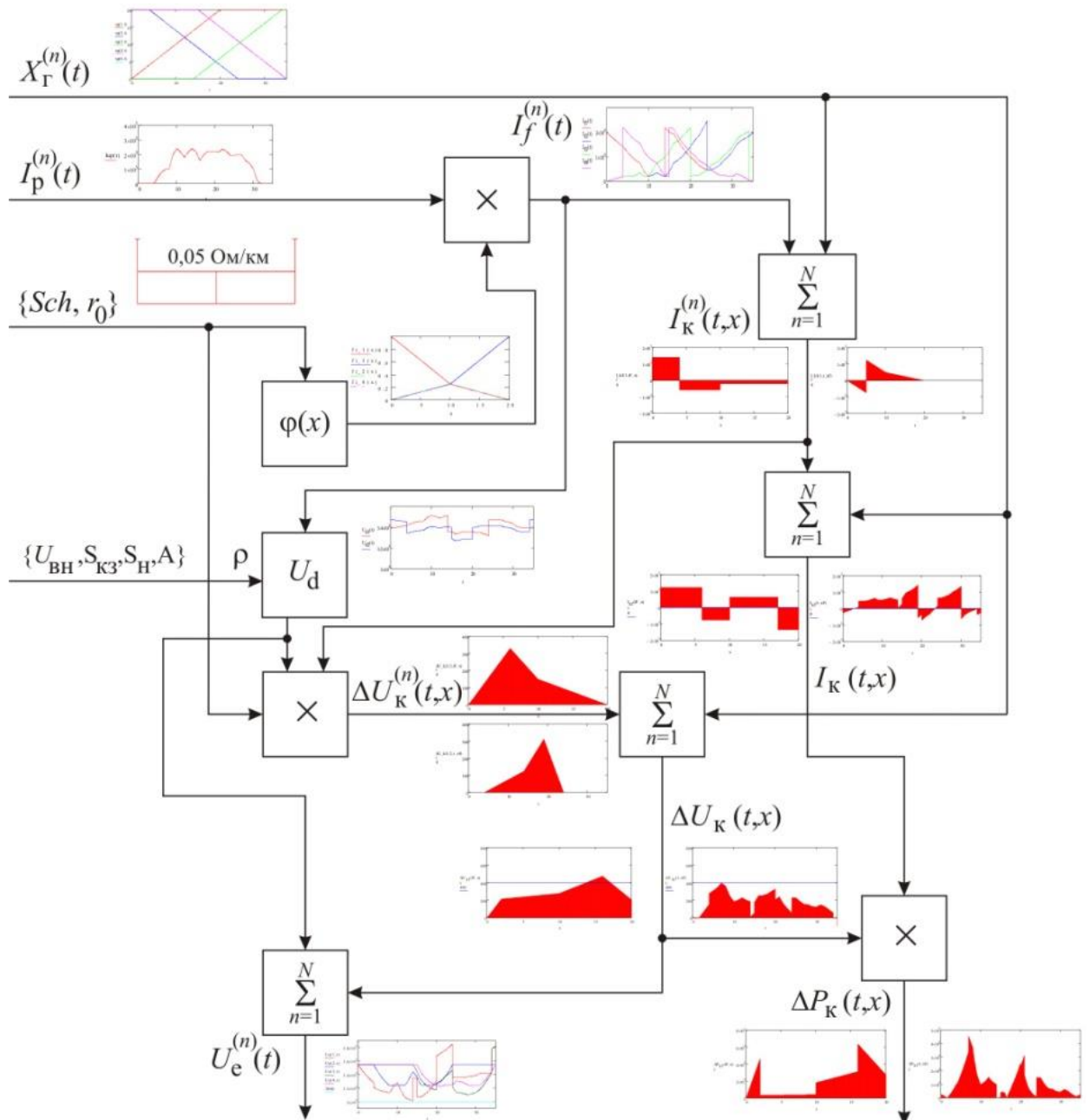


Рис. 2.25. Узагальнена структура просторово-часової моделі

2.6. Узагальнення розроблених методик

Загальновідомо, що напруга на струмоприймачі електровозу в найпростішому випадку буде дорівнювати напрузі на шинах тягової підстанції за умови його розташування поблизу підстанції, та буде знижуватись параболічною функцією. Для подальшого спрощення в узагальненні прийнемо, що тягове навантаження рухається з постійною швидкістю, з постійним споживаним струмом прямолінійною ділянкою електрифікованої залізниці.

В такому випадку, закон зміни приведенного відносно рухомого навантаження опору, що було раніше позначено як $f(x)$, визначатиме функціональну залежність зміни напруги на струмоприймачі.

Для двосторонньої роздільної схеми живлення (рис. 2.26, усі вузли розірвано) функціональний закон зміни опору дійсно буде параболічним, а саме

$$f(x) = \frac{r_0 x \cdot r_0 (L-x)}{r_0 x + r_0 (L-x)} = r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2.27)$$

где r_0 – опір 1 км тягової мережі, Ом/км;

L – довжина міжпідстанційної зони, км;

x – координата розташування навантаження, км.

Як видно, зі співставлення формул (2.5) та (2.27), отримано абсолютно аналогічні результати, що додатково підтверджує правильність виконаних перетворень.

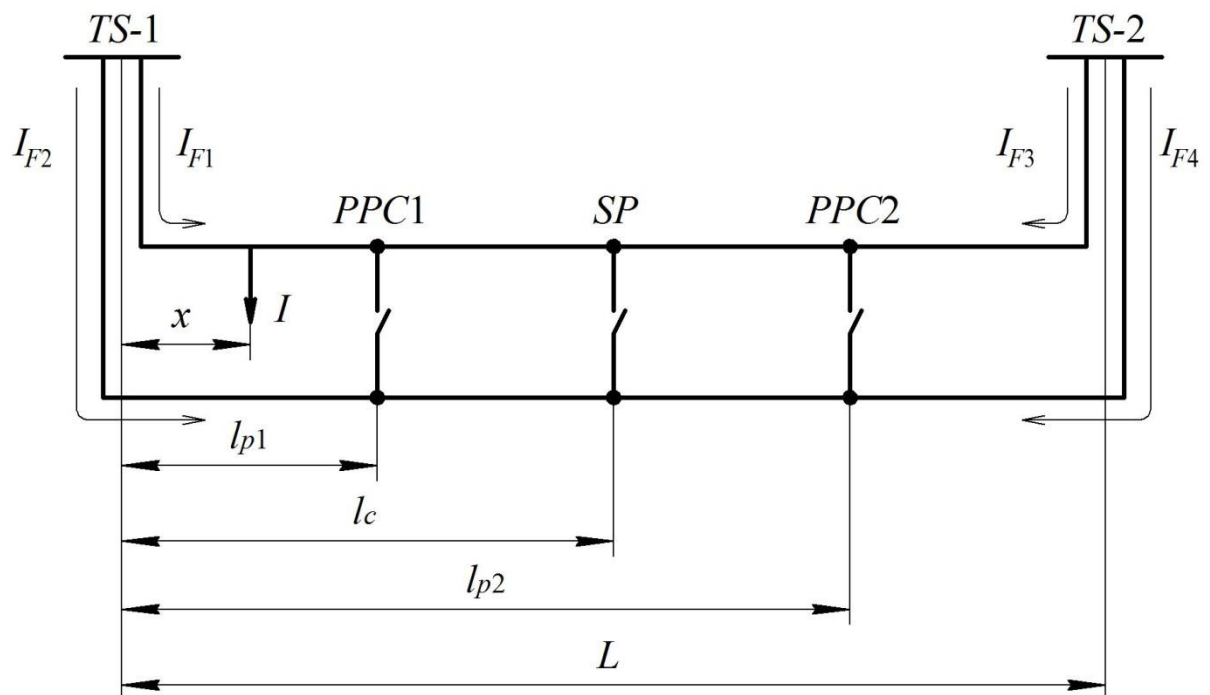


Рис. 2.26. Узагальнена розрахункова схема міжпідстанційної зони

Функції опорів для інших схем будуть визначатись:

- формулою (2.10) для вузлової схеми (рис. 2.26, включено тільки ПСК);
- формулою (2.16) для паралельної схеми (рис. 2.26, включено усі вузли).

Графічно отримані функції опорів являють собою складні кусочно-задані параболічні залежності (рис. 2.27), які за допомогою корекції вихідних даних можуть бути адаптовані до будь-яких реальних умов. Зокрема, до розрахунку несиметричних схем живлення, у яких відстані між вузлами паралельного з'єднання підвісок неоднакові.

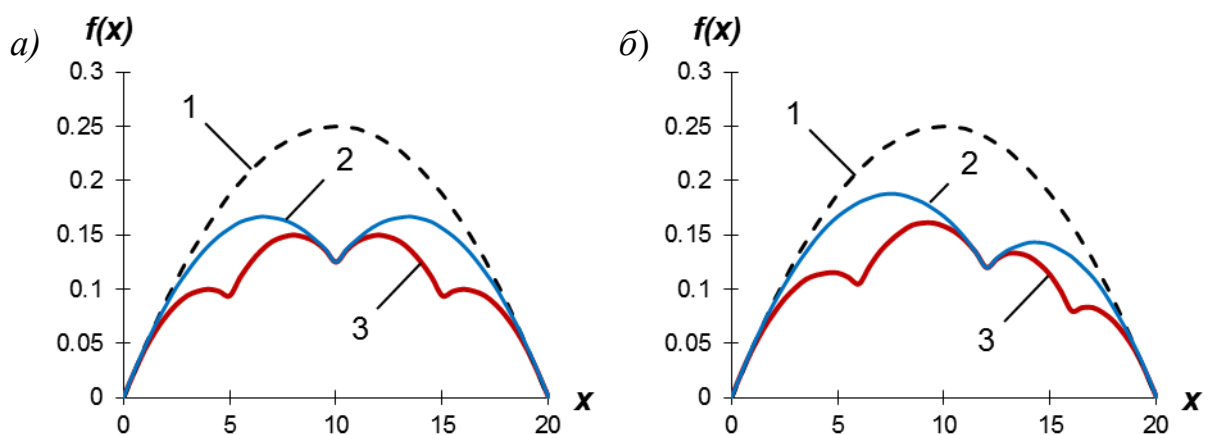


Рис. 2.27. Графічне уявлення функцій опору для симетричних (а) та несиметричних (б) схем живлення: 1 – двостороння; 2 – вузлова; 3 – паралельна

В теорії розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання відоме застосування функцій струморозподілу, яке було описане вище. Фізичний смисл цих функцій полягає у вираженні часток струму фідера відносно струму навантаження в залежності від його розташування. Загально прийнято застосовувати цей підхід до розрахунку лише вузлової схеми живлення, проте можливо розповсюдити його й на інші схеми.

Нижче дослідимо аналітичні вирази для узагальненої схеми (рис. 2.26). Двостороння схема з роздільним живленням колій матиме наступні функції для кожного фідера

$$\varphi_1(x) = 1 - \frac{x}{L}; \quad \varphi_2(x) = 0; \quad \varphi_3(x) = \frac{x}{L}; \quad \varphi_4(x) = 0.$$

Графічно ці функції виглядають як показано на рис. 2.28.

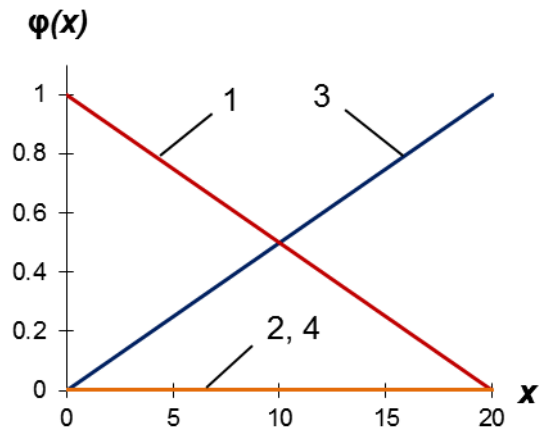


Рис. 2.28. Функції струморозподілу для фідерів тягових підстанцій двосторонньої схеми

Для схеми вузлового живлення справедливі наступні функції

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{L+l_c}{2Ll_c} \cdot x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_c < x \leq L; \end{cases} \quad \varphi_2(x) = \begin{cases} \frac{L-l_c}{2Ll_c} \cdot x, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_c < x \leq L; \end{cases}$$

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ 1 - \frac{(2L-l_c)(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c < x \leq L; \end{cases} \quad \varphi_4(x) = \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_c; \\ \frac{l_c(L-x)}{2L(L-l_c)}, & l_c < x \leq L. \end{cases}$$

Графічна інтерпретація приведена на рис. 2.29, з якого також видно можливість їх застосування для несиметричних схем живлення тягової мережі.

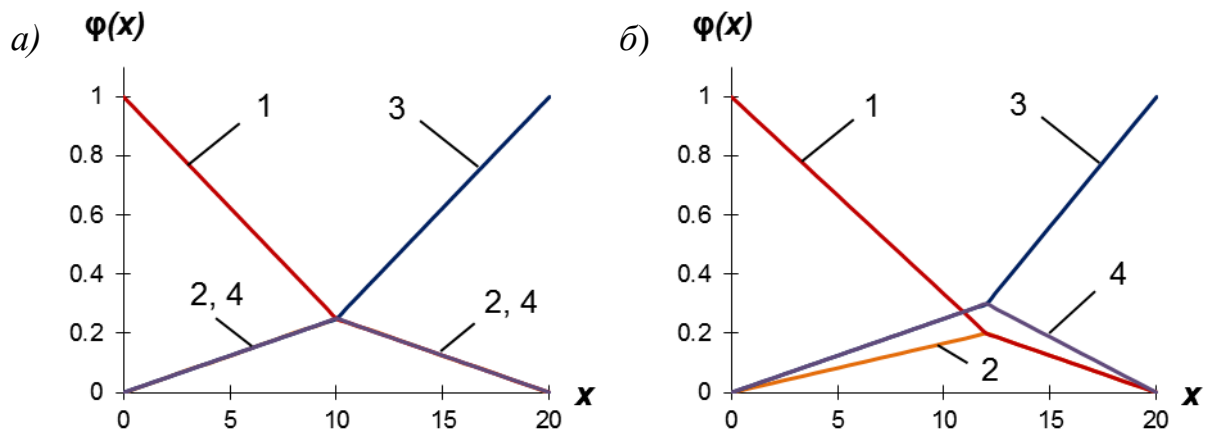


Рис. 2.29. Функції струморозподілу для фідерів вузлової схеми:
а – схема симетрична; б – схема несиметрична

І, нарешті, схема повного паралельного з'єднання підвісок описуватиметься наступними функціями. Аналітичні вирази для паралельної схеми отримуються шляхом заміни координати поста секціонування на координати пунктів паралельного з'єднання підвісок. Примітним для цієї схеми є те, що наявність середнього вузла з'єднання і його розташування не впливає на розподіл струмів між фідерами тягових підстанцій. Середній вузол впливатиме на розподіл струмів всередині самої схеми живлення і, відповідно, на розподіл втрат напруги.

$$\varphi_1(x) = \begin{cases} 1 - \frac{L + l_{p1}}{2Ll_{p1}} \cdot x, & 0 \leq x \leq l_{p1}; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_{p1} < x \leq L; \end{cases} \quad \varphi_2(x) = \begin{cases} \frac{L - l_{p1}}{2Ll_{p1}} \cdot x, & 0 \leq x \leq l_{p1}; \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right), & l_{p1} < x \leq L; \end{cases}$$

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_{p2}; \\ 1 - \frac{(2L - l_{p2})(L - x)}{2L(L - l_{p2})}, & l_{p2} < x \leq L; \end{cases} \quad \varphi_4(x) = \begin{cases} \frac{x}{2L}, & 0 \leq x \leq l_{p2}; \\ \frac{l_{p2}(L - x)}{2L(L - l_{p2})}, & l_{p2} < x \leq L. \end{cases}$$

Графічні залежності, що пояснюють розподіл струмів між фідерами паралельної схеми живлення, приведені на рис. 2.30. Як і в попередньому випадку показано характерні зміни при застосуванні несиметричних схем.

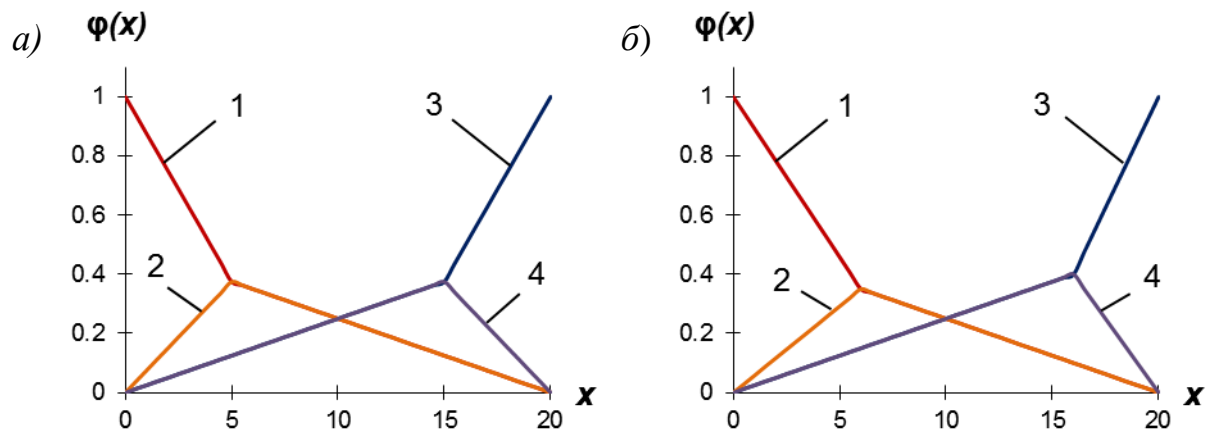


Рис. 2.30. Функції струморозподілу для симетричної (а) і несиметричної (б) паралельної схеми живлення

Описані вище підходи застосування аналітичних функцій до розрахунку миттєвих схем не в повній мірі відтворюють узагальнений процес електропостачання тягових навантажень, оскільки не формалізують визначення напруги в розрахунковій схемі. Для повноти теорії розрахунку необхідно увести поняття функцій опорів фідерів. Фізично ця функція являє собою опір, на якому створюється спад напруги до будь-якої точки розрахункової схеми від струму даного фідера. Таким чином, у загальному випадку матимемо

$$f_F(x) = \frac{\Delta U^{(F)}(x)}{I_F(x)}, \quad (2.28)$$

де $\Delta U^{(F)}(x)$ – спад напруги від шин тягової підстанції до координати x , викликаний струмом даного фідера.

У випадку, якщо на ділянці протікатиме лише один струм розглядуваного фідера, функція опору фідера може бути вираженою в окремому випадку через загальну функцію опору і функцію струморозподілу, а саме

$$f_{Fi}(x) = \frac{f(x)}{\varphi_i(x)}. \quad (2.29)$$

Графічні інтерпретації функцій опору фідерів приведені на рис. 2.31-2.33, з виокремленням також і для несиметричних схем живлення. Як видно з приведених графіків, функції опорів фідерів є кусочно-лінійними та можуть бути виражені аналітично, враховуючи особливості реальних схем живлення.

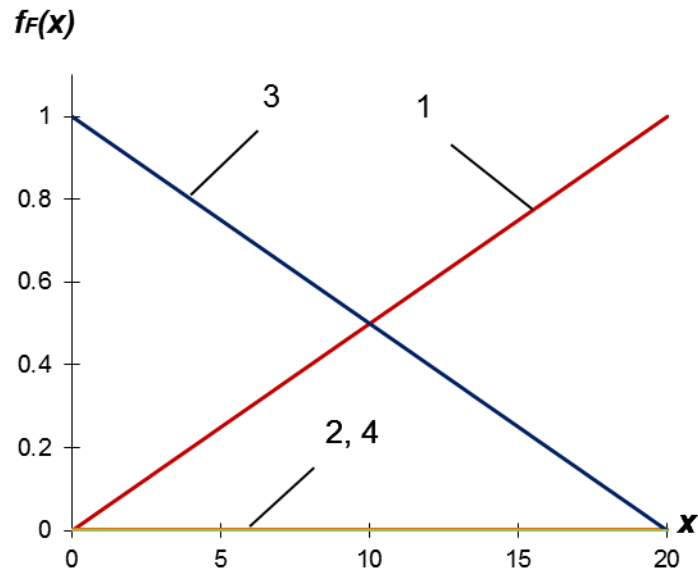


Рис. 2.31. Функції опору фідерів двосторонньої схеми живлення

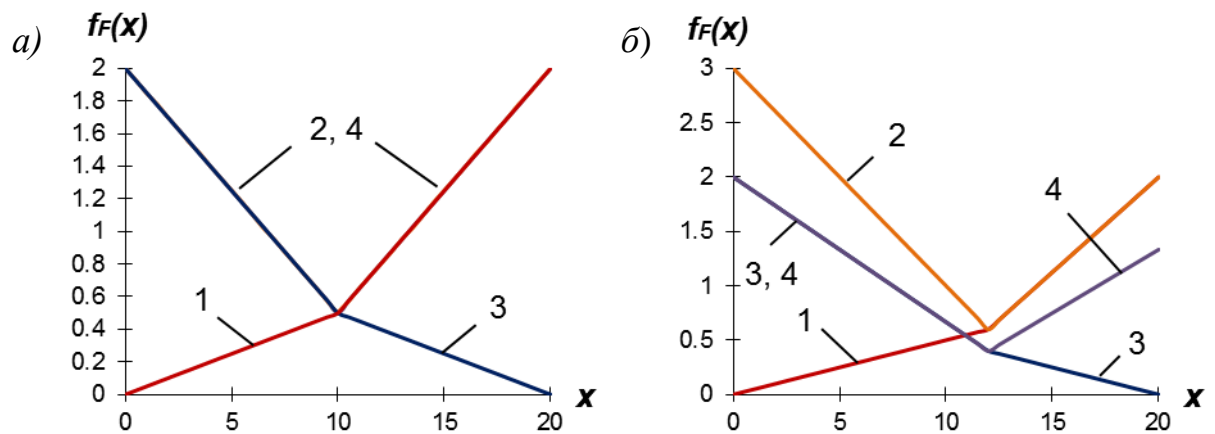


Рис. 2.32. Функції опору фідерів симетричної (а) та несиметричної (б) вузлової схеми живлення

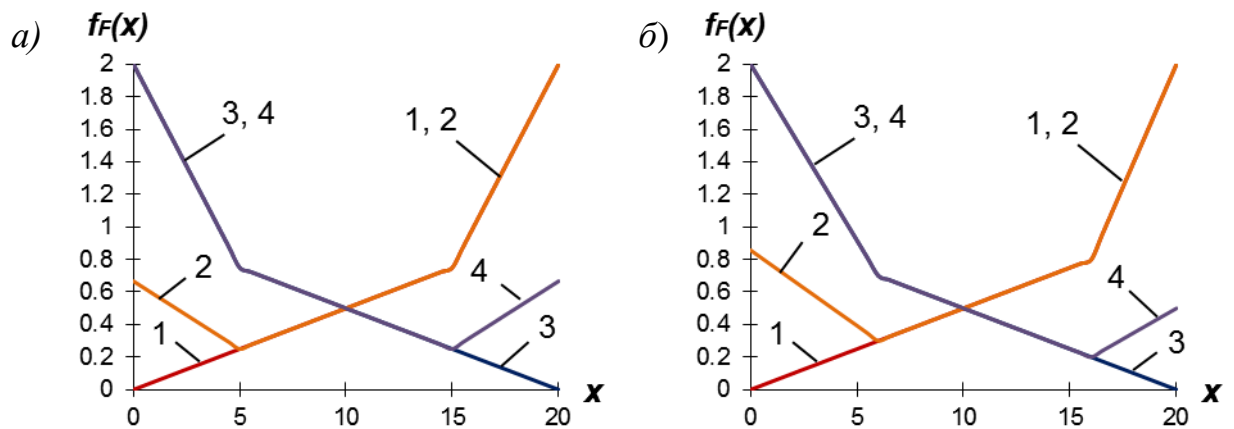


Рис. 2.33. Функції опору фідерів симетричної (а) та несиметричної (б) паралельної схеми живлення

Основними величинами, які вимагаються в якості результатів розрахунку систем тягового електропостачання, є струми фідерів тягових підстанцій, втрати потужності в системі електропостачання і рівень напруги на струмоприймачах електровозів.

Приведемо основні співвідношення, які дозволять отримати чисельний розрахунок вказаних величин, на підставі розробленого методу розрахунку. Для спрощення викладок не будемо враховувати внутрішній опір тягових підстанцій, оскільки його характеристики не змінюються в часі і просторі, і розрахунки типових пристроїв електроенергетики значних складнощів не викликають.

Струми фідерів тягових підстанцій при русі навантаження однією колією визначаються шляхом добутку струму тягового навантаження на відповідну функцію струморозподілу, що впливає з її визначення, тобто

$$I_{Fi}(x) = I(x) \cdot \varphi_i(x).$$

Для декількох навантажень на міжпідстанційній зоні застосовується суперпозиція складових струмів фідерів від кожного навантаження, а саме

$$I_{Fi}(x) = \sum_{j=1}^n I_j(x) \cdot \varphi_{i_j}(x), \quad (2.30)$$

де j – номер навантаження в межах міжпідстанційної зони;

n – кількість навантажень у схемі живлення.

Напруга на струмоприймачі електровозу може бути визначена через загальну функцію опору

$$U(x) = U_{III} - I(x) \cdot f(x).$$

Вищенаведена формула справедлива для одного навантаження. При наявності декількох навантажень необхідно врахувати взаємний їх вплив на попутній та, в залежності від схеми живлення, на суміжній колії. В загальному випадку, матимемо

$$U_j(x) = U_{III} - I_j(x) \cdot f(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (2.31)$$

де U_{III} – напруга на шинах тягової підстанції, В;

k – номер навантаження на даній колії;

$\Delta U'_k(x, x_k)$ – функція розподілу спаду напруги від k -го навантаження на попутній колії, В;

$\Delta U''_k(x, x_k)$ – те ж на суміжній колії, В.

Функція розподілу спаду напруги достатньо легко формалізується за допомогою функції опору фідера. Наприклад, для вузлової схеми живлення при русі навантаження першою колією справедливі співвідношення

$$\Delta U'_k(x, x_k) = \begin{cases} I_{F1}(x_k) \cdot f_{F1}(x), & 0 \leq x \leq x_k; \\ I_{F3}(x_k) \cdot f_{F3}(x), & x_k < x \leq L; \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\Delta U''_k(x, x_k) = \begin{cases} I_{F2}(x_k) \cdot f_{F1}(x), & 0 \leq x \leq l_c; \\ I_{F4}(x_k) \cdot f_{F3}(x), & l_c < x \leq L. \end{cases} \quad (2.33)$$

На рис. 2.34 приведені графічні інтерпретації функцій, що описуються рівняннями (2.32)-(2.33), які являють собою кусочно-лінійні залежності. При зміні розташування тягового навантаження максимальна точка цих функцій описуватиме траєкторію, що визначається функцією опору даної схеми живлення (рис. 2.34, штрихова лінія).

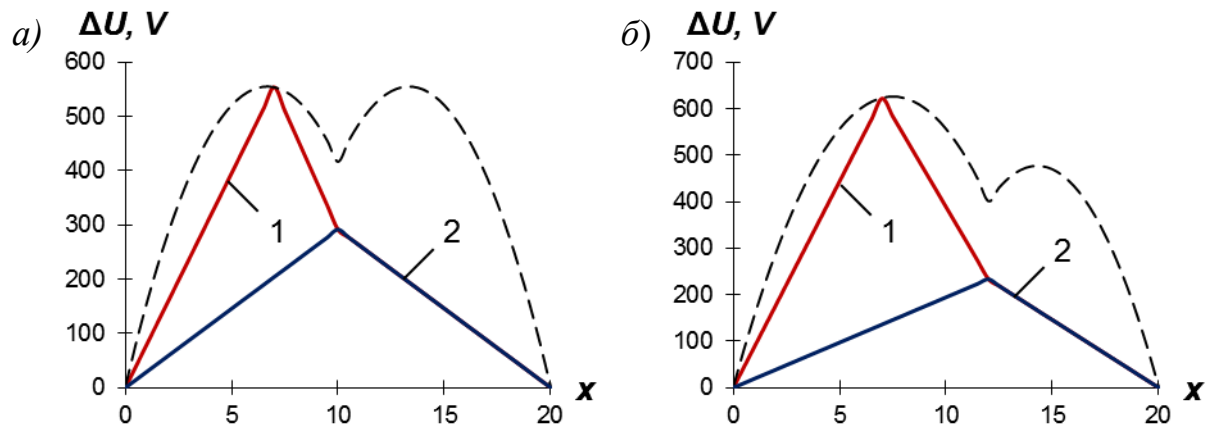


Рис. 2.34. Функції розподілу спаду напруги для симетричної (а) та несиметричної (б) вузлової схеми живлення:
1 – на попутній колії; 2 – на суміжній колії

Втрати потужності в тяговій мережі за допомогою представлених методів можна визначити двома способами. Використовуючи струми фідерів та функції опору фідерів можна визначити втрати потужності за складовими, а саме

$$\Delta P(x) = \sum_{i=1}^{N_F} I_{F_i}^2(x) \cdot f_{F_i}(x), \quad (2.34)$$

де N_F – кількість фідерів, для розглядуваної схеми $N_F = 4$.

Формула (2.34) буде корисна, якщо необхідно розділити загальні втрати потужності в мережі між тяговими підстанціями або фідерами. Аналогічний результат, тільки загалом, може бути отриманий і загальною формулою, що використовує струм навантаження і загальну функцію опору, тобто

$$\Delta P(x) = I^2(x) \cdot f(x). \quad (2.35)$$

Графічні інтерпретації функціональних залежностей, що отримані в результаті розрахунків за формулами (2.34), (2.35) приведені на рис. 2.35 на прикладі симетричної та несиметричної вузлової схеми живлення.

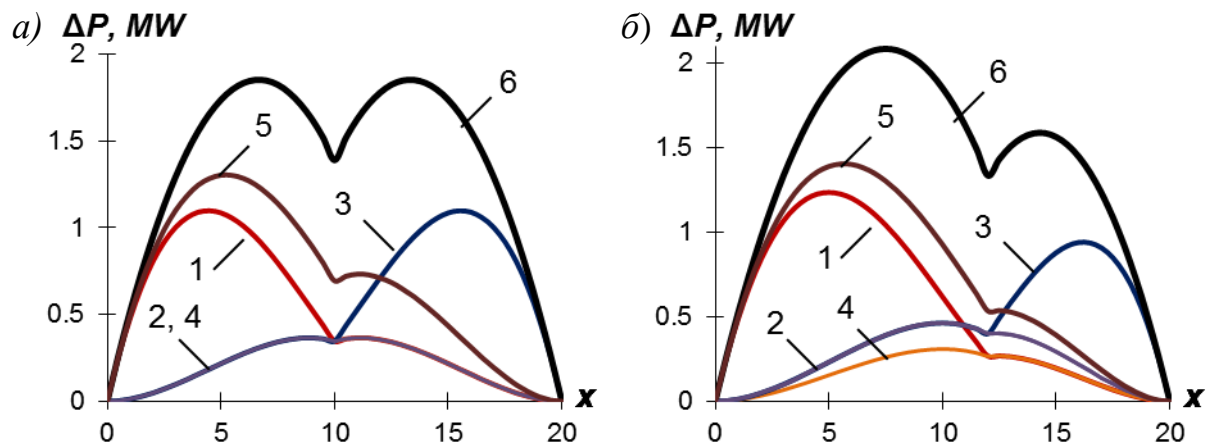


Рис. 2.35. Розподіл втрат потужності для симетричної (а) та несиметричної (б) вузлової схеми живлення: 1-4 – складові, що відповідають фідерам тягових підстанцій; 5 – втрати, що припадають на одну підстанцію; 6 – загальні втрати в тяговій мережі

Отримані співвідношення, що приведені вище, в цілому стосуються системи тягового електропостачання постійного струму. Проте, використовуючи комплексну форму уявлення електричних величин, можна замінити геометричні операції над векторами алгебраїчними операціями над комплексними числами, в результаті чого до системи змінного струму можуть бути застосовані всі отримані формули. Окрім застосування комплексних величин, слід також врахувати наявність взаємоіндукції між колями електрифікованих ділянок змінного струму, які виражатимуться у впливі опору взаємної індукції на розподіл струмів і напруг уздовж ділянки. При цьому для врахування явища взаємоіндукції можна використовувати відомі методи, наприклад, метод багатополісників при розрахунку впливів багатопровідних тягових мереж змінного струму [260].

2.7. Особливості розрахунку розподілених систем тягового електропостачання

Розглянутий вище метод розрахунку на основі функцій струморозподілу з використанням запропонованих загальних функцій опору

та функцій опору фідерів дозволяє формалізувати розрахунок миттєвих схем для відомих схем живлення однієї міжпідстанційної зони.

Розглянемо особливості визначення функцій струморозподілу для декількох міжпідстанційних зон. Теоретичні викладки в загальному випадку виконаємо для електрифікованої ділянки, де довжина кожної міжпідстанційної зони складає L з кількістю підстанцій N . Розрахункова схема такої ділянки приведена на рис. 2.39, при цьому як і раніше розташування навантаження враховується змінною x . Методика розрахунку передбачає побудову схеми заміщення з врахуванням опорів основних ланок (рис. 2.40).

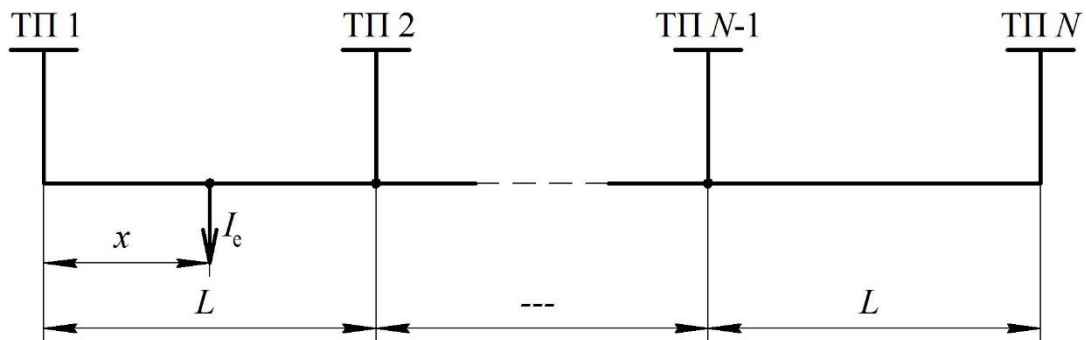


Рис. 2.39. Розрахункова схема ділянки

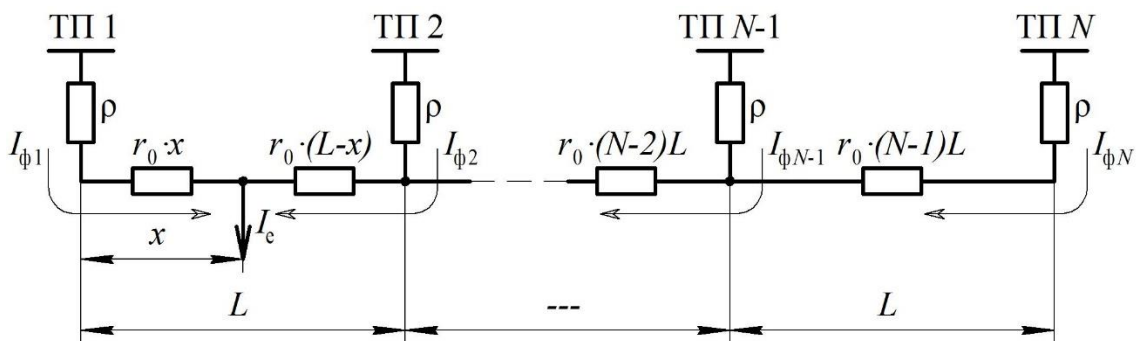


Рис. 2.40. Схема заміщення розрахункової ділянки

Струми фідерів тягових підстанцій відносно координати місцезнаходження навантаження x можна визначити відношенням спаду напруги на загальному опорі системи до опору ділянки, якою проходить струм фідера кожної підстанції, а саме

$$I_{\Phi i} = \frac{\Delta U}{R_{\Phi i}}, \quad (2.36)$$

де ΔU – спад напруги на загальному опорі системи, В;

$R_{\Phi i}$ – опір ланки еквівалентної схеми заміщення (рис. 2.41), Ом, в загальному виді може бути представлений як

$$R_{\Phi i} = \rho + r_0 \cdot x,$$

де ρ – еквівалентний внутрішній опір тягової підстанції, Ом;

r_0 – питомий опір тягової мережі, Ом/км.

Стосовно до прийнятої схеми заміщення розрахункової ділянки, опір кожної ланки може бути виражений універсальною формулою

$$R_{\Phi i}(x) = \begin{cases} \rho + r_0 \cdot ((i-1)L - x), & 0 \leq x \leq (i-1)L; \\ \rho + r_0 \cdot (x - (i-1)L), & (i-1)L \leq x \leq (N-1)L. \end{cases} \quad (2.37)$$

У формулі (2.36) спад напруги можна визначити як

$$\Delta U = I_e \cdot R_{\Sigma}, \quad (2.38)$$

де I_e – струм, що споживається навантаженням, А;

R_{Σ} – сумарний опір еквівалентної схеми заміщення (загальний опір системи) (рис. 2.41), Ом.

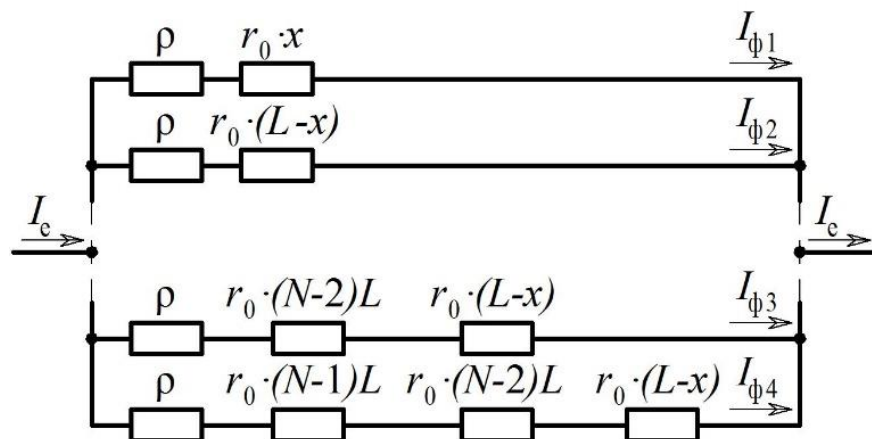


Рис. 2.41. Еквівалентна схема заміщення

Сумарний опір схеми визначимо загальновідомою формулою паралельного з'єднання опорів

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{\phi 1}} + \frac{1}{R_{\phi 2}} + \dots + \frac{1}{R_{\phi(N-1)}} + \frac{1}{R_{\phi N}},$$

де $R_{\phi 1} \dots R_{\phi N}$ – сумарний опір кожної ланки схеми, Ом.

За визначенням функція струморозподілу визначається відношенням струму фідера до струму навантаження. Підставивши замість струму фідера вираз (2.36) і, замінюючи ΔU виразом (2.38), отримаємо

$$\varphi_i = \frac{I_{\phi i}}{I_e}; \quad \varphi_i = \frac{\frac{\Delta U}{R_{\phi i}}}{I_e}; \quad \varphi_i = \frac{I_e \cdot R_{\Sigma}}{R_i}. \quad (2.39)$$

Після підстановки виразу, що визначає R_{Σ} , та скорочень, отримаємо шуканий вираз для функцій струморозподілу кожного фідера

$$\varphi_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^N \frac{R_i}{R_j}}, \quad \text{або} \quad \varphi_i = \frac{1}{R_i \sum_{j=1}^N \frac{1}{R_j}}. \quad (2.40)$$

В якості прикладів розрахунку за даною методикою на рис. 2.42-2.47 показані функції струморозподілу, струми фідерів тягових підстанцій, напруга на струмоприймачеві електровозу та втрати потужності в тяговій мережі для ділянки з 5-ма тяговими підстанціями.

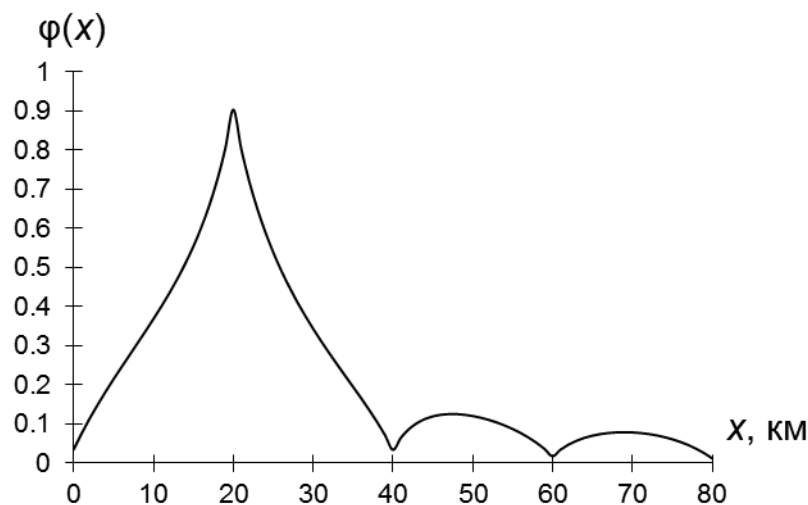


Рис. 2.42 Функція струморозподілу фідера другої тягової підстанції

Для спрощень на графічних ілюстраціях прийнято, що всі підстанції є однотипними, мають однаковий внутрішній опір та однаковий рівень напруги. Крім цього, тип контактної мережі всією ділянкою і відстані між суміжними підстанціями також приймаються однаковими. Прийняті припущення не є догматичними і використані з метою забезпечення наочності сприйняття отриманих результатів. Розрахунки виконані для двох варіантів – випадку, коли тягове навантаження визначається значенням струму, і для випадку стабілізації електрорухомим складом споживаної потужності.

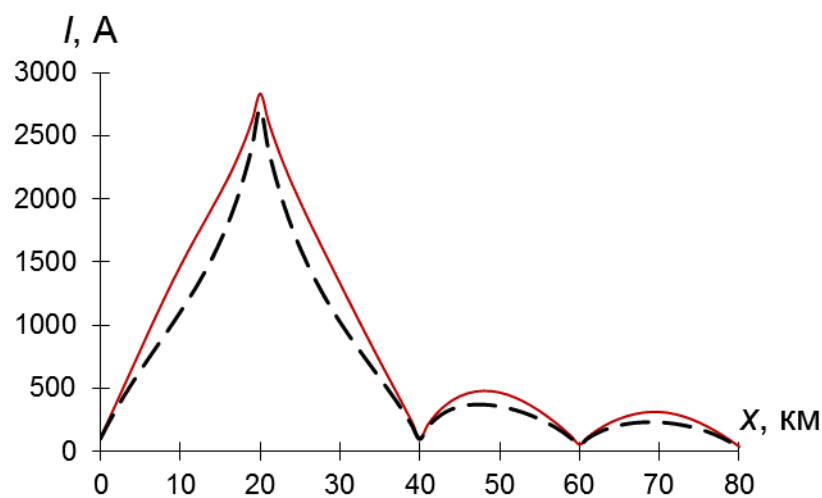


Рис. 2.43. Струм фідера другої тягової підстанції для випадку стабілізації потужності (суцільна) та без неї (пунктирна)

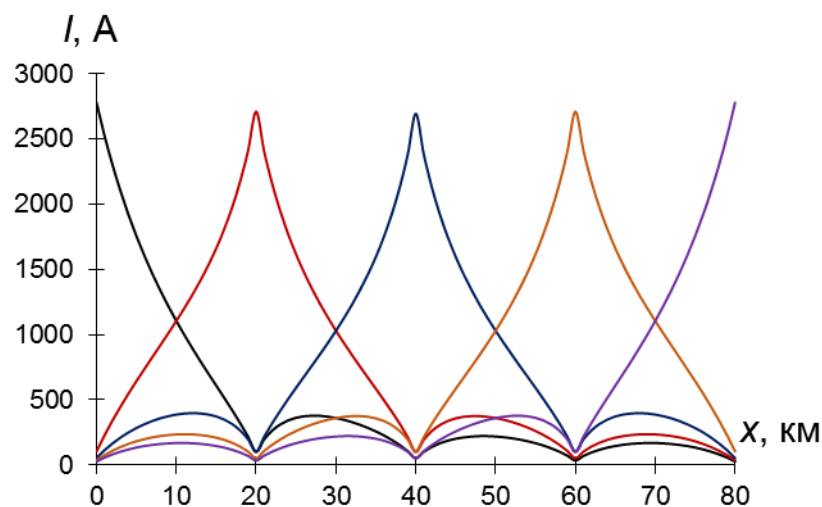


Рис. 2.44. Струми фідерів усіх тягових підстанцій без стабілізації потужності

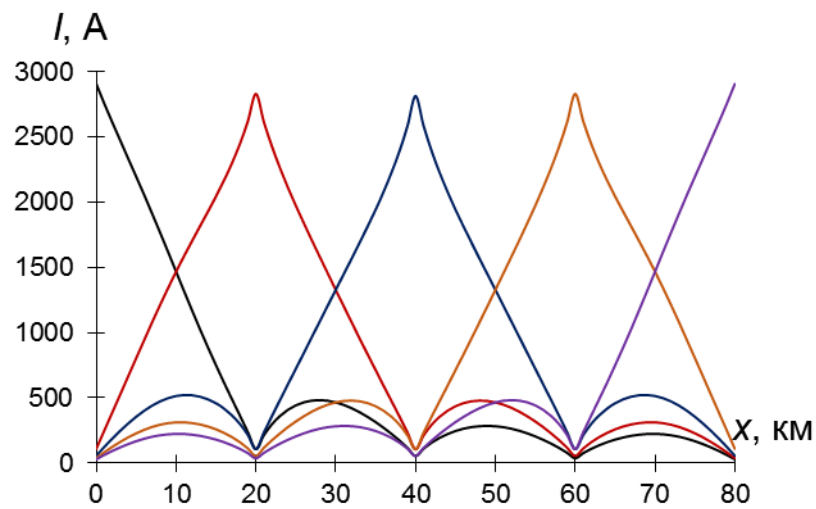


Рис. 2.45. Струми фідерів усіх тягових підстанцій при стабілізації потужності

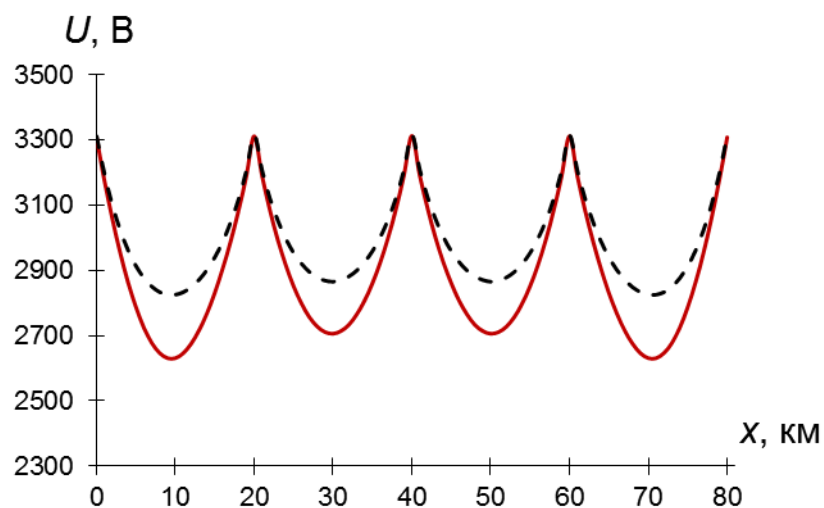


Рис. 2.46. Напряга на струмоприймачі електровозу для випадку стабілізації потужності (суцільна) та без неї (пунктирна)

Для випадку стабілізації електрорухомим складом споживаної потужності використана методика, яка описана в п. 2.3 і полягає у перерахунку струму електровоза за формулою (2.7).

Для випадку ряду тягових підстанцій загальна функція опору $f(x)$ визначається як результуючий опір усіх ланок схеми заміщення для даної координати x , а саме

$$f(x) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{R_{\phi i}(x)}}. \quad (2.41)$$

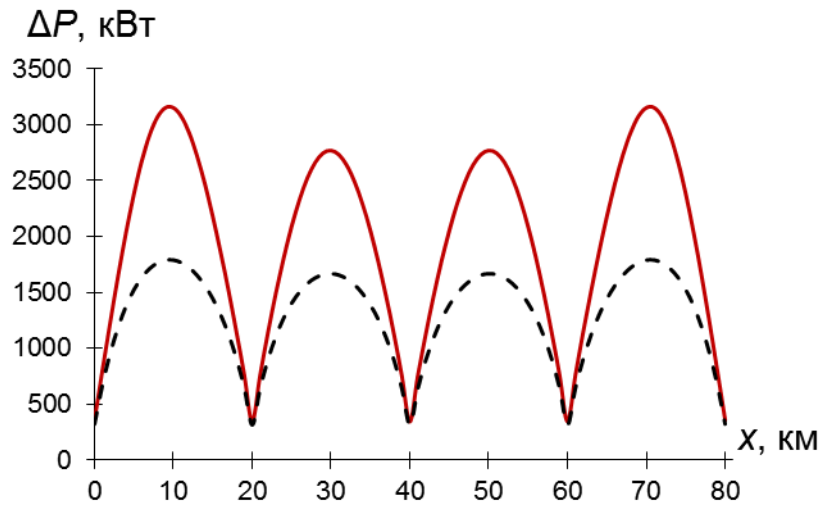


Рис. 2.47. Втрати потужності в тяговій мережі для випадку стабілізації потужності (суцільна) та без неї (пунктирна)

Для двоколіїних ділянок розрахунок функції опору ускладнюється необхідністю врахування схем роздільного, вузлового, паралельного, а в деяких випадках, і неповного паралельного з'єднання. Узагальнена схема заміщення для визначення функції опору двоколіїних ділянок приведена на рис. 2.48, яка враховує усі варіанти розташування навантаження відносно вузлів паралельного з'єднання контактних підвісок.

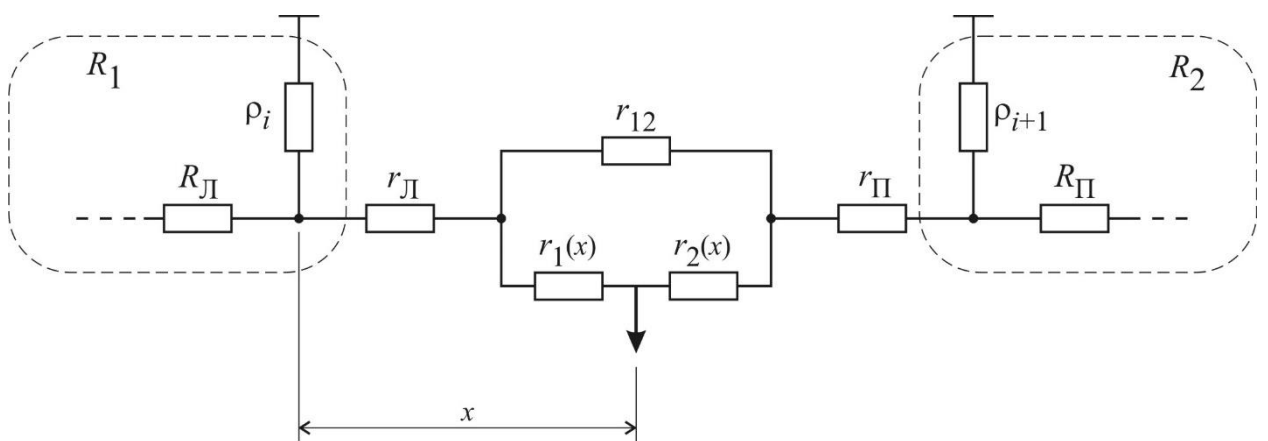


Рис. 2.48. Узагальнена схема заміщення двоколіїної ділянки тягової мережі

Слід відзначити, що при визначенні функції опору, врахуванню підлягають лише вузли лівіше та правіше відносно навантаження, оскільки інші не мають впливу для даної координати місцезнаходження. Згортання

узагальненої схеми заміщення виконується через перетворення «трикутник – зірка» таким чином, що функція опору

$$f(x) = \frac{r_1(x) \cdot r_2(x)}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + \frac{1}{\frac{1}{\frac{r_1(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_1 + r_{Л}} + \frac{1}{\frac{r_2(x) \cdot r_{12}}{r_1(x) + r_2(x) + r_{12}} + R_2 + r_{П}}}}, \quad (2.42)$$

де R_1, R_2 – опори зліва та справа від розглядуваних тягових підстанцій з врахуванням їх внутрішнього опору, Ом;

$r_1(x), r_2(x)$ – опори тягової мережі однієї колії до найближчого вузла зліва та справа від навантаження, Ом;

r_{12} – те саме, між найближчими вузлами, Ом;

$r_{Л}, r_{П}$ – опори тягової мережі двох колій, між найближчими вузлами і відповідними тяговими підстанціями зліва та справа, Ом.

Окрім розрахунку функції опору (2.42) за наявності на ділянці декількох тягових підстанцій, необхідно врахувати можливість протікання вирівнювальних струмів. Для цього методом суперпозиції розраховується струморозподіл в загальній схемі при наявності лише однієї е.р.с. від кожної із загальної кількості тягових підстанцій. Потім результати розрахунків накладаються та визначається результуючий струморозподіл, який визначає закон зміни напруги холостого ходу уздовж ділянки. Такий підхід застосовується для випадку інверторних тягових підстанцій. У випадку некерованих перетворювачів необхідно враховувати можливість їх запирання іншими підстанціями з більшим значенням е.р.с. Отриманий таким чином розподіл напруги холостого ходу уздовж ділянки може бути використаний у формулі (2.7) замість $U_{ш}$, але з врахуванням його зміни відносно координати.

Врахування фактичного внутрішнього опору тягових підстанцій ($\sim 0,1$ Ом) призводить до того, що функція опору $f(x)$ приймає значення до

30 % менше в точках їх приєднання, чим враховується паралельна робота кожної підстанції на загальне навантаження.

2.8. Висновки до розділу 2

Складності в розрахунках систем тягового електропостачання обумовлені сформованим поглядом на складну систему і процеси, що в ній протікають, постфактум без аналізу та узагальнення причин. Для спрощення та формалізації розрахунків необхідно переглянути розуміння специфіки тягового навантаження та розглядати процеси відносно тягового навантаження в припущенні того, що параметри самої системи тягового електропостачання змінюються в залежності від місцезнаходження навантаження.

Заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму для розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання вносить суттєву похибку в розрахунки струмів фідерів, напруги на струмоприймачеві та втрати потужності. Похибка збільшується зі збільшенням потужності, що реалізується електрорухомим складом. Внаслідок того, що при проектуванні системи електропостачання це явище не враховувалось, погіршуються тягового-енергетичні характеристики існуючого електрорухомого складу при одночасній експлуатації з сучасним, системи управління якого дозволяють стабілізувати значення тягової потужності.

На підставі балансу та розподілу потужностей для різних схем живлення контактної мережі в аналітичному виді отримані функції опору, які фізично визначають закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого тягового навантаження. Запропонована методика розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомим складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві.

Розрахунки систем тягового електропостачання в якості складної системи з врахуванням багатьох різноманітних факторів доцільно виконувати за допомогою розробленої методики просторово-часового уявлення, яка ґрунтується на аналітичних кусочно-заданих функціях двох змінних. Запропонований метод розрахунку системи тягового електропостачання полягає в описі закономірності зміни опору тягової мережі аналітичними функціями, які в сукупності з функціями струморозподілу та опору фідерів, дозволяють формалізувати електротехнічні розрахунки електротягових систем та перейти від дискретного до неперервного уявлення.

Виконані розрахунки показали, що кількість тягових підстанцій на ділянці, які приймаються до розрахункової схеми, впливає на рівень напруги на струмоприймачі електровозу, струми фідерів підстанцій та втрати потужності в тяговій мережі. Струми фідерів, за такого випадку, описуються нелінійними залежностями, які можуть бути визначені за допомогою приведених аналітичних виразів. Характер нелінійності залежить також і від наявності систем стабілізації тягової потужності на електрорухомому складі.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

Застосування розробленої методики в цілому можливе в науково-дослідних роботах, що направлені на оптимізацію режимів роботи шляхом виконання оптимізаційних розрахунків чи розрахунків керуючого впливу при посиленні систем тягового електропостачання або застосуванні підходів керованого електропостачання.

Отримані результати придатні для подальшого впровадження в сучасні засоби імітаційного моделювання, оскільки мають можливість аналітичної

формалізації, що, в свою чергу, позначається на об'ємах та швидкості виконання розрахунків.

Отримані в другому розділі результати розвитку методів розрахунку режимів електропостачання в системах електричної тяги опубліковано в роботах [11, 21, 24, 27].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ**3.1. Методологія проведення експериментальних досліджень**

Проведення експериментальних вимірювань в системах електропостачання електрифікованих мережі залізниць є досить складною та багатокритеріальною задачею. Безпосередньому проведенню електричних вимірювань передують організаційна робота стосовно постановки задачі досліджень, розробки програми та її подальше узгодження. З огляду на характер та структуру поставленого завдання проведення експериментальних досліджень проходить в загальному випадку за наступними етапами:

- 1) отримання необхідної інформації про досліджуваний об'єкт;
- 2) організація та узгодження програми експерименту;
- 3) проведення електричних вимірювань;
- 4) обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій.

Перед початком експериментальних досліджень та на підставі інформації про дослідний об'єкт визначаються умови проведення, оцінюються загальні обсяги робіт та перевіряються наявні засоби вимірювальної техніки.

На етапі організації експерименту визначаються об'єкти проведення вимірювань, умови доступу до вимірювальних трансформаторів струму і напруги та узгоджується схема приєднання засобів вимірювальної техніки.

При необхідності проведення активного експерименту визначаються необхідні оперативні перемикання та узгоджуються зміни у нормальній схемі живлення та секціонування пристроїв електропостачання дослідної ділянки залізниці.

На етапі безпосереднього проведення електричних вимірювань виконується калібрування та налаштування засобів вимірювальної техніки. Особливу увагу приділяється синхронізації роботи вимірювальних приладів на

різних приєднаннях та об'єктах проведення досліджень. Зазвичай синхронізація виконується у часі з похибкою не більше 1,0 с.

Інтервал проведення експериментальних досліджень встановлюється на рівні мінімально можливого, який встановлюється стандартом, а саме 24 год. В окремих випадках можуть мати певні відхилення, тому забезпечення регламентованого інтервалу вимірювань досягається шляхом збільшення загального періоду проведення досліджень.

На етапі обробки отриманих результатів виконується перетворення даних у форму, придатну для подальших розрахунків та аналізу. Перевіряється синхронність роботи приладів та при необхідності виконується видалення зайвих чи свідомо неправильних даних. Після первинної обробки виконується необхідні розрахунки, дані піддаються статистичній обробці та зіставленню між собою або з даними, що отримані від інших систем вимірювання, зазвичай з даними автоматизованої системи комерційного обліку.

Для системи електричної тяги змінного струму актуальними є наступні задачі, які вимагають постановки та проведення експериментальних досліджень: визначення оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності; визначення причин виникнення перетоків потужності між суміжними тяговими підстанціями; визначення балансу електроенергії за приєднаннями тягової підстанції; перевірка режиму напруги та роботи обліку електричної енергії безпосередньо на електровозах; оцінка якості електроенергії на приєднаннях тягових підстанцій та у споживачів, що живляться від них.

При проведенні вимірювань використовувались портативні аналізатори якості електричної енергії виробництва Satec (Ізраїль), які включені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки України.

В якості основного для експериментальних використовувався аналізатор якості електричної енергії EDL-175хг зав. № 723096 належністю ДНУЗТ.

Для збільшення інформативності результатів до експерименту залучались вимірювальні прилади інших організацій:

- PNA-296, зав. № 260513 Котовської дистанції електропостачання;

- PNA-296, зав. № 218855 ТОВ “ХайТек-Енергія”, м. Київ;
- EDL-175хг, зав. № 723789 Знам’янської дистанції електропостачання;
- EDL-175хг, зав. № 725151 Долинської дистанції електропостачання;
- Парма, зав. № 00220 Основ’янської дистанції електропостачання;
- Fluke 43В, зав. № DM8430276 ДЕЛ Львівської залізниці.

У випадку проведення вимірювань на одній тяговій підстанції застосовується схема (рис. 3.1), яка, окрім оцінки якості електричної енергії на всіх приєднаннях, дозволяє визначити баланс та втрати електроенергії в пристроях тягової підстанції.

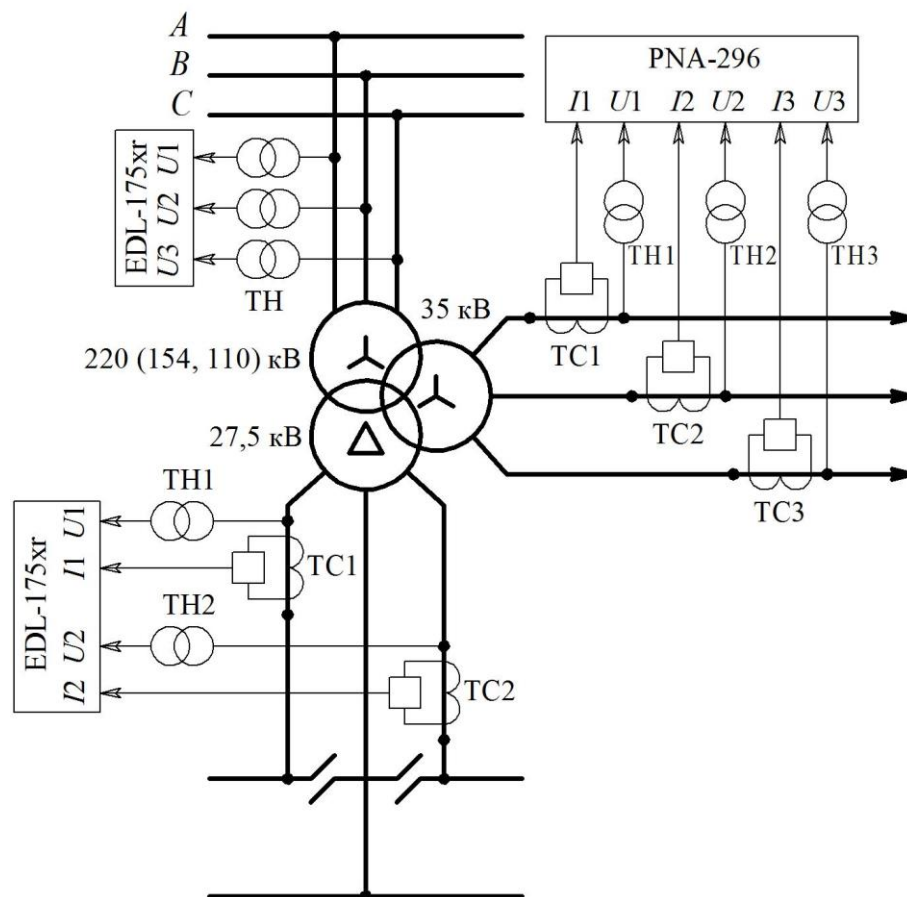


Рис. 3.1. Схема проведення вимірювань показників якості електроенергії на одній тяговій підстанції

Метою виконання експериментальних досліджень за схемою (рис. 3.2) є визначення профілю тягового навантаження та співставлення рівнів напруги на кожній тяговій підстанції.

Внаслідок того, що тягові підстанції можуть у схемі зовнішнього електропостачання живитись від різних енергосистем, в системі тягового електропостачання виникатимуть транзитні перетоки потужності, які будуть однозначно визначатись кутом зсуву фаз між векторами напруги, що паралельно живлять міжпідстанційну зону. Для чисельного визначення та фіксації цього кута зсуву фаз, застосовувалась схема (рис. 3.3), яка додатково вимагає консольного живлення дослідної ділянки тягової мережі від суміжної підстанції.

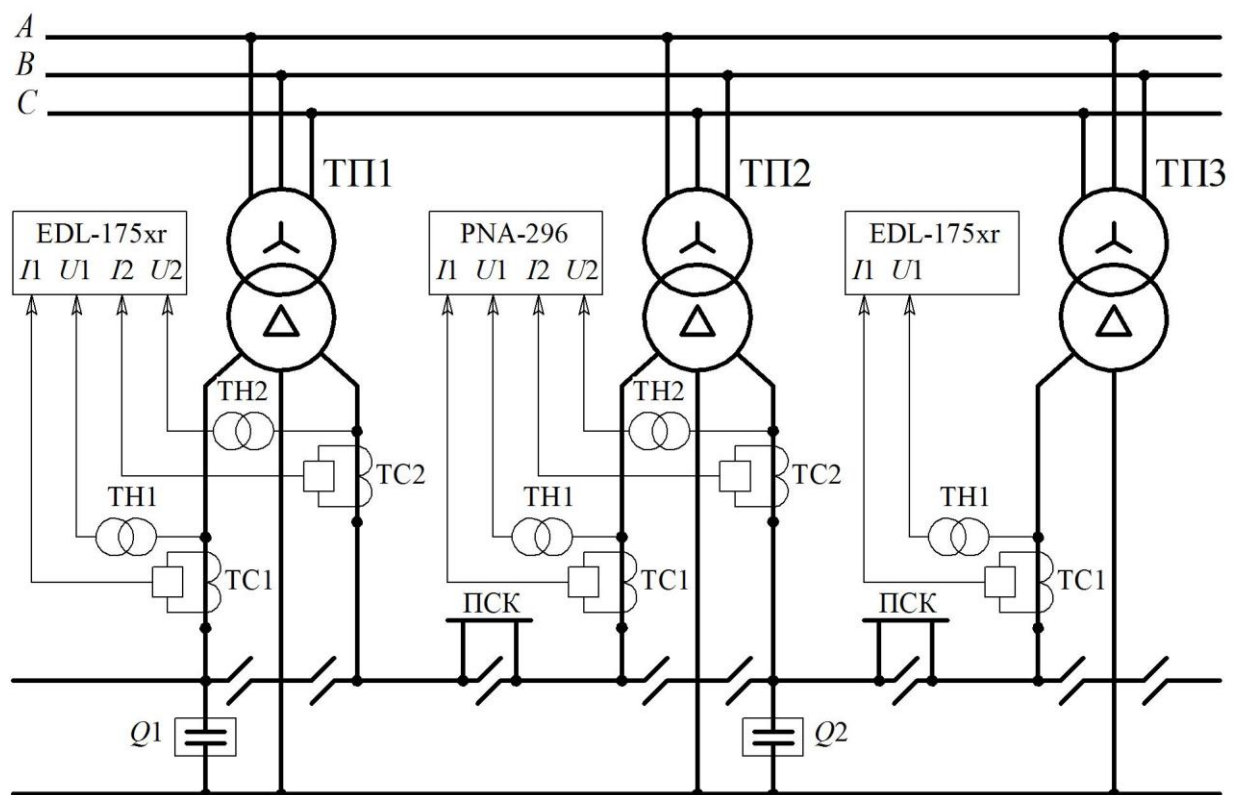


Рис. 3.2. Схема проведення вимірювань показників якості електроенергії на декількох тягових підстанціях Одеської залізниці

В такому випадку за допомогою наявного аналізатора, відповідно зі схемою, можна виміряти різницю між напругами суміжних тягових підстанцій за величиною та кутом зсуву фаз. Саме кут зсуву векторів напруги, що живлять міжпідстанційну зону, визначатиме можливість протікання та активний характер перетоків електроенергії.

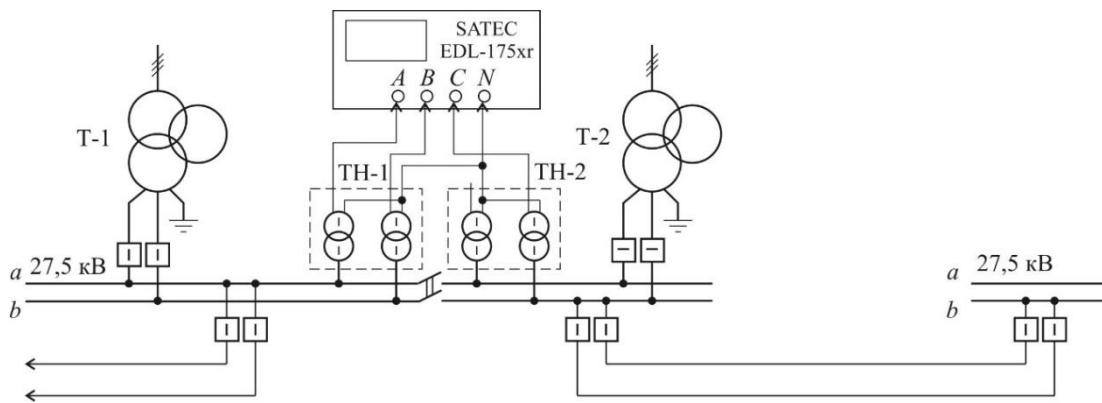


Рис 3.3. Схема проведення вимірювань на тяговій підстанції для вимірювання кута зсуву фаз між векторами напруги

Для перевірки якості електричної енергії в лініях «два проводи – рейка» та безпосередньо на приєднанні споживача, який живиться від неї, застосовується схема (рис. 3.4).

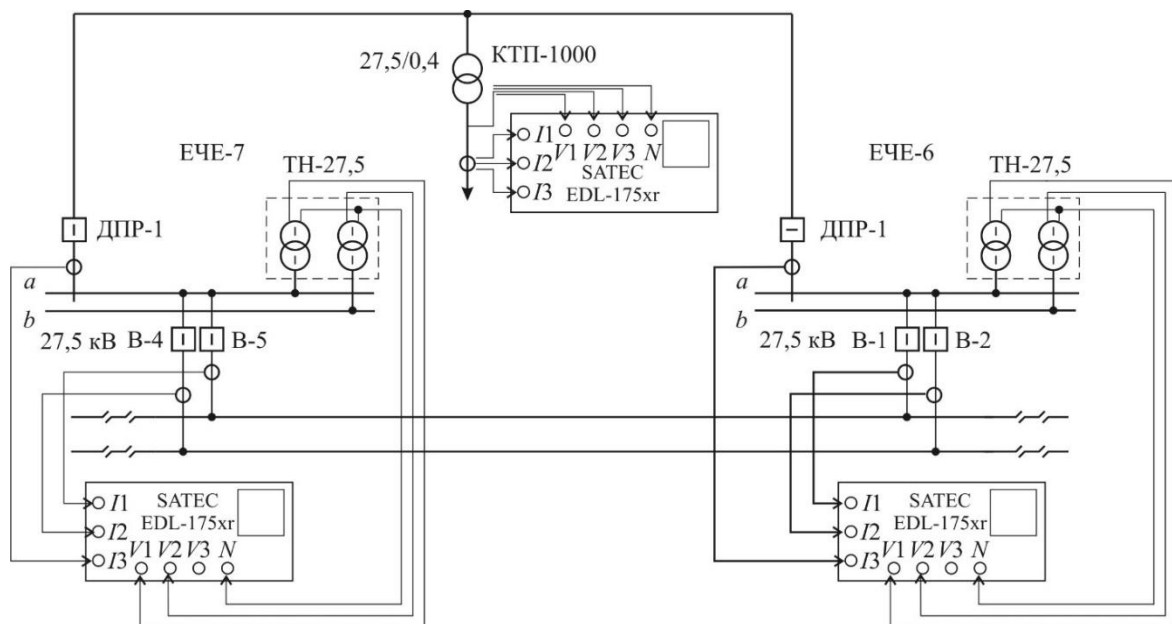


Рис 3.4. Схема проведення вимірювань на тягових підстанціях та у споживача, який живиться від лінії «два проводи – рейка»

Вимірювання безпосередньо в силових колах електровозу змінного струму проводяться з метою перевірки рівня напруги при русі поїзда міжпідстанційною зоною. Відповідна схема для досягнення цієї мети (рис. 3.5), окрім всього іншого, вимагає наявності джерела резервного живлення.

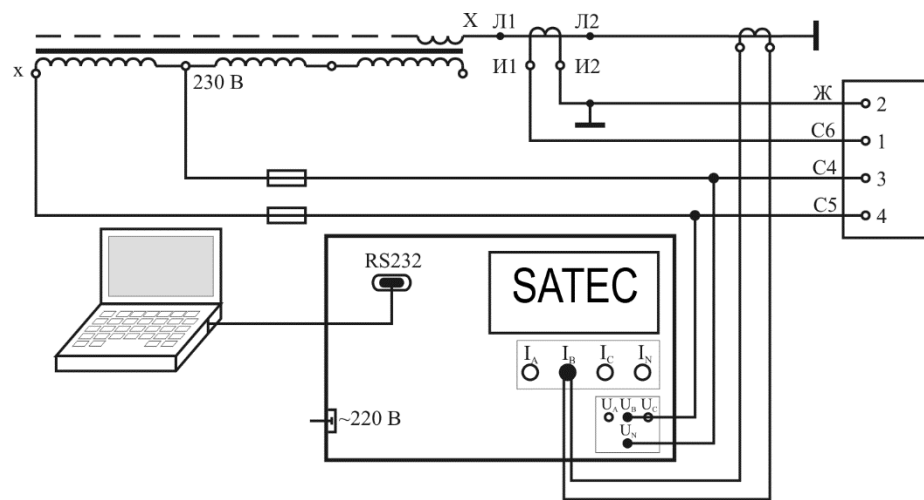


Рис 3.5. Підключення аналізатора у вимірювальні кола електровозу ВЛ-80

Загальна схема проведення експериментальних досліджень для системи електричної тяги постійного струму представлена на рис. 3.6. Технічними відмінностями виконання даної схеми відносно схем для системи змінного струму є необхідність застосування спеціальних пристроїв гальванічної розв'язки в колах постійного струму. Для цього використовувались розроблені на кафедрі Електропостачання залізниць ДНУЗТ первинні вимірювальні перетворювачі струму і напруги, здатні працювати під високим потенціалом з передачею інформації по оптичному каналу, модулі збору інформації NI USB6009, які дозволяють вимірювати до 8 аналогових сигналів з роздільною здатністю до 14 біт і частотою дискретизації 48 кГц та програмне забезпечення NI-DAQ, призначене для збору і обробки вимірюваної інформації.

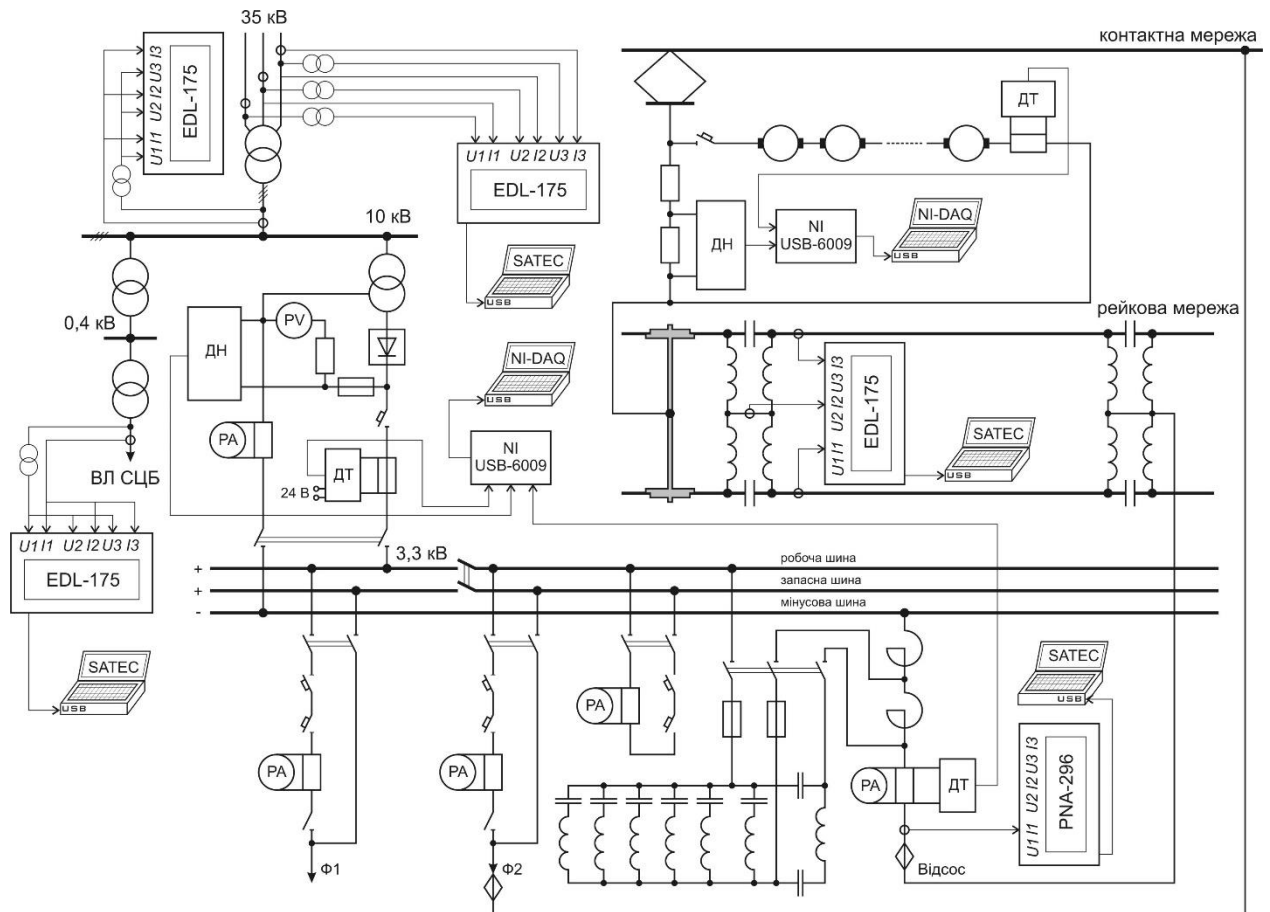


Рис. 3.6. Схема проведення комплексних вимірювань в системі електричної тяги постійного струму

3.2. Системна оцінка показників якості електроенергії двох систем електричної тяги

Системи електричної тяги постійного та змінного струму характеризуються системою показників якості електричної енергії, яку з нормованих стандартом [151] обмежимо наступними показниками напруги:

- усталене відхилення;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності;
- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю;

З огляду на досвід нормування величин спотворення струму [151], до системи досліджуваних показників долучимо також наступні:

- коефіцієнт гармонік струму;
- коефіцієнт співвідношення вищих гармонік.

В якості показника енергоефективності перетворення електричної енергії використаємо коефіцієнт реактивної потужності $\text{tg}\varphi$.

Коефіцієнти n -них гармонійних складових, розглянуті окремо для усередненого режиму роботи тягових підстанцій постійного та змінного струму.

Об'єктами досліджень виступають вказані нижче тягові підстанції та ділянки електрифікованих залізниць (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Об'єкти досліджень «тягові підстанції»

№	Назва	Первинна напруга	№	Назва	Первинна напруга
постійний струм			змінний струм		
1	ЕЧЕ-Ілларіонове	35 кВ	I	ЕЧЕ-Знам'янка	154 кВ
2	ЕЧЕ-Елеваторна	220 кВ	II	ЕЧЕ-Олександрія	154 кВ
3	ЕЧЕ-Поштова	110 кВ	III	ЕЧЕ-Шевченка	154/110 кВ
4	ЕЧЕ-Сімферополь	35 кВ	IV	ЕЧЕ-Чубівка	110 кВ
5	ЕЧЕ-Федорівка	154 кВ	V	ЕЧЕ-Полтава	110 кВ
6	ЕЧЕ-Горяїнове	6 кВ	VI	ЕЧЕ-Курилівка	110 кВ
7	ЕЧЕ-Варварівка	35 кВ			
8	ЕЧЕ-Залізнякове	35 кВ			
9	ЕЧЕ-Самойлівка	110 кВ			
10	ЕЧЕ-Красноармійськ	35 кВ			
11	ЕЧЕ-Основа	110 кВ			
12	ЕЧЕ-Верхівцеве	35 кВ			

Таблиця 3.2 – Об'єкти досліджень «електрифіковані ділянки»

Назва	Електровоз	Назва	Електровоз
постійний струм		змінний струм	
Запоріжжя – Синельникове	ВЛ-8	Користівка – Кременчук	ВЛ-80Т
Клепарів – Воловець	ВЛ-11М	Котовськ – Одеса	2ЕС5К
		Знам'янка – П'ятихатки	ВЛ-80Т
		Баришівка – Яготин	ДСЗ

Досліджуючи часові реалізації усталеного відхилення напруги на тягових підстанціях постійного струму отримано наступний ансамбль реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.7). Загальною закономірністю є зростання математичного очікування кожної реалізації при відповідному збільшенні класу напруги первинної мережі.

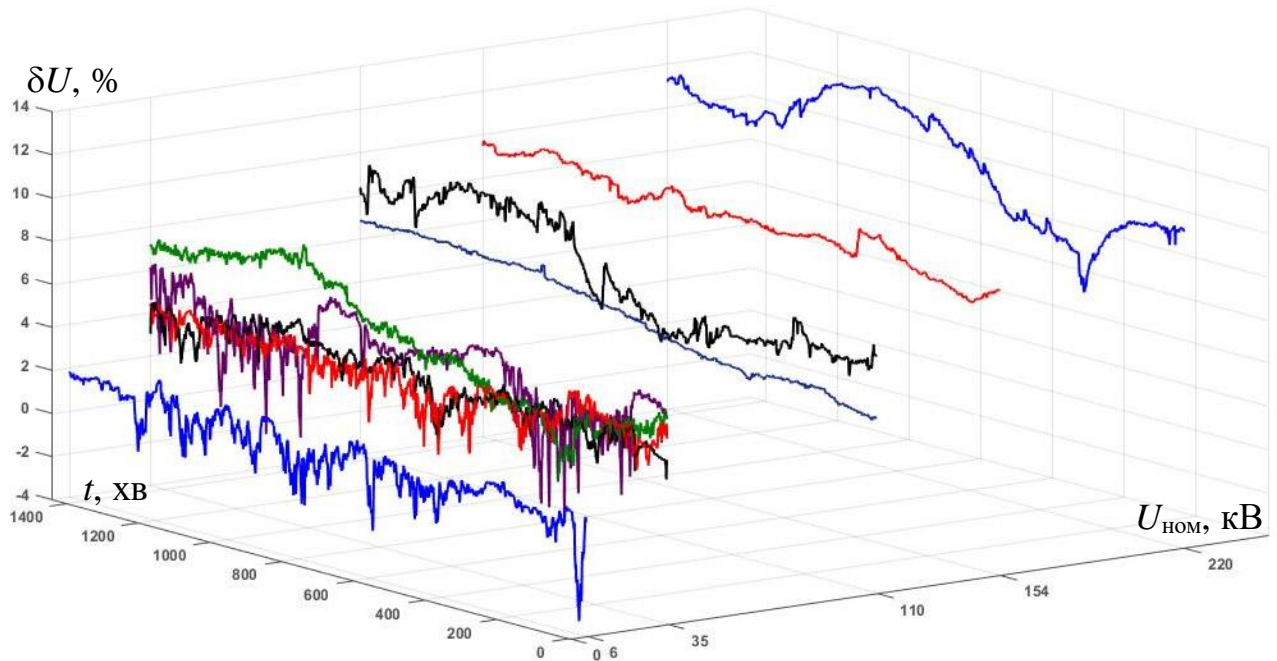


Рис. 3.7. Регістрограми усталеного відхилення напруги в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму в залежності від класу напруги

В табл. 3.3 приведені основні числові характеристики усталеного відхилення напруги, що визначають характеристики положення, розкиду, мінімальні та максимальні значення відхилення напруги. Мінімальне значення характеристики положення величини відхилення напруги припадає на моду для тягової підстанції з первинною напругою 6 кВ (№ 6), максимальне – на математичне очікування для підстанції з первинною напругою 220 кВ (№ 2). Найбільшу характеристику розкиду за відхиленням напруги має тягова підстанція з первинною напругою 35 кВ, найменшу – відповідно з напругою 154 кВ. Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 6 кВ.

Таблиця 3.3 – Числові характеристики усталеного відхилення напруги тягових підстанцій постійного струму

№ ТП	$M(\delta U)$	$Me(\delta U)$	$Mo(\delta U)$	$D(\delta U)$	$\sigma(\delta U)$	$Ex(\delta U)$	$As(\delta U)$	$\min(\delta U)$	$\max(\delta U)$
6	1.114	1.271	0.862	0.588	0.767	3.938	-1.543	-3.395	2.577
4	6.456	5.945	6.013	3.440	1.855	-0.928	0.579	3.512	10.096
8	4.992	5.215	6.257	1.624	1.274	1.201	-1.075	-0.596	6.997
7	4.203	4.268	4.305	0.365	0.605	1.042	-0.839	1.705	5.595
1	4.023	4.087	3.998	0.433	0.658	1.535	-0.655	1.006	5.751
10	5.980	5.879	7.582	2.591	1.610	-0.924	-0.160	1.240	9.102
3	7.502	6.933	6.388	2.065	1.437	-1.456	0.236	4.963	9.993
11	5.747	5.906	6.910	0.964	0.982	-1.599	-0.136	3.976	7.088
5	9.341	9.329	9.313	0.164	0.405	-0.135	-0.010	8.310	10.348
2	10.997	10.762	10.685	2.283	1.511	-0.559	-0.175	6.645	13.557

Емпіричні розподіли величини відхилення напруги приведені на рис. 3.8, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та наявні мультимодальності в розподілах. Розподіли відхилення напруги зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону збільшення числових характеристик положення. Закономірностей у зміні характеристик розкиду, при цьому, не спостерігається.

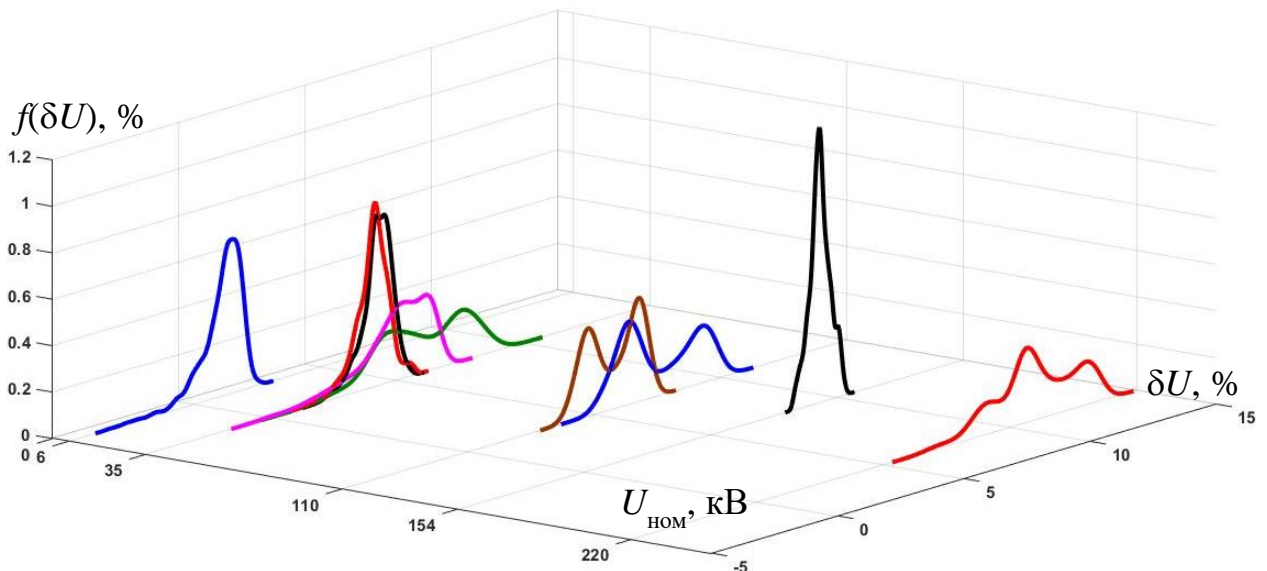


Рис. 3.8. Емпіричні розподіли усталеного відхилення напруги в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

Дослідження часових реалізацій спотворення синусоїдності напруги на тягових підстанціях постійного струму показано у вигляді реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.9). Загальною закономірністю є зниження математичного очікування кожної реалізації при відповідному збільшенні класу напруги первинної мережі.

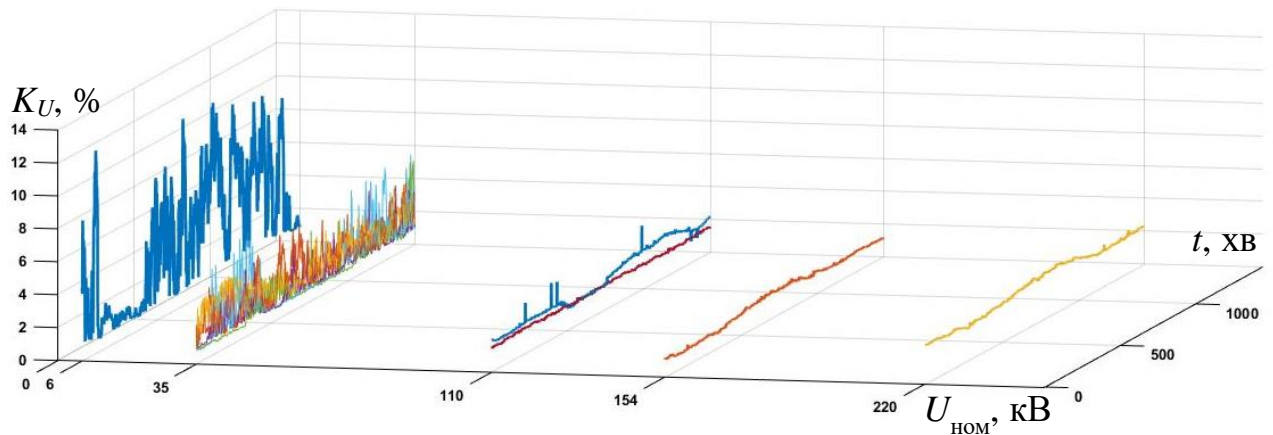


Рис. 3.9. Регістрограми коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

В табл. 3.4 приведені основні числові характеристики коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги. Мінімальне значення характеристики положення величини несинусоїдності напруги припадає на моду для тягової підстанції з первинною напругою 35 кВ (№ 8), максимальне – на моду для підстанції з первинною напругою 6 кВ (№ 6). Найбільшу характеристику розкиду за відхиленням напруги має тягова підстанція з первинною напругою 6 кВ, найменшу – відповідно з напругою 110 кВ. Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 35 кВ.

Таблиця 3.4 – Числові характеристики коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги тягових підстанцій постійного струму

№ ТП	$M(K_U)$	$Me(K_U)$	$Mo(K_U)$	$D(K_U)$	$\sigma(K_U)$	$Ex(K_U)$	$As(K_U)$	$\min(K_U)$	$\max(K_U)$
6	4.169	3.622	4.501	7.891	2.809	-0.963	0.482	0.776	12.332
12	1.266	0.905	0.825	0.527	0.726	4.935	2.041	0.645	5.135

Продовження табл. 3.4.

№ ТП	$M(K_U)$	$Me(K_U)$	$Mo(K_U)$	$D(K_U)$	$\sigma(K_U)$	$Ex(K_U)$	$As(K_U)$	$\min(K_U)$	$\max(K_U)$
8	1.708	1.145	0.800	1.467	1.211	1.450	1.549	0.715	6.180
7	1.419	1.185	0.980	0.413	0.642	3.985	1.874	0.710	4.800
1	2.149	1.987	1.662	0.759	0.871	-0.014	0.748	0.789	5.051
10	2.279	2.196	2.492	0.570	0.755	-0.534	0.446	0.825	4.275
3	1.970	1.920	1.907	0.114	0.337	0.272	0.245	1.294	3.912
11	1.524	1.523	1.529	0.004	0.061	-0.551	-0.107	1.355	1.679
5	1.242	1.215	1.202	0.042	0.205	-0.857	0.234	0.870	1.782
2	2.368	2.301	2.237	0.049	0.220	-0.752	0.590	1.920	2.914

Емпіричні розподіли величини спотворення синусоїдності напруги приведені на рис. 3.10, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та наявні мультимодальності в розподілах. Розподіли відхилення напруги зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону зменшення числових характеристик положення. Закономірностей у зміні характеристик розкиду не спостерігається.

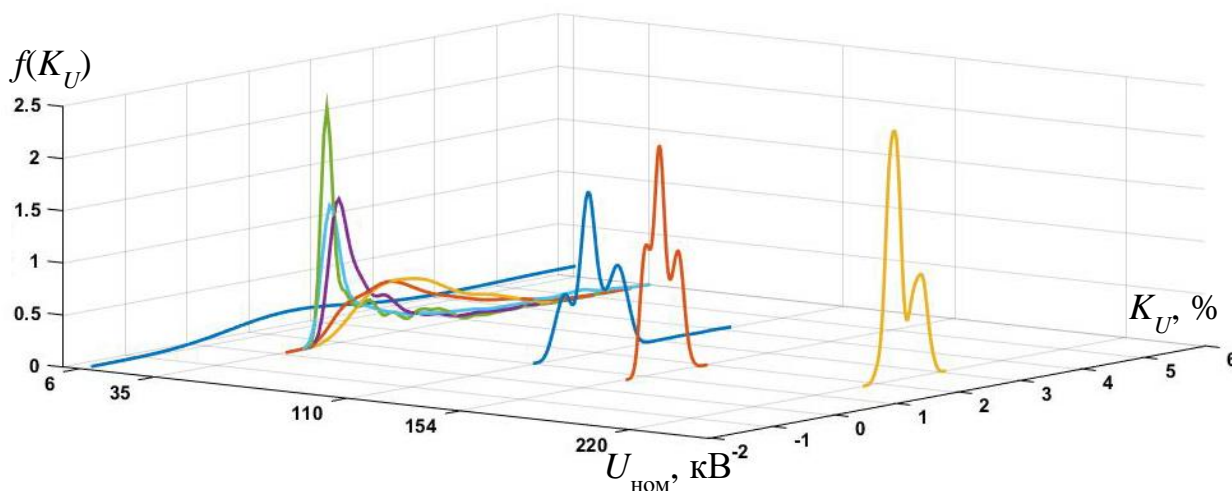


Рис. 3.10. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

Дослідження часових реалізацій несиметрії напруги на тягових підстанціях постійного струму показано у вигляді реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.11). Загальною закономірністю є

зниження математичного очікування кожної реалізації при відповідному збільшенні класу напруги первинної мережі.

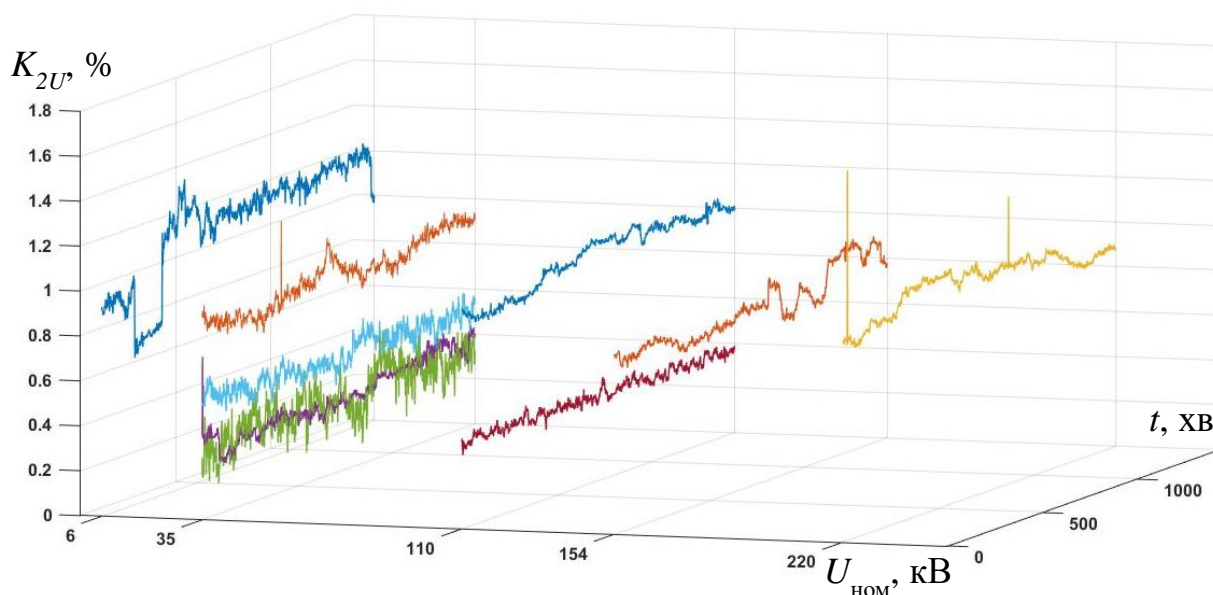


Рис. 3.11. Регістрограми коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

В табл. 3.5 приведені основні числові характеристики коефіцієнта несиметрії напруги. Мінімальне значення характеристики положення величини несиметрії напруги припадає на моду для тягової підстанції з первинною напругою 35 кВ (№ 12), максимальне – на медіану для підстанції з первинною напругою 6 кВ (№ 10). Найбільшу характеристику розкиду за несиметрією напруги має тягова підстанція з первинною напругою 6 кВ (№ 10), найменшу – відповідно з напругою 110 кВ (№ 11). Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 35 кВ (№ 7).

Таблиця 3.5 – Числові характеристики коефіцієнта несиметрії напруги тягових підстанцій постійного струму

№ ТП	$M(K_{2U})$	$Me(K_{2U})$	$Mo(K_{2U})$	$D(K_{2U})$	$\sigma(K_{2U})$	$Ex(K_{2U})$	$As(K_{2U})$	$\min(K_{2U})$	$\max(K_{2U})$
6	1.097	1.157	1.198	0.023	0.152	0.854	-1.377	0.654	1.371
12	0.326	0.325	0.315	0.005	0.072	-0.049	-0.117	0.090	0.560

Продовження табл. 3.5.

№ ТП	$M(K_{2U})$	$Me(K_{2U})$	$Mo(K_{2U})$	$D(K_{2U})$	$\sigma(K_{2U})$	$Ex(K_{2U})$	$As(K_{2U})$	$\min(K_{2U})$	$\max(K_{2U})$
8	0.515	0.516	0.502	0.002	0.041	0.040	-0.136	0.385	0.645
7	0.332	0.330	0.325	0.002	0.045	3.684	0.520	0.215	0.725
1	0.877	0.874	0.911	0.002	0.048	1.648	0.525	0.734	1.208
10	1.698	1.840	1.820	0.136	0.369	1.205	-1.721	0.808	2.042
3	1.002	1.010	1.010	0.003	0.051	-0.986	-0.439	0.890	1.090
11	0.379	0.378	0.390	<0.001	0.020	0.351	0.301	0.309	0.456
5	0.788	0.780	0.780	0.003	0.059	-0.424	0.621	0.670	0.940
2	0.948	0.950	0.960	0.003	0.059	13.350	1.217	0.840	1.650

Емпіричні розподіли величини несиметрії напруги приведені на рис. 3.12, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та наявні мультимодальності в розподілах. Розподіли несиметрії напруги зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону зменшення числових характеристик положення. Закономірностей у зміні характеристик розкиду не спостерігається.

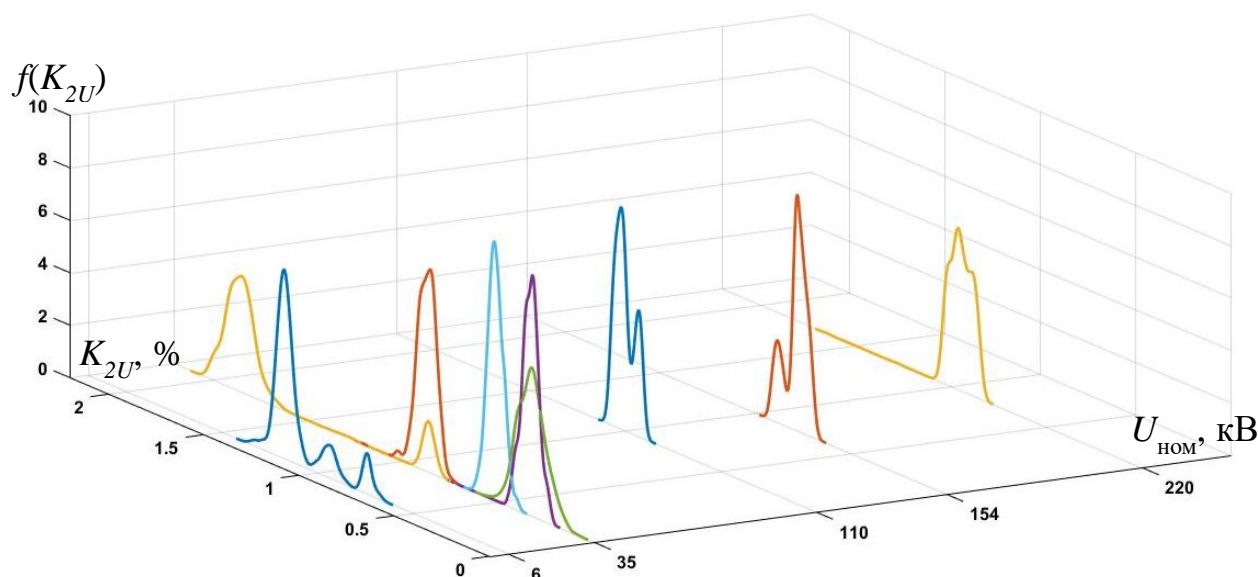


Рис. 3.12. Емпіричні розподіли коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

Дослідження часових реалізацій коефіцієнта спотворення струму тягових підстанціях постійного струму показано у вигляді реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.13). Загальною

закономірністю є зниження математичного очікування кожної реалізації при відповідному збільшенні класу напруги первинної мережі.

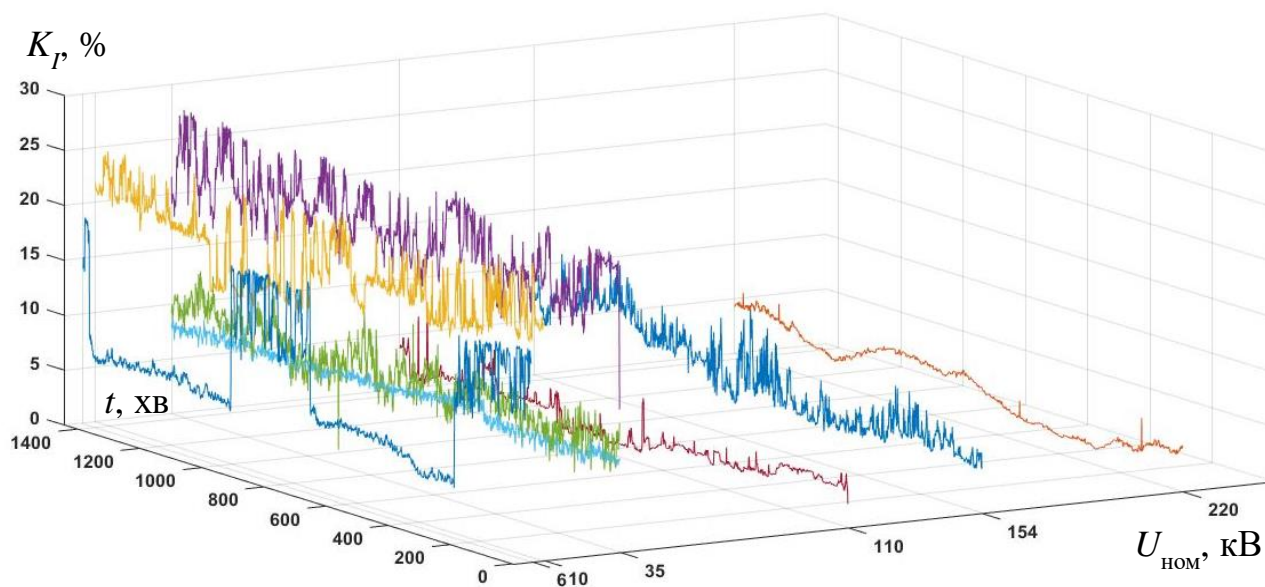


Рис. 3.13. Регістрограми коефіцієнта спотворення синусоїдності струму в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

В табл. 3.6 приведені основні числові характеристики коефіцієнта спотворення струму. Мінімальне значення характеристики положення величини спотворення струму припадає на моду для тягової підстанції з первинною напругою 220 кВ (№ 2), максимальне – на математичне очікування для підстанції з первинною напругою 35 кВ (№ 7). Найбільшу характеристику розкиду за спотворенням струму має тягова підстанція з первинною напругою 6кВ (№ 6), найменшу – відповідно з напругою 110 кВ (№ 3). Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 220 кВ (№ 2).

Таблиця 3.6 – Числові характеристики коефіцієнта спотворення струму тягових підстанцій постійного струму

№ ТП	$M(K_I)$	$Me(K_I)$	$Mo(K_I)$	$D(K_I)$	$\sigma(K_I)$	$Ex(K_I)$	$As(K_I)$	$\min(K_I)$	$\max(K_I)$
6	9.958	6.965	18.348	24.547	4.955	-1.129	0.770	4.539	19.335
9	20.485	20.473	21.114	6.288	2.508	-0.477	-0.101	14.965	26.798
8	8.350	8.364	8.519	0.295	0.543	0.416	0.120	6.525	10.201
7	23.275	22.943	22.750	5.293	2.301	-0.578	0.127	13.010	28.265
1	9.779	8.357	9.217	9.886	40.123	-0.950	-0.096	3.887	78.628
12	9.824	9.860	10.070	1.854	1.361	1.050	-0.105	1.420	14.970
3	2.634	2.528	3.796	0.920	0.959	0.915	0.585	0.758	7.157
5	6.233	5.987	4.838	3.403	1.845	-0.186	0.621	3.001	12.430
2	3.354	3.394	1.779	1.087	1.043	-1.273	-0.098	1.440	5.756

Емпіричні розподіли величини коефіцієнта спотворення синусоїдності струму приведені на рис. 3.14, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та наявні мультимодальності в розподілах. Розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності струму зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону зменшення числових характеристик положення. Закономірностей у зміні характеристик розкиду не спостерігається.

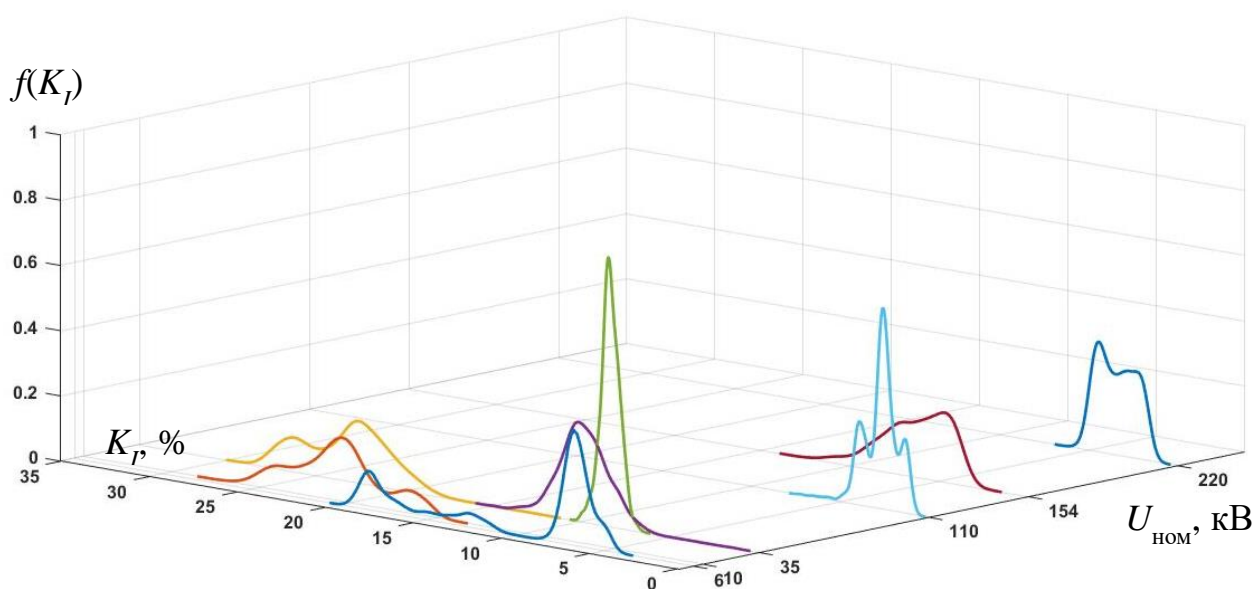


Рис. 3.14. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності струму в первинній мережі тягових підстанцій постійного струму

На рис. 3.15 показано фазові портрети системи тягового електропостачання постійного струму, отримані за кутами навантажень у кожній фазі трифазної системи. Фазові портрети для підстанцій з первинною напругою від 6 до 35 кВ являють собою нелінійні відрізки, що відходять з початку координат, для підстанцій з первинною напругою вище 110 кВ – у вигляді кільцевих замкнених кривих або полів розсіювання.

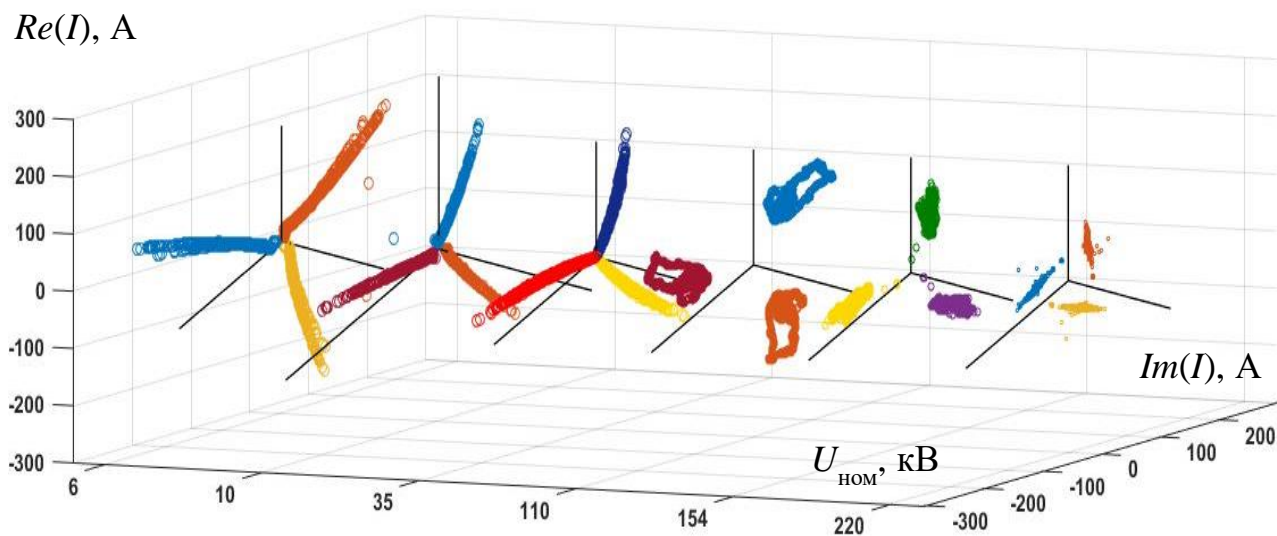


Рис. 3.15. Фазові портрети за кутами навантажень струмів в системі постійного струму

Досліджуючи часові реалізації усталеного відхилення напруги на тягових підстанціях змінного струму отримано наступний ансамбль реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.16). Загальною закономірністю є зниження математичного очікування кожної реалізації при відповідному зниженні класу напруги мережі.

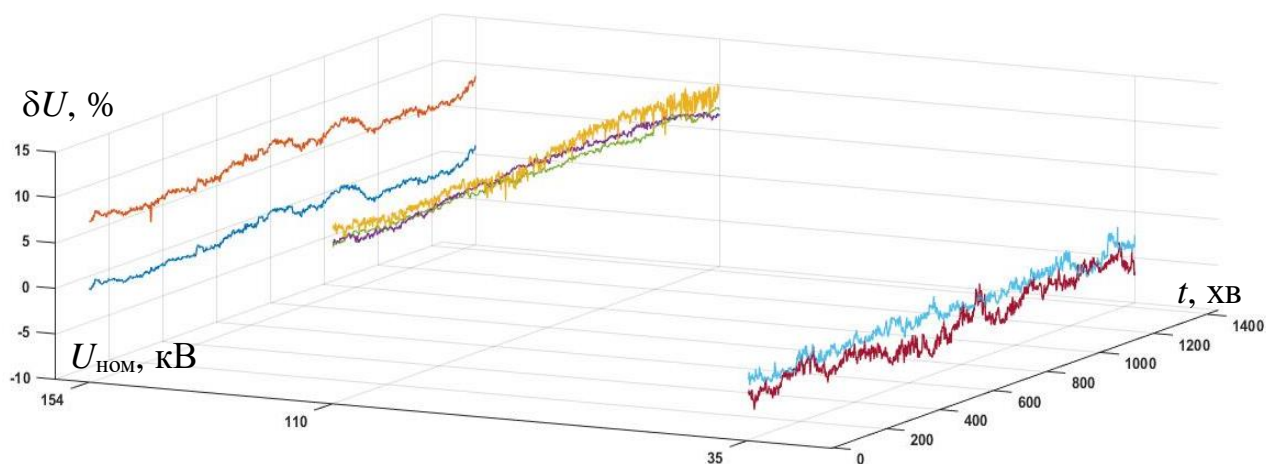


Рис. 3.16. Регістрограми усталеного відхилення напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

В табл. 3.7 приведені основні числові характеристики усталеного відхилення напруги, що визначають характеристики положення, розкиду, мінімальні та максимальні значення відхилення напруги. Мінімальне значення характеристики положення величини відхилення напруги припадає на математичне очікування для тягової підстанції з первинною напругою 154 кВ (№ II), максимальне – також на математичне очікування для підстанції з первинною напругою 110 кВ (№ IV). Найбільшу характеристику розкиду за відхиленням напруги має тягова підстанція з первинною напругою 110 кВ, найменшу – відповідно з напругою 154 кВ. Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 110 кВ.

Таблиця 3.7 – Числові характеристики усталеного відхилення напруги тягових підстанцій змінного струму

№ ТП	$M(\delta U)$	$Me(\delta U)$	$Mo(\delta U)$	$D(\delta U)$	$\sigma(\delta U)$	$Ex(\delta U)$	$As(\delta U)$	$\min(\delta U)$	$\max(\delta U)$
II	0.214	0.145	0.372	0.537	0.733	-0.753	0.188	-1.335	1.877
I	7.673	7.588	7.387	0.496	0.704	-0.537	0.307	5.191	9.538
VI	7.985	8.137	8.417	0.361	0.601	-0.669	-0.547	6.326	9.103
IV	8.942	8.851	8.549	0.794	0.891	6.362	-0.742	0.000	10.964
III	7.563	7.554	7.579	0.087	0.295	0.114	0.250	6.626	8.603

Емпіричні розподіли величини відхилення напруги приведені на рис. 3.17, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та відсутність мультимодальностей в розподілах. Розподіли відхилення напруги зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону збільшення числових характеристик положення. Закономірностей у зміні характеристик розкиду, при цьому, не спостерігається.

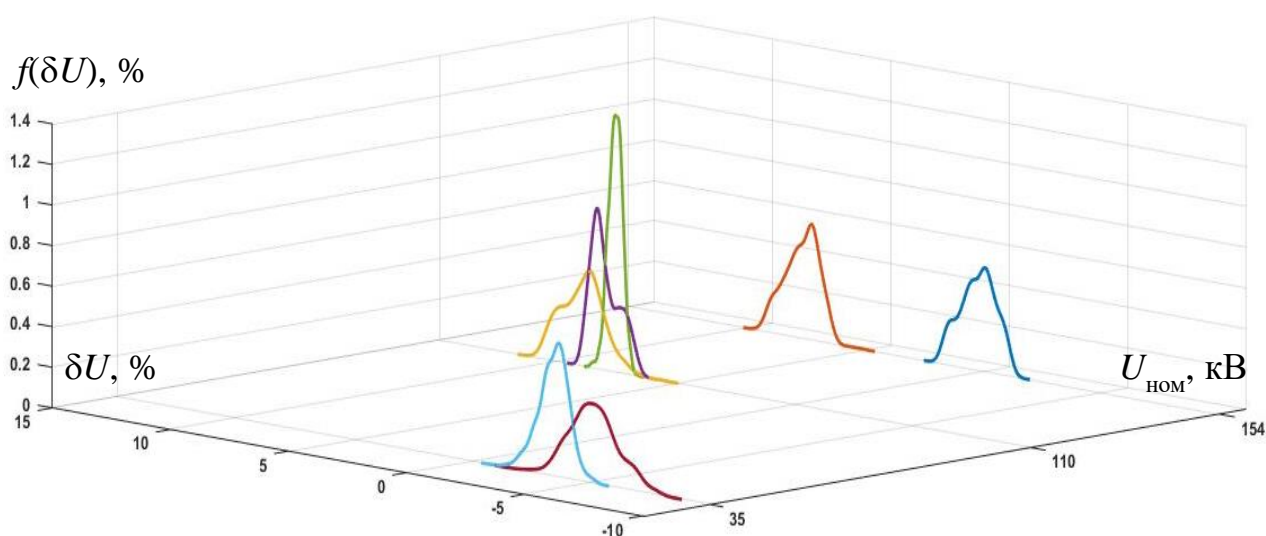


Рис. 3.17. Емпіричні розподіли усталеного відхилення напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

Дослідження часових реалізацій спотворення синусоїдності напруги на тягових підстанціях змінного струму показано у вигляді реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.18). Загальною закономірністю є збільшення математичного очікування кожної реалізації при відповідному зниженні класу напруги мережі.

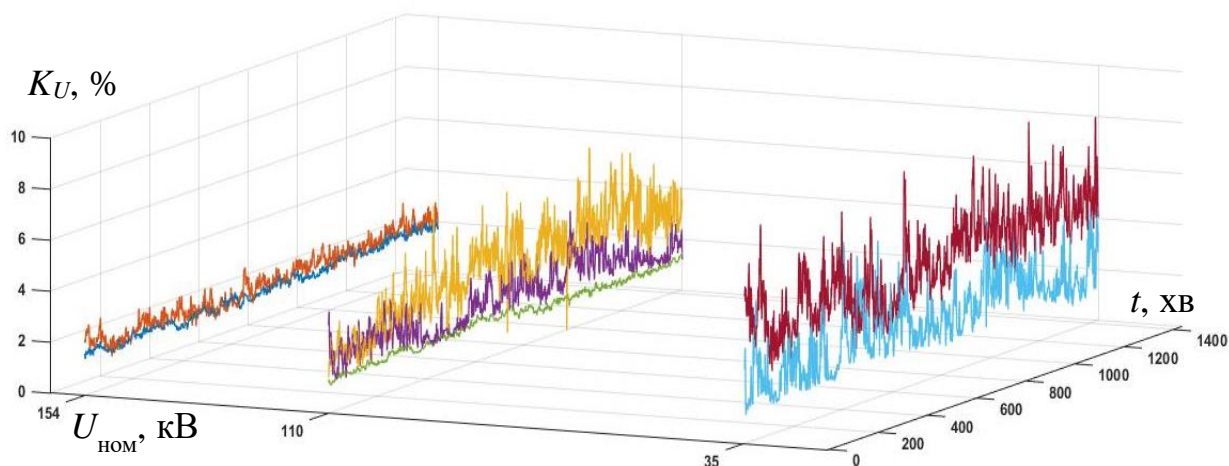


Рис. 3.18. Регістрограми коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

В табл. 3.8 приведені основні числові характеристики коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги. Мінімальне значення характеристики положення величини несинусоїдності напруги припадає на моду і медіану для тягової підстанції 154/110 кВ (№ III), максимальне – на математичне очікування для підстанції з первинною напругою 110 кВ (№ IV). Найбільшу характеристику розкиду за відхиленням напруги має тягова підстанція з первинною напругою 110 кВ, найменшу – відповідно з напругою 154/110 кВ. Максимальне відхилення від нормального розподілу за асиметрією припадає на підстанцію з первинною напругою 110 кВ (№ VI).

Таблиця 3.8 – Числові характеристики спотворення синусоїдності напруги тягових підстанцій змінного струму

№ ТП	$M(K_U)$	$Me(K_U)$	$Mo(K_U)$	$D(K_U)$	$\sigma(K_U)$	$Ex(K_U)$	$As(K_U)$	$\min(K_U)$	$\max(K_U)$
II	1.700	1.700	1.700	0.036	0.190	-0.109	0.132	1.183	2.383
I	1.968	1.967	1.867	0.095	0.308	0.002	0.252	1.150	3.217
VI	2.134	2.040	1.720	0.322	0.567	-0.058	0.671	1.160	4.640
IV	3.367	3.300	2.800	0.845	0.919	0.130	0.350	0.000	6.850
III	1.316	1.300	1.300	0.024	0.156	-0.261	0.428	0.917	1.833

Емпіричні розподіли величини спотворення синусоїдності напруги приведені на рис. 3.19, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та відсутні мультимодальності в розподілах. Розподіли відхилення напруги зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону зменшення числових характеристик положення. Характеристики розкиду збільшуються для класу районної напруги 35 кВ.

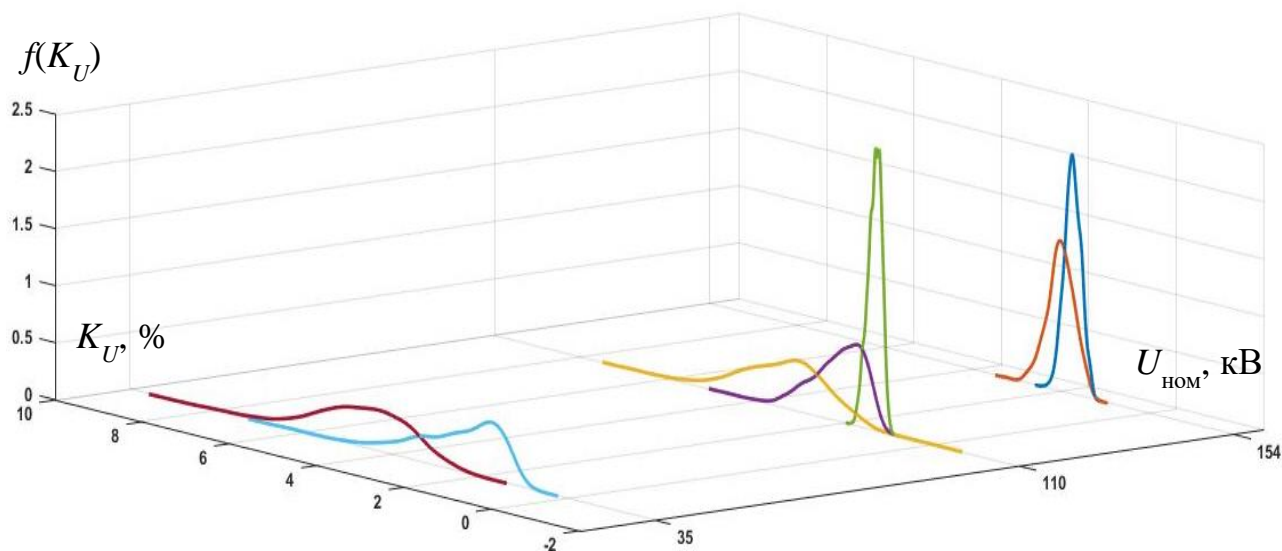


Рис. 3.19. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

Дослідження часових реалізацій несиметрії напруги на тягових підстанціях змінного струму показано у вигляді реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.20). Загальною закономірністю є зниження математичного очікування кожної реалізації при відповідному збільшенні класу напруги первинної мережі.

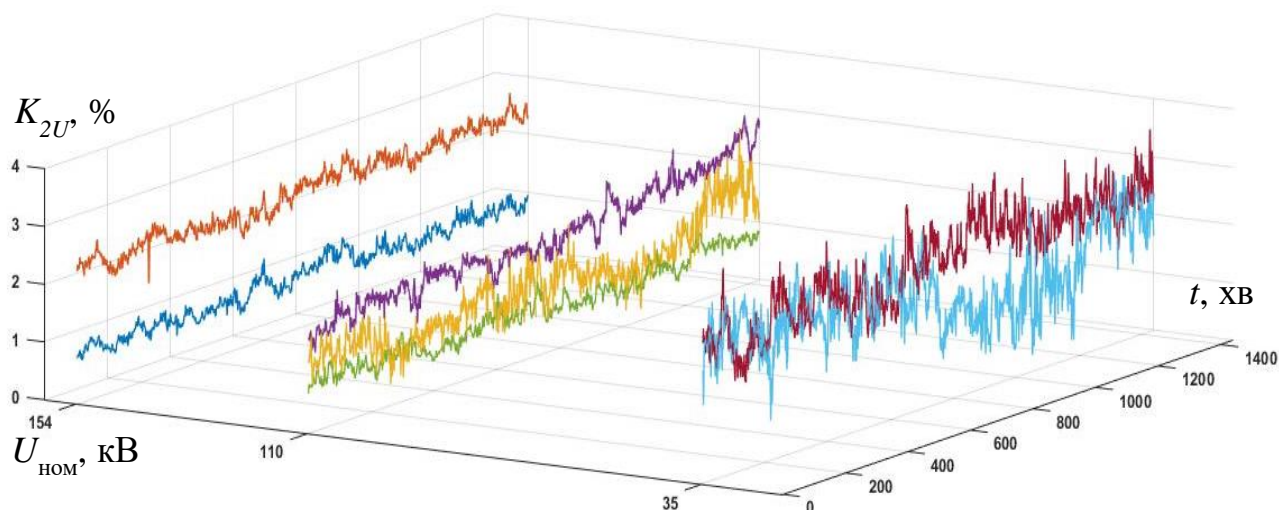


Рис. 3.20. Регістрограми коефіцієнта несиметрії напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

В табл. 3.9 приведені основні числові характеристики коефіцієнта несиметрії напруги. Мінімальне значення характеристики положення величини несиметрії напруги припадає на медіану для тягової підстанції з первинною напругою 154/110 кВ (№ III), максимальне – на математичне очікування і медіану для підстанції з первинною напругою 154 кВ (№ I). Найбільшу характеристику розкиду за несиметрією напруги має тягова підстанція з первинною напругою 110 кВ (№ IV), найменшу – відповідно з напругою 154 кВ (№ II). Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 110 кВ (№ IV).

Таблиця 3.9 – Числові характеристики несиметрії напруги тягових підстанцій змінного струму

№ ТП	$M(K_{2U})$	$Me(K_{2U})$	$Mo(K_{2U})$	$D(K_{2U})$	$\sigma(K_{2U})$	$Ex(K_{2U})$	$As(K_{2U})$	$\min(K_{2U})$	$\max(K_{2U})$
II	0.880	0.868	0.823	0.018	0.134	0.279	0.534	0.561	1.411
I	2.352	2.352	2.300	0.022	0.149	0.508	-0.222	1.659	2.818
VI	1.998	1.985	1.986	0.068	0.261	0.473	0.527	1.257	2.927
IV	1.197	1.144	1.207	0.111	0.333	1.016	0.552	0.000	2.743
III	0.787	0.785	0.810	0.021	0.146	0.043	0.264	0.378	1.302

Емпіричні розподіли величини несиметрії напруги приведені на рис. 3.21, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та відсутні мультимодальності в розподілах. Розподіли несиметрії напруги зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону зменшення числових характеристик положення. Характеристики розкиду збільшуються для класу напруги 35 кВ.

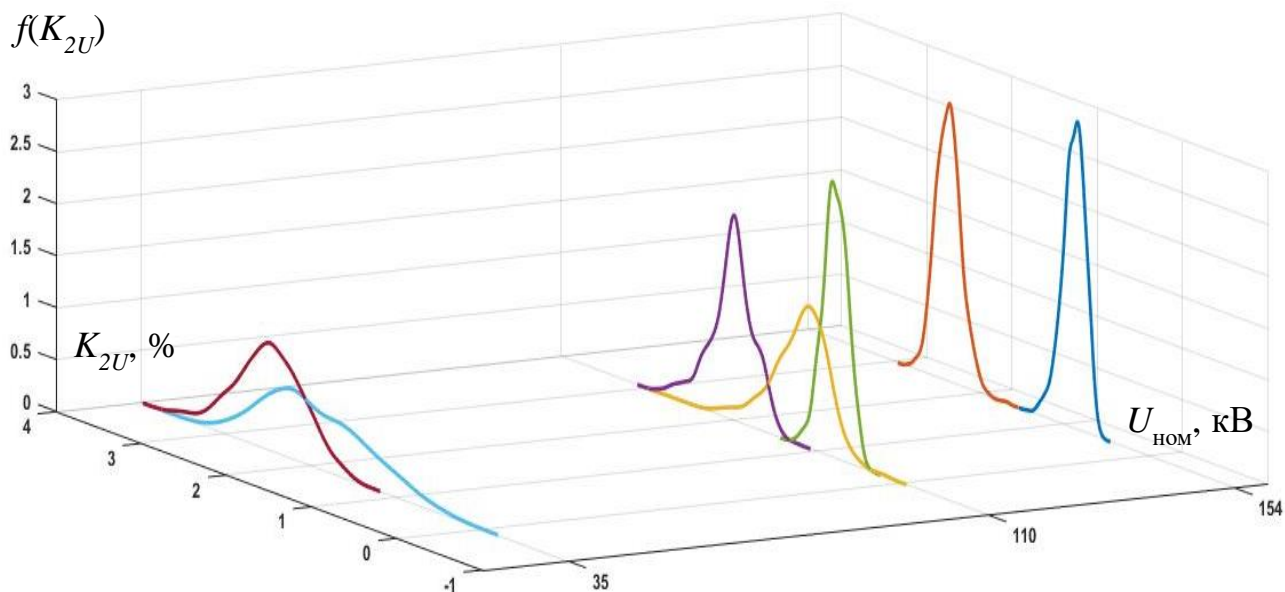


Рис. 3.21. Емпіричні розподіли коефіцієнта несиметрії напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

Дослідження часових реалізацій коефіцієнта спотворення струму тягових підстанцій змінного струму показано у вигляді реалізацій в залежності від величини первинної напруги (рис. 3.22). Загальною закономірністю є зниження математичного очікування кожної реалізації при відповідному збільшенні класу напруги первинної мережі.

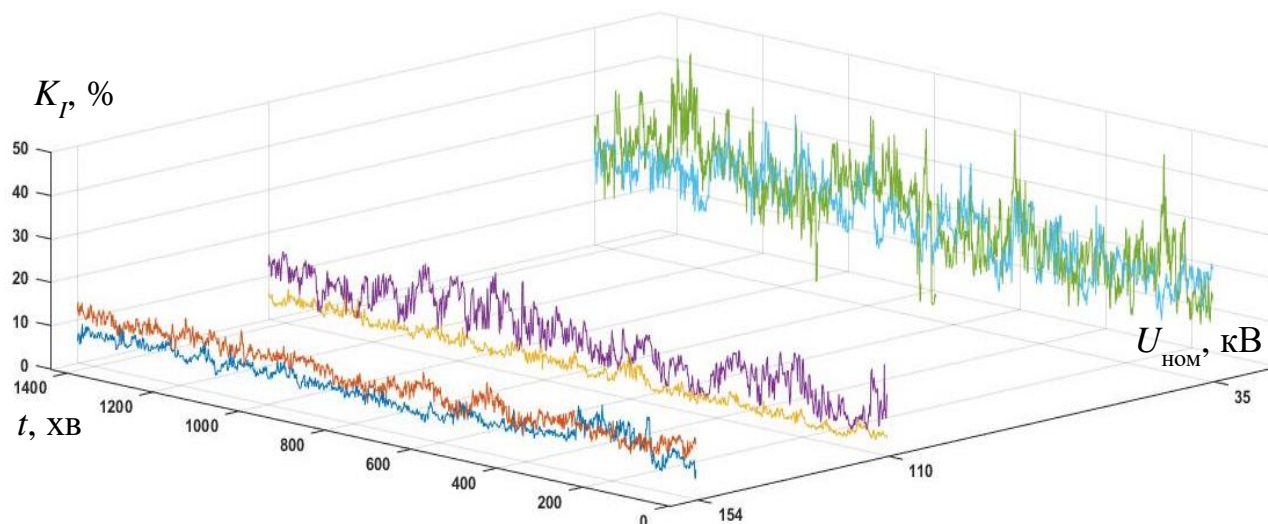


Рис. 3.22. Регістрограми коефіцієнта спотворення синусоїдності струму на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

В табл. 3.10 приведені основні числові характеристики коефіцієнта спотворення струму. Мінімальне значення характеристики положення величини спотворення струму припадає на медіану для тягової підстанції з первинною напругою 154 кВ (№ II), максимальне – на моду для підстанції з первинною напругою 110 кВ (№ VI). Найбільшу характеристику розкиду за спотворенням струму має тягова підстанція з первинною напругою 110 кВ (№ IV), найменшу – відповідно з напругою 154 кВ (№ I). Максимальне відхилення від нормального розподілу за ексцесом припадає на підстанцію з первинною напругою 154 кВ (№ II).

Таблиця 3.10 – Числові характеристики спотворення струму тягових підстанцій змінного струму

№ ТП	$M(K_I)$	$Me(K_I)$	$Mo(K_I)$	$D(K_I)$	$\sigma(K_I)$	$Ex(K_I)$	$As(K_I)$	$\min(K_I)$	$\max(K_I)$
II	8.030	7.562	7.304	4.152	2.038	2.632	1.492	3.966	17.165
I	11.045	11.126	11.022	2.654	1.629	-0.033	-0.154	5.441	16.491
VI	22.443	22.669	22.907	21.899	4.680	0.183	0.224	9.776	40.312
IV	24.312	24.016	20.000	47.546	6.895	0.634	0.232	2.774	49.926

Емпіричні розподіли величини коефіцієнта спотворення синусоїдності струму приведені на рис. 3.23, які показують орієнтування числових характеристик в площині номінальних напруг та відсутні мультимодальності в розподілах. Розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності струму зі зростанням класу напруги орієнтуються в сторону зменшення числових характеристик положення. Характеристики розкиду збільшуються для класу напруги 35 кВ.

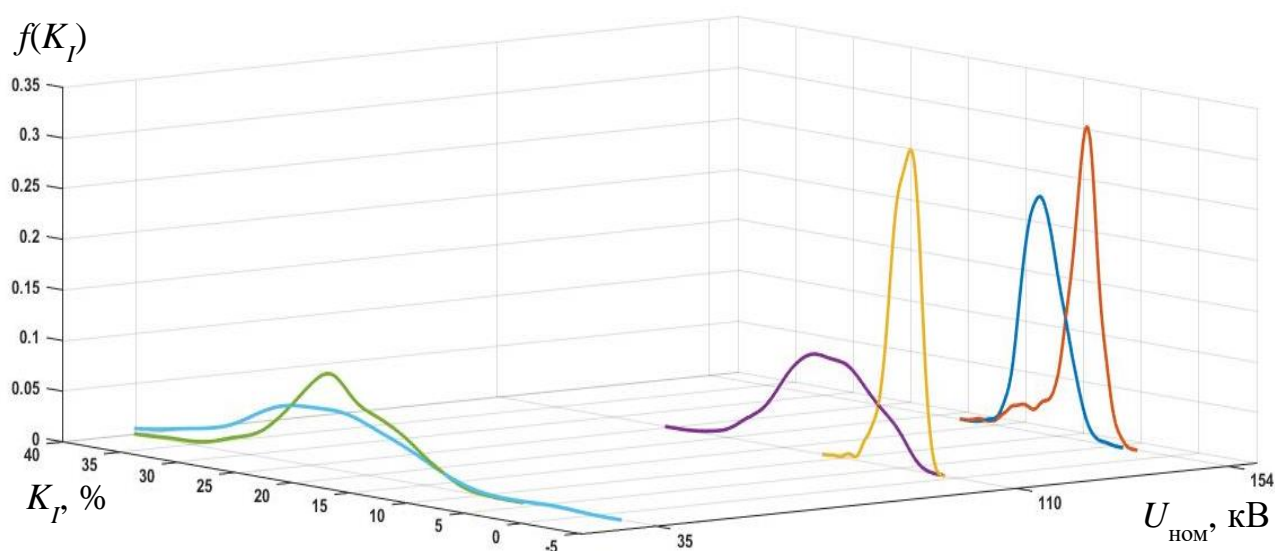


Рис. 3.23. Емпіричні розподіли коефіцієнта спотворення синусоїдності струму на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму

На рис. 3.24 показано фазові портрети системи тягового електропостачання змінного струму, отримані за кутами навантажень у кожній фазі трифазної системи. Фазові портрети для всіх дослідних підстанцій являють собою хаотичні поля розсіювання, закономірності в яких визначити складно.

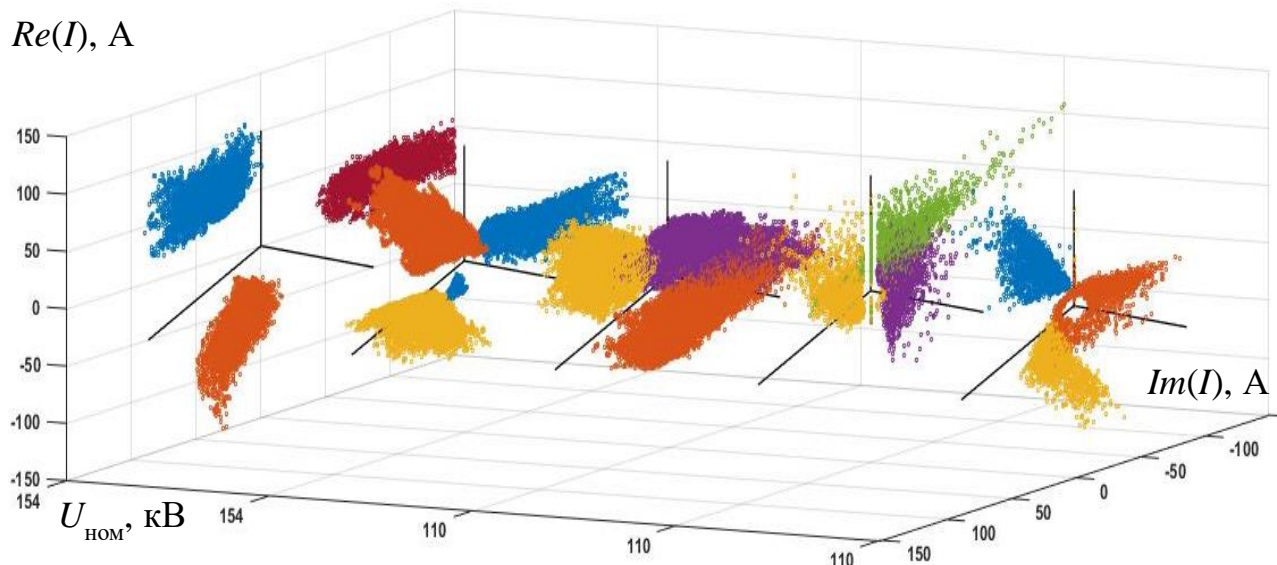


Рис. 3.24. Фазові портрети за кутами навантажень струмів
в системі змінного струму

В табл. 3.11 приведені зведені значення показників якості електроенергії в порівнянні систем тягового електропостачання постійного та змінного струму із врахуванням якості електроенергії, що постачається нетяговим споживачам.

Таблиця 3.11 – Показники якості електроенергії в системах електричної тяги

Показник	Приєднання	Нормоване значення	Постійний струм	Змінний струм
K_U	35 кВ	4 %	2,35 % (+)	5,84 % (-)
K_I		-	10 %	9,4 %
K_{2U}		2 %	0,82 % (+)	2,95 % (-)
ΔU		$\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$	6,5 % (-)	5,4 (-)
ΔU	3,3 кВ (=) 27,5 кВ (~)	$\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$	11% (-)	6,93% (-)

3.3. Оцінка режимних перетікань потужності

Для оцінки режимних перетікань потужності в тяговій мережі проведені додаткові дослідження на тягових підстанціях ЕЧЕ-24 Курилівка, ЕЧЕ-35 Булацелівка Південної залізниці проведені вимірювання параметрів споживання електричної енергії на приєднаннях 110 та 27,5 кВ

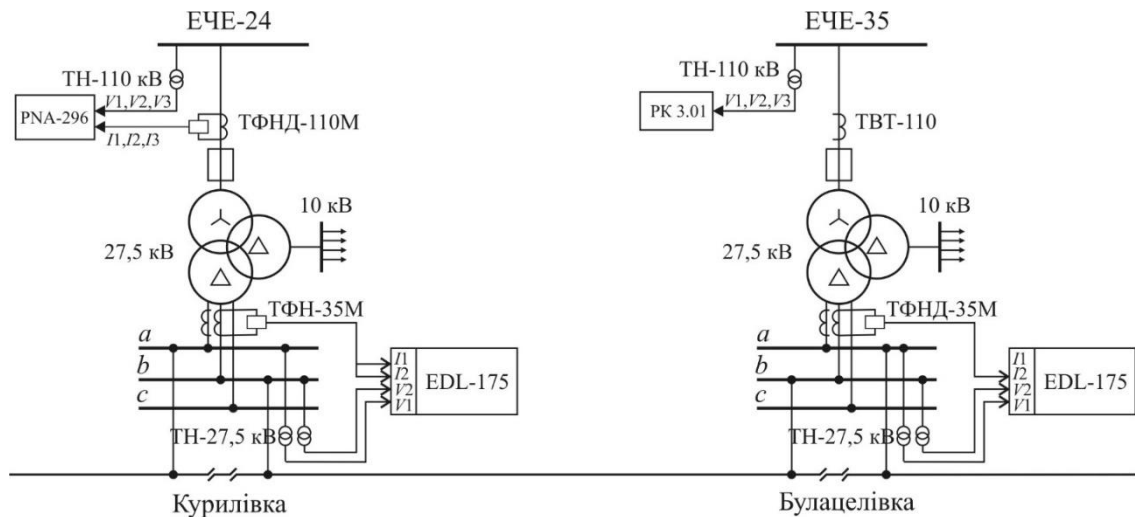


Рис. 3.25. Схема підключення вимірювальних пристроїв на тягових підстанціях

Вимірювання проводились в період з 13⁰⁰ 05.12.2013 до 13⁰⁰ 06.12.2013.

Результати вимірювань приведені на рис. 3.26-3.34.

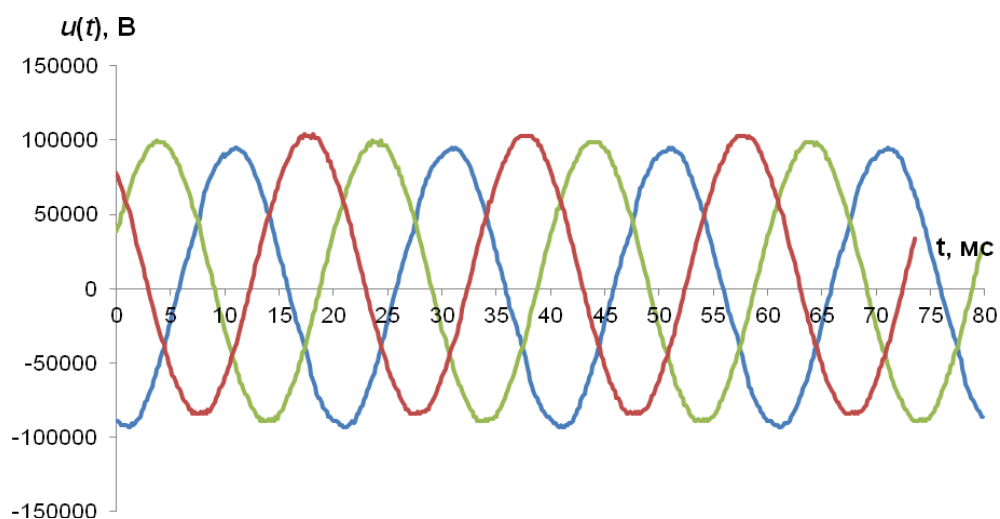


Рис. 3.26. Миттєві значення фазних напруг в мережі 110 кВ в момент часу 16⁰⁰ 05.12.2013

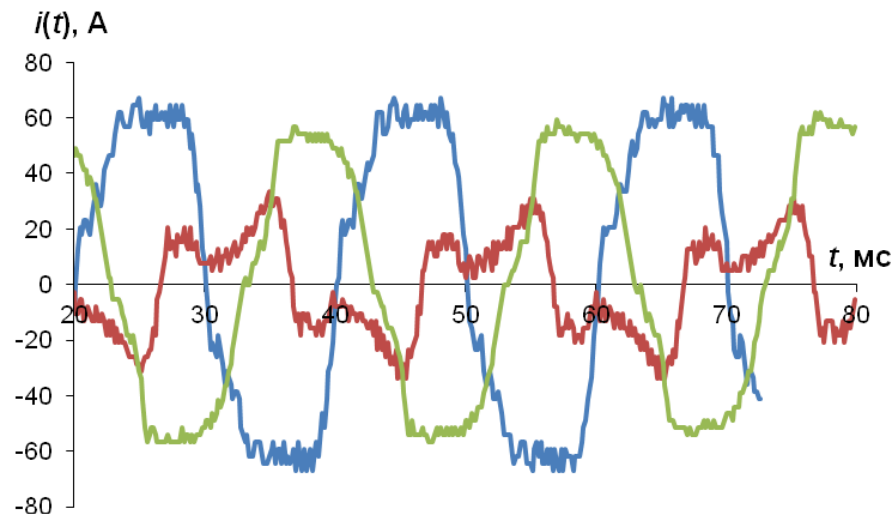


Рис. 3.27. Миттєві значення фазних струмів в мережі 110 кВ
в момент часу 16⁰⁰ 05.12.2013

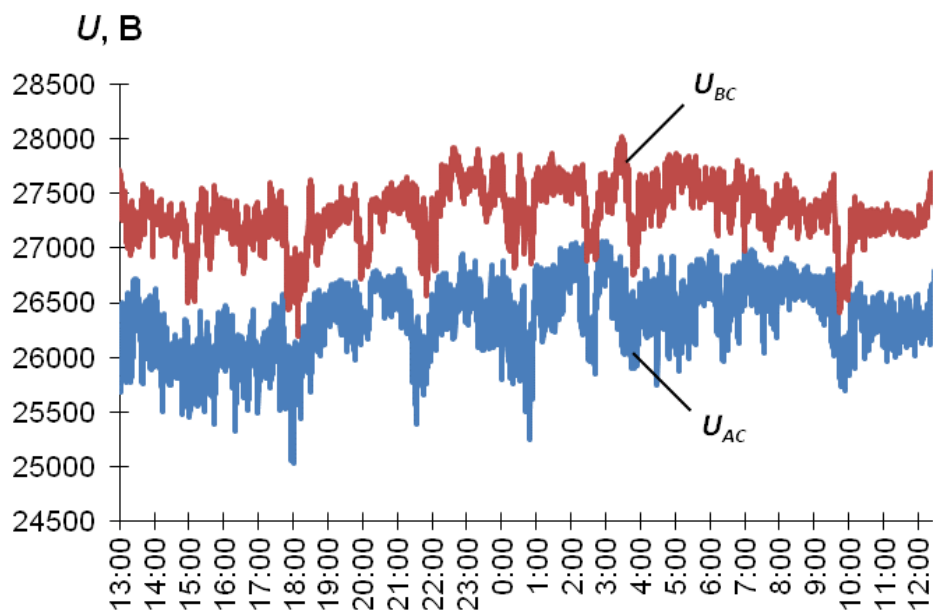


Рис. 3.28. Напруги в тяговій мережі 27,5 кВ
(АС – ліве плече, ВС – праве плече)

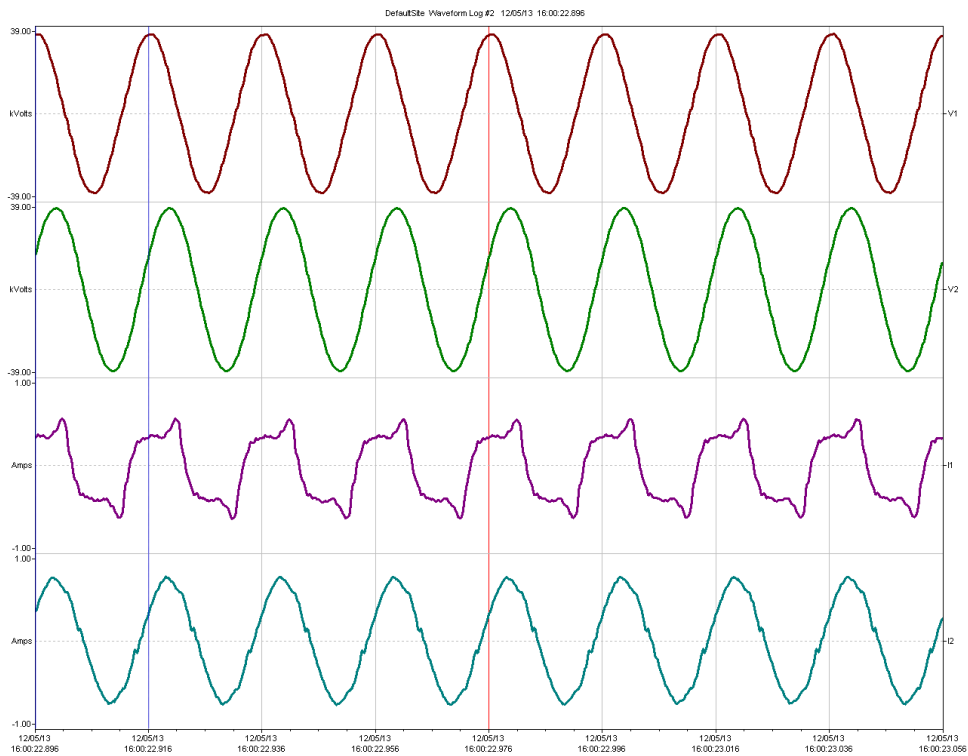


Рис. 3.29. Осцилограми напруг і струмів плечей живлення (05.12.2013 16⁰⁰)

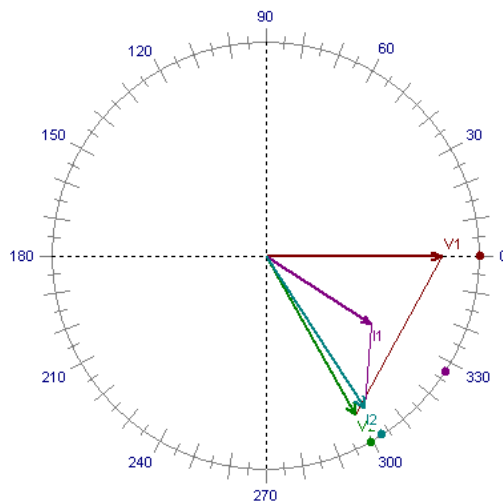


Рис. 3.30. Векторна діаграма напруг і струмів плечей живлення
(05.12.2013 16⁰⁰)

Ліве плече (струм I1) завантажене первинним струмом електровозу, який має характерну форму. У правому плечі (струм I2) протікає практично синусоїдний струм за відсутності тягового навантаження.

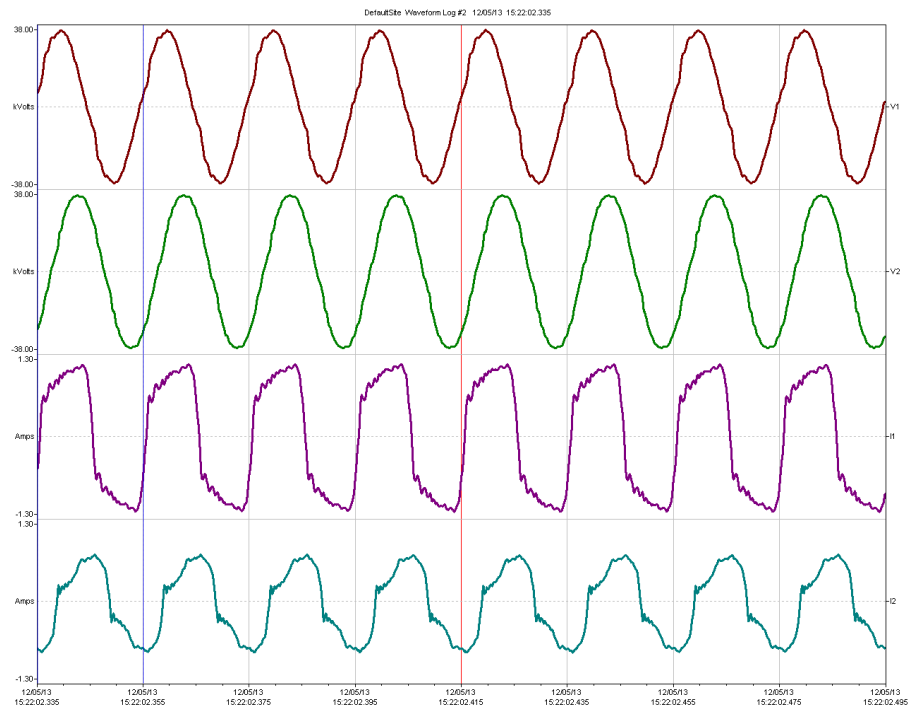


Рис. 3.31. Осцилограма напруг і струмів плечей живлення (05.12.2013 15²²)

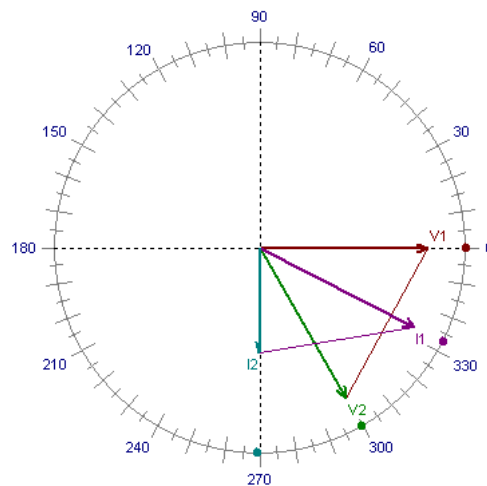


Рис. 3.32. Векторна діаграма напруг і струмів плечей живлення (05.12.2013 15²²)

Векторну діаграму (рис. 3.22) приведено при відсутності вирівнювального струму при «розібраному» посту секціонування. Форми кривих струму та кути зсуву фаз мають характерні для тягового навантаження значення.

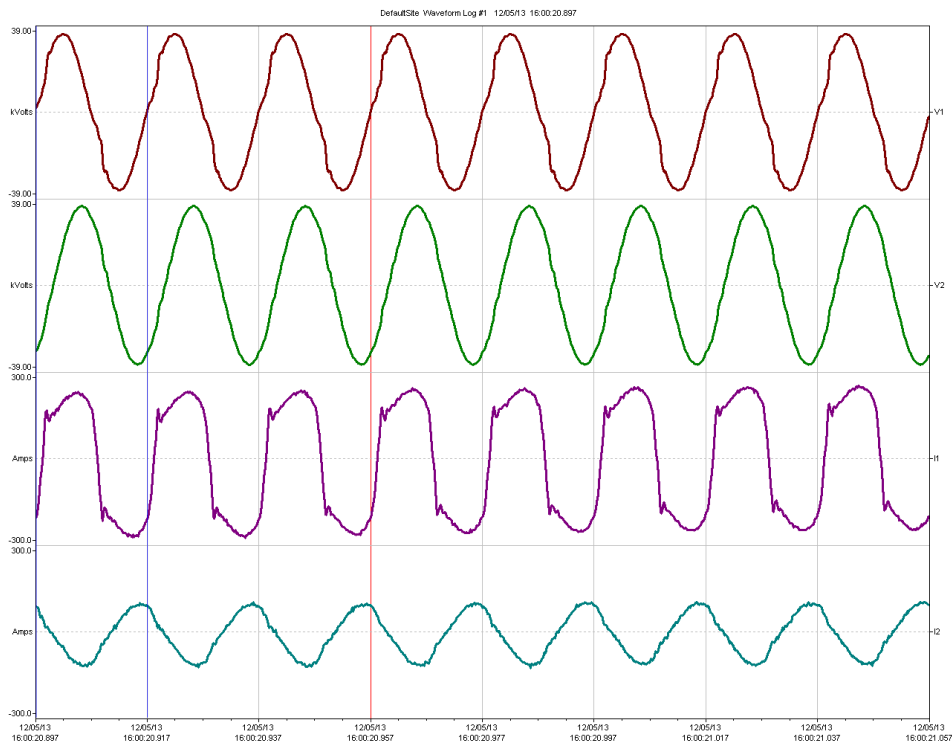


Рис. 3.33. Осцилограма напруг і струмів плечей живлення (05.12.2013 16⁰⁰)

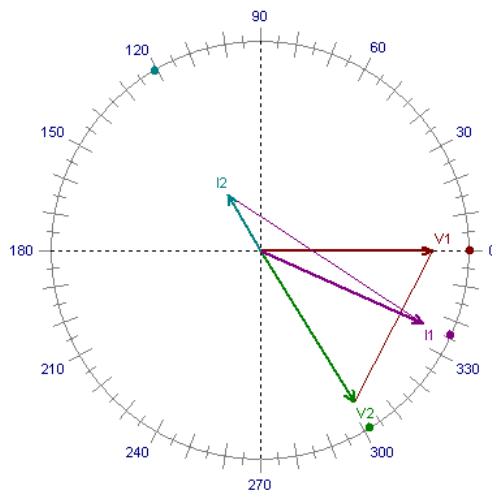


Рис. 3.34. Векторна діаграма напруг і струмів плечей живлення
(05.12.2013 16⁰⁰)

В період з 13⁰⁰ 23.04.14 до 11⁰⁰ 24.04.14 на тяговій підстанції ЕЧЕ-Шевченко представниками ДНУЗТ проведені вимірювання параметрів електроспоживання відповідно до узгодженої програми. Підключення приладів SATEC EDL-175xr виконано у вторинні кола ТН-27,5 кВ та ТТ-1500/5 обох вводів Т1, Т2 трансформаторів.

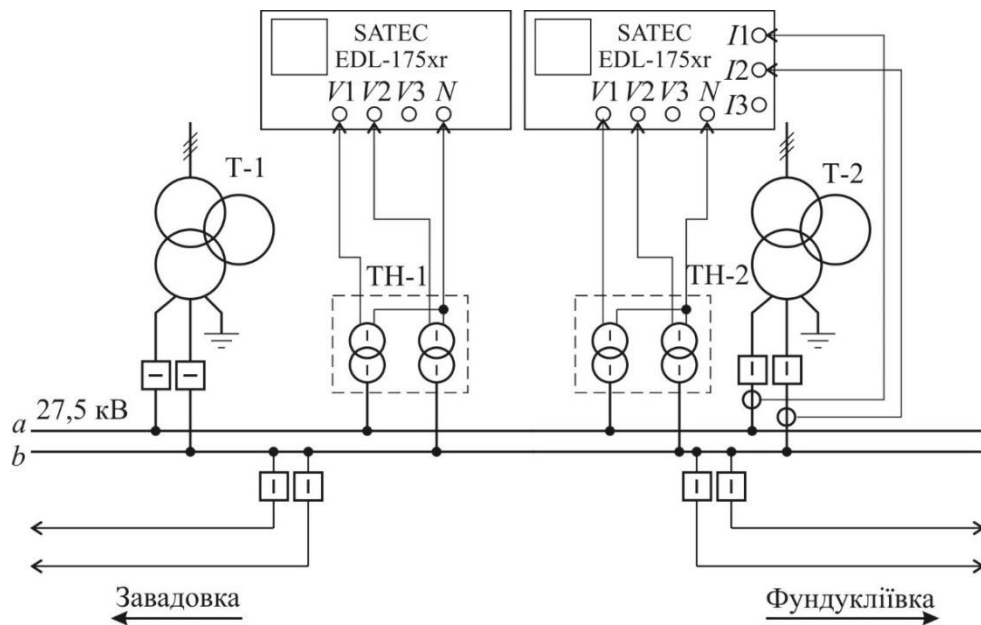


Рис. 3.35. Схема підключення приладів на тяговій підстанції III

В період вимірювань в роботі знаходився трансформатор T2. Схема живлення ділянки відповідала нормально встановленій.

За вказаний період отримані профілі навантажень активної та реактивної потужностей за даними системи АСКОЕ для подальшого зіставлення.

Схема вимірювань відповідала наступній:

V1 – напруга плеча живлення фази «А», напрямком до ст. Фундукліївка;

I1 – струм плеча живлення у напрямку до ст. Фундукліївка;

V2 – напруга плеча живлення фази «В», напрямком до ст. Завадовка;

I2 – струм плеча живлення у напрямку до ст. Завадовка.

У фазі «В» працює пристрій компенсації реактивної потужності величиною 1/3 від встановленої потужності.

Детальний профіль активного навантаження першого плеча живлення приведено на рис. 3.36.

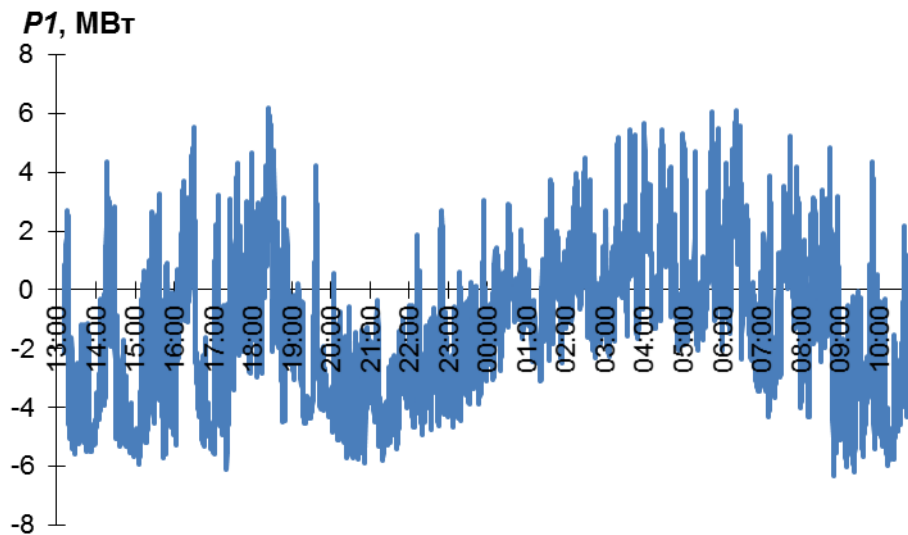


Рис. 3.36. Профіль активної потужності фази «А»

Фактично 70 % інтервалу спостереження припадає на режим генерації активної потужності зі сторони тягової мережі, інші 30 % часу відносяться до режиму споживання активної потужності. Найбільшого значення споживання потужності активної потужності сягає у нічний час після 0:00 до 9:00 та у вечірні часи 17:00 – 19:00.

На рис. 3.37 показано детальний профіль реактивного навантаження першого плеча. З точки зору режиму споживання, то 100 % інтервалу спостереження відповідає режиму споживання реактивної електроенергії зі сторони шин тягової підстанції.

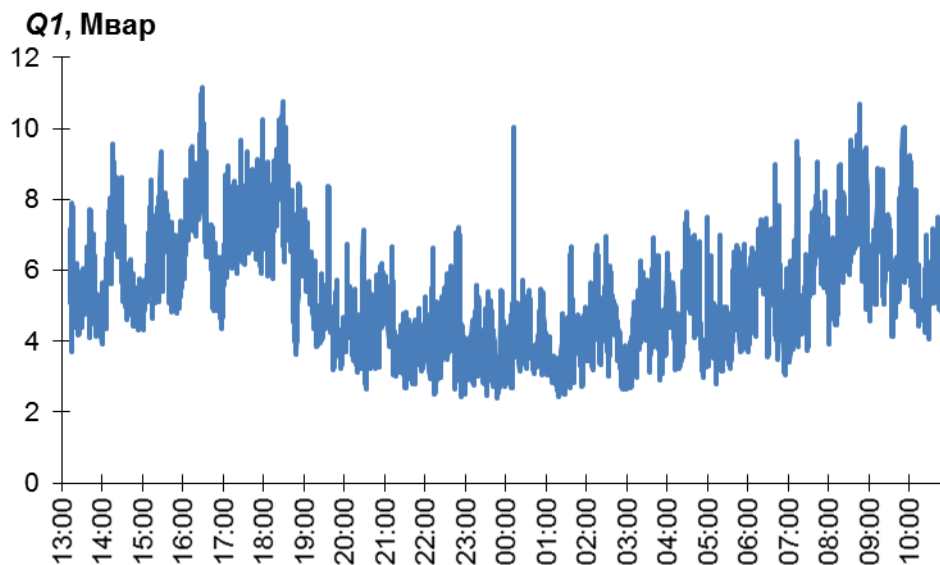


Рис. 3.37 Профіль реактивної потужності фази «А»

Детальний профіль активного навантаження другого плеча живлення приведено на рис. 3.38.

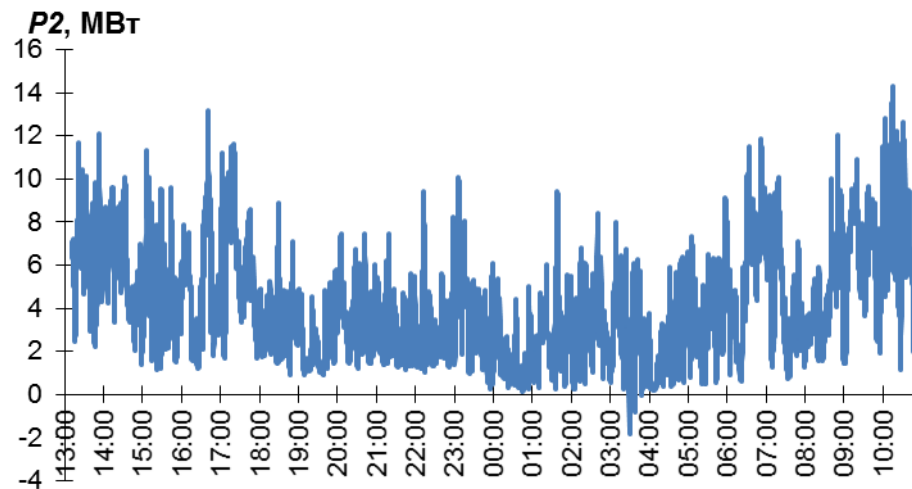


Рис. 3.38. Профіль активної потужності фази «В»

Режим споживання активної потужності у даній фазі відповідає її споживанню за винятком окремого інтервалу моменту часу між 03:00 та 04:00, який носить випадковий характер і суттєвого впливу на загальну картину не має.

На рис. 3.39 приведено детальний профіль реактивної потужності у другому плечі живлення. Оскільки у даній фазі працює компенсуючий пристрій, то наявні режими і споживання і генерації реактивної електроенергії. На всьому інтервалі спостереження 54 % часу відповідає режиму споживання та 46 % генерації. Такий розподіл режимів вказує на цілком доцільну обрану потужність компенсуючого пристрою у даному плечі живлення.

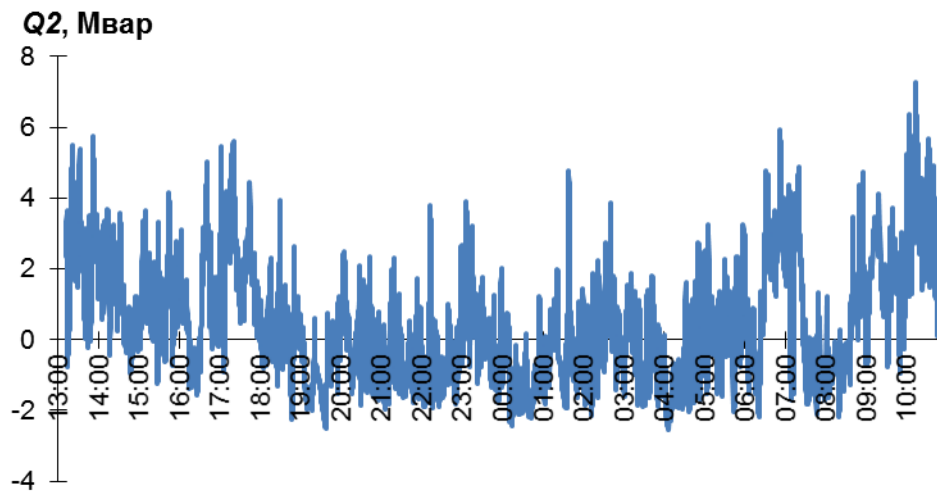


Рис. 3.39. Профіль реактивної потужності фази «В»

Лічильниками електроенергії на вводах трансформатора 27,5 кВ фіксується результуюча потужність обох плечей живлення з розділенням за квадрантами.

На рис. 3.47 приведено детальний профіль активної потужності, яка визначає сумарне тягове навантаження обох плечей живлення.

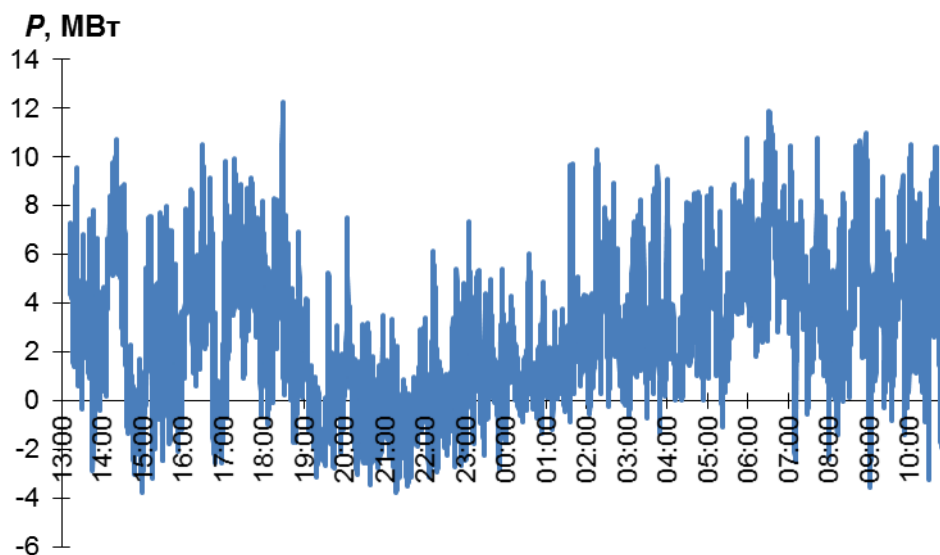


Рис. 3.40. Активна потужність обох плечей живлення

В результаті накладання профілів лівого та правого плечей живлення, майже на 82 % часу інтервалу спостереження приходиться режим

споживання електроенергії від шин тягової підстанції, інші 18 % часу становлять режим генерації активної потужності зі сторони тягової мережі та у разі відсутності стороннього навантаження можуть призвести до перетікання активної потужності безпосередньо в первинну мережу.

На рис. 3.48. показано сумарний профіль реактивного навантаження тягової підстанції. В результаті накладання профілів потужностей плечей, маємо на всьому протязі інтервалу спостереження режим споживання реактивної електроенергії.

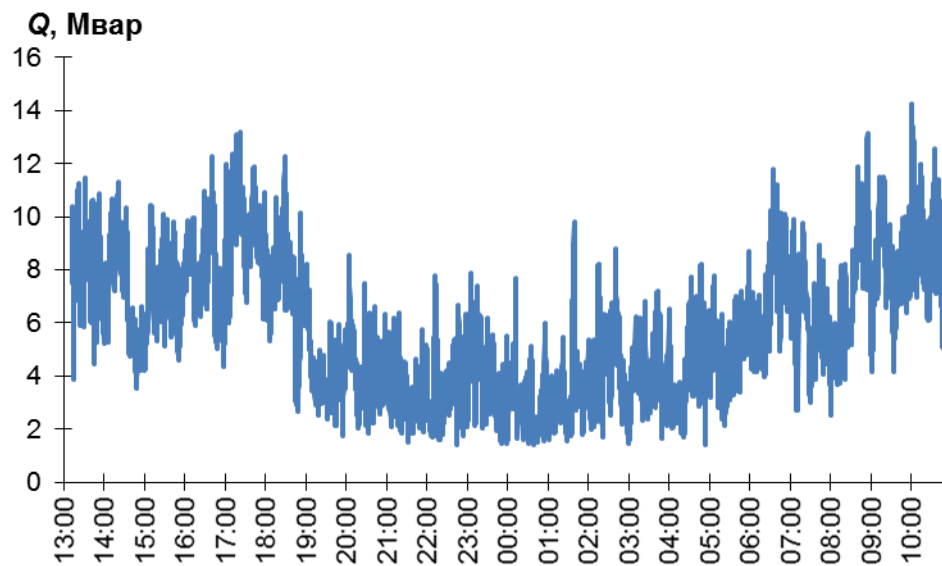


Рис. 3.41. Реактивна потужність обох плечей живлення підстанції

На рис. 3.42 – 3.44 приведені результати зіставлення усереднених значень вимірних потужностей та зафіксованих АСКОЕ за розділенням їх за квадрантами.

Аналіз зіставлення даних показує достатньо хороший кореляційний зв'язок між двома величинами. Існуючі в певні моменту часу розбіжності можна пояснити низькою чутливістю вимірювальних кліщів з номінальним струмом 30 А при вимірюванні вторинних струмів до 5 А, розсинхронізацією у часі, різними алгоритмами усереднення величин та певними особливостями обліку електроенергії у несинусоїдних режимах.

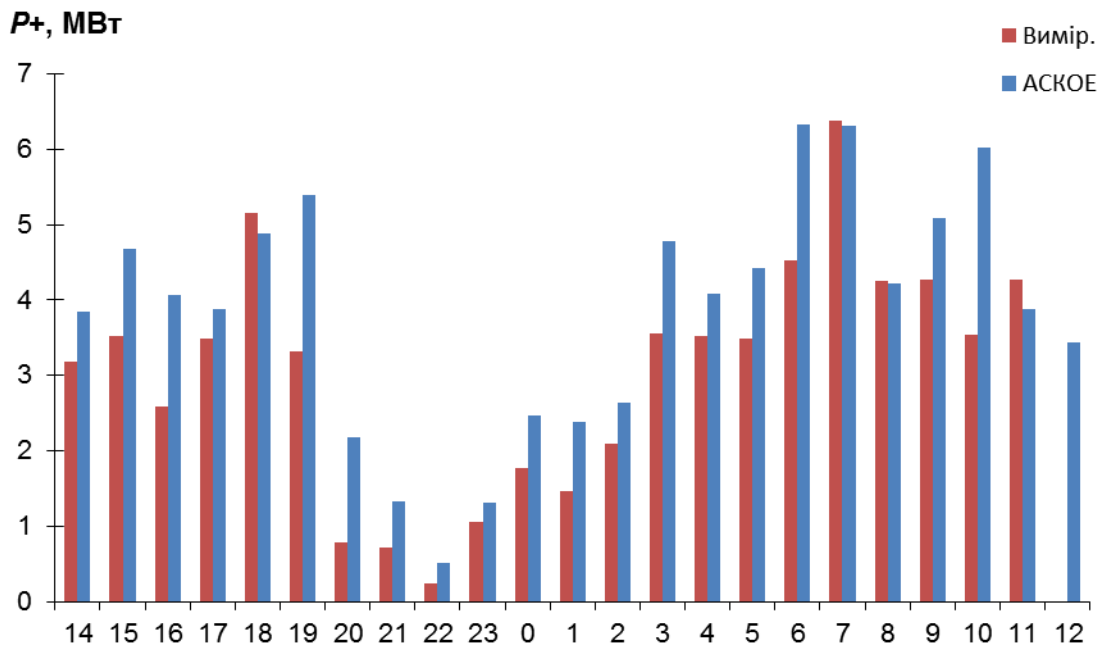


Рис. 3.42. Споживання активної потужності за годинами доби

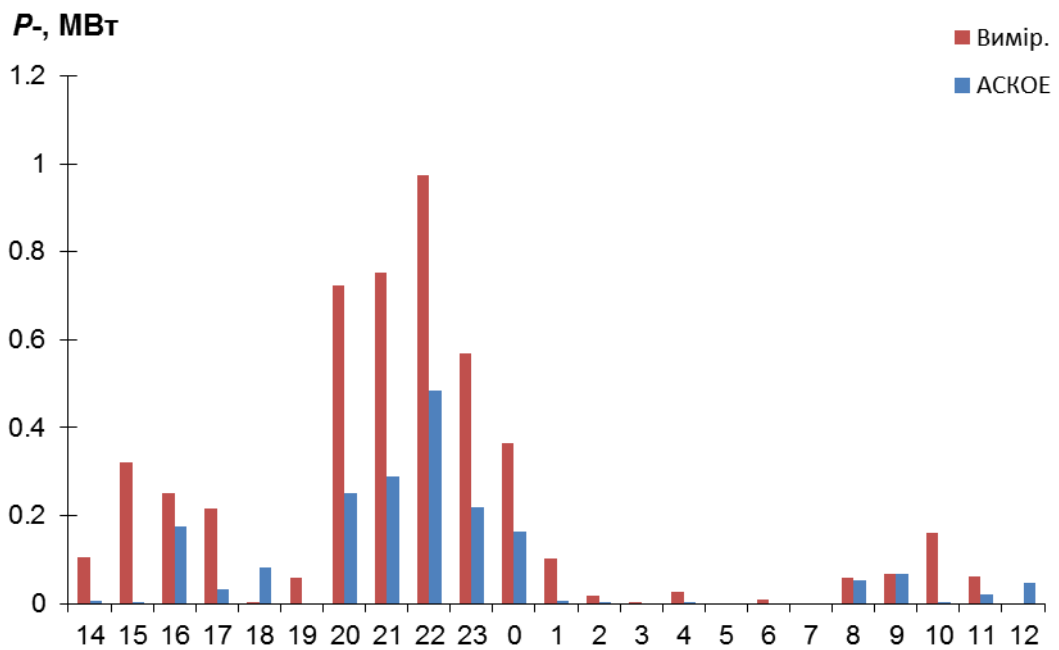


Рис. 3.43. Генерація активної потужності за годинами доби

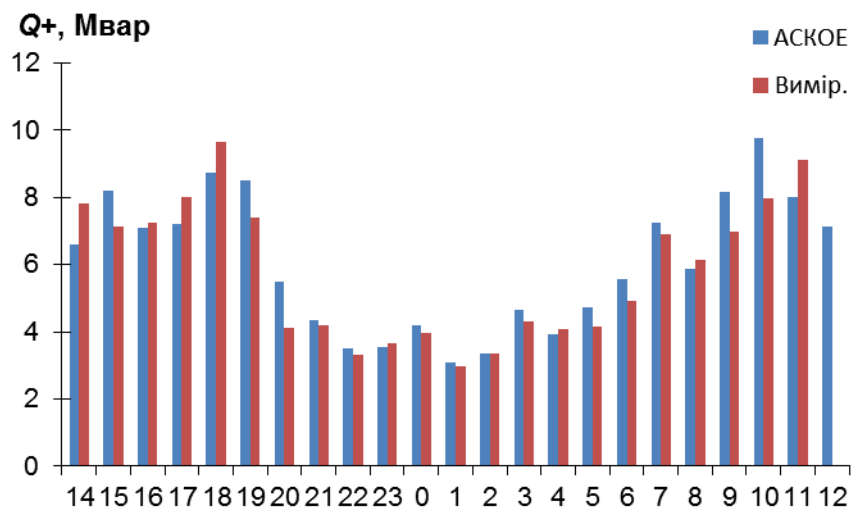


Рис. 3.44. Споживання реактивної потужності за годинами доби

Генерації реактивної потужності ні вимірюваннями ні системою АСКОЕ не зафіксовано. На рис. 3.45 – 3.47 представлені вибіркові осцилограми режимів споживання електроенергії.

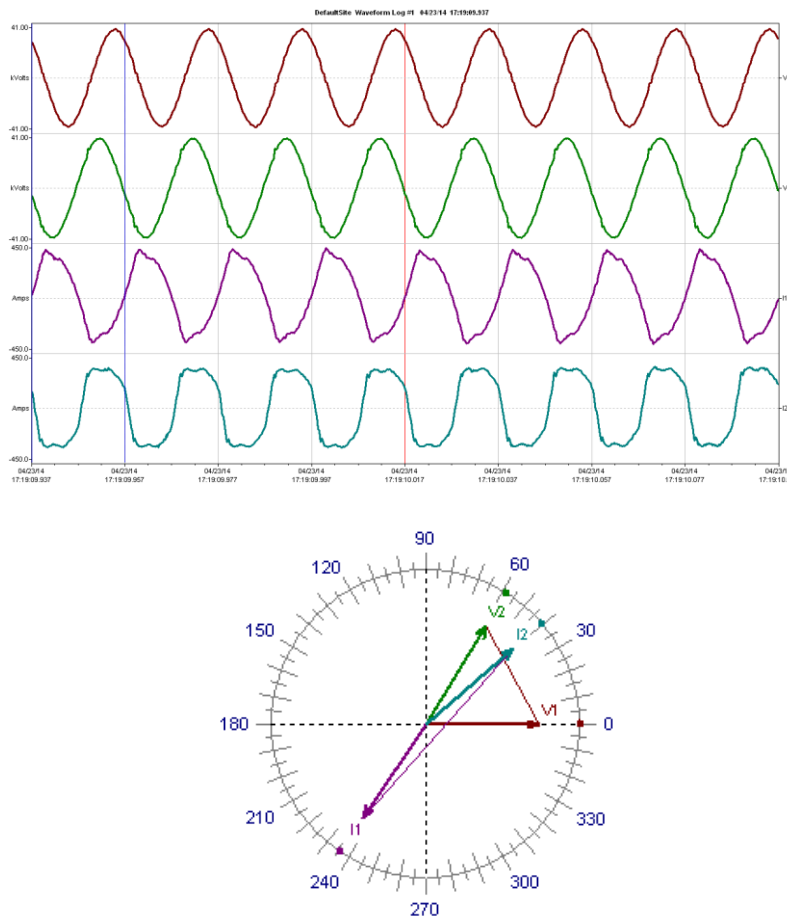


Рис.3.45. Осцилограми струмів і напруги 23.04.14 17:19:10, у плечі фази «А» 124° , у плечі фази «В» $17,5^\circ$

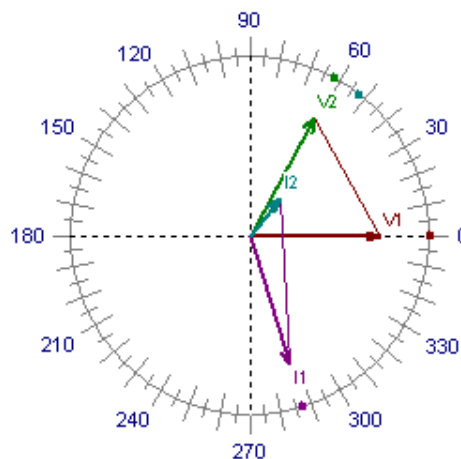
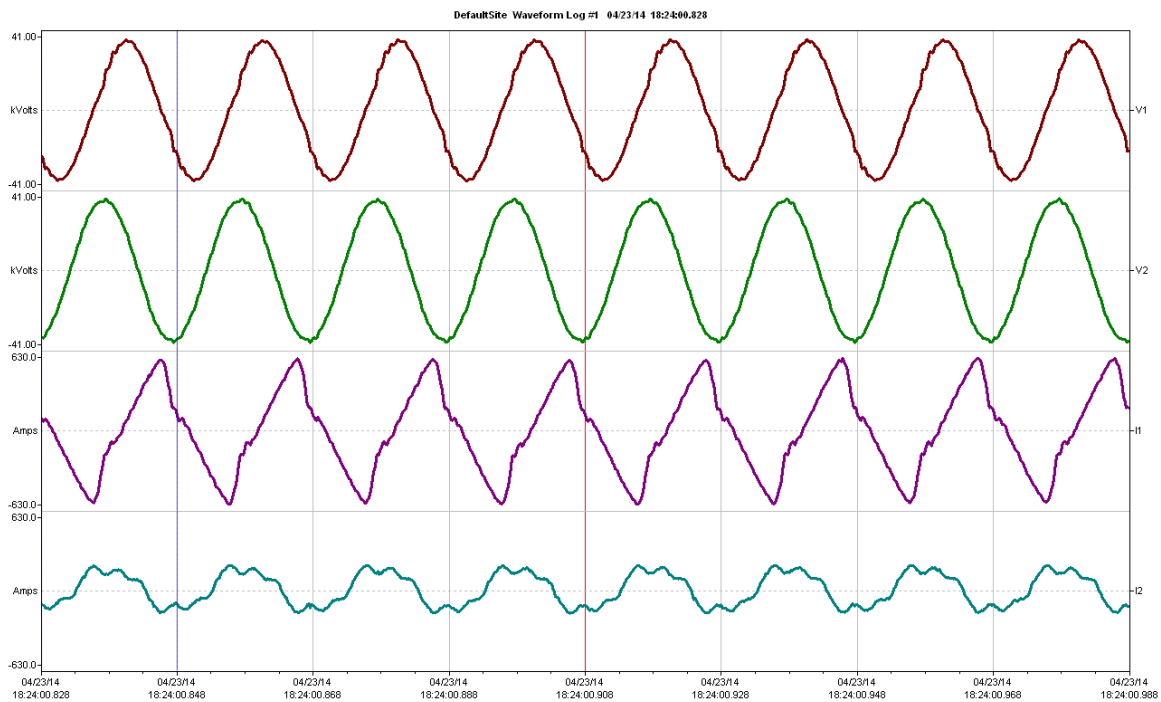


Рис. 3.46. Осцилограми струмів і напруги 23.04.14 18:24:00
у плечі фази «А» $72,9^\circ$, у плечі фази «В» $9,2^\circ$

Виконаємо аналіз умов виникнення, спектрального складу та ортогональних складових вирівнювального струму.

Як видно з рис. 3.45, 3.46 праве плече тягової підстанції ЕЧЕ-35 Булацелівка завантажене тяговим струмом (I1), ліве плече завантажене вирівнювальним струмом, який знаходиться в протифазі з напругою, тобто маємо режим генерації енергії в мережу. На осцилограмі суміжної підстанції в той же момент часу вирівнювальний струм знаходиться майже в протифазі. Розглянемо цей момент часу детальніше, та виконаємо деякі розрахунки.

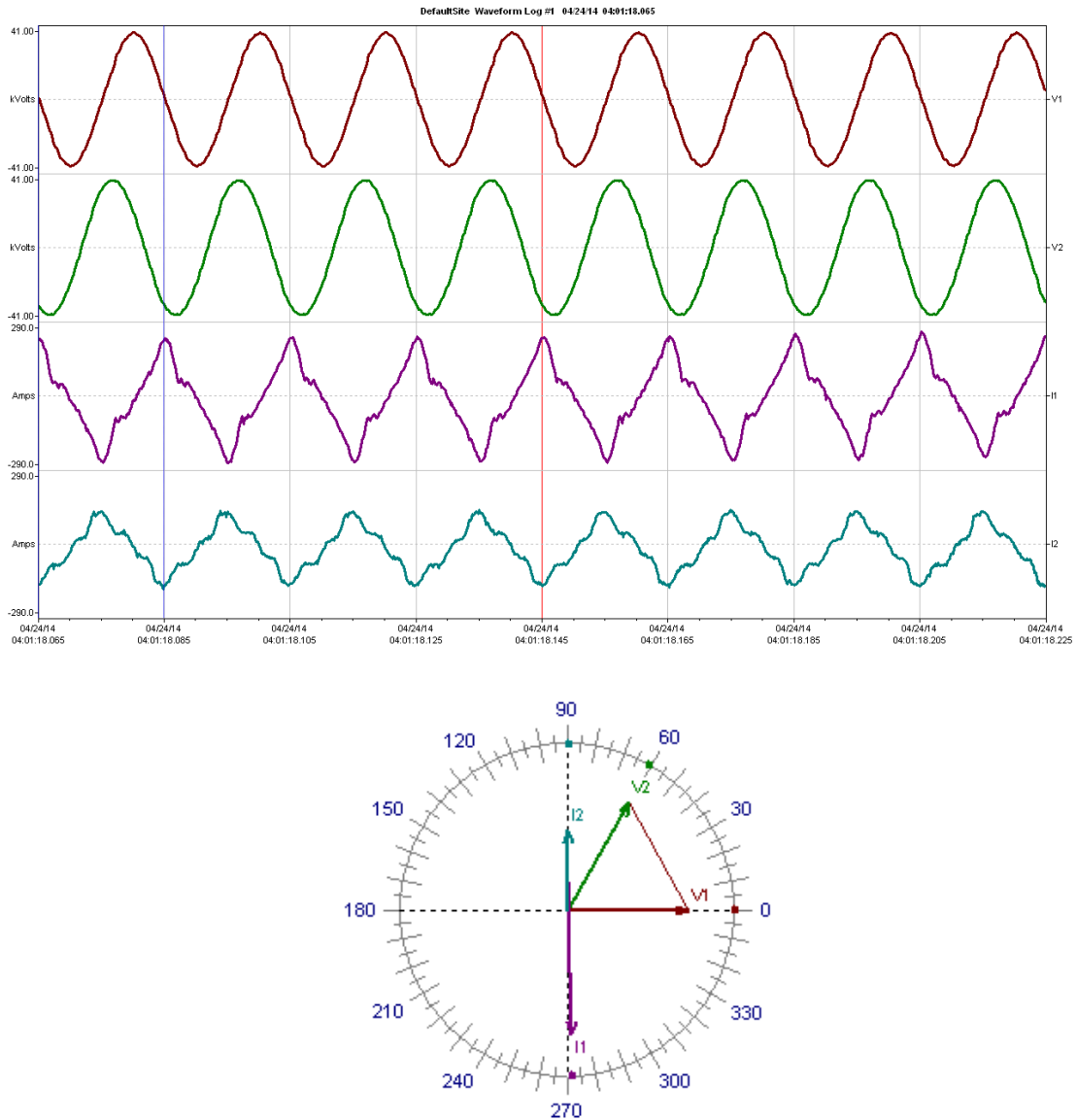


Рис. 3.47. Осцилограми струмів і напруги 24.04.14 04:01:18
у плечі фази «А» $87,7^\circ$, у плечі фази «В» -29°

Напруги на шинах 27,5 кВ суміжних підстанцій опишемо
комплексними векторами

$$U_1 := 27,27 \cdot e^{-j \cdot 60 \cdot \frac{\pi}{180}} \quad U_2 := 26,95 \cdot e^{-j \cdot 58,2 \cdot \frac{\pi}{180}}$$

За модулем напруги відрізняються незначно, приблизно $27,27 - 26,95 = 0,32$ кВ, крім цього наявний кут зсуву фаз $60 - 58,2^\circ = 1,8^\circ$. Визначимо векторну різницю напруги, матимемо

$$U_2 - U_1 = 0.566 + 0.712i$$

$$|U_2 - U_1| = 0.91 \quad \arg(U_2 - U_1) \cdot \frac{180}{\pi} = 51.491$$

Таким чином, з урахуванням куту зсуву фаз та різниці напруг за модулями, модуль векторної різниці напруги збільшується до 0,9 кВ з кутом 51,5 °.

З урахуванням марки тягової мережі ПБСМ-70+МФ-100+Р-65 та довжини ділянки 41,75 км, визначимо вирівнювальний струм розрахунковим шляхом

$$I := \frac{U_2 - U_1}{(0.113 + j \cdot 0.393) \cdot 41.75} \cdot 10^3 = 49.244 - 20.365i$$

З останнього виразу видно, що вирівнювальний струм в основному має активну складову величиною майже 50 А та реактивну величиною 20 А. В залежності від підстанції реактивна складова матиме ємнісний (ЕЧЕ-24 Курилівка) або індуктивний (ЕЧЕ-35 Булацелівка) характер у відповідному квадранті генерування потужності. На комплексній площині розраховані вектори матимуть вигляд, приведений на рис. 3.48.

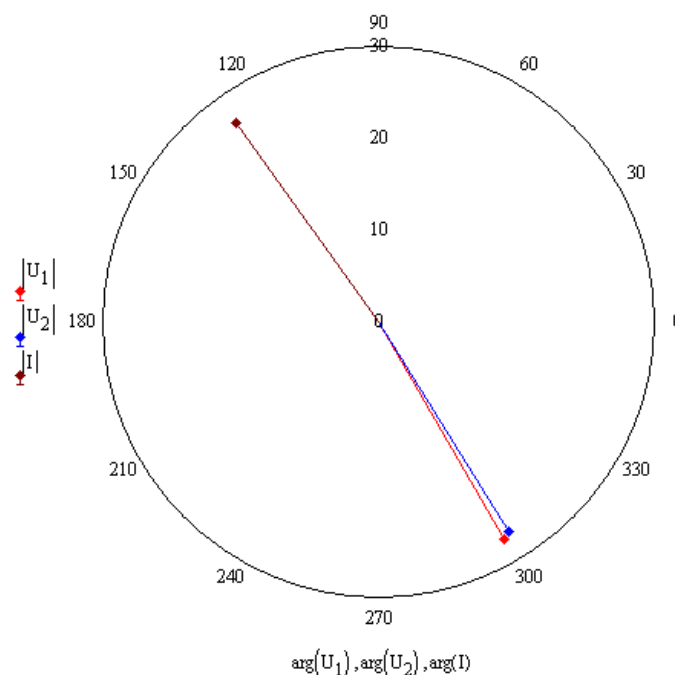


Рис. 3.48. Вектори напруг та вирівнювальних струмів на комплексній площині

Завдяки можливості оперативного «розбирання» поста секціонування, та оцінці поїзної ситуації за виконаними графіками руху, зафіксовані осцилограми вирівнювальних та тягових струмів окремо та разом.

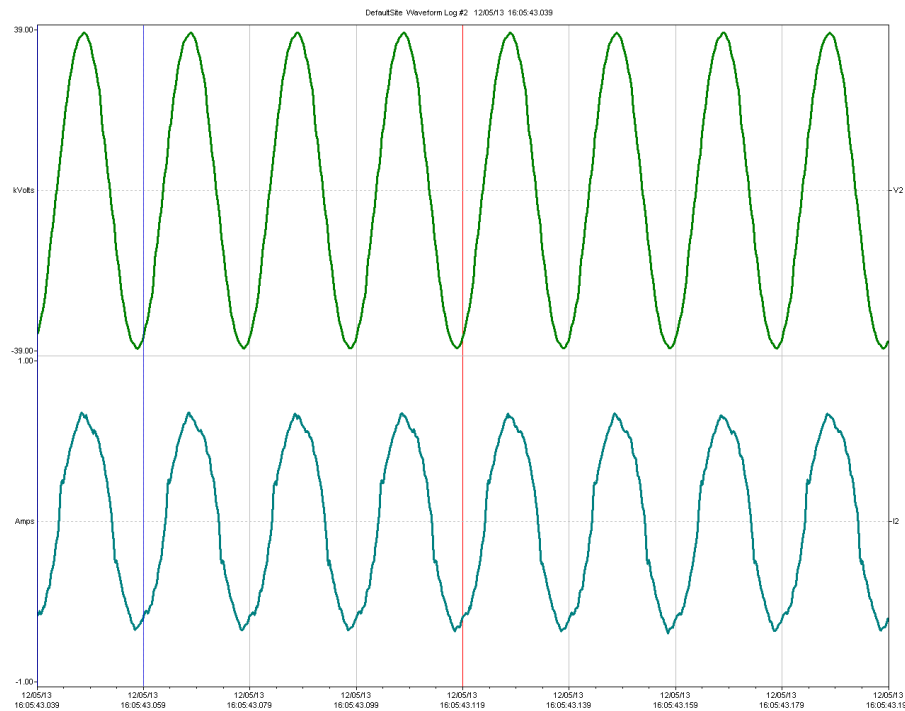


Рис. 3.49. Осцилограма напруги і струми плеча живлення при протіканні вирівнювального струму без тягового навантаження

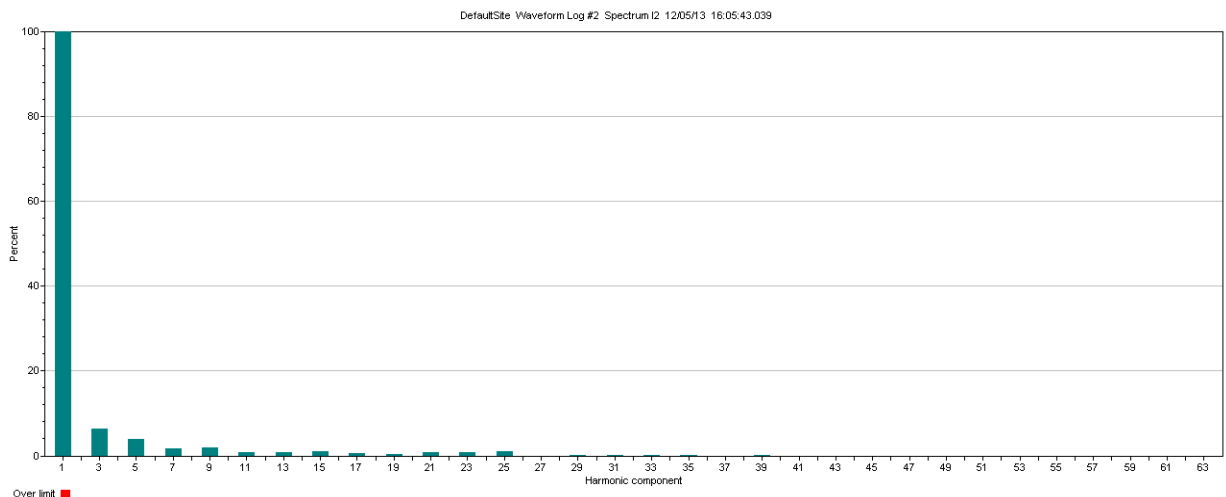


Рис. 3.50. Гармонійний склад вирівнювального струму без тягового навантаження

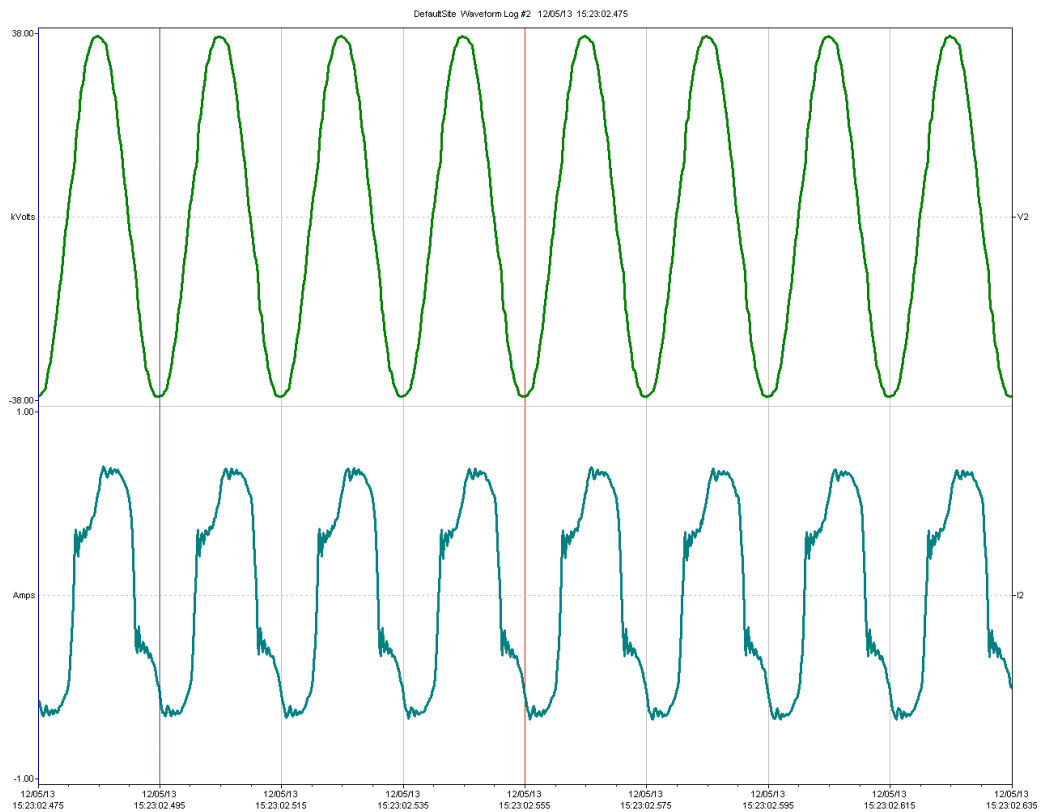


Рис. 3.51. Осцилограми напруги і струму плеча живлення без вирівнювального струму з наявністю тягового навантаження при відключеному ПСК

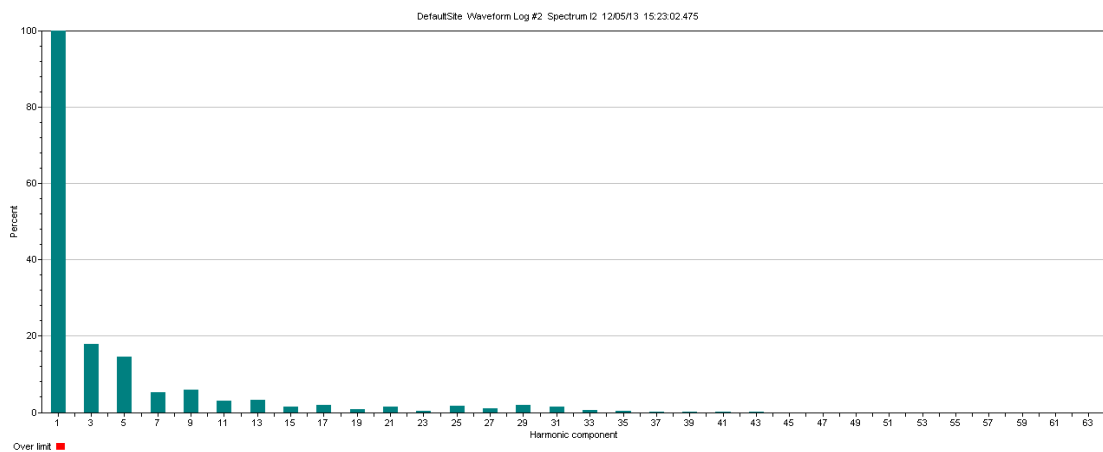


Рис. 3.52. Гармонійний склад струму тягового навантаження при відключеному ПСК

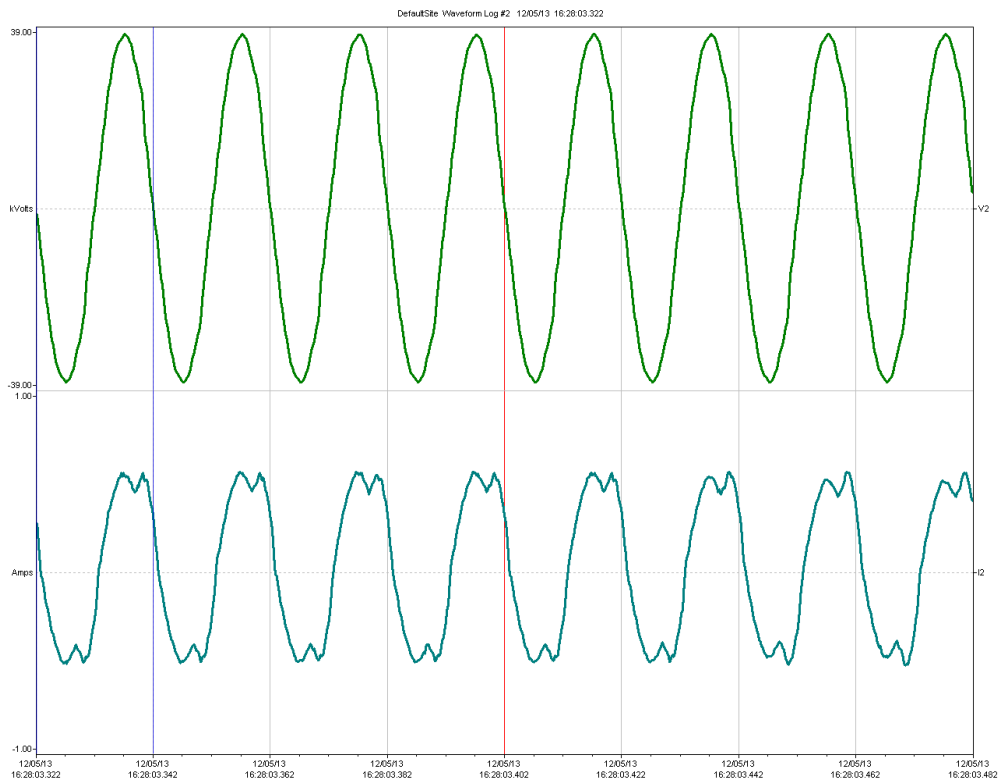


Рис. 3.53. Осцилограми напруги і струму плеча живлення при накладанні вирівнювального струму і струму тягового навантаження

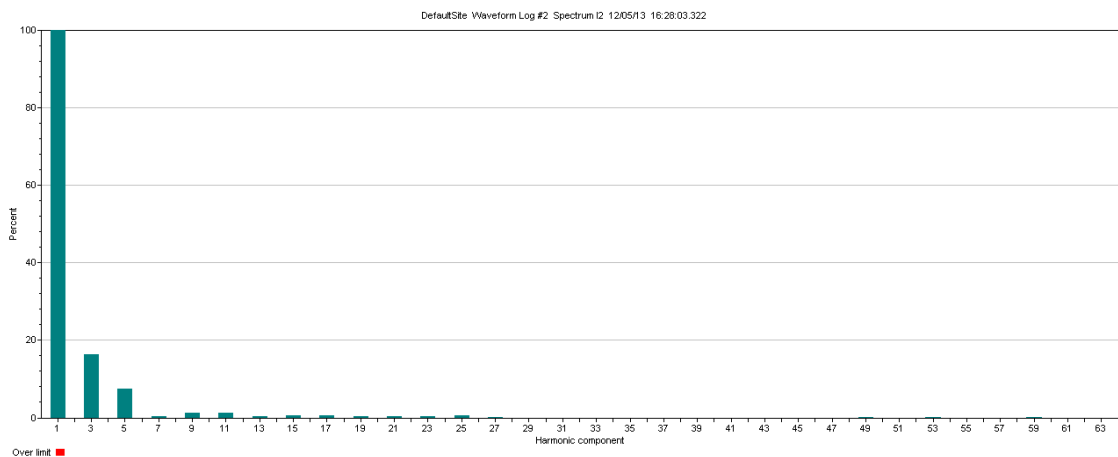


Рис. 3.54. Гармонійний склад струму при накладанні вирівнювального струму і струму тягового навантаження

12.05.2014 на ЕЧЕ-Шевченка з 11:40 виконані перемикання у схемі живлення відповідно до схеми рис. 3.35 таким чином, щоб ділянка тягової мережі від ст. Фундукліївка до ст. Ім. Т. Шевченка живилась консольно від ЕЧЕ-Фундукліївка. Крім цього, розділені секції шин 27,5 кВ ЕЧЕ-Шевченка

за допомогою секційного роз'єднувача та розділені вторинні кола трансформаторів напруги ТН-27,5 кВ.

У вторинні кола ТН-27,5 кВ підключені два однотипні прилади типу SATEC EDL-175xr для дублювання запису осцилограм напруги. Розподіл доступних каналів запису обрано наступним чином:

V1 – напруга фази А ЕЧЕ-Шевченка;

V2 – напруга фази В ЕЧЕ-Шевченка;

V3 – напруга фази В ЕЧЕ-Фундукліївка;

N – загальна точка вторинних обмоток ТН-27,5 кВ.

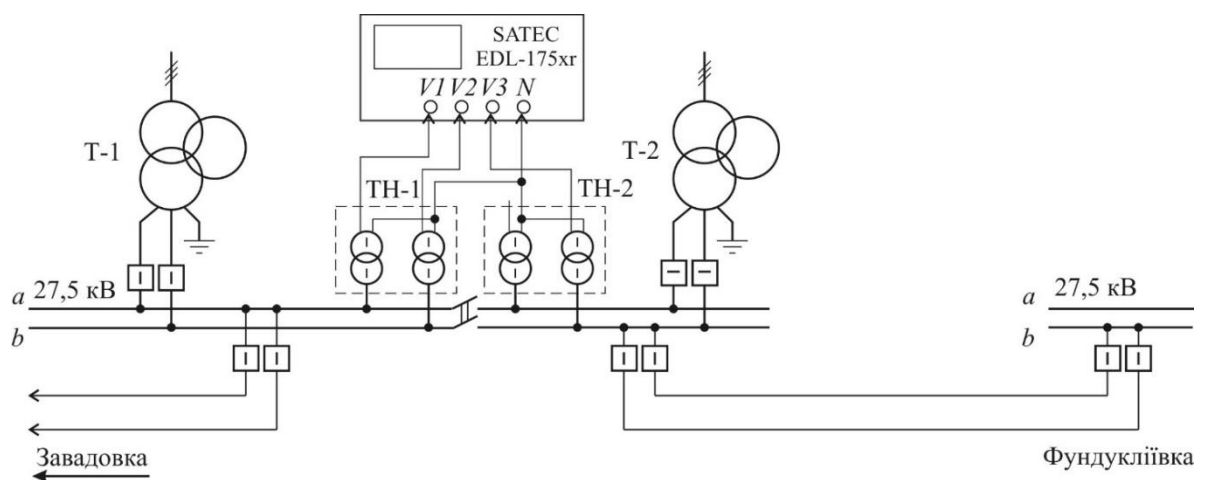


Рис. 3.55. Схема підключення приладу згідно з виконаними переключеннями

Представимо вибірккові осцилограми режимів споживання електроенергії зафіксовані після переключень в схемі живлення на рис. 3.56 – 3.58.

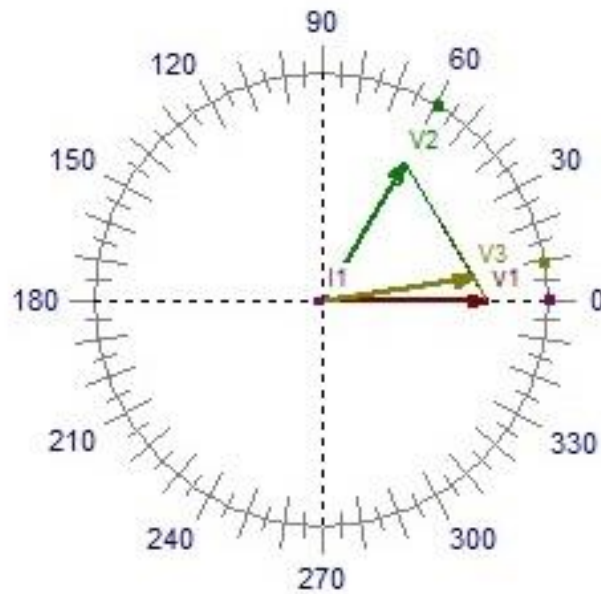
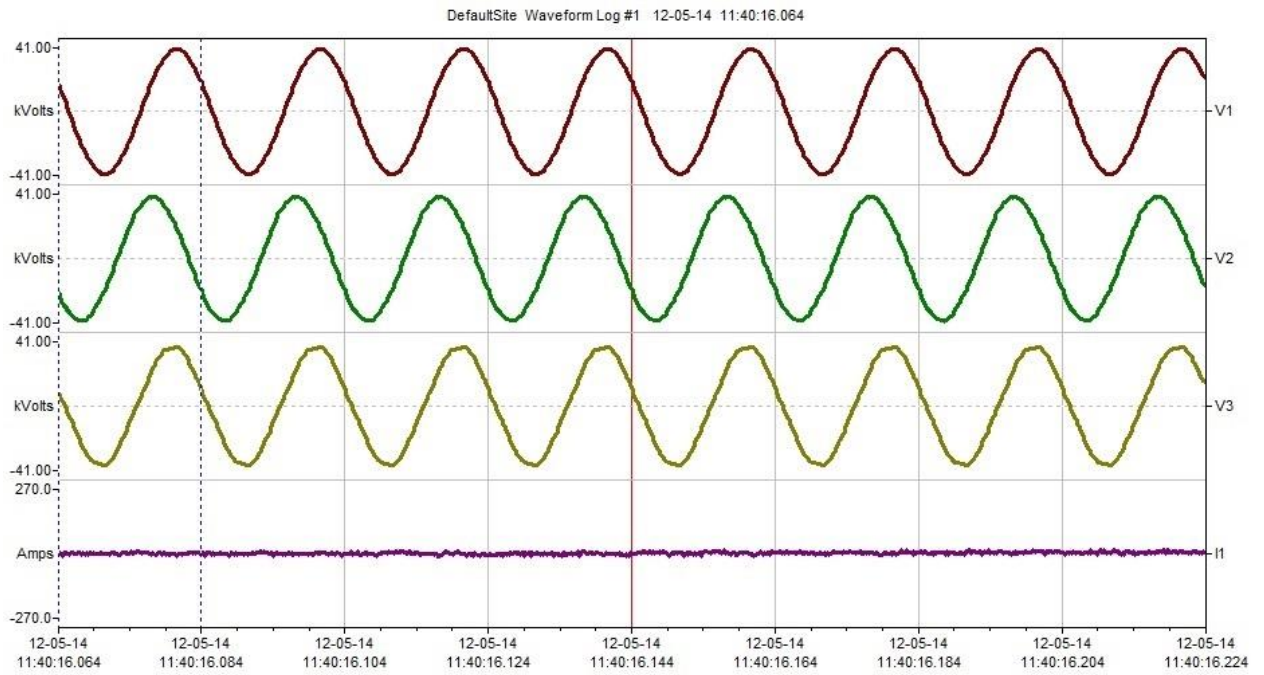


Рис. 3.56. Осцилограми струмів і напруги 12.05.14 11:40:18
у плечі фази «В»- Шевченка $59,1^\circ$, у плечі фази «В»- Фундукліївка $9,4^\circ$

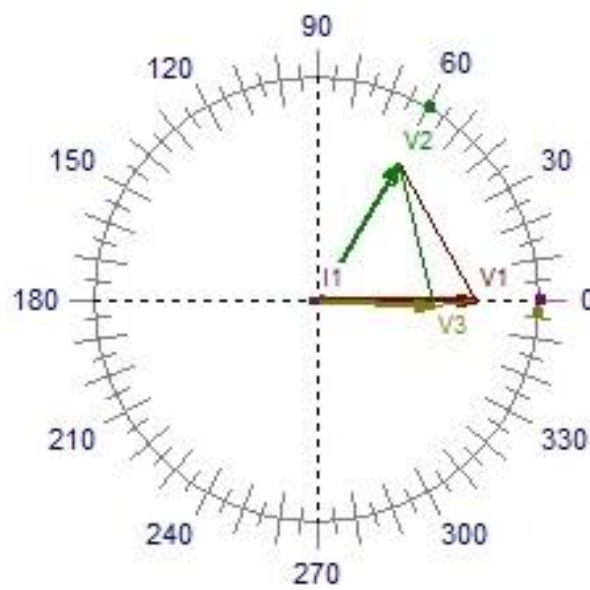
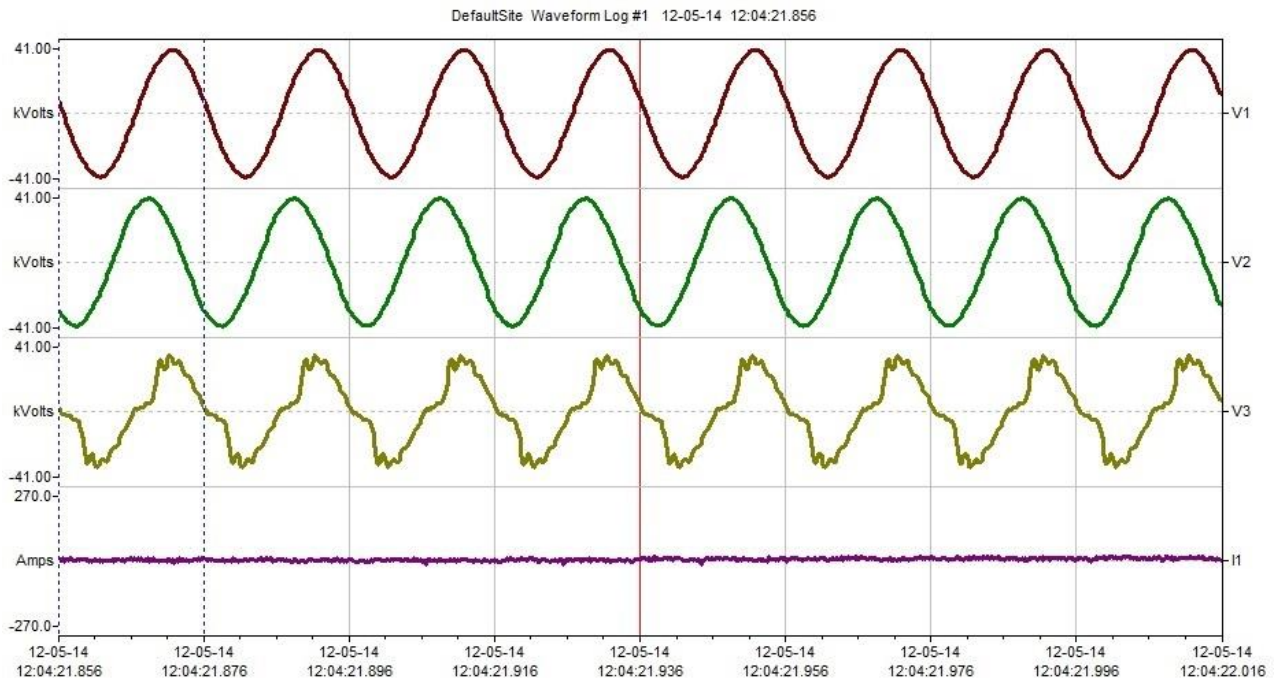


Рис. 3.57. Осцилограми струмів і напруги 12.05.14 12:04:21
у плечі фази «В»- Шевченка $59,1^\circ$, у плечі фази «В»- Фундукліївка - $3,4^\circ$

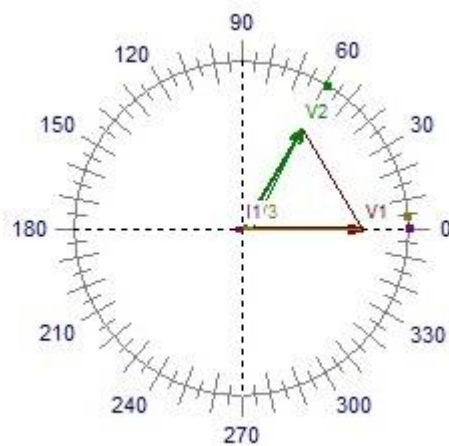
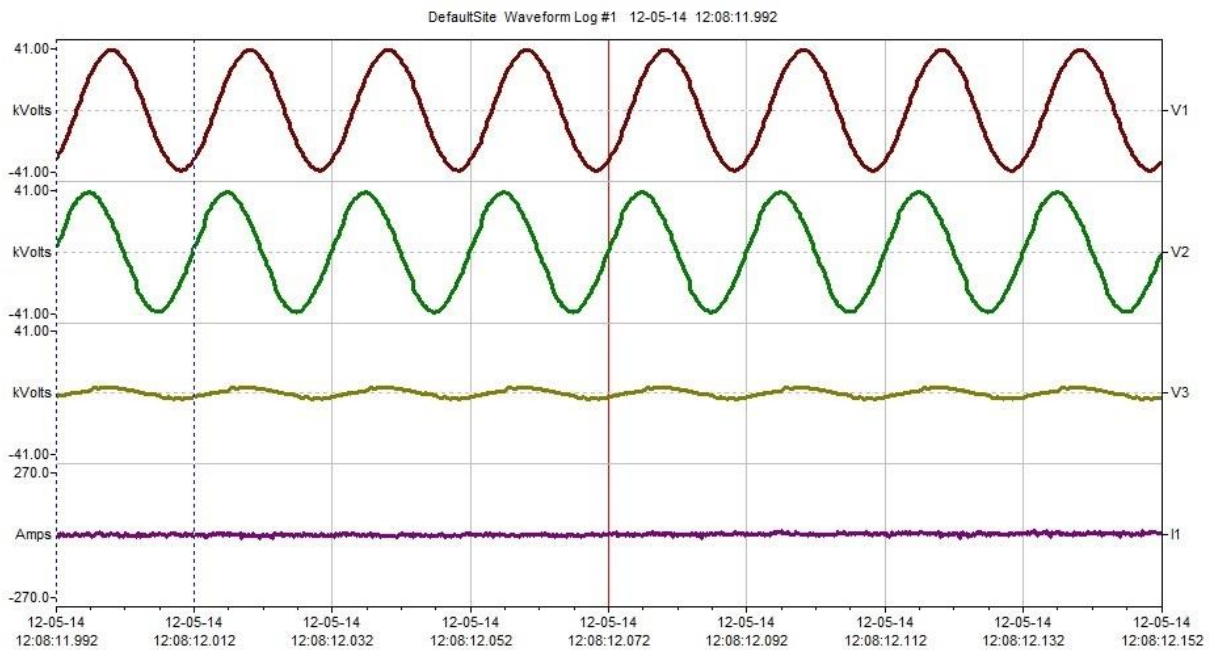


Рис. 3.58. Осцилограми струмів і напруги 12.05.14 12:08:11
у плечі фази «В»- Шевченка $58,7^\circ$, у плечі фази «В»- Фундукліївка $4,3^\circ$

Досліджені експериментальним режимом роботи тягової підстанції змінного струму в умовах наявності перетоків електроенергії були виконані для виявлення можливості вирівнювання рівнів напруги шин суміжних тягових підстанцій для унеможливлення протікання вирівнювальних струмів.

Вимірювання проведені для вимушеного режиму роботи при роботі на дослідній підстанції одного тягового трансформатора, при роботі трансформаторів напруги ТН-1, ТН-2 обох секцій шин 27,5 кВ та

консольному живленні ділянки від суміжної тягової підстанції. Інтервал проведення вимірів складав 1 секунду протягом всього експерименту.

За допомогою аналізатора EDL-175xr за вище зазначеною схемою виміряна різниця між напругами суміжних тягових підстанцій за величиною та кутом зміщення фаз. Проаналізувавши отримані осцилограми та порівнявши їх можна зробити висновок, що між фазами мережі «В» від підстанції Шевченка та «В» від підстанції Фундукліївка є наявність кута зсуву фаз, який досягає в середньому 10 електричних градусів. Саме цей кут зміщення векторів напруг говорить про наявність активного протікання перетоків електроенергії.

Співставивши результати вимірювань з отриманими даними комерційного обліку можна встановити прямий зв'язок між виявленою причиною виникнення вирівнювальних струмів та його впливом на баланс електричної енергії.

3.4. Оцінка адекватності розробленого методу розрахунку на підставі експериментальних даних

Адекватність оцінена на підставі експериментальних даних, отриманих з тягово-енергетичної лабораторії Придніпровської залізниці при виконанні дослідної поїздки на ділянці Дніпро – П'ятихатки, розрахункова схема якої приведена на рис. 3.59. Для цієї ділянки за методикою, описаною в 2-му розділі, на підставі паспортних даних отримано функцію опору, яка приведена на рис. 3.60.

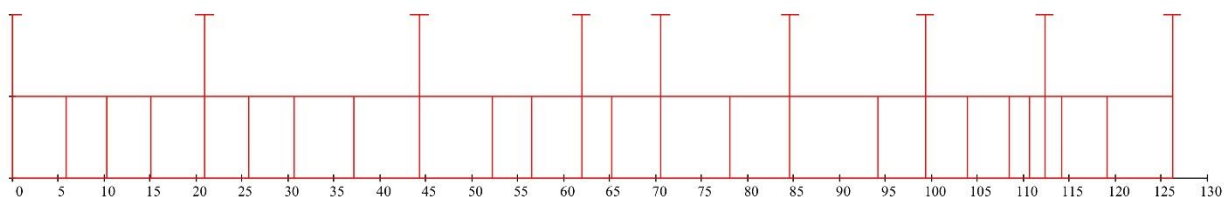


Рис. 3.59. Розрахункова схема ділянки Д – П Придніпровської залізниці

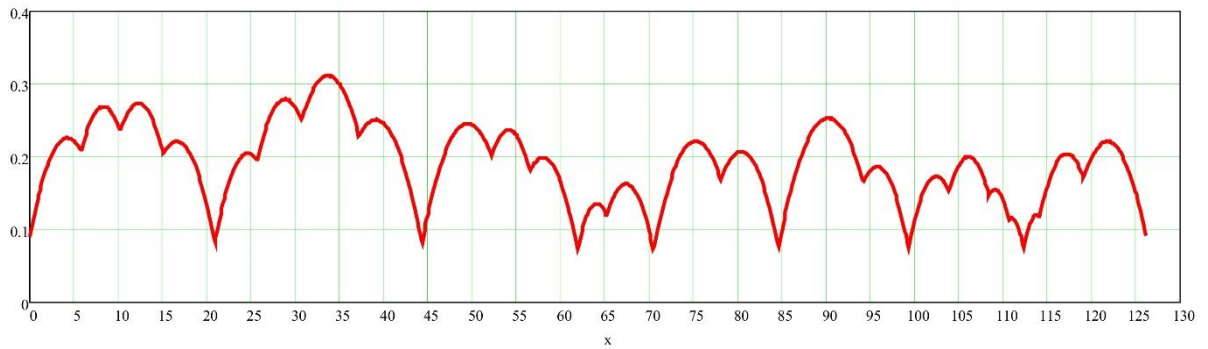


Рис. 3.60. Функція опору для ділянки Дніпро – П'ятихатки

На рис. 3.61 приведені результати розрахунку напруги на струмоприймачі електровозу, за якими оцінювалась адекватність.

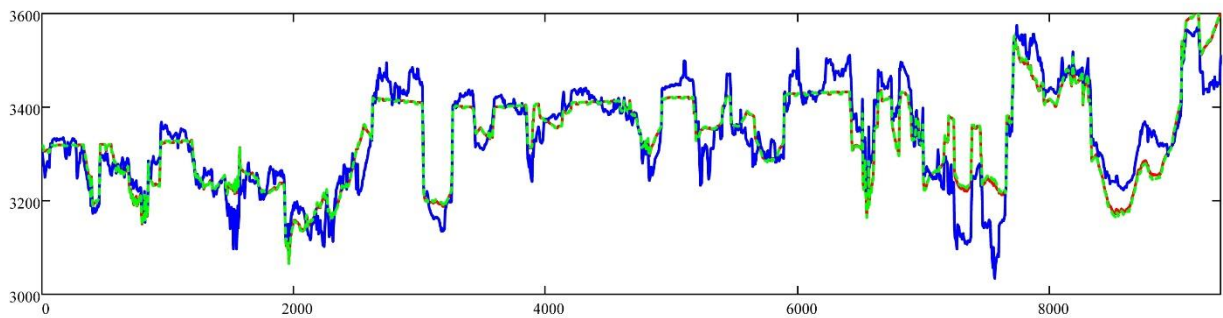


Рис. 3.61. Результати розрахунку напруги на струмоприймачі в порівнянні з експериментальними

На рис. 3.62 показані обчислені похибки для двох використаних методів розрахунку.

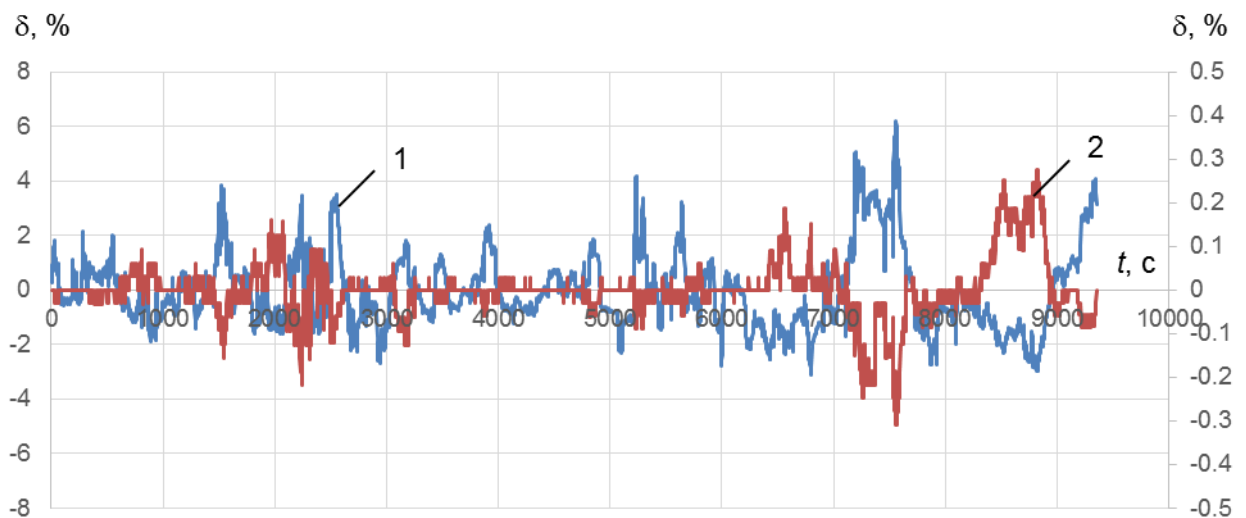


Рис. 3.62. Результати обчислення похибки

На рис. 3.63, 3.64 представлені щільності розподілу імовірностей та інтегральні криві розподілу за двома методами розрахунку, з яких видно, що метод розрахунку (поз. 2) має менші характеристики розкиду.

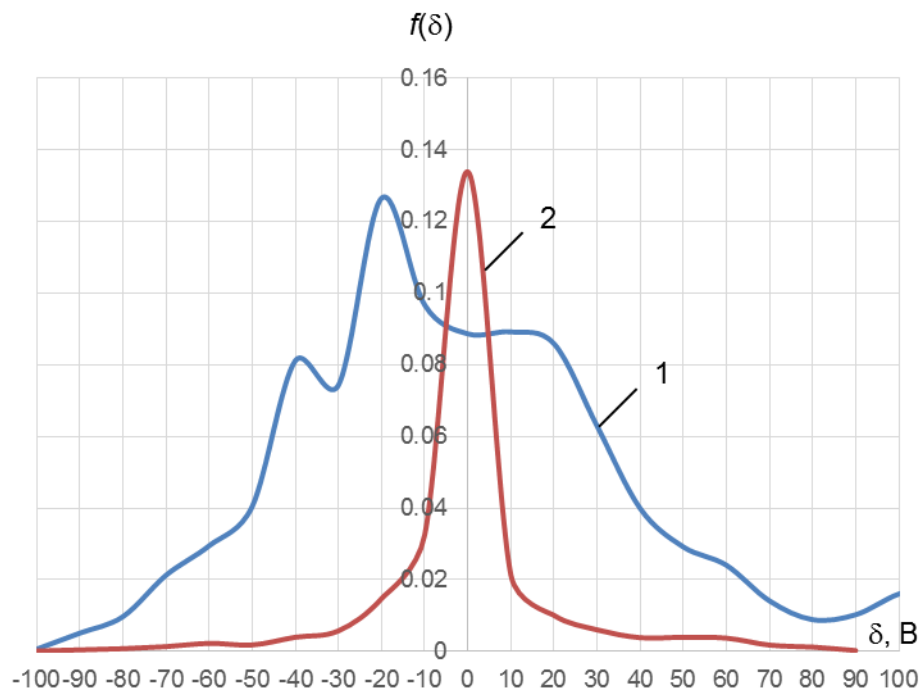


Рис. 3.63. Щільності розподілу похибок визначення напруги

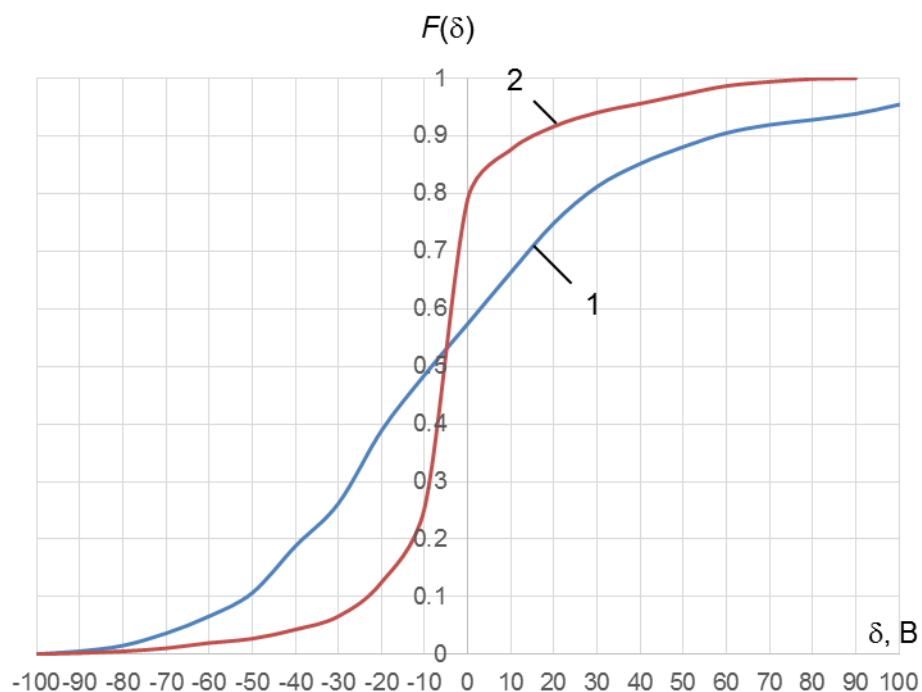


Рис. 3.64. Криві інтегральних імовірностей розподілу похибок визначення напруги

Для перевірки адекватності за вибірками застосовано F-критерій Фішера, розрахункове значення якого визначається відношенням дисперсій вихідного ряду вимірної напруги та ряду розрахованих значень.

Критичне значення критерію $F_{кр} = 0,514$ визначене для рівня значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів свободи для вибірки з більшою дисперсією $k_1 = 30$ та кількості ступенів свободи для вибірки з меншою дисперсією $k_2 = 19$. Відношення дисперсій складає $F = 2604,697/9455,029 = 0,275$, а оскільки $F < F_{кр}$, то можна вважати розроблену модель розрахунку режимів напруги адекватною.

3.5. Аналіз енергетичних складових, зумовлених спотвореннями синусоїдності

Для аналізу з всього масиву даних обрано 5 тягових підстанцій, а саме:
на змінному струмі – Ім. Т. Шевченка, Полтава;
на постійному струму – Воловець (6-пульсна схема), Горяїнове (6-пульсна схема), Слов'янськ (12-пульсна схема).

Для кожної тягової підстанції обирались зафіксовані осцилограми струму і напруг в одній фазі для інтервалу часу, коли навантаження відповідало номінальному режиму. За осцилограмами визначались коефіцієнти n -ї гармонійної складової, активні та неактивні складові повної потужності та їх відповідні квадратурні співвідношення.

На рис. 3.65 – 3.71 показано результати аналізу для тягової підстанції Ім. Т. Шевченка (вимірювання 28.01.2010 р).

На рис. 3.72 – 3.78 показано результати аналізу для тягової підстанції Полтава (вимірювання 29.11.2012 р).

На рис. 3.79 – 3.85 показано результати аналізу для тягової підстанції Воловець (вимірювання 09.06.2015 р).

На рис. 3.86 – 3.92 показано результати аналізу для тягової підстанції Горяїнове (вимірювання 24.12.2009 р).

На рис. 3.93 – 3.99 показано результати аналізу для тягової підстанції Слов'янськ (вимірювання 25.03.2010 р).

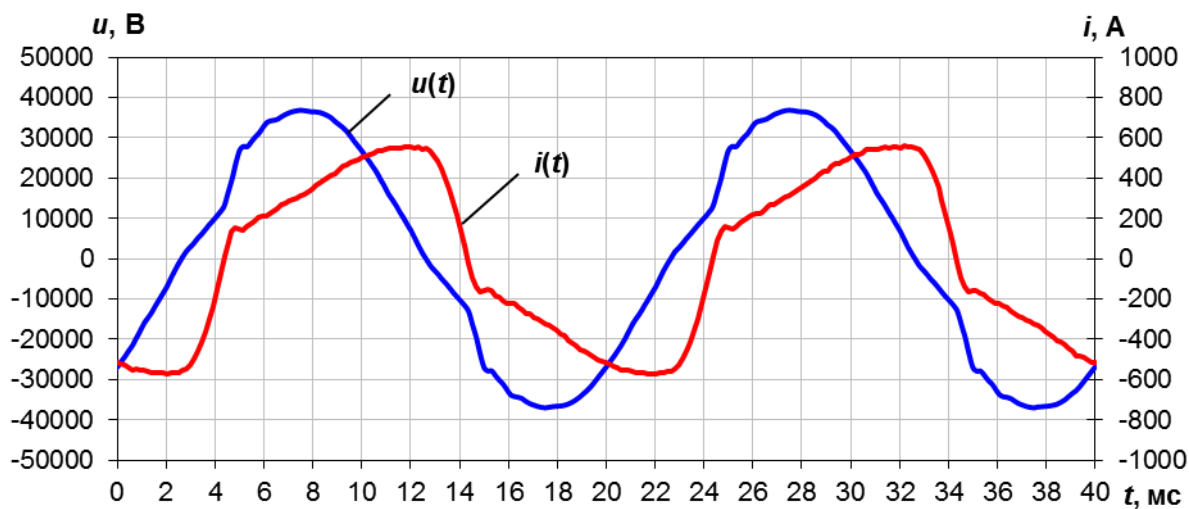


Рис. 3.65. Осцилограми струму і напруги (підстанція Ш)

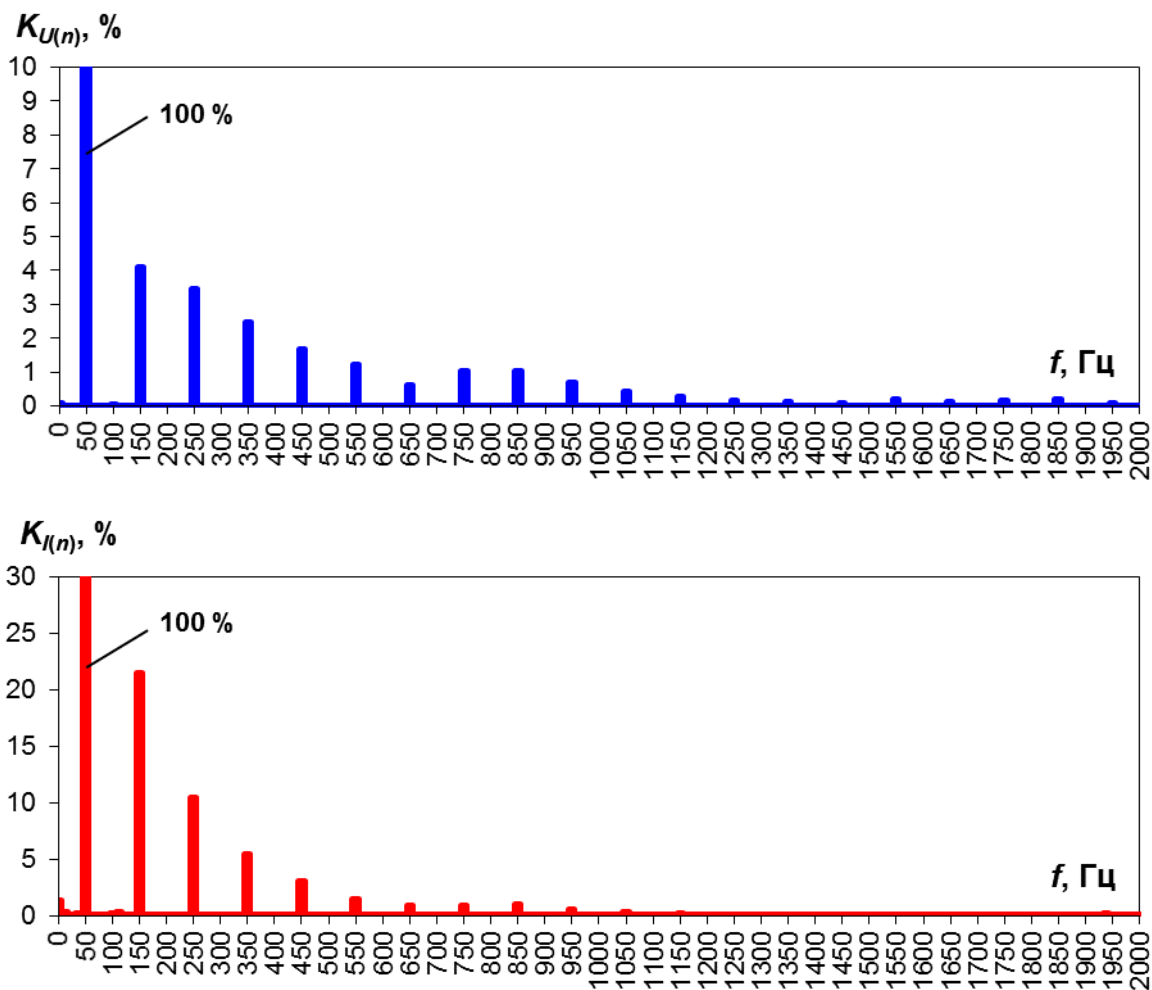


Рис. 3.66. Гармонійний склад струмів і напруг (підстанція Ш)

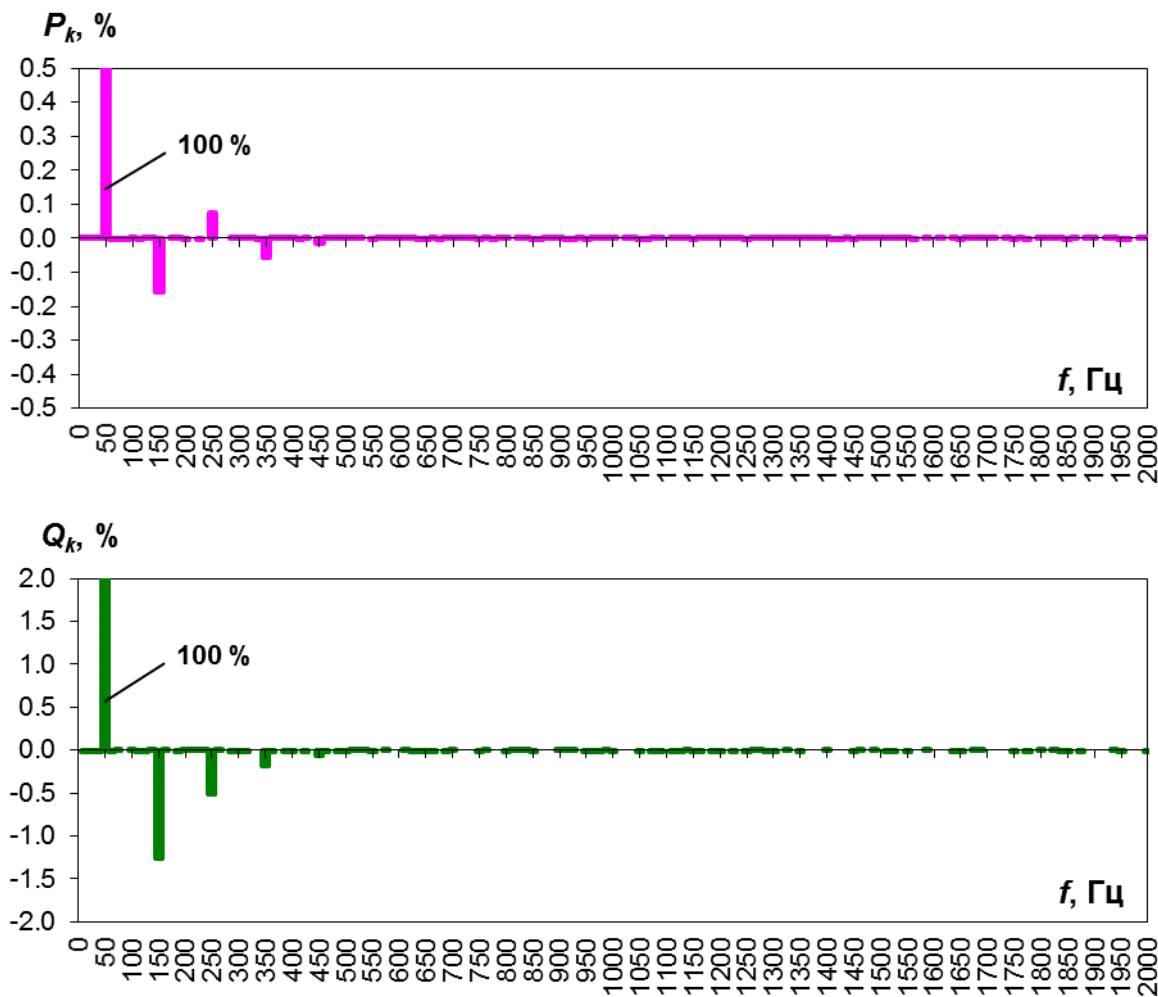


Рис. 3.67. Розподіл активних та реактивних потужностей за гармоніками (підстанція Ш)

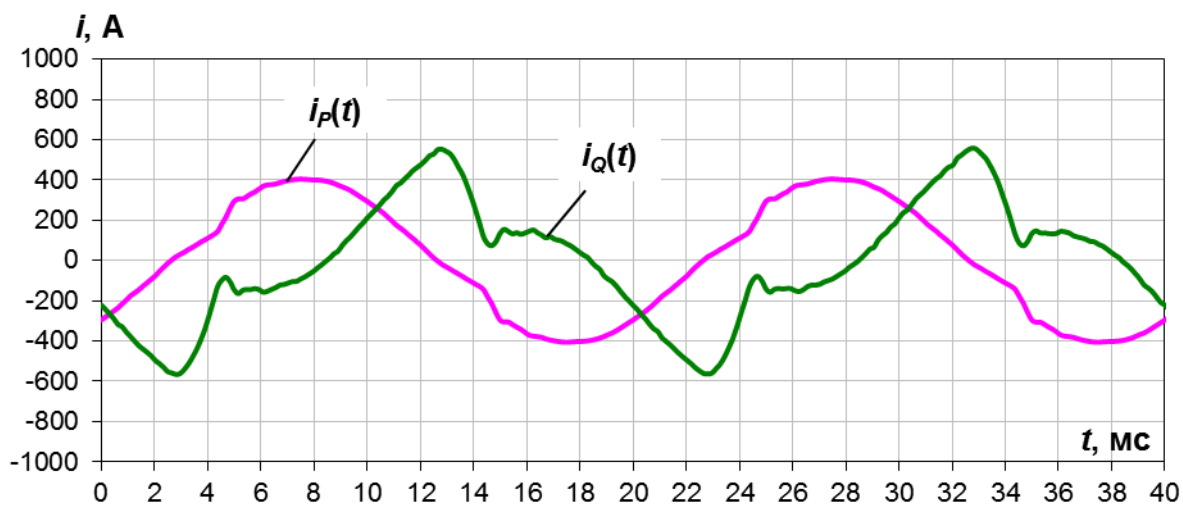


Рис. 3.68. Активні та неактивні струми за концепцією Фрізе (підстанція Ш)

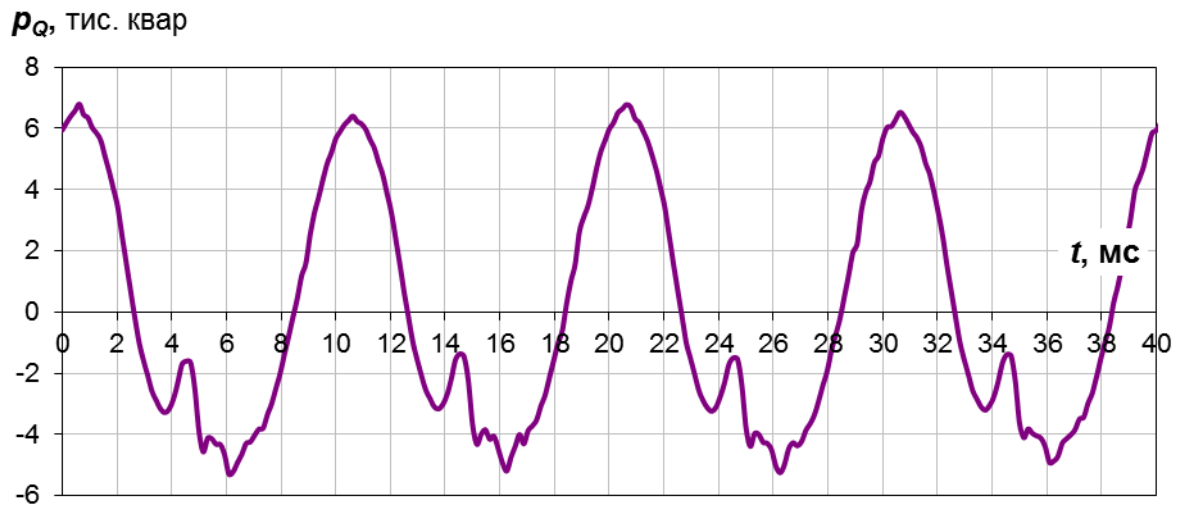


Рис. 3.69. Форма миттєвої потужності Фрізе (підстанція Ш)

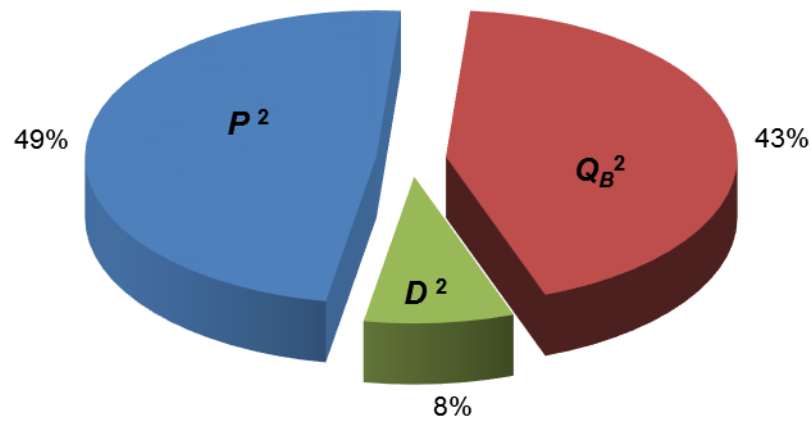


Рис. 3.70. Квадратурні складові за частотною концепцією (підстанція Ш)

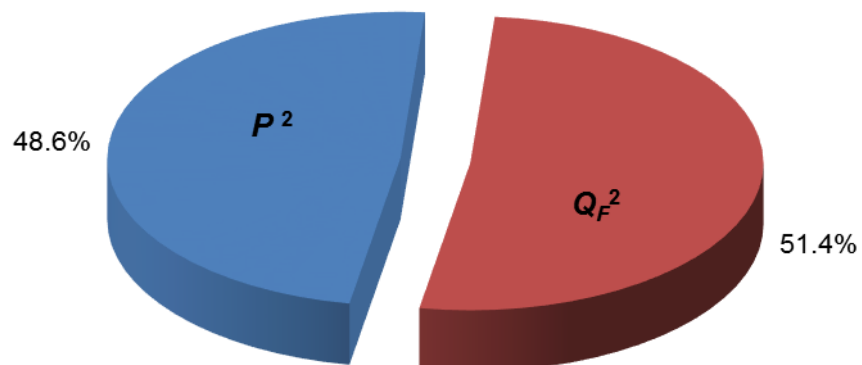


Рис. 3.71. Квадратурні складові за інтегральною концепцією (підстанція Ш)

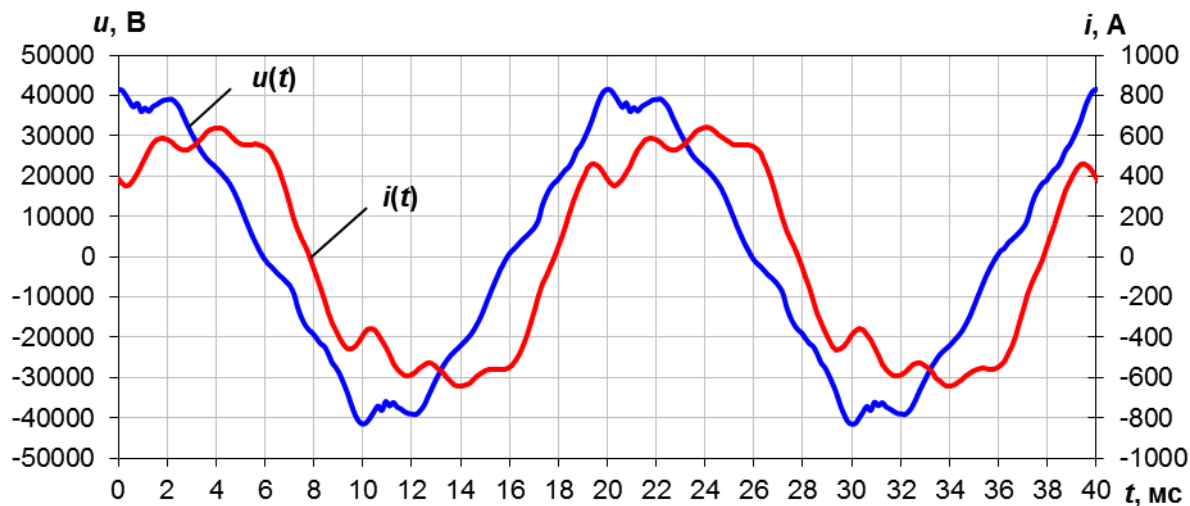


Рис. 3.72. Осцилограми струму і напруги (підстанція II)

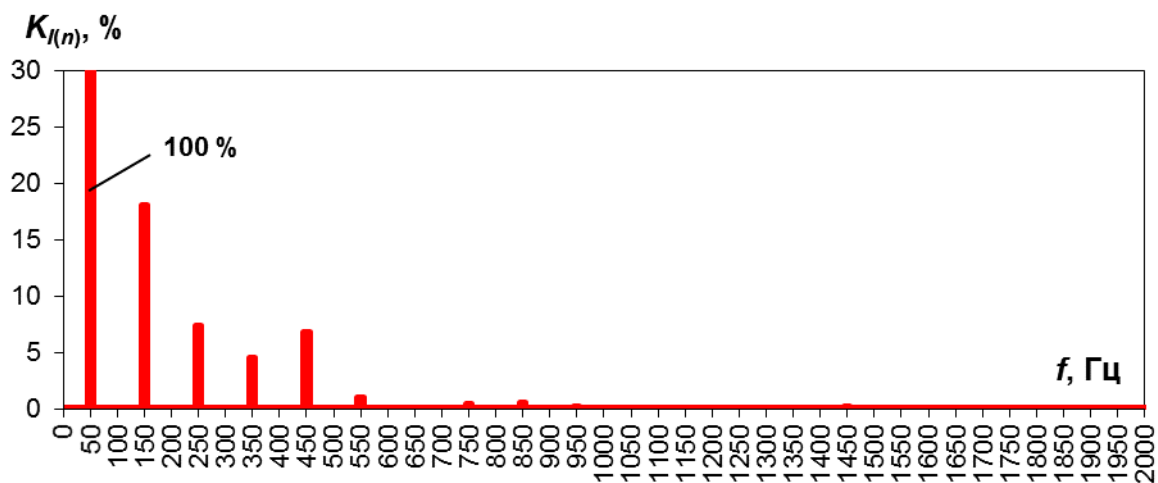
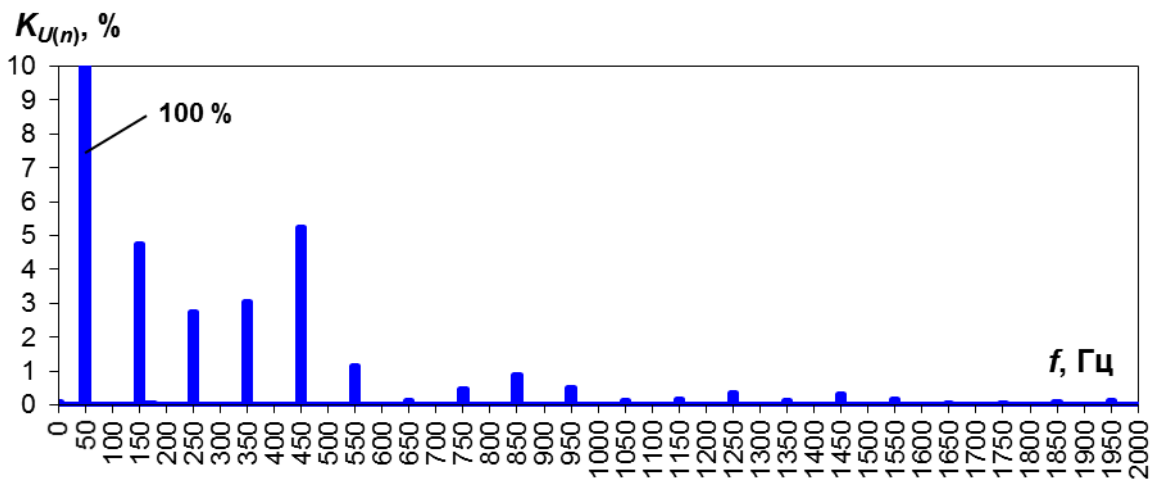


Рис. 3.73. Гармонійний склад струмів і напруг (підстанція II)

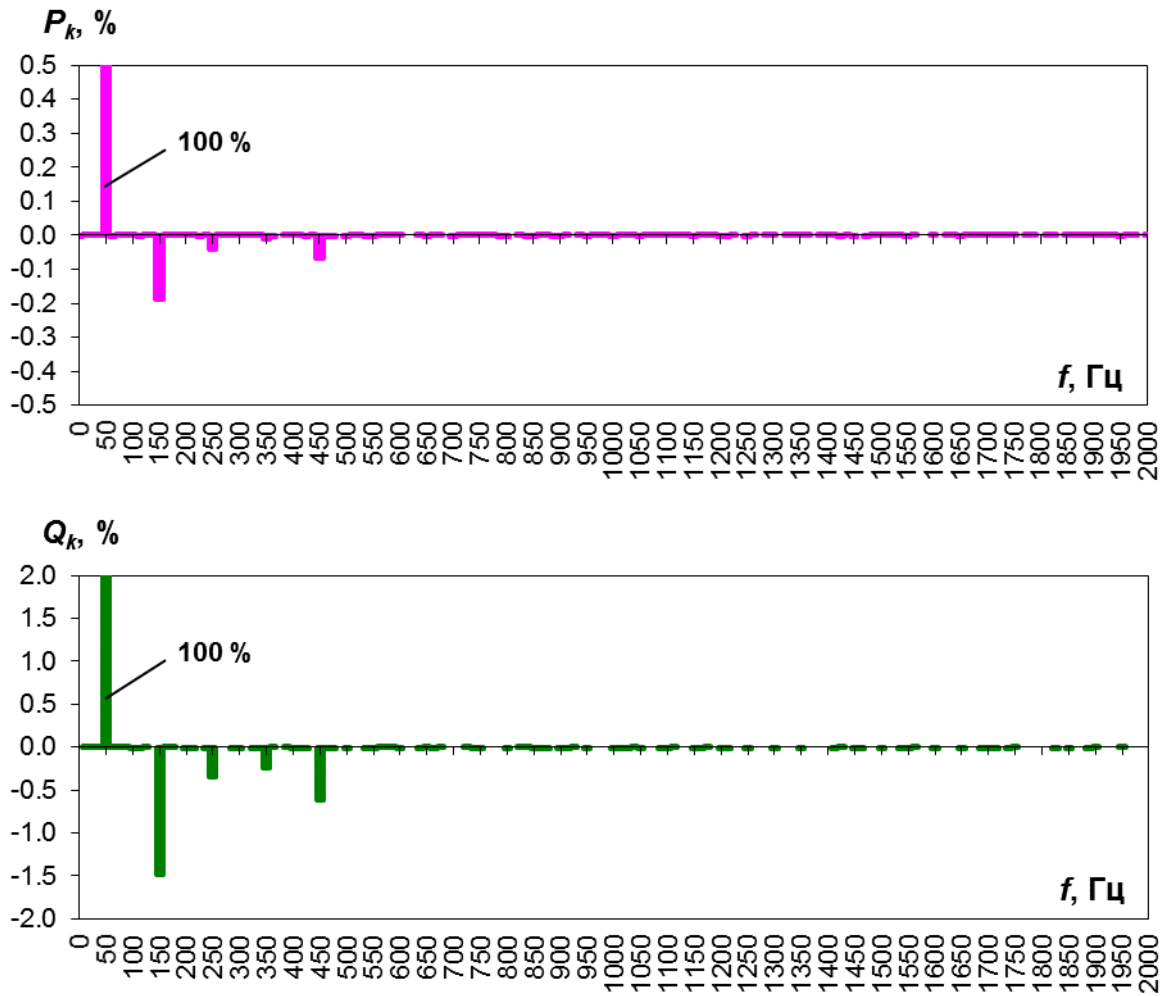


Рис. 3.74. Розподіл активних та реактивних потужностей за гармоніками (підстанція II)

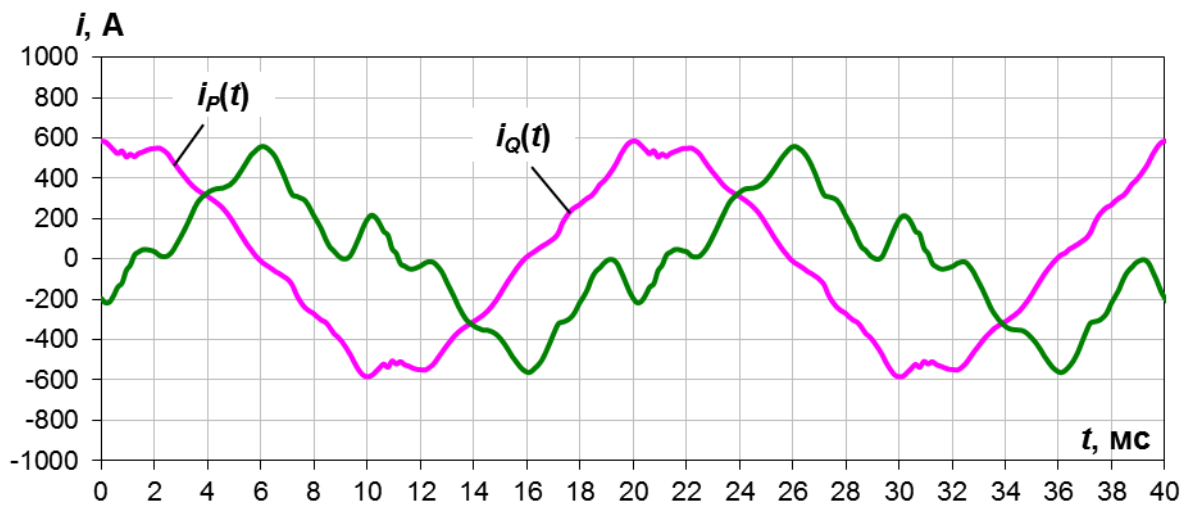


Рис. 3.75. Активні та неактивні струми за концепцією Фрізе (підстанція III)

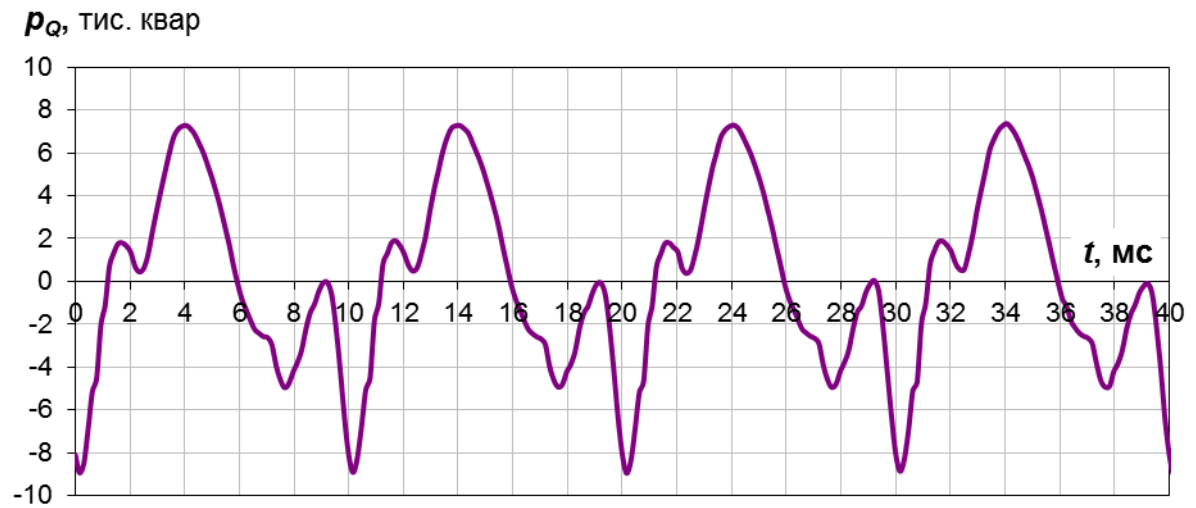


Рис. 3.76. Форма миттєвої потужності Фрізе (підстанція Ш)

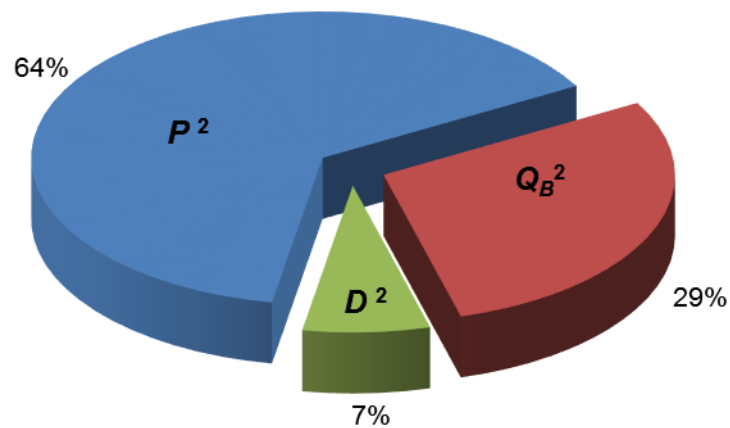


Рис. 3.77. Квадратурні складові за частотною концепцією (підстанція Ш)

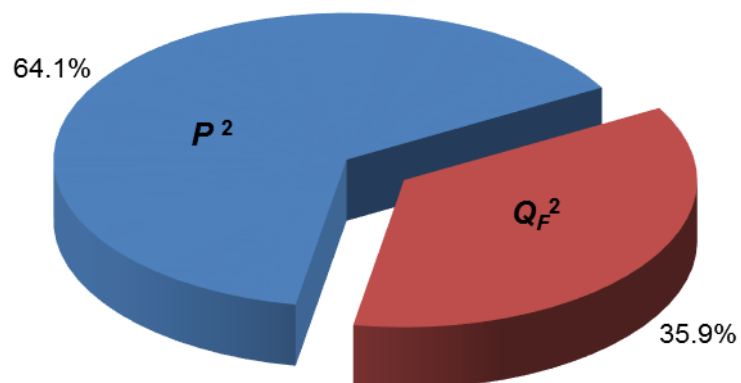


Рис. 3.78. Квадратурні складові за інтегральною концепцією (підстанція Ш)

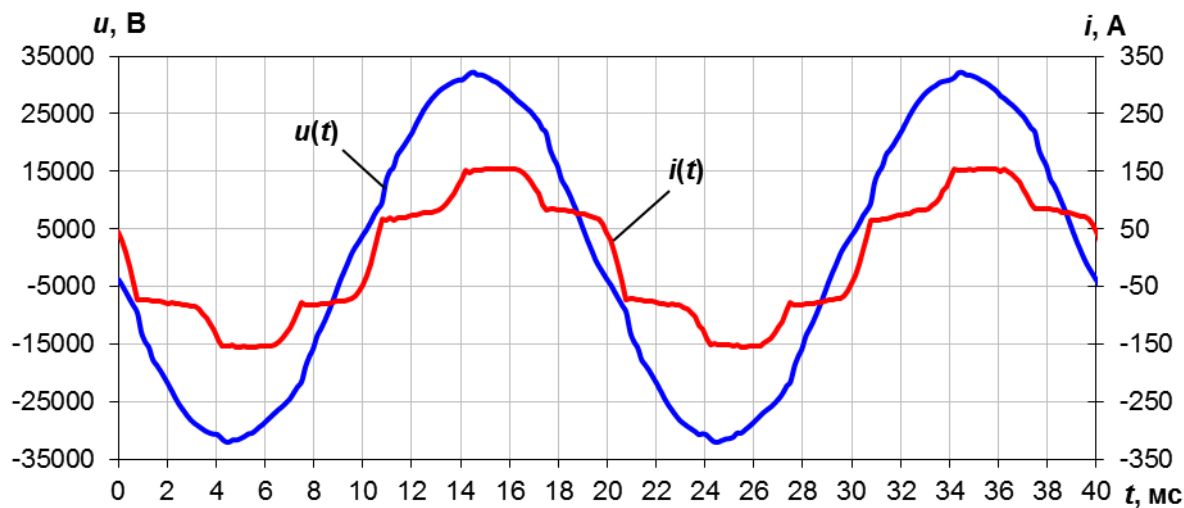


Рис. 3.79. Осцилограми струму і напруги (підстанція В)

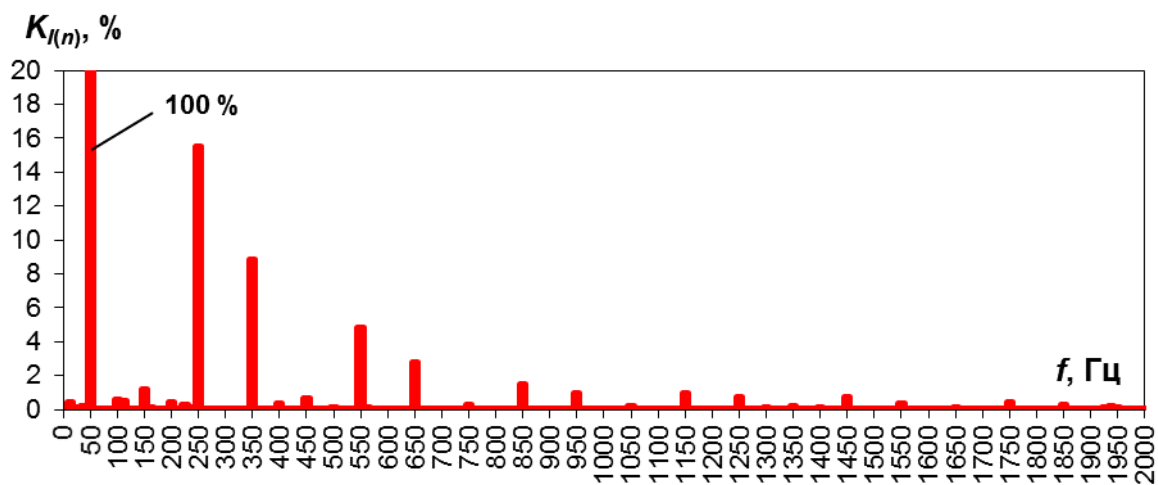
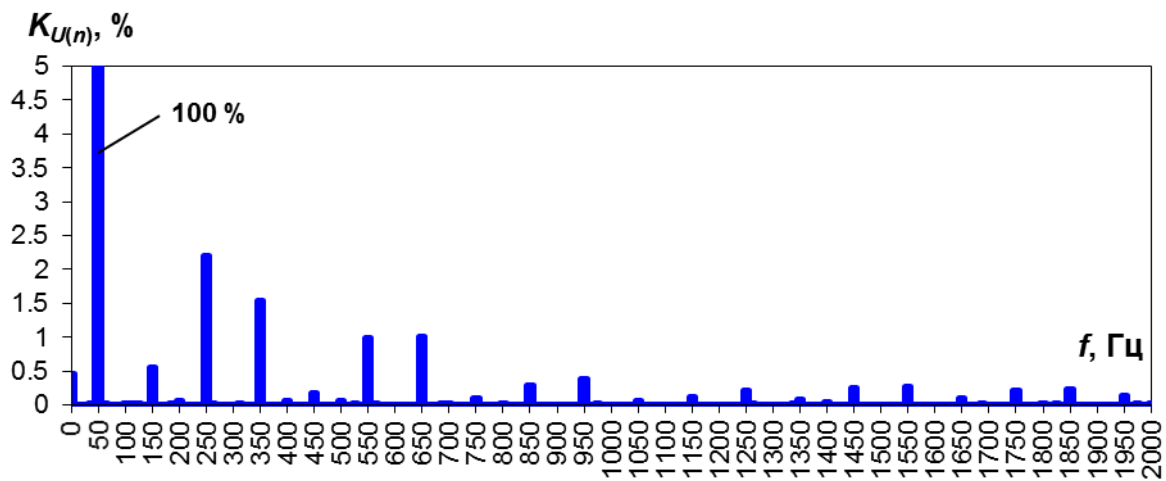


Рис. 3.80. Гармонійний склад струмів і напруг (підстанція В)

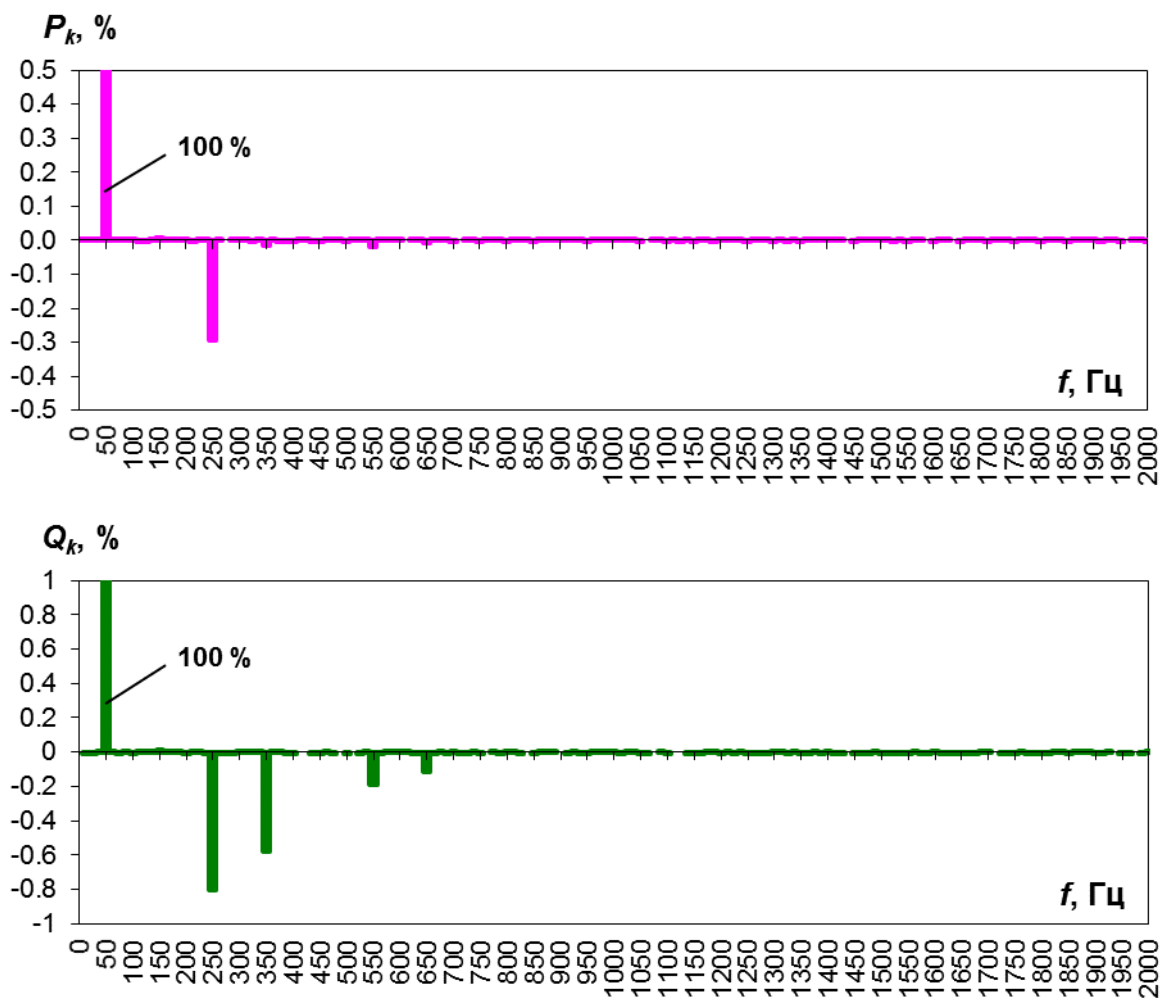


Рис. 3.81. Розподіл активних та реактивних потужностей за гармоніками (підстанція В)

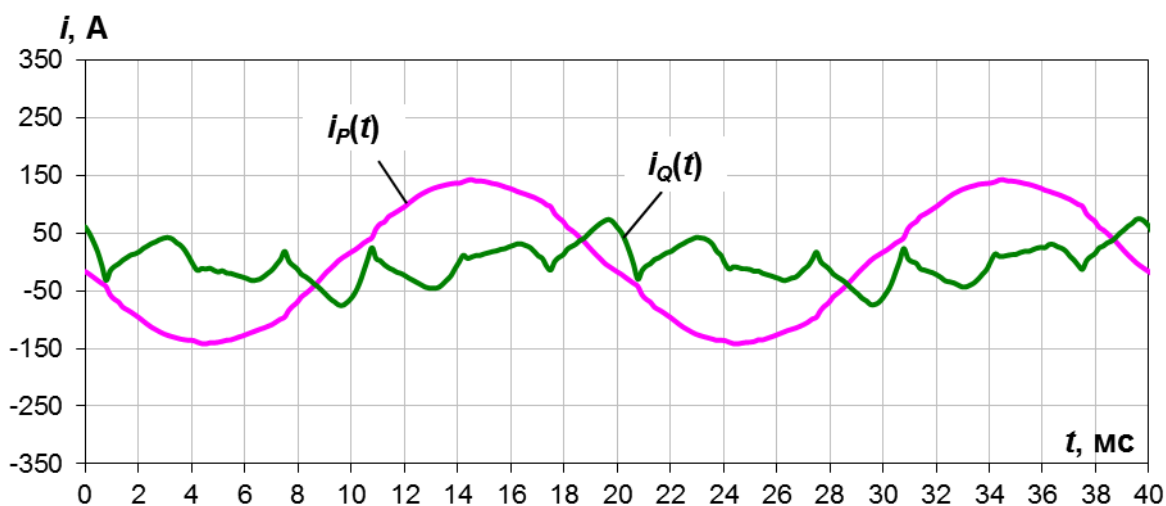


Рис. 3.82. Активні та неактивні струми за концепцією Фрізе (підстанція В)

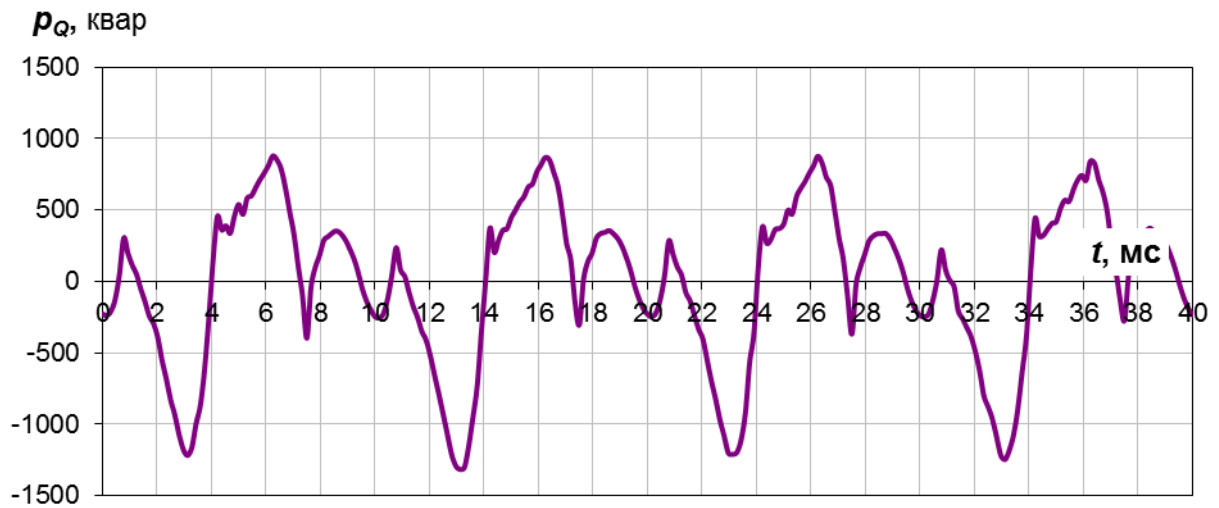


Рис. 3.83. Форма миттєвої потужності Фрізе (підстанція В)

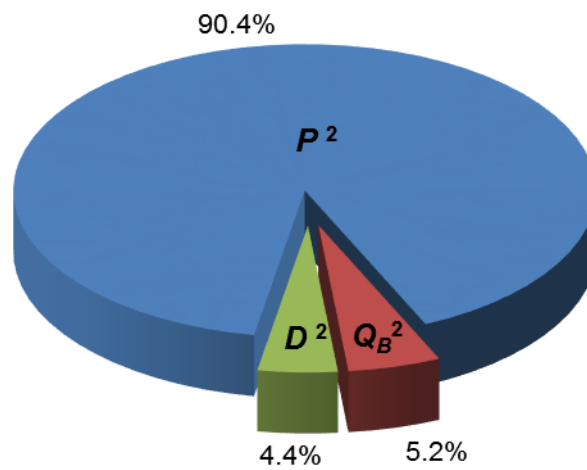


Рис. 3.84. Квадратурні складові за частотною концепцією (підстанція В)

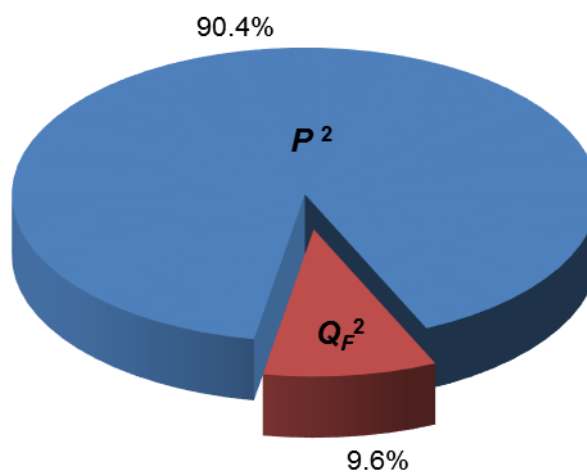


Рис. 3.85. Квадратурні складові за інтегральною концепцією (підстанція В)

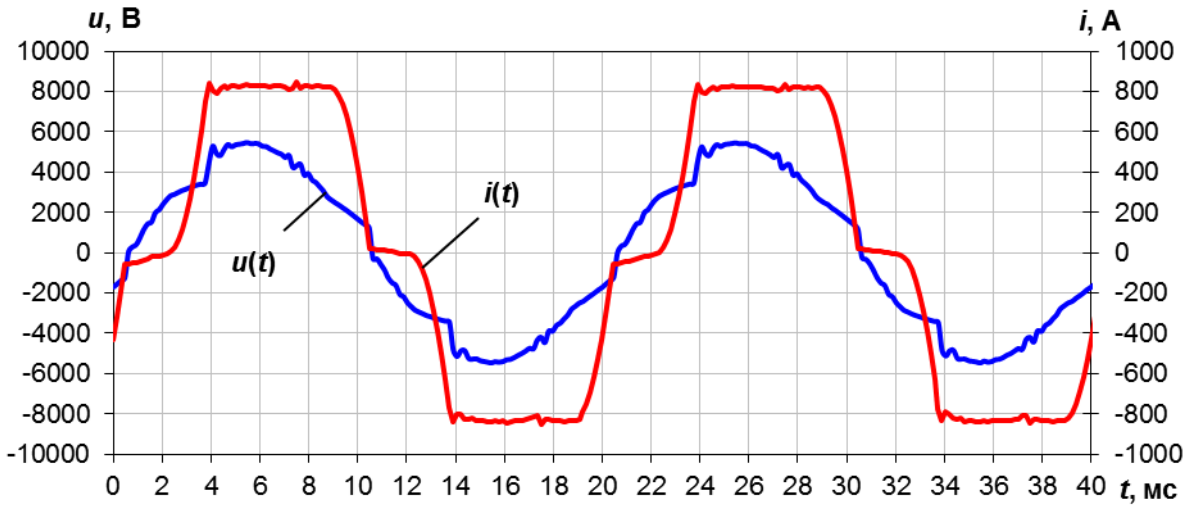


Рис. 3.86. Осцилограми струму і напруги (підстанція Г)

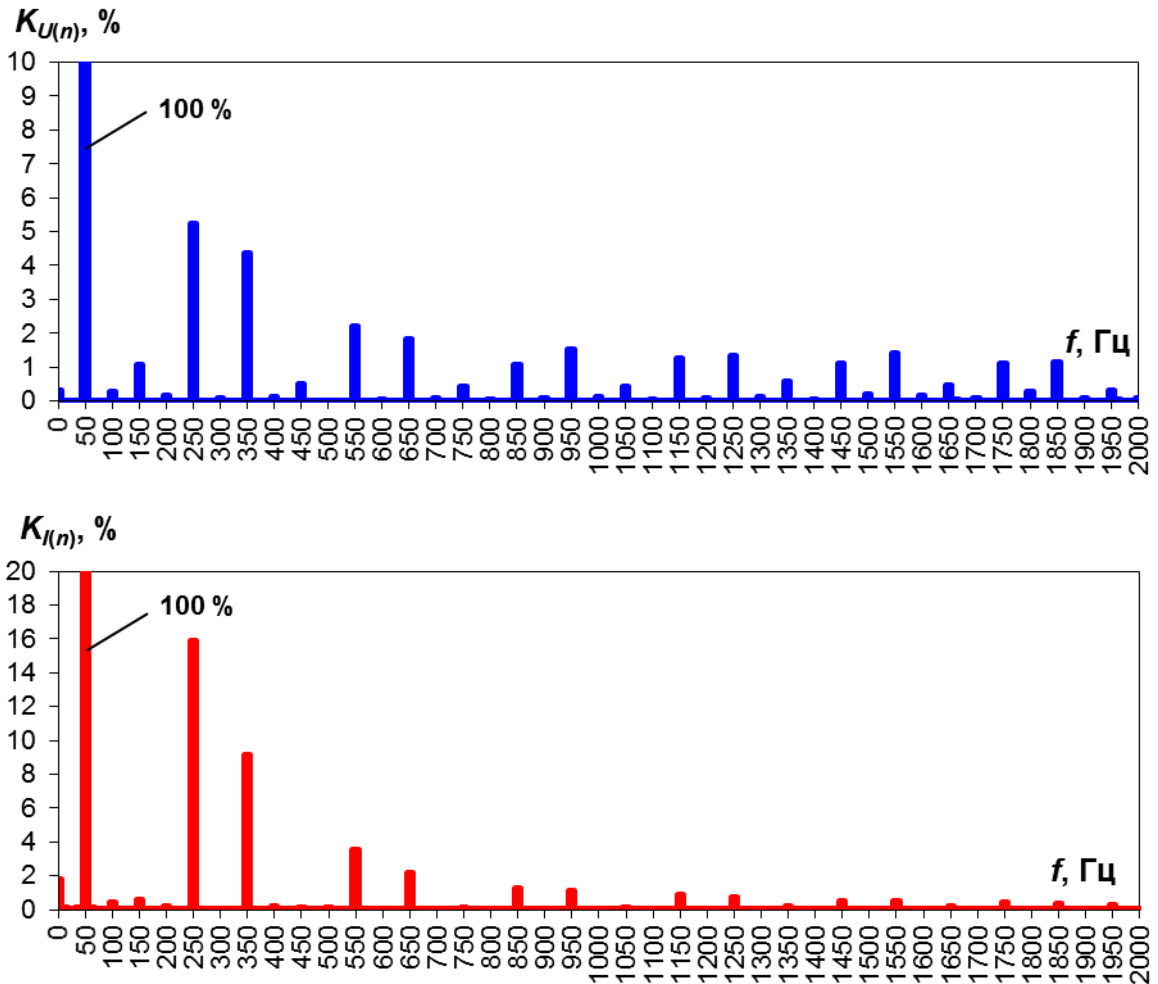


Рис. 3.87. Гармонійний склад струмів і напруг (підстанція Г)

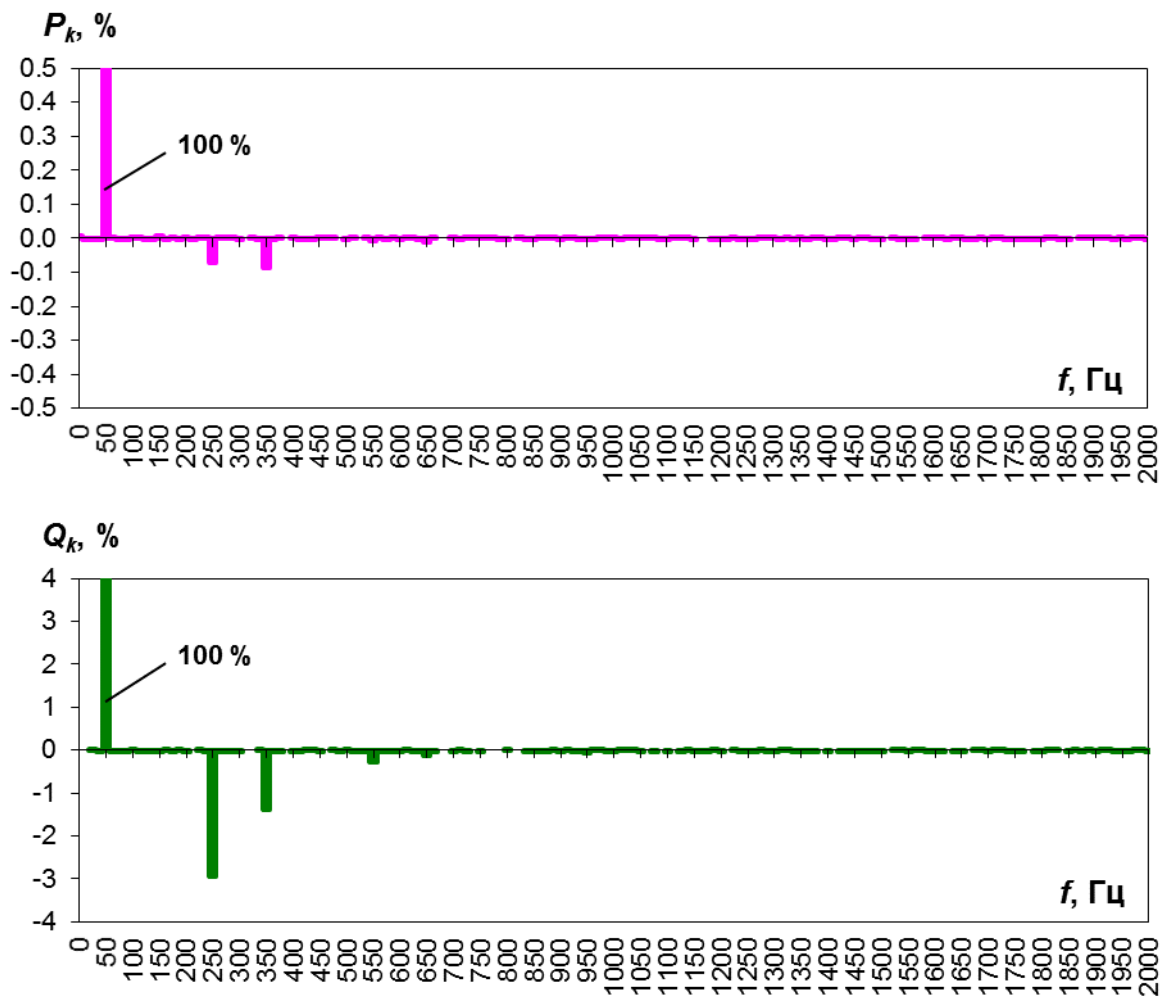


Рис. 3.88. Розподіл активних та реактивних потужностей за гармоніками (підстанція Г)

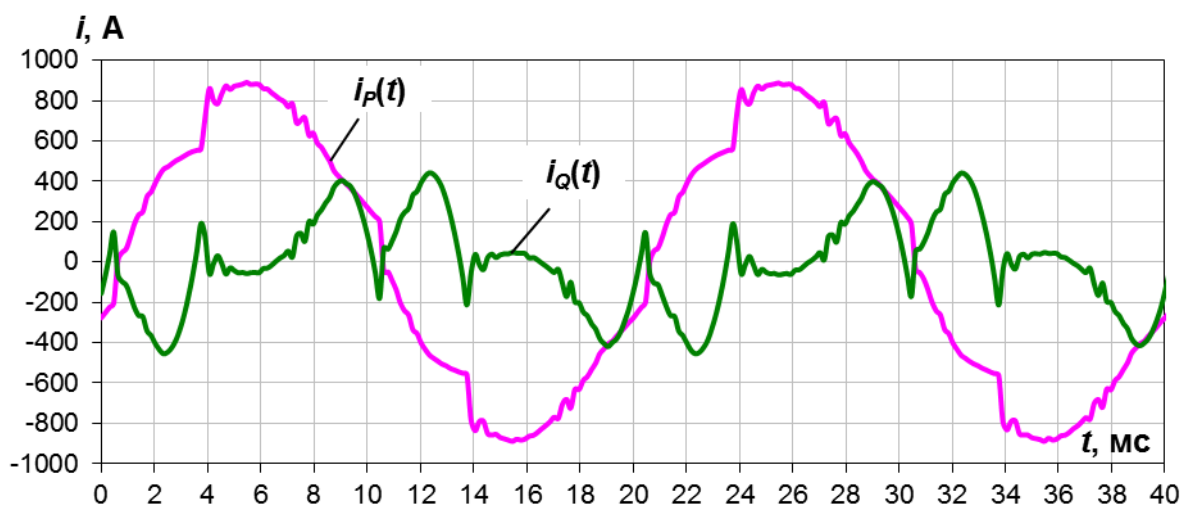


Рис. 3.89. Активні та неактивні струми за концепцією Фрізе (підстанція Г)

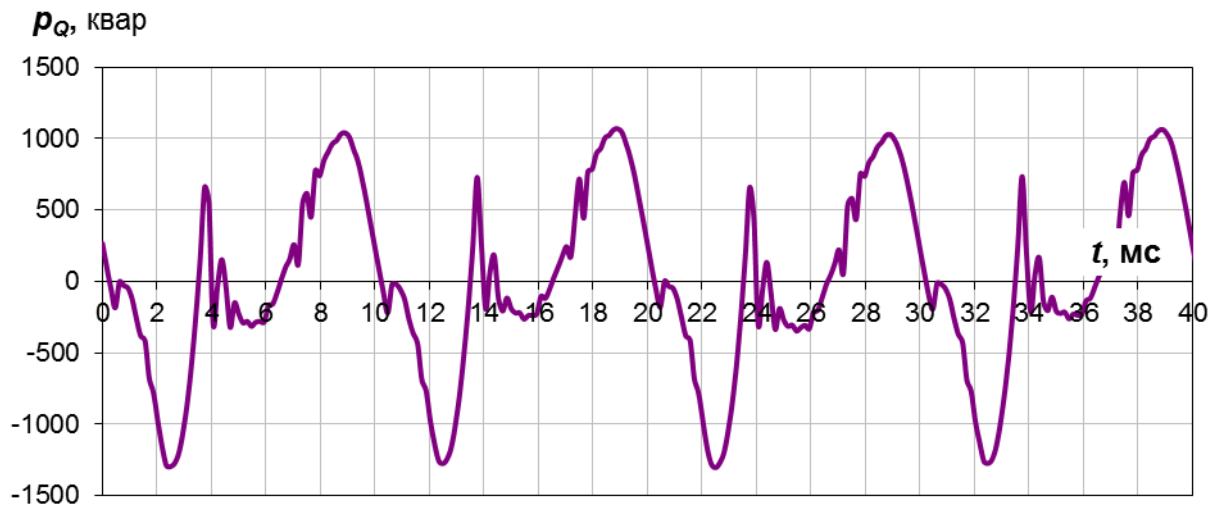


Рис. 3.90. Форма миттєвої потужності Фрізе (підстанція Г)

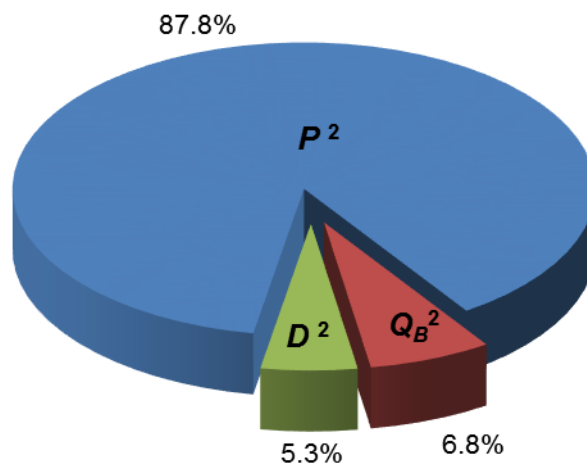


Рис. 3.91. Квадратурні складові за частотною концепцією (підстанція Г)

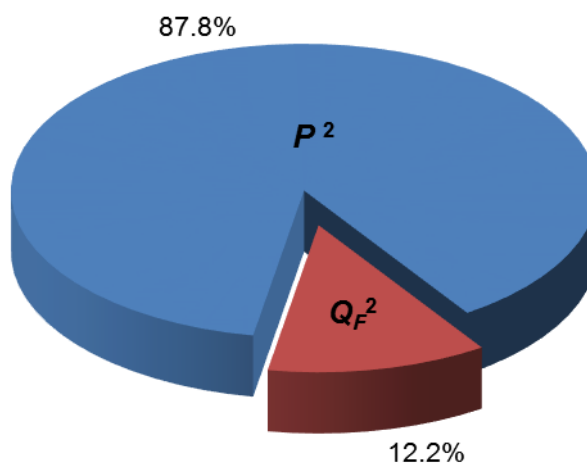


Рис. 3.92. Квадратурні складові за інтегральною концепцією (підстанція Г)

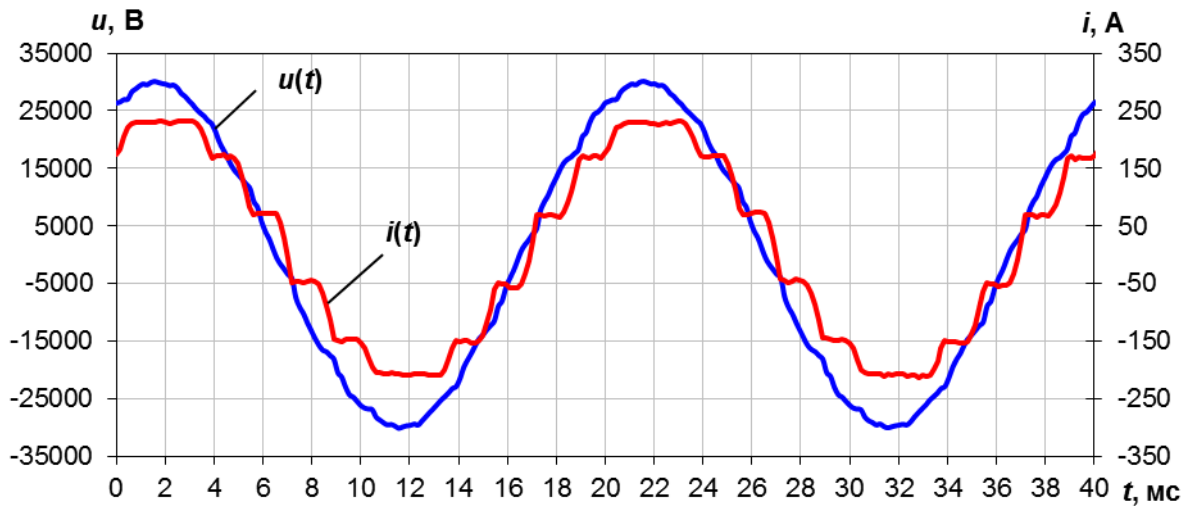


Рис. 3.93. Осцилограми струму і напруги (підстанція С)

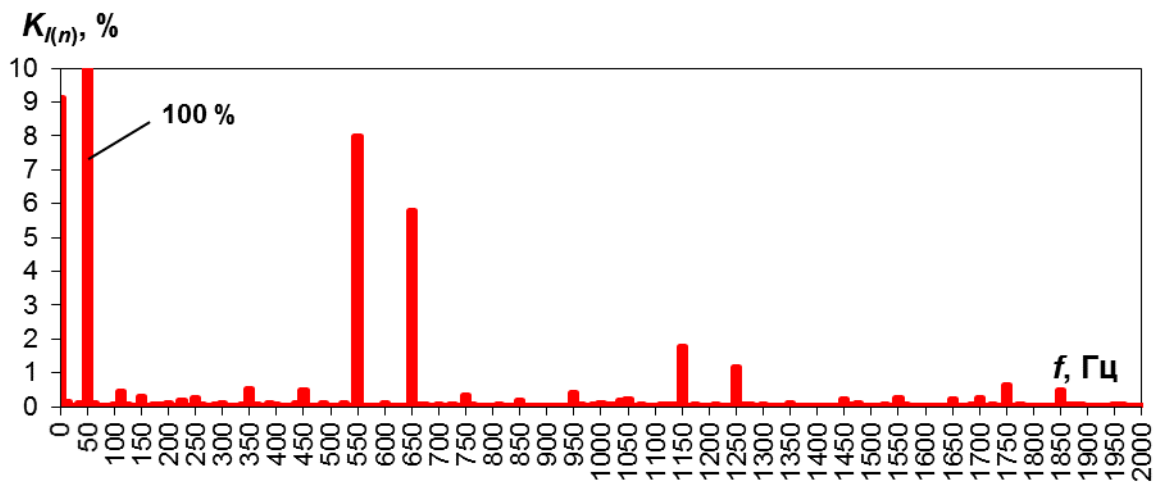
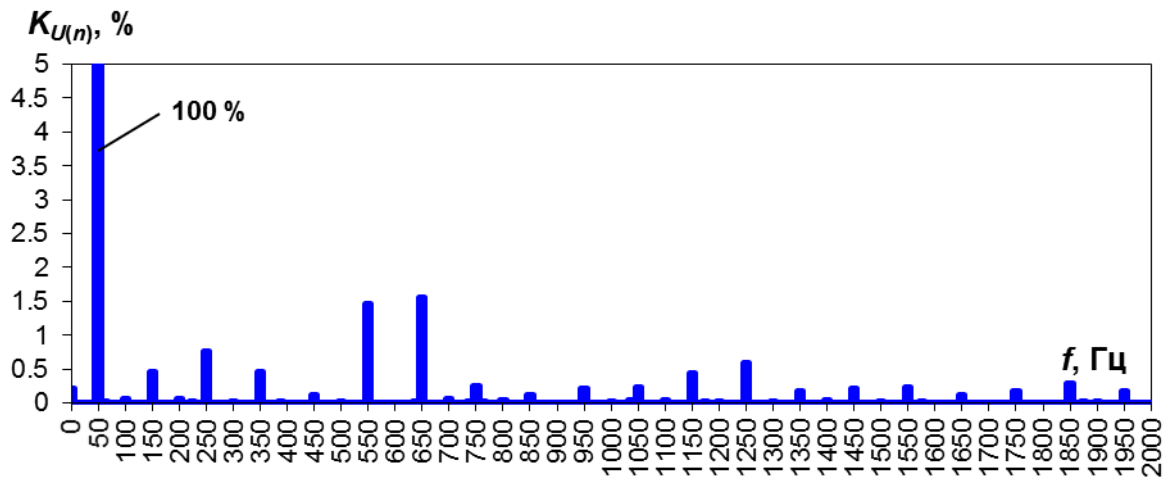


Рис. 3.94. Гармонійний склад струмів і напруг (підстанція С)

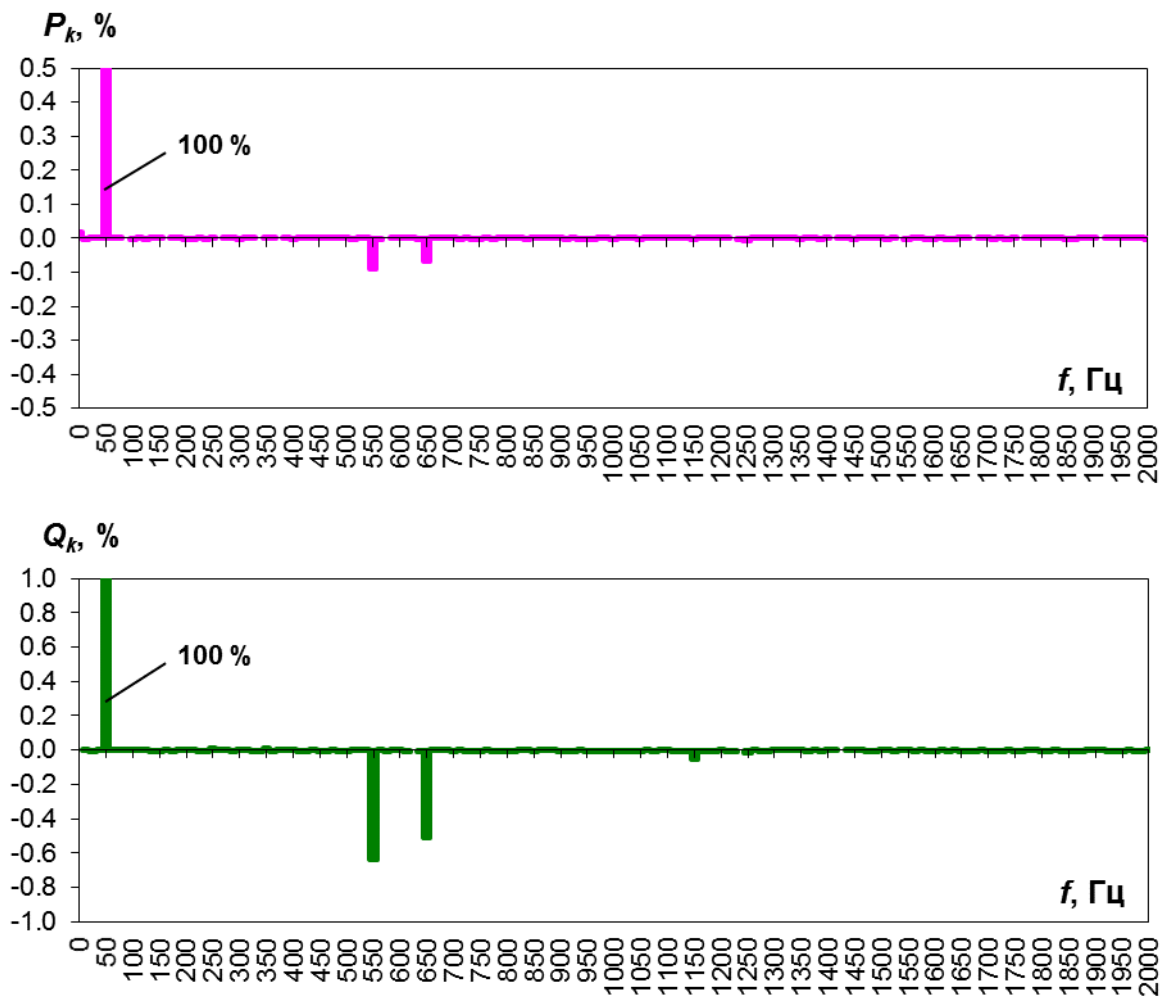


Рис. 3.95. Розподіл активних та реактивних потужностей за гармоніками (підстанція С)

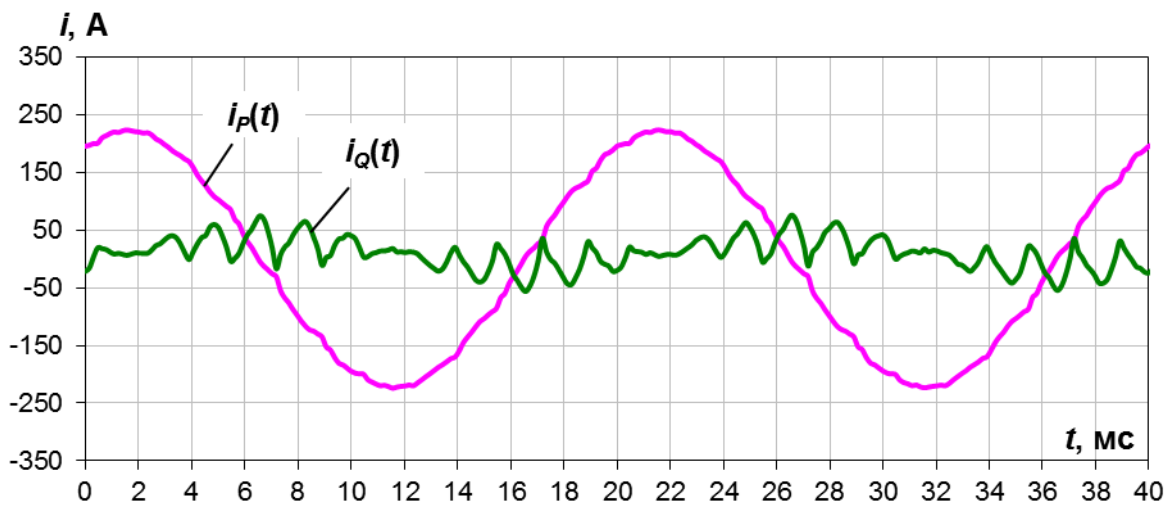


Рис. 3.96. Активні та неактивні струми за концепцією Фрізе (підстанція С)

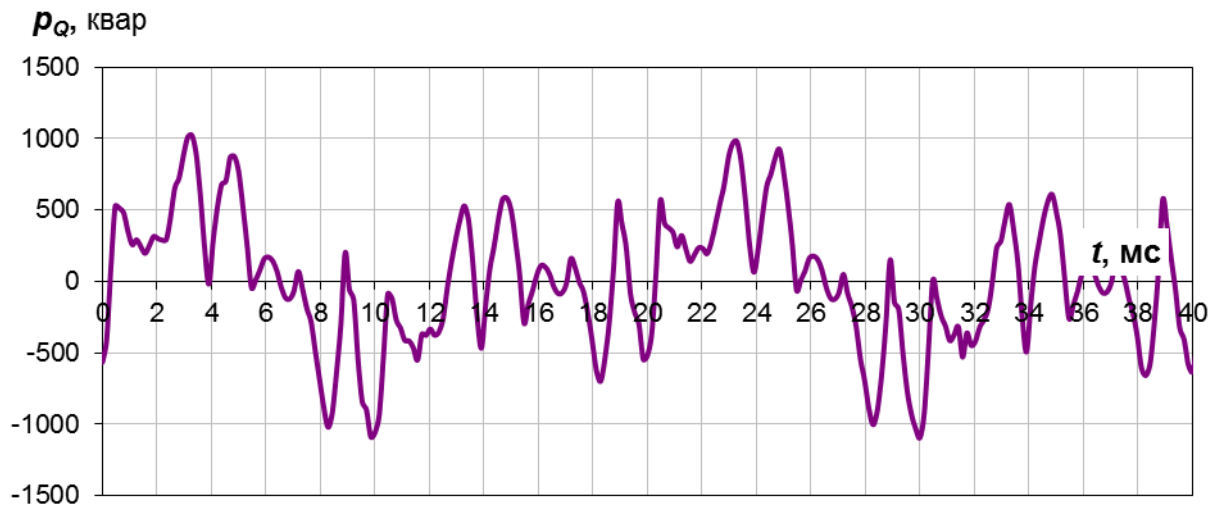


Рис. 3.97. Форма миттєвої потужності Фрізе (підстанція С)

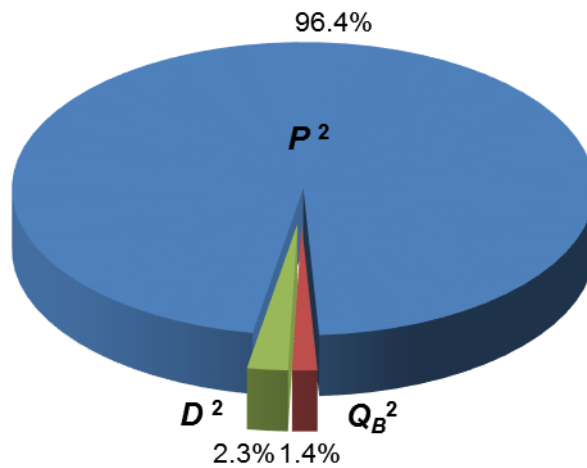


Рис. 3.98. Квадратурні складові за частотною концепцією (підстанція С)

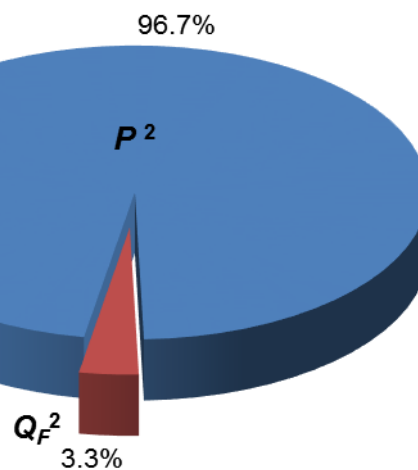


Рис. 3.99. Квадратурні складові за інтегральною концепцією (підстанція С)

Результати приведених обчислень зведено до табл. 3.12, з якої видно, що за співвідношенням квадратур активних та неактивних складових повної потужності, коефіцієнтам активної потужності за першою гармонікою, коефіцієнтом реактивної потужності система електричної тяги змінного струму поступається системі постійного.

Таблиця 3.12 – Складові та коефіцієнти потужності для тягових підстанцій

Показники		Змінний струм		Постійний струм	
		п/ст. Ш	п/ст. П	п/ст. В (6-п.)	п/ст. С (12-п.)
Складові повної потужності, %: за Фрізе	P^2	48,6	64,1	90,4	96,7
	Q^2_F	51,4	35,9	9,6	3,3
за Будеану	P^2	48,6	64,1	90,4	96,4
	Q^2_B	43,1	28,9	5,2	1,4
	D^2	8,3	7,0	4,4	2,3
Коефіцієнти	$\cos \varphi_1$	0,721	0,824	0,972	0,993
	$\operatorname{tg} \varphi_1$	0,961	0,689	0,242	0,121
	λ	0,697	0,800	0,951	0,984

3.4. Висновки до розділу 3

Результати системного аналізу показників якості електроенергії показали, що, в цілому, система електричної тяги має гірші показники по відношенню до системи постійного струму.

Найбільш важливим показником, який унеможлиблює конкуренцію за рівнем втрат електроенергії системи постійного струму з системою змінного є рівень напруги. Стосовно системи змінного струму, фактором, що знижує техніко-економічні показники роботи є наявність режимних перетікань потужності, які викликані кутом зсуву фаз між однойменними векторами живлячої напруги.

Енергоефективність системи тягового електропостачання змінного струму проти системи постійного струму не повною мірою відповідає

існуючим критеріям через наявні спотворення якості електроенергії, що складають:

у частині несинусоїдності напруги – до 5,84 % проти 2,35 %;

несиметрії напруги – до 2,95 % проти 0,82 %;

коефіцієнта потужності – 0,7..0,8 проти 0,95..0,98;

співвідношення складових неактивної до активної потужності в квадратурах – 50/50 % проти 10/90 %.

За допомогою аналізатора якості електричної енергії EDL-175хr за розробленою схемою виміряно різницю фаз між напругами суміжних тягових підстанцій.

Проаналізувавши отримані осцилограми та порівнявши встановлено, що між фазами мережі «В» від підстанції Шевченка та «В» від підстанції Фундукліївка є наявність кута зсуву фаз, який досягає в середньому 10 електричних градусів. Саме цей кут зміщення векторів напруг говорить про наявність активного протікання перетоків електроенергії.

Таким чином, система електричної тяги змінного струму допускає транзитні перетікання потужністю до 4 МВт за наявності кута зсуву фаз однойменних напруг в первинній мережі.

Співставивши результати вимірювань з отриманими даними комерційного обліку можна встановити прямий зв'язок між виявленою причиною виникнення вирівнювальних струмів та його впливом на баланс електричної енергії.

Для перевірки адекватності розробленої моделі системи тягового електропостачання на підставі експериментальних даних за вибірками застосовано Фішера, розрахункове значення якого визначалось відношенням дисперсій вихідного ряду вимірюваної напруги та ряду розрахованих значень. Отримане критичне значення $F_{кр} = 0,514$, визначене для рівня значимості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів свободи для вибірки з більшою дисперсією $k_1 = 30$ та кількості ступенів свободи для вибірки з меншою дисперсією

$k_2 = 19$. у порівнянні з розрахованим (0,275) дозволило вважати розроблену модель розрахунку режимів напруги адекватною.

Отримані в третьому розділі результати системної оцінки показників якості систем електричної тяги постійного та змінного струму опубліковано в роботах [9, 12, 13, 19, 30].

РОЗДІЛ 4

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ НАПРУГИ
НА СИСТЕМУ ОБЛІКУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

У попередньому розділі системно виконувалась статистична оцінка режимних показників якості електричної енергії, які характерні для діючих на Україні двох систем електричної тяги. В даному розділі на основі загальної властивості балансу електричної енергії дослідимо вплив спотворень якості електроенергії на енергетичні характеристики та точність обліку електричної енергії.

Як відомо, баланс енергії притаманний усім процесам у природі. Кількість енергії отриманої об'єктом завжди дорівнює сумі електроенергії, що виділилась з нього, та енергії, яка спожита всередині об'єкту.

4.1. Особливості електроспоживання тяговими підстанціями постійного струму

Оцінка ефективності енергозберігаючих заходів з врахуванням якості електричної енергії часто вимагає вирішення задачі знаходження балансу електричної енергії в окремих видах обладнання та систем електропостачання [138]. Не винятком виступає і система тягового електропостачання постійного струму, в якій для живлення електрорухомого складу виконується перетворення енергії трифазного змінного струму в енергію постійного пульсуючого струму. При цьому, вважається, що процес перетворення є симетричним відносно кожної фази системи зовнішнього електропостачання. Проте на практиці в системі зовнішнього електропостачання досить часто виникає нерівність напруг у фазах, що створює додаткові ускладнення в роботі пристроїв електропостачання та суміжних з ними пристроїв, а саме виникнення додаткового перешкоджаючого впливу та втрат потужності, недоврахування електроенергії приладами обліку, скарги споживачів на якість електроенергії. Виникнення несиметричної напруги особливо актуальне у місцях стикування електрифікованих залізниць на змінному та постійному

струмі, оскільки саме в цьому випадку тягова підстанція змінного навантажена лише одним плечем змінного струму і виникає максимально можливий рівень несиметрії тягових струмів.

Таким чином, впровадження будь-яких енергозберігаючих заходів в системі тягового електропостачання, потребує аналізу та розвитку методів, спроможних визначити складові електроенергії, яка генерується, споживається та циркулює у мережі з врахуванням спотворення показників її якості. Як відомо, зв'язок між складовими електроенергії встановлює баланс, за яким будується система показників, яка характеризує співвідношення та рівновагу різних явищ та процесів [130-140]. Тому дослідження балансу електроенергії з врахуванням її якості на тяговій підстанції постійного струму є актуальним і потребує вирішення до масового впровадження ефективних заходів з енергозбереження.

Представлені нижче дослідження ставлять на меті розробку методів підвищення ефективності процесу енергетичного обміну між тяговою мережею та енергосистемою, враховуючи вплив несиметрії напруги на процес випрямлення через баланс електричної енергії, тим самим, передбачаючи зменшення витрат електроенергії та економію енергетичних ресурсів. Окрім вказаного, актуальним передбачається виявлення похибки вимірювання потужності в колі з нелінійним навантаженням електронними приладами обліку електричної енергії та визначення критичного значення спотворення синусоїдності, при якому прилад обліку буде працювати поза межами встановленого класу точності.

4.2. Баланс електричної енергії тягових підстанцій постійного струму при роботі за несиметричною первинною напругою

Для встановлення взаємозв'язку між енергосистемою та тяговою мережею постійного струму використаємо явище зміни частотного спектру випрямленої напруги при виникненні несиметричної вхідної напруги випрямляча. Відомо, що за ідеально симетричної живлячої напруги на виході випрямляча присутні постійна складова та гармоніки, порядок яких кратний

числу пульсацій схеми випрямлення. Такі гармоніки прийнято називати канонічними. Несиметрична напруга спричиняє появу неканонічних гармонік для схеми випрямлення, що додатково спотворюють криву випрямленої напруги, збільшуючи або зменшуючи окремі її пульси.

Наприклад, для 6-пульсної схеми канонічними будуть гармоніки з частотами 300, 600, 900 Гц і т.д., неканонічними – 100, 200, 400 Гц і т.д. Запропонований в роботах [139, 140] коефіцієнт співвідношення вищих гармонік $K_{\text{СВГ}}$ (4.1), що визначається відношенням неканонічних гармонік до канонічних, по суті відображає вплив якості живлячої напруги на якість напруги на стороні постійного струму, тобто певною мірою характеризує ефективність перетворення енергії, а саме

$$K_{\text{СВГ}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1,3,5,\dots} [U_{(3\cdot i-1)}^2 + U_{(3\cdot i+1)}^2]}}{\sqrt{\sum_{i=1,2,3,\dots} U_{(6\cdot i)}^2}}. \quad (4.1)$$

В якості показника рівня несиметрії живлячої напруги використовується коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності [151]

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%. \quad (4.2)$$

Дослідження проведені на фізичній моделі (рис. 4.1), схема якої представляє собою структуру тягової підстанції постійного струму. В схемі використані: понижуючий трансформатор, мостовий 6-пульсний випрямляч, двигун постійного струму, вимірювальне обладнання, а саме: аналізатор потужності Satec EDL-175XR, макетна плата мікроконтролера Atmega128RFA1, аналогово-цифровий перетворювач NI USB-6009.

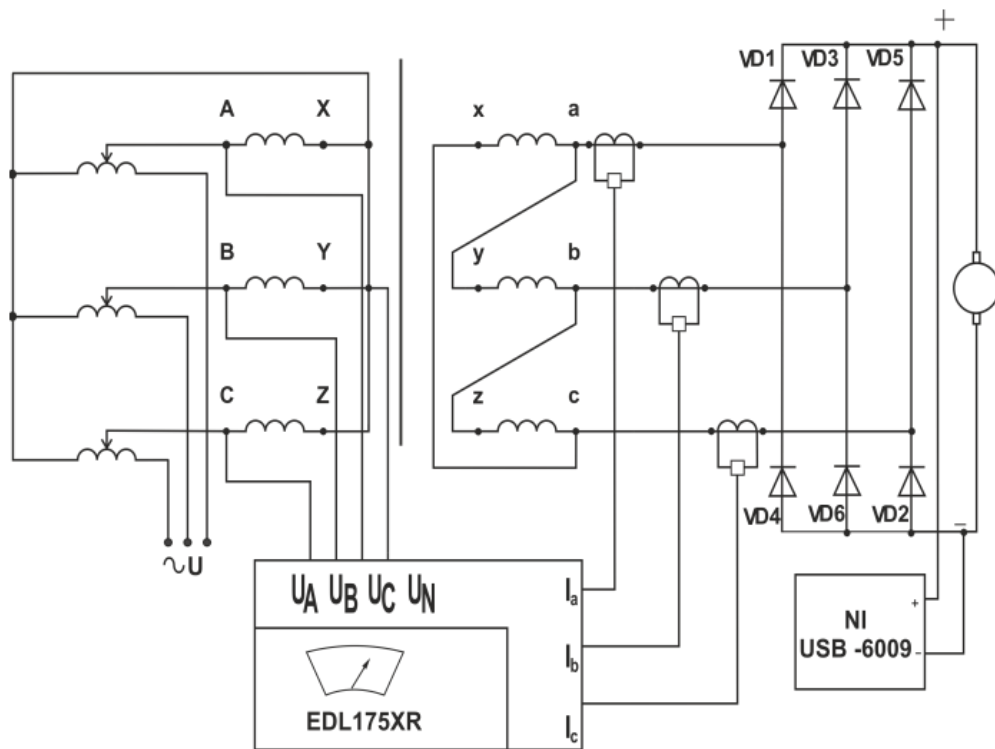


Рис. 4.1. Схема фізичної моделі підстанції постійного струму

Аналогічні розрахунки були проведені на імітаційній комп'ютерній моделі. Структурно імітаційна модель досліджуваної схеми, реалізована в пакеті MATLAB/Simulink з використанням додатка SymPowerSystems, представлена на рис. 4.2.

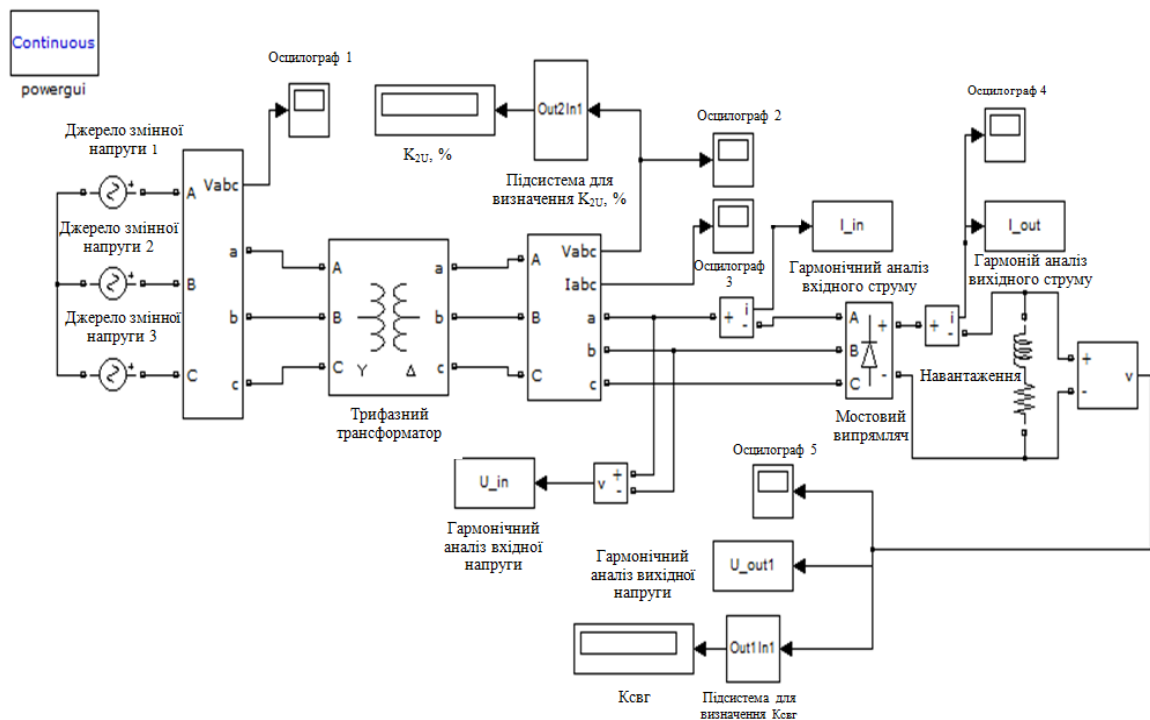


Рис. 4.2. Імітаційна модель досліджуваної схеми в пакеті MATLAB/Simulink

Дослідження проводились в режимах холостого ходу та номінального навантаження для двигуна. На першому етапі експерименту прийнято базову первинну напругу симетричного режиму значенням 80 В. Далі для збільшення коефіцієнту несиметрії за зворотною послідовністю поступово значення напруги змінювалось у одній з фаз трансформатора у межах від 50 до 100 В. Вибір базових та граничних значень передбачав урахування максимально можливих змін напруги, що зустрічається на практиці, та враховував максимальну перевантажну здатність вимірювальної схеми постійного струму.

Для оцінки негативного впливу несиметрії трифазної системи на випрямлену напругу використано коефіцієнт потужності λ , який визначається відношенням активної потужності до повної. Повна та активна потужності визначались за результатами експерименту у колах змінного та випрямленого струму за різних рівнів несиметрії та зниженні напруги в одній фазі. Необхідні розрахунки виконувались за формулами (4.3) – (4.7) з використанням прикладних програмних засобів Excel та MathCAD.

Діюче значення фазної напруги та струму визначаються формулами

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N i_j^2}{N}}; \quad (4.3)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N u_j^2}{N}}; \quad (4.4)$$

відповідно, повна потужність однієї фази

$$S = U \cdot I = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N u_j^2}{N}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N i_j^2}{N}}; \quad (4.5)$$

активна потужність

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt = \frac{\sum_{j=1}^N u_j i_j}{N}; \quad (4.6)$$

коефіцієнт потужності

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\frac{\sum_{j=1}^N u_j i_j}{N}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N u_j^2}{N}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N i_j^2}{N}}}, \quad (4.7)$$

де i_j , u_j – миттєві значення струму та напруги, зафіксовані вимірювальним обладнанням за період зміни напруги T ;

N – кількість зафіксованих миттєвих значень напруги та струму;

$i(t)$, $u(t)$, $p(t)$ – миттєві значення струму, напруги та потужності.

В результаті розрахунків на підставі вимірних величин та їх обробки, отримані зведені результати фізичного моделювання, які приведені у табл. 4.1. Як видно з результатів, за симетричної напруги значення коефіцієнта співвідношення вищих гармонік дорівнює нулю. При збільшенні несиметрії напруги, відповідним чином зростає значення $K_{\text{СВГ}}$.

Таблиця 4.1 – Залежність співвідношення гармонік від несиметрії напруги

K_{2U} , %	$K_{\text{СВГ}}$, в.о.	
	холостий хід	навантаження
зниження напруги однієї фази		
0	0	0
1,0	0,312429	0,285359
5,0	0,836240	0,727361
10,0	1,461658	1,339860
15,0	2,740708	2,688797
підвищення напруги однієї фази		
1,0	0,317751	0,206174
5,0	0,870100	0,765496
8,0	1,232775	1,127256

Криві випрямленої напруги та її частотний спектр за несиметрії 10 % при зниженні напруги в одній фазі у порівнянні з симетричним режимом представлені на рис. 4.3 – 4.6.

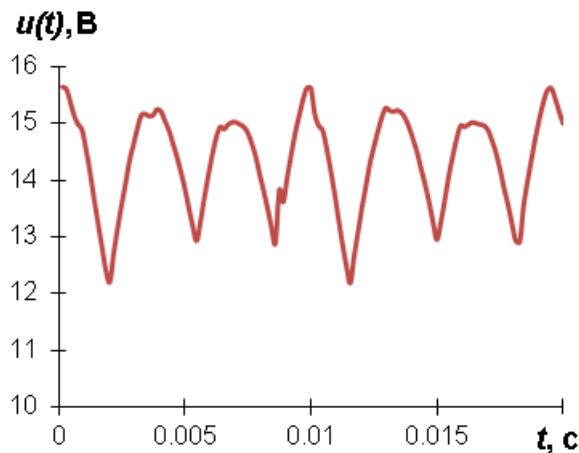


Рис. 4.3. Крива випрямленої напруги за симетричного режиму

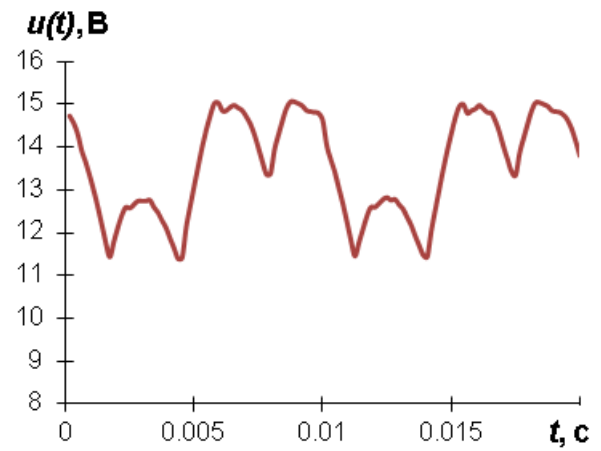


Рис. 4.4. Крива випрямленої напруги при несиметрії 10 %

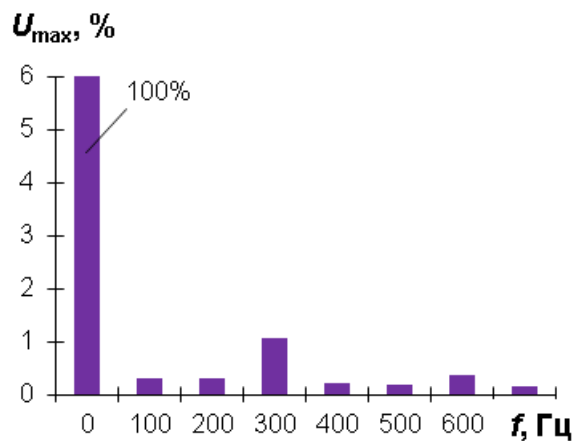


Рис. 4.5. Частотний спектр випрямленої напруги за симетричного режиму

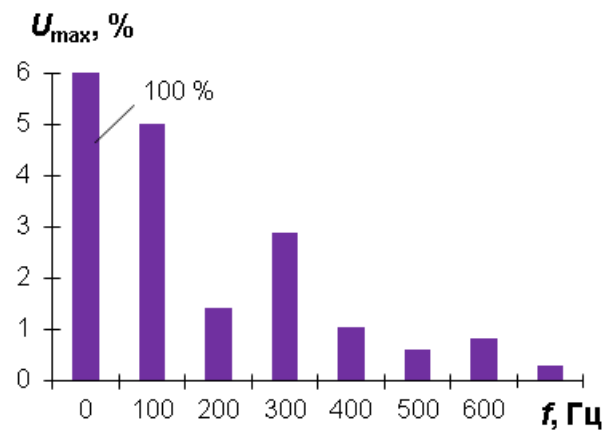


Рис. 4.6. Частотний спектр випрямленої напруги при несиметрії 10 %

Аналогічні результати були отриманні під час імітаційного комп'ютерного моделювання.

За результатами отриманими під час фізичного моделювання за формулами (4.3) – (4.7) розраховані миттєві потужності у колах змінного та випрямленого струму для випадку симетричного (рис. 4.7, а) та

несиметричного (рис. 4.7, б) режиму. За миттєвими потужностями розраховані значення коефіцієнтів потужності для кіл постійного та змінного струму випрямляча (табл. 4.2).

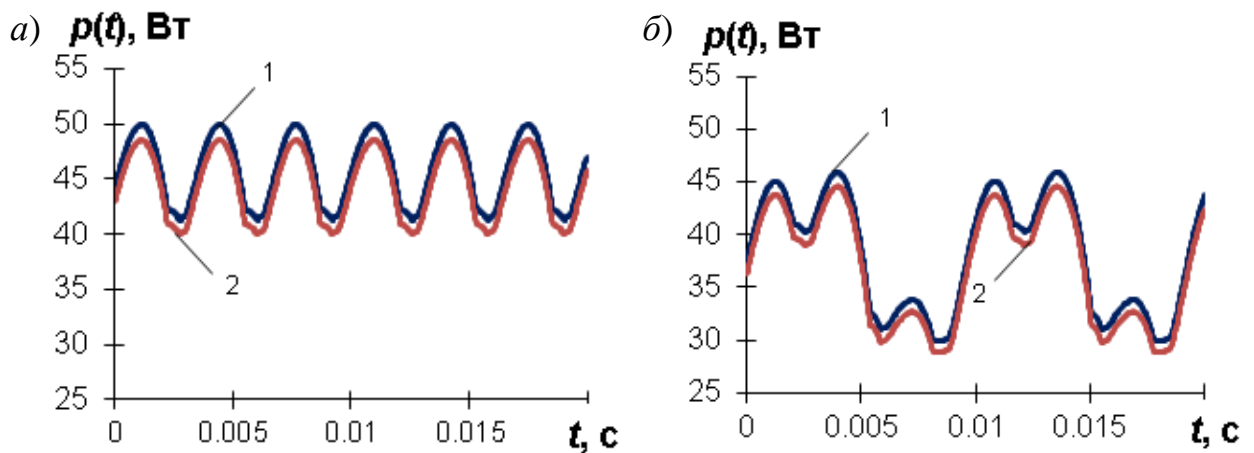


Рис. 4.7. Часові залежності миттєвої потужності кола в симетричному (а) та несиметричному (б) режимах: 1 – трифазного; 2 – випрямленого струму

Таблиця 4.2 – Залежність коефіцієнта потужності від співвідношення гармонік

$K_{2U}, \%$	$K_{СВГ}$	λ_A	λ_B	λ_C	λ_{AC}	λ_{DC}
0	0	0,850	0,843	0,845	0,840	0,9973
2,0	0,4	0,851	0,841	0,845	0,843	0,9973
4,0	0,7	0,853	0,838	0,837	0,840	0,9972
5,0	0,8	0,855	0,834	0,835	0,840	0,9971
10,0	1,6	0,867	0,822	0,830	0,841	0,9970
15,0	2,6	0,881	0,804	0,820	0,840	0,9970

Примітки: $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ – коефіцієнти потужності у фазах кола змінного струму; λ_{AC} – коефіцієнт потужності кола змінного струму; λ_{DC} – коефіцієнт потужності кола випрямленого струму.

На рис. 4.8, 4.9 побудовані залежності коефіцієнта потужності λ від коефіцієнта співвідношення вищих гармонік $K_{СВГ}$ для кожної фази кола змінного струму та окремо для кола постійного струму. Як видно з

приведених графіків, несиметрія напруги досить не значно впливає на результуючі коефіцієнти потужності кіл змінного та постійного струму. Особливої уваги заслуговують закономірності перерозподілу потужностей у фазах змінного струму, які призводять до збільшення коефіцієнта потужності у фазі із заниженою напругою та відповідного зменшення у двох інших.

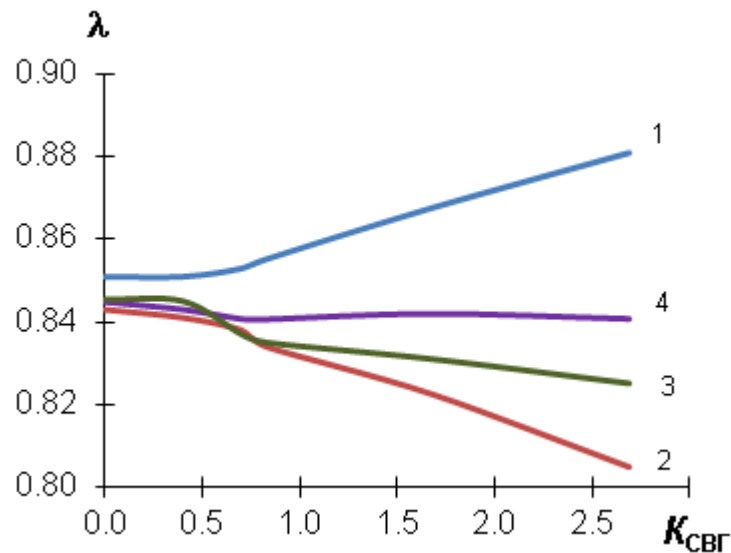


Рис. 4.8. Залежність коефіцієнта потужності від співвідношення гармонік у колі змінного струму: 1 – фаза *A*, 2 – фаза *B*, 3 – фаза *C*, 4 – все коло

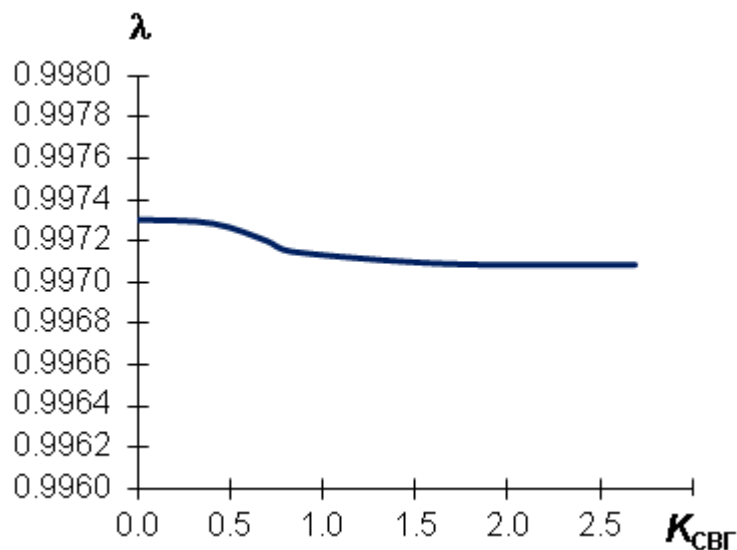


Рис. 4.9. Залежність коефіцієнта потужності від співвідношення гармонік у колі випрямленого струму

Таким чином, з результатів досліджень випливає, що зміна ступеню несиметрії практично не призводить до зміни коефіцієнта трифазної потужності в цілому та коефіцієнта потужності у колі постійного струму. Несиметрія напруги викликає перерозподіл потужностей у фазах випрямляча, збільшуючи тим самим коефіцієнт потужності у фазі із заниженою напругою, та, відповідно, зменшуючи його у інших фазах.

4.3. Виробничо-економічні аспекти експлуатації систем обліку електроенергії

Взаємовідносини між продавцем і покупцем будуються в першу чергу на кількісній, якісній та вартісній оцінці товару. Електрична енергія, що постачається енергопостачальними організаціями, виступає як товар, що характеризується збігом у часі процесів виробництва, транспортування і споживання. Разом з тим до електроенергії, як до товару будь-якого виду, застосовуються категорії «кількість» і «якість». Таким чином, зростаючі вимоги до точності обліку кількості електричної енергії при необхідній якості базуються на економічній основі.

У реальних умовах виробництва, перетворення, розподілу і споживання електроенергії виникають спотворення форми синусоїдного струму і напруги. Ці спотворення виникають при генерації електроенергії, її передачі мережею і, головним чином, при споживанні, пов'язаному з випрямленням чи інвертуванням.

Основними джерелами спотворення струмів і напруг у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць є перетворювальні агрегати тягових підстанцій постійного струму та перетворювальні пристрої електровозів однофазного змінного струму [286]. При цьому, лінії зовнішнього електропостачання, елементи тягової мережі, розподільчі лінії поздовжнього електропостачання і автоблокування, володіючи певними частотними характеристиками вносять свої корективи у гармонійний склад напруг та струмів.

Всі ці фактори негативно впливають на роботу приладів обліку електричної енергії та піднімають проблему електромагнітної сумісності засобів обліку з факторами, що впливають на точність обліку.

В даний час зі зміною виробничо-економічної ситуації в країні, зміною структури ринку електричної енергії загострюються проблеми обліку електричної енергії, зростають вимоги до систем електропостачання.

Широко застосовувані нині лічильники електричної енергії розроблюються і проходять перевірку виходячи з припущення, що напруга в мережі є синусоїдною, і вміст вищих гармонік в струмі навантаження не перевищує 10 %. На цьому ґрунтуються застосовувані в лічильниках матеріали та алгоритми обліку електроенергії.

Однак, більшість споживачів є нелінійними, і при включенні таких електроприймачів в мережу в споживаному струмі і функції живлячої напруги з'являються значний вміст вищих гармонік. І очевидно, що цей факт буде впливати на похибку приладу, призначеного для роботи в колах з практично синусоїдальними сигналами.

Всі лічильники електричної енергії можна класифікувати за типом підключення, вимірюваними величинами та конструкцією.

В індукційних лічильниках магнітне поле нерухомих струмопровідних котушок впливає на рухомий елемент з провідного матеріалу. Рухомий елемент являє собою диск, по якому протікають струми, індуковані магнітним полем котушок. Кількість спожитої електроенергії, в цьому випадку, прямо пропорційна числу обертів диска.

Електронний лічильник представляє собою перетворювач аналогового сигналу в частоту проходження імпульсів, підрахунок яких дає кількість споживаної енергії, при чому відпадає необхідність застосування обертових елементів. Електронні лічильники забезпечують більш широкий інтервал вхідних напруг, дозволяють легко організувати багатотарифні системи обліку, мають режим ретроспективи чим дозволяють визначити кількість спожитої енергії за будь-який період; вимірюють споживану потужність,

вписуються в конфігурацію систем автоматизованого комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ) та володіють додатковими сервісними функціями [216].

У цифрових системах обліку досягний практично будь-який клас точності, при виборі відповідної елементної бази й алгоритмів обробки інформації. Відсутність механічних частин значно підвищує надійність. Обробка інформації в цифровому вигляді дозволяє одночасно підраховувати як активну, так і реактивну складові потужності, це є важливим, наприклад, при обліку енергії в трифазних мережах [217].

Гібридні лічильники електроенергії – проміжний варіант з цифровим інтерфейсом, вимірювальною частиною індукційного або електронного типу та механічним обчислювальним пристроєм.

У господарстві електрифікованих залізниць України на приєднаннях комерційного обліку застосовуються лише сучасні електронні лічильники з класом точності 0,5 або з класом 0,2. Для сторонніх та побутових споживачів невеликої потужності, як правило, використовуються гібридні лічильники з електронною вимірювальною частиною та подальшим механічним обчисленням з класом точності до 1,0. У випадку наявності потужних нетягових споживачів для обліку електроенергії застосовуються електронні лічильники з класом точності 0,5 та підключенням до системи АСКОЕ. В якості технічного обліку у мережах власних потреб можуть використовуватись і застарілі індукційні лічильники з класом точності до 2,0.

Окрім основної мети застосування обліку електроенергії, отриману достовірну інформацію про кількість виробленої електроенергії та потужності, її передачу, розподіл та споживання на оптовому і роздрібному ринку споживання можна використати і для вирішення наступних техніко-економічних завдань на всіх рівнях управління в енергетиці [217], тобто для:

- фінансових розрахунках за електроенергію і потужність між суб'єктами оптового і роздрібною ринку споживання;
- управління режимами електроспоживання;

- визначення та прогнозування складових балансу електроенергії;
- визначення вартості і собівартості виробництва, передачі, розподілу електроенергії та потужності;
- контролю технічного стану та відповідності вимогам нормативно-технічних документів систем обліку електроенергії в електроустановках.

Основними нормативними документами, які регламентують вимоги до виготовлення, перевірки та експлуатації приладів обліку електроенергії є державні стандарти [218]. Типовий електронний лічильник має будову, узагальнена структура якої приведена на рис. 4.11. Датчики струму та напруги формують аналоговий сигнал на вході перетворювача потужність-частота, який, в свою чергу, створює імпульси, що з накопиченням підраховуються мікроконтролером. На мікроконтролер покладаються основні функції сучасних приладів обліку. Можливості, якими володіє мікроконтролер, залежать від його програмного забезпечення, а різноманітність сервісних функцій і виконуваних завдань залежить від того, яке технічне завдання було поставлено перед розробкою програмного забезпечення.

Електронні лічильники після випуску проходять заводську параметризацію, де встановлюються стандартні варіанти тарифікації. Перед установкою на конкретний об'єкт, вони проходять в обов'язковому порядку параметризацію в лабораторії АСКОЕ Енергозбуту, де в електролічильник встановлюються параметри відповідно до проектної документації і вноситься пароль захисту від несанкціонованого доступу.

Згідно з [218] повірці підлягають засоби вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, випускаються з серійного виробництва, ремонту та у продаж, на які поширюється державний метрологічний нагляд. Повірку засобів вимірювальної техніки під час експлуатації та випуску з виробництва проводять метрологічні центри та територіальні органи, в яких зберігаються відповідні еталони. Засоби вимірювальної техніки визначають придатними

до застосування, якщо результати повірки підтверджують їх відповідність метрологічним і технічним вимогам до цих засобів вимірювальної техніки, встановленим у нормативних чи експлуатаційних документах.

При проведенні повірки лічильників виконують наступні операції перевірки зовнішнього огляду, електричної міцності ізоляції, роботи лічильного механізму, порогу чутливості, відсутності самоходу та метрологічних характеристик в режимі несиметричного навантаження

При виконанні повірки клас точності встановлюється при дотриманні наступних нормальних умов роботи лічильника, а саме:

- 1) температура навколишнього середовища $20 \pm 2^\circ\text{C}$;
- 2) відносна вологість повітря 30...80 %;
- 3) атмосферний тиск 630...795 мм. рт. ст.;
- 4) відсутність зовнішніх магнітних полів (не більше 0.5 мТл);
- 5) номінальна частота $50 \pm 0,5$ ($60 \pm 0,6$) Гц;
- 6) пряме чергування фаз;
- 7) рівномірність і симетричність навантаження;
- 8) синусоїдність кривої струму та напруги з коефіцієнтом несинусоїдності не більше 5%;
- 9) відхилення значення фазної або лінійної напруги від номінального значення $\pm 1\%$;
- 10) відхилення значення сили струму в кожній фазі від середнього значення $\pm 1\%$;
- 11) відхилення від вертикального розташування лічильника по вертикалі не більше 1 %.

Кількісне значення основної відносної похибки лічильника δ_c , % розраховують для кожного з режимів перевірки за наступною формулою

$$\delta_c = \frac{C_c \cdot N_c - C_y \cdot N_e}{C_y \cdot N_e} \cdot 100, \quad (4.8)$$

де C_c – постійна лічильника, що підлягає повірці, виражається у ват-годинах на імпульс;

C_y – коефіцієнт перетворення еталонних засобів вимірювання повірочної установки;

N_c, N_e – число імпульсів, що надходять з вихідного пристрою до лічильника, що повіряється та еталонного лічильника відповідно.

Результати повірки вважають прийнятними, якщо отримані значення основної відносної похибки при всіх точках навантаження не перевищують значення меж допустимої основної відносної похибки. Наприклад, для лічильника з класом точності 1,0 (для активної енергії) значення меж допустимої основної відносної похибки, відповідно до [218], складає $\delta_c = \pm 1,5 \%$, а для класу точності 2,0 (реактивної енергії) $\delta_c = \pm 2,5 \%$.

Таким чином, вимоги діючої нормативної документації при встановленні класів точності приладів обліку електроенергії не в повній мірі враховують реального стану показників якості електроенергії, які мають місце на тягових підстанціях постійного та змінного струму.

4.4. Дослідження роботи електронних лічильників при зниженій якості електроенергії

З метою дослідження роботи обліку електричної енергії у несинусоїдному режимі в лабораторії навмисно створені умови, які відрізняються від вимог стандарту стосовно допустимих значень синусоїдності напруги та струму.

Схема для вимірювання лічильниками спожитої електроенергії приведена на рис. 4.12, яка складається з 2 частин:

- 1) для живлення обмоток напруги лічильників з використанням ЛАТРу, до вторинної обмотки якого підключаються відповідні обмотки кожного лічильника;

2) фізичний макет компенсації реактивної потужності з плавним тиристорним регулюванням і складається з:

- батареї конденсаторів увімкнених послідовно з реактором, утворюючи *LC*-фільтр налаштований на 3 гармоніку (компенсуючий контур);
- послідовно з'єднаних реактора та зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів (декомпенсуючий контур);
- підключеного індуктивного навантаження, у якості якого використовується двигун увімкнений через підвищуючий трансформатор.

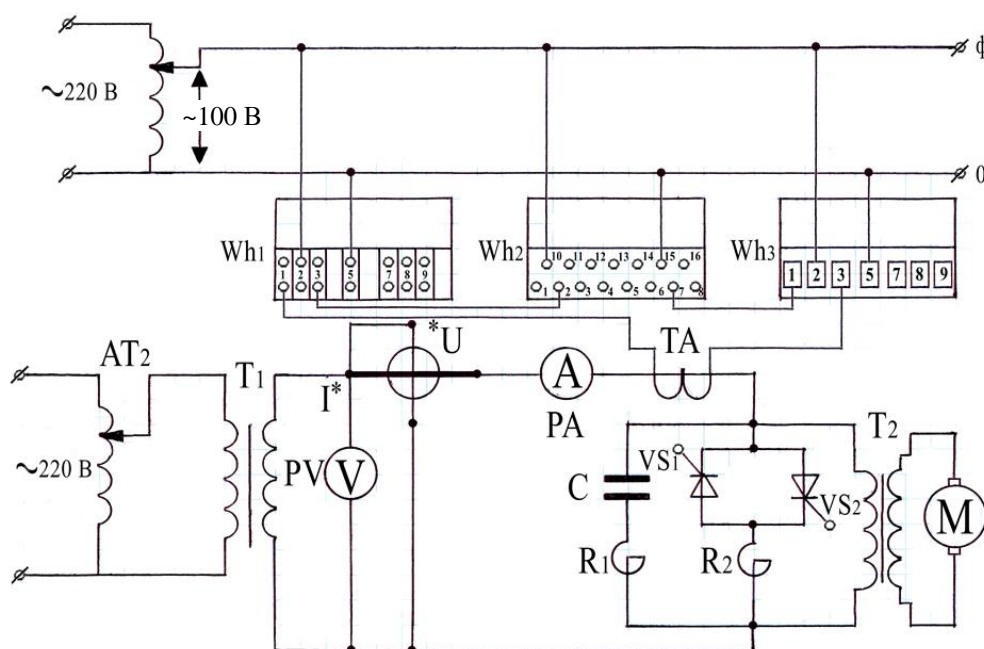


Рис. 4.12. Схема підключення приладів обліку та навантаження

Лічильники у першій частині схеми було обрано одного класу точності (1,0) різних типів, які для уникнення можливих претензій зі сторони виробників свідомо не вказуються.

Для досягнення поставленої задачі у якості еталонного приладу застосовано аналізатор якості електричної енергії Satec EDL-175xr з класом точності 0,2. Еталонний прилад має 2 режими вимірювання реактивної потужності:

1) за миттєвими значеннями струму та напруги розраховується активна та повна потужності, а реактивна потужність є їх функцією, $Q = f(S, P)$;

2) за діючими значеннями струму та напруги, а також за кутом між ними розраховуються активна та реактивна потужності, а повна потужність є їх функцією, $S = f(Q, P)$.

Вимірювання проводились одночасно і лічильником, і еталонним приладом, з налаштуваннями спочатку на обидва режими вимірювання потужності. Знімання показів приладів відбувалось з кожною зміною характеру навантаження. Реєструвались такі показники: активна та реактивна потужності, струм навантаження, коефіцієнт спотворення форми струму, фіксувались осцилограми струму і напруги.

Режими зміни навантаження, використані у даному експерименті можна умовно поділити на три частини:

1) режим, при якому відсутня реактивна потужність основної гармоніки, $\varphi_1 = 0$;

2) режим недокомпенсації реактивної потужності при недорегулюванні компенсації реактивної потужності за допомогою тиристорів;

3) режим перекомпенсації, за якого відсутнє регулювання тиристорним декомпенсатором.

Результати експериментальних вимірювань похибок зведені до табл. 4.3.

На рис. 4.13 – 4.15 представлені характерні осцилограми струмів і напруги в окремих режимах навантаження.

Отримані значення сили струму, коефіцієнта спотворення форми кривої струму та кути зсуву фаз під час проведення експерименту в лабораторних умовах дають можливість відтворити форми кривих струму за допомогою програмного забезпечення WinSAM (рис. 4.16) універсальної системи для перевірки трифазних лічильників електричної енергії MTS 320 виробництва Zera в умовах сертифікованої лабораторії.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювань похибок лічильника

Дослідний		Еталонний				
P , Вт	Q , вар	I_{THD} , %	I , А	P , Вт	Q , вар	
					1	2
184	-382	2,2	4,35	181	-393	-390
178	-351	5,2	4,06	179	-361	-371
172	-316	10,6	3,7	174	-320	-336
170	-283	14,8	3,47	168	-290	-288
170	-236	20,6	3,09	169	-243	-251
174	-171	31,1	2,68	172	-176	-185
180	-123	37,5	2,47	178	-126	-160
225	-10	53,1	2,591	224	-13	-113
233	9	52,3	2,7	230	8	-106
305	148	40,5	3,72	304	146	216
395	262	30,2	5,07	393	268	297

Примітка: 1 – $Q = f(S, P)$; 2 – $S = f(P, Q)$.

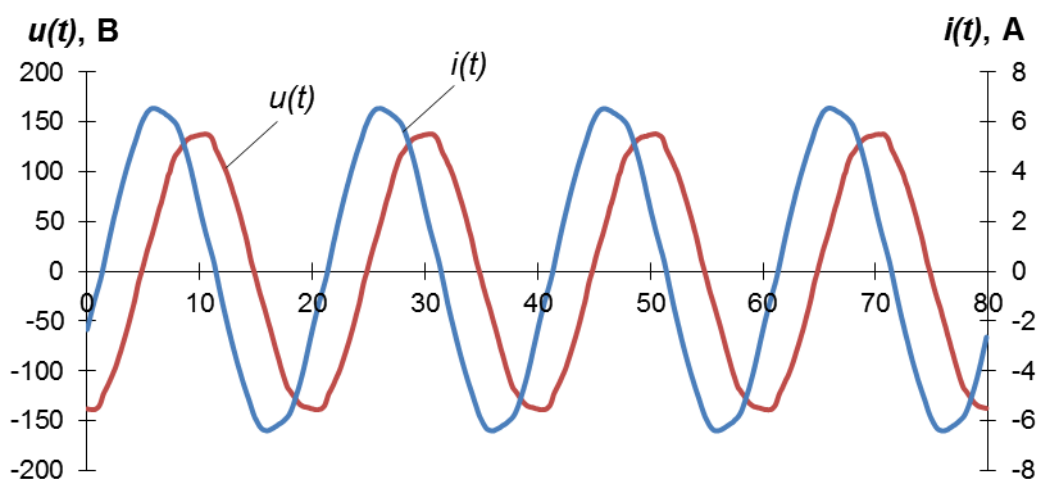


Рис. 4.13. Осцилограми напруги і струму в режимі перекомпенсації реактивної потужності при відсутності регулювання ($I = 4,35$ А; $\varphi_1 = -64,2^\circ$; $I_{\text{THD}} = 2,2$ %)

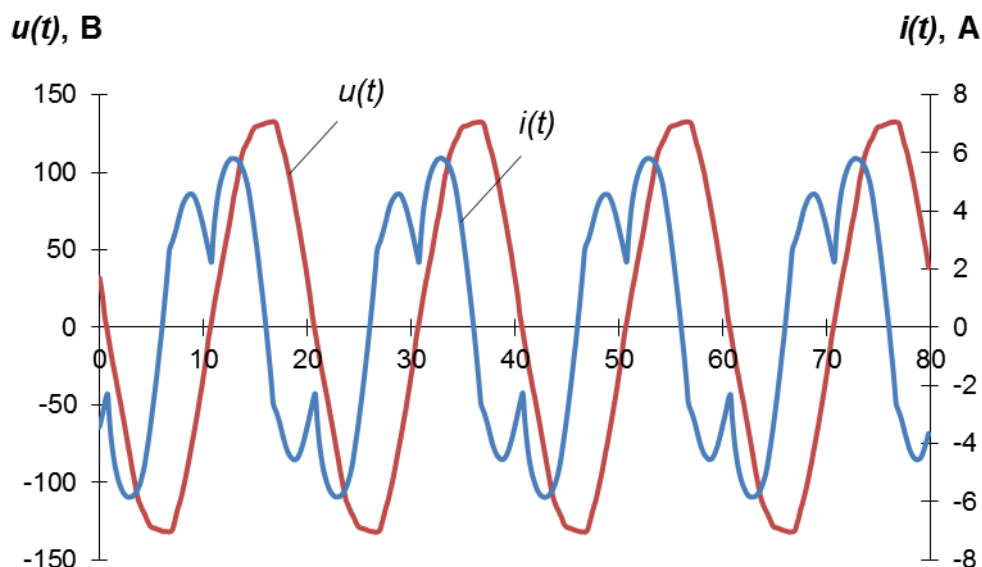


Рис. 4.14. Осцилограми напруги і струму при початку регулювання струму декомпенсації ($I = 5,07$ А; $\varphi = -34,3^\circ$; $I_{\text{THD}} = 30,2$ %)

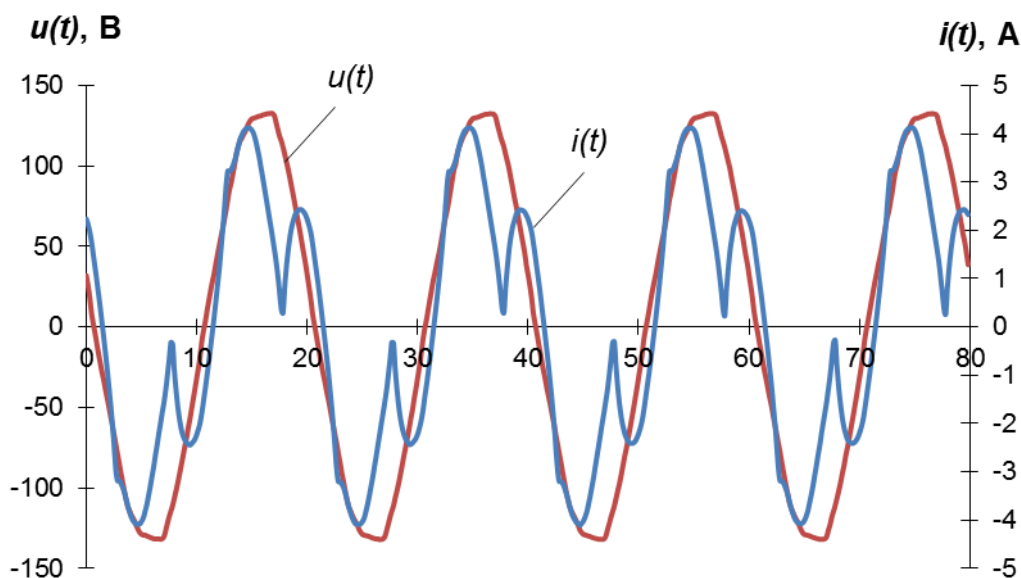


Рис. 4.15. Осцилограми напруги та струму у режимі, при якому відсутня реактивна потужність основної гармоніки ($I = 2,591$ А; $\varphi_1 = 0^\circ$; $I_{\text{THD}} = 53,1$ %)

Під час повторення експерименту в умовах сертифікованої лабораторії за домовленістю були використані ті ж самі типи електронних лічильників.

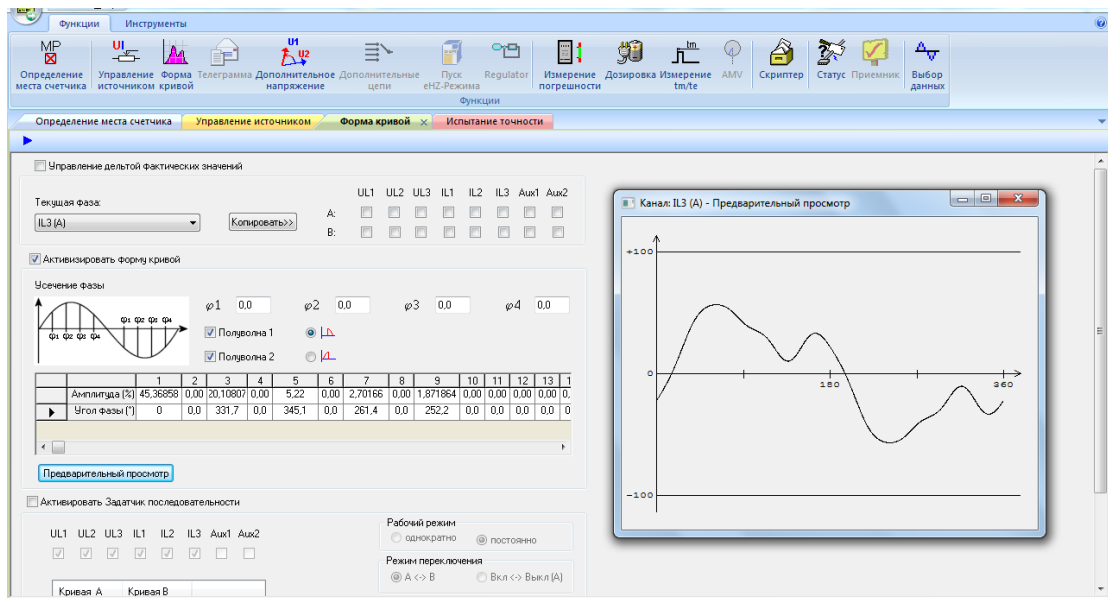


Рис. 4.16. Скріншот програми WinSAM при уведенні параметрів для отримання кривої форми струму з нульовим кутом зсуву фаз за основною гармонікою

При обробці результатів, отриманих під час виконання експериментальних дослідів, отримано залежність похибки електронного лічильника від коефіцієнта спотворення струму (рис. 4.17), яка відображає, що при значеннях $I_{ТНД}$ більше 25 %, дослідний лічильник виходить за клас точності.

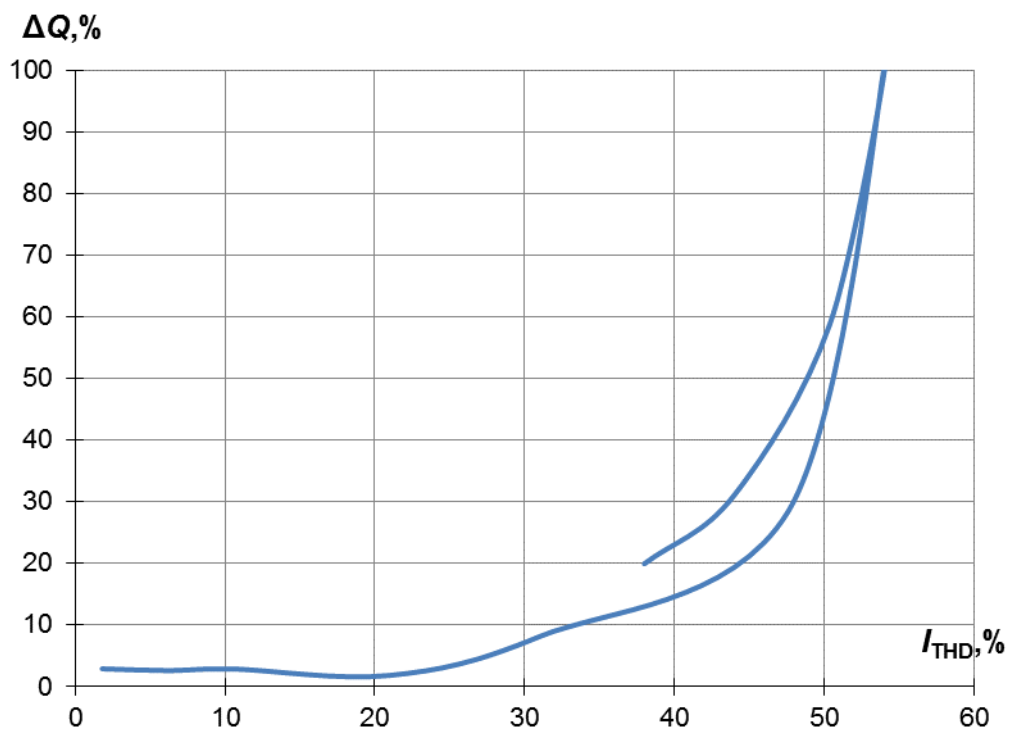


Рис. 4.17. Похибка електронного лічильника в залежності від коефіцієнта спотворення струму

Зіставляючи результати вимірювань реактивної потужності для двох приладів та двох режимів роботи еталонного приладу, отримана залежність (рис. 4.18), з якої видно, що для малих значень коефіцієнта спотворення струму реактивні потужності для двох методів розрахунку практично не відрізняються. При збільшенні спотворень струму збільшується різниця між цими величинами. Особливим є те, що за наявності спотворень реактивна потужність за концепцією Фрізе змінює знак при зміні характеру навантаження, при цьому не дорівнюючи нулю.

Отримані результати свідчать про те, що при вимірюванні активної потужності (за умов, що не відповідають повірочним аспектам – нелінійне навантаження, підвищений рівень несинусоїдності напруги) основна відносна похибка відповідає допустимим класу точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності (за тих самих умов) основна відносна похибка відповідає допустимим класу точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше ніж 25%, а для інших значень – не відповідає.

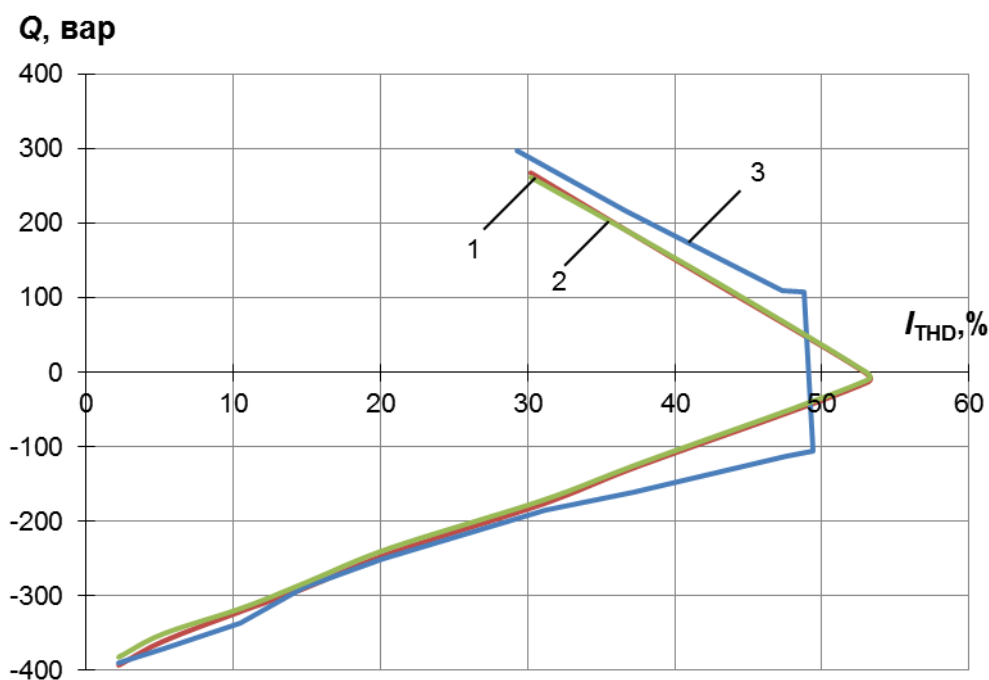


Рис. 4.18. Реактивні потужності в залежності від коефіцієнта спотворення струму: 1 – основної гармоніки за лічильником; 2 – основної гармоніки за еталонним приладом; 3 – потужність Фрізе за еталонним приладом

При проведенні дослідів в умовах сертифікованої лабораторії за допомогою системи для перевірки лічильників отримані чисельні результати, які приведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Похибки, отримані з модуля вимірювання похибок лічильників

Прилад	Похибка δ_c , % за умов		
	$\varphi_1 = 0$	$\varphi > 0$	$\varphi < 0$
Лічильник 1	∞	-0,171	0,26
Лічильник 2	100	-5,151	3,883
Лічильник 3	0	-0,098	-0,123

Як видно з табл. 4.4, лічильники 1 та 3 не виходять за межі своїх класів точності активної потужності за умов, що не відповідають повірочним аспектам, а лічильник типу 2 – виходить. Також, аналізуючи покази дослідних та зразкового лічильників, встановлено, що розрахунок реактивної потужності ведеться за основною гармонікою 50 Гц, а можливі потоки потужностей інших гармонік жодним з обраних типів не враховується .

4.5. Висновки до розділу 4

На підставі досліджень особливостей розподілу потужності у випрямлячах за різних рівнів несиметрії живлячої напруги встановлено, що остання впливає на співвідношення вищих гармонік на виході випрямляча таким чином, що у фазі із заниженої напругою коефіцієнт потужності збільшується, а у інших фазах – зменшується.

Використаний метод визначення несиметрії напруги з використанням коефіцієнта співвідношення вищих гармонік дістав подальшого розвитку та дозволяє достатньо точно визначити ступінь несиметрії та енергетичні характеристики електричного кола за відомими значеннями гармонік в колі постійного струму.

Цифрові системи обліку можна побудувати для будь-якого класу точності при відповідному виборі елементної бази, алгоритмів обробки інформації та відповідності державних стандартів сучасним вимогам.

Електронні прилади обліку електричної енергії можуть мати декілька алгоритмів визначення реактивної потужності, які базуються на відомих теоретичних підходах до визначення неактивних складових повної потужності. Виконані досліджень показують, що при виборі типу комерційних приладів обліку для нелінійних навантажень, зокрема для тягових підстанцій постійного та змінного струму, необхідно звертати увагу на результати випробувань при заниженій якості електричної енергії.

Для електронних приладів обліку електроенергії в умовах, що відповідають реальному стану показників якості електроенергії тягових підстанцій постійного і змінного струму, встановлено, що при вимірюванні активної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше 25%.

Отримані в четвертому розділі результати досліджень впливу режимів напруги на систему обліку та енергетичні характеристики випрямлячів тягових підстанцій постійного струму опубліковано в роботах [14, 16, 18, 20, 22].

РОЗДІЛ 5

НАУКОВІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

5.1 Постановка задачі

Система електропостачання тяги постійного струму представляє собою розподілену у просторі сукупність електротехнічних пристроїв для живлення електрорухомого складу. Напруга в контактній мережі залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів – організації руху поїздів, режиму ведення кожного поїзду та режиму роботи пристроїв електропостачання. Значення швидкості руху поїзду в значній мірі залежить від напруги на струмоприймачеві електровозу, яка визначається параметрами системи електропостачання та поїзною ситуацією. Збільшення об'єму перевезень та організація руху швидкісних та високошвидкісних поїздів призводить до того, що пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень.

Як показав досвід експлуатації, відомі способи регулювання напруги на шинах тягових підстанцій [164, 177, 185, 265] не вирішили цю проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат.

Тому, поставимо задачу пошуку альтернативного способу забезпечення номінального рівня напруги за допомогою розширення інформативності про режим напруги в контактній мережі.

Таким чином, на основі неповної інформації про розташування навантажень та їх значення на міжпідстанційній зоні, з врахуванням режиму роботи системи зовнішнього електропостачання, вимагається визначити керуючу послідовність впливів на пункти підсилення тягової мережі, яка забезпечить кожній одиниці електрорухомого складу номінальний рівень напруги та, відповідно, знизить втрати потужності в системі електропостачання.

5.2. Принципи визначення керуючої послідовності впливів для пунктів підсилення тягової мережі

Формалізуємо поставлену задачу. Нехай маємо деяку міжпідстанційну зону, на якій може знаходитись різна кількість навантажень I_1, I_2, \dots, I_n (рис. 5.1). З врахуванням можливості різного рівня напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, необхідно визначити залежність струму пункту підсилення $I_{\text{ПП}}$, який при зміні поїзної ситуації дозволить забезпечити на струмоприймачі кожного поїзду номінальний рівень напруги.

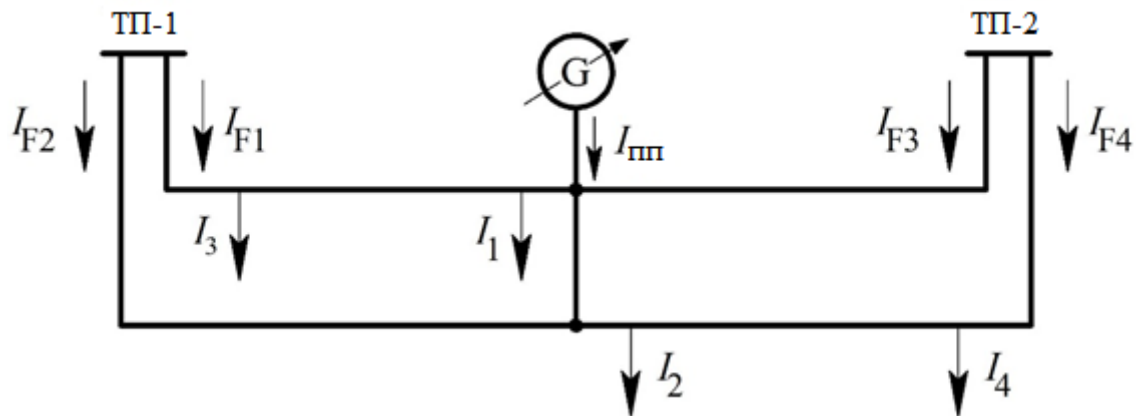


Рис. 5.1. Розрахункова схема міжпідстанційної зони з пунктом підсилення

Для вирішення поставленої задачі стабілізації напруги на струмоприймачеві застосуємо розроблені підходи просторово-часового уявлення електричних величин до розрахунку систем тягового електропостачання при формалізації задачі оптимального керування.

Задача оптимального керування полягатиме в тому, що необхідно для прийнятої математичної моделі

$$\Delta W(\vec{I}) = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \left[\sum_{i=1}^k \Delta U_{K_i}(\vec{I}, t, x) \times \sum_{i=1}^k I_{K_i}(\vec{I}, t, x) \right] dx dt, \quad (5.1)$$

визначити струми пунктів підсилення з метою мінімізації цільової функції $\Delta W(\vec{I}) \rightarrow \min$ при обмеженнях за напругою для кожного електрорухомого складу $U_{\min} \leq U_e \leq U_{\max}$ та за струмом кожного пункту підсилення $I_{\text{ПП}} \leq I_{\max}$.

Вважатимемо, що в кожен момент часу відомий розподіл спаду напруги уздовж електрифікованої ділянки. Тоді, можемо скласти наступну графічну інтерпретацію для визначення закону управління пунктом підсилення при його роботу у складі слідкуючої системи (рис. 5.2).

Уведемо необхідні позначення. Для деякого моменту часу, матимемо

U_{d1}, U_{d2} – точки, що відповідають рівню напруги на шинах першої та другої підстанції, В;

$\Delta U'_k(I_{\text{вир}})$ – функція розподілу спаду напруги, що залежить від вирівнювального струму, В;

$\Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}})$ – функція розподілу спаду напруги від струму підсилюючого пункту, В;

$\Delta U_{\text{доп}}(U_d, I_{\text{вир}})$ – допустима втрата напруги для забезпечення стабілізованого рівня напруги, що визначається константою $\Delta U_{\text{ст}}$, В.

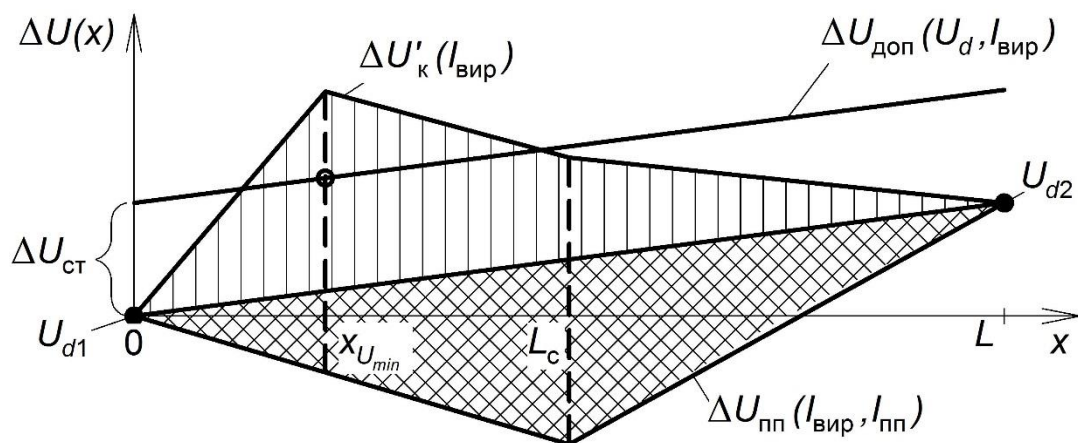


Рис. 5.2. Графіки функцій для визначення рівняння стабілізації напруги

Для визначення керуючої послідовності впливів використаємо рівняння стабілізації напруги, в якому використовуються величини, що змінюються в часі і просторі. Таким чином, маємо

$$\Delta U'_k(I_{\text{вир}}) + \Delta U_{\text{пп}}(x_{\text{пп}}, x_{U_{\text{min}}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{пп}}) = \Delta U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{пп}}(I_{\text{пп}}), \quad (5.2)$$

де $\Delta U'_k(I_{\text{вир}})$ – падіння напруги в контактній мережі з урахуванням вирівнювального струму $I_{\text{вир}}$;

$\Delta U_{\text{III}}(I_{\text{вир}}, I_{\text{III}})$ – падіння напруги від підсилюючого пункту розташованого в координаті x_{III} , зі струмом I_{III} в точці $x_{U_{\text{min}}}$ з урахуванням вирівнювального струму $I_{\text{вир}}$;

ΔU_{CT} – втрата напруги до струмоприймача електровозу при якій на останньому буде забезпечено стабілізований рівень напруги;

$\Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}})$ – втрати напруги від вирівнювального струму $I_{\text{вир}}$.

$\Delta U_{\text{CT}} = U_{d1} - U_{\text{CT}}$ в даному випадку приймаємо $U_{\text{CT}} = 3000 \text{ В}$

$$\Delta U'_k(I_{\text{вир}}) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta U_{k1i} + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta U_{k2i} + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}), \quad (5.3)$$

де ΔU_{k1i} та ΔU_{k2i} – втрати напруги від одного поїзду на першій та другій колії відповідно;

n_1, n_2 – кількість поїздів на першій та другій колії відповідно.

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{III}}(x_{\text{III}}, x_{U_{\text{min}}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{III}}) = & I_{\text{ук}}(x_{\text{III}}, I_{\text{III}}) \cdot r_0 \cdot x_{\text{III}} + \\ & + I_{\text{ук}}(x_{\text{III}}, I_{\text{III}}) \cdot r_0 \cdot (L_c - x_{\text{III}}) + I_{\text{ук}}(x_{\text{III}}, I_{\text{III}}) \cdot r_0 \cdot (x_{\text{III}} - L_c) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) \end{aligned}$$

$I_{\text{ук}}(x_{\text{III}}, I_{\text{III}})$ – струм в контактній мережі від підсилюючого пункту, який знаходиться в точці x_{III} .

$$I_{\text{ук}}(x_{\text{III}}, I_{\text{III}}) = \Phi_1(x_{\text{III}}) \cdot I_{\text{III}} + \Phi_2(x_{\text{III}}) \cdot I_{\text{III}} + \Phi_4(x_{\text{III}}) \cdot I_{\text{III}}$$

Φ_1, Φ_2, Φ_4 – функції струморозподілу.

Для спрощення запису функції струморозподілу та опори замінімо функцією $f(x)$, тоді

$$\Delta U_{\text{III}}(x_{\text{III}}, x_{U_{\text{min}}}, I_{\text{вир}}, I_{\text{III}}) = I_{\text{III}} \cdot f(x) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}})$$

Тоді рівняння стабілізації напруги прийме вигляд:

$$I_{\text{III}} \cdot f(x) + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) = \Delta U_{\text{CT}} + \Delta U_{\text{вир}}(I_{\text{вир}}) - \Delta U'_k(I_{\text{вир}})$$

Струм підсилюючого пункту в результаті визначатиметься

$$I_{\text{пп}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}} - \Delta U'_{\text{к}}(I_{\text{вир}})}{f(x)} \quad (5.4)$$

Струм $I_{\text{пп}}$ при $\Delta U_{\text{ст}} < \Delta U'_{\text{к}}(I_{\text{вир}})$ має від'ємне значення, що вказуватиме на необхідність генерації додаткової потужності (рис 4.13).

Для безпосереднього розрахунку за формулою (5.4) розроблено алгоритм за допомогою якого можна розраховувати струм, що повинен видаватись пунктом підсилення. Алгоритм має вигляд, представлений на рис. 5.3. Умовно розділити структуру алгоритму можна на три частини.

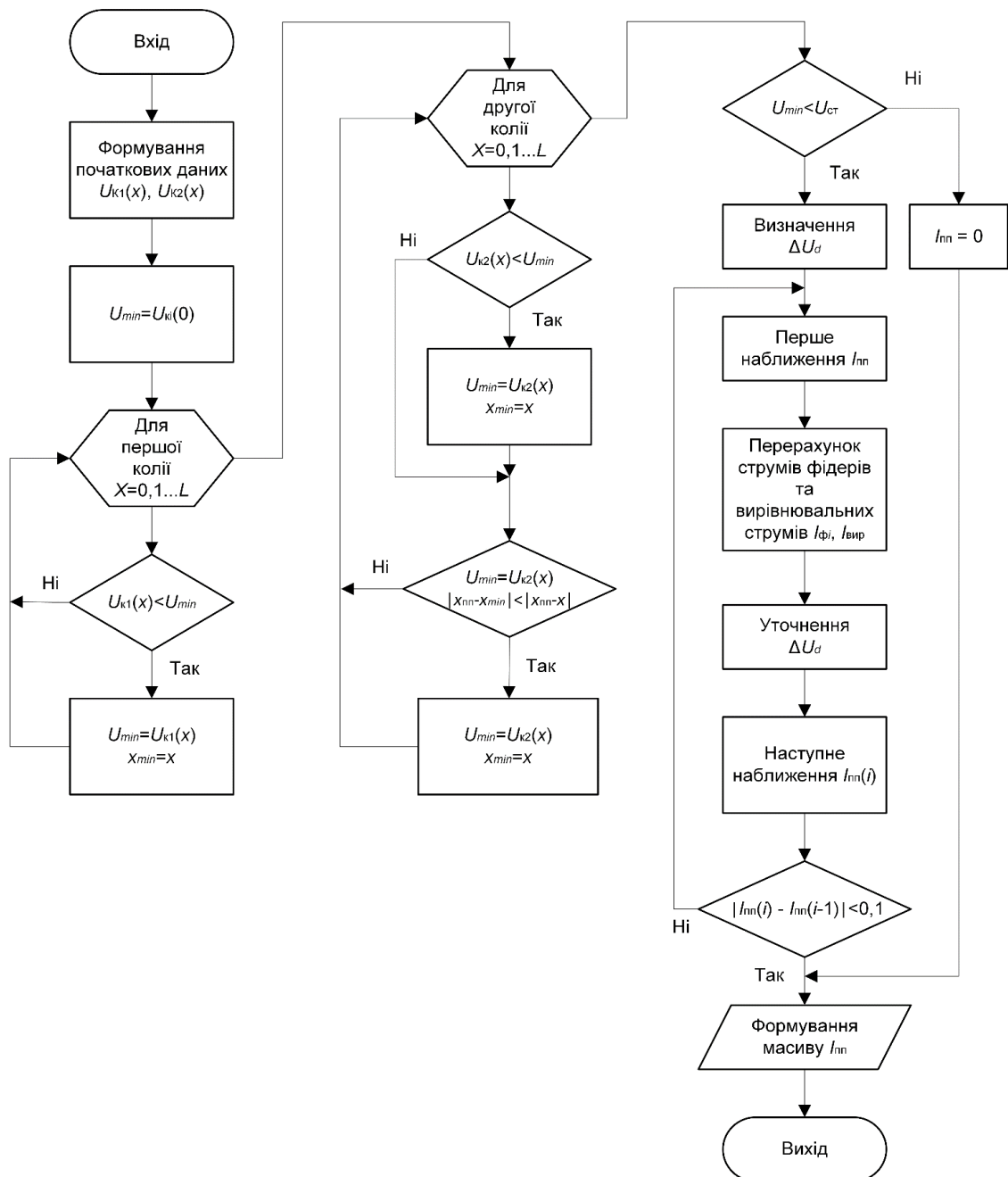


Рис. 5.3. Алгоритм розрахунку струму регулювання пункту підсилення

Перший та другий стовбець виконують розрахунок та формування початкових даних залежності $U_{K1}(t)$ та $U_{K2}(t)$. Третій стовпчик з використанням методу ітерацій виконує розрахунок струмів для підсилюючого пункту, щоб вирівняти напругу в кожній точці, з урахуванням зміни поїзної ситуації.

Результат роботи алгоритму представлено на рис. 5.4-5.5 у вигляді часових залежностей напруги на струмоприймачі кожного електровозу та безпосередньо необхідного струму пункту підсилення (рис. 5.6).

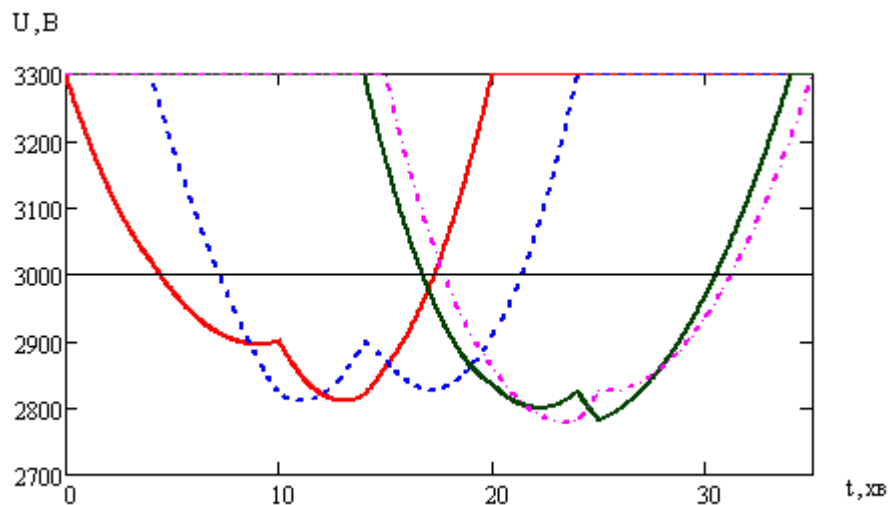


Рис. 5.4. Часові залежності напруги на струмоприймачі чотирьох електровозів при русі міжпідстанційною зоною зі стабілізацією напруги

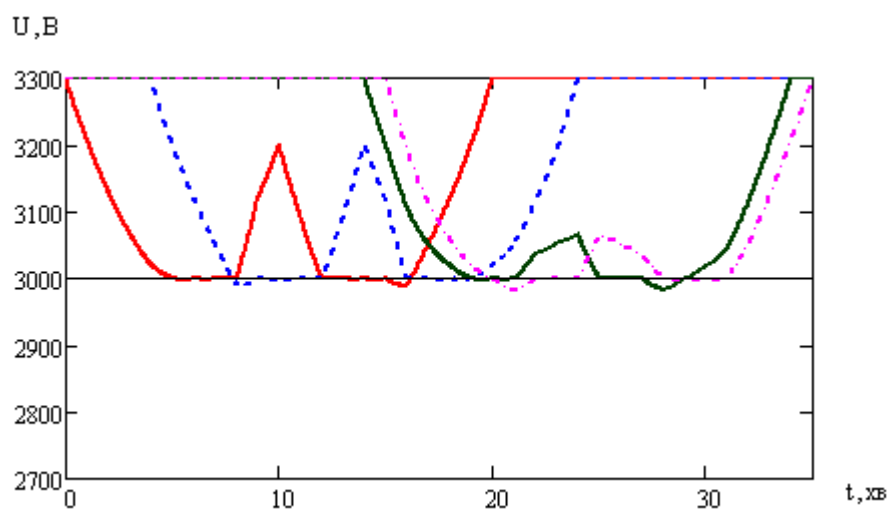


Рис. 5.5. Часові залежності напруги на струмоприймачі чотирьох електровозів при русі міжпідстанційною зоною без стабілізації напруги

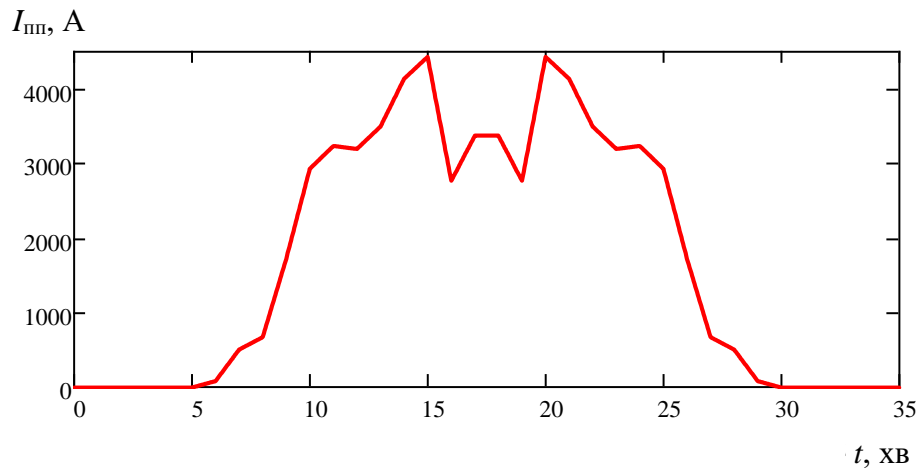


Рис. 5.6. Часова залежність струму пункту підсилення

Як видно з рис. 5.5, напруга на струмоприймачі жодного електровозу не знижується нижче заданого рівня стабілізації, що також і забезпечує майже двократне зниження втрат потужності в контактній мережі.

На основі розробленої моделі досліджені різні схеми живлення тягової мережі з пунктами підсилення. В результаті отримані залежності показників системи тягового електропостачання.

Нижче на прикладі двосторонньої схеми живлення показані оптимізаційні розрахунки зі стабілізацією напруги на струмоприймачах електрорухомого складу (рис. 5.7-5.9), з обмеженням потужності пункту підсилення (рис. 5.10-5.12). Порівняння отриманих характеристик показує, що найменших втрат можна досягти в режимі відсутності обмежень потужності пункту підсилення та без стабілізації напруги.

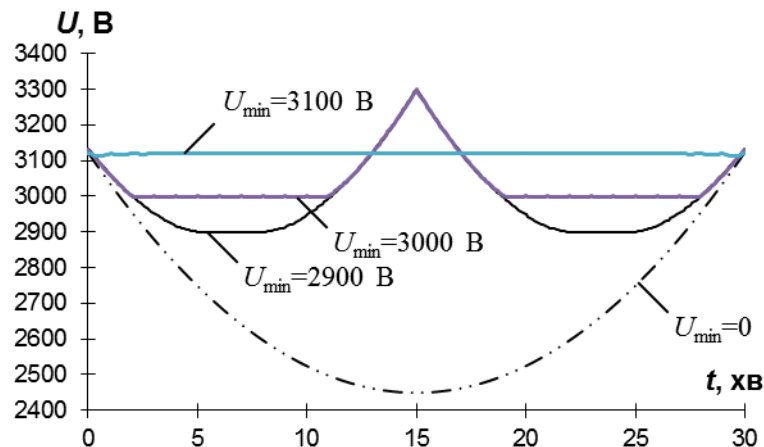


Рис 5.7. Напруга на струмоприймачі електрорухомого складу в режимі обмеження мінімальної напруги

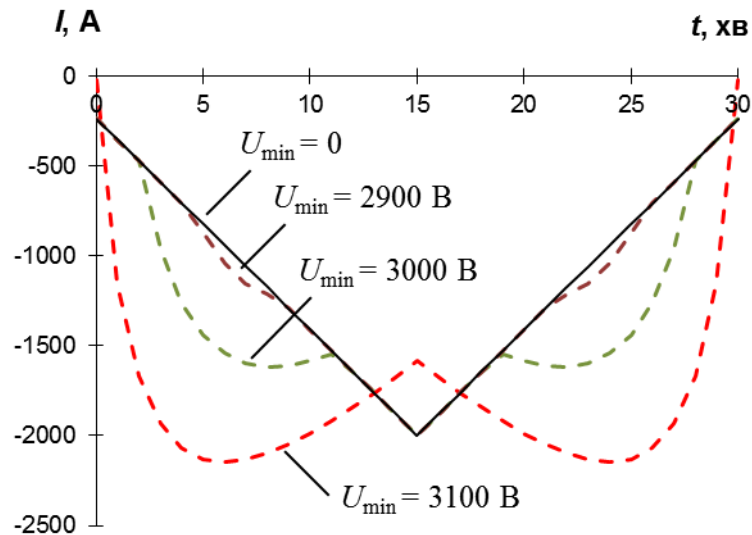


Рис. 5.8. Струми пунктів підсилення в режимі обмеження мінімальної напруги

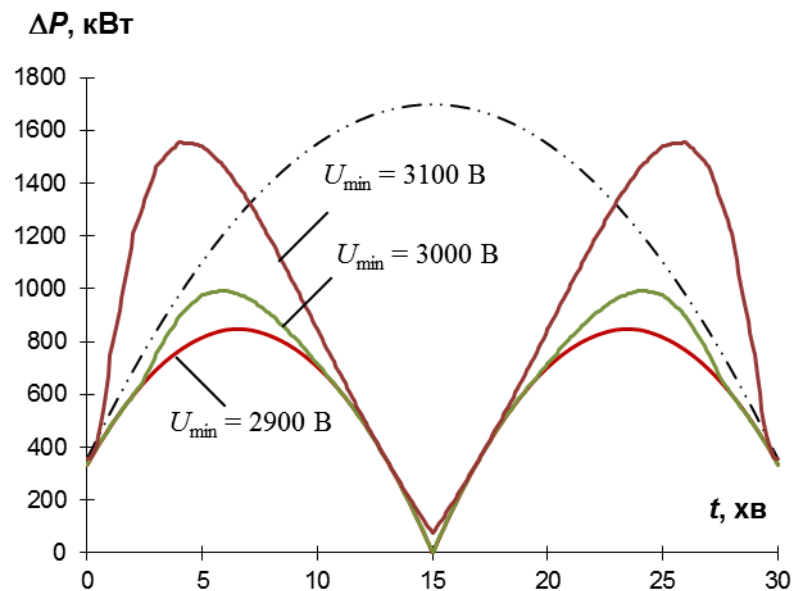


Рис. 5.9. Втрати потужності в тяговій мережі в режимі обмеження мінімальної напруги

В режимі обмеження струму пунктів підсилення враховувалось зниження загальної величини капітальних вкладень в систему підсилення тягової мережі, таким чином, щоб потужність пункту підсилення не перевищувала 2-3 МВт. При цьому, мінімальний ефект у зниженні втрат потужності в системі тягового електропостачання на 40 % спостерігався для потужності пункту підсилення від 1,5 МВт.

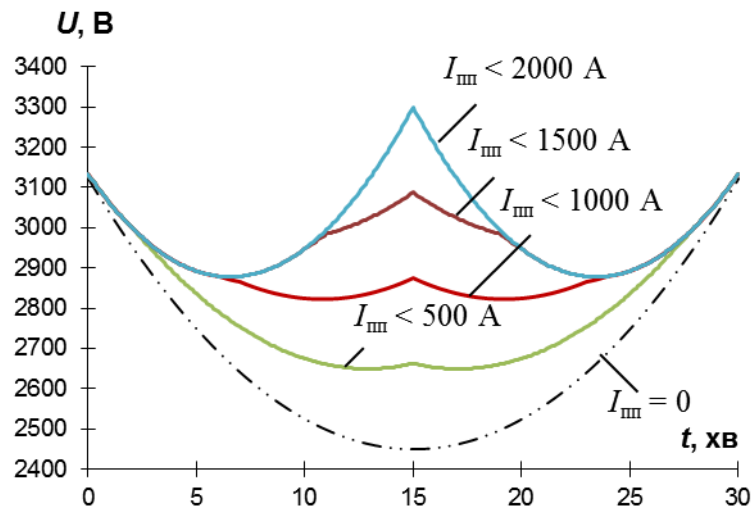


Рис. 5.10. Напруги на струмоприймачі електрорухомого складу в режимі обмеження струму пункту підсилення

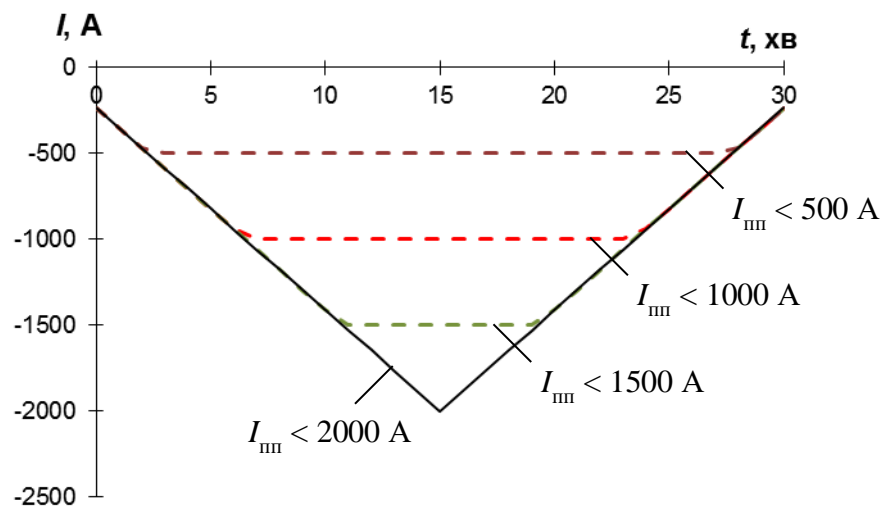


Рис. 5.11. Струми пункту підсилення тягової мережі в режимі обмеження

Дослідження також проводились для ділянки з трьома міжпідстанційними зонами та трьома підсилюючими пунктами при пакетному пропуску поїздів з інтервалом 10 хв (рис. 5.13-5.16). В цій розрахунковій схемі враховувався також взаємний вплив однієї міжпідстанційної зони на інші.

Слід відзначити також збільшення часу розрахунку для складних схем, що включають декілька міжпідстанційних зон.

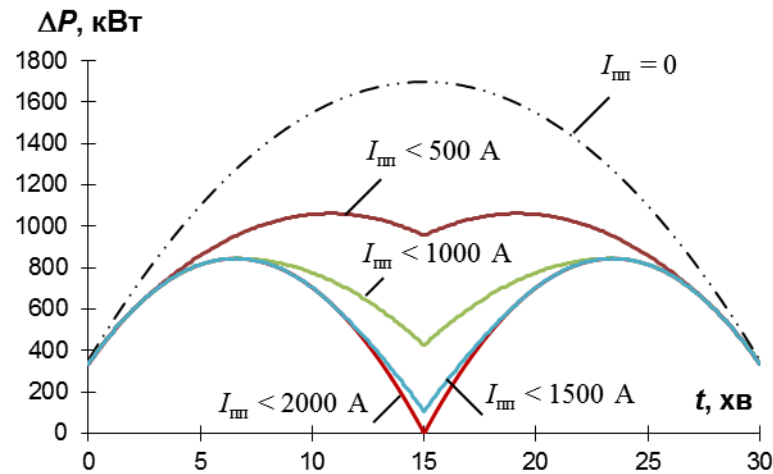


Рис. 5.12. Втрати потужності в тяговій мережі в режимі обмеження струму пункту підсилення

Робота підсилюючого пункту не обмежувалась ні рівнем напруги ні вихідним струмом. Досліджуючи варіантні розрахунки отримано результати, які показують, що в залежності від обмеження цільової функції, економія на втратах електроенергії складає від 40 до 60 %. Таким чином, можливість керування пунктами підсилення значно розширює функціональні можливості при управлінні режимами в системі електричної тяги постійного струму.

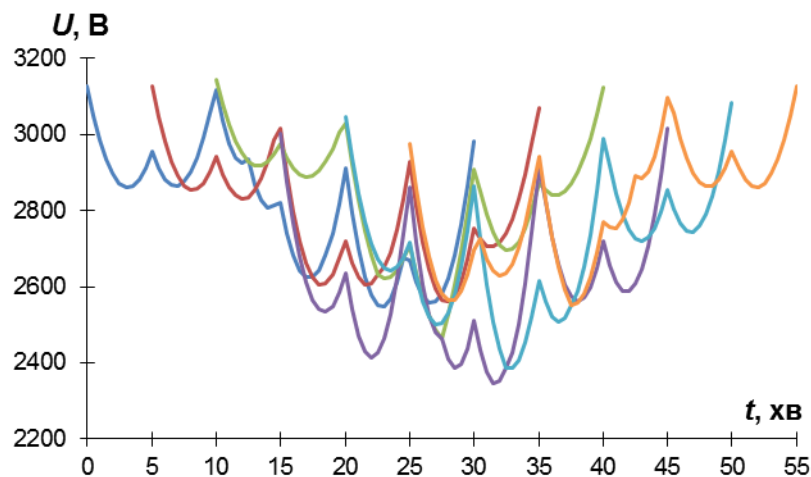


Рис. 5.13. Напруга на струмоприймачах електрорухомого складу ділянки з трьома міжпідстанційними зонами без підсилюючих пунктів

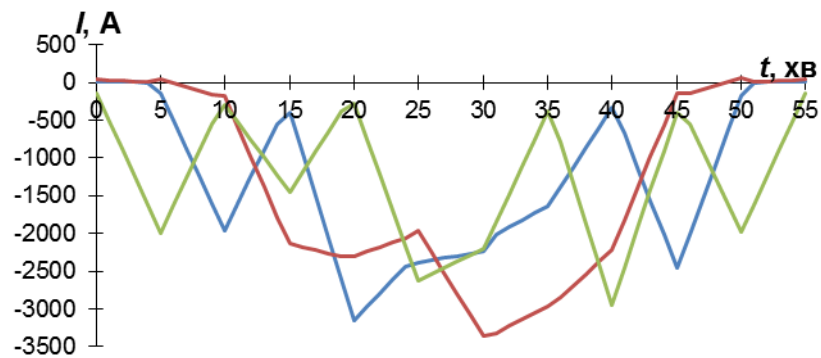


Рис. 5.14. Вихідні струми трьох підсилюючих пунктів

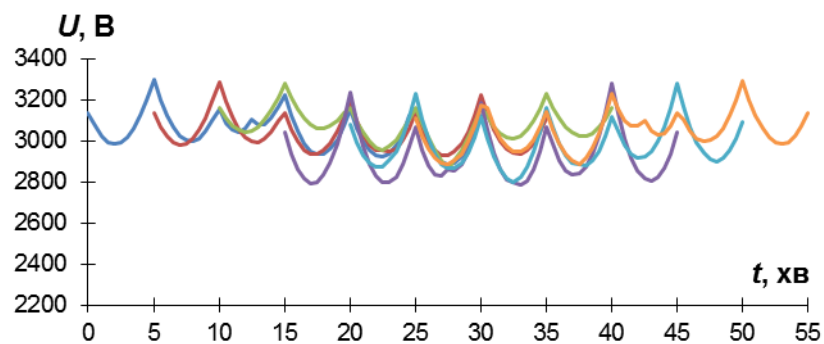


Рис. 5.15. Напряга на струмоприймачах електрорухомого складу при роботі підсилюючих пунктів

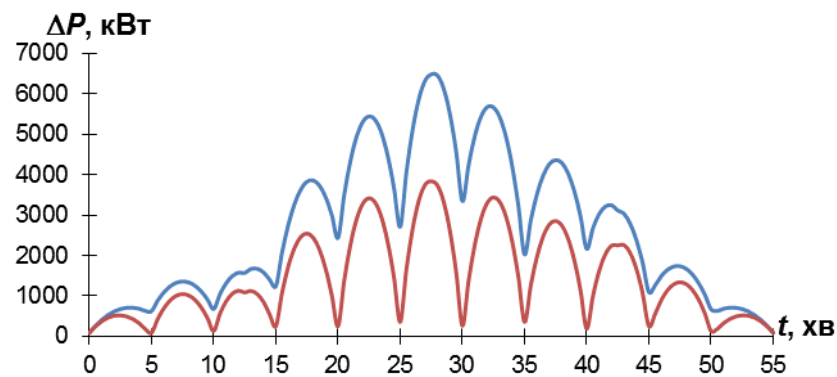


Рис. 5.16. Втрати потужності в тяговій мережі

На рис. 5.17-5.18 показано використання розробленої методології розрахунку до оптимізації режимів роботи реальних ділянок. При цьому враховувався реальний графік руху поїзда, струмоспоживання в залежності від профілю ділянки, внутрішні опори тягових підстанцій на ділянці та напруги холостого ходу.

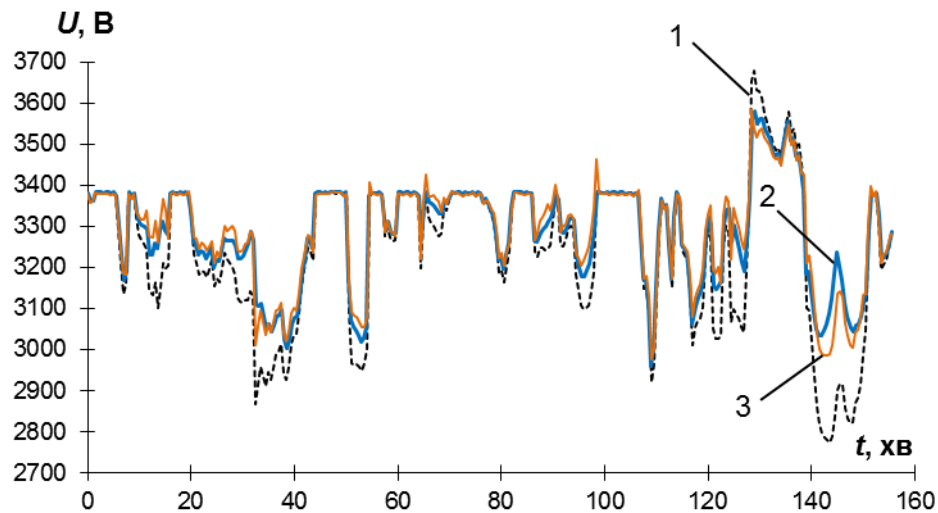


Рис. 5.17. Напряга на струмоприймачах електрорухомого складу: 1 – базовий розрахунок; 2 – підсилення додатковими тяговими підстанціями; 3 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Так розглянута ділянка «Д – П» Придніпровської залізниці має вісім міжпідстанційних зон, на кожній з яких визначалось оптимальне значення струму пункту підсилення. При розрахунках також використовувались реальні дані стромоспоживання та параметри схеми живлення.

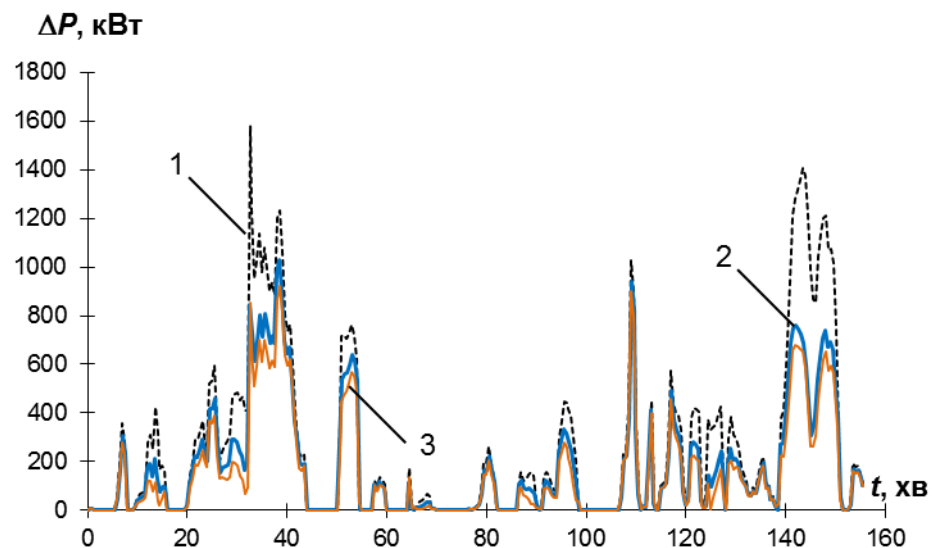


Рис. 5.18. Втрати потужності в системі тягового електропостачання: 1 – базовий розрахунок; 2 – підсилення системи електропостачання додатковими тяговими підстанціями; 3 – підсилення тягової мережі керованими пунктами

В результаті виконання поставлених розрахунків на дослідній ділянці втрати електроенергії при проході одного поїзда склали 2,6 МВт·год. За допомогою розподіленого електропостачання можливо знизити ці втрати до значення 1,56 МВт·год. Крім того, при децентралізованому електропостачанні підвищується напруга в мережі, що позитивно впливає на безпеку руху та експлуатацію електрорухомого складу. Використання в якості пунктів підсилення некерованих одноагрегатних тягових підстанцій має на 10 % меншу ефективність, оскільки втрати знижуються лише на 30 %, а коефіцієнт їх завантаження залишається невисоким (0,2-0,3). І тому підключення джерел альтернативної енергетики до некерованих підстанції не матиме змоги повністю реалізувати генеровану потужність.

5.3. Розподілена система синхронних вимірювань електричних величин

Таким чином, для реалізації поставленої задачі, необхідно контролювати рівні напруги у заданому діапазоні на струмоприймачах електрорухомого складу при русі міжпідстанційною зоною за будь-якої їх кількості. Для вирішення подібної задачі в середині 70-х років минулого сторіччя було запропоновано спосіб, який полягає у вимірюванні рівня напруги на шинах 3,3 кВ двох суміжних тягових підстанцій, подальшого обчислення середньої втрати напруги до струмоприймача електрорухомого складу на підставі емпіричної залежності відносно втрати напруги до поста секціонування, яка в свою чергу визначається як середнє значення між виміряними напругами на шинах суміжних тягових підстанцій. Отримане, таким чином, середнє значення напруги на струмоприймачеві подається на командний пристрій регулювання напруги в системі СТАРНК [207], який в залежності від різниці заданої уставки напруги та напруги на струмоприймачеві, генерує команду, що передається блокам регулювання

випрямних агрегатів суміжних тягових підстанцій для підвищення напруги безпосередньо на шинах тягових підстанцій.

Недоліком цього способу є те, що при наявності декількох поїздів на міжпідстанційній зоні, коли втрати напруги до кожного з них відрізняються між собою, неможливо забезпечити необхідний рівень напруги на струмоприймачі кожного з поїздів, оскільки при зміні напруги на шинах тягової підстанції одночасно зміниться напруга на струмоприймачах всіх поїздів, що знаходяться на міжпідстанційній зоні.

Для удосконалення автоматичного регулювання напруги в контактній мережі також був розроблений спосіб [177], який полягає в тому, що вимірюють напругу на постах секціонування суміжних з тяговою підстанцією, порівнюють вимірні значення зі встановленими уставками напруги та формують керуючий вплив на блок регулювання напруги на шинах тягової підстанції в залежності від співвідношення між собою напруги постів секціонування та необхідності мінімізації додаткових втрат потужності від виникнення вирівнювальних струмів між іншими тяговими підстанціями.

Недоліком цього способу є те, що він також не дозволяє забезпечити необхідний рівень напруги на струмоприймачеві електровозу при наявності декількох поїздів на міжпідстанційній зоні. Крім того, підвищення рівня напруги на тягових підстанціях додатково збільшує втрати потужності, оскільки принципово не змінюється розподіл струмів в тяговій мережі. Також до недоліків слід віднести застосування для передачі вимірних даних провідних ліній зв'язку, які призводять до значного здорожчання системи при необхідності встановлення більшої кількості пунктів вимірювання напруги.

Пропонується новий спосіб, який має на меті стабілізацію напруги в контактній мережі електрифікованої залізниці постійного струму безпосередньо на струмоприймачі електрорухомого складу не залежно від кількості поїздів на міжпідстанційній зоні.

Основна задача полягає в тому, що для стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму вимірюють напругу на шинах суміжних тягових підстанціях та посту секціонування всередині міжпідстанційної зони. Новим є те, що додатково необхідно виміряти розподіл напруги уздовж міжпідстанційної зони за допомогою пристроїв вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних через оптимально встановлену відстань в межах 1–3 км, після чого обчислити необхідну потужність та регулювати величину її генерації системою управління, враховуючи кількість підсилюючих пунктів, які розподілені уздовж електрифікованої залізниці постійного струму.

На рис. 5.19 зображено схему електропостачання ділянки електрифікованої залізниці із запропонованою системою моніторингу та регулювання напруги.

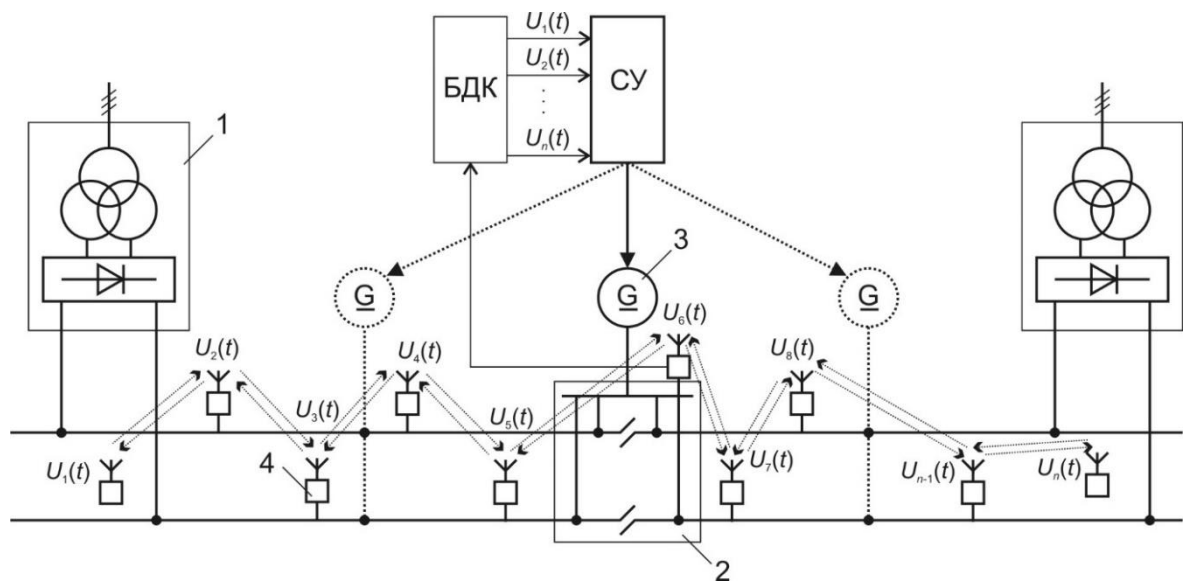


Рис. 5.19. Схема електрифікованої ділянки із системою моніторингу та регулювання напруги

Схема електропостачання ділянки електрифікованої залізниці постійного струму (рис. 5.19) складається з елементів: 1 – тягова підстанція; 2 – контактна мережа; 3 – пост секціонування; 4 – підсилюючий пункт тягової мережі; 5 – пристрій вимірювання напруги з бездротовою передачею даних; 6 – блок декодування даних; 7 – система управління.

Електрифіковану ділянку залізниці між двома суміжними тяговими підстанціями необхідно обладнати пристроями вимірювання напруги з бездротовою передачею даних, підсилюючим пунктом тягової мережі, підключеним в середині міжпідстанційної зони до поста секціонування, системою управління. В систему управління через блок декодування подається масив значень напруги, отриманий шляхом накопичення даних, які передаються мережею, що побудована за комірковою топологією пристроями вимірювання напруги з бездротовою передачею даних, розподілених уздовж міжпідстанційної зони та підключених по чергово до контактної мережі першої та другої колії.

Системою управління виконується аналіз отриманого масиву даних шляхом пошуку розрахункової точки контактної мережі, де вимагається забезпечення встановленого значення напруги. Далі, на підставі масиву значень напруги, розраховується струморозподіл на міжпідстанційній зоні, а потім за допомогою аналітичного виразу визначається необхідна генерована потужність у місці розташування підсилюючого пункту тягової мережі. На підставі виміряного значення напруги у місці підключення підсилюючого пункту тягової мережі виконується регулювання струму генерації для досягнення розрахованої потужності. Завдяки регулюванню струму генерації підсилюючого пункту тягової мережі не відбувається зниження напруги на струмоприймачі кожного електрорухомого складу нижче номінального значення 3,0 кВ, що рухаються міжпідстанційною зоною у парному та непарному напрямках, для запропонованого способу стабілізації напруги в контактній мережі.

Таким чином, регулювання потужності генерації підсилюючого пункту тягової мережі забезпечує номінальний рівень напруги кожному електрорухомому складу на міжпідстанційній зоні та, в залежності від поїзної ситуації, зменшує втрати електроенергії в контактній мережі на 40-60 %.

Для впровадження запропонованого методу розроблено спеціальний пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних.

Як відомо, на тягових підстанціях постійного струму та електрорухомому складі вимірювання електричних величин виконується без гальванічної розв'язки з використанням резистивних дільників напруги та шунтів. Контроль за режимом напруги в тяговій мережі виконується на підставі вимірювань напруги на шинах кожної тягової підстанції і електрорухомому складі. Відсутність гальванічної розв'язки створює небезпеку обслуговуючому персоналу та ускладнює облік електричної енергії безпосередньо в мережі постійного струму.

Розроблений пристрій додатково направлений на підвищення безпеки праці обслуговуючого персоналу тягових підстанцій постійного струму та електрорухомого складу, та підвищення точності вимірювання напруги в мережі постійного струму.

Відомий пристрій вимірювання величини напруги у високовольтних колах постійного струму складається з додаткового резистора відомого номіналу та амперметра, який вимірює струм витoku, при цьому поділки шкали амперметра градуують у вольтах. Недоліком такого пристрою є те, що амперметр знаходиться під високим потенціалом вимірюваної напруги, що призводить до необхідності дотримання додаткових заходів безпеки при виконанні вимірювань та обслуговуванні.

Найближчим аналогом до розробленого пристрою є вимірювач високої напруги постійного та змінного струму РД-140 (або РД-150), який складається з високовольтного омичного симетричного дільника напруги та підключеного до його виходу високоточного мікропроцесорного низьковольтного вольтметра постійного та змінного струму, який у свою чергу складається з двох окремих рознесених модулів, зв'язаних між собою за допомогою радіоканалу.

Недоліками цього приладу є висока вартість та громіздкість, оскільки він розроблений на широкий спектр застосування, а саме вимірювання постійної та змінної напруги в діапазоні до 140 (150) кВ. Крім цього, цей прилад за призначенням не передбачає максимальної тривалості роботи більше 8 год., що викликано великим власним електроспоживанням.

Розроблений прилад має зменшені масо-габаритні показники для вимірювання напруги в мережі постійного струму, зменшене власне електроспоживання для збільшення часу автономної роботи, забезпечення зручності та мобільності застосування, необхідної точності вимірювання при максимально можливій зниженій вартості.

Принцип роботи пристрою полягає в тому, що для вимірювання напруги в мережі постійного струму застосовується резистивний дільник напруги, до виходу якого підключений пристрій узгодження та мікроконтролер загального призначення типу Atmega128RFA1 (або аналогічний) з вбудованим багатоканальним аналогово-цифровим перетворювачем і високочастотним радіопередавачем. Новим є те, що в пристрої узгодження міститься чотириканальне джерело опорної напруги та каскад операційних підсилювачів, кожен з яких включений за схемою диференційного підсилення з первинним вимірювальним сигналом, а виходи цих операційних підсилювачів підключені до чотирьох різних входів аналогово-цифрового перетворювачі мікроконтролера.

На рис. 5.20 показано принципову схему пристрою з первинним дільником напруги, пристроєм узгодження та мікроконтролером, де 1 – високовольтний дільник напруги; 2 – пристрій узгодження; 3 – чотириканальне джерело опорної напруги; 4 – мікроконтролер типу Atmega128RFA1 (або аналогічний) з необхідними радіо елементами.

Вихід високовольтного дільника напруги приєднується до входу пристрою узгодження, де виконується розгалуження первинного вимірюваного сигналу. З одиничним коефіцієнтом підсилення первинний вимірюваний сигнал подається на перший вхід *ADC0* аналогово-цифрового перетворювача

мікроконтролера. З десятикратним коефіцієнтом підсилення до чотирьох інших входів мікроконтролера ($ADC1.. ADC4$) подається результат віднімання від первинного вимірюваного сигналу кожного з чотирьох рівнів опорної напруги, які в свою чергу формуються джерелом опорної напруги

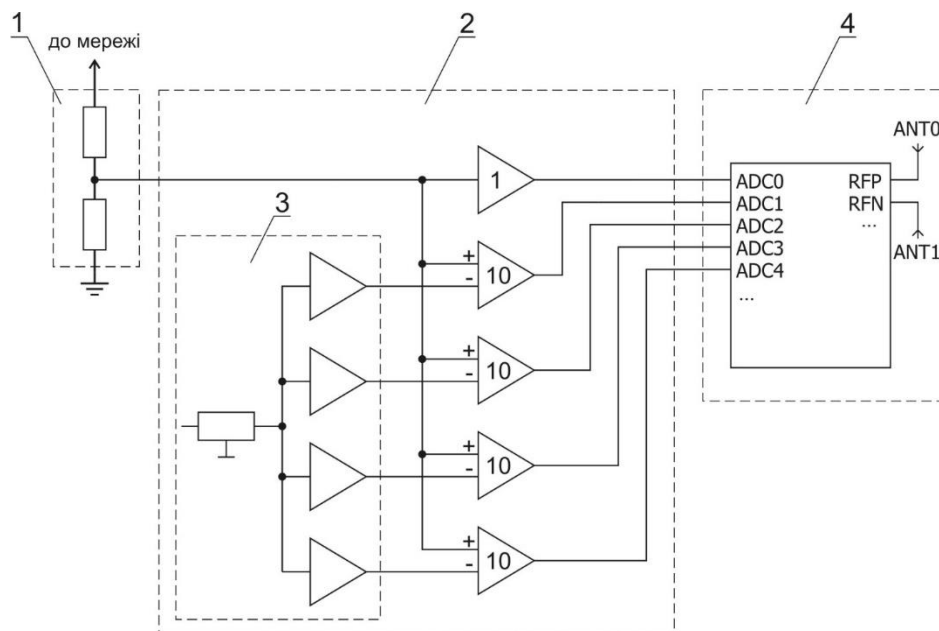


Рис. 5.20. Принципова схема пристрою вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних

Конструктивне виконання пристрою передбачає застосування або у приміщеннях чи на електрорухомому складі (рис. 5.21) або на відкритому просторі (рис. 5.22).

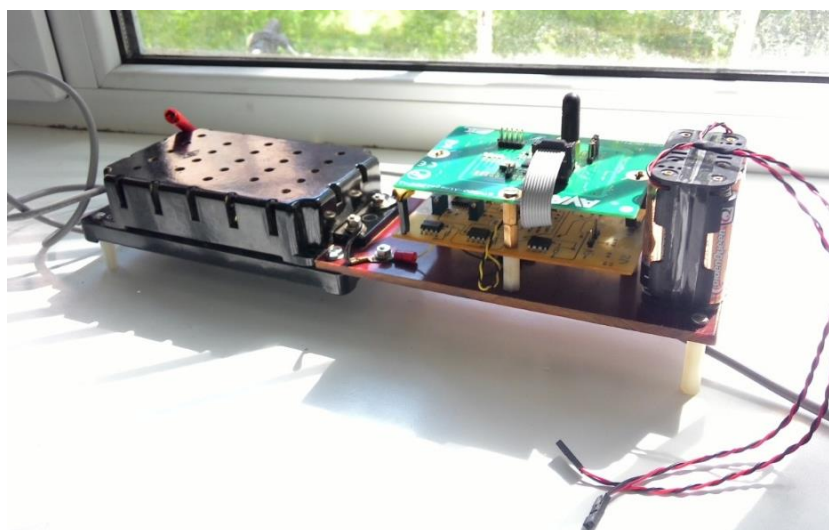


Рис. 5.21. Зовнішній вигляд розробленого пристрою для вимірювання напруги в мережі 3,3 кВ у приміщеннях чи на електрорухомому складі

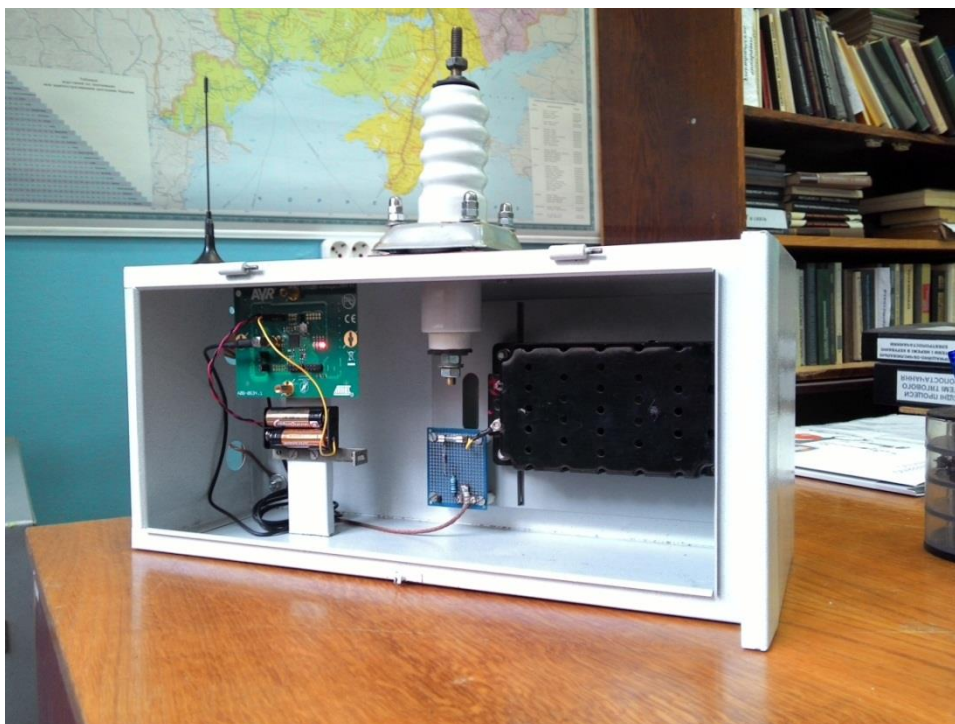


Рис. 5.22. Зовнішній вигляд розробленого пристрою для вимірювання напруги в мережі 3,3 кВ на відкритому просторі

Пристрій починає працювати після подачі напруги постійного рівня на високовольтний дільник напруги. Струм витоку, який визначається рівнем напруги та загальним опором кола, створює падіння напруги на зразковому резисторі. Падіння напруги через пристрій узгодження з одиничним коефіцієнтом передачі подається на перший вхід аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера, який у свою чергу вимірює його, зберігає у внутрішній пам'яті мікроконтролера та перемикається на інший канал аналогово-цифрового перетворювача відповідно до отриманого раніше значення, чим виконує автоматичний вибір діапазону вимірювання. Сигнали на інших чотирьох входах аналогово-цифрового перетворювача мікроконтролера формуються пристроєм узгодження шляхом віднімання від первинного сигналу фіксованих значень напруги, які задаються чотирьохканальним джерелом опорної напруги, з подальшим їх лінійним підсиленням. Отримані, таким чином, мікроконтролером наближене та

уточнене значення напруги передаються для відображення або накопичення даних через бездротовий ZigBee інтерфейс (*ANT0, ANTI*).

У разі подання на вхід напруги, що містить змінну складову, або напруги, що має різкі зміни, мікроконтролером виконується накопичення двовимірного масиву даних, із розрахунку 128 точок на період основної частоти 0,02 с. У першій вимірності масиву зберігаються значення наближеної напруги, у другій – відповідно уточненої. Передача масиву накопиченої інформації здійснюється з інтервалом в 1 с.

Виготовлення такого пристрою не потребує великих матеріальних затрат, оскільки пристрій складається з доступних радіо деталей та мікросхем загального призначення, а застосування пристрою узгодження з чотириканальним джерелом опорної напруги і каскадом операційних підсилювачів, включених за диференційною схемою, забезпечує необхідну точність вимірювання у заданих діапазонах зміни напруги.

5.4. Дослідження можливості застосування штучних нейронних мереж до визначення керуючої послідовності впливів

Одним із недоліків застосування розробленого алгоритму (рис. 5.3) до розрахунку керуючого впливу є громіздкість та відносна тривалість роботи. Для покращення швидкодії розробленого алгоритму, дослідимо можливість застосування штучних нейронних мереж.

Як відомо, штучна нейронна мережа – математична модель, а також її програмне або апаратне втілення, побудована за принципом організації та функціонування біологічних нейронних мереж – мереж нервових клітин живого організму. Штучні нейронні мережі являють собою систему сполучених і взаємодіючих між собою простих процесорів (штучних нейронів). Такі процесори зазвичай досить прості (особливо в порівнянні з процесорами, які використовуються в персональних комп'ютерах). Кожен процесор подібної мережі має справу тільки з сигналами, які він періодично отримує, і сигналами, які він періодично посиляє іншим процесорам. І, тим

не менш, будучи з'єднаними в досить велику мережу з керованим взаємодією, такі локально прості процесори разом здатні виконувати досить складні завдання.

Більш великі та складні нейронні мережі володіють, як правило, і більшими розрахунковими можливостями. Хоча створені мережі всіх конфігурацій, які тільки можна собі уявити, пошарова організація копіює шарові структури визначених відділів мозку. Виявилось, що такі багатшарові мережі володіють більшими можливостями, і в останні роки було розроблено алгоритм для їх навчання.

Багатшарові мережі можуть створюватися каскадами шарів. Вихід одного шару може слугувати входом для наступного шару. Приклад такої мережі показано на рис 5.23, де $\omega_{m,n}$ та $K_{m,n}$ – коефіцієнти зв'язку між нейронами; x_m – масив вхідних даних; y_p – масив вихідних даних.

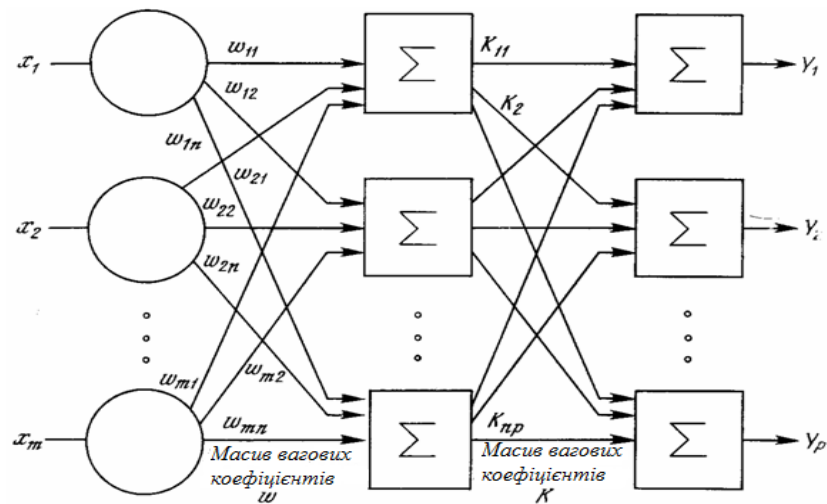


Рис. 5.23. Загальний вигляд структури нейронної мережі

З точки зору машинного навчання, нейронна мережа являє собою окремий випадок методів розпізнавання образів, дискримінантного аналізу, методів кластеризації і т. п. З математичної точки зору, навчання нейронних мереж – це багатопараметрична задача нелінійної оптимізації. З точки зору кібернетики, нейронна мережа використовується в задачах адаптивного управління і як алгоритми для робототехніки. З точки зору розвитку обчислювальної техніки та програмування, нейронна мережа – спосіб

вирішення проблеми ефективного паралелізму. А з точки зору штучного інтелекту є основою філософської течії коннективізму і основним напрямком в структурному підході з вивчення можливості побудови (моделювання) природного інтелекту з допомогою комп'ютерних алгоритмів.

Нейронні мережі не програмуються в звичному сенсі цього слова, для них необхідно проводити процес навчання. Можливість навчання – одне з головних переваг нейронних мереж перед традиційними алгоритмами. Технічно навчання полягає в знаходженні коефіцієнтів зв'язків між нейронами. У процесі навчання нейронна мережа здатна виявляти складні залежності між вхідними даними і вихідними, а також виконувати узагальнення. Це означає, що в разі успішного навчання мережа зможе повернути вірний результат на підставі даних, які були відсутні в навчальній вибірці, а також неповних та/або «зашумлених», частково перекручених даних.

Для створення нейромережі використане програмне забезпечення NeuroSolution 6. В першу чергу, необхідно було створити масив вхідних і результуючих даних, тобто матрицю напруг в кожній точці контактної мережі та матрицю струмів стабілізації для підсилюючого пункту.

Використавши викладений раніше метод, було визначено струми для підсилюючого пункту, які слугували «вчителем» при навчанні нейромережі.

За допомогою програмного забезпечення створено оптимальний варіант нейронної мережі, яка найбільш підходила, задовольняючи поставлену задачу (рис 5.24). Після чого виконувався процес навчання. Він полягав в тому, що нейронна мережа виконувала підбір оптимальних коефіцієнтів зв'язку між функціональними одиницями (нейронами), щоб на виході отримати необхідний результат. Тобто, перебір можливих коефіцієнтів, за допомогою яких з вхідних напруг у точках вимірювання контактної мережі визначались вихідні струми пунктів підсилення, зберігались ці коефіцієнти і потім застосовувались для інших вхідних даних. Особливістю нейронних мереж є саме те, що вони навчаються, а не програмуються в звичному для цього слова розумінні. Чим більше повторень (епох) виконала нейронна мережа, тим краще будуть результати.

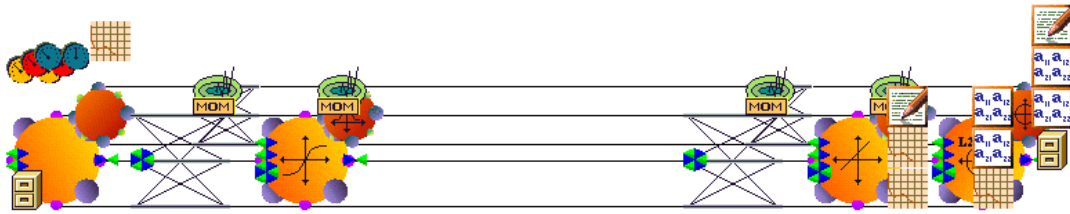


Рис. 5.24 Структура досліджуваної нейронної мережі у програмі NeuroSolution (тришарова нейромережа)

Особливістю навчання нейронних мереж є те, що необхідно подати інформацію в потрібному вигляді. Також слід зазначити, що навчаючи нейронну мережу по різним вихідним даним, при різних графіках руху, то після вдалого навчання результати вона буде з кожним кроком видавати кращі. Наприклад, результати нейромереж які навчалися по різним вихідним даним представлені на рис. 5.25.

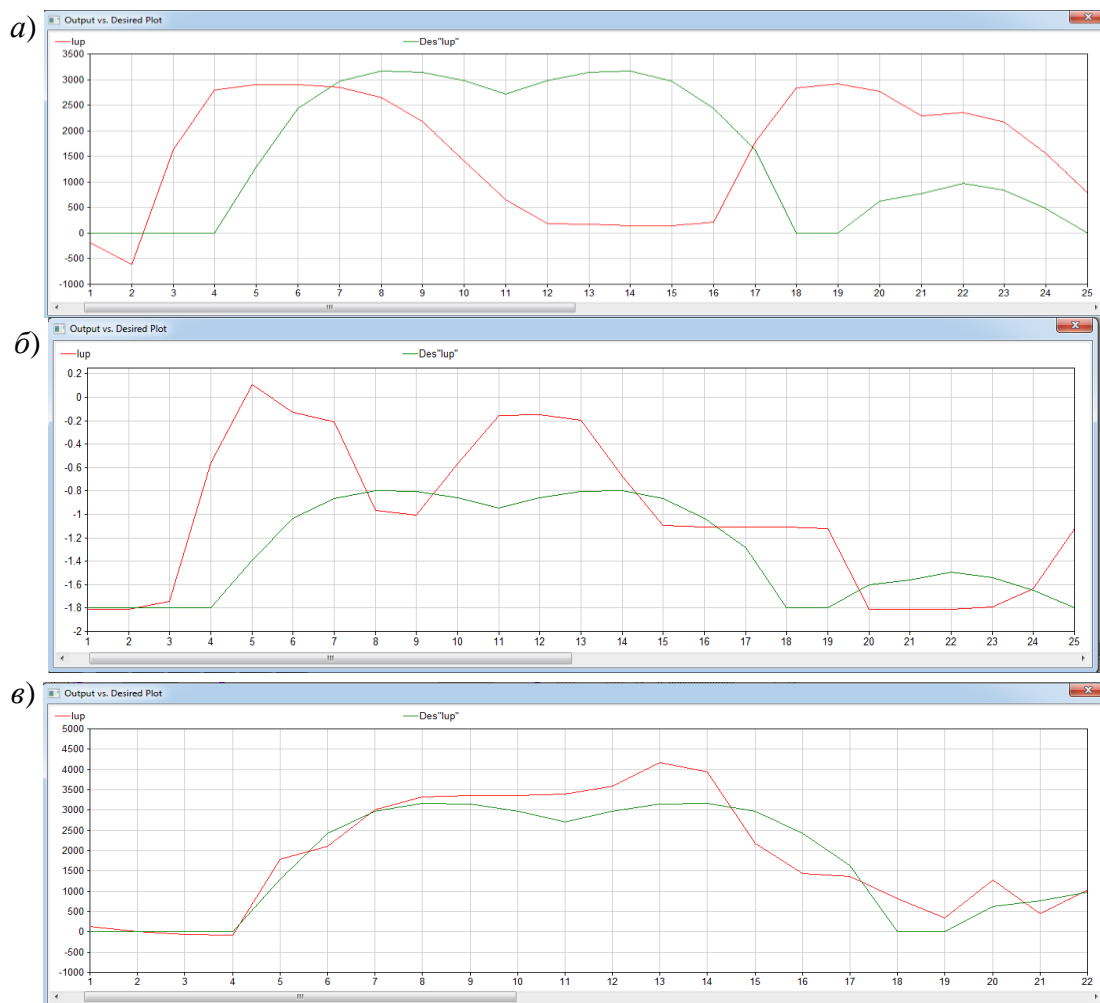


Рис. 5.25. Результати поступового навчання (а-в) нейронної мережі у вигляді співставлення струмів пункту підсилення

Кожна мережа досить добре розраховує результати для конкретно тих даних, по яким виконувалось навчання. Проте результат навчання нейромережі за одними вхідними даними для інших – викликає суттєву похибку. Так, на рис. 5.26 показані результати з вихідних даних, по яким навчалися різні нейромережі у порівнянні з різними графіками руху поїздів.

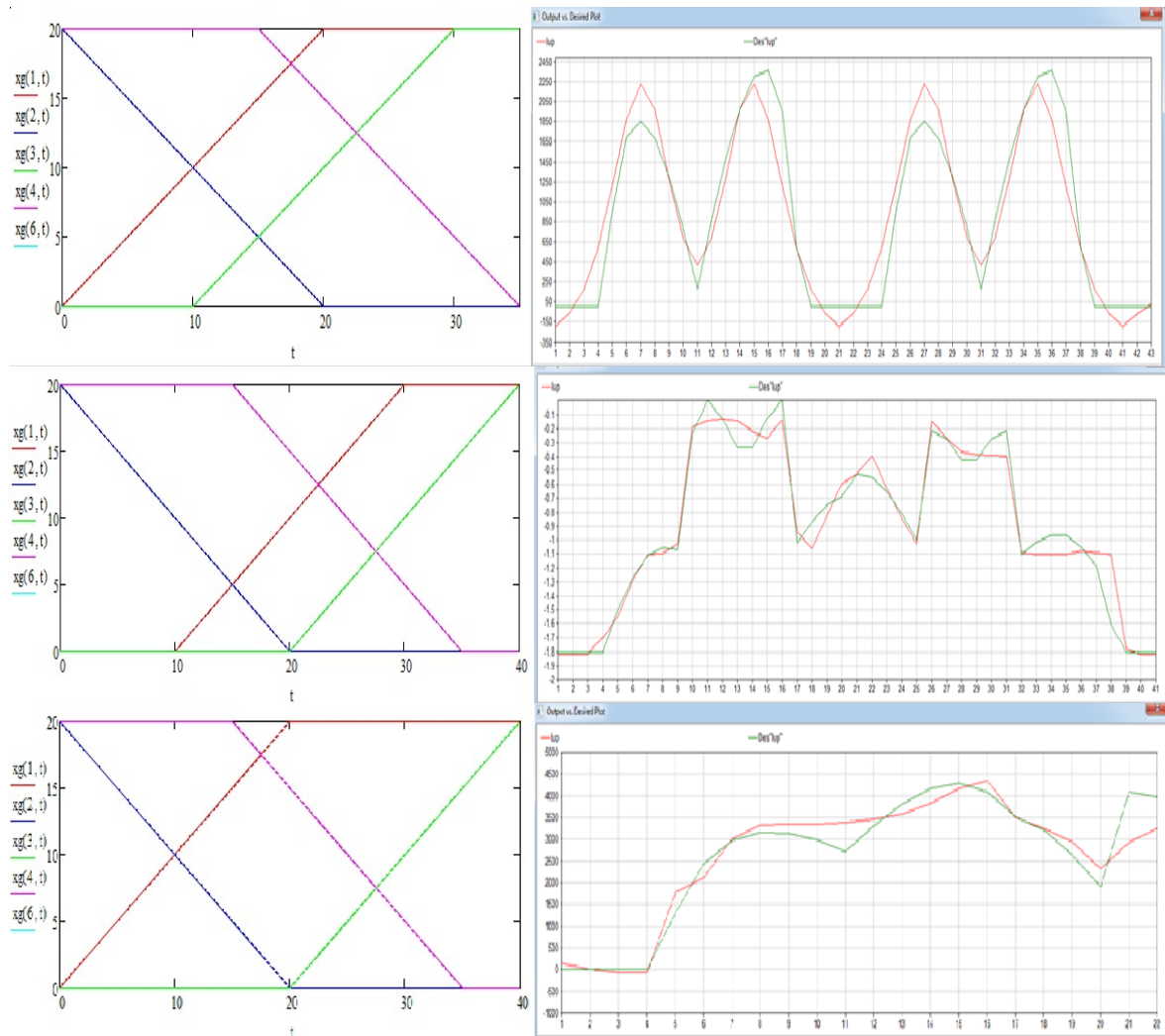


Рис. 5.26. Результати роботи нейронних мереж у порівнянні з різними графіками руху

Для отримання найбільш точних результатів навчання нейромережі виконувалось послідовне її навчання для кожного набору вихідних даних та зміни графіку руху поїздів. На рис. 5.27 представлено результати навчання нейромережі, з яких видно, що наявні відхилення досить незначні і можна зробити висновок, що нейронна мережа досить добре вирішує поставлену

задачу, і підходить для будь-якого конкретного графіку руху поїздів, оскільки абсолютна різниця досліджуваних величин не перевищує 5 %.

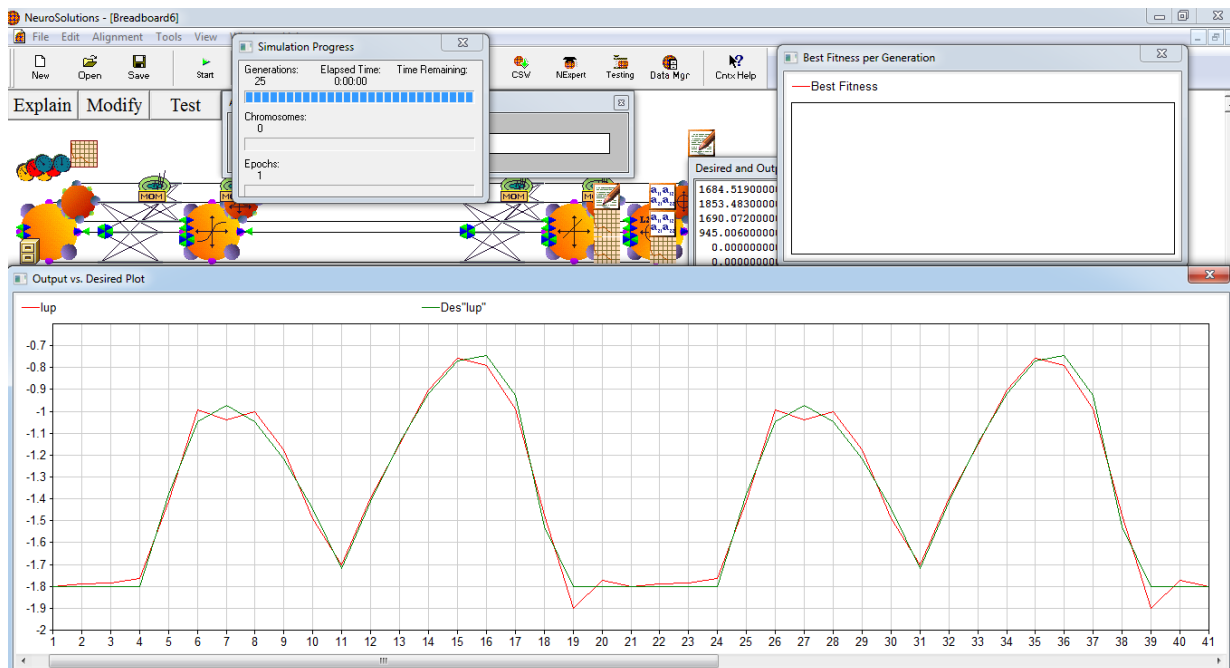


Рис. 5.27 Результат тривалого навчання нейромережі з більшою варіацією вхідних даних

5.5. Висновки до розділу 5

Визначальним фактором, який знижує ефективність функціонування системи електричної тяги є відносно низький рівень напруги в контактній мережі. При збільшенні об'єму перевезень та організації руху швидкісних та високошвидкісних поїздів, пристрої тягового електропостачання обмежують пропускну спроможність ділянки електрифікованої залізниці внаслідок зниження напруги на струмоприймачі електрорухомого складу нижче нормованих значень.

Для забезпечення стабілізованого рівня напруги в контактній мережі для кожної одиниці електрорухомого складу розроблена система стабілізації, яка включає в собі розподілену систему синхронних вимірювань та обчислювальний комплекс, який реалізує розрахунки керуючого впливу.

Як показали розрахунки, застосування нейронних мереж до визначення керуючого впливу значно спрощує технічну реалізацію за суттєво підвищує

швидкодiю у порiвняннi з класичними алгоритмами, тим самим дозволяючи використання розроблених методiв визначення керуючої послiдовностi впливiв на пункти пiдсилення в системах реального часу.

Керуючу послiдовнiсть впливiв з використанням штучних нейронних мереж та похибкою не бiльше 5 % можна визначати на основi тришарової структури персептрону з кiлькiстю вхiдних нейронiв, що дорiвнює кiлькостi точок вимiрювання напруги в контактнiй мережi, одним прихованим шаром та з кiлькiстю вихiдних нейронiв, що визначається кiлькiстю керованих пунктив пiдсилення на дiлянцi.

Отриманi в п'ятому роздiлi науковi основи iнтелектуального управлiння режимом напруги в системi електричної тяги постiйного струму опублiковано в роботах [15, 17, 28, 29, 34, 35].

РОЗДІЛ 6

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ШЛЯХОМ УЗГОДЖЕННЯ
ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО І ТЯГОВОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

6.1. Постановка задачі

У загальному випадку тягові підстанції отримують живлення від різних вузлів однієї або навіть декількох енергосистем. Це призводить до того, що тягові підстанції мають різні приведені зовнішні характеристики та для контурів замикання через тягову мережу спостерігається відмінність у модулях та кутах зсуву фаз напруг в точках приєднання до вузлів енергосистем. Наявність вказаних чинників призводить до виникнення транзитних перетікань потужності між вузлами живлення, які більш за все проявляються при відсутності чи відносно низьких навантаженнях в тяговій мережі.

В умовах лібералізації ринкових відносин, коли залізниці України стали ліцензіатами оптового ринку, разом з іншими суб'єктами ринку формуються відносини, які не передбачають на даному етапі оплати послуг за будь-які транзитні перетікання активної чи реактивної електроенергії.

Системі тягового електропостачання змінного струму для забезпечення заданих розмірів руху та пропускної спроможності технологічно необхідне одночасне живлення ділянок тягової мережі від двох суміжних тягових підстанцій, бо інакше спроектовані параметри ділянок електрифікованих залізниць не забезпечать нормований рівень на лімітуючих блок-ділянках. Крім цього, слід зазначити, що взаємодія систем тягового і зовнішнього електропостачання для підстанцій постійного і змінного струму відбувається через загальнопромислову підсистему трифазного змінного струму, для якої характерні будуть також і перетікання реактивної електроенергії.

6.2. Особливості протікання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання змінного струму

Протікання електромагнітних процесів в системі електричної тяги змінного струму має свої особливості. Інтерес науковців до вивчення проблеми якості електричної енергії в електроенергетиці, та, зокрема, в системах тягового електропостачання змінного струму, спонукає розвиток теоретичної електротехніки та переглядів класичних підходів до оцінки електромагнітних процесів в колах з несинусоїдними величинами та нелінійними параметрами.

Проведемо теоретичне дослідження для отримання кінцевих формул визначення миттєвих характеристик плечей живлення тягових підстанцій та електровозів змінного струму на основі отриманих шляхом вимірювань осцилограм миттєвих значень струмів і напруги.

В загальному випадку в складних розгалужених колах, що містять джерела та споживачі електроенергії, мають місце два відмінні один від одного енергетичні процеси: 1) безповоротне перетворення енергії джерел живлення в теплову та/або інші види енергії; 2) накопичення енергії у формі магнітного та електричного поля. В теорії електричних кіл ці два процеси описуються за допомогою миттєвої активної ($p = p(t)$) та миттєвої обмінної потужності ($q = q(t)$), що в інтегральній інтерпретації є ортогональними складовими миттєвої повної потужності

$$s(t) = p(t) + q(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (6.1)$$

З виразу (6.1) випливає, що

$$\frac{s(t)}{i^2(t)} = \frac{p(t)}{i^2(t)} + \frac{q(t)}{i^2(t)} = r(t) + x(t) = z(t), \quad (6.2)$$

де $r(t)$, $x(t)$, $z(t)$ – миттєві активні, обмінні та повні опори споживача електричної енергії.

Слід відмітити, що вираз (6.2) є також своєрідним розкладанням миттєвого повного опору на ортогональні складові, для інтегральних значень $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Для отримання миттєвих характеристик будь-якого споживача, перш за все, необхідно визначити його характер. В подальшому розглянемо два споживача – плече живлення тягової підстанції змінного струму та електровоз змінного струму в режимі тяги. Прийmemo, що в межах розглядуваного плеча живлення підстанції не відбувається рекуперації електроенергії, тобто обидва споживачі замінимо еквівалентними пасивними двополюсниками. Задамо елементарною схемою заміщення лінійного кола струму зі значенням напруги на вході $u(t)$ та струму $i(t)$ (рис. 6.1).

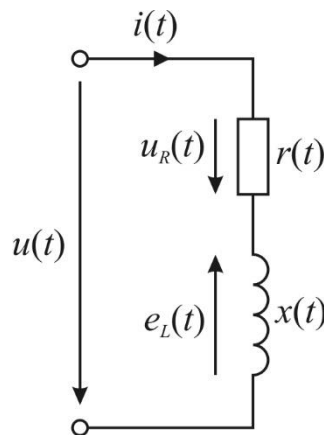


Рис. 6.1. Схема заміщення активно-індуктивного навантаження

Рівняння електромагнітного стану для даного кола в загальному випадку матиме вигляд

$$u(t) = r(t) \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} = r(t) \cdot i(t) + L \cdot i'(t), \quad (6.3)$$

або, диференціюючи, отримаємо

$$\frac{du}{dt} = u'(t) = r(t) i'(t) + \frac{dr(t)}{di(t)} i'(t) i(t) + \frac{dL}{di(t)} (i')^2 + L \cdot i''.$$

Приймаючи граничну умову $i'(t_1) = 0$, визначимо для моменту t_1

значення виразу $\frac{u'}{i''}$,

$$\left. \frac{u'}{i''} \right|_{t=t_1} = L \Big|_{t=t_1} > 0. \quad (6.4)$$

Умова (6.4) застосовується саме для визначення характеру пасивного двополюсника по миттєвим характеристикам $u(t)$ та $i(t)$. Відповідно для двополюсника з ємнісним навантаженням $\left. \frac{u'}{i''} \right|_{t=t_1} < 0$.

Для отримання кінцевих формул визначення миттєвих параметрів, запишемо рівняння для моментів часу t_1 та t_2 у відповідності з рівнянням електромагнітного стану кола (6.3):

$$\begin{cases} u(t_1) = r[i(t_1)] \cdot i(t_1) + L[i(t_1)] \cdot i'(t_1); \\ u(t_2) = r[i(t_2)] \cdot i(t_2) + L[i(t_2)] \cdot i'(t_2). \end{cases} \quad (6.5)$$

Припускаючи, що гістерезисні явища для заданого кола не характерні, отримаємо

$$r[i(t_1)] = r[i(t_2)] = r_{(1)}; \quad L[i(t_1)] = L[i(t_2)] = L_{(1)}.$$

Тоді система двох рівнянь (6.5) спроститься до вигляду

$$\begin{cases} u(t_1) = r_{(1)} \cdot i(t_1) + L_{(1)} \cdot i'(t_1); \\ u(t_2) = r_{(1)} \cdot i(t_2) + L_{(1)} \cdot i'(t_2). \end{cases}$$

Розв'язуючи отриману систему відносно невідомих $r_{(1)}$ і $L_{(1)}$, та

враховуючи, що $x_{(1)} = L \frac{i'(t_1)}{i(t_1)}$, матимемо

$$r_{(1)} = \frac{u(t_2) \cdot i'(t_1) - i'(t_2) \cdot u(t_1)}{i(t_2) \cdot i'(t_1) - i'(t_2) \cdot i(t_1)}, \quad x_{(1)} = \frac{\frac{u(t_1)}{i(t_1)} i(t_2) - u(t_2)}{i(t_2) - \frac{i'(t_2) \cdot i(t_1)}{i'(t_1)}}. \quad (6.6, 6.7)$$

За отриманими формулами (6.6-6.7) визначимо миттєві характеристики на прикладі електровоза ДСЗ по вимірним миттєвим напругам і струмам та розрахованим похідним цих залежностей (рис. 6.2) на підставі основних положень робіт [153, 158]. Отримані за результатами розрахунків миттєві характеристики наведено на рис. 6.3.

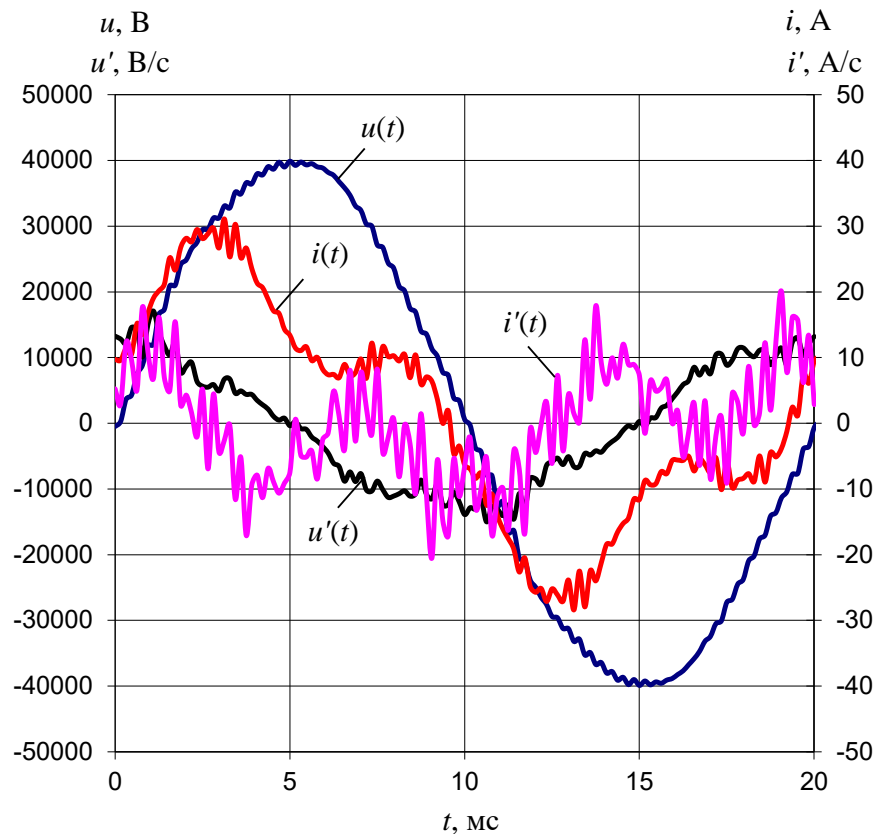


Рис. 6.2. Осцилограми миттєвої напруги, струму електровоза ДСЗ та їх похідні

Для порівняння визначимо миттєві характеристики для ідеально синусоїдного пасивного двополюсника змінного струму. Застосовуючи закон Ома до кожного моменту часу, матимемо

$$z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{U_m \sin \omega t}{I_m (\sin \omega t \cdot \cos \varphi - \cos \omega t \cdot \sin \varphi)}. \quad (6.8)$$

Спрощуючи (6.8), отримаємо

$$z(t) = \frac{U_m}{I_m} \cdot \frac{1}{\cos \varphi - \operatorname{ctg} \omega t \cdot \sin \varphi}. \quad (6.9)$$

Розкладемо вихідний вираз (6.8) на постійну та змінну в часі складові. Для цього доцільно застосувати принцип розкладання змінної величини на ортогональні складові, тобто прикладену напругу $u(t)$ представити сумою двох синусоїд – співпадаючою за фазою зі струмом навантаження (активна) та зсунутою на кут $\pi/2$ відносно струму навантаження (реактивна).

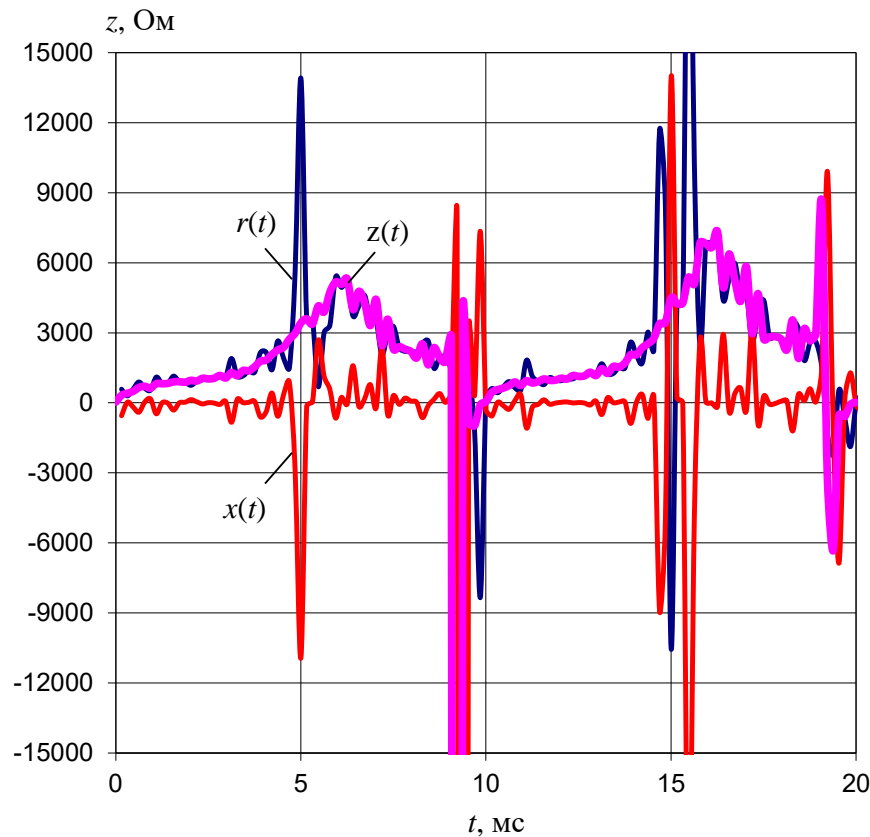


Рис. 6.3. Миттєві активна та обмінна характеристики електровоза ДСЗ

Математично цю операцію можна представити так

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \sin[(\omega t - \varphi) + \varphi] = \\ &= U_m [\sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos \varphi + \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin \varphi] \end{aligned} \quad (6.10)$$

Підставляючи останній вираз (6.10) у вихідний для визначення $z(t)$

(6.8), отримаємо

$$z(t) = \frac{U_m}{I_m} \cdot \frac{\sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos \varphi + \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin \varphi}{\sin(\omega t - \varphi)},$$

Тобто,

$$z(t) = \frac{U_m}{I_m} \cos \varphi + \frac{U_m}{I_m} \operatorname{ctg}(\omega t - \varphi) \cdot \sin \varphi. \quad (6.11)$$

Проаналізуємо отриманий вираз (6.11) детальніше. При відсутності зсуву навантаження ($\varphi = 0$), значення миттєвого опору $z(t)$ не залежить часу, а визначається тільки відношенням амплітуд прикладеної напруги та струму навантаження. В такому випадку має місце споживання потужності навантаженням, яке називають чисто активним, а опір, що кількісно характеризує величину цієї потужності буде активним опором.

У випадку, коли струм зсунутий відносно напруги на кут π , має місце повернення потужності зі сторони споживача (рекуперація), а величина опору приймає від'ємного значення і не залежить від часу.

Для значень кутів навантаження $\varphi = \frac{\pi}{2}$ та $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ має місце чисто індуктивне та чисто ємнісне навантаження. В таких випадках перша складова виразу (6.11) дорівнює нулю, а друга – являє собою характеристику миттєвого реактивного опору споживача (рис. 6.4).

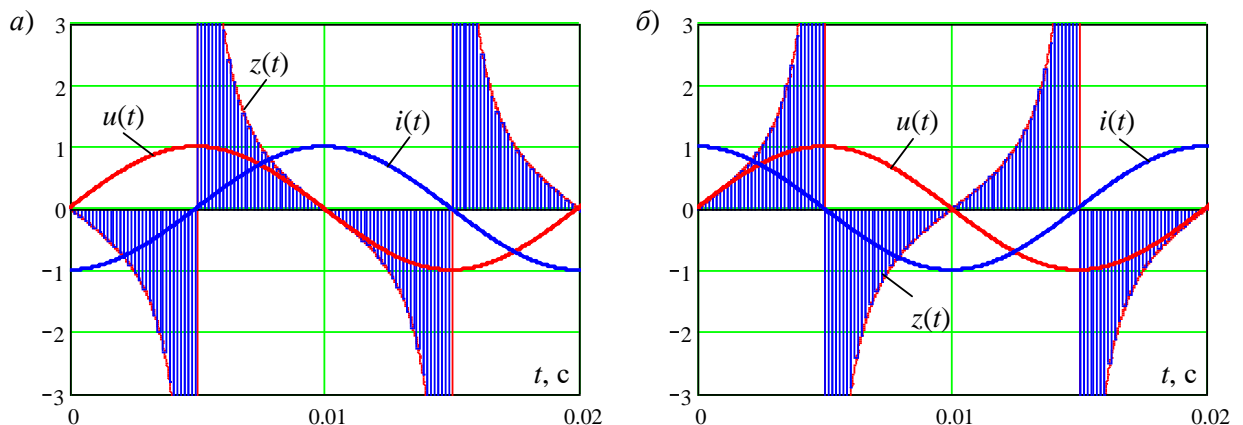


Рис. 6.4. Миттєві характеристики індуктивного (а) та ємнісного навантажень (б) на одному періоді основної частоти

Як видно з рис. 6.4, величина миттєвого реактивного опору навантаження змінює свій знак чотири рази за один період основної частоти, що свідчить про зміну напрямку протікання реактивної потужності між генератором та споживачем.

В електротехніці для кіл змінного струму застосовуються поняття індуктивного X_L та ємнісного опору X_C . Для знаходження співвідношень між цими поняттями і поняттям миттєвого опору, розглянемо дві схеми з активно-індуктивним та активно-ємнісним навантаженням (рис. 6.5).

Використовуючи закон електромагнітної індукції $e_L = -L \frac{di}{dt}$ та відомий

вираз для ємнісного елементу $u_C = \frac{1}{C} \int idt$, на основі другого закону

Кірхгофа, запишемо рівняння для кожної схеми заміщення, а саме

$$U_m \sin \omega t = RI_m \sin(\omega t - \varphi) + \omega LI_m \cos(\omega t - \varphi);$$

$$U_m \sin \omega t = RI_m \sin(\omega t - \varphi) - \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t - \varphi).$$

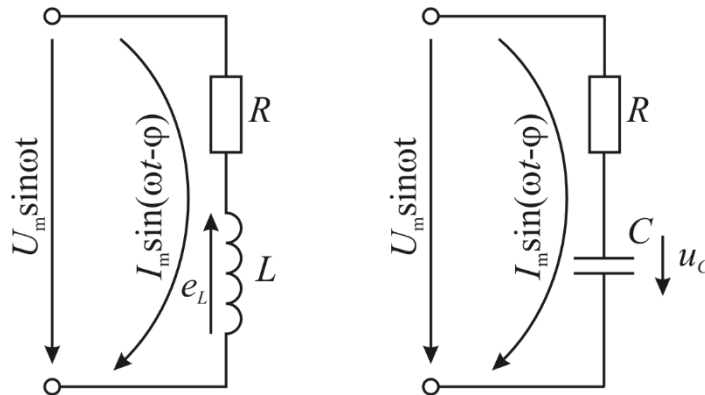


Рис. 6.5. Схеми заміщення активно-індуктивного та активно-ємнісного навантаження

Розділивши праву та ліву частини рівнянь на вираз миттєвого струму $I_m \sin(\omega t - \varphi)$, отримаємо

$$z(t) = R + \omega L \operatorname{ctg}(\omega t - \varphi);$$

$$z(t) = R - \frac{1}{\omega C} \operatorname{ctg}(\omega t - \varphi).$$

Зіставляючи отримані вирази з формулою (6.11), матимемо відомі в електротехніці співвідношення:

$$R = \frac{U_m}{I_m} \cos \varphi; \quad X_L = \omega L = \frac{U_m}{I_m} \sin \varphi; \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = -\frac{U_m}{I_m} \sin \varphi.$$

Таким чином, незалежна від часу складова у виразі (6.11) кількісно характеризує величину потужності, що без повернення споживається навантаженням, яку в електротехніці прийнято називати активною потужністю, відповідатиме активній характеристиці навантаження.

Змінна в часі складова миттєвого опору кількісно характеризує величину потужності, що коливається між генератором та споживачем, не створюючи при цьому корисної роботи. Для синусоїдних кіл ця потужність отримала назву «реактивної», а в більш ширшому розумінні її називають «обмінною». Відповідно друга складова миттєвого опору відповідатиме обмінній характеристиці навантаження.

Для несинусоїдних кіл, при визначенні миттєвого опору необхідно було б виконати перетворення Фур'є для переходу від часового до частотного уявлення. Проте виникає проблема, оскільки функція миттєвого опору має стрибки, тобто не є неперервною і не відповідає умові Діріхле. Тому приходимо до висновку, що отримання характеристик опору навантаження в частотній області за миттєвими значеннями напруги і струму неможливий, оскільки ці осцилограми визначають характеристики навантаження при фіксованому наборі частотних збурень.

6.3. Взаємодія системи тягового з системою зовнішнього електропостачання

Системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць складаються з великої кількості відносно складних підсистем і активним чином взаємодіють між собою. Складні процеси взаємодії систем тягового та зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи та електроустаткуванням, що застосовується на тягових підстанціях і електрорухомому складі. Через вказані причини та без спеціальних знань та засобів моделювання неможливо побудувати математичні моделі в загальному випадку для вивчення першопричин виникнення проблем в складних експлуатаційних режимах.

Для забезпечення перевізного процесу обома системами електропостачання постійного та змінного струму виконується споживання електричної енергії з первинної мережі, проте ефективність роботи окремої системи та її вплив на систему зовнішнього електропостачання залишається індивідуальним. З усіх відомих видів впливу, системи тягового електропостачання можна обмежити головними – впливом на створення відхилень напруги, на спотворення синусоїдності кривої напруги (струму) та розбалансування трифазної системи.

Дослідимо на узагальнених моделях взаємодію систем тягового електропостачання з системами зовнішнього електропостачання для

подальшого використання в задачах вивчення енергообмінних процесів з метою поліпшення ефективності та забезпечення необхідного рівня електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги.

Відомо, що будь-яка задача моделювання в динаміці, пов'язана з розрахунками потоків енергії, зводиться до вирішення диференціальних рівнянь [304]. Методика вирішення рівнянь повинна враховувати наявність так званих «жорстких» задач, ознакою яких є наявність у досліджуваній системі об'єктів з суттєво різними постійними часу, або об'єктів, які різко змінюють свої параметри в процесі функціонування. Такими в системах тягового електропостачання є силові вентиляції, у яких стрибкоподібно змінюється провідність при переході з провідного стану в непровідний.

Кінцевий споживач в системі тягового електропостачання на частоті основної гармоніки є додатнім опором. На частотах вищих гармонік споживач виступає генератором, тобто створює емісію через контактну мережу певного набору гармонійних складових, який залежить від типу силового перетворювача. Струми вищих гармонійних складових, замикаючись через тягову мережу, трансформуються відповідним чином до первинної та районної мереж. При чому відомо, що ступінь впливу тягового навантаження на первинну мережу залежатиме від режиму роботи районного навантаження, що в першу чергу поглинатиме спотворення, викликані, як-то гармонійними складовими, так і наявністю струмів зворотної послідовності.

Використання на залізницях з системою електричної тяги змінного струму статичних перетворювачів на електровозах пов'язано з певними перевагами перед системою постійного струму, які існували на період масової електрифікації ділянок [305]. Разом з тим, однофазні тягові навантаження викликають ряд процесів, які ускладнюють роботу енергосистем та споживачів, що від них живляться. Це пов'язано з тим, що однофазні несинусоїдні навантаження створюють в трифазних мережах високої напруги несиметрію струмів і, як наслідок, несиметрію напруг, в результаті чого збільшуються втрати і зменшується пропускна спроможність

ліній електропередач і трансформаторів. Крім цього, знижується наявна потужність генераторів, синхронних та асинхронних машин, випрямних та частотних перетворювачів.

Вплив несиметрії безпосередньо на електрорухомих склад виражається в тому, що рівень напруги в контактній мережі, що живиться від різних фаз трифазної системи, виходить неоднаковим, що впливає на швидкість руху і пропускну спроможність залізниці [306]. Зі збільшенням опору живлячої системи збільшується несиметрія напруги, що в ній виникає. Для європейських країн, де використовуються змінний струм для електричної тяги, прийнято живлення від однофазних трансформаторів. Тому для таких країн з невеликою територією тягове навантаження незначно впливає на систему зовнішнього електропостачання.

Той факт, що електричні мережі України, особливо для промислово розвинених регіонів досить сильно розгалужені, мають велику довжину, значить що при неправильному проектуванні вплив тягових навантажень може досягати великих значень. Крім цього, несиметричний та несинусоїдний режим роботи електричної тяги постійного чи змінного струму є нормальним режимом роботи системи електропостачання.

Вплив тягового навантаження на рівень напруги в мережі зовнішнього електропостачання визначається приведеним опором зовнішньої системи. Для віддалених точок енергосистеми тягове навантаження створюватиме істотний вплив. Для інших – впливом тягового навантаження можна знехтувати. Для нормалізації рівня напруги при надлишку реактивної потужності застосовують шунтові реактори, а відповідно, при недостатці – пристрої компенсації. Досвід експлуатації показав низьку ефективність застосування ступінчато регульованих пристроїв в мережах, що живлять тягові навантаження, з метою регулювання балансу реактивної потужності з причини обмеженого комутаційного ресурсу.

Більш перспективним на даний час вважається застосування тиристорно-керованих реакторів з можливостями плавного регулювання

струму в кожній фазі. Це не тільки підвищує керованість процесу електропостачання, але при додатковому налаштуванні дозволяє знизити несиметрію напруги, яка спричинена специфікою тягового навантаження. Ще більшу гнучкість регулювання мають компенсатори комбінованого типу. До їх складу включаються два види регульованих реактивних елементів: керовані реактори та комутуємі конденсатори. Зазвичай для згладження характеристики регулювання на два-чотири конденсаторних блока використовують один керований реактор рівної потужності. Таким чином, це дає можливість керувати видачею реактивної потужності від нуля до номінального значення.

Для зменшення впливу гармонійних складових застосовують або фільтруючі пристрої (постійний струм) або фільтро-компенсуючі (змінний). Принцип роботи цих пристроїв полягає у зменшенні частотного опору для окремих гармонік, таким чином, щоб контур їх замикання був якомога ближче до джерела їх виникнення, тим самим досягається їх шунтування в тяговій мережі і зменшується вплив на системи зовнішнього електропостачання. Ефективність застосування фільтруючих пристроїв знижується через використання сучасного електрорухомого складу з принципово іншими перетворювачами, що генерують невідомий раніше спектр гармонік, та через виникнення несиметрії первинної напруги, що в свою чергу, викликає появу неканонічних складових.

Вважаючи активні та реактивні складові комплексних величин струмів тягового навантаження випадковими двовимірними розподіленими величинами окремо на прикладі системи постійного та змінного струму, визначимо характер та окремі точки режимів, довкола яких орієнтуються ймовірності зміни режимів системи електропостачання.

Шляхом узагальнення одновимірного розподілу, наприклад, до двовимірного нормального закону, формула щільності ймовірностей матиме вигляд

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\sigma_{12}^2}} \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-\sigma_{12}^2)}\left(\frac{(x_1-a_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\sigma_{12}(x_1-a_1)(x_2-a_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-a_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right], \quad (6.12)$$

де a_1, σ_1 – математичне очікування та стандартне відхилення змінної x_1 ; a_2, σ_2 – те ж, змінної x_2 ; σ_{12} – парна кореляція між змінними x_1 та x_2 , $\sigma_{12} = \text{cov}(x_1, x_2)/(\sigma_1\sigma_2)$.

На підставі досвіду проведених експериментальних вимірювань [13] встановлено, що між активними та реактивними складовими струмів навантаження наявна додатна нелінійна кореляція, при чому вона характерна лише системам електричної тяги постійного струму. Це пояснюється тим, що безпосередньо електрорухомий склад постійного струму та його режими роботи не впливають на природу виникнення реактивної потужності [20]. Що не можна сказати про систему змінного струму, де кореляція в загальному випадку відсутня, через прямий вплив додаткових факторів, що в загальному випадку дає підстави вважати активні та реактивні складові тягових струмів незалежними величинами стосовно системи електропостачання. Якщо ж узяти окремо режим роботи одного електровозу, то прослідковується нелінійний кореляційний зв'язок між цими складовими [307].

Виконуючі описані розрахунки на рис. 6.6 представлена щільність ймовірностей двовимірної випадкової величини трифазного струму навантаження тягової підстанції постійного струму, на рис. 6.7 – теж, для змінного струму. Концентрація ліній рівня довкола характерних точок вказує на найбільш вірогідні точки режимів та їх відповідну кількість. Так, в системі постійного струму спостерігається 3 стійкі точки режиму електропостачання, при чому, в контексті загалом симетричної роботи кожної фази.

В системі ж змінного струму, режим електроспоживання у двох робочих фазах суттєво відрізняється від третьої (недозавантаженої) [12]. В порівнянні з

системою постійного струму, можна констатувати більший ступінь невизначеності та розкиду активної і реактивної складових струму [19].

Кількісно гармонійний вплив систем тягового електропостачання можна оцінити спрощеними моделями некерованих випрямлячів [253]. Так, для системи змінного струму, гармонійний склад струму електровозу може бути визначений аналітичним розкладанням кусочно-заданої функції пульсуючого струму для мостового однофазного випрямляча

$$i(t) = \begin{cases} -I_{dc}, & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4}; \\ +I_{dc}, & t < \frac{T}{4}; t > \frac{3T}{4}; \end{cases} \quad (6.13)$$

$$I_h = \begin{cases} +\frac{2\sqrt{2}}{h} I_{dc}, & h = 1, 5, 9, 13, \dots \\ -\frac{2\sqrt{2}}{h} I_{dc}, & h = 3, 7, 11, 15, \dots \\ 0, & h = 0, 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (6.14)$$

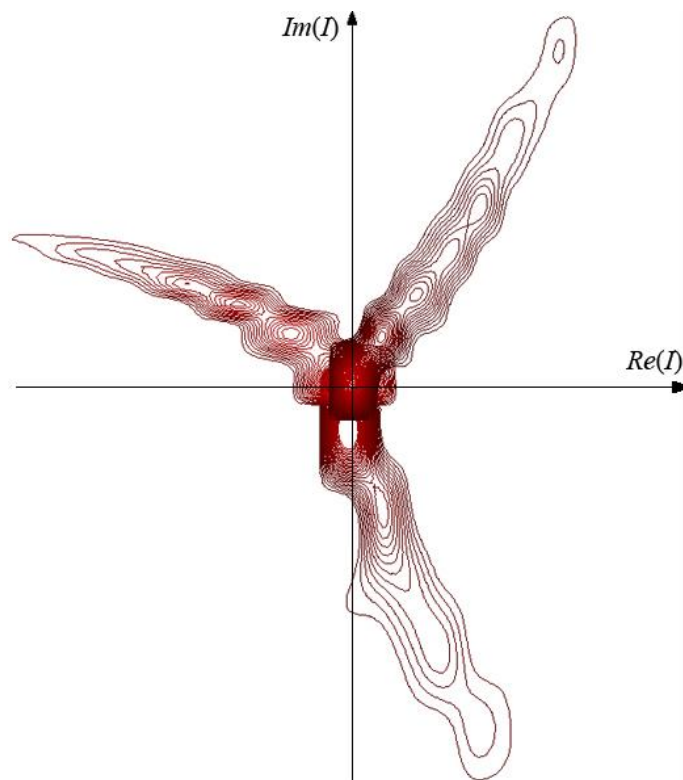


Рис. 6.6. Лінії рівня струму тягової підстанції постійного струму як двовимірної випадкової величини

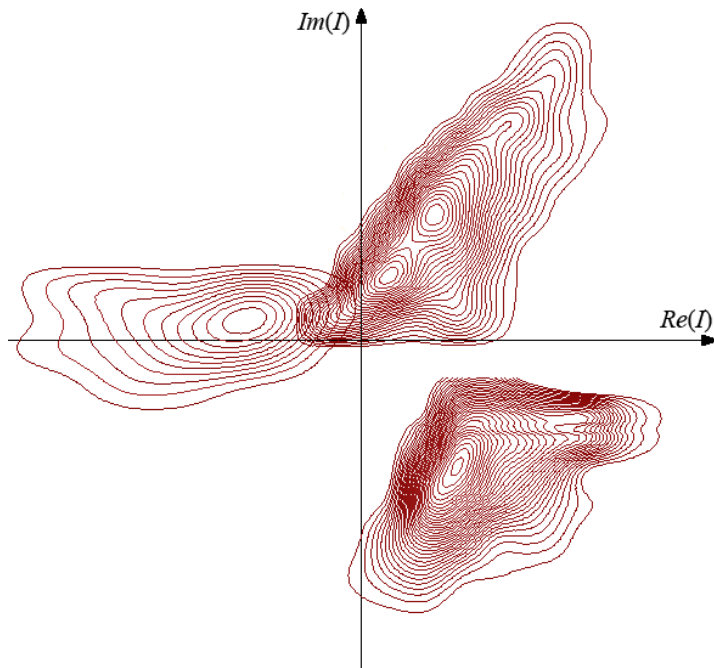


Рис. 6.7. Лінії рівня струму тягової підстанції змінного струму як двовимірної випадкової величини

Для системи постійного струму, струм в одній фазі, наприклад для 6-пульсового випрямляча, визначатиметься

$$i_A(t) = \begin{cases} +I_{dc}, & 0 < t < \frac{T}{6}, \frac{5T}{6} < t < T; \\ 0, & \frac{T}{6} < t < \frac{2T}{6}, \frac{4T}{6} < t < \frac{5T}{6}; \\ -I_{dc}, & \frac{2T}{6} < t < \frac{4T}{6}. \end{cases} \quad (6.15)$$

$$I_h = \begin{cases} +\frac{\sqrt{6}}{h\pi} I_{dc}, & h = 1, 7, 13, 19, \dots \\ -\frac{\sqrt{6}}{h\pi} I_{dc}, & h = 5, 11, 17, 23, \dots \\ 0, & h = 2, 4, 6, 8, \dots \\ 0, & h = 3, 9, 15, 21, \dots \end{cases} \quad (6.16)$$

За допомогою приведених аналітичних моделей, досить просто визначити емісію вищих гармонійних складових зі сторони тягового навантаження. Визначені відносні спектри струмів приведені на рис. 6.8, з

яких також можна визначити очікуване значення коефіцієнта нелінійних спотворень (THD) струму для систем постійного і змінного струму. Для першого системи змінного струму значення THD складає 42,6 %, для постійного струму і 6-пульсної схеми – 28,5 %, для 12-пульсної – 13,7 %.

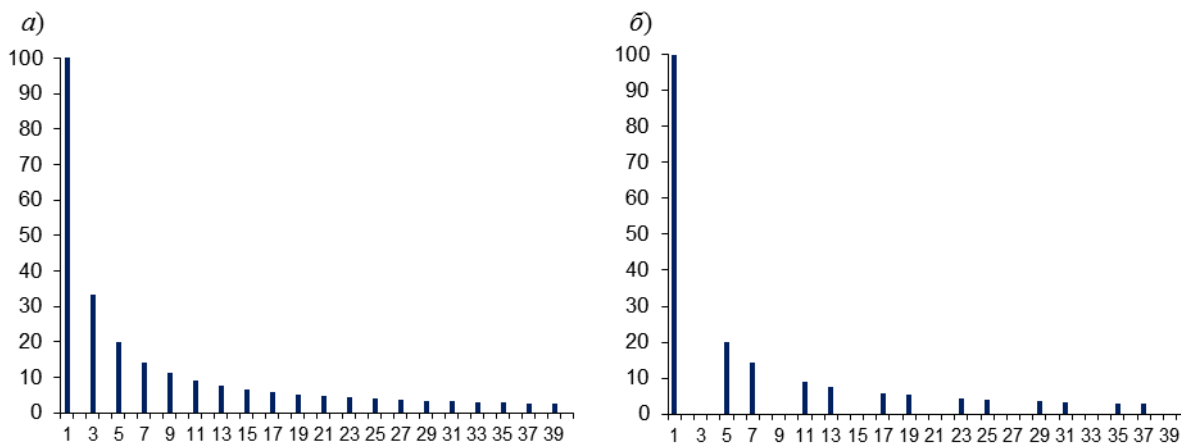


Рис. 6.8. Відносні спектри гармонік для електричної тяги змінного (а) та постійного струму (б)

Також використання приведених моделей дозволяє оцінити залежності зміни емісію струмів вищих гармонійний складових в перерахунку від споживаної потужності (рис. 6.9). З приведених залежностей видно, що для однієї споживаної потужності найбільшою та найменшою емісією володіє система 3,3 кВ з 6-пульсною схемою та 12-пульсною схемою випрямлення відповідно. Система змінного струму 27,5 кВ займає проміжне положення.

Таким чином, можна підсумувати, що процеси взаємодії систем тягового електропостачання з системами зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи та електроустаткуванням, що міститься у великій кількості складних підсистем, які активним чином взаємодіють між собою. Додатна нелінійна кореляція між активними та реактивними складовими струмів тягового навантаження характерна лише системам електричної тяги постійного струму, що вказує на те, що електрорухомий склад постійного струму не впливає на природу виникнення реактивної потужності.

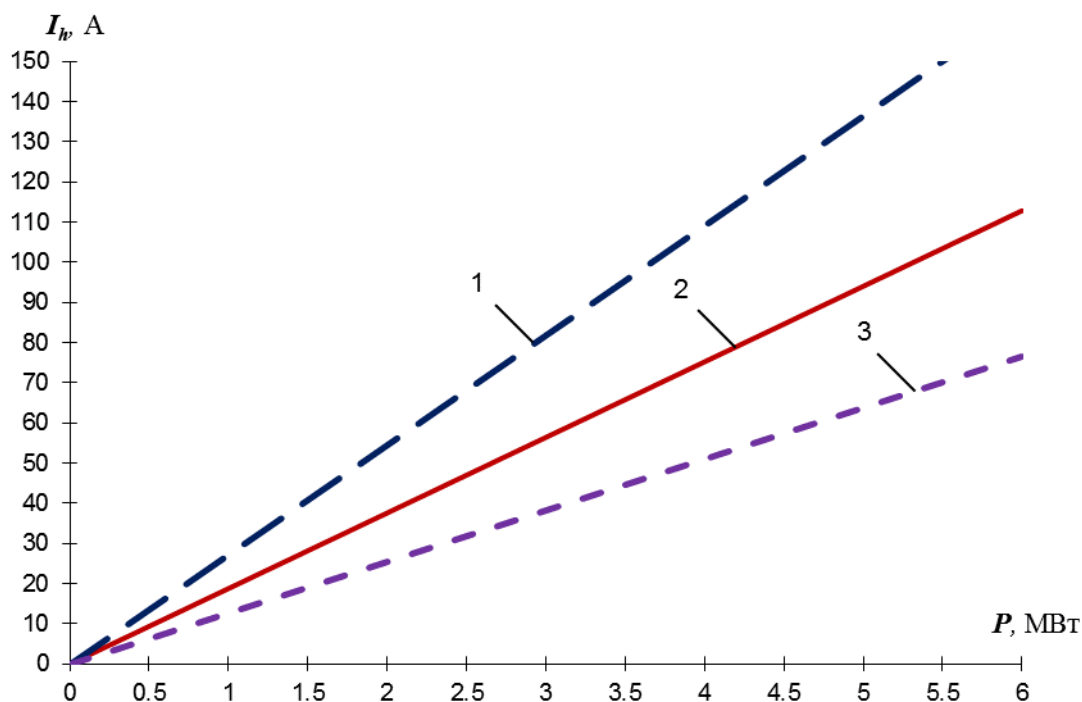


Рис. 6.9. Емісія вищих гармонік струму системами електричної тяги: 1 – 3,3 кВ (6-пульсна схема); 2 – 27,5 кВ; 3 – 3,3 кВ (12-пульсна схема)

В системі електричної тяги змінного струму через вплив різних факторів відсутня кореляція між ортогональними складовими струмів, що дозволяє досліджувати їх в якості незалежних випадкових величин.

Емісія струмів вищих гармонійних складових при однаковій споживаній потужності та інших рівних умов найбільша в системі постійного струму 3,3 кВ з 6-пульсними схемами випрямлення, найменша – для цієї ж системи але з 12-пульсними схемами. Система змінного струму 27,5 кВ з огляду на емісію вищих гармонік займає проміжне положення.

6.4. Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності

У випадках порушення нормальної схеми живлення в системі зовнішнього електропостачання між векторами однойменних первинних напруг виникає кут зсуву фаз, який викликає відповідну векторну різницю напруг на шинах тягового навантаження підстанцій. Під дією різниці напруг, зумовленою саме кутом зсуву фаз тяговою мережею, яка має активно-

(рис. 6.11) але без остаточного їх уникнення. Вирішення можливе застосуванням фазозсуваючих силових трансформаторів з інтелектуальною системою управління. Вимірювальними органами такої системи можуть бути пристрої комплексних вимірювань електричних параметрів мережі, а виконавчими – пристрої перемикання обмоток трансформаторів, які зібрані за схемою зигзагу [204]. Проте, як показав досвід експлуатації, використання фазозсуваючих трансформаторів виправдане в мережах напругою 150 кВ та вище. Тому, очевидно, що для узгодження тягових підстанцій змінного струму, які отримують живлення в основному напругою 110 кВ, та в окремих випадках, в якості винятку, – 154 кВ, застосування фазозсуваючих трансформаторів не буде виправданим, ще й тому, що узгодження відбуватиметься лише за однією фазою трифазної системи.

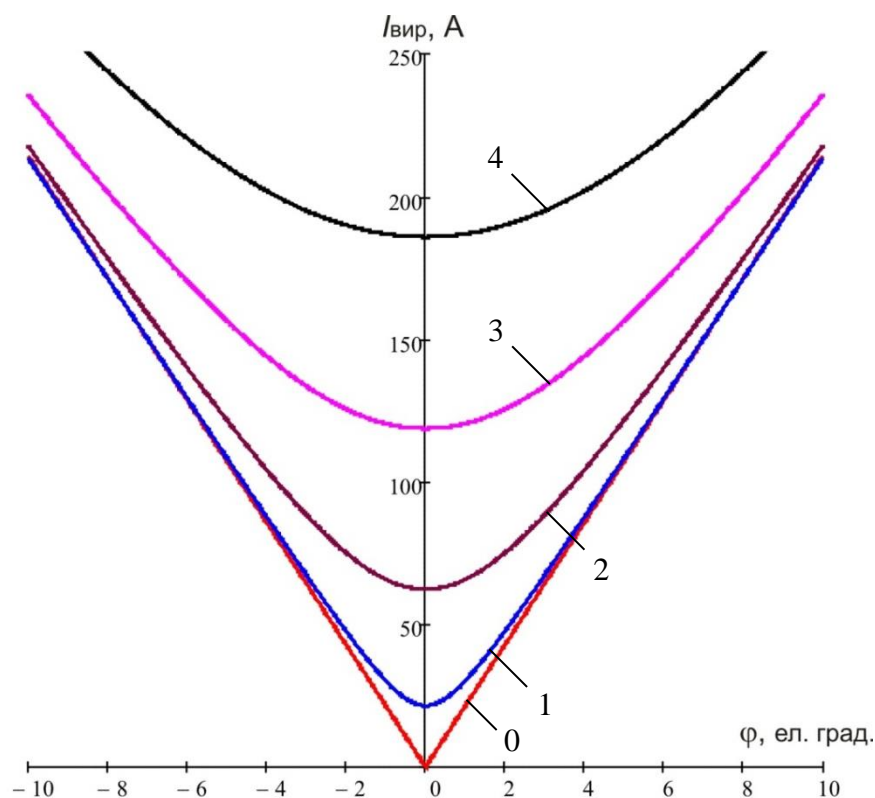


Рис. 6.11. Залежності вирівнювальних струмів в тяговій мережі на фазовій площині від положень перемикачів апацф трансформаторів

На тягових підстанціях електрифікованих залізниць з трифазними трансформаторами можливе встановлення установок поздовжньої

компенсації у відсмоктуючий фідер [205]. Доцільність цього рішення полягає в тому, що, по-перше, при підвищених навантаженнях і в лівому, і в правому плечах живлення компенсація у відсмоктуючому фідері приймає участь у підвищенні напруги. Необхідно відмітити, що при ввімкненні поздовжньої компенсації у плечі живлення для досягнення таких умов знадобилось вмикання двох установок.

По-друге, при ввімкненні поздовжньої компенсації у відсмоктуючий фідер напруга на плечі живлення не буде залежати від навантаження іншого плеча, тобто усувається ефект випереджуючої та відстаючої фаз. При цьому досягається симетрія напруги при рівних струмах плечах живлення. Та, нарешті, підключення компенсації у відсмоктуючий фідер знижує клас напруги застосовуваного обладнання та спрощує конструктивне виконання установки.

На тягових підстанціях змінного струму встановлюють, як правило, два силових трансформатори. Зазвичай у роботі знаходиться лише один трансформатор, але при відключенні сусідньої підстанції, а також при значному підвищенні розмірів руху та ваги вантажних поїздів з різних причин вмикають другий трансформатор. Таким чином, за рахунок включення другого трансформатора зменшується опір тягової підстанції. Через це при зміні числа ввімкнених трансформаторів необхідно передбачити зміну параметрів пристрою поздовжньої компенсації. Досвід застосування поздовжньої компенсації у тяговому електропостачанні виявив переваги їх підключення до відсмоктуючого фідера підстанції з трифазними трансформаторами.

Для дослідження впливу поздовжньої компенсації на характер вирівнювальних струмів задамося схемою заміщення тягової мережі, яка вплив параметрів компенсуючого пристрою буде враховувати в параметричному виді (рис. 6.12).

Отримаємо вираз для знаходження вирівнювального струму в тяговій мережі, в загальному виді

$$I_{\text{вир}} = \frac{U_1 - U_2}{(r_0 + jx_0) \cdot L - jX_C}, \quad (6.17)$$

де $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ – вектори напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, В;
 $r_0 + jx_0$ – питомий опір тягової мережі, в подальших розрахунках
 прийнято $0,2 + j 0,4$ Ом/км;

L – довжина міжпідстанційної зони, приймається рівною 50 км;

X_C – опір пристрою поздовжньої компенсації, Ом.

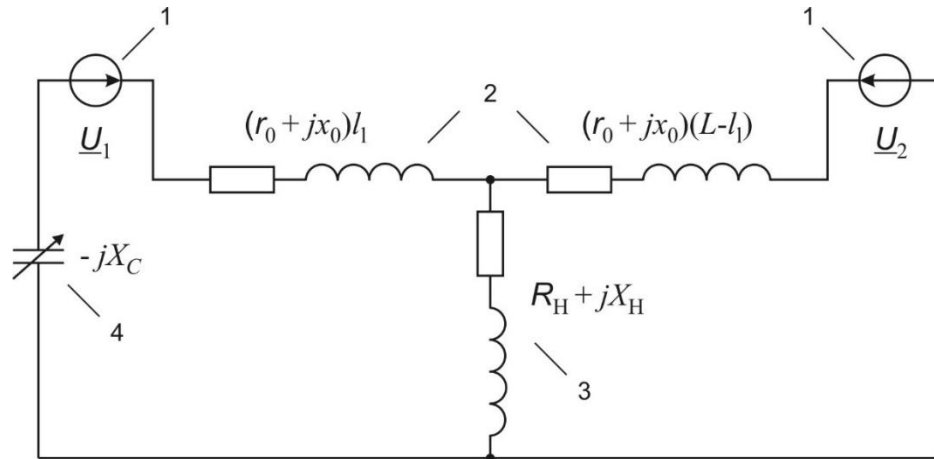


Рис. 6.12. Схема заміщення міжпідстанційної зони при застосуванні поздовжньої компенсації: 1 – фаза трансформатора; 2 – контактна мережа; 3 – навантаження; 4 – поздовжня компенсація

В такому випадку, залежність модулю вирівнювального струму та його кута зсуву від значення опору поздовжньої компенсації матиме вигляд, приведений на рис. 6.13, 6.14.

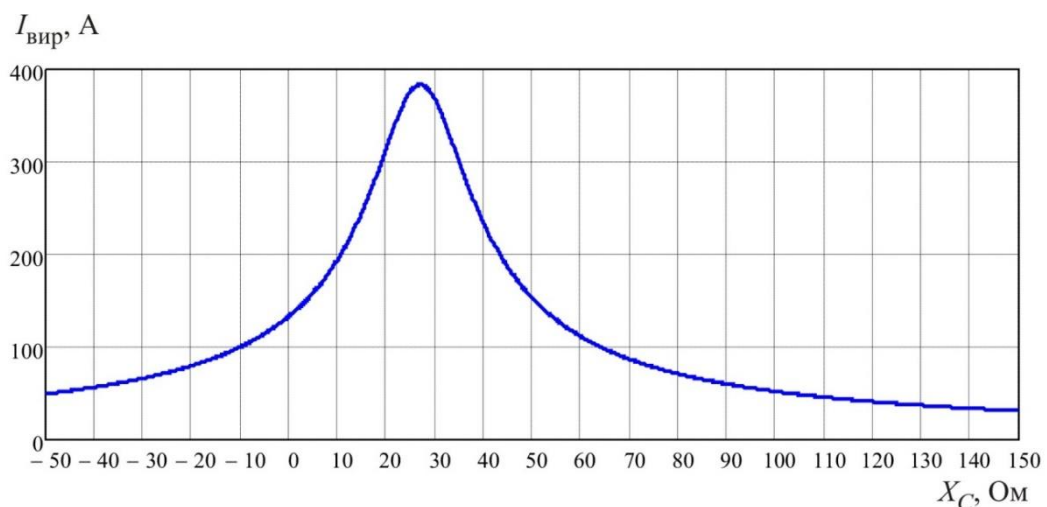


Рис. 6.13. Залежність модулю вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

Приведені вище розрахунки виконані для максимального значення кута зсуву напруги у фазі A на тяговій підстанції «Ім. Т. Шевченка» Одеської залізниці, а саме для 10 ел. градусів.

Для дослідження характеристик вирівнювального струму при застосуванні поперечної компенсації використано схему заміщення, яка приведена на рис. 6.15.

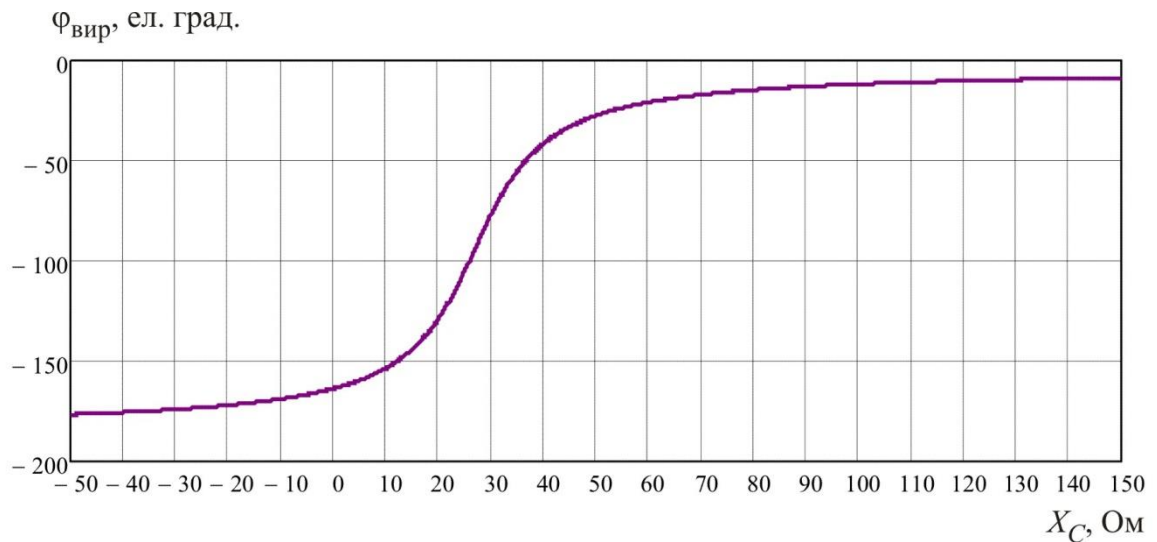


Рис. 6.14. Залежність кута вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

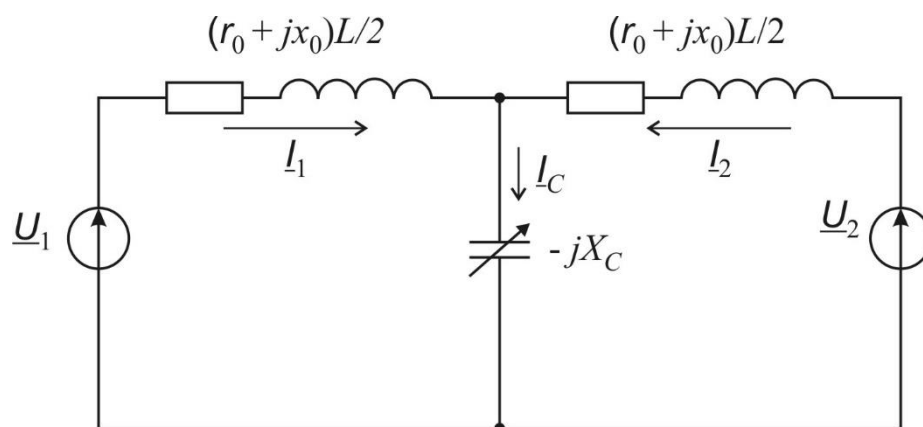


Рис. 6.15. Схема заміщення міжпідстанційної зони при застосуванні поперечної компенсації

Виразимо математично значення струмів навантаження та струму компенсації. Для цього складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа:

$$\begin{cases} \underline{I}_1 + \underline{I}_2 - \underline{I}_C = 0; \\ \underline{I}_1(r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot \underline{I}_C = \underline{U}_1; \\ \underline{I}_2(r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot \underline{I}_C = \underline{U}_2. \end{cases} \quad (6.18)$$

Виконуючи перетворення в загальному виді отримаємо вирази для знаходження струмів:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 = & \frac{LU_1r_0 + LU_2r_0 - jLU_1x_0 - jLU_2x_0 + 4jU_1X_C + 4jU_2X_C}{L^2r_0^2 + L^2x_0^2 - 8LX_Cx_0 + 16X_C^2} + \\ & + \frac{16U_1X_C^2r_0 - 16U_2X_C^2r_0 - j16U_1X_C^2x_0 + j16U_2X_C^2x_0}{16LX_C^2(r_0^2 + x_0^2)}, \end{aligned} \quad (6.19)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_2 = & \frac{LU_1r_0 + LU_2r_0 - jLU_1x_0 - jLU_2x_0 + 4jU_1X_C + 4jU_2X_C}{L^2r_0^2 + L^2x_0^2 - 8LX_Cx_0 + 16X_C^2} + \\ & + \frac{16U_1X_C^2r_0 - 16U_2X_C^2r_0 - j16U_1X_C^2x_0 + j16U_2X_C^2x_0}{16LX_C^2(r_0^2 + x_0^2)}, \end{aligned} \quad (6.20)$$

$$\underline{I}_C = \frac{2(\underline{U}_1 + \underline{U}_2)(Lr_0 - jLx_0 + 4jX_C)}{L^2r_0^2 + L^2x_0^2 - 8LX_Cx_0 + 16X_C^2}. \quad (6.21)$$

Графічно отримані залежності струмів плечей живлення від значення емнісного опору поперечної компенсації представлені на рис. 6.16, 6.17.

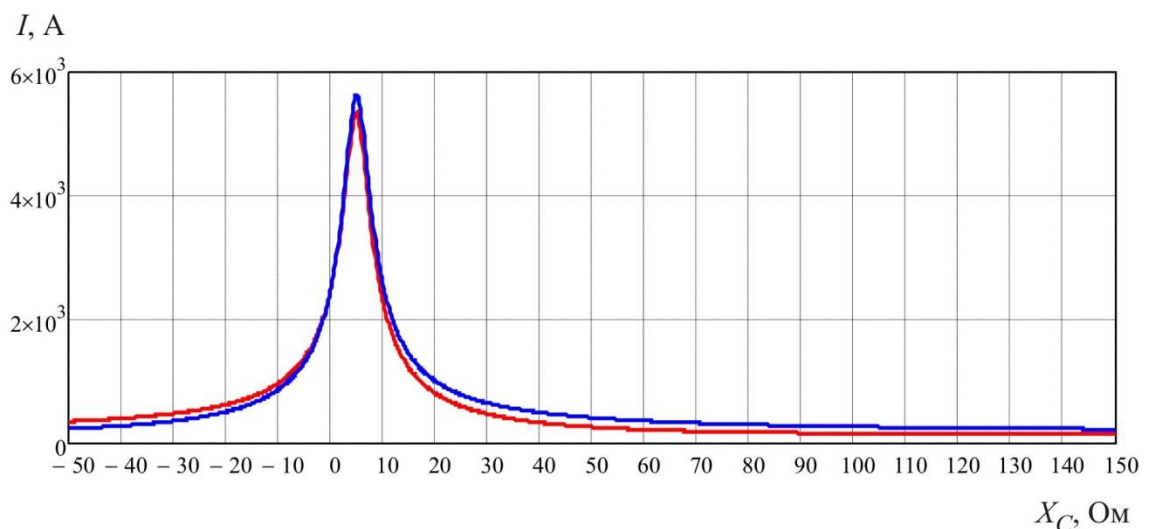


Рис. 6.16. Залежності струмів плечей живлення від опору поперечної компенсації

Узагальнюючи проведені дослідження, отримаємо залежності кута навантаження вирівнювального струму від параметрів пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації, використовуючи вираз

$$\varphi_{\text{вир}} = \psi(\underline{U}_1) - \psi(\underline{I}_{\text{вир}}).$$

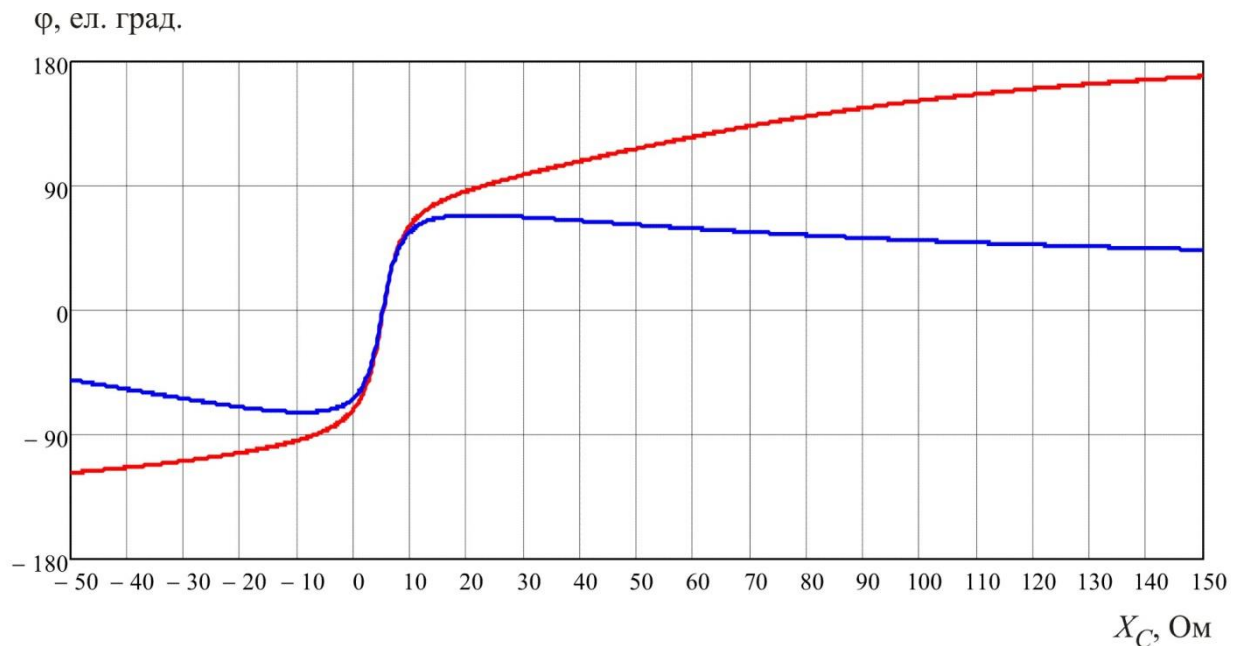


Рис. 6.17. Залежності кутів навантаження струмів від опору поперечної компенсації

Отримаємо залежності, приведені на рис. 6.18, з яких видно, що кута навантаження у 90° можна досягти при застосуванні поздовжньої компенсації з опором $X_C = 26,5 \text{ Ом}$, а при застосуванні поперечної компенсації – з опором $X_C = -12,2 \text{ Ом}$. Тобто, для отримання кута зсуву фаз у 90° при поперечній компенсації необхідно вмикати у коло додаткове індуктивне навантаження, що на практиці не є доцільним. Таким чином, маємо відмовитись від використання поперечної компенсації для впливу на характер вирівнювальних струмів.

У подальшому приймемо поздовжню компенсацію у відсмоктуючому фідері з параметром, який змінить кут зсуву вирівнювального струму

якогома ближче до 90° , тим самим переведе проблему вирівнювальних струмів у реактивну площину.

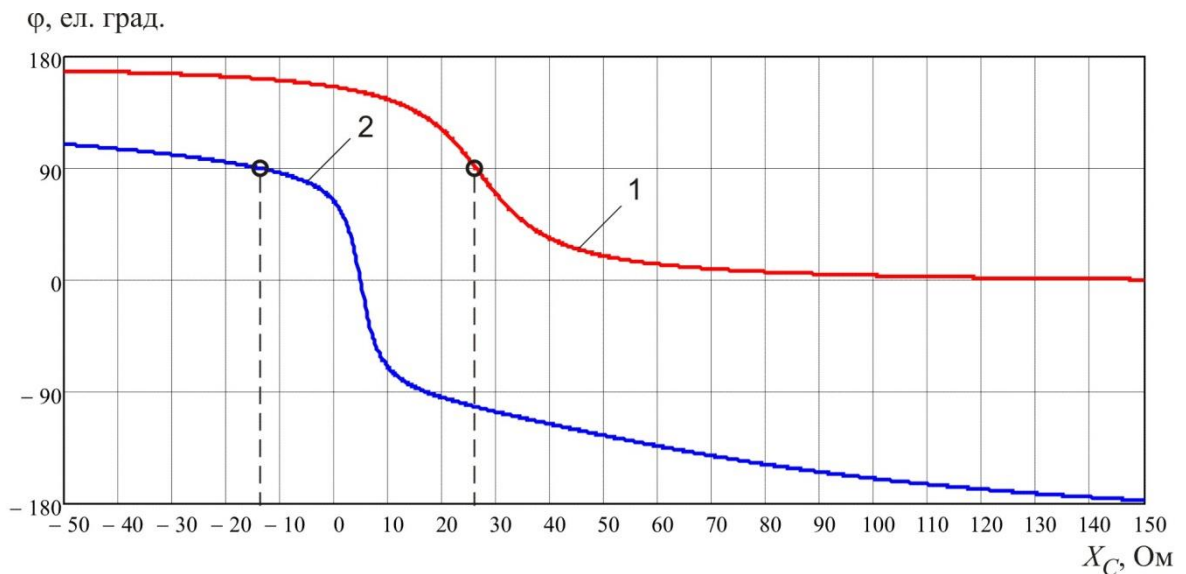


Рис. 6.18. Залежності кута навантаження вирівнювального струму для різних видів компенсації: 1 – поздовжньої; 2 – поперечної

Вирівнювальний струм під дією різних кутів зсуву фаз напруг суміжних тягових підстанцій з урахуванням превалюючого індуктивного опору тягової мережі виявляється майже активним відносно напруг плечей живлення. Використовуючи поздовжню компенсацію у відсмоктуючому фідері існує можливість формування кута зсуву вирівнювального струму відносно напруг плечей живлення. Тим самим стає можливим переведення проблеми активних перетоків у реактивну площину (рис. 6.19).

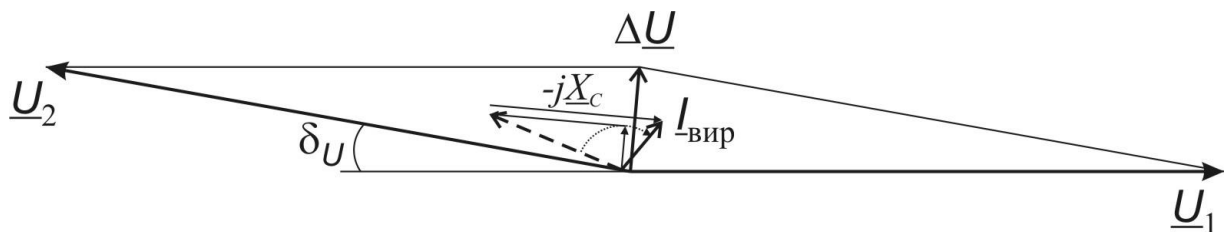


Рис. 6.19. Векторна діаграма зміни вирівнювального струму при застосуванні поздовжньої компенсації

Прийmemo у якості раціонального кута навантаження вирівнювального струму відносно напруг плеч живлення максимально близьке до 90° . З урахуванням того, що вирівнювальний струм для однієї тягової підстанції буде активним, а для іншої – ємнісним, результуючий кут визначимо з виразу

$$\varphi_{\text{вир}} = \frac{180 - \psi(U_1)}{2}. \quad (6.22)$$

Проведені дослідження показали, що ємнісний опір пристрою поздовжньої компенсації для досягнення вимоги (6.22) не буде змінюватись в залежності від кута зсуву фаз однойменних напруг первинної мережі, що дозволяє визначити його значення за приведеною методикою.

Транзитні перетікання потужності тяговою мережею змінного струму на сьогодні залишаються актуальним питанням, особливо в умовах лібералізації ринкових відносин в сфері електроенергетики. Уникнути явища вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму при відхиленні кута зсуву фаз однойменних напруг суміжних тягових підстанцій залишаючи їх у паралельній роботі достатньо складно.

Проте із використанням розробленої методики можна досягти зниження активних перетікань з 4 МВт (рис. 6.20) до 100-160 кВт (рис. 6.21).

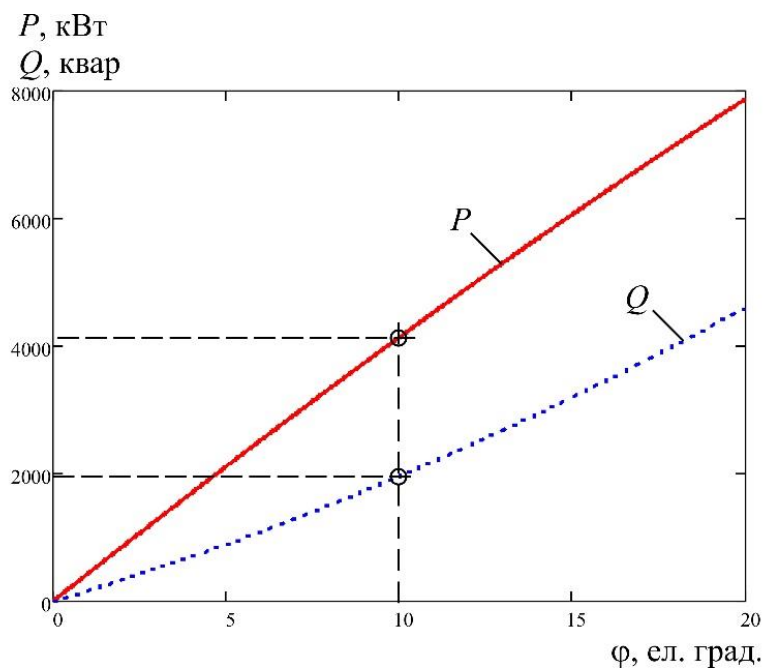


Рис. 6.20. Залежності додаткової активної та реактивної потужності від кута зсуву фаз напруги суміжних підстанцій

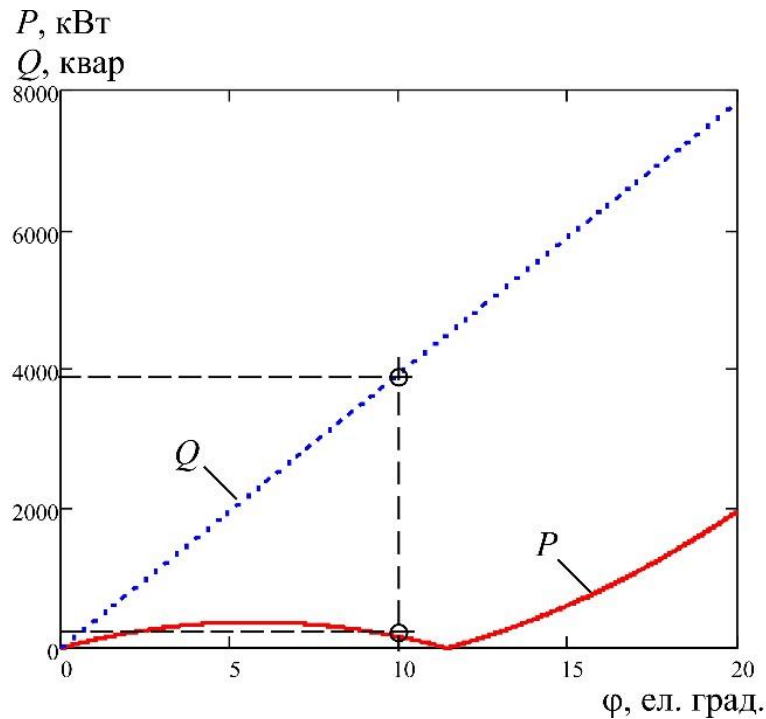


Рис. 6.21. Залежності додаткової активної та реактивної потужності при застосуванні поздовжньої компенсації від кута зсуву фаз напруги суміжних підстанцій

6.5. Методика розрахунку оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності

З огляду на невеликі значення перетікань реактивної електроенергії тяговими підстанціями постійного струму (300-600 квар) жоден зі способів регулювання компенсації реактивної способів не знайшов широкого розповсюдження. Тому пропонується методика пошуку оптимальної потужності нерегульованого компенсуючого пристрою Q_K , яка відповідає мінімуму відповідної її оплати. Виходячи з методу оплати за перетікання реактивної потужності за методикою [210], складемо цільову функцію

$$P = (WQ_{сп} + 3 \cdot WQ_{ген}) \left[1 + 1,3(\operatorname{tg} \varphi - 0,25)^2 \right] DT, \quad (6.23)$$

де $WQ_{сп}$ – величина спожитої реактивної потужності за розрахунковий період, квар·год;

$WQ_{\text{ген}}$ – величина генерованої реактивної потужності за розрахунковий період з мережі споживача в мережу енергопостачальної компанії, квар·год;

$\text{tg}\varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності;

D – економічний еквівалент реактивної потужності, кВт/квар;

T – середньозакупівельний тариф на активну електроенергію, грн./кВт·год;

В свою чергу, спожита $WQ_{\text{сп}}$ та генерована $WQ_{\text{ген}}$ реактивні потужності можуть бути визначені, як площі кривої добового споживання реактивної потужності з врахуванням встановленої потужності Q_K в певні відрізки часу (рис. 6.22), а саме

$$WQ_{\text{сп}} = \int_{t_0}^{t_1} (Q(t) - Q_K) dt + \int_{t_2}^{t_3} (Q(t) - Q_K) dt + \dots; \quad (6.24)$$

$$WQ_{\text{ген}} = \int_{t_1}^{t_2} (Q_K - Q(t)) dt. \quad (6.25)$$

В результаті розрахунку плати за перетікання Π при різних значеннях потужності компенсуючого пристрою Q_K отримуємо залежність $\Pi = f(Q_K)$, матиме мінімум (рис. 6.23).

На рис. 6.23 приведені результати розрахунку оптимальної потужності компенсуючого пристрої для чотирьох тягових підстанцій постійного струму Придніпровської залізниці. Для спрощення розрахунків, адекватності співставлення і порівняння результатів між собою та можливості подальшого використання розрахунки виконані для вартості електричної енергії $T = 1,0$ грн / кВт·год та економічного еквівалента реактивної потужності $D = 1,0$ кВт / квар. При необхідності уточнення внаслідок зміни вартості електроенергії чи перерахунку коефіцієнта D розраховані вартісні показники слід домножити на потрібний тариф чи коефіцієнт.

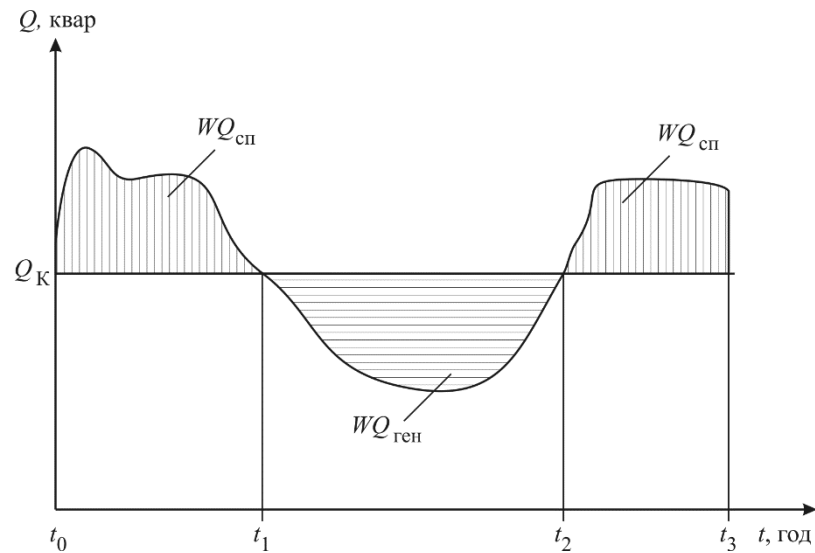


Рис. 6.22. Визначення складових цільової функції за профілем реактивного навантаження

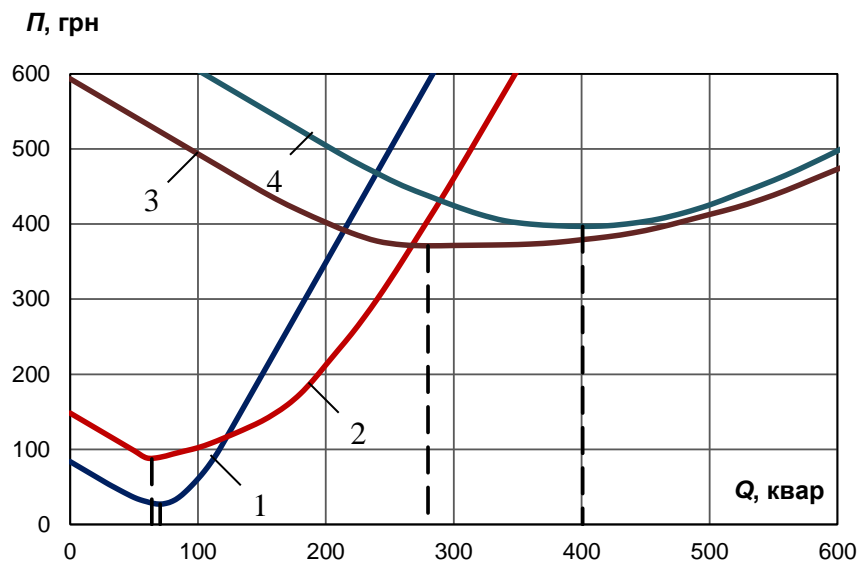


Рис. 6.23. Залежності добової плати за перетікання реактивної електроенергії від потужності компенсуючого пристрою для чотирьох підстанцій Придніпровської залізниці

В табл. 6.1 наведені чисельні значення ефективності впровадження компенсуючих пристроїв на тягових підстанціях постійного струму. В залежності від завантаженості тягових підстанцій, вартість перетікання реактивної електроенергії може складати від 84 до 705 грн. на добу (за цінами 2016 р.). При застосуванні нерегульованих компенсуючих чи фільтро-компенсуючих пристроїв з потужностями, що визначені за допомогою

запропонованої методики, можна досягти зниження цієї вартості на величину від 56 до 308 грн.

Таблиця 6.1 – Показники ефективності впровадження компенсуючих пристроїв

Показник	Тягова підстанція			
	1	2	3*	4
Добова вартість перетікання реактивної електроенергії, грн.	83,68	593,38	148,29	704,63
Оптимальна потужність компенсуючого пристрою, квар	70,4	280,0	63,9	400,8
Добова вартість перетікання реактивної електроенергії після компенсації, грн.	27,05	371,03	87,26	396,88
Добова економія коштів, грн.	56,63	222,35	61,03	307,75

Примітка: * – в розрахунках використані дані при ненормальному режимі роботи унаслідок виконання графіку аварійних відключень.

6.6. Висновки до розділу 6

Складні розгалужені кола, що містять джерела та споживачі електроенергії характеризуються двома відмінними енергетичними процесами: безповоротного перетворення енергії джерела живлення в інші види енергії; накопичення енергії у формі магнітного та електричного поля.

Миттєві характеристики електровозів чи плечей навантаження в системі електропостачання змінного струму за вимірними миттєвим напругами і струмами можуть бути визначені за допомогою чисельно розрахованих похідних цих залежностей.

Отримання характеристик опору навантаження в частотній області за миттєвими значеннями напруги і струми неможливий, оскільки ці осцилограми визначають характеристики навантаження при фіксованому наборі частотних збурень.

Процеси взаємодії між системами тягового і зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи електроустаткування, що міститься у великій кількості складних підсистем, які активним чином взаємодіють між собою.

Додатна нелінійна кореляція між активними та реактивними складовими струмів тягового навантаження характерна лише системам електричної тяги постійного струму.

У системі електричної тяги змінного струму через вплив різних факторів відсутня кореляція між ортогональними складовими струмів, що дозволяє досліджувати їх як незалежні випадкові величини.

Емісія струмів вищих гармонійних складових при однаковій споживаній потужності та інших рівних умовах найбільша в системі постійного струму 3,3 кВ з 6-пульсними схемами випрямлення, найменша – для цієї ж системи але з 12-пульсними схемами. Система змінного струму 27,5 кВ, незважаючи на емісію вищих гармонік, займає проміжне положення.

При відсутності чи відносно низьких навантаженнях в тяговій мережі в системах електричної тяги змінного струму виникають транзитні перетікання потужності між вузлами живлення. Діючі ринкові відносини ліцензіатів оптового ринку не передбачають оплати послуг за будь-які транзитні перетікання активної чи реактивної потужностей.

Проведені дослідження показали, що найбільший вплив на характер вирівнювальних струмів в тяговій мережі змінного струму має поздовжня компенсація реактивної потужності, яку на практиці найбільш доцільно виконувати у відсмоктуючому фідері тягової підстанції.

Запропонована методика визначення параметрів поздовжньої компенсації дозволяє перевести проблему транзитних перетікань у реактивну площину з подальшим застосуванням сучасних пристроїв поперечної компенсації, тим самим покращуючи електрифікованим залізницям умови закупівлі електроенергії.

Для тягових підстанцій системи електричної тяги постійного струму існують схемні рішення застосування пристроїв компенсації безпосередньо для випрямлячів, проте жоден з них не знайшов широкого застосування на залізницях України.

На сучасному етапі розвитку залізниць та ринкових відносин у сфері електроенергетики на тягову підстанцію постійного струму в залежності від розташування та завантаженості припадає від 84 до 705 грн. плати за перетікання реактивної електроенергії на добу (за цінами 2016 р.).

Розрахунки, які виконані на підставі профілів навантаження реальних тягових підстанцій постійного струму Придніпровської залізниці з використанням запропонованої методики показують, що можна досягти зниження добової вартості перетікань реактивної електроенергії на величину від 56 до 308 грн.

Запропонована методика визначення необхідної потужності компенсуючих пристроїв для забезпечення максимального зниження плати за перетікання реактивної електроенергії дозволяє визначити оптимальну потужність компенсуючого пристрою і для інших промислових споживачів.

Отримані в шостому розділі результати підвищення ефективності систем електричної тяги змінного струму в частині взаємодії з системою зовнішнього електропостачання опубліковано в роботах [24, 25, 26, 32].

РОЗДІЛ 7

**ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ****7.1. Комп'ютерно-інтегрована система електричної тяги**

Для ефективного функціонування систем тягового електропостачання у складі комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем [184, 188, 224-231] необхідний спеціальний програмний продукт. Призначення такого продукту полягає в розрахунку режимних показників системи тягового електропостачання для залізниць постійного та змінного струму, а саме значень фідерних і первинних струмів, розподілу струмів в контактній мережі, втрат напруги, потужності, витрат електричної енергії та основних показників якості електроенергії в системі тягового електропостачання з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії; виконання оптимізаційних розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

На рис. 7.1 зображено узагальнений алгоритм роботи розробленої інтелектуальної системи розрахунку режимів системи тягового електропостачання «iSET» (Intelligence System of Electrified Transport).

Для початку роботи в системі необхідно створити схему живлення ділянки тягової мережі, для якої необхідно виконати розрахунки, а також задати вихідні дані, а саме: обрати рід струму яким електрифікована ділянка, схему живлення, задати графік руху поїздів шляхом введення часу ходу ділянкою та момент часу відправлення, увести довжину у кілометрах обраної ділянки, тип тягової мережі, рівень напруги у вольтах на підстанціях, задати струми, що споживаються електровозами та кількість потягів для парної та непарної колії.

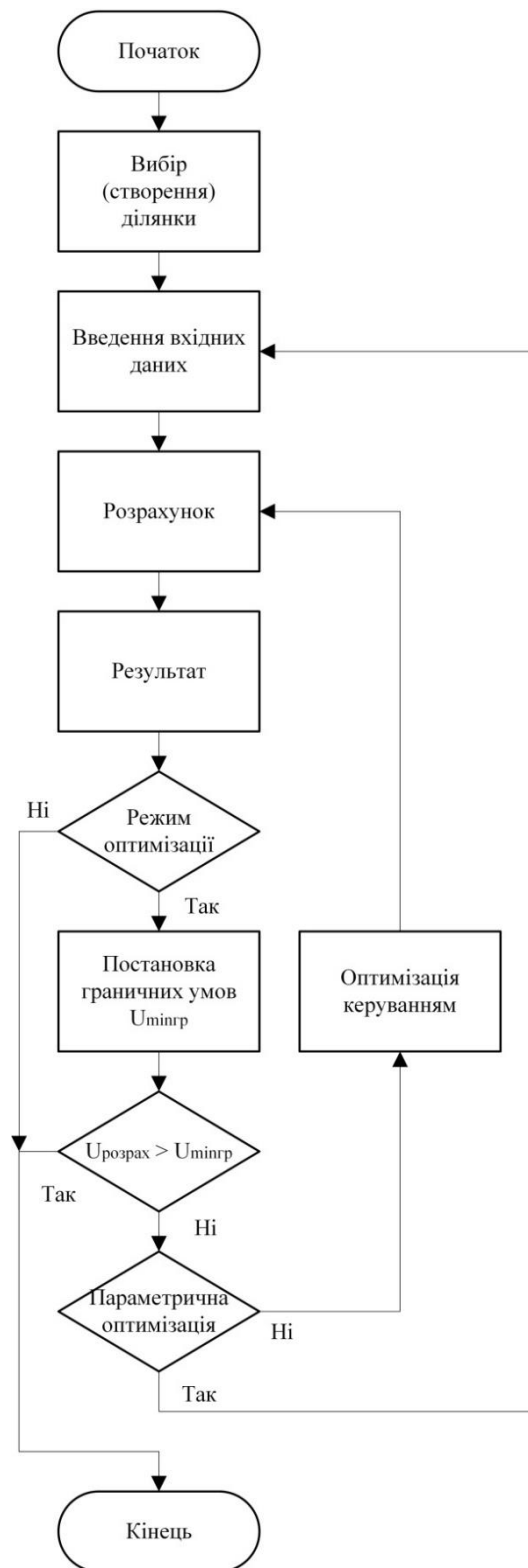


Рис. 7.1. Узагальнений алгоритм роботи програми

Програма передбачає три режими роботи:

- 4) загальний розрахунок системи тягового електропостачання;
- 5) параметричної оптимізації;
- 6) оптимізації керуванням.

Користувачу надається можливість провести загальний розрахунок, алгоритм якого приведено на рис. 7.2, після чого увійти в режим оптимізації. Результати розрахунків відображаються у вигляді графіків струмів фідерів тягових підстанцій, напруги на струмоприймачах електровозів та втрат потужності в тяговій мережі, епюр струму, втрат напруги та потужності в тяговій мережі.

При загальному розрахунку для введених вхідних даних (рід струму, схема живлення, графік руху, довжина обраної ділянки, тип тягової мережі, рівень напруги на підстанціях, споживані електровозами струми та кількість потягів для парної і непарної колії) проводиться розрахунок фідерних струмів тягових підстанцій та струмів в тяговій мережі, напруги на струмоприймачах електровозів, втрат напруги та потужності в тяговій мережі.

При оптимізації користувач, після проведення загального розрахунку, задає граничні умови за рівнем напруги. Система перевіряє відповідність отриманих результатів заданим умовам, і, якщо розрахункові дані відповідають їм, то система приймає рішення, що оптимізація не потрібна і завершує розрахунок. Якщо отримані результати не відповідають поставленим умовам, то система переходить до вибору одного з варіантів оптимізації: параметричної (рис. 7.3) чи оптимізації керуванням (рис. 7.4).

При параметричній оптимізації (рис. 7.3) коригуються параметри системи електропостачання, а саме: вихідна потужність тягових підстанцій, площа поперечного перерізу контактної мережі, довжина міжпідстанційних зон, розташування постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання.

В режимі оптимізації керуванням (рис. 7.4) проводиться розрахунок для двох варіантів: підсилення системи тягового електропостачання встановленням підсилюючих пунктів та стабілізації напруги в контактній мережі.

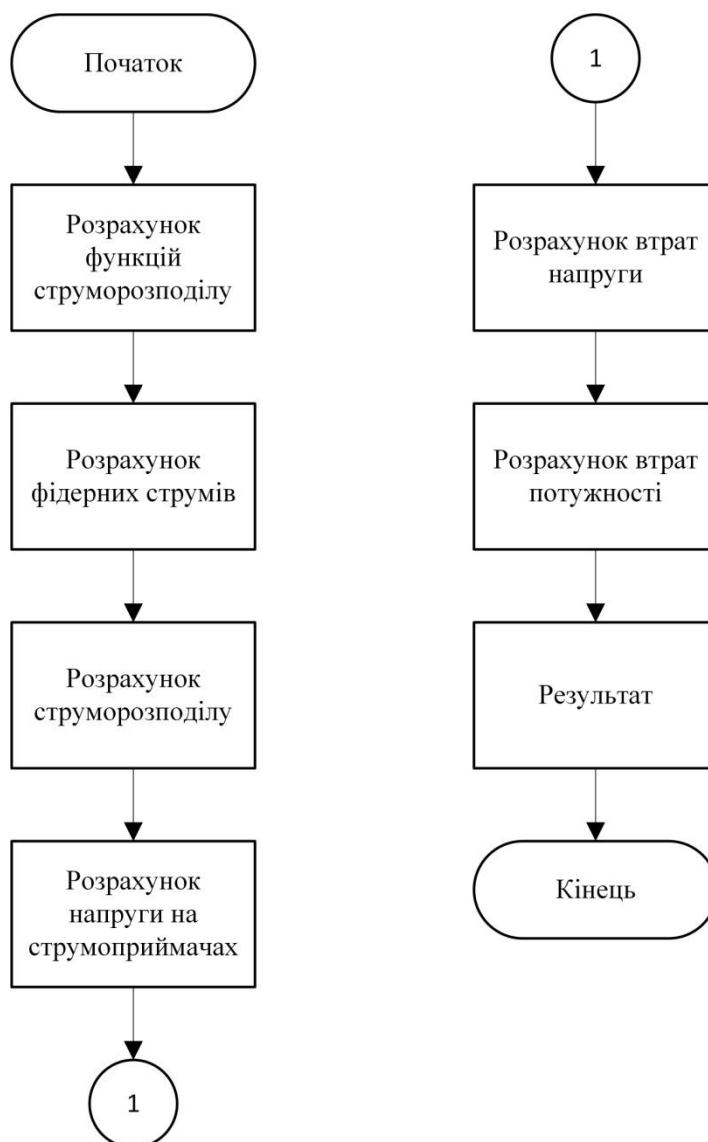


Рис. 7.2. Алгоритм загального розрахунку

При підсиленні системи тягового електропостачання шляхом встановлення на міжпідстанційній зоні пунктів підсилення спочатку проводиться визначення місця на розрахунковій ділянці з мінімальним значенням напруги на струмоприймачі електровозу для підключення підсилюючого пункту. Після чого визначається різниця напруги між встановленим і отриманим значенням та струм підсилення необхідний для компенсації цієї різниці. Далі проводиться розрахунок аналогічний загальному, але з урахуванням струму підсилюючого пункту в тяговій мережі. В результатах розрахунку додатково відображається струм підсилюючого пункту.



Рис. 7.3. Узагальнений алгоритм параметричної оптимізації

При стабілізації напруги в контактній мережі передбачається її вимірювання уздовж електрифікованої ділянки через встановлений інтервал. Далі формується масив вимірних даних. На основі масиву ідентифікується наближений струморозподіл в розрахунковій схемі. Використовуючи точку з мінімальним значенням напруги, визначається, в даний момент часу, величина недостаючої потужності, яка приводиться до струму підсилюючого пункту в місці його підключення. Далі отриманий струм передається в систему регулювання і розрахунок повертається на стадію формування масиву вимірних напруг.

В результаті роботи в режимі оптимізації отримується результат у вигляді оптимальних варіантів підсилення системи тягового електропостачання: потужності тягових підстанцій, типу контактної мережі, відстані між тяговими підстанціями, місць установки і струмів пунктів підсилення, струму керування системи стабілізації напруги. Також програма будує графіки фідерних струмів, напруг на струмоприймачах електровозів,

втрати потужності, епюри струмів та втрат напруги в контактній мережі на основі отриманих результатів.

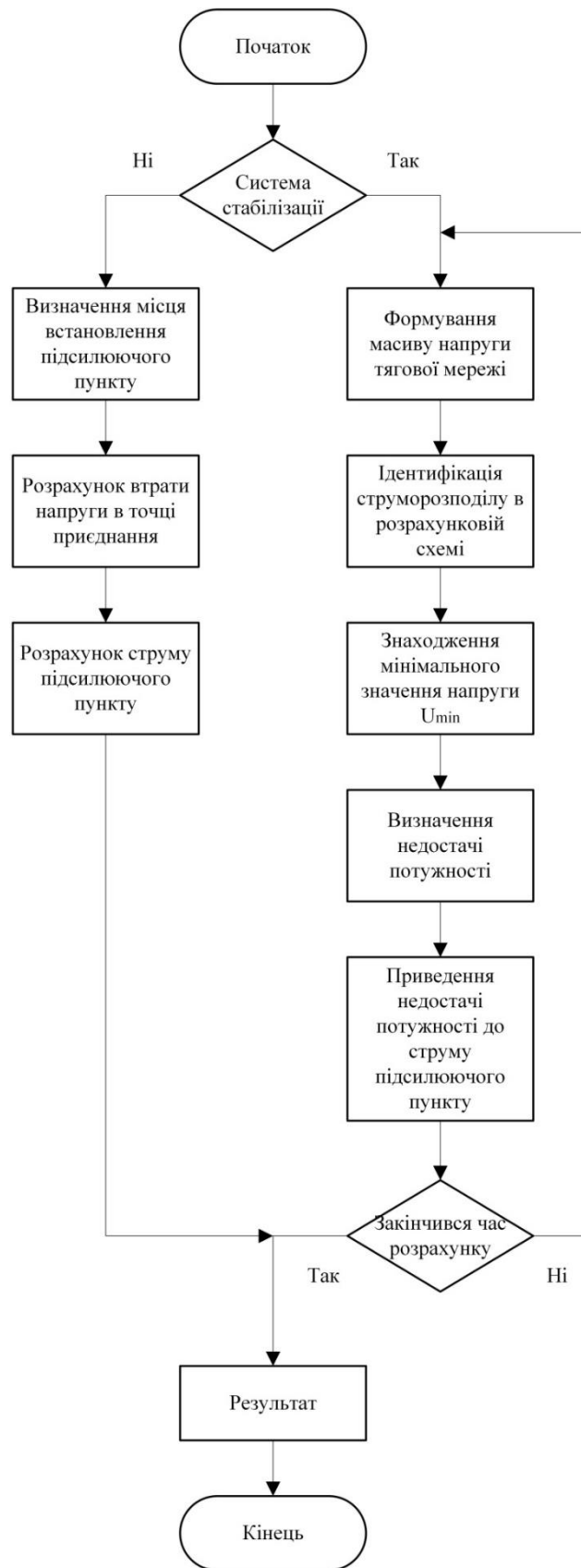


Рис. 7.4. Алгоритм оптимізації керуванням

Для опису структури програми використано діаграму компонентів. Діаграма компонентів (рис. 7.5) описує особливості фізичного представлення системи. Діаграма компонентів дозволяє визначити архітектуру системи, що розробляється.

На рис. 7.6 приведено структуру головного інтерфейсу програми, з виокремленням основних класів компонент.

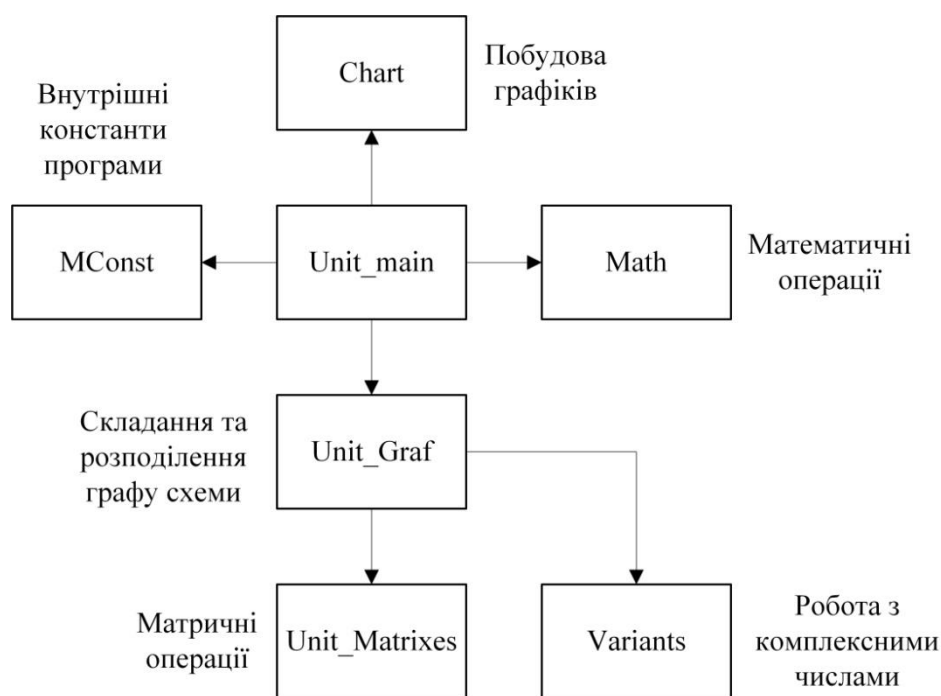


Рис. 7.5. Діаграма компонентів

Вхідними даними для роботи програми є:

- $x_g(n,t)$ – графік руху поїздів, який являє собою двовимірний масив з параметрами n – номер поїзду та t – час руху;
- $I_p(n,t)$ – масив тягових струмів у вигляді функції, що визначає струм поїзда з номером n в часі t з виконанням лінійної інтерполяції;
- L – довжина ділянки електрифікованої залізниці, км;
- L_0 – координата початку ділянки, км;
- L_k – координата кінця ділянки, км;
- r_0, x_0, r_m, x_m – питомі активні та індуктивні опори тягової мережі, Ом/км;
- Δt – крок розрахунку (дискретизація), с;

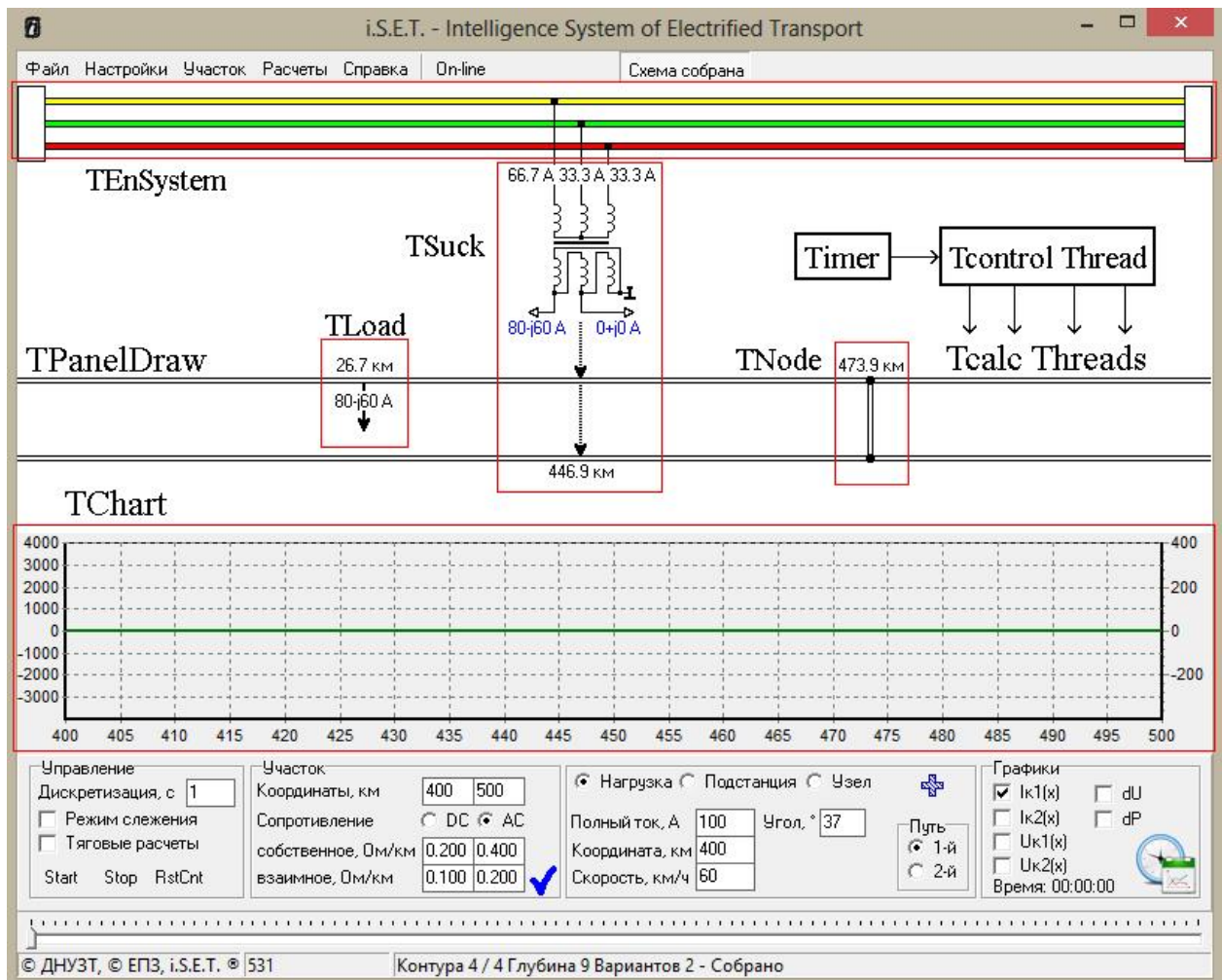


Рис. 7.6 Структура інтерфейсу програми з основними класами

Вихідними даними програми є:

- $I_{f1}(t), I_{f2}(t), I_{f3}(t), I_{f4}(t)$ – струми чотирьох фідерів кожної тягової підстанції в момент часу t від всіх поїздів;
- $I_{k1}(n,t,x), I_{k2}(n,t,x)$ – струми в контактній мережі першої та другої колії від поїзда з номером n в момент часу t в координаті x ;
- $\Delta U_{k1}(n,t,x), \Delta U_{k2}(n,t,x)$ – падіння напруги в контактній мережі першої та другої колії від поїзда з номером n в момент часу t в координаті x без урахування впливу інших поїздів;
- $I_{k1}(t,x), I_{k2}(t,x)$ – струм в контактній мережі першої та другої колії від усіх поїздів;
- $\Delta U_{k1}(t,x), \Delta U_{k2}(t,x)$ – падіння напруги в контактній мережі першої та другої колії від всіх поїздів та підсилюючого пункту;

- $\Delta U'_{k1}(t,x)$, $\Delta U'_{k2}(t,x)$ – падіння напруги в контактній мережі першої та другої колії від всіх поїздів без урахування підсилюючого пункту;
- $\Delta P_{k1}(t,x)$, $\Delta P_{k2}(t,x)$ – втрати потужності в контактній мережі першої та другої колії в момент часу t в координаті x від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $\Delta P_k(t,x)$ – сумарні втрати потужності в контактній мережі обох колій в момент часу t в координаті x від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $\Delta P_k(t)$ – сумарні миттєві втрати потужності в контактній мережі обох колій в момент часу t від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $U_e(n,t)$ – напруга на струмоприймачі електровозу з номером n в момент часу t з урахування впливу інших поїздів;
- $U_{k1}(t,x)$ – напруга в контактній мережі першої колії в момент часу t в координаті x ;
- $U_{k2}(t,x)$ – напруга в контактній мережі другої колії в момент часу t в координаті x ;

Панель «Участок» (рис. 7.7) призначена для введення параметрів розрахункової ділянки. Вона надає можливість ввести наступні данні: довжину, початкові та кінцеві координати ділянки, для якої необхідно провести розрахунки; рід струму, яким вона електрифікована, питомий опір тягової мережі. Для ділянки, електрифікованої змінним струмом, необхідно вказати також і взаємні опори. Після введення чи зміни даних натиснути кнопку «Применить».

Участок		
Координаты, км	400	500
Сопротивление	<input type="radio"/> DC	<input checked="" type="radio"/> AC
собственное, Ом/км	0.200	0.400
взаимное, Ом/км	0.100	0.200




Рис. 7.7. Панель «Участок» головного вікна програми

Панель «Схема и нагрузка» (рис. 7.8) призначена для створення розрахункової схеми та розташування навантаження. За допомогою панелі на розрахунковій схемі розташовуються тягові підстанції, пункти секціонування та паралельного з'єднання підвісок контактної мережі, навантаження.



Рис. 7.8. Панель редагування схеми і навантажень головного вікна програми:
1- ввід координати розташування; 2 – вибір схеми підключення до первинної мережі; 3 - вибір схеми підключення до тягової мережі; 4 – вибір наявності районних споживачів; 5 – кнопка «Добавить»

Для розташування тягової підстанції необхідно:

- задати початкову координату розташування;
- вибрати схему підключення до первинної мережі;
- вибрати схему підключення до тягової мережі;
- наявність районних споживачів.

Після задання параметрів натиснути «Добавить». Після появи тягової підстанції в робочій області програми її можна пересувати вздовж розрахункової ділянки (рис. 7.9) за допомогою «миші».

Для розташування в схемі пунктів секціонування чи паралельного з'єднання необхідно (рис 7.10):

- задати початкову координату розташування;
- якщо необхідно, задати ознаку розриву вузла.

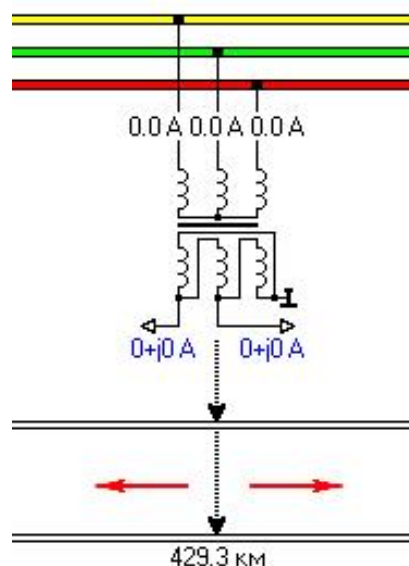


Рис. 7.9. Розташування тягової підстанції в робочій області програми

Після задання параметрів натиснути «Добавить». Після появи вузла в робочій області програми, його також можна переміщувати уздовж розрахункової ділянки.

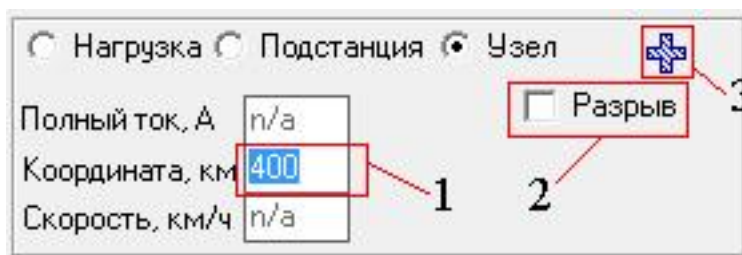


Рис. 7.10. Розміщення вузла: 1 – початкова координата;
2 – наявність розриву вузла; 3 – кнопка «Добавить»

При завершенні розміщення тягових підстанцій та вузлів схеми необхідно натиснути кнопку «Собрать схему» (рис. 7.11). Після цього система складає граф схеми, з'явиться інформація про необхідну кількість незалежних контурів у схемі, глибину розрахунку та загальну кількість контурів. Потім відбувається пошук незалежних контурів, про що свідчить повідомлення у статусі «Поиск», який переходить у фільтрацію до тих пір, поки не буде знайдено необхідну кількість незалежних контурів. Про можливість подальших операцій інформує статус «Готово». Після цього розраховується

напруга холостого ходу на шинах тягових підстанцій, струми плечей живлення, в зовнішній системі живлення відображаються фазні струми.

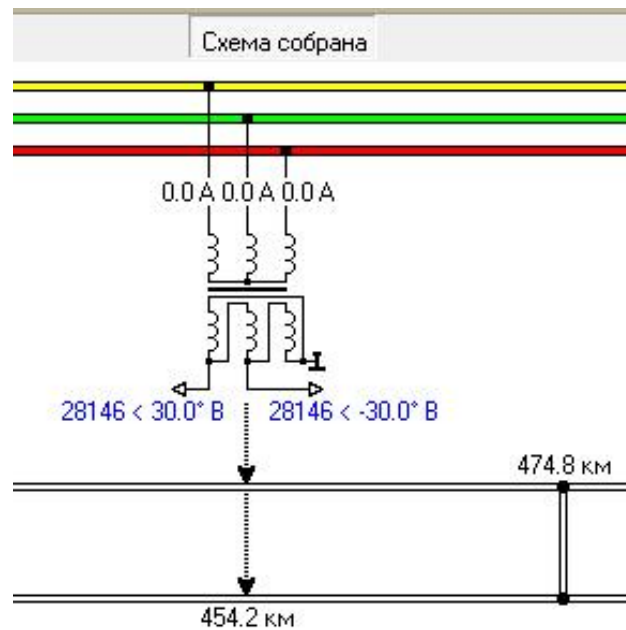


Рис. 7.11. Збирання розрахункової схеми

Після збирання схеми можна додавати навантаження (рис. 7.12). Для цього необхідно:

- задати початкову координату розташування;
- задати повний струм та кут навантаження;
- задати швидкість руху поїзда;
- вибрати колію для розташування.

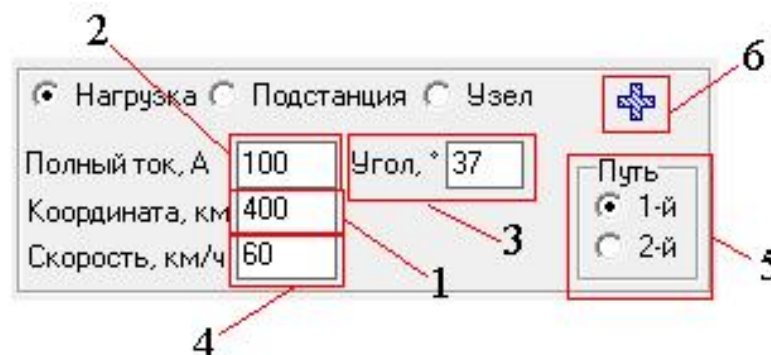


Рис. 7.12. Задання параметрів навантаження:

- 1 – початкова координата; 2 – повний струм навантаження; 3 – кут навантаження; 4 – швидкість руху поїзда; 5 – колія, по якій рухається поїзд; 6 – кнопка «Добавить»

Після задання необхідних параметрів і натискання кнопки «Добавить» збирається остаточна схема розрахунку (рис. 7.13).

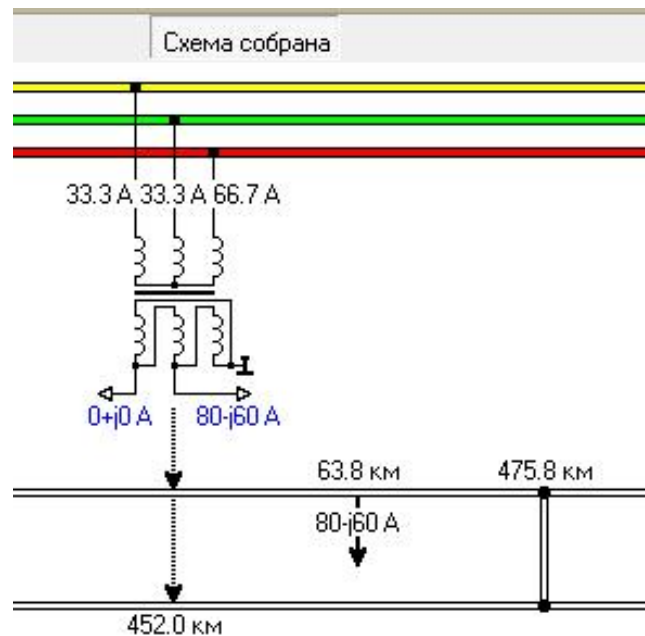


Рис. 7.13. Остаточна схема розрахунку

Для імітації руху поїздів та розрахунку створеної ділянки у загальному режимі необхідно натиснути кнопку «Start», для зупинки розрахунку – кнопку «Stop», які знаходяться на панелі «Управление» (рис. 7.14). На цій же панелі задається дискретизація розрахунку. Для відображення зміни параметрів системи тягового електропостачання в реальному часі необхідно натиснути кнопку «On-line».

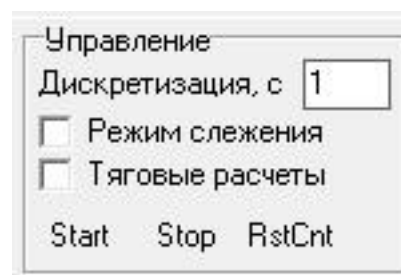


Рис. 7.14 Панель «Управление» головного вікна програми

Для виводу результатів розрахунку у вигляді графічних залежностей необхідно на панелі «Графики» (рис. 7.15) вибрати одну з запропонованих залежностей, і вона з'явиться в області побудови графіків (рис. 7.16).

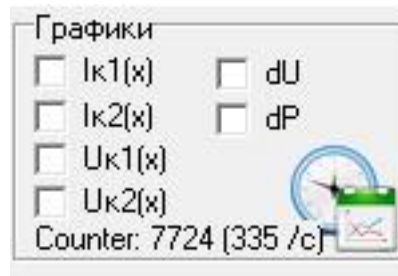


Рис. 7.15 Панель «Графики» головного вікна програми

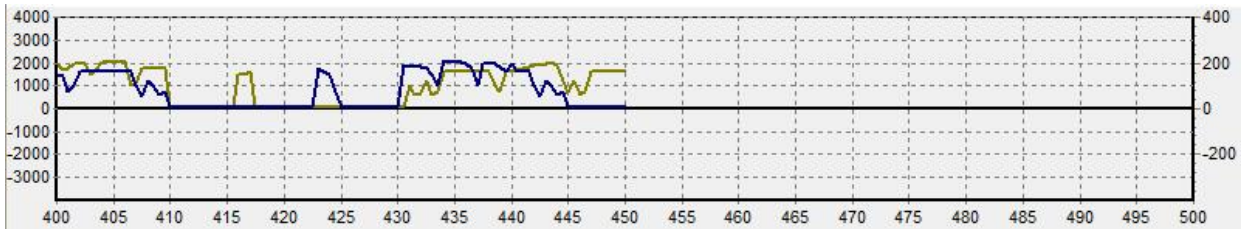


Рис. 7.16 Область побудови графічних залежностей

Після створення остаточної схеми та під час імітації руху поїздів можна спостерігати векторні діаграми струмів та напруг на шинах тягових підстанцій змінного струму (рис. 7.17 – 7.18).

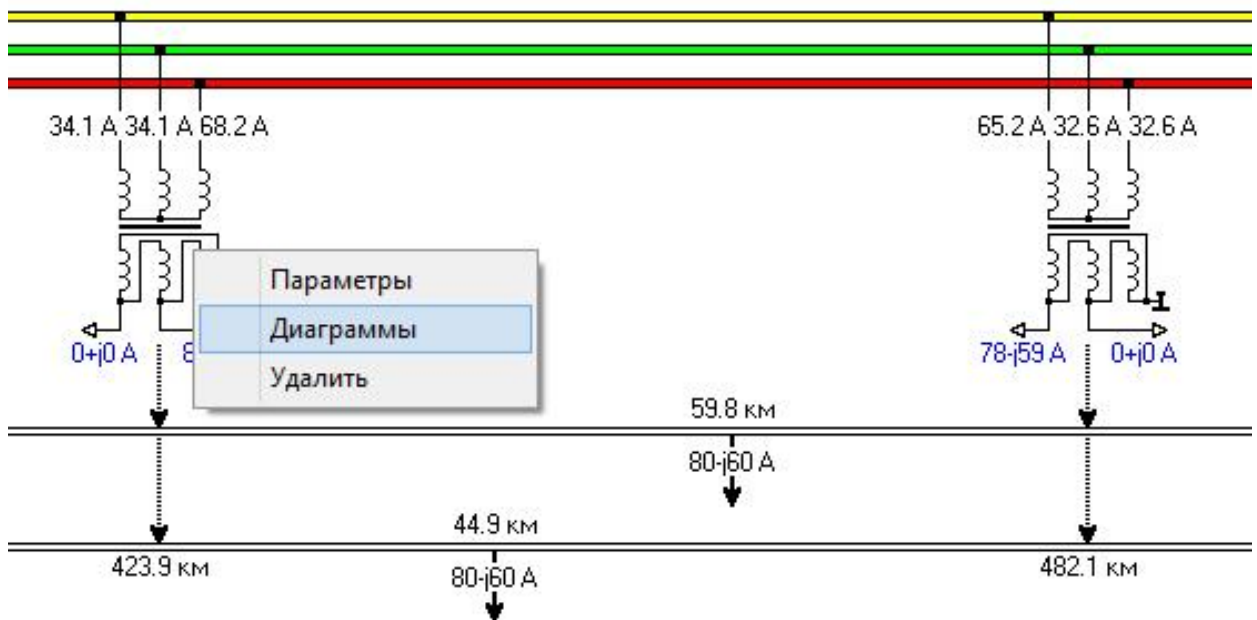


Рис. 7.17. Меню тягової підстанції

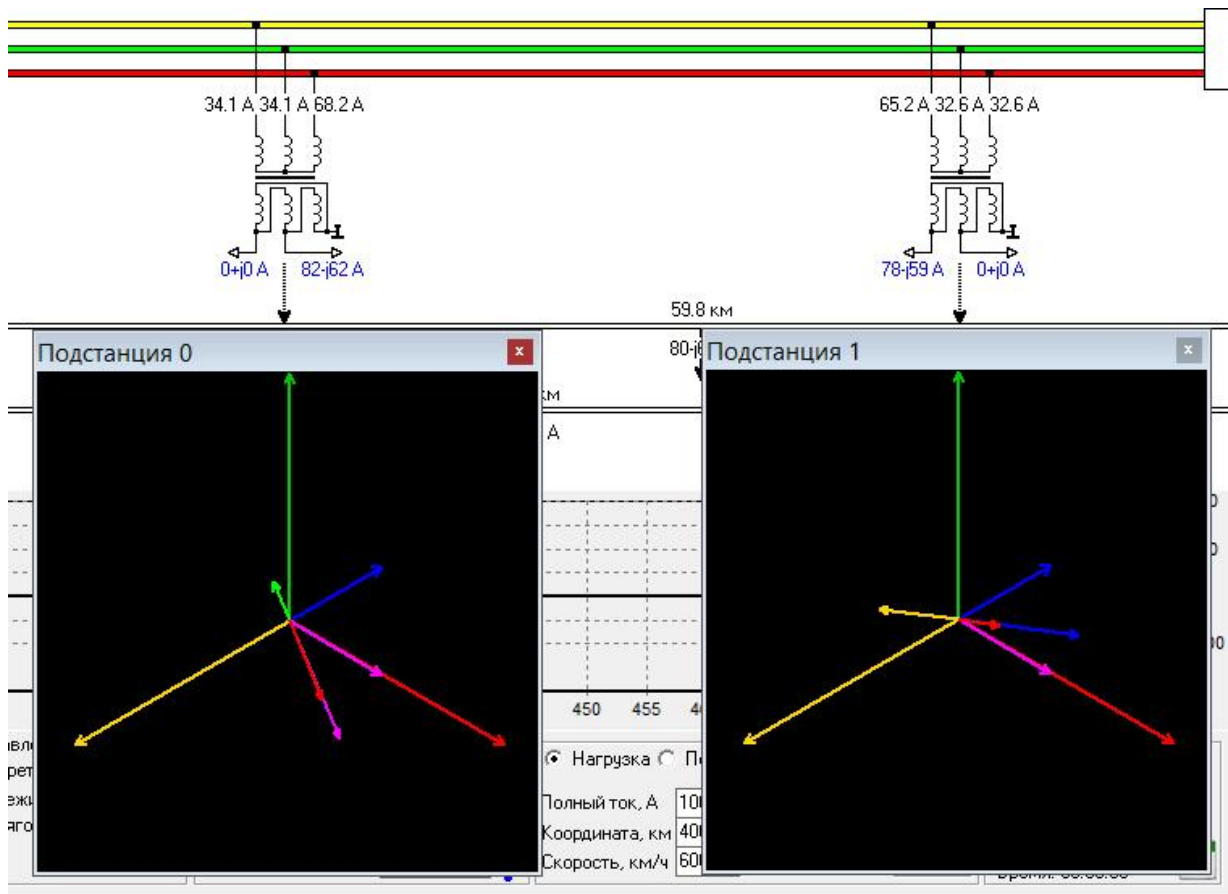


Рис. 7.18 Векторні діаграми

Для вибору режиму оптимізації потрібно на панелі «Меню» натиснути кнопку «Расчеты» і вибрати необхідний спосіб оптимізації (рис. 7.19).

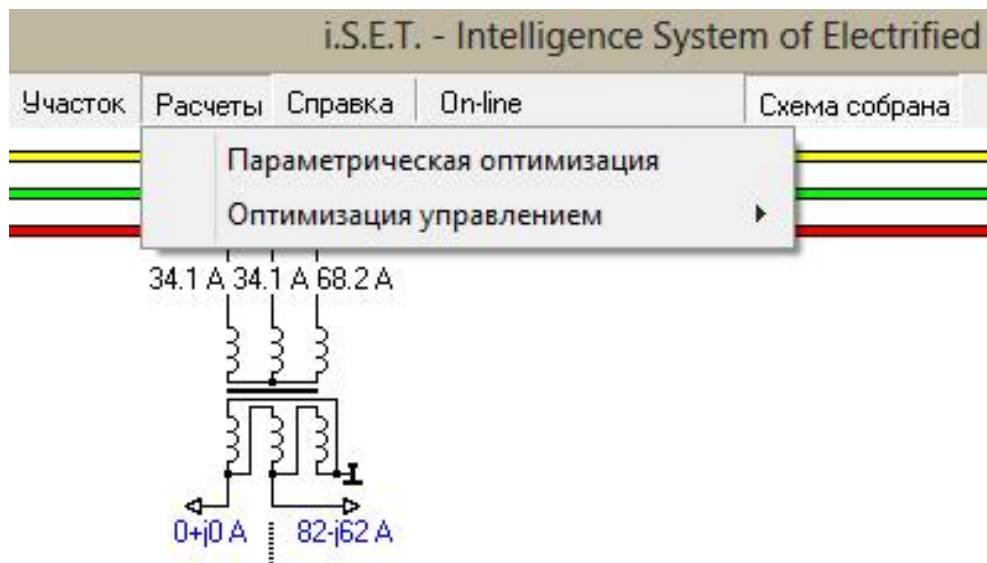


Рис. 7.19. Вибір способу оптимізації

При виборі режиму «Параметрична оптимізація» робота системи буде виконуватися згідно встановленого алгоритму.

При виборі режиму «Оптимізація управління» користувачу пропонується підсилення системи тягового електропостачання установкою підсилюючих пунктів або системою стабілізації напруги в тяговій мережі (рис. 7.20).



Рис. 7.20. Вибір оптимізації керуванням

При виборі способів підсилення системи електропостачання з меню «Оптимізація управління» програма виконує дії згідно з встановленим алгоритмом.

Перервати виконання розрахунків можна, натиснувши кнопку «Stop» (рис. 7.14). Для виходу з програми необхідно натиснути «Выход» в меню «Файл» або закрити вікно програми.

У табл. 7.1 представлені повідомлення користувачу, що можуть з'явитися у процесі роботи програми.

Таблица 7.1 – Повідомлення, що з'являються в процесі роботи програми

Текст повідомлення	Опис ситуації	Рекомендовані дії
Недопустимое значение дискретизации	На формі в полі дискретизація уведене неприпустиме значення	Виправити значення поля, яке не може приймати нульових та від'ємних значень
Недопустимые параметры участка	В параметрах ділянки уведені значення, що виходять за межі або не є числовими даними	Перевірити та виправити всі дані числових полів параметрів ділянки

Продовження табл. 7.1

Нельзя добавить нагрузку без собранной схемы	Натиснута кнопка додати навантаження без складання схеми електропостачання ділянки	Додати у схему тягові підстанції та вузли з'єднання контактних підвісок, а потім дати команду на збирання схеми
Нет ни одной подстанции для сборки схемы	Отримана команда на збирання схеми без додавання жодної тягової підстанції.	Додати до схеми електропостачання хоча б одну тягову підстанцію.
Перед изменением схемы требуется разборка	До зібраної схеми електропостачання ділянки додається новий об'єкт.	Виконати розбирання схеми та редагування об'єктів, а потім дати команду на збирання схеми
Действительно хотите разобрать схему?	Для зібраної схеми надходить команда на розбирання.	Якщо треба розібрати схему натиснути «Так», якщо розбирати не потрібно – «Ні».
Необходимо собрать схему и задать параметр оптимизации	Система отримала команду параметричної оптимізації.	Перевірити чи зібрано схему електропостачання ділянки та задати який саме параметр слід оптимізувати.
Необходимо задать график движения и размещение пунктов	Обрано розрахунок підсилюючих пунктів у статичному режимі.	Перевірити чи задано графік руху поїздів на ділянці на розташувати у схемі підсилюючі пункти.
Необходимо собрать схему и задать график движения	Обрано розрахунок стабілізації напруги на струмоприймачах електровозів.	Перевірити чи зібрано схему електропостачання ділянки та графік руху поїздів, задати розташування керованого підсилюючого пункту.

7.2. Техніко-економічне обґрунтування варіантів удосконалення системи електричних вимірювань для тягових підстанцій

Нижче приводиться техніко-економічний розрахунок двох варіантів удосконалення системи обліку електричної енергії на тяговій підстанції. У першому варіанті застосовується високовольтний вольтметр типу РД-150, а в другому варіанті удосконалення системи, застосовуються розроблений пристрій. Основне завдання проведення техніко-економічного порівняння обох варіантів, полягає в тому щоб визначити один, найбільш економічний із запропонованих варіантів, який буде упроваджений в систему обліку електричної енергії для тягових підстанцій постійного струму.

Виконуємо розрахунок для першого варіанту – "РД-150".

Розрахунок капітальних вкладень. Капітальні вкладення являють

собою затрати, спрямовані на створення нових, розширення, реконструкцію і технічне переозброєння діючих основних фондів виробничого та невиробничого призначення:

$$K_1 = n_1 \cdot Ц_{\text{пр.1}}$$

де n_1 – кількість приладів, шт ($n_1=2$ шт.);
 $Ц_{\text{пр.1}}$ – ціна одного приладу, тис. грн. ($Ц_{\text{пр.1}}=150.0$ тис. грн).

$$K_1 = 2 \cdot 150.0 = 300.0 \text{ тис. грн};$$

Експлуатаційні витрати – це грошові кошти, які повинні бути на підприємстві для виконання промислових завдань. Експлуатаційні витрати складаються з:

- експлуатаційних витрат на заробітну плату ($E_{\text{зп}}$).

$$З_{\text{міс}} = МТС + Д_{\text{висл}} + Пр ,$$

де $МТС$ – місячна тарифна ставка, грн;
 $Д_{\text{висл}}$ – доплата за вислугу років ($Д_{\text{висл}}=25\%$ від $МТС$);
 $Пр$ – премія ($Пр=20\%$ від $МТС$);

$$МТС = e_{\text{ч}} \cdot 169 ,$$

де $e_{\text{ч}}$ – годинна тарифна ставка, грн;
 169 – середня кількість робочих годин у місяці;

Годинна тарифна ставка приймається відповідно до розряду електромонтера, який безпосередньо виконує монтаж, налаштування, випробовування приладів. Монтаж виконують три електромонтера, з яких один має 2-й розряд, а два інших – 3-й розряд. Годинна тарифна ставка для: 2-го розряду складає – 11.67 грн. (за 1 годину); для 3-го розряду складає – 14.37 грн. (за 1 годину);

Розраховуємо місячну годинну ставку для 2-го розряду:

$$МТС_{2р.} = 11.67 \cdot 169 = 1972.23 \text{ грн};$$

Розраховуємо місячну годинну ставку для 3-го розряду:

$$МТС_{3р.} = 14.37 \cdot 169 = 2428.53 \text{ грн};$$

Розраховуємо місячну заробітну плату для електромонтера 2-го розряду:

$$З_{\text{міс. 2 р.}} = 1972.23 + 493.06 + 394.45 = 2859.74 \text{ грн};$$

Розраховуємо місячну заробітну плату для електромонтера 3-го розряду:

$$З_{\text{міс. 3 р.}} = 2428.53 + 607.13 + 485.71 = 3521.37 \text{ грн};$$

Експлуатаційні витрати на заробітну плату електромонтерів складають:

$$E_{\text{зп}} = З_{\text{міс. 2 р.}} + З_{\text{міс. 3 р.}} \cdot 2,$$

$$E_{\text{зп}} = 2859.74 + 3521.37 \cdot 2 = 9902.48 \text{ грн};$$

- експлуатаційних витрат на соціальні потреби ($E_{\text{сп}}$).

Відрахування на соціальні потреби складають 37,8 % від експлуатаційних витрат на заробітну плату електромонтерів ($E_{\text{зп}}$).

$$E_{\text{СП}} = 3743.14 \text{ грн};$$

- експлуатаційних витрат на витратні матеріали ($E_{\text{м}}$).

Таблиця 7.2 – Витратні матеріали

Найменування матеріалу	Одиниці виміру	Кількість одиниць	Ціна за одиницю, грн	Сума витрат, грн
1. Монтажний кабель ПВ1-4	м	16	10,00	160,00
2. Клемна колодка	шт.	2	162,50	325,00
3. Гвинти для клемної колодки	шт.	6	1.80	10,80
4. Гвинти для лічильників	шт.	8	2.20	17,60
5. Хомути монтажні	шт.	12	2.50	30,00
Сума				543,40

Експлуатаційні витрати на витратні матеріали складають:

$$E_M = 543.40 \text{ грн};$$

- експлуатаційних витрат на використану електроенергію ($E_{e/e}$).

У процесі виконання монтажних робіт, електромонтерами використовується такий електроінструмент: ручна дріль – номінальною потужністю 0,850 кВт, загальний час використання якої приблизно 1 годна; переносна освітлювальна установка – номінальною потужністю 0,060 кВт, загальний час використання приблизно 6 годин.

$$E_{e/e} = W \cdot T \cdot Ц,$$

де W – загальна потужність обладнання для здійснення монтажу системи, кВт;

T – час використання обладнання, год.;

$Ц$ – ціна електричної енергії за 1 кВт·год. ($Ц=2.00$ грн.).

$$E_{e/e} = 0.91 \cdot 7 \cdot 2 = 12.74 \text{ грн};$$

Сумарне значення експлуатаційних витрат ($E_{\text{сум}}$):

$$E_{\text{сум}1} = E_{\text{зп}} + E_{\text{сп}} + E_M + E_{e/e}$$

$$E_{\text{сум}1} = 9902.48 + 3743.14 + 543.40 + 12.74 = 14201.76 \text{ грн};$$

Інші експлуатаційні витрати (E_{iH}) складають 10 % від ($E_{\text{сум}}$):

$$E_{iH} = 1420.18 \text{ грн};$$

Визначаємо значення приведених витрат першого варіанту:

$$E_{\text{прив } 1} = E_{\text{сум}1} + K_1 \cdot E_H,$$

де E_H – коефіцієнт ефективності ($E_H=0,2$).

$$E_{\text{прив } 1} = 15621.94 + 300000.00 \cdot 0.2 = 75621.94,$$

Виконаємо розрахунок для другого варіанту, а саме, для розробленого приладу.

Розрахунок капітальних вкладень:

$$K_2 = n_2 \cdot C_{\text{пр.2}},$$

де n_2 – кількість приладів, шт ($n_2=2$ шт.);

$C_{\text{пр.2}}$ – ціна одного приладу, тис. грн. ($C_{\text{пр.2}}=1,6$ тис. грн).

$$K_2 = 2 \cdot 1,6 = 3,2 \text{ тис. грн};$$

Експлуатаційні витрати складаються з:

- експлуатаційних витрат на заробітну плату ($E_{\text{зп}}$).

$$Z_{\text{міс}} = \text{МТС} + D_{\text{висл}} + \text{Пр},$$

де МТС – місячна тарифна ставка, грн;

$D_{\text{висл}}$ – доплата за вислугу років ($D_{\text{висл}}=25\%$ від МТС);

Пр – премія (Пр=20% від МТС);

$$\text{МТС} = e_{\text{ч}} \cdot 169,$$

де $e_{\text{ч}}$ – годинна тарифна ставка, грн;

169 – середня кількість робочих годин у місяці;

Годинна тарифна ставка приймається відповідно до розряду електрика, який безпосередньо виконує монтаж, налаштування, випробовування приладів. Монтаж виконують три електрика, з яких один має 2-й розряд, а два інших – 3-й розряд. Годинна тарифна ставки прийняті аналогічним першому варіанту.

Розраховуємо місячну годинну ставку для 2-го розряду:

$$\text{МТС}_{2р.} = 11,67 \cdot 169 = 1972,23 \text{ грн};$$

Розраховуємо місячну годинну ставку для 3-го розряду:

$$\text{МТС}_{3р.} = 14,37 \cdot 169 = 2428,53 \text{ грн};$$

Розраховуємо місячну заробітну плату для електрика 2-го розряду:

$$Z_{\text{міс.2р.}} = 1972,23 + 493,06 + 394,45 = 2859,74 \text{ грн};$$

Розраховуємо місячну заробітну плату для електромонтера 3-го розряду:

$$З_{\text{міс. 3 р.}} = 2428.53 + 607.13 + 485.71 = 3521.37 \text{ грн};$$

Експлуатаційні витрати на заробітну плату електромонтерів складають:

$$E_{\text{зп}} = З_{\text{міс. 2 р.}} + З_{\text{міс. 3 р.}} \cdot 2,$$

$$E_{\text{зп}} = 2859.74 + 3521.37 \cdot 2 = 9902.48 \text{ грн};$$

- експлуатаційних витрат на соціальні потреби ($E_{\text{сп}}$).

Відрахування на соціальні потреби складають 37,8 % від експлуатаційних витрат на заробітну плату електромонтерів ($E_{\text{зп}}$).

$$E_{\text{сп}} = 3743.14 \text{ грн};$$

- експлуатаційних витрат на витратні матеріали ($E_{\text{м}}$).

Таблиця 7.3 – Витратні матеріали

Найменування матеріалу	Одиниці виміру	Кількість одиниць	Ціна за одиницю, грн	Сума витрат, грн
Плата мікроконтролера Atmega128RFA1	шт.	1	1600.00	1600.00
Джерело опорного живлення REF3120	шт.	1	12.12	12.12
Прецизійний операційний підсилювач LTC1053	шт.	4	22.75	91.00
Прецизійний операційний підсилювач OP07C	шт.	10	2.61	26.10
Конденсатор 10 uF 25V	шт.	10	0.32	3.20
Конденсатор 33 nF 50V	шт.	10	0.32	3.20
Резистор 1.5K	шт.	10	0.06	0.60
Резистор підлаштування 20K	шт.	4	5.06	20.24
Прецизійний резистор 240R	шт.	1	10.00	10.00

Високовольтний резистор 600К	шт.	1	50.00	50.00
Акумулятор	шт.	1	240.00	240.00
Корпус	шт.	1	150.00	150.00
Сума				2206.46

Експлуатаційні витрати на витратні матеріали складають:

$$E_M = 2206.46 \text{ грн};$$

- експлуатаційних витрат на використану електроенергію ($E_{e/e}$).

У процесі виконання монтажних робіт, електромонтерами використовується такий електроінструмент: ручна дріль – номінальною потужністю 0,850 кВт, загальний час використання якої приблизно 1 годна; переносна освітлювальна установка – номінальною потужністю 0,060 кВт, загальний час використання приблизно 6 годин, паяльне устаткування потужністю 0,050 кВт, час використання 40 годин.

$$E_{e/e} = W \cdot T \cdot \text{Ц}$$

де W – загальна потужність обладнання для здійснення монтажу системи, кВт;

T – час використання обладнання, год.;

Ц – ціна електричної енергії за 1 кВт·год. ($\text{Ц}=2.00$ грн.).

$$E_{e/e} = 0.96 \cdot 47 \cdot 2 = 90.24 \text{ грн};$$

Сумарне значення експлуатаційних витрат ($E_{\text{сум}}$):

$$E_{\text{сум}2} = E_{\text{зп}} + E_{\text{сс}} + E_M + E_{e/e},$$

$$E_{\text{сум}2} = 9902.48 + 3743.14 + 543.40 + 2206.46 + 90.24 = 16485.72 \text{ грн};$$

Інші експлуатаційні витрати ($E_{\text{ін}}$) складають 10 % від ($E_{\text{сум}}$):

$$E_{\text{ін}} = 1648.57 \text{ грн};$$

Визначаємо приведені значення експлуатаційних витрат першого варіанту:

$$E_{\text{прив}2} = E_{\text{сум}2} + K_2 \cdot E_{\text{н}},$$

де $E_{\text{н}}$ – коефіцієнт ефективності ($E_{\text{н}}=0,2$).

$$E_{\text{прив } 2} = 18134.29 + 3200.00 \cdot 0.2 = 18774.29,$$

Визначаємо економію приведених витрат ($\Delta E_{\text{прив}}$):

$$\Delta E_{\text{прив}} = E_{\text{прив } 2} - E_{\text{прив } 1}$$

$$\Delta E = 75621.94 - 18774.29 = 56847.65 \text{ грн};$$

З використанням показника "модифіковані приведені витрати" визначимо найбільш ефективний варіант з точки зору комерційної ефективності, якщо норма дисконту складає 15%, метод нарахування амортизації – прямолінійний, середня ставка амортизаційних відрахувань 10 % в рік, ставка податку на прибуток 0%, тривалість життєвого циклу проекту – 15 років.

Враховуючи, що для проекту, який розглядається, капітальні витрати здійснюються на початку життєвого циклу одноразово, а експлуатаційні витрати рівні по роках життєвого циклу, розрахункова формула для модифікованих приведених витрат має вигляд:

$$E_{\text{МП}} = K_t + \mathcal{E}_t \cdot (1 - \gamma) - \frac{(1 + E)^T - 1}{(1 + E)^T \cdot E} - \gamma \cdot \sum_{t=0}^T \frac{A_t}{(1 + E)^t}$$

де $E_{\text{МП}}$ - модифіковані приведені витрати на життєвий цикл проекту;

K_t - капітальні витрати в році t , тис. грн.;

\mathcal{E}_t - експлуатаційні витрати без амортизаційних відрахувань в році t , тис. грн.;

A_t - амортизація в податковому обліку в році t , тис. грн.;

γ - ставка податку на прибуток, долі;

E - норма дисконту проекту, %;

T - тривалість життєвого циклу проекту, років.

Оскільки густина по роках однакова, то розрахунок комерційної ефективності складе:

$$E_{\text{МП}} = 300000 + 14201.76 \cdot (1 - 0) \cdot \frac{(1 + 0.2)^3 - 1}{(1 + 0.2)^3 \cdot 0.2} - 0 \cdot \frac{0.1}{(1 + 0.2)} = 329915,75 \text{ грн.}$$

$$E_{МП2} = 3200 + 16485.72 \cdot (1 - 0) \cdot \frac{(1 + 0.2)^3 - 1}{(1 + 0.2)^3 \cdot 0.2} - 0 \cdot \frac{0.1}{(1 + 0.2)} = 37926,86 \text{ грн.}$$

Результати техніко-економічного порівняння двох варіантів зведемо до табл. 7.4.

Таблиця 7.4 – Результати розрахунків

Найменування	Існуючий "РД-150"	Розроблений
1.Капітальні вкладення, грн	300 000,00	3 200,00
2.Експлуатаційних витрат на заробітну плату ($E_{зп}$), грн	9 902,48	9 902,48
3.Експлуатаційних витрат на соціальні служби ($E_{сп}$), грн	3 743,14	3 743,14
4. Експлуатаційних витрат на витратні матеріали (E_m), грн	543,40	2 206,46
5.Експлуатаційних витрат на використану електроенергію ($E_{e/e}$), грн	12,74	90,24
6.Сумарне значення експлуатаційних витрат ($E_{сум}$), грн	14 201,76	16 485,72
7. Інші експлуатаційні витрати ($E_{ін}$), грн	1420,18	1 648,57
8.Приведені витрати ($E_{прив}$), грн	75 621,94	18 774,29
9. $\Delta E_{прив}$, грн	56 847,65	
10.Модифіковані приведені витрати ($E_{МП}$), грн	329 915,75	37 926,86

В результаті проведених розрахунків визначено, що капітальні вкладення для варіанту існуючого приладу "РД-150" більші ніж для варіанту розробленого пристрою.

Приведені витрати для розробленого приладу менші на 56,8 тис. грн. Виходячи з проведеного техніко-економічного розрахунку і проаналізувавши отримані дані, можна зробити висновок, що самим економічним варіантом для подальшого впровадження та удосконалення системи обліку електричної енергії є варіант застосування розробленого приладу, а саме пристрою вимірювання напруги постійного струму з бездротовою передачею даних. Зважаючи на те, що технічні характеристики існуючого пристрою "РД-150" набагато вищі, то при розробці автоматизованих систем необхідно враховувати не лише економічні показники, але й технічні, і вибір повинен залежати від поставлених задач, які повинна вирішувати вся система загалом.

7.3. Оцінка економічної ефективності застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі

На сучасному етапі розвитку електроенергетики необхідно використовувати форсований підхід до енергозберігаючих технологій виробництва та різноманітним способом зниження втрат електричної потужності та електроенергії, що скорочують потребу в нових електростанціях. Найдешевшим та одночасно найбільш ефективним засобом підвищення техніко – економічних показників електричних систем, зменшуючи всі види втрат та капіталовкладення на мережеві об'єкти та електростанції, віддаляючи строки їх спорудження є впровадження систем стабілізації напруги. При цьому додатково створюється підґрунтя для подальшого підвищення якості електроенергії згідно з вимогами стандартів.

Вибір способів підсилення, зокрема, тягових мереж, полягає у визначенні способу реалізації, номінальної потужності та місця встановлення підсилюючих пунктів в електричну мережу при одночасному оптимальному використанні вже наявних джерел потужності. До способів підсилення можна віднести одноагрегатні тягові підстанції, пункти додаткового живлення, застосування накопичувачів та альтернативних джерел електроенергії.

Для рішення поставленої проблеми необхідно застосовувати комплексний підхід як до проблеми підвищення якості електроенергії: необхідно мати відповідні засоби регулювання, впливати на баланси активної та реактивної потужності, і навпаки, на показники якості електроенергії, що залежать від режимів роботи систем тягового електропостачання.

Оптимальне рішення даного завдання не лише створює можливість існування максимальних режимів роботи електричних систем за рахунок забезпечення балансу потужності в цілому, так і в окремих її вузлах, але й суттєво додатково зменшує всі перераховані втрати, а також приведені затрати на спорудження та експлуатацію мереж. Така оптимізаційна ефективність не потребує додаткових капіталовкладень, досягається за

рахунок методичних удосконалень та запровадження раціонального організаційного механізму реалізації теоретичних рішень і тому надзвичайно практична й актуальна, особливо на сучасній стадії розвитку електроенергетики, при все більш відчутних дефіцитах генеруючих потужностей та достатньо низьких рівнях напруги в енергосистемах.

7.3.1. Визначення інвестиційних витрат

В табл. 7.5 наведені витрати на закупівлю та монтаж пристроїв для впровадження системи стабілізації напруги в контактній мережі

Таблиця 7.5 – Розрахунок витрат на матеріали та обладнання

Назва матеріалу	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за одиницю, тис. грн	Вартість, тис. грн
Керований пристрій підсилення напруги 2 МВт, 3,3 кВ	шт	1	10 000	10 000
Пристрої вимірювання напруги уздовж контактної мережі ділянки	шт	15	1,6	24
Датчики температури та вологості повітря	шт	1	2	2
Вольтметри	шт	5	1	5
Міліамперметри	шт	5	1	5
Шлейфи	шт	2	1,5	3
Вогнегасники	шт	2	1	2
Ящик з піском	шт	1	0,5	0,5
Всього				10 041,5

Визначаємо заробітну плату виробників, які виконуватимуть монтаж та налаштування пристрою поздовжньої компенсації:

Таблиця 7.6 – Склад та час виконання робіт з монтажу

Склад робіт	Час виконання, год
Підготування місця монтажу	64

Монтаж пристрою	80
Монтаж датчиків та приладів вимірювання	24
Монтаж шафи та його обладнання	80
Налаштування системи в цілому	20

Для розрахування величини заробітної плати робітника за виконання роботи скористаємось виразом:

$$ЗП = (T + B) \cdot T_{\text{год}},$$

де T – трудомісткість робіт, год;

B – позапланові роботи, год (складає 12 % від T);

$T_{\text{год}}$ – погодинна тарифна ставка, грн..

Розрахунок заробітної плати робітникам за виконання встановленого плану робіт приведений в табл. 7.7.

Таблиця 7.7 – Штат робітників та величина заробітної плати за виконання плану робіт

Штат робітників та їх категорії	Погодинна тарифна ставка робітника, грн	Заробітна плата, грн
Електромонтер III розряду	12,47	2456,59
Електромонтер III розряду	12,47	2456,59
Електромонтер IV розряду	13,39	2637,83
Електромеханік	15,86	3124,42
Інженер-проектувальник	16,3	3211,42
Всього:		11679,85

Нарахування на заробітну плату складає 37,8 % від загальної заробітної плати робітникам за виконаний план роботи.

Розрахуємо нарахування на заробітну плату за формулою:

$$E_{c.v.} = ЗП_{заг} \cdot 37,8\%,$$

де $ЗП_{заг}$ – загальна заробітна плата, грн.;

$$E_{с.в.} = 11679,85 \cdot 37,8\% = 4414,98 \text{ грн.}$$

7.3.2. Розрахунок амортизаційних відрахувань, вартісної оцінки та терміну окупності

Амортизаційні відрахування розраховуються за формулою:

$$A = \frac{B_n \cdot H_a}{100},$$

де B_n – вартість обладнання, що встановлюється, грн/рік;

H_a – річна норма амортизації, % (складає 15 %);

Розрахуємо амортизаційні відрахування за формулою:

$$A = \frac{10041,5 \cdot 15\%}{100} = 1506,23 \text{ тис. грн/рік}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат проводимо за формулою:

$$E = ЗП + E_{с.в.} + A + \text{інш}$$

де $ЗП$ – витрати на заробітну плату, грн;

$E_{с.в.}$ – нарахування на заробітну плату, % (становить 37,8 %);

A – амортизаційні відрахування, грн;

інш – інші витрати, грн. (становлять 1 % від витрат на матеріали).

Розрахуємо експлуатаційні витрати

$$E = 11679,85 + 4414,98 + 1506230 + 100415,00 = 1622739,83 \text{ грн.}$$

Вартісна оцінка на впровадження заходу розраховується за формулою:

$$B_T = B_M + ЗП + E_{с.в.}$$

де B_M – вартість матеріалів для впровадження окремого заходу, грн.;

Розрахуємо вартісну оцінку на впровадження заходу за формулою:

$$B_T = 10041500 + 11679,85 + 4414,98 = 10057594,83 \text{ грн.}$$

Термін окупності розрахуємо за наступною формулою:

$$T_o = \frac{K}{P_T} \leq T_n$$

де K – капітальні витрати на впровадження заходу, грн;

P_T – вартісна оцінка попередженої поломки (становить 60 % від вартості нового пристрою підсилення напруги (6000 тис. грн.), відповідно до оціночних розрахунків).

Розрахунок терміну окупності системи стабілізації проведемо за виразом:

$$T_o = \frac{10058}{6000} = 1,68 \text{ років.}$$

Орієнтований термін окупності встановлення системи стабілізації напруги в контактній мережі становить до 2 років, за умови виявлення можливої поломки. Проте, як показує досвід експлуатації, сучасні силові елементи мають достатньо високі показники надійності.

7.4. Висновки до розділу 7

Системи тягового електропостачання, функціонуючи у складі комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем, повинні володіти спеціальними програмами, призначення яких полягає у розрахунку режимних показників з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії та у виконанні розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

Виконані оціночні техніко-економічні розрахунки показали, що модернізація системи обліку електричної енергії на основі розробленого пристрою вимірювання напруги постійного струму з бездротовою передачею даних має приведені витрати на 56,8 тис. грн. менші ніж для існуючих схемних рішень. В цілому застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі, маючі відносні капіталомісткі витрати, характеризується орієнтовним терміном окупності до 2 років.

Отримані в цьому розділі результати розробки інформаційного забезпечення для інтелектуалізації систем електропостачання електрифікованих залізниць опубліковано в роботах [7, 33, 36, 46].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна проблема підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованого залізничного транспорту за рахунок створення керуючої послідовності впливів, яка забезпечує оптимальний перерозподіл потоків потужності в системах тягового електропостачання, а також шляхом узгодження режимів взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають в такому.

1. У результаті виконаного у дисертації аналізу проблеми енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць встановлено, що наявний рівень технологічних втрат у системах тягового електропостачання для існуючих на сьогодні режимів електропостачання не задовольняє сучасним вимогам. У системах електричної тяги змінного струму, які характеризуються рівнем втрат 5-8 %, створюються умови для транзитних перетікань потужностей, які не правильно враховуються системою обліку та спричиняють додаткові витрати на закупівлю електроенергії. У системах постійного струму з рівнем втрат 14-17 % наявні відхилення напруги на струмоприймачах електрорухомого складу, які обмежують провізну і пропускну спроможності електрифікованих ділянок залізниць та, у цілому, ускладнюють виробничо-господарську діяльність.

2. Виконана в роботі формалізація дисипативного процесу виникнення втрат електроенергії в тяговій мережі у вигляді добутку адитивних функцій розподілу спаду напруги та струму в контактній мережі дозволяє врахувати керовані елементи в системах електричної тяги шляхом застосування принципу суперпозиції. Аналітичні вирази функції опору, які отримані в дисертації для всіх схем живлення тягової мережі, дозволяють в інженерній та науковій діяльності у спрощеній формі розраховувати миттєві схеми, а на практиці – розробити систему керування пунктами підсилення

тягової мережі шляхом використання формального підходу до просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання незалежно від схеми живлення та місцевих особливостей електрифікованих ділянок залізниць.

3. Заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму в існуючих методах розрахунку миттєвих схем вносить похибку більше 5 % в розрахунки режимних показників системи тягового електропостачання при значенні потужності, що реалізується, більше 8 МВт. Визначення струму тягового навантаження за допомогою запропонованого аналітичного виразу дозволяє виключити похибку, знизивши її до величини 4,7 %, та автоматизувати розрахунки параметрів режиму систем тягового електропостачання за наявності в системі електропостачання керованих пунктів підсилення.

4. У результаті комплексного дослідження, проведеного для тягових підстанцій електрифікованих залізниць, показано, що енергоефективність системи тягового електропостачання змінного струму проти системи постійного струму не повною мірою відповідає існуючим критеріям через наявні спотворення якості електроенергії, що складають: у частині несинусоїдності напруги – до 5,84 % проти 2,35 %; несиметрії напруги – до 2,95 % проти 0,82 %; коефіцієнта потужності – 0,7..0,8 проти 0,95..0,98; співвідношення складових неактивної до активної потужності в квадратурах – 50/50 % проти 10/90 %. Крім цього, система змінного струму допускає транзитні перетікання потужністю до 4 МВт за наявності кута зсуву фаз однойменних напруг в первинній мережі до 10 електричних градусів.

5. Встановлено, що при роботі випрямлячів у системі постійного струму за різних рівнів несиметрії живильної напруги спостерігається зміна співвідношення вищих гармонік та коефіцієнта потужності на виході випрямляча таким чином, що при несиметрії напруги до 6 % у фазі із заниженою напругою коефіцієнт потужності збільшується на 1 %, а у інших фазах – зменшується на 3-5 %.

6. Для електронних приладів обліку електроенергії в умовах, що відповідають реальному стану показників якості електроенергії тягових підстанцій постійного і змінного струму, при вимірюванні активної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням (0,5 %), а при вимірюванні реактивної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням (1,0 %) лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше 25 %.

7. Підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму досягається шляхом застосування розробленої системи стабілізації напруги, яка має розподілену систему синхронних вимірювань та обчислювальний комплекс, в якому за допомогою штучної нейронної мережі в режимі реального часу визначається керуюча послідовність впливів з подальшою передачею до підсилюючих пунктів на ділянці залізниці. Такий підхід дозволяє знизити втрати в тяговій мережі постійного струму з 14-17 % до 7-8,5 % від споживання електроенергії на тягу залежно від кількості поїздів, що одночасно перебувають на міжпідстанційній зоні.

8. У режимах електропостачання тяги залізниць змінного струму найбільший вплив на характер вирівнювальних струмів має поздовжня компенсація реактивної потужності, яку найбільш доцільно виконувати у відсмоктуючому фідері тягової підстанції. Методика визначення параметрів поздовжньої компенсації дозволяє перевести проблему транзитних перетікань у реактивну площину з подальшим застосуванням сучасних пристроїв поперечної компенсації (перетікання знижуються з 4 МВт до 100-160 кВт), тим самим виключаючи закупівлю надлишкової електроенергії для електрифікованих залізниць.

9. Розроблений програмний комплекс складає альтернативу існуючим засобам моделювання та розрахунку параметрів режиму систем тягового електропостачання та дозволяє визначати пропускну спроможність

електрифікованих ділянок, напруги на лімітуючих ділянках, втрати електроенергії, а також оцінювати технічні обмеження при підсиленні та оптимізації параметрів системи тягового електропостачання.

10. Удосконалені методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання за рахунок методики вибору потужності компенсуючих пристроїв для сторони змінної напруги тягових підстанцій постійного струму, за умови застосування статичних пристроїв компенсації, дозволяють знизити видатки на 250 тис. грн за рік, пов'язані з перетіканнями реактивної електроенергії.

11. Техніко-економічні розрахунки показали, що модернізація системи обліку електричної енергії на основі розробленого пристрою вимірювання напруги постійного струму з бездротовою передачею даних має приведені витрати на 56,8 тис. грн менші, ніж для існуючих схемних рішень. У цілому застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується орієнтовним терміном окупності до 2 років та щорічним ефектом при широкому впровадженні в розмірі 2-2,5 млн грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Механізми ефективного використання та розвитку потенціалу транспортно-дорожнього комплексу України. – К.: Національний інститут стратегічних досліджень, 2014. – 60 с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання (за роками 2005-2015) [Текст]. – К.: Укрзалізниця, 2006-2016.
3. Транспорт (1980-2015): Державна служба статистики України [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/tz/tz_rik/tz_u/ts_u.htm
4. Енергетичний баланс України (за роками 2007-2014): Державна служба статистики України [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2012/energ/en_bal/arh_2012.htm
5. Зменшення втрат електроенергії в лініях електропередач // Електронний журнал енергосервісної компанії «Екологіческие системы». – 2005. – № 5. – Режим доступу: http://www.journal.esco.co.ua/2005_5/art18.htm
6. Огляд ринку залізничних перевезень / Т. Гулик [Електрон. ресурс]. – Режим доступу: <http://www.credit-rating.ua/ua/analytics/analytical-articles/12826/>
7. Босий Д. О. Інтелектуальні системи в керуванні режимами систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць / Д. О. Босий // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 76-80.
8. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // The archives of transport. – 2015. – Vol. 35, Iss. 3. – P. 63–70.
9. Босый Д. А. Проблемы качества электроснабжения промышленных потребителей от обмотки среднего напряжения тяговых подстанций переменного тока / Д. А. Босый // Problemy Kolejnictwa. – 2014. – Zeszyt 162. – С. 21-32.
10. Сыченко В. Г. Качество использования электроэнергии в системах электрической тяги / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4(48). – С. 143-149.
11. Bosiy D. O. Calculation of the traction power supply systems using the functions of resistance / D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Problemy kolejnictwa. – 2015. – Vol. 59, Issue 168. – P. 7-14.
12. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий // Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна / Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс». – Дніпропетровськ, 2015. – 344 с. – ISBN 978-966-97463-8-2.
13. Сиченко В. Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 58-63.

14. Босий Д. О. Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Східно – Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 35-39.

15. Кузнецов В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников, Д. А. Босий // Технічна електродинаміка. Темат. вип. – 2012. – С. 107-110.

16. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямым способом / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 42. – С. 103-109.

17. Кузнецов В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Босий Д. А. // Праці інституту електродинаміки. – 2012. – Вип. 33. – С. 18-22.

18. Босий Д. О. Особливості роботи електронних лічильників у несинусоїдних режимах тягових підстанцій електричного транспорту / Д. О. Босий // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 9 (115). – С. 29-37.

19. Bosiy D. O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D. O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 4 (46). – С. 30-37.

20. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий, Д. Р. Земський // Східно-Європейський журнал передових технологій. Энергосберегающие технологии и оборудование. – 2014. – № 2/8 (68). – С. 52-57.

21. Сыченко В. Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом / В. Г. Сыченко, Д. А. Босий, Е. Н. Косарев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – Сп. вип., том 2. – С. 8-18.

22. Босий Д. О. Облік електроенергії сучасними електронними лічильниками в умовах гармонійних спотворень / Д. О. Босий, О. М. Синьогіна // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 98-106.

23. Босий Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності / Д. О. Босий // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 15-25.

24. Босий Д. О. Методика розрахунку оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності тягових підстанцій постійного струму / Д. О. Босий // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2014. – № 93. – С. 33-37.

25. Босий Д. О. Застосування миттєвих характеристик до аналізу електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання змінного струму / Д. О. Босий // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 94. – С. 37-42.

26. Босий Д. О. Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності / Д. О. Босий // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 2. – С. 95-103.

27. Босий Д. О. Просторово-часова модель системи тягового електропостачання / Д. О. Босий // Вісник НТУ ХП. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2015. – №19 (1128). – С. 139-151.

28. Босий Д. А. Учет потерь электроэнергии в системах тягового электро-снабжения / Д. А. Босый // Вісник НТУ ХП. – 2015. – №. 12 (1121). – С. 270-273.

29. Сиченко В. Г. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, Є. М. Косарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 95-103.

30. Саблін О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73-79.

31. Босий Д. О. Стан та перспективи розвитку енергетичної інфраструктури залізниць України / Д. О. Босий // Українська залізниця. – 2016. – № 9 (39). – С. 58-62.

32. Босий Д. О. Взаємодія систем тягового з системами зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 95. – С. 9-15.

33. Комп'ютерна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48202 / Калашников К.О., Кузнецов В.Г., Босий Д. О.; Україна / Зареєстровано 05.03.2013. – К.: ДСІВУ, 5-3-2013.

34. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних: Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20 / Босий Д. О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201408019; заявл. 16.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 3 с.

35. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму: Пат. 98483 Україна, МПК H02J 1/00, H02J 13/00 / Сиченко В. Г., Босий Д. О., Косарев Є. М.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201412905; заявл. 02.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. – 3 с.

36. Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport): Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60711 / Босий Д. О., Косарев Є. М.; Україна / Зареєстровано 20.07.2015. – К.: ДСІВУ, 20-07-2015.

37. Логвінова Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях

// Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2012. – Вип. 42. – С. 110-113.

38. Bosiy D. O. Power quality complex estimation at AC traction substations / D. O. Bosiy // XI International Scientific Conference Modern Electric Traction (MET'2013), Warsaw, October 10-12 2013, p. 147-151.

39. Кузнецов В. Г. Управління транспортним потоком для зменшення експлуатаційних витрат електрифікованих залізниць / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, К. О. Калашников // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 71-79.

40. Босий Д. О. Управління графіком руху поїздів для зменшення експлуатаційних витрат електрифікованих залізниць / Д. О. Босий, К. О. Калашников // Українські залізниці. – 2014. – № 4 (10). – С. 46-51.

41. Гончаров Ю.П. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии / Ю.П. Гончаров, В.Г. Сыченко, Д. А. Босый и др. // Problemy Kolejnictwa. – 2014. – Zeszyt 162. – С. 65-82.

42. Босий Д. О. Інтелектуальні системи в керуванні режимами систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць / Д. О. Босий // Матеріали Четвертої міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» 09.06-12.06.2015, м. Київ, с. 239-241.

43. Босий Д. О. Оптимізація потужності підсилюючих пунктів для живлення тягової мережі високошвидкісних магістралей / Д. О. Босий, О. А. Запара // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015», 29.09 – 02.10.2015, м. Одеса, с. 29-30.

44. Босий Д. О. Проблеми забезпечення режиму напруги на струмоприймачі електрорухомого складу на ділянках зі складним профілем гірської місцевості / Д. О. Босий, Є. М. Косарев, А. І. Барна // III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ-2015, 14.10 – 15.10.2015, м. Вінниця, с. 11.

45. Bosiy D. O. Control the traction power supply with the intelligent systems / D. O. Bosiy // IV International Conference Advanced Rail Technologies ART-2015, 18.11–19.11.2015, Warszawa, Poland, p. 27.

46. Босый Д. А. Усовершенствование имитационных средств моделирования систем тягового электроснабжения / Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», 19–20.11.2015, г. Хабаровск, ДВГУПС. – С. 64-70.

47. Босый Д. А. Управление режимами систем тягового электроснабжения с помощью интеллектуальных систем / Д. А. Босый // VII Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте», 26.11-27.11.2015, г. Гомель, Беларусь, с. 16.

48. Кирилюк Т. І. Визначення коефіцієнту налаштування лічильника втрат в загальному виді / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Матеріали VI Міжнародної

науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро-2012», 25-28.09.2012, Дніпропетровськ, 2012. – С. 25-26.

49. Bosiy D. O. The problems of power supply industrial consumers from medium-voltage winding of AC traction substations / D. O. Bosiy // *Miedzynarodowa Konferencja Naukowa Niewzawodnosc w transporcie szynowym i mozliwosci jej zwiakszania*, 20-21.11.2013, Warszawa, 2013. – S. 55.

50. Босий Д. О. Дослідження ступінчастої компенсації реактивної потужності на фізичному макетів / Д. О. Босий, А. С. Дем'яненко // *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, 11-14.06.2013, Дніпропетровськ, 2013. – С. 10.

51. Кузнецов В. Г. Схемна реалізація пристрою для вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // *II Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ-2013*, 22-24.11.2013, Вінниця, 2013. – С. 51.

52. Босий Д. О. Система розподіленого вимірювання рівня напруги електрифікованих ділянок постійного струму / Д. О. Босий // *Тези доповідей 74 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 15-16.05.2014, Дніпропетровськ, 2014. – С. 151-152.

53. Босий Д. О. Стабілізація напруги на струмоприймачеві електрорухомого складу високошвидкісних магістралей постійного струму / Д. О. Босий, А. А. Сидоров // *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро-2014»*, 23-26.10.2014, Одеса-Дніпропетровськ, 2014. – С. 14-15.

54. Кравчук С. Л. Комплексні дослідження процесів електроспоживання на тягових підстанціях Південної залізниці / С. Л. Кравчук, В. М. Козачок, Д. О. Босий // *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, 11-13.06.2014, Воловець, 2014. – С. 82.

55. Сиченко В. Г. Проблема перетоків електроенергії між тяговими підстанціями змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, С. М. Міщенко // *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, 11-13.06.2014, Воловець, 2014. – С. 137-138.

56. Босий Д. О. Удосконалення режиму напруги тягової підстанції змінного струму при транзиті потужності тяговою мережею / Д. О. Босий, С. М. Міщенко, О. В. Шама // *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, 10-13.06.2015, Дніпропетровськ, 2015. – С. 31.

57. Земський Д. Р. Дослідження порушення енергетичного обміну між випрямним агрегатом тягової підстанції та живлячою мережею / Д. Р. Земський, Д. О. Босий // *Матеріали VI Міжнародної науково-практичної*

конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», 10-13.06.2015, Дніпропетровськ, 2015. – С. 53.

58. Стогній, Б. С. Аналіз світового досвіду та перспектив побудови інтелектуальних енергетичних систем в Україні / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Енергетика та Електрифікація. – 2013. – № 12. – С. 47–50.

59. Стогній, Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–67.

60. Стогній, Б. С. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 1. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 5–20.

61. European Technology Platform – Smartgrids, April 2010: Strategic Deployment document for Europe’s Electricity Networks of the Future.

62. Grid 2030: A National Version for Electricity’s Second 100 Years // Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy, July 2003.

63. Денисюк С. П. Активний споживач електроенергії. Проблеми та перспективи його функціонування в Україні / С. П. Денисюк, Т. М. Базюк // Енергетика та електрифікація. – 2013. – № 11. – С. 38-42.

64. Kyrylenko O. V. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity grid with DG i Ukraine based on IEEE standards / O. V. Kyrylenko, R. Strzelecki, S. P. Denysiuk // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 46-50.

65. Праховник А. В. Принципи організації взаємодії компонент Смарт мереж / А. В. Праховник, С. П. Денисюк, О. В. Коцар // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 51-52.

66. Жуйков В. Я. Силовая электроника в Смарт-сетях / В. Я. Жуйков // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 49-50.

67. Кириленко О. В. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах / О. В. Кириленко, І. В. Блінов, С. Є. Танкевич // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 47-48.

68. Жаркін А. Ф. Науково-технічні аспекти інтеграції ОЕС України до об’єднання енергосистем європейських держав ENTSO-E / А. Ф. Жаркін, В. В. Павловський, Л. М. Лук’яненко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 25-27.

69. Стогній Б. С. Підвищення пропускної здатності «слабких» перетинів енергосистем з використанням технології гнучкої передачі змінним струмом (ГПЗС, FACTS) / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, В. В. Павловський, А. В. Левконюк // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 63-687.

70. Ситников В. Ф. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью / В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев // Электричество. – 2012. – № 3. – С. 2-7.

71. Вариводов В. Н. Интеллектуальные электроэнергетические системы / В. Н. Вариводов, Ю. А. Коваленко // Электричество. – 2011. – № 9. – С. 4-9.
72. EPRI's IntelliGridSM initiative: <http://intelligrid.epri.com>
73. The Modern Grid Initiative Version 2.0, Conducted by the National Energy Technology Reliability, January 2007:
<http://www.netl.doe.gov/moderngrid/resources.html>
74. Grid Wise Architectural Council : <http://www.gridwiseac.org>
75. Стогній Б. С. Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу / Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 1. – С. 62-69.
76. Кириленко О. В. Системи підтримки прийняття рішень оперативним персоналом електроенергетичних об'єктів / О. В. Кириленко, О. Ф. Буткевич, Л. М. Лук'яненко, Є. В. Парус // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 59-65.
77. Никифоров И. К. Альтернативные принципы управления в электроэнергетике на основе синергетического подхода / И. К. Никифоров // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 15-18.
78. Глазунова А. М. Критерии и методы расстановки РМУ при оценивании состояния электроэнергетической системы и расчете установившегося режима / А. М. Глазунова, И. Н. Колосок, Е. С. Коркина // Электричество. – 2010. – № 9. – С. 16-24.
79. Соколов В. К. Задачи оперативной оптимизации производства электроэнергии в условиях рыночных отношений / В. К. Соколов, А. А. Прейгель, В. Г. Васильев // Электричество. – 2007. – № 1. – С. 2-9.
80. Петрушенко О. Ю. Розв'язання двоїстої задачі оптимального керування нормальними режимами ЕЕС з застосуванням нейро-нечіткого моделювання / О. Ю. Петрушенко, Ю. В. Петрушенко, О. О. Рубаненко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 36-37.
81. Маругин В. И. Оценивание режимных параметров распределительных электрических сетей в вероятностной форме / В. И. Маругин, Пейзель В. М., А. С. Степанов // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 1. – С. 58-60.
82. Стогний Б. С. Проблемно-ориентированный мониторинг режимов энергообъединения / Б. С. Стогний, А. Ф. Буткевич, Е. В. Зорин, А. В. Левконюк, В. В. Чижевский // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 52-59.
83. Файзрахманов Р. А. Распознавание режимов работы распределенных потребителей электроэнергии с помощью адаптивной фильтрации // Р. А. Файзрахманов, Р. Р. Бакунов // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 36-39.
84. Карташев И. И. Способы и средства управления режимами электроэнергетических систем и качеством электроэнергии / И. И. Карташев, Ю. П. Рыжов // Электричество. – 2007. – №9. – С. 20-25.
85. Фролов В. И. Применение адаптивных систем управления для оптимизации текущих режимов электрических сетей энергосистем / В. И. Фролов // Электричество. – 2012. – №12. – С. 2-13.

86. Каргин А. А. Нечеткие модели в задачах ситуационного управления / А. А. Каргин, Т. Г. Петренко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 66-69.

87. Карташев И. И. Системный подход к управлению качеством электрической энергии / И. И. Карташев, Д. С. Подольский // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 2-7.

88. Буткевич О. Ф. Штучний інтелект та гібридні системи у розв'язанні задач електроенергетики: поточний стан та тенденції / О. Ф. Буткевич, В. В. Павловський // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2003. – № 1. – С. 109-117.

89. Джагаров Н. Ф. Управление продольным компенсатором для демфирования колебаний в ЭЭС / Н. Ф. Джагаров, Ж. Г. Гроздев // Электричество. – 2008. – № 10. – С. 25-30.

90. Шидловский А. К. Регулируемые статические источники реактивной мощности / А. К. Шидловский, В. С. Федий // Электричество. – 2009. – № 1. – С. 15-20.

91. Беляев А. Н. О применении устройств управляемой поперечной компенсации для транзитных электропередач класса 500 кВ / А. Н. Беляев, Г. А. Евдокунин, С. В. Смолвик, В. С. Чудный // Электричество. – 2009. – № 2. – С. 2-13.

92. Довгун В. П. Адаптивные алгоритмы управления характеристиками активных фильтрокомпенсирующих устройств / В. П. Довгун, С. А. Темербаев // Электричество. – 2012. – № 11. – С. 32-38.

93. Брянцев А. М. Регулирование и стабилизация напряжения высоковольтной электрической сети управляемыми источниками реактивной мощности индуктивно-емкостного типа / А. М. Брянцев, Б. И. Базылев, А. И. Лурье, С. В. Смолвик // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 15-21.

94. Брянцев А. М. Компенсаторы реактивной мощности для регулирования и стабилизации напряжения высоковольтной электрической сети / А. М. Брянцев, Б. И. Базылев, А. И. Лурье и др. // Электротехника. – 2013. – № 2. – С. 2-10.

95. Карымов Р. Р. Потери активной мощности в источниках реактивной мощности на базе управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов / Р. Р. Карымов, Б. В. Олексюк, Д. Х. Сафиуллин // Электротехника. – 2012. – № 10. – С. 15-18.

96. Ромодин А. В. Преобразование реактивной мощности в трехобмоточном трансформаторе с емкостной компенсацией / А. В. Ромодин, М. И. Кузнецов // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 2-6.

97. Білоха Д. О. Метод побудови вимірювача реактивного струму для швидкодіючого тиристорного компенсатора / Д. О. Білоха // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 1. – С. 31-35.

98. Чаплыгин Е. Е. Применение активных источников реактивной мощности для перераспределения потоков энергии в электрических сетях / Е. Е. Чаплыгин, М. Г. Асташев, К. В. Расули // Электротехника. – 2013. – № 12. – С. 19-25.

99. Терешкевич Л. Б. Дослідження впливу компенсувальних установок на додаткові втрати активної потужності від несиметрії режиму / Л. Б. Терешкевич, Т. М. Червінська, І. О. Бандура // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 4. – С. 50-54.
100. Сиротин Ю. А. Оптимальная компенсация пульсаций при несимметричном напряжении / Ю. А. Сиротин // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 3. – С. 73-80.
101. Нос О. В. Анализ трехфазных систем компенсации мгновенной неэффективной мощности в кватернионном базисе / О. В. Нос, В. В. Панкратов // Электромеханика. Известия вузов. – 2013. – № 6. – С. 3-8.
102. Бурбело М. Й. Алгоритм керування симетрувальними пристроями за багатократною несиметрією в розподільних мережах / М. Й. Бурбело, М. В. Девятко, Ю. П. Войтюк // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 6. – С. 58-60.
103. Боровиков Ю. С. Принципы построения средств моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем / Ю. С. Боровиков, А. С. Гусев, А. О. Сулайманов // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 10-13.
104. Труфанов В. В. Оптимизация развития системообразующей электрической сети с использованием структурного анализа электроэнергетических систем / В. В. Труфанов, И. Ю. Усов, О. М. Попова // Электричество. – 2010. – № 9. – С. 10-15.
105. Гамм А. З. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы / А. З. Гамм, А. М. Глазунова, Ю. А. Гришин, И. Н. Колосок, Е. С. Коркина // Электричество. – 2009. – № 6. – С. 2-9.
106. Беляев Н. А. Исследование методов оптимизации режимов работы энергосистем / Н. А. Беляев, Н. В. Коровкин, О. В. Фролов, В. С. Чудный // Электротехника. – 2013. – № 2. – С. 21-29.
107. Шакарян Ю. Г. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач / Ю. Г. Шакарян, В. К. Фокин, А. П. Лихачев // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 2-13.
108. Толстихина Е. А. Многоцелевая вероятностная коррекция режима электрической сети на множестве Парето / Е. А. Толстихина, Л. В. Толстихина // Электричество. – 2013. – № 6. – С. 13-18.
109. Беляев А. Н. Робастный адаптивный регулятор для демпфирования межрайонных колебаний в электроэнергетической системе / А. Н. Беляев, И. Б. Ядыкин, С. В. Смолвик и др. // Электричество. – 2011. – № 6. – С. 2-10.
110. Аюев Б. И. Оптимизационные вычислительные модели предельных режимов электрических систем для заданного направления утяжеления / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин // Электричество. – 2010. – № 12. – С. 2-7.
111. Ахметбаев Д. С. Метод расчета установившихся режимов электрических сетей на основе коэффициентов токораспределения / Д. С. Ахметбаев // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 23-27.

112. Аюев Б. И. Оптимизационная модель предельных режимов электрических систем / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 2-12.

113. Воропай Н. И. Анализ режимов электроэнергетических систем и управление ими в исследованиях СЭИ–ИСЭМ / Н. И. Воропай // Электричество. – 2010. – № 9. – С. 2-8.

114. Бат-Ундрал Б. Расчет режимов радиальной электрической сети интервальным методом / Б. Бат-Ундрал, Н. И. Воропай // Электричество. – 2008. – № 10. – С. 65-66.

115. Глазунова А. М. Применение метода оценивания состояния для вычисления предельных режимов электроэнергетической системы / А. М. Глазунова // Электричество. – 2013. – № 10. – С.23-29.

116. Боровиков Ю. С. Концепция адекватного моделирования интеллектуальных энергосистем / Ю. С. Боровиков // Электромеханика. Известия вузов. – 2011. – № 6. – С. 86-91.

117. Кононов Ю. Г. Перспективы моделирования несинусоидальных режимов электрических сетей по данным синхронных измерений в интеллектуальных сетях / Ю. Г. Кононов, Е. Г. Зеленский, М. В. Жуков // Электромеханика. Известия вузов. – 2012. – № 26. – С. 12-17.

118. Седов А. В. Распознавание типов графиков электрической нагрузки с использованием самоорганизующихся карт / А. В. Седов // Электромеханика. Известия вузов. – 2012. – № 2. – С. 63-65.

119. Петроченков А. Б. Полунатурное моделирование активно-адаптивной электрической сети / А. Б. Петроченков, Т. Франк, А. В. Ромодин, А. В. Кычкин // Электротехника. – 2013. – № 11. – С.57-62.

120. Боровиков Ю. С. Информационно-управляющая система мульти-процессорного комплекса моделирования в реальном времени энергосистем / Ю. С. Боровиков, А. О. Сулайманов // Электротехника. – 2013. – № 5. – С. 56-63.

121. Лихачев А. П. Разработка моделей энергосистем с учетом гибких электропередач / А. П. Лихачев // Электричество. – 2013. – № 2. – С. 11-20.

122. Гусейнов А. М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах / А. М. Гусейнов, Ф. Ш. Ибрагимов // Электричество. – 2012. – № 5. – С. 10-17.

123. Гусейнов А. М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся и переходных режимов в сложных электроэнергетических системах / А. М. Гусейнов, Ф. Ш. Ибрагимов // Электричество. – 2012. – № 7. – С. 23-34.

124. Аюев Б. И. Анализ эффективности вычислительных моделей расчета установившихся режимов электрических систем / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, В. Г. Неуймин // Электричество. – 2008. – № 8. – С. 2-14.

125. Лежнюк П. Д. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / П. Д.

Лежнюк, В. В. Кулик, Д. И. Оболонский // Электричество. – 2007. – № 11. – С. 2-8.

126. Лежнюк П. Д. Оптимізація розподілу навантаження між розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, О. В. Нікіторович, В. В. Нетребський / Технічна електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 38-39.

127. Шидловский А. К. Энергетические характеристики электромагнитной совместимости цепей / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов, И. В. Мостовяк // Техническая электродинамика. – 1985. – № 4. – С. 3-8.

128. Харлов Н. Н. Энергетическое обследование несинусоидальных режимов многопроводных линий электропередачи / Н. Н. Харлов, В. С. Боровиков, В. В. Литвак и др. // Электричество. – 2011. – № 12. – С. 12-15.

129. Кузнецов В. Г. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах / В. Г. Кузнецов, О. Г. Шполянський, Н. А. Яремчук // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 3. – С. 46-52.

130. Денисюк С. П. Оцінка точності вимірювання складових електроенергії в системах з перетворювачами електроенергії / С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2008. – Темат. вип. – С. 61-66.

131. Васильченко В. І. Автоматизована система обліку електричної енергії з контролем показників якості / В. І. Васильченко, О. Г. Гриб, О. Д. Светелик, Ю. Ф. Тесик // Енергетика та електрифікація. – 2013. – № 11. – С. 55-56.

132. Сиротин Ю. А. Векторная мгновенная мощность и энергетические режимы трехфазных цепей / Ю. А. Сиротин // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 57-65.

133. Розанов Ю. К. О мощностях в цепях переменного и постоянного токов / Ю. К. Розанов // Электричество. – 2009. – № 4. – С. 33-36.

134. Цицикян Г. Н. Полная мощность и коэффициент мощности в трехфазной системе / Г. Н. Цицикян // Электричество. – 2010. – № 7. – С. 49-54.

135. Цицикян Г. Н. Полная мощность трехфазной системы и стандарт IEEE 1459-2010 / Г. Н. Цицикян // Электричество. – 2012. – № 9. – С. 65-69.

136. Цицикян Г. Н. Коэффициент мощности трехфазных приемников, соединенных по схемам звезды и треугольника / Г. Н. Цицикян, А. Н. Казначеев // Электричество. – 2011. – № 11. – С. 48-53.

137. Цицикян Г. Н. О методе преобразований для нахождения компенсирующих токов в трехфазной системе / Г. Н. Цицикян // Электричество. – 2009. – № 5. – С. 8-13.

138. Тонкаль, В. Е. Баланс энергии в электрических цепях [Текст] / В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк. – К.: Наук. Думка, 1992. – 312 с.

139. Сиченко, В. Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту [Текст]: дис. ... док. техн. наук: 05.22.09 / В. Г. Сиченко // Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – 396 с.

140. Сиченко, В. Г. Показники якості електроживлення у тягових мережах постійного струму [Текст] : зб. наук. праць/ В. Г. Сиченко // Праці інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спец. випуск, Частина 2. Київ, 2011. – С. 5–13.

141. Жемеров, Г. Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности [Текст] / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Електротехніка і Електромеханіка. – 2007. – Вип. 7. – С. 63–65.

142. Кизилов, В. У. К вопросу о физическом смысле реактивного тока и реактивной мощности [Текст] / В. У. Кизилов // Вестник НТУ ХПИ. Сборник научных трудов. Тем. выпуск. Энергетика и преобразовательная техника. – 2002. – Вып. 9, Т. 3. – С. 44–50.

143. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 459 с.

144. Akagi, H. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [Text] / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1984. – Vol. 20. – P. 625–630.

145. Kim, H. S. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory [Text] / H. S. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, L. Choi // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, № 5. – P. 701–710.

146. Сербиненко, Д. В. Качество электрической энергии и степень взаимного влияния тяговых подстанций железных дорог постоянного тока и системы внешнего электроснабжения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д. В. Сербиненко. – М.: РГБ, 2006. – 195 с.

147. Барковский, Б. С. Обобщение теории мостовых схем выпрямления и выбор оптимальной [Текст]: сб. науч. тр. / Б. С. Барковский, Е. Ю. Салита // Повышение качества электрической энергии на тяговых подстанциях. – ОмИИТ, 1983. – С. 15–21.

148. Глинтерник, С. Р. Электромагнитная совместимость мощных вентильных преобразователи и электрических сетей [Текст] / С. Р. Глинтерник // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 1–4.

149. Барковский, Б. С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко и др.; под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.

150. Руденко, В. С. Анализ электромагнитных процессов в статических преобразователях методом эквивалентного источника [Текст] / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. Я. Жуйков // Проблемы технической электродинамики. – 1973. – Вып. 41. – С. 10–14.

151. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

152. Костин, Н. А. Реактивная мощность в устройствах систем электрической тяги / Н. А. Костин // Вісник Дніпропетровського

національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 34. – С. 73-76.

153. Міщенко Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2012. – Вип. 41. - С. 86-91.

154. Косарев Б. И. Определение параметров устройств электрической тяги по временным характеристикам / Б. И. Косарев, С. В. Ключников, А. В. Фролов, А. И. Щуров // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 3. – С. 15-17.

155. Косарев Б. И. Активные и обменные характеристики электрических цепей при несинусоидальных токах и напряжениях / Б. И. Косарев, А. И. Щуров, А. В. Фролов, В. Н. Силкин // Электричество. – 1989. – № 9. – С. 43-47.

156. Волынцев В. В. Машинный метод прямого синтеза нелинейных двухполюсников по временным характеристикам тока и напряжения / В. В. Волынцев, А. Б. Косарев // Электротехника. – 2011. – № 8. – С. 37-41.

157. Использование мгновенных характеристик электрических цепей при исследовании пассивных двухполюсников: Методические указания по дисциплинам Теоретические основы электротехники и Основы теории электрических цепей / Сост. Б. И. Косарев, Т. К. Асанов, В. Н. Силкин, и др. – М.: МИИТ, 1990. – 28 с.

158. Босий Д. О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д. О. Босий, В. Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичн. вип. – 2009. – Ч. 3. – С. 86-89.

159. Босий Д. О. Підвищення ефективності електропостачання системи електричної тяги змінного струму [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Д. О. Босий // Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – 165 с.

160. Решение задач энергоснабжения на электронных машинах [Текст] / Р. И. Мирошниченко, Н. Я. Пузанов, М. Б. Улановский, Д. А. Палей, М. С. Гочуа. – М.: Транспорт, 1971. – 168 с.

161. Босий, Д. О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму [Текст] / Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2008. - Вип. 24. - С. 49-54.

162. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 1. – 456 с.

163. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. – Т. 2. – 364 с.

164. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст] / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.
165. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 82-87.
166. Сиченко В. Г. Voltage quality on traction load buses of DC substations / В. Г. Сиченко // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 58-63.
167. Сиченко, В. Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму / В. Г. Сиченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д., 2011. – Вип. 38. – С. 110-113.
168. Крюков А. В. Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин // Транспорт Российской Федерации, 2010. – № 3 (28). – С. 61-65.
169. Герман Л. А. Сравнение методов расчета системы тягового электроснабжения при разных способах учета параметров внешней сети / Л. А. Герман, К. В. Кишкурно // Вестник ВНИИЖТ, 2013. – № 1. – С. 16-21.
170. Бобирь Д. В. Удосконалення режимів ведення вантажного поїзда з електричною тягою: авт. дис. к. т. н. / Д. В. Бобирь. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007. – 22 с.
171. Иванов О. П. Удосконалення режимів тяги поїздів за вартісними показниками при змінних тарифах на електроенергію: авт. дис. к. т. н. / О. П. Иванов. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2013. – 24 с.
172. Кузнецов В. Г. Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму: авт. дис. д. т. н. / В. Г. Кузнецов. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2012. – 38 с.
173. Кузнецов В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мыцко, Д. А. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006. – Вип. 12. – С. 36-40.
174. Калашников К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень: авт. дис. к. т. н. / К. О. Калашников. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – 20 с.
175. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
176. Бурков А. Т. Методы расчета систем тягового электроснабжения железных дорог / А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, С. Е. Кузин, Э. П. Селедцов, В. Г. Каратеев; Ленинград, 1985. – 74 с.
177. Марикин, А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока: Автореф. дис. д-ра техн. наук. 05.22.07 / А. Н. Марикин. – Санкт-Петербург, 2008. – 36 с.

178. Тер-Оганов Э. В. Электроснабжение железных дорог: учебник для студентов университета (УрГУПС) / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин // Екатеринбург: УрГУПС, 2014. – 432 с.

179. G. Hofmann et al. Elektrische Bahnen, 1995, № 3, S. 73-78 (русс, пер.: Моделирование и расчет сетей тягового электроснабжения // Железные дороги мира, 1998, № 8, с. 44-49).

180. H. Chen, G. Geng, Q. Jiang Power flow algorithm for traction power supply system of electric railway based on locomotive and network coupling. Automation of Electric Power Systems 36(3): pp 76-80. – 2012.

181. Косарев С. М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / С. М. Косарев // Електрифікація транспорту, 2015. – № 9. – С. 37-43.

182. Розробка і дослідні випробування пристрою для організації оптимального ведення поїзда машиністом / Звіт з науково-дослідної роботи, за дог. № 15/02-СНЦ-ПР/НТО(Т)-02-4/НЮ-291 від 26.03.02, Дніпропетровськ, 2004. – 65 с.

183. Косяков А.А. Оценка возможности применения методологии интеллектуальных электрических сетей в системах электроснабжения железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 2. – С. 34-38.

184. Стасюк О.І. Методи організації інтелектуальних електричних мереж залізниць на основі концепції SMART Grid/ О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова, В.Ф. Максимчук // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – № 2. – С. 29-37.

185. Аржанников Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2012. – 207 с.

186. Гончаров Ю.П. Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей / Ю.П. Гончаров, Е.И. Сокол, В.В. Замаруев // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2015. – № 30. – С. 200-211.

187. Сыченко В.Г. Алгоритмы управления режимом напряжения на тяговых подстанциях постоянного тока // Депонировано в ГПНТБ Украины 13.12.99 г. № 329 – Ук 99, 18 с.

188. Стасюк О. І. Методи комп'ютерної інтелектуалізації режимів функціонування тягових мереж залізниць / О. І. Стасюк, Л. Л. Гончарова, В. Ф. Максимчук, Г. М. Голуб // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 5. – С. 29-35.

189. Боднар, Б. Е. О несравнимых вариантах в задаче тяговых расчетов / Б.Е. Боднар, А.А. Босов, Д.В. Бобырь // Вісник ДНУЗТ. - Д., 2006. - Вип. 12. - С. 57-59.

190. Герман Л. А. Продольная емкостная компенсация в системе тягового электроснабжения переменного тока / Л. А. Герман // Железные дороги мира. – 2007. – № 11. – С. 53-58.

191. Зажирко В. Н. Влияние фильтрующих цепей компенсирующих устройств на режимы тяговых и питающих сетей / В. Н. Зажирко, Г. В. Коробков // Вестник инженеров-электромехаников железнодорожного транспорта. – 2003. – № 1. – С. 142-146.

192. Назаров О. Н. Научное обеспечение разработки нормативной базы и технологических решений для высокоскоростного движения в России / О. Н. Назаров, Д. Е. Кирюшин // Электрификация транспорта. – 2014. – № 7. – С. 39-45.

193. Юрченко К. И. Расчет энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования / К. И. Юрченко // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 78-82.

194. Лукьянов П. Ю. Математические модели контактной сети и рельсовых цепей / П. Ю. Лукьянов // Электричество. – 2008. – № 10. – С. 40-45.

195. Мамошин Р. Р. Влияние поперечной емкостной компенсации на электромагнитные процессы в тяговой сети переменного тока / Р. Р. Мамошин, А. П. Милютин, А. В. Фролов, А. И. Щуров // Электричество. – 1984. – № 5. – С. 9-12.

196. Щуров А. И. Метод прямого синтеза электрических цепей по их обменным характеристикам / А. И. Щуров, А. Б. Косарев // Вестник ВНИИЖТ. – 1995. – № 2. – С. 26-28.

197. Завгородний А. В. Сравнительный анализ методов расчета импеданса линий электрифицированных железных дорог / А. В. Завгородний // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 2. – С. 49-53.

198. Ермоленко Д. В. Улучшение электромагнитного взаимодействия тиристорного электроподвижного состава и системы тягового электроснабжения / Д. В. Ермоленко, И. В. Павлов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 8. – С. 25-30.

199. Малинин Л. И. К расчету интегральных характеристик тока и момента тягового электропривода с контактной сетью / Л. И. Малинин, В. Ю. Нейман // Электричество. – 2012. – № 10. – С. 53-58.

200. Лобынцев В. В. Система тягового электроснабжения постоянного тока с использованием сверхпроводящего кабеля / В. В. Лобынцев, В. Н. Пупынин // Электричество. – 2007. – № 2. – С. 20-22.

201. Зиновьев Г. С. Пути модернизации систем электроснабжения и электрооборудования высоковольтных электровозов постоянного напряжения / Г. С. Зиновьев, С. И. Сальва // Электромеханика. Известия вузов. – 2012. – № 6. – С. 83-87.

202. Панасенко Н. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров и др. // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 4. – С. 76-80.

203. Крюков А. В. Свойства и характеристики систем распределенной генерации для электроэнергетики железнодорожного транспорта / А. В.

Крюков, В. П. Закарюкин, М. О. Арсентьев // Энергосбережение: технологии, приборы, оборудование. Сборник научных трудов. – Иркутск: ИрГупс, 2009. – С. 6-23.

204. Добрусин Л. А. Проблемы энергоэффективности и энергосбережения в России [Текст]: информационно-аналитический обзор. Ч. 3. Тенденции применения фазопоротных трансформаторов в электроэнергетике / Л. А. Добрусин // Силовая электроника. – 2012. – № 4. – С. 60-66.

205. Герман Л. А. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог / Л. А. Герман, А. С. Серебряков. – М.: МИИТ, 2012. – 211 с.

206. Бородулин Б. М. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог [Текст] / Б. М. Бородулин, Л. А. Герман, Г. А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.

207. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.

208. Кондратьев Ю. В. Совершенствование условий согласования систем внешнего и тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока [Текст]: дис. канд. техн. наук. – Омск: ОмГУПС, 2006. – 164 с.

209. Босий Д.О. Оптимізація керування регульованою компенсацією реактивної потужності на тягових підстанціях змінного струму / Д.О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 1. – С. 24-32.

210. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затв.: Наказ Міністерства палива та енергетики України 17.01.2002, № 19 [Текст] / Мін-во палива та енергетики України. – К., 2002. – 14 с.

211. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы: Под общ. ред. акад. НАН Украины А. В. Кириленко / Ин-т Электродинамики НАН Украины. – К., 2014. – 408 с. – ISBN 978-966-02-7207-1

212. Ekanayake Ja. Smart Grid technology and applications / Ja. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, N. Jenkins. John Wiley & Sons, Ltd., 2012, 293 p. – ISBN 978-0-470-97409-4.

213. Скалозуб В. В. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковицкий, К. В. Гончаров. – Д. : Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. – 207 с.

214. Rojek A. Zasilanie trakcji elektrycznej w systemie prądu stałego 3 kV / A. Rojek. – Warszawa: KOW media&marketing Sp. z o.o., 2012. – 247 s. – ISBN 978-83-933737-3-4

215. Siczenko W. G. Badanie liczników różnych typów pod nieźrównowazonym obciążeniu / W. G. Siczenko, O. P. Koszmaк // Infrastruktura transportu. – 2013. – № 1. – P. 46-48.

216. Гуртовцев, А. Электронные счетчики. Доверять или проверять? / А. Гуртовцев, В. Бордаев, В. Чижонко // Электронный журнал «Новости Электротехники». – 2005. – № 1(31), 2(32).

217. Тубинис, В. В. Европа принимает общие технические требования к приборам учета топливных энергетических ресурсов / В. В. Тубинис, О. В. Балашов // Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность. – 2005. – № 1. – С. 47-51.

218. ДСТУ 2708:2006. Перевірка засобів вимірювальної техніки. Організація та порядок проведення.

219. Паливно-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень / А. К. Шидловський, Б. С. Стогній, М. М. Кулик та ін. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2004. – 468.

220. Почаевец Э. С. Обобщенные методы анализа режимов системы тягового электроснабжения: учебн. пособие для вузов / Э. С. Почаевец. – Днепропетровск, 1981. – 55 с.

221. Почаевец Э. С. Расчет системы тягового электроснабжения: метод. указания к курс. и дипл. проект. Ч. 1. / Э. С. Почаевец. – Днепропетровск, 1982. – 32 с.

222. Почаевец Э. С. Выбор основных параметров тягового электроснабжения: учебн. пособие для вузов / Э. С. Почаевец. – Днепропетровск, 1982. – 40 с.

223. Почаевец Э. С. Анализ режимов системы электрической тяги методом фиксированной выходной мощности / Э. С. Почаевец // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979. – № 1. – С. 18-26.

224. Стасюк О. І. Математичні моделі і методи комп'ютерного керування електропостачанням залізниць на основі диференційних перетворень Пухова / О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова // Электронное моделирование. – 2016. – Том 38, № 4, 16. – С. 37-46.

225. Стасюк О. І. Математичні моделі і методи аналізу комп'ютерних мереж керування електропостачанням тяговими підстанціями залізниць / О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова // Проблемы управления и автоматизации. – 2017. – № 1. – С. 104 – 105.

226. Стасюк О. І. Диференційні математичні моделі дослідження комп'ютерної архітектури всережимної системи керування дистанції електропостачання залізниць / О.І. Стасюк, Л. Л. Гончарова // Кибернетика и системный анализ. – 2017. – Том 54, № 1. – С 83-92.

227. Стасюк О.І. Математичні комп'ютерно-орієнтовані моделі безпеки інформації обчислювальних мереж тягових підстанцій залізниць / О. І. Стасюк, Р.В. Грищук, Л.Л. Гончарова // Захист інформації. – 2015. – Том 17, №2. – С. 117-124.

228. Стасюк О.І. Математичні моделі комп'ютерної інтелектуалізації технологій синхронних векторних вимірів параметрів електричних мереж / О.І. Стасюк, Л.Л. Гончарова // Кибернетика и системный анализ. – 2016. – Том 52, №5. – С 186-192.

229.Стасюк О.І. Методи інтелектуалізації інноваційних комп'ютерних технологій бортових систем моніторингу локомотивів // Стасюк О.І., Гончарова Л.Л. Електрифікація транспорту. – 2016. – № 11. – С.100 – 107.

230.Stasiuk A.I. Mathematical Models of Computer Intellectualization of Technologies for Synchronous Phasor Measurements of Parameters of Electric Networks// Stasiuk A.I., Goncharova L.L. New Means Cybernetics, Informatics, Computers Engineering And Systems Analysis. Springer Science+Business Media New York 2016. Volume 52, Issue 5, pp. 825 -830.

231.Стасюк О.І. Підвищення надійності моніторингу допустимості завантажень контрольованих перетинів енергосистем // Стасюк О.І., Буткевич О.Ф., Левконюк А.В. Технічна електродинаміка, Київ – 2014, №2 – С.56-67.

232.Гриб О.Г. Разработка нейросетевой модели для прогнозирования отклонения напряжения в электрических сетях / О. Г. Гриб, В.А. Сапрыка, А.В. Сапрыка, Л.Ю. Ступишин // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 2/3(62). – С. 9-11.

233.Гриб О.Г. Проблеми якості електричної енергії живлячої мережі при підключенні пристрою з активним перетворювачем / О.Г. Гриб, Р.В. Жданов, Д.А. Гапон, А.А. Зуев // Вісник Вінницького Національного технічного університету. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – №2. – С. 87-90.

234.Сокол Е. И. Качество электрической энергии. Том 3. Методы и средства повышения качества электрической энергии / Е. И. Сокол, О. Г. Гриб, А. Ф. Жаркин и др. // Монография. ПП «Граф-Ікс»: Харьков, 2014. – 292 с.

235. Gryb O. G. Monitoring of electrical energy quality on the traction substation input / O. G. Gryb, D.A. Gapon, T.S. Ierusalimova and oth. // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – №6. – С. 61-65.

236.Гриб О. Г. Автоматизированная система контроля уровня перенапряжений и качества электрической энергии / О. Г. Гриб, С.Ю. Шевченко, Д.А. Гапон, Н.С. Белов, Т.С. Иерусалимова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Енергетика: надійність та енергоефективність» – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №56(1098) – С.45-50.

237.Гриб О. Г. Мониторинг качества электроэнергии на цифровых подстанциях / О. Г. Гриб, Д.А. Гапон, Ю.А. Сиротин, Т.С. Иерусалимова, А.В. Дяченко // Вестник Национального технического университета «Харковский политехнический институт» Выпуск серия « Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Силовая электроника и энергоэффективность.» – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2015. – №12 (1121). – С. 316-319.

238.Буславец О.А. Вплив транзитних перетоків потужності на втрати електроенергії в електричних мережах / О.А. Буславец, О.Б. Бурикін, П.Д. Лежнюк // Технічна електродинаміка. – 2016. – №4. – С. 71–73.

239. Лежнюк П.Д. Автоматизація роботи розосереджених джерел електроенергії в локальній електричній системі на основі концепції SMART Grid / П.Д. Лежнюк, О.В. Нікіторович, О.А. Ковальчук, В.В. Кулик // Праці інституту електродинаміки НАНУ. Зб. наук. праць. Сп. вип. – 2013. – С. 136–143.

240. Лежнюк П.Д. Використання в SMART GRID технологіях принципу найменшої дії як механізму природної оптимізації / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – С. 32–34.

241. Лежнюк П.Д. Формування умов оптимальності компенсації реактивної потужності в електричних мережах споживачів і енергопостачальних компаній / П.Д. Лежнюк, О.М. Нанака // Монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2015. – 114 с.

242. Лежнюк П.Д. Інформаційне забезпечення розрахунків втрат потужності й електроенергії від транзитних перетоків / П.Д. Лежнюк, Н.В. Семенюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С. 66–69.

243. Лежнюк П.Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з використанням нейронечіткого моделювання / П.Д. Лежнюк, О.О. Рубаненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – №1. – С. 127–130.

244. Лежнюк П.Д., Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з застосуванням нейронечіткого моделювання: Монографія / П.Д. Лежнюк, О.О. Рубаненко. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 136 с.

245. Лежнюк П.Д., Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці: Монографія / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, В.В. Нетребський, В.В. Тептя. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 212 с.

246. Лежнюк П.Д. Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний потокорозподіл в електричних мережах / П. Д. Лежнюк, І.О. Гунько // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №18. – С. 86–91.

247. Доманский И. В. Режимы работы системы тягового электроснабжения переменного тока с устройствами компенсации реактивной мощности / И. В. Доманский // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 59-66.

248. Доманский И. В. Развитие методов расчета систем тягового электроснабжения и питающих их энергосистем / И. В. Доманский // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – № 4. – С. 62-68.

249. Хворост Н. В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития / Н. В. Хворост, Н. В. Панасенко // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. – № 4. – С. 104-114.

250. Енергозбереження та енергетичний менеджмент у пристроях тягового електропостачання: навч. Посібн. / С. П. Денисюк, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко, О. М. Крупинський; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 364 с.

251.Сегеда М. С. Электричні мережі та системи: підручн. для студ. вищ. навч. закл. / М. С. Сегеда. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.

252.Электромагнитная совместимость тягового электроснабжения постоянного тока при скоростном движении: монография / В. Г. Сыченко, А. П. Бялонь; Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – Днепропетровск, 2016. – 267 с.

253.Bollen, M.H.J. Signal Processing of Power Quality Disturbances [Text] / M.H.J. Bollen, I.Y.H. Gu. – Piscataway, NJ.: IEEE Press, 2006. – 861 p.

254.Доманская, Г. А. Интеллектуализация управления режимами работы систем тягового электроснабжения / Г. А. Доманская // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 81-84.

255.Доманская Г.А. Нечеткие модели и методы анализа и выбора управлений режимами работы электротяговых сетей / Доманская Г.А, Доманский В.В. // Труды всероссийской научно-практической конференции с международным участием представителей производства, ученых транспортных вузов и инженерных работников „Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы” ДВГУПС. – 2010. – С.143-148

256.Доманская, Г. А. Выбор энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей на базе нечеткого описания их состояния / Г. А. Доманская // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2009. - Вип. 29. - С. 63-67.

257.Митрофанов А. Н. Моделирование процессов прогнозирования и управления электропотреблением тяги поездов / А. Н. Митрофанов. – Самара: СамГАПС, 2005. – 168 с.

258.Савич Я. Е. Оптимизация напряжений на шинах тяговых подстанций постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Я. Е. Савич; МИИТ. – М., 1985. – 166 с.

259.Черемисин В. Т. Способы оценки и снижения влияния уравнивающих токов на потери электрической энергии в тяговой сети переменного тока: монография / В. Т. Черемисин, В. А. Кващук, Ю. В. Кондратьев; Федеральное агентство железнодорожного транспорта, Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2009. – 76 с.

260.Закарюкин В. П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. – Иркутск: ИрГУПС. – 2010. – 160 с.

261.Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.

262.Жежеленко І. В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Саєнко. – Д., Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с.

263. Гетьман Г. К. Выбор рациональных параметров номинального режима пассажирских электровозов / Г. К. Гетьман, С. В. Арпуль, А. И. Кийко, Ю. В. Михайленко. – Дн-вск: Изд-во Маковецкой, 2012. – 188 с.

264. Савич Я. Е. Оптимизация размещения тяговых подстанций / Я. Е. Савич // Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта: Межвуз. сб. науч. тр. / ДИИТ. – Днепропетровск, 1993. – Вып. 294/3. – С. 25-29.

265. Марикин, А.Н. Принципы построения системы автоматического регулирования напряжения в электротяговой сети постоянного тока [Текст] / А. Н. Марикин, С. А. Бурков // СПб, ПГУПС, 2010. – Материалы пятого международного симпозиума «Элтранс—2009». – С. 222-227.

266. Герман, Л.А. Совершенствовать регулирование напряжения на тяговых подстанциях [Текст] / Л.А. Герман, Д.А. Куров, С.О. Фельдман, К.В. Кишкурно // Локомотив. – 2012. – №5. – С. 45-46.

267. Баринов, В.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. [Текст] / В.А. Баринов, С.А. Савалов – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.

268. Идельчик, В.И. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей и систем [Текст] / В.И. Идельчик – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.

269. Синьков, В.М. Оптимизация режимов энергетических систем [Текст] / В.М. Синьков, А.В. Богословский, В.Г. Григоренко, Я.А. Калиновский, А.А. Огородников, Э.А. Мозговая. – Киев: «Вища школа», 1976. – 308 с.

270. Герман, Л.А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. Ч.1. [Текст] / Л.А. Герман – М.: РГОТУПС, 1998. – 36 с.

271. Герман, Л.А. Матричные методы расчета системы тягового электроснабжения. Конспект лекций. Ч.2. [Текст] / Л.А. Герман – М.: РГОТУПС, 2000. – 38 с.

272. Герман, Л.А. Расчет типовых задач тягового электроснабжения переменного тока на ЭВМ. Уч. Пособие [Текст] / Л.А. Герман, Д.А. Морозов – М.: МИИТ, 2010. – 59 с.

273. Герман, Л.А. Программа совместного расчета систем тягового и внешнего электроснабжения РАСТ-05К» [Текст] / Л.А. Герман, К.В. Кишкурно // Свидетельство Роспатента РФ №2014612195 от 28.10.13 о государственной регистрации программы для ЭВМ.

274. Porter, W. General sensitivity theory [Txt] / W. Porter // Automatic Control, IEEE Transactions on (Volume: 18 , Issue: 2). – IEEE. – 1973. – P.199-200.

275. Laufenberg, M.J. Sensitivity theory in power systems: application in dynamic security analysis [Txt] / M.J Laufenberg, M.A. Pai // Control Applications, 1996. – Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on. – Dearborn, MI. – IEEE. – 1996. – P.738-743.

276. Frank, P. M. Introduction to System Sensitivity Theory [Txt] / P.M. Frank, M. Eslami // Systems. – Man and Cybernetics, IEEE Transactions on. – 1980. – Volume: 10, Issue: 6. – P. 337 – 338.

277. Вульф, Д. Чем больше информации о состоянии сети, тем выше её пропускная способность [Текст] / Д. Вульф // Transmission and Distribution World (Russian Edition). – 2014. – С. 32-35.

278. Kahrobaee, S. Reliability assessment for smart grid and future power distribution systems [Тxt] / S. Kahrobaee, S. Asgarpoor // Technologies for Sustainability (SusTech), IEEE Conference on. – 2015. – P.160-164.

279. Al-Abdulwahab, A.S. Reliability assessment of distribution system with innovative Smart Grid technology implementation [Тxt] / A.S. Al-Abdulwahab, K.M. Winter, N. Winter // Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East), IEEE PES Conference on. – 2011. – P.1-6.

280. Belhomme, R. Overview and goals of the clusters of smart grid demonstration projects in France [Тxt] / R. Belhomme // Power and Energy Society General Meeting, IEEE. – 2011. – P.1-8.

281. Deotare, P. Overview of automation of Smart Grid network [Тxt] / P. Deotare, L. Dole. // Intelligent Systems and Control (ISCO), IEEE 9th International Conference on. – 2015. – P. 1-3.

282. Исаев И. П. Беседы об электрической железной дороге / И. П. Исаев, А. В. Фрайфельд. – М.: Транспорт, 1989. – 359 с.

283. Кисляков В. А. Электрические железные дороги / В. А. Кисляков, А. В. Плакс, В. Н. Пупынин. – М.: Транспорт, 1993. – 280 с.

284. Зеефельнер Е. Е. Электрическая тяга. Теория и применение электрической тяги на железных дорогах / Е. Е. Зеефельнер. – М.: НКПС – Транспечать, 1926. – 750 с.

285. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда / В. К. Калинин. – М.: Транспорт, 1991. – 480 с.

286. Мамошин Р. Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока / Р. Р. Мамошин. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.

287. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах). Под ред. Н. В. Колодяжного. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.

288. Новые силовые полупроводниковые приборы для тягового электроснабжения // Железные дороги мира. – 2000. – № 1. – С. 46-51.

289. Пронтарский А. Ф. Системы и устройства электроснабжения / А. Ф. Пронтарский. – М.: Транспорт, 1979. – 261 с.

290. Котельников А. В. Железнодорожный транспорт в России в 2000..3030 гг. (научная концепция) / А. В. Котельников, А. С. Нестрахов // Вестник ВНИИЖТа. – 2000. – № 5. – С. 3-15.

291. Новый электроподвижной состав магистральных и горных железных дорог. Под ред. докт. техн. наук В. Г. Щербакова. – Новочеркасск, изд-во НГТУ, 1996. – 210 с.

292. Чумак В. В. Перспективы развития электровозостроения в Украине / В. В. Чумак, Браташ В. А. // Транспорт: Збірник наукових праць. – 2002. – Вип. 11. – С. 3-6.

293. Курбасов А. С. Система электрической тяги XXI века / А. С. Курбасов // Железные дороги мира. – 1999. – № 4. – С. 19-20.

294. Курбасов А. С. Эффективность системы электрической тяги постоянного тока 6 кВ / А. С. Курбасов // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 11. – С. 32-34.

295. Панасенко М. В. Проблемы розвитку швидкісного руху в Україні / М. В. Панасенко // Напівпровідникові та мікропроцесорні пристрої в електроенергетичних системах транспорту. Збірник наук. праць ХарДАЗТ. – 2000. – С. 3-5.

296. Блохин, Е. П. Высокоскоростной наземный транспорт мира [Текст]: учеб. / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько. – Днепропетровск: Изд-во Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2009. – 237 с.

297. Головченко В. А. О некоторых особенностях схем и конструкций перспективных магистральных электровозов / В. А. Головченко // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2000. – № 3. – С. 4-12.

298. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. Под ред. д.т.н., проф. Ротанова Н. А. – М.: Транспорт, 1991. – 336 с.

299. Жуйков В. Я. Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами / В. Я. Жуйков, С. П. Денисюк. – К.: ТЕКСТ, 2010. – 364 с.

300. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А. Г. Ивахненко. – К.: Техника, 1975. – 312 с.

301. Кузнецов В. Г. Проблемы повышения качества энергии в электрических сетях и системах / В. Г. Кузнецов // Техническая электродинамика. – 1991. – № 2. – С. 84-92.

302. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1975. – 320 с.

303. Музиченко О. Д. Особиста та дольова відповідальність приймачів за погіршення якості електричної енергії / О. Д. Музиченко // Технічна електродинаміка. – 1996. – № 6. – С. 67-72.

304. Крюков, А. В. Влияние тяговой нагрузки на режим сети внешнего электроснабжения / А. В. Крюков, Е. В. Турков, В. А. Ушаков // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. – Т. 2. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т. – 2003. – С. 159-165.

305. Мамошин, Р. Р. Выбор режима напряжения в тяговой сети переменного тока / Р. Р. Мамошин // Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на ж. д. транспорте: Сб. трудов. – М.: МИИТ. – 2000. – С. 18-22.

306. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками / А. И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.

307. Скалозуб, В. В. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости активной и реактивной электроэнергии / В. В. Скалозуб, В. Г. Кузнецов, Д. А. Босый, А. П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4. – С. 111-114.

ДОДАТОК А

**РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МОДЕЛІ
В ПАКЕТІ MATHCAD**

▼ Вихідні дані

I := 3333 L := 20 L_c := 10 n₁ := 2 n₂ := 2 tx := 20 τ₁ := 0 τ₂ := 5 τ₃ := 10 τ₄ := 30 r₀ := 0.05

U₁ := 10000 U₂ := 35000 U_{CT} := 3000 n_{up1} := 1 n_{up2} := 0 x_{up5} := 10 k₁ := $\frac{10}{3.2}$ k₂ := $\frac{35}{3.2}$

Задаючі вектори руху електрорухомого складу

	Час	Координата	Струм ЕРС																										
vt ₁ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₁ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0	2	...	vI ₁ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>8</td></tr><tr><td>1</td><td>32</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	8	1	32	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0																												
2	...																												
	0																												
0	8																												
1	32																												
2	...																												
vt ₂ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₂ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.01</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.01	2	...	vI ₂ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td></tr><tr><td>1</td><td>38</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	9	1	38	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0.01																												
2	...																												
	0																												
0	9																												
1	38																												
2	...																												
vt ₃ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₃ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.01</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.01	2	...	vI ₃ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>27</td></tr><tr><td>1</td><td>96</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	27	1	96	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0.01																												
2	...																												
	0																												
0	27																												
1	96																												
2	...																												
vt ₄ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₄ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.01</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.01	2	...	vI ₄ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>872</td></tr><tr><td>1</td><td>872</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	872	1	872	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0.01																												
2	...																												
	0																												
0	872																												
1	872																												
2	...																												
vt ₅ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₅ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0	2	...	vI ₅ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>29</td></tr><tr><td>1</td><td>137</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	29	1	137	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0																												
2	...																												
	0																												
0	29																												
1	137																												
2	...																												
vt ₆ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₆ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.02</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.02	2	...	vI ₆ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>27</td></tr><tr><td>1</td><td>61</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	27	1	61	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0.02																												
2	...																												
	0																												
0	27																												
1	61																												
2	...																												
vt ₇ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.017</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.017	2	...	vx ₇ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0.02</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	0	1	0.02	2	...	vI ₇ :=	<table border="1"><tr><td></td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>29</td></tr><tr><td>1</td><td>41</td></tr><tr><td>2</td><td>...</td></tr></table>		0	0	29	1	41	2	...
	0																												
0	0																												
1	0.017																												
2	...																												
	0																												
0	0																												
1	0.02																												
2	...																												
	0																												
0	29																												
1	41																												
2	...																												

x_e(n,t) := linterp(vt_n, vx_n, t) I_e(n,t) := linterp(vI_n, vI_n, t)

▲ Вихідні дані

$$T := \begin{cases} \text{if } f_Real_Traction & = 50 \\ \quad \left| \begin{array}{l} \max_ \leftarrow \max(\tau) \\ \text{for } i \in 1 \dots n_1 + n_2 \\ \quad n \leftarrow i \text{ if } \tau_i = \max_ \\ \quad \max(\tau) + \max(vt_n) \end{array} \right. & \text{Визначення часу ходу міжпідстанційною зоною} \\ \max(\tau) + tx & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_0(U_{prim}, k, A, u_k, n, S_{nom}, S_{kz}) := \frac{U_{prim}}{k} \cdot \frac{1}{1 - A \cdot \left(\frac{u_k}{100} + \frac{n \cdot S_{nom}}{S_{kz}} \right)}$$

Визначення напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій

$x := 0, 0.05 \dots L \quad t := 0, 0.05 \dots T$

$$\rho(A, u_k, n, S_{nom}, S_{kz}, I_{nom}) := \frac{3300}{I_{nom} \cdot \left(1 - A \cdot \left(\frac{u_k}{100} + \frac{n \cdot S_{nom}}{S_{kz}} \right) \right)} \cdot A \cdot \left(\frac{u_k}{100 \cdot n} + \frac{S_{nom}}{S_{kz}} \right)$$

Визначення внутрішнього опору тягової підстанції (з урахуванням зовнішньої енергосистеми)

$$U_d(U_0, \rho, I) := U_0 - \rho \cdot I$$

$$\rho_1 := \rho(0.5, 8.5, 1, 12500, 800000, 3150) = 0.056$$

$$\rho_2 := \rho(0.5, 8.5, 1, 12500, 800000, 3150) = 0.056$$

$$U_{01} := U_0(U_1, k_1, 0.5, 7.5, 1, 12500, 200000) = 3436.242$$

$$U_{02} := U_0(U_2, k_2, 0.5, 7.5, 1, 12500, 800000) = 3351.882$$

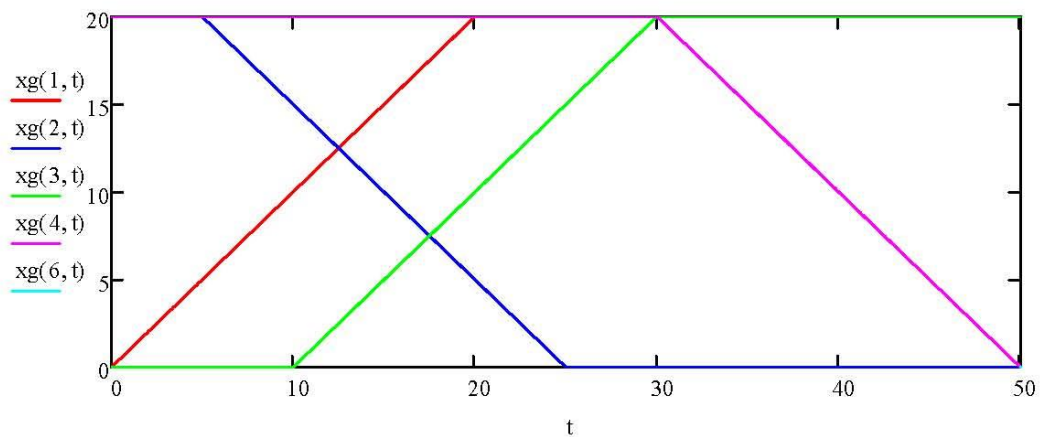
$$I_{p_r}(n, t) := \begin{cases} \text{if } (n \leq 2 \cdot n_1 - 1) + (n \leq 2 \cdot n_2) \\ \quad \left| \begin{array}{l} 0 \text{ if } (t < \tau_n) \\ 2 \cdot I_e(n, t - \tau_n) \text{ if } (t \geq \tau_n) \cdot (t < \tau_n + tx) \\ 0 \text{ if } t \geq \tau_n + tx \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \quad \left| \begin{array}{l} 0 \text{ if } (t < 0) \\ -I_{up}(t) \text{ if } (t \geq 0) \cdot (t < T) \\ 0 \text{ if } t \geq T \end{array} \right. \end{cases}$$

$$xg_r(n,t) := \begin{cases} \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ \quad \text{if } n \leq 2 \cdot n_1 - 1 \\ \quad \quad \begin{cases} 0 & \text{if } (t < \tau_n) \\ x_e(n, t - \tau_n) & \text{if } (t \geq \tau_n) \cdot (t < \tau_n + \max(vt_n)) \\ L & \text{if } t \geq \tau_n + \max(vt_n) \end{cases} \\ \quad \text{otherwise} \\ \quad \quad \begin{cases} 0 & \text{if } (t < 0) \\ x_up_n & \text{if } (t \geq 0) \cdot (t < T) \\ 0 & \text{if } (t \geq T) \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \quad \text{if } n \leq 2 \cdot n_2 \\ \quad \quad \begin{cases} L & \text{if } (t < \tau_n) \\ L - x_e(n, t - \tau_n) & \text{if } (t \geq \tau_n) \cdot (t < \tau_n + \max(vt_n)) \\ 0 & \text{if } (t \geq \tau_n + \max(vt_n)) \end{cases} \\ \quad \text{otherwise} \\ \quad \quad \begin{cases} 0 & \text{if } (t < 0) \\ x_up_n & \text{if } (t \geq 0) \cdot (t < T) \\ 0 & \text{if } (t \geq T) \end{cases} \end{cases}$$

$$xg(n,t) := \begin{cases} xg_r(n,t) & \text{if } f_Real_Traction \\ xg_m(n,t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad Ip(n,t) := \begin{cases} Ip_r(n,t) & \text{if } f_Real_Traction \\ Ip_m(n,t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

▢ Обробка вихідних даних

▣ Графік руху



▢ Графік руху

Функції струморозподілу

$$\begin{aligned}
 f_{i_1}(x) &:= \begin{cases} 1 - \frac{L + L_c}{2 \cdot L \cdot L_c} \cdot x & \text{if } x \leq L_c \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) & \text{otherwise} \end{cases} & f_{i_2}(x) &:= \begin{cases} \frac{L - L_c}{2 \cdot L \cdot L_c} \cdot x & \text{if } x \leq L_c \\ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) & \text{otherwise} \end{cases} \\
 f_{i_3}(x) &:= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L} \right) & \text{if } x \leq L_c \\ 1 - \frac{2L - L_c}{2 \cdot L \cdot (L - L_c)} \cdot (L - x) & \text{otherwise} \end{cases} & f_{i_4}(x) &:= \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{x}{L} \right) & \text{if } x \leq L_c \\ \frac{L_c}{2 \cdot L \cdot (L - L_c)} \cdot (L - x) & \text{otherwise} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Струми фідерів при русі одного ЕРС міжпідстанційною зоною

$$I_{f_1}(n, t) := \begin{cases} f_{i_1}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{if } \text{mod}(n, 2) \neq 0 \\ f_{i_2}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad I_{f_2}(n, t) := \begin{cases} f_{i_2}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{if } \text{mod}(n, 2) \neq 0 \\ f_{i_1}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$I_{f_3}(n, t) := \begin{cases} f_{i_3}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{if } \text{mod}(n, 2) \neq 0 \\ f_{i_4}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad I_{f_4}(n, t) := \begin{cases} f_{i_4}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{if } \text{mod}(n, 2) \neq 0 \\ f_{i_3}(xg(n, t)) \cdot I_p(n, t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Струми фідерів при реалізації графіка руху

$$I_{f1}(t) := \sum_{i=1}^{n_1+n_up1} (f_{i_1}(xg(2 \cdot i - 1, t)) \cdot I_p(2 \cdot i - 1, t)) + \sum_{i=1}^{n_2+n_up2} (f_{i_2}(xg(2 \cdot i, t)) \cdot I_p(2 \cdot i, t))$$

$$I_{f2}(t) := \sum_{i=1}^{n_2+n_up2} (f_{i_1}(xg(2 \cdot i, t)) \cdot I_p(2 \cdot i, t)) + \sum_{i=1}^{n_1+n_up1} (f_{i_2}(xg(2 \cdot i - 1, t)) \cdot I_p(2 \cdot i - 1, t))$$

$$I_{f3}(t) := \sum_{i=1}^{n_1+n_up1} (f_{i_3}(xg(2 \cdot i - 1, t)) \cdot I_p(2 \cdot i - 1, t)) + \sum_{i=1}^{n_2+n_up2} (f_{i_4}(xg(2 \cdot i, t)) \cdot I_p(2 \cdot i, t))$$

$$I_{f4}(t) := \sum_{i=1}^{n_2+n_up2} (f_{i_3}(xg(2 \cdot i, t)) \cdot I_p(2 \cdot i, t)) + \sum_{i=1}^{n_1+n_up1} (f_{i_4}(xg(2 \cdot i - 1, t)) \cdot I_p(2 \cdot i - 1, t))$$

$$\begin{aligned}
 I_{yp}(t) &:= \begin{cases} I_{f12} \leftarrow I_{f1}(t) + I_{f2}(t) & \text{Визначення вирівнювального струму} \\ I_{f34} \leftarrow I_{f3}(t) + I_{f4}(t) \\ I_- \leftarrow \frac{U_d(U_{01}, \rho_1, I_{f12}) - U_d(U_{02}, \rho_2, I_{f34})}{1 \cdot r_0 \cdot L} \\ I \leftarrow \frac{U_d(U_{01}, \rho_1, I_{f12} + 2 \cdot I_-) - U_d(U_{02}, \rho_2, I_{f34} - 2 \cdot I_-)}{1 \cdot r_0 \cdot L} \\ \text{while } |I - I_-| > 0.1 \\ \quad \begin{cases} I_- \leftarrow I \\ I \leftarrow \frac{U_d(U_{01}, \rho_1, I_{f12} + 2 \cdot I_-) - U_d(U_{02}, \rho_2, I_{f34} - 2 \cdot I_-)}{1 \cdot r_0 \cdot L} \end{cases} \\ I \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$I_{f1}(t) := I_{f1}(t) + I_{yp}(t)$$

$$I_{f3}(t) := I_{f3}(t) - I_{yp}(t)$$

$$I_{f2}(t) := I_{f2}(t) + I_{yp}(t)$$

$$I_{f4}(t) := I_{f4}(t) - I_{yp}(t)$$

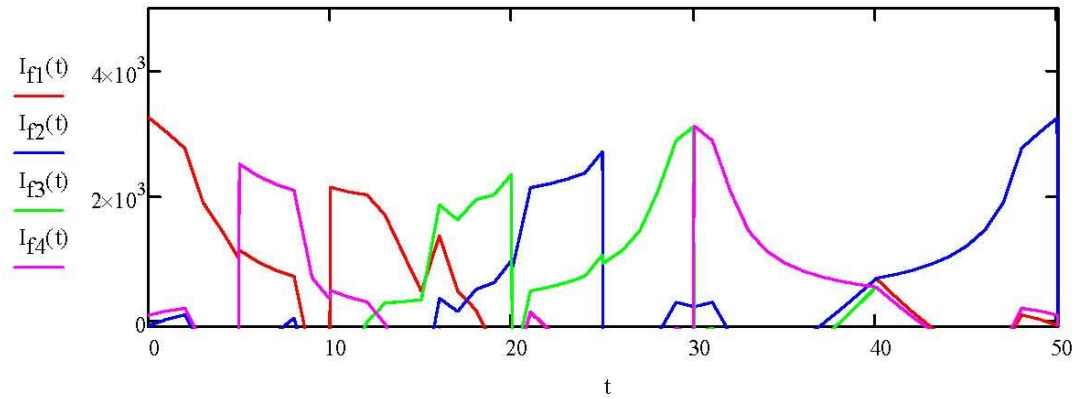
Напруга на шинах тягових підстанцій з урахуванням навантаження

$$U_{d1}(t) := U_d(U_{01} \cdot \rho_1 \cdot I_{f1}(t) + I_{f2}(t)) \quad U_{d2}(t) := U_d(U_{02} \cdot \rho_2 \cdot I_{f3}(t) + I_{f4}(t))$$

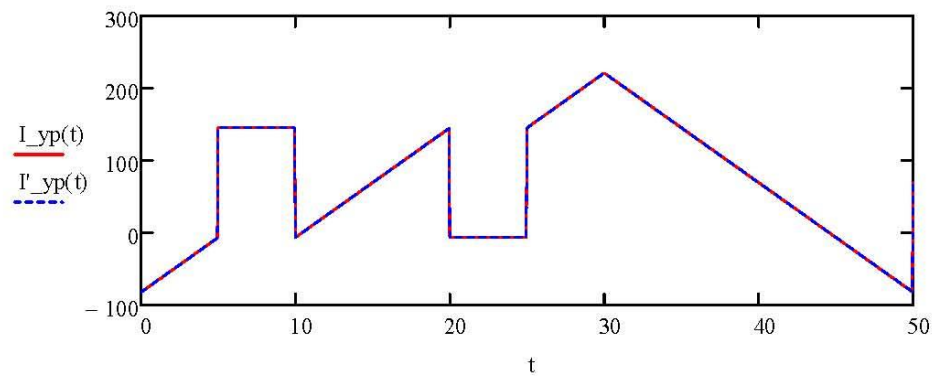
▢ Розрахунок струмів фідерів та вирівнювальних струмів

▣ Графіки струмів фідерів

Струми фідерів

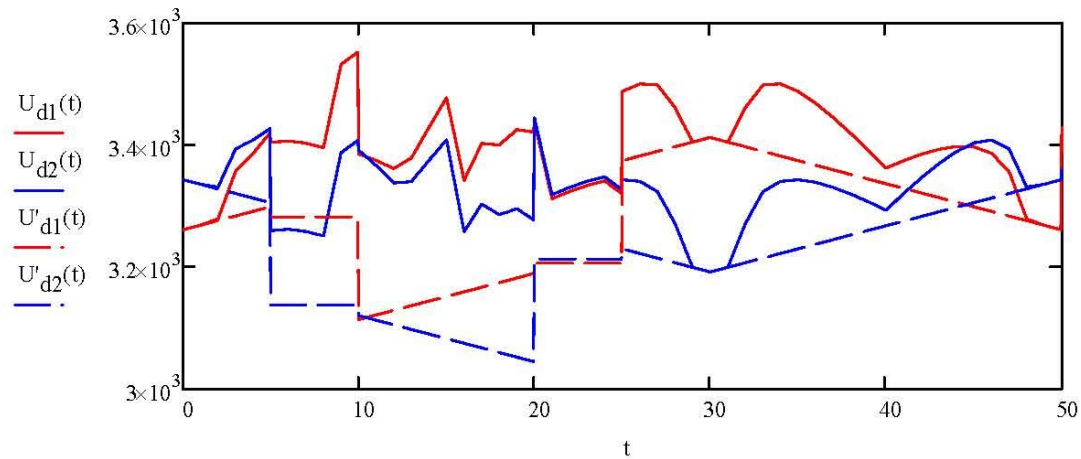


Вирівнювальний струм



▢ Графіки струмів фідерів

▣ Графіки напруги на шинах тягових підстанцій



▢ Графіки напруги на шинах тягових підстанцій

$$I_{k1}(n,t,x) := \begin{cases} \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ \begin{cases} \text{if } (xg(n,t) \geq 0) \cdot (xg(n,t) \leq L_c) & \text{Перша копія} \\ \begin{cases} I_{f_1}(n,t) \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq xg(n,t)) \\ -(I_{f_2}(n,t) + I_{f_3}(n,t) + I_{f_4}(n,t)) \text{ if } (x > xg(n,t)) \cdot (x \leq L_c) \\ -I_{f_3}(n,t) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} \\ \text{if } (xg(n,t) > L_c) \cdot (xg(n,t) \leq L) & \text{otherwise} \\ \begin{cases} I_{f_1}(n,t) \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ I_{f_1}(n,t) + I_{f_2}(n,t) + I_{f_4}(n,t) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq xg(n,t)) \\ -I_{f_3}(n,t) \text{ if } (x > xg(n,t)) \cdot (x \leq L) \end{cases} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} I_{f_1}(n,t) \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ -I_{f_3}(n,t) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} \end{cases}$$

$$I_{k2}(n,t,x) := \begin{cases} \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ \begin{cases} I_{f_2}(n,t) \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ -I_{f_4}(n,t) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} & \text{Друга копія} \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} \text{if } (xg(n,t) \geq 0) \cdot (xg(n,t) \leq L_c) \\ \begin{cases} I_{f_2}(n,t) \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq xg(n,t)) \\ -(I_{f_1}(n,t) + I_{f_3}(n,t) + I_{f_4}(n,t)) \text{ if } (x > xg(n,t)) \cdot (x \leq L_c) \\ -I_{f_4}(n,t) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} \\ \text{if } (xg(n,t) > L_c) \cdot (xg(n,t) \leq L) \\ \begin{cases} I_{f_2}(n,t) \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ I_{f_1}(n,t) + I_{f_2}(n,t) + I_{f_3}(n,t) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq xg(n,t)) \\ -I_{f_4}(n,t) \text{ if } (x > xg(n,t)) \cdot (x \leq L) \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

Розподіл струмів в контактній мережі з урахуванням струму підсилюючого пункту та вирівнювального струму

$$I_{u_k1}(n,x_{up},I_{up},x) := \begin{cases} I_{up} \leftarrow I_{up} - 1 \\ \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ \begin{cases} \text{if } (x_{up} \geq 0) \cdot (x_{up} \leq L_c) \\ \begin{cases} fi_1(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq x_{up}) \\ -(fi_2(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_3(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_4(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > x_{up}) \cdot (x \leq L_c) \\ -(fi_3(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} \\ \text{if } (x_{up} > L_c) \cdot (x_{up} \leq L) & \text{other} \\ \begin{cases} fi_1(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ fi_1(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_2(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_4(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq x_{up}) \\ -(fi_3(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > x_{up}) \cdot (x \leq L) \end{cases} \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} fi_2(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ -(fi_4(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} \end{cases}$$

$$I_{u_k2}(n, x_{up}, I_{up}, x) := \begin{cases} I_{up} \leftarrow I_{up} - 1 \\ \text{if } \text{mod}(n, 2) \neq 0 \\ \left| \begin{array}{l} fi_2(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ -(fi_4(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{array} \right. \\ \text{otherwise} \\ \left| \begin{array}{l} \text{if } (x_{up} \geq 0) \cdot (x_{up} \leq L_c) \\ \left| \begin{array}{l} fi_1(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq x_{up}) \\ -(fi_2(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_4(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_3(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > x_{up}) \cdot (x \leq L_c) \\ -(fi_3(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq L) \end{array} \right. \\ \text{if } (x_{up} > L_c) \cdot (x_{up} \leq L) \\ \left| \begin{array}{l} fi_1(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x \geq 0) \cdot (x \leq L_c) \\ fi_2(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_1(x_{up}) \cdot I_{up} + fi_4(x_{up}) \cdot I_{up} \text{ if } (x > L_c) \cdot (x \leq x_{up}) \\ -(fi_3(x_{up}) \cdot I_{up}) \text{ if } (x > x_{up}) \cdot (x \leq L) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Струми в контактній мережі першої та другої колії при реалізації графіка руху

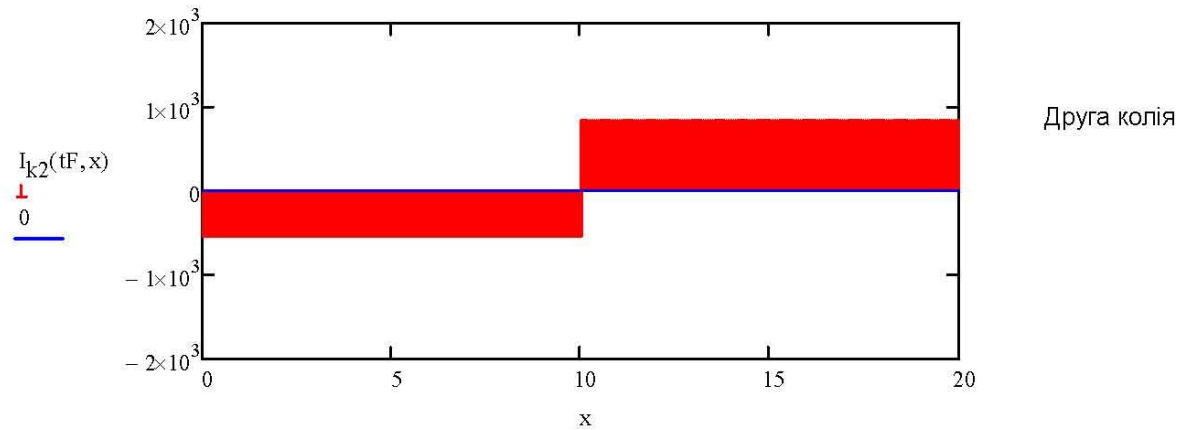
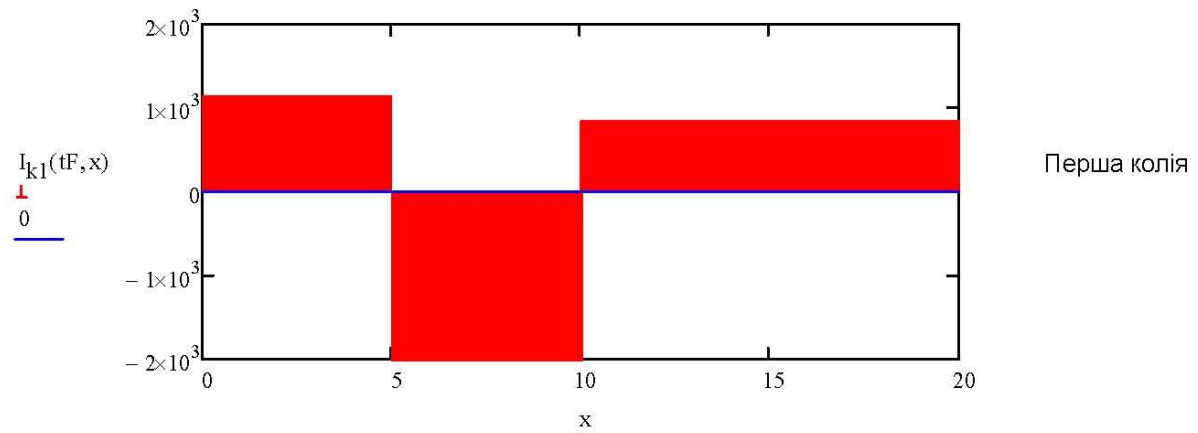
$$I_{k1}(t, x) := \sum_{i=1}^{n_1+n_up1} I_{k1}(2 \cdot i - 1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_2+n_up2} I_{k1}(2 \cdot i, t, x) + I_{yp}(t)$$

$$I_{k2}(t, x) := \sum_{i=1}^{n_2+n_up2} I_{k2}(2 \cdot i, t, x) + \sum_{i=1}^{n_1+n_up1} I_{k2}(2 \cdot i - 1, t, x) + I_{yp}(t)$$

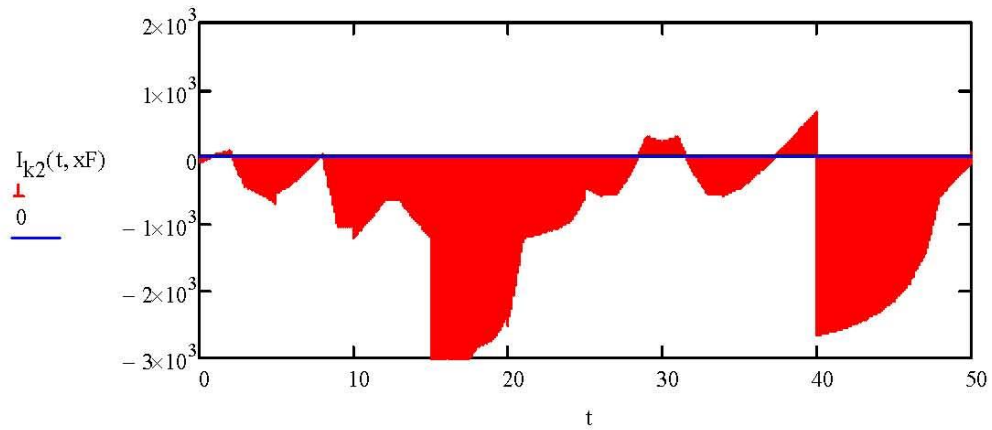
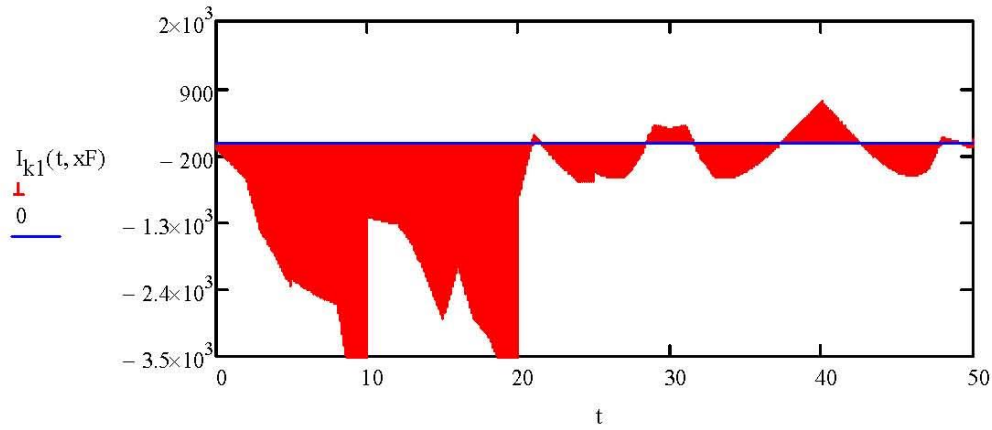
▢ Розрахунок розподілу струмів в контактній мережі

tF ≡ 5 xF ≡ 10

▣ Епюри струмів в контактній мережі



▢ Епюри струмів в контактній мережі



Расчет распределения потерь напряжения

$$\Delta U_{k1}(n,t,x) := \begin{cases} \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ \begin{cases} \text{if } (xg(n,t) \geq 0) \cdot (xg(n,t) < L_c) \\ \begin{cases} I_{k1}(n,t,x) \cdot r_0 \cdot x & \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < xg(n,t)) \\ I_{k1}\left(n,t, \frac{0+xg(n,t)}{2}\right) \cdot r_0 \cdot xg(n,t) + I_{k1}(n,t,x) \cdot r_0 \cdot (x-xg(n,t)) & \text{if } (x \geq xg(n,t)) \cdot (x < L_c) \\ I_{k1}\left(n,t, \frac{0+xg(n,t)}{2}\right) \cdot r_0 \cdot xg(n,t) + I_{k1}\left(n,t, xg(n,t) + \frac{L_c-xg(n,t)}{2}\right) \cdot r_0 \cdot (L_c-xg(n,t)) & \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} I_{k1}(n,t,x) \cdot r_0 \cdot x & \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < L_c) \\ I_{k1}\left(n,t, \frac{0+L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot L_c + I_{k1}(n,t,x) \cdot r_0 \cdot (x-L_c) & \text{if } (x \geq L_c) \cdot (x < xg(n,t)) \\ I_{k1}\left(n,t, \frac{0+L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot L_c + I_{k1}\left(n,t, L_c + \frac{xg(n,t)-L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot (xg(n,t)-L_c) + I_{k1}(n,t,x) \cdot r_0 \cdot (x-L_c) & \end{cases} \\ \text{otherwise} \\ \begin{cases} I_{k1}\left(n,t, \frac{0+L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot x & \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < L_c) \\ I_{k1}\left(n,t, \frac{0+L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot L_c + I_{k1}\left(n,t, L_c + \frac{L-L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot (x-L_c) & \text{if } (x \geq L_c) \cdot (x \leq L) \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

$$\Delta U_{k1_up}(n, x_{up}, I_{up}, x) := \begin{cases} \text{if } \text{mod}(n, 2) \neq 0 \\ \quad \text{if } (x_{up} \geq 0) \cdot (x_{up} < L_c) \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} I_{u_k1}(n, x_{up}, I_{up}, x) \cdot r_0 \cdot x \quad \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < x_{up}) \\ I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, \frac{0 + x_{up}}{2}\right) \cdot r_0 \cdot x_{up} + I_{u_k1}(n, x_{up}, I_{up}, x) \cdot r_0 \cdot (x - x_{up}) \\ I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, \frac{0 + x_{up}}{2}\right) \cdot r_0 \cdot x_{up} + I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, x_{up} + \frac{L_c - x_{up}}{2}\right) \cdot r_0 \cdot (x - x_{up}) \end{array} \right. \\ \quad \text{otherwise} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} I_{u_k1}(n, x_{up}, I_{up}, x) \cdot r_0 \cdot x \quad \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < L_c) \\ I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, \frac{0 + L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot L_c + I_{u_k1}(n, x_{up}, I_{up}, x) \cdot r_0 \cdot (x - L_c) \quad \text{if } (x > L_c) \\ I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, \frac{0 + L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot L_c + I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, L_c + \frac{x_{up} - L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot (x - L_c) \end{array} \right. \\ \quad \text{otherwise} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, \frac{0 + L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot x \quad \text{if } (x \geq 0) \cdot (x < L_c) \\ I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, \frac{0 + L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot L_c + I_{u_k1}\left(n, x_{up}, I_{up}, L_c + \frac{L - L_c}{2}\right) \cdot r_0 \cdot (x - L_c) \end{array} \right. \end{cases}$$

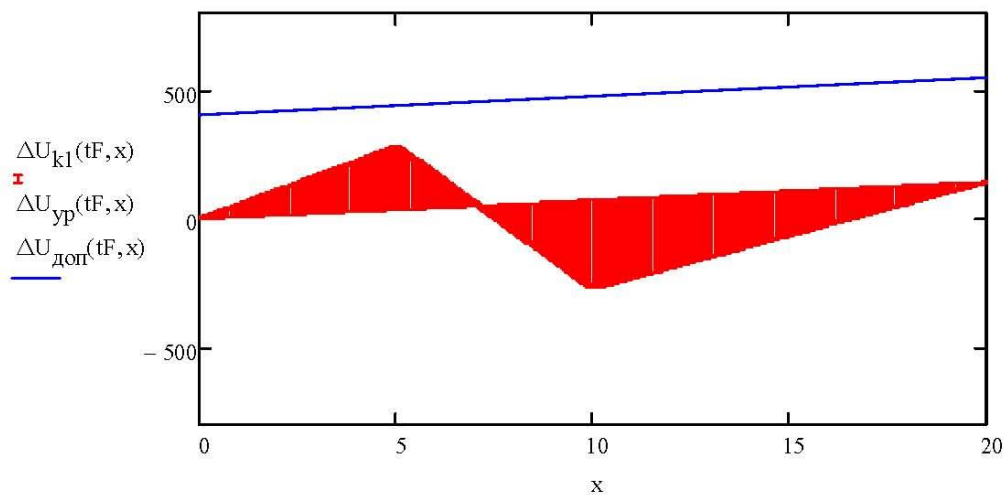
$$\Delta U_{yp}(t, x) := I_{yp}(t) \cdot r_0 \cdot x \quad \Delta U_{дон}(t, x) := U_{d1}(t) - 3000 + \Delta U_{yp}(t, x) \quad \Delta U_{yp}(t, x)$$

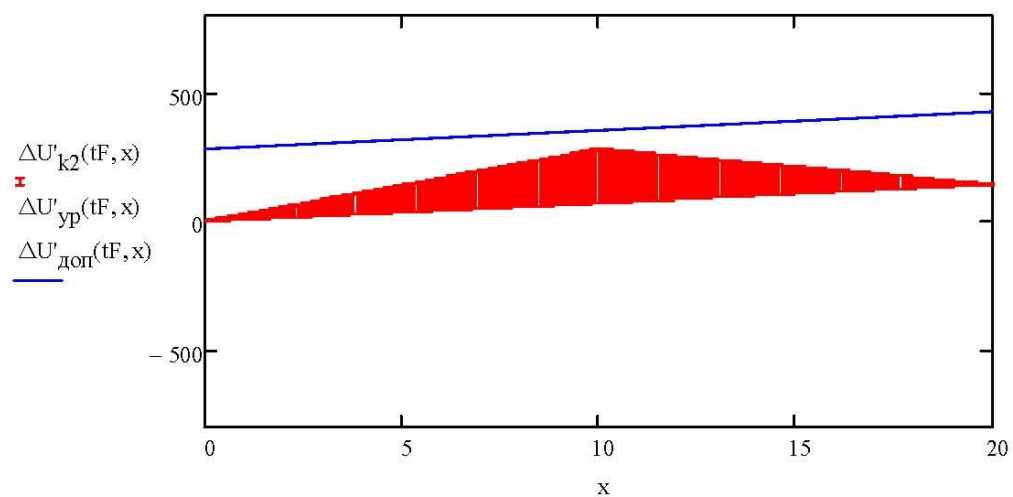
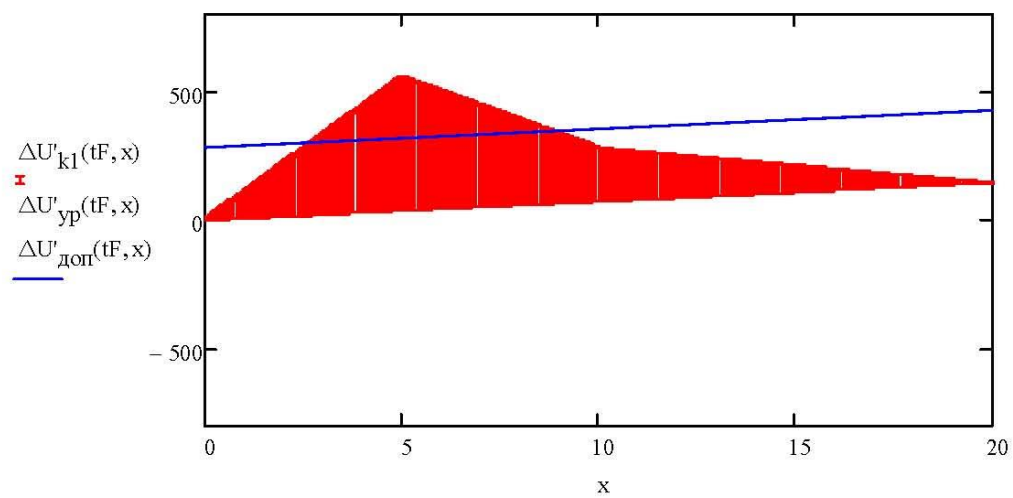
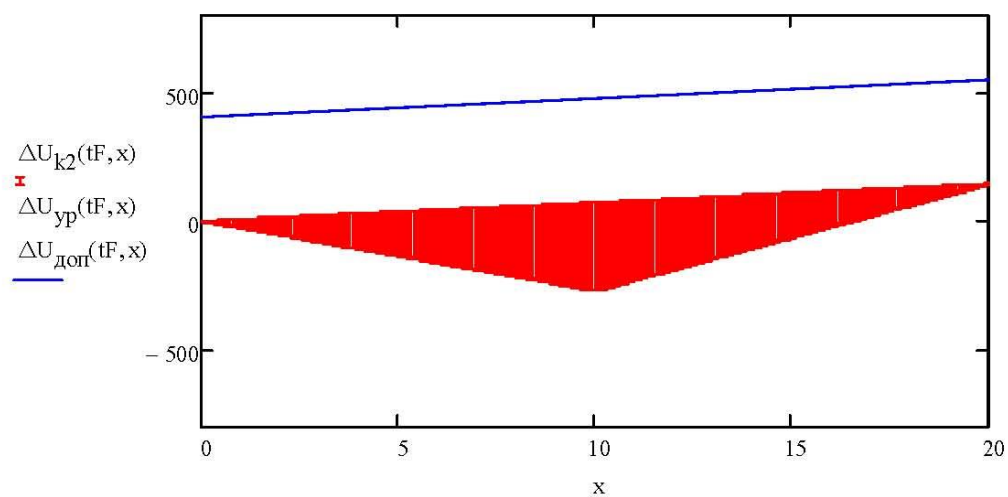
$$\Delta U_{k1}(t, x) := \sum_{i=1}^{n_{1+n_{up1}}} \Delta U_{k1}(2 \cdot i - 1, t, x) + \sum_{i=1}^{n_{2+n_{up2}}} \Delta U_{k1}(2 \cdot i, t, x) + \Delta U_{yp}(t, x) \quad \Delta U_{k1}(t, x)$$

$$\Delta U_{k2}(t, x) := \sum_{i=1}^{n_{2+n_{up2}}} \Delta U_{k2}(2 \cdot i, t, x) + \sum_{i=1}^{n_{1+n_{up1}}} \Delta U_{k2}(2 \cdot i - 1, t, x) + \Delta U_{yp}(t, x) \quad \Delta U_{k2}(t, x)$$

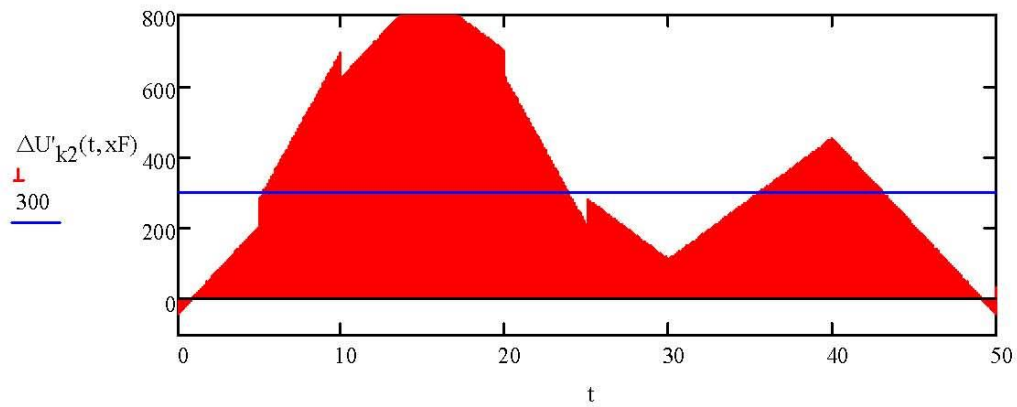
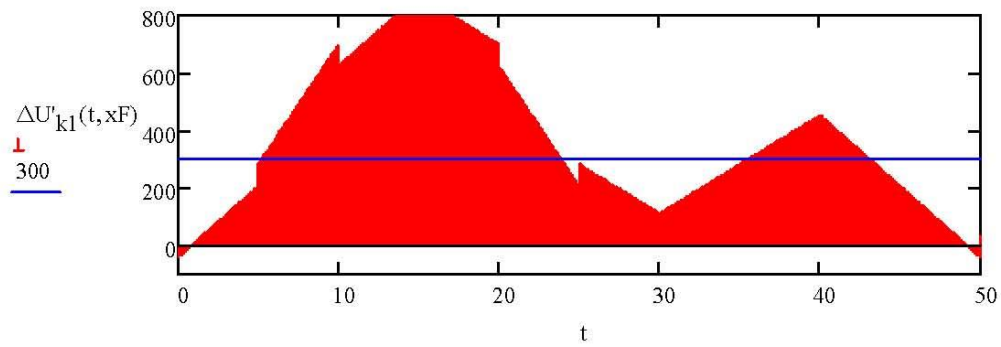
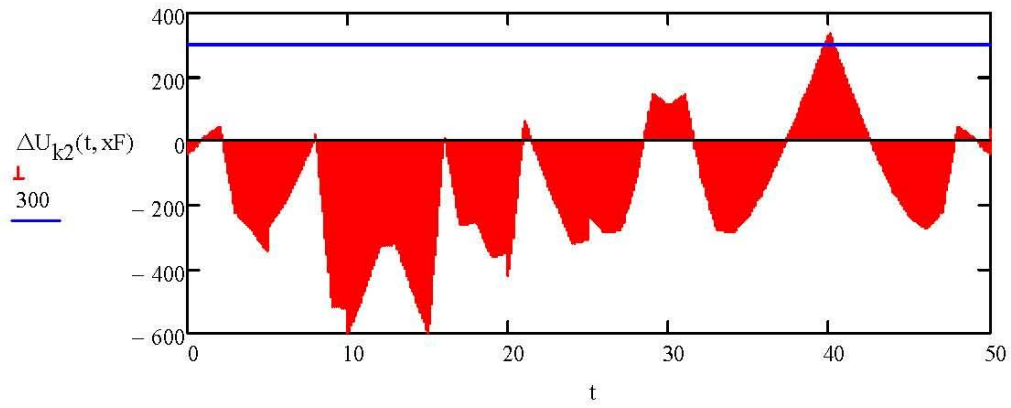
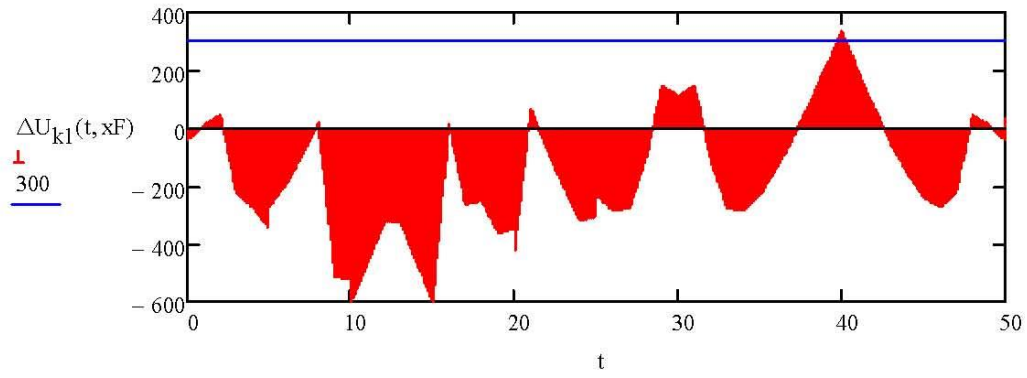
Расчет распределения потерь напряжения

Эпюры потерь напряжения в контактной сети





▲ Эпюры потерь напряжения в контактной сети



▣ Расчет потерь мощности и энергии

$$\begin{aligned}\Delta P_{k1}(t,x) &:= \left| \Delta U_{k1}(t,x) \cdot I_{k1}(t,x) \right| & \Delta P_{k2}(t,x) &:= \left| \Delta U_{k2}(t,x) \cdot I_{k2}(t,x) \right| & \Delta P_k(t,x) &:= \Delta P_{k1}(t,x) + \Delta P_{k2}(t,x) \\ \Delta P'_{k1}(t,x) &:= \left| \Delta U'_{k1}(t,x) \cdot I'_{k1}(t,x) \right| & \Delta P'_{k2}(t,x) &:= \left| \Delta U'_{k2}(t,x) \cdot I'_{k2}(t,x) \right| & \Delta P'_k(t,x) &:= \Delta P'_{k1}(t,x) + \Delta P'_{k2}(t,x)\end{aligned}$$

$$\Delta P_k(t) := \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \Delta P_{k1}(t,x) dx + \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \Delta P_{k2}(t,x) dx$$

$$\text{simp_dx}(f, x0, xn, t, n) := \begin{cases} s \leftarrow 0 \\ h \leftarrow \frac{xn - x0}{n} \\ \text{for } i \in 0..n-1 \\ \quad \begin{cases} x_{i1} \leftarrow x0 + i \cdot h \\ x_i \leftarrow x_{i1} + h \\ s \leftarrow s + f(t, x_{i1}) + 4 \cdot f\left(t, \frac{x_{i1} + x_i}{2}\right) + f(t, x_i) \end{cases} \\ \frac{s \cdot h}{6} \end{cases}$$

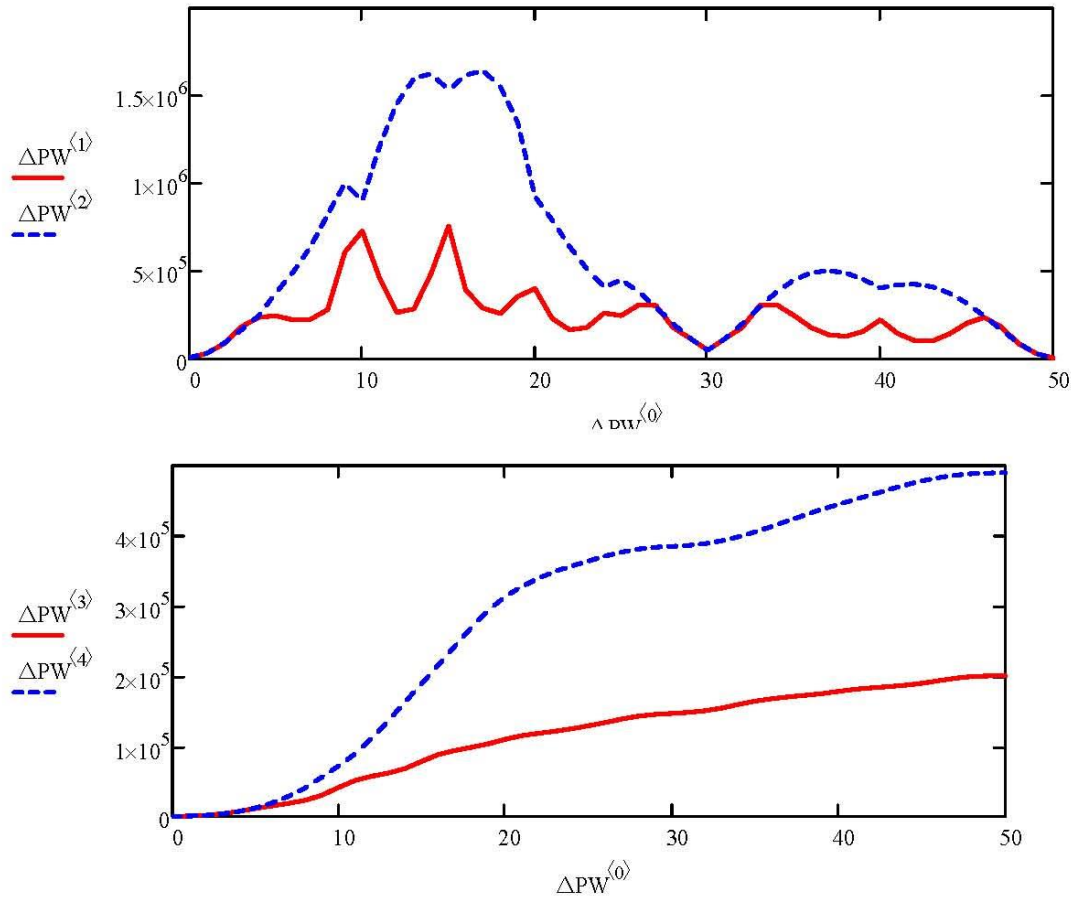
$$\Delta PW := \begin{cases} \text{if } f_Calc_dWP \\ \quad \begin{cases} h \leftarrow 1 \\ \text{for } i \in 0.. \frac{T}{h} \\ \quad \begin{cases} res_{i,0} \leftarrow i \cdot h \\ res_{i,1} \leftarrow \frac{1}{L} \cdot \text{simp_dx}\left(\Delta P_k, 0, L, i \cdot h, \frac{L}{h}\right) \\ res_{i,2} \leftarrow \frac{1}{L} \cdot \text{simp_dx}\left(\Delta P'_k, 0, L, i \cdot h, \frac{L}{h}\right) \\ res_{i,3} \leftarrow res_{i-1,3} + (res_{i-1,1} + res_{i,1}) \cdot \frac{h}{2 \cdot 60} \text{ if } i > 0 \\ res_{i,3} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \\ res_{i,4} \leftarrow res_{i-1,4} + (res_{i-1,2} + res_{i,2}) \cdot \frac{h}{2 \cdot 60} \text{ if } i > 0 \\ res_{i,4} \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases} \end{cases} \\ res \end{cases}$$

$$\frac{\Delta PW_{\text{rows}(\Delta PW)-1,4} - \Delta PW_{\text{rows}(\Delta PW)-1,3}}{\Delta PW_{\text{rows}(\Delta PW)-1,4}} \cdot 100 = 59.1$$

$$\Delta PW_{\text{rows}(\Delta PW)-1,4} = 489479.257$$

$$\Delta PW_{\text{rows}(\Delta PW)-1,3} = 200288.097$$

▣ Расчет потерь мощности и энергии

Графики потерь мощности и энергии

 Графики потерь мощности и энергии

 Расчет напряжений в к/сети

$$U_e(n,t) := \begin{cases} U_{d1}(t) - \Delta U_{k1}(t, xg(n,t)) & \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ U_{d1}(t) - \Delta U_{k2}(t, xg(n,t)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$U_{k1}(t,x) := U_{d1}(t) - \Delta U_{k1}(t,x)$$

$$U_{k2}(t,x) := U_{d1}(t) - \Delta U_{k2}(t,x)$$

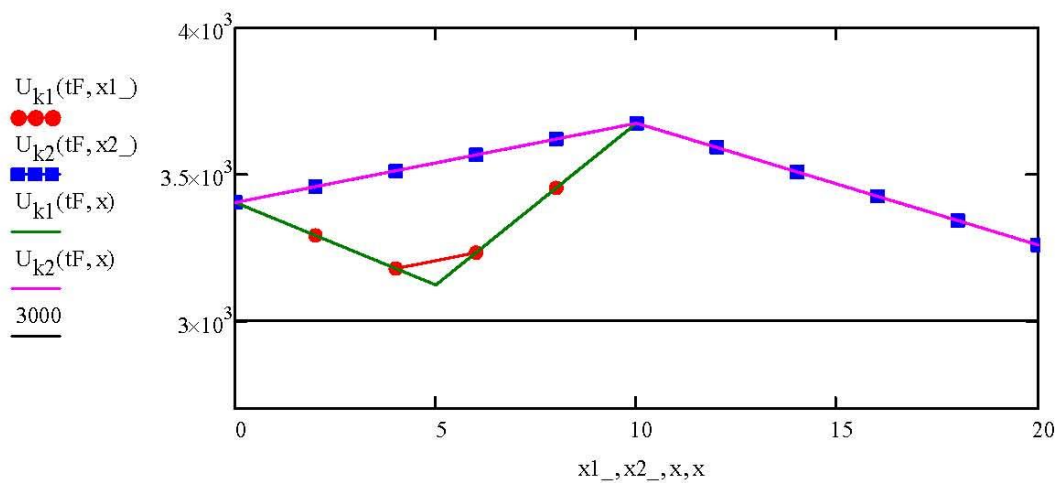
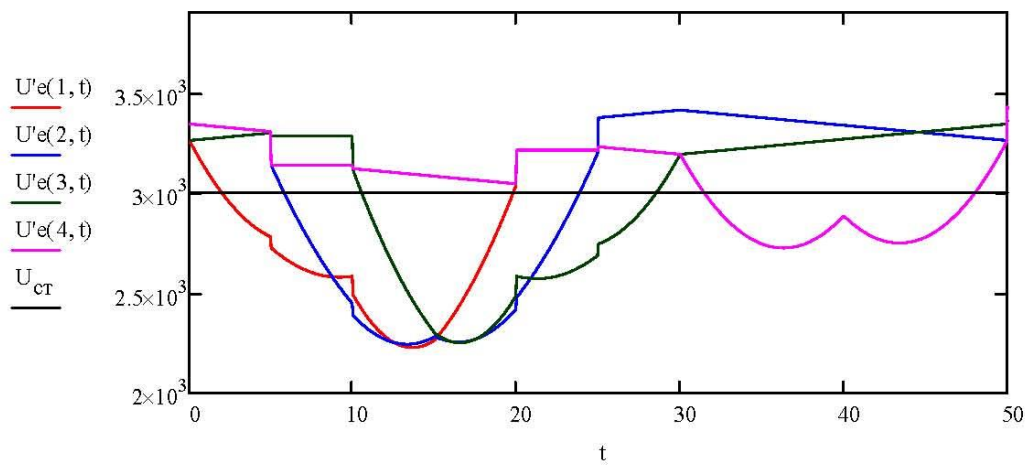
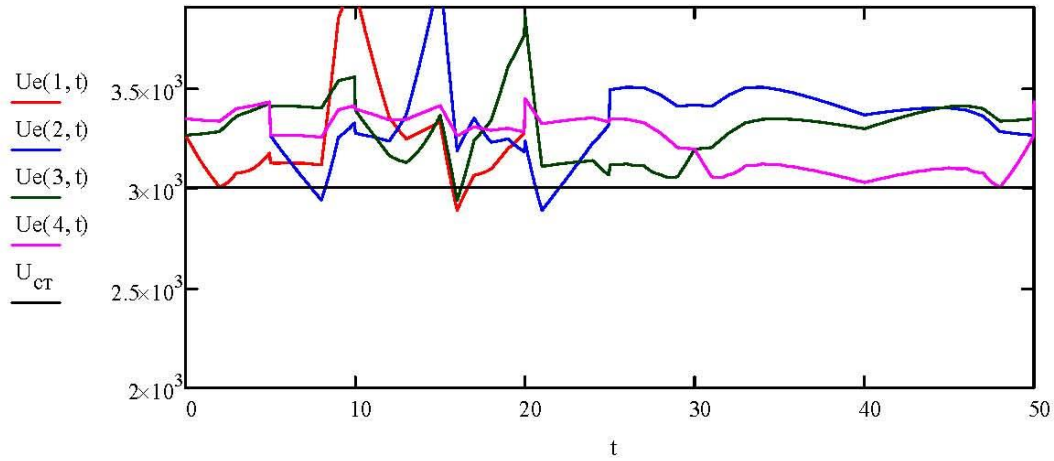
$$x1_ := 0,2..L \quad x2_ := 0,2..L$$

$$U_e(n,t) := \begin{cases} U_{d1}(t) - \Delta U_{k1}(t, xg(n,t)) & \text{if } \text{mod}(n,2) \neq 0 \\ U_{d1}(t) - \Delta U_{k2}(t, xg(n,t)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

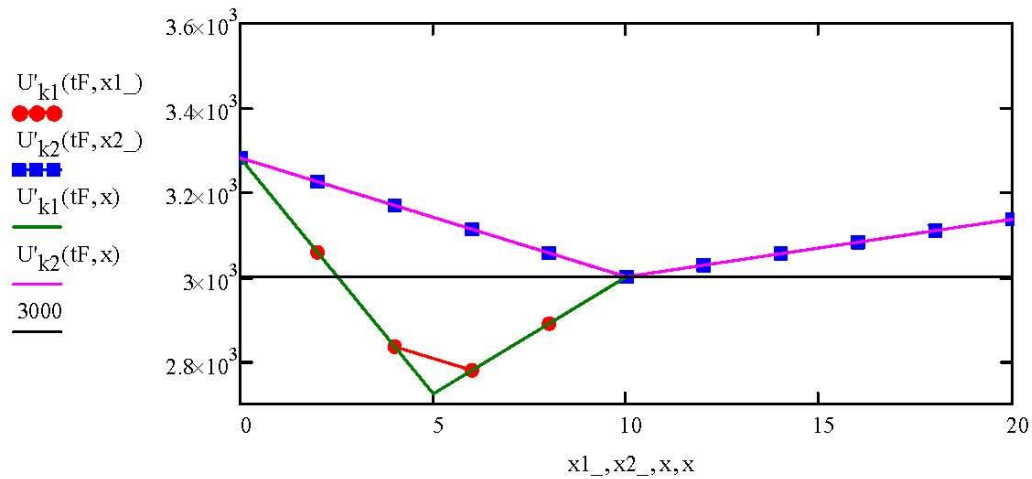
$$U_{k1}(t,x) := U_{d1}(t) - \Delta U_{k1}(t,x)$$

$$U_{k2}(t,x) := U_{d1}(t) - \Delta U_{k2}(t,x)$$

 Расчет напряжений в к/сети



$tF = 5 \quad I_p(5, tF) = -4408.262$



▲ Распределение напряжений в к/сети

▼ Расчет тока усиливающего пункта

```

_Iup(t) :=
  U_min ← U'_{k1}(t, 0)
  x_min ← 0
  n ← 1
  for x ∈ 0..L
    if U'_{k1}(t, x) < U_min
      U_min ← U'_{k1}(t, x)
      x_min ← x
      n ← 1
  for x ∈ 0..L
    if U'_{k2}(t, x) < U_min
      U_min ← U'_{k2}(t, x)
      x_min ← x
      n ← 2
    if (U'_{k2}(t, x) = U_min) · (|x_up5 - x_min| < |x_up5 - x|)
      U_min ← U'_{k2}(t, x)
      x_min ← x
      n ← 2
  if U_min < U_{cr}
    _I_up ← 1
    _I_up_ ← 1
    _ΔU_d ← U_{d1}(t) - U_{d2}(t)
    _I_up ← root[ΔU'_{k1}(t, x_min, 0) + ΔU_{k1_up}(5, x_up5, _I_up, x_min) - (U_{d1}(t) - U_{cr}), _I_up] if n
    _I_up ← root[ΔU'_{k2}(t, x_min, 0) + ΔU_{k2_up}(5, x_up5, _I_up, x_min) - (U_{d1}(t) - U_{cr}), _I_up] othe
    _I_f12 ← I_f12(t, x_up5, _I_up)
    _I_f34 ← I_f34(t, x_up5, _I_up)
    _I_yp ← I'_yp(t, _I_f12, _I_f34)

```

```


$$\Delta U_d \leftarrow U_d(U_{01}, \rho_1, I_{fl2} + I_{yp}) - U_d(U_{02}, \rho_2, I_{f34} - I_{yp}) \quad 346$$

_I_up_  $\leftarrow$  root[ $\Delta U'_{k1}(t, x_{min}, I_{yp}) + \Delta U_{k1\_up}(5, x_{up5}, I_{up}, x_{min}) + I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min} - (U_d$ 
_I_up_  $\leftarrow$  root[ $\Delta U'_{k2}(t, x_{min}, I_{yp}) + \Delta U_{k2\_up}(5, x_{up5}, I_{up}, x_{min}) + I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min} - (U_d$ 
trace("t = {0} Iup = {1}" , t, I_up_)
while |I_up - I_up_| > 0.1
| I_up  $\leftarrow$  I_up_
| I_fl2  $\leftarrow$  I_fl2(t, x_up5, I_up)
| I_f34  $\leftarrow$  I_f34(t, x_up5, I_up)
| I_yp  $\leftarrow$  I_yp(t, I_fl2, I_f34)
|  $\Delta U_d \leftarrow U_d(U_{01}, \rho_1, I_{fl2} + I_{yp}) - U_d(U_{02}, \rho_2, I_{f34} - I_{yp})$ 
| I_up_  $\leftarrow$  root[ $\Delta U'_{k1}(t, x_{min}, I_{yp}) + \Delta U_{k1\_up}(5, x_{up5}, I_{up}, x_{min}) + I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min} - ($ 
| I_up_  $\leftarrow$  root[ $\Delta U'_{k2}(t, x_{min}, I_{yp}) + \Delta U_{k2\_up}(5, x_{up5}, I_{up}, x_{min}) + I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min} - ($ 
trace("t = {0} x_min = {1} Iup = {2} Iyp = {3} I_fl2 = {4} I_f34 = {5}" , t, x_min, I_up_, I_yp, I_fl2
I_up_  $\leftarrow$  0 otherwise
I_up_

```

```

_vIup := | for t  $\in$  0..T    if f_Calc_Iup = 1    _vIup = 0
| vec_t  $\leftarrow$  Iup(t)
| vec

```

```

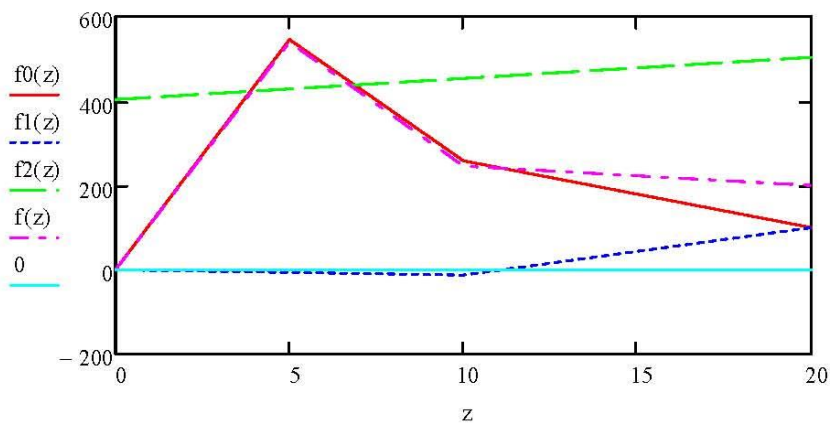
min_Uk1_x := | min  $\leftarrow$  U'_k1(tF, 0)    min_Uk1_x = 5
| x_min  $\leftarrow$  0
| for x  $\in$  1 .. L
|   if U'_k1(tF, x) < min
|     | min  $\leftarrow$  U'_k1(tF, x)
|     | x_min  $\leftarrow$  x
|   x_min

```

$$U_{k1}(tF, \min_Uk1_x) = 3122.331$$

$$Iur := 100 \quad 300 + I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min} \quad f_0(z) := \Delta U'_{k1}(tF, z, Iur)$$

$$f_1(z) := \Delta U_{k1_up}(5, x_{up5}, 500, z) + Iur \cdot r_0 \cdot z \quad f(z) := f_0(z) + f_1(z) \quad f_2(z) := U_{d1}(tF) - 3000 + Iur \cdot r_0 \cdot z$$



$$_I_{up} := 1$$

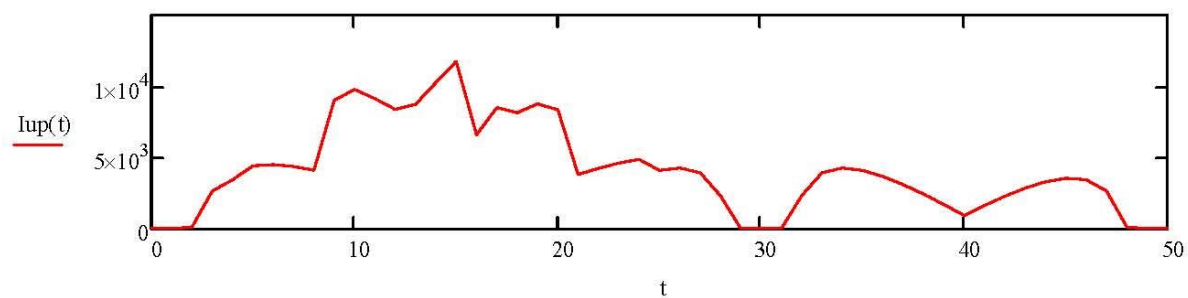
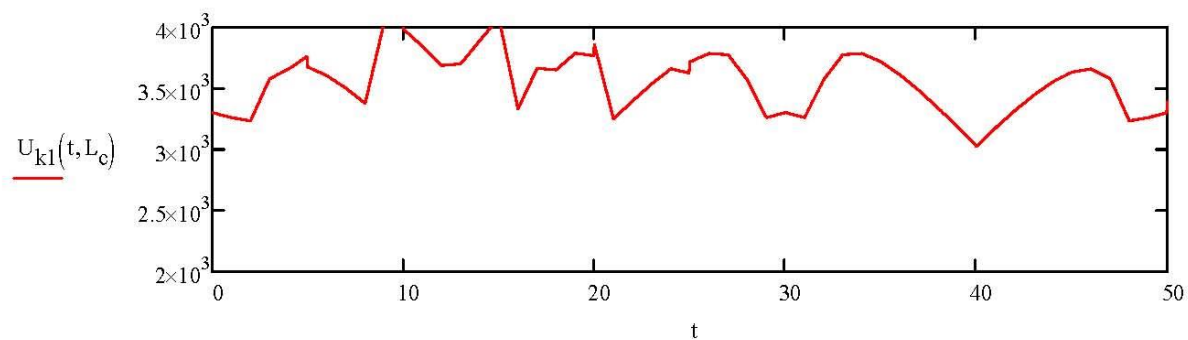
$$\text{root}[\Delta U_{k1}(tF, 5, 0) + \Delta U_{k1_up}(5, x_{up5}, _I_{up}, 5) - (300 + 100 \cdot r_0 \cdot 5), _I_{up}] = 3132.5$$

$$tF = 5$$

$$\Delta U_{k2}(t, x_{min}, _I_{yp}) + \Delta U_{k2_up}(5, x_{up5}, _I_{up}, x_{min}) + _I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min} - (U_{d1}(t) - 3000 + _I_{yp} \cdot r_0 \cdot x_{min}),$$

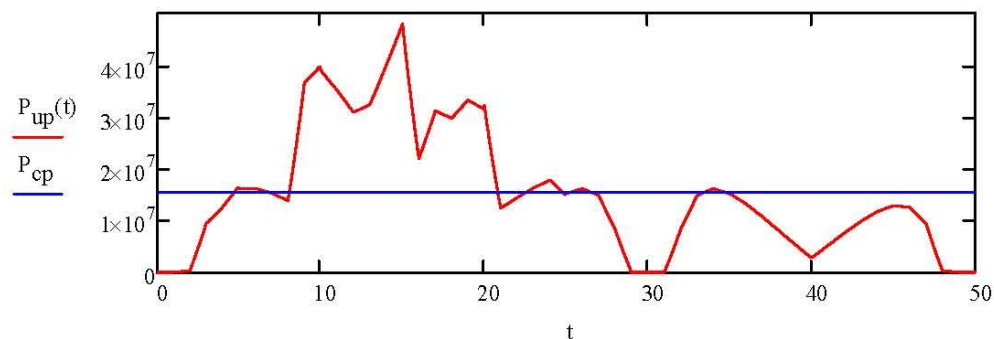
Расчет тока усиливающего пункта

Мощность усиливающего пункта



$$P_{up}(t) := U_{k1}(t, L_c) \cdot I_{up}(t)$$

$$P_{cp} := \frac{1}{T} \cdot \sum_{tt=0}^{\text{round}(T)} P_{up}(tt) = 15453671.32$$



Мощность усиливающего пункта

```

M := if f_Neuro
    for i ∈ 0,1..L
        vec0,i ← concat("Uk1_", num2str(i))
        vec0,i+L+1 ← concat("Uk2_", num2str(i))
    vec0,2·L+2 ← "Iup"
    for t ∈ 0,1..T
        for x ∈ 0,1..L
            vect+1,x ← Uk1(t,x)
            vect+1,x+L+1 ← Uk2(t,x)
            vect+1,2·L+2 ← Iup(t)
vec
    
```

	0	1	2	3	4	5
0	"Uk1_0"	"Uk1_1"	"Uk1_2"	"Uk1_3"	"Uk1_4"	"Uk1_5"
1	3260.397	3264.514	3268.63	3272.747	3276.864	3280.98
2	3267.966	3117.175	3133.033	3148.892	3164.751	3180.609
3	3275.535	3136.486	2997.436	3025.037	3052.638	3080.238
4	3283.104	3155.797	3028.489	2901.182	2940.524	2979.867
5	3290.675	3175.11	3059.545	2943.981	2828.416	2879.501
6	3281.441	3170.05	3058.658	2947.267	2835.875	2724.484
M = 7	3281.441	3178.382	3075.323	2972.264	2869.205	2766.146
8	3281.441	3186.715	3091.988	2997.262	2902.535	2807.809
9	3281.441	3195.047	3108.653	3022.259	2935.865	2849.471
10	3281.441	3203.38	3125.318	3047.257	2969.195	2891.134
11	3113.257	3051.095	2988.933	2926.771	2864.61	2802.448
12	3120.827	2903.758	2853.338	2802.919	2752.499	2702.08
13	3128.395	2923.067	2717.739	2679.061	2640.383	2601.705
14	3135.966	2942.381	2748.795	2555.21	2528.275	2501.34
15	3143.535	2961.692	2779.848	2598.005	2416.162	...

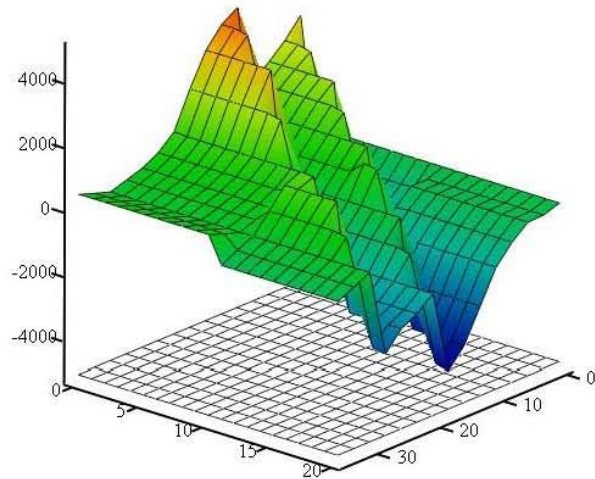
```
Z1 := if f_3D
      | i ← 0
      | for t ∈ 0..T
      |   for x ∈ 0..L
      |     Zi,0 ← t
      |     Zi,1 ← x
      |     Zi,2 ← I'_{k1}(t,x)
      |     Mx,t ← I'_{k1}(t,x)
      |     i ← i + 1
      |   Z ←  $\begin{pmatrix} Z^{(0)} \\ Z^{(1)} \\ Z^{(2)} \end{pmatrix}$ 
      | Z
```

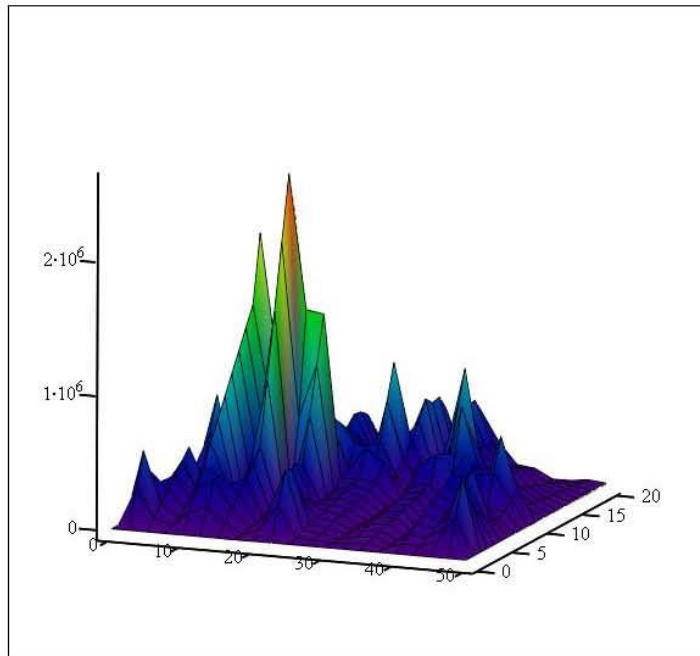
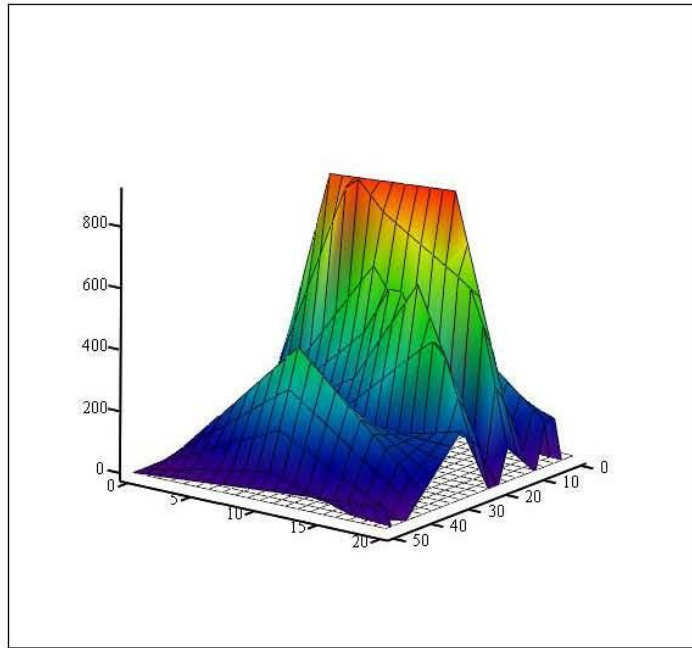
```
Z1_ := if f_3D
       | i ← 0
       | for t ∈ 0..T
       |   for x ∈ 0..L
       |     Mx,t ← I'_{k1}(t,x)
       |     i ← i + 1
       |   M
```

```
Z2 := if f_3D
      | i ← 0
      | for t ∈ 0..T
      |   for x ∈ 0..L
      |     Zi,0 ← t
      |     Zi,1 ← x
      |     Zi,2 ← ΔU'_{k1}(t,x)
      |     i ← i + 1
      |   Z ←  $\begin{pmatrix} Z^{(0)} \\ Z^{(1)} \\ Z^{(2)} \end{pmatrix}$ 
      | Z
```

```
Z3 := if f_3D
      | i ← 0
      | for t ∈ 0..T
      |   for x ∈ 0..L
      |     Zi,0 ← t
      |     Zi,1 ← x
      |     Zi,2 ← ΔPk(t,x)
      |     i ← i + 1
      |   Z ←  $\begin{pmatrix} Z^{(0)} \\ Z^{(1)} \\ Z^{(2)} \end{pmatrix}$ 
      | Z
```

```
Z4(a) := if f_3D
         | i ← 0
         | for t ∈ 0..T
         |   for x ∈ 0..L
         |     Zi,0 ← t
         |     Zi,1 ← x
         |     Zi,2 ← a
         |     i ← i + 1
         |   Z ←  $\begin{pmatrix} Z^{(0)} \\ Z^{(1)} \\ Z^{(2)} \end{pmatrix}$ 
         | Z
```





```

dL := 2      I_ek1(t) :=
j ← 0
Rj,0 ← 0
Rj,1 ←  $\frac{U'_{k1}(t,0) - U'_{k1}(t,0 + dL)}{r_0 \cdot dL}$ 
for x ∈ dL, 2·dL .. L - dL
    R- ←  $\frac{U'_{k1}(t,x) - U'_{k1}(t,\text{round}(x + dL,6))}{r_0 \cdot dL}$ 
    if |R- - Rrows(R)-1,1| > 0.01
        j ← j + 1
        Rj,0 ← x - 0.0001
        Rj,1 ← Rrows(R)-2,1
        j ← j + 1
        Rj,0 ← x
        Rj,1 ← R-
j ← j + 1
Rj,0 ← Rrows(R)-1,0 +  $\frac{L - R_{\text{rows}(R)-1,0}}{2} - 0.001$ 
Rj,1 ← Rrows(R)-2,1
j ← j + 1
Rj,0 ← Rrows(R)-1,0 + 0.001
Rj,1 ←  $\frac{U'_{k1}(t,L - dL) - U'_{k1}(t,L)}{r_0 \cdot dL}$ 
j ← j + 1
Rj,0 ← L
Rj,1 ←  $\frac{U'_{k1}(t,L - dL) - U'_{k1}(t,L)}{r_0 \cdot dL}$ 
R

```

```

I_ek2(t) := | j ← 0
              Rj,0 ← 0
              Rj,1 ←  $\frac{U'_{k2}(t,0) - U'_{k2}(t,0 + dL)}{r_0 \cdot dL}$ 
              for x ∈ dL, 2·dL .. L - dL
                | R- ←  $\frac{U'_{k2}(t,x) - U'_{k2}(t, \text{round}(x + dL, 6))}{r_0 \cdot dL}$ 
                  | if |R- - Rrows(R)-1,1| > 0.01
                    | | j ← j + 1
                      | | Rj,0 ← x - 0.0001
                      | | Rj,1 ← Rrows(R)-2,1
                      | | j ← j + 1
                      | | Rj,0 ← x
                      | | Rj,1 ← R-
                    | j ← j + 1
                Rj,0 ← Rrows(R)-1,0 +  $\frac{L - R_{\text{rows}(R)-1,0}}{2} - 0.001$ 
                Rj,1 ← Rrows(R)-2,1
                j ← j + 1
                Rj,0 ← Rrows(R)-1,0 + 0.001
                Rj,1 ←  $\frac{U'_{k2}(t,L - dL) - U'_{k2}(t,L)}{r_0 \cdot dL}$ 
                j ← j + 1
                Rj,0 ← L
                Rj,1 ←  $\frac{U'_{k2}(t,L - dL) - U'_{k2}(t,L)}{r_0 \cdot dL}$ 
              R

```

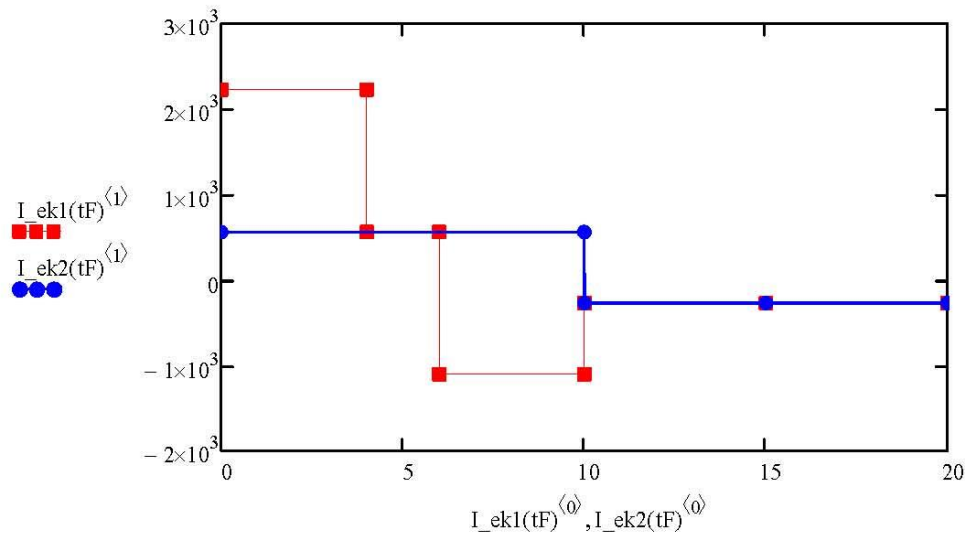
$$I_{ek1}(t,x) := \text{linterp}(I_{ek1}(t)^{\langle 0 \rangle}, I_{ek1}(t)^{\langle 1 \rangle}, x)$$

$$I_{ek2}(t,x) := \text{linterp}(I_{ek2}(t)^{\langle 0 \rangle}, I_{ek2}(t)^{\langle 1 \rangle}, x)$$

```

xx := | i ← 0
       | veci ← 0
       | for j ∈ dL, 2·dL .. L - dL
         | | i ← i + 1
         | | veci ← j
         | i ← i + 1
         | veci ← L
       | vec

```



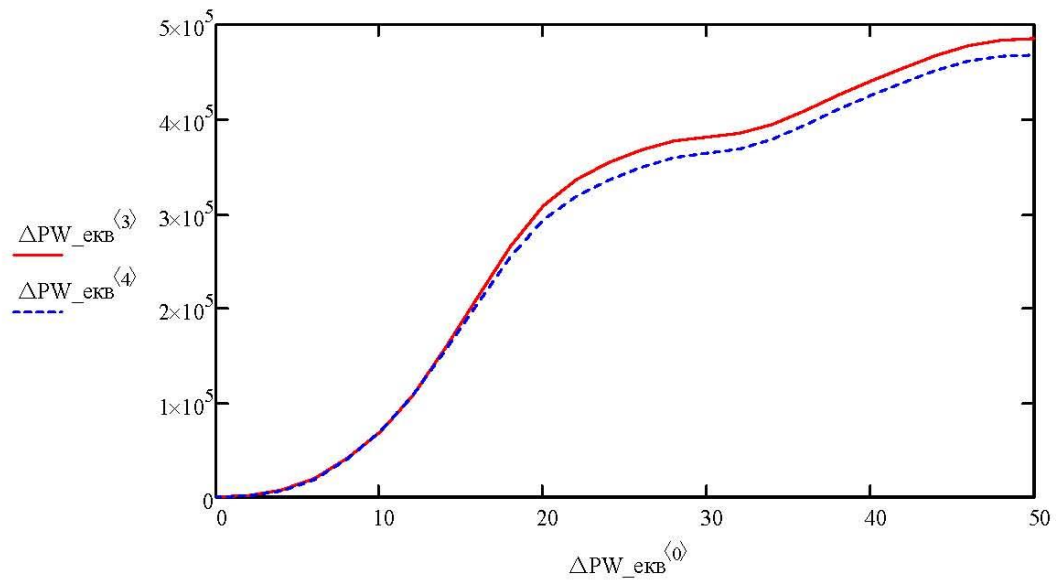
$$I_{ek2}(tF) = \begin{pmatrix} 0 & 561.3302 \\ 9.9999 & 561.3302 \\ 10 & -271.9198 \\ 14.999 & -271.9198 \\ 15 & -271.9198 \\ 20 & -271.9198 \end{pmatrix}$$

$$\Delta U_{ek1}(t) := \begin{cases} j \leftarrow 0 \\ R_{j,1} \leftarrow \Delta U_{k1}(t,0) \\ R_{j,0} \leftarrow 0 \\ \text{for } x \in dL, 2dL \dots L - dL \\ \quad \begin{cases} j \leftarrow j + 1 \\ R_{j,1} \leftarrow \Delta U_{k1}(t,x) \\ R_{j,0} \leftarrow x \end{cases} \\ j \leftarrow j + 1 \\ R_{j,1} \leftarrow \Delta U_{k1}(t,L) \\ R_{j,0} \leftarrow L \\ R \end{cases}$$

$$\Delta U_{ek2}(t) := \begin{cases} j \leftarrow 0 \\ R_{j,1} \leftarrow \Delta U_{k2}(t,0) \\ R_{j,0} \leftarrow 0 \\ \text{for } x \in dL, 2dL \dots L - dL \\ \quad \begin{cases} j \leftarrow j + 1 \\ R_{j,1} \leftarrow \Delta U_{k2}(t,x) \\ R_{j,0} \leftarrow x \end{cases} \\ j \leftarrow j + 1 \\ R_{j,1} \leftarrow \Delta U_{k2}(t,L) \\ R_{j,0} \leftarrow L \\ R \end{cases}$$

$$\Delta U_{ek1}(t,x) := \text{linterp}(\Delta U_{ek1}(t)^{\langle 0 \rangle}, \Delta U_{ek1}(t)^{\langle 1 \rangle}, x)$$

$$\Delta U_{ek2}(t,x) := \text{linterp}(\Delta U_{ek2}(t)^{\langle 0 \rangle}, \Delta U_{ek2}(t)^{\langle 1 \rangle}, x)$$



$$\frac{\Delta PW_{\text{екв}}_{\text{rows}(\Delta PW_{\text{екв}})-1,3} - \Delta PW_{\text{екв}}_{\text{rows}(\Delta PW_{\text{екв}})-1,4}}{\Delta PW_{\text{екв}}_{\text{rows}(\Delta PW_{\text{екв}})-1,3}} \cdot 100 = 3.58514$$

▣ Анализ погрешности учета потерь

ДОДАТОК Б

ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ДП «ОДЕСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту



С. В. Мямлін

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Шевченківської дистанції
електропостачання Одеської залізниці



С. М. Малиш

ПРОГРАМА

**експериментальних вимірювань параметрів перетікання електроенергії
між тяговими підстанціями змінного струму**

Узгоджено:

Начальник ремонтно-ревізійної дільниці
Шевченківської дистанції електропостачання

П. Г. Шевцов

Експериментальним шляхом дослідити режими роботи тягової підстанції змінного струму в умовах наявності перетоків електроенергії з суміжною підстанцією.

Визначити баланс електроенергії за основними приєднаннями тягової підстанції: первинна мережа, районна мережа, тягова мережа.

Оцінити баланс електроенергії в тяговій мережі між дослідною та суміжною підстанціями, які паралельно живлять тягову мережу.

Дослідити можливість вирівнювання рівнів напруги на шинах суміжних тягових підстанцій для унеможливлення протікання вирівнювальних струмів.

Розробити рекомендації щодо виявлення причин виникнення вирівнювальних струмів та його впливу на баланс електричної енергії.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	1
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	3
9.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	2
10.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягової підстанції	ЕЧЕ
2.	Однолінійна схема тягової підстанції	ЕЧЕ
3.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
4.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
5.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	ЕЕЛ
6.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіна	РРД
7.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ
8.	Поздовжній профіль ділянки	ЕЧТ

Експеримент проводиться на 1-й тяговій підстанції ЕЧЕ-2, Одеської залізниці.

ЕЧ-2 Одеської залізниці відповідно з програмою готує місця проведення вимірів на дослідній тяговій підстанції. Вимірювання проводяться у вторинних колах трансформаторів напруги ТН-27,5 кВ двох секцій одночасно ТН-1, ТН-2.

Схема приєднання засобів вимірювальної техніки наведені на рис. 1.

Для підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів напруги і струму необхідне узгодження з відповідною службою енергопередаючої компанії.

Підключення в кола вторинної напруги виконується контактним з'єднанням за допомогою «крокодилів».

Для підключення гнучких роз'ємних кліщів типу LEM-Flex та узгодження діапазону вимірювань вимагається послідовне врізання в кола струму провідників з шістьма повними витками або виконання таких витків $\varnothing 25-40$ мм за наявності достатньої довжини на проводах кожної фази трансформатора струму вторинної сторони (рис. 2).

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювань у разі необхідності залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікованим працівником РРД під контролем представника ДНУЗТ.

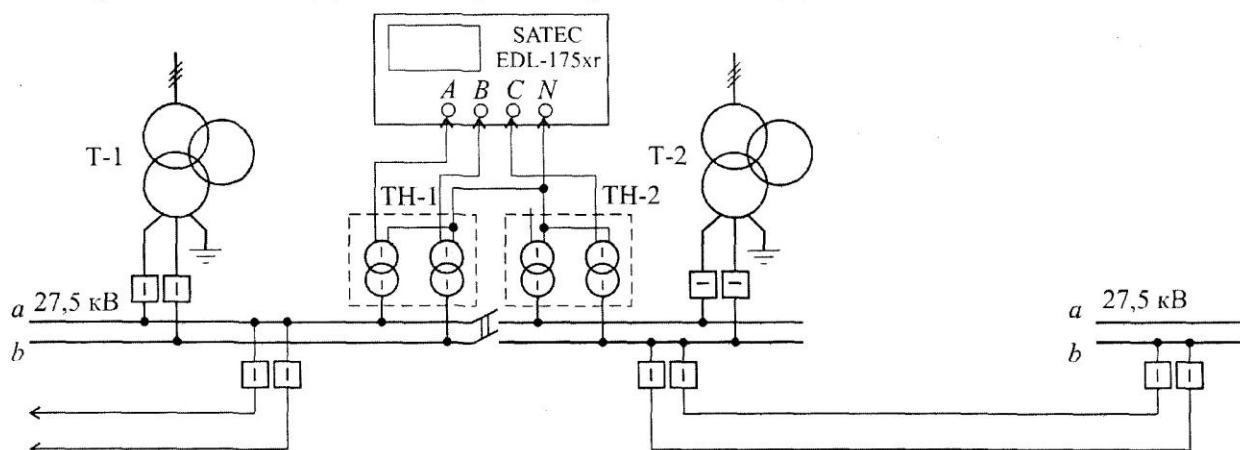


Рис 1. Схема проведення вимірювань на тяговій підстанції

Для проведення вимірювань на ЕЧЕ-2 вимагаються оперативні перемикання у схемі живлення пристроїв електропостачання, а саме розділення секцій шин 27,5 кВ за допомогою відключення секційного роз'єднувача РУ-27,5 кВ та консольного живлення ділянки від суміжної тягової підстанції.

В такому випадку за допомогою наявного аналізатора EDL-175xг відповідно зі схемою можна виміряти різницю між напругами суміжних тягових підстанцій за

величиною та кутом зміщення фаз. Саме кут зміщення векторів напруги, що живлять міжпідстанційну зону визначатиме можливість протікання активності перетоків електроенергії.

Дату та час проведення експерименту визначає Шевченківська дистанція електропостачання Одеської залізниці. Дистанція призначає відповідальних за проведення експерименту та інструктажі причетних.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснює дистанція електропостачання у встановленому порядку.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

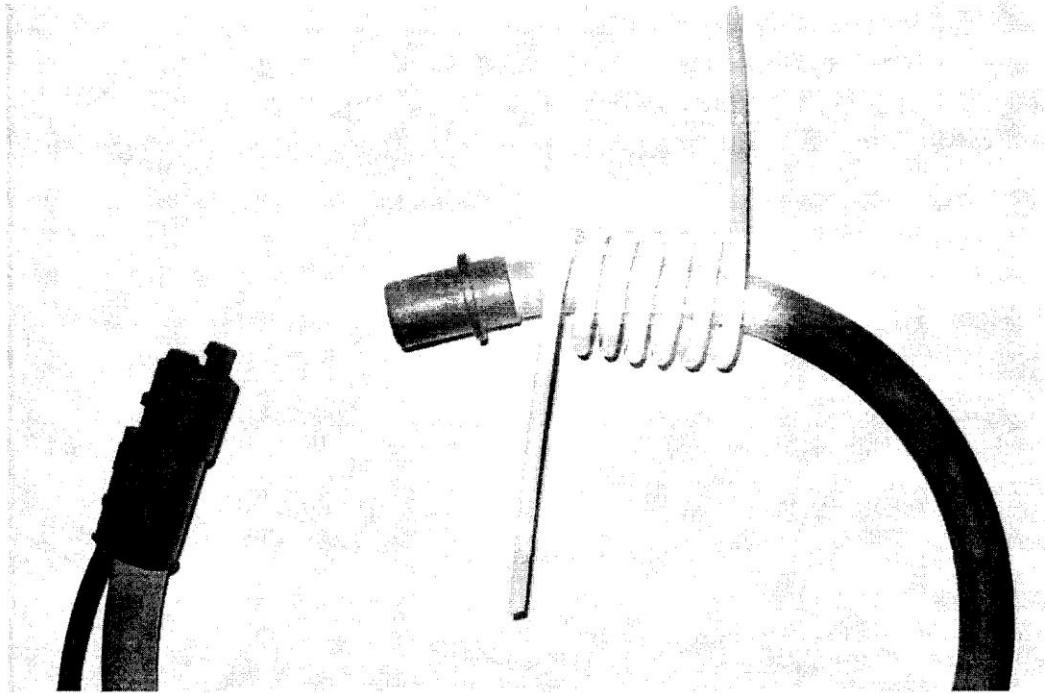


Рис. 2. Зразок виконання витків для підключення роз'ємних кліщів LEM-Flex

Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на ЕЧЕ-2 Одеської залізниці необхідно провести для вимушеного режиму роботи протягом можливого періоду часу, при роботі на дослідній підстанції одного тягового трансформатора, при роботі трансформаторів напруги ТН-1, ТН-2 обох секцій шин 27,5 кВ та консольному живленні ділянки від суміжної тягової підстанції.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих регістраторами та аналізаторами на тяговій підстанції.

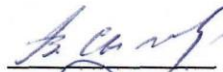
Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднанні 27,5 кВ тягової підстанції. Виконується обчислення балансу електроенергії в межах дослідної ділянки та розподіл електроенергії між дослідними

підстанціями в тяговій мережі з урахуванням перетікань електроенергії. Результати³⁶¹ вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – дистанція електропостачання, ДНУЗТ.

Експеримент проводять – представники ДНУЗТ, представник дистанції електропостачання, фахівець ремонтно-ревізійної дільниці, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: д.т.н., с.н.с.



В. Г. Сиченко

к.т.н., докторант



Д. О. Босий

ДП «ПІВДЕННА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник відокремленого підрозділу
«Служба електропостачання»
ДП «Південна залізниця»

С. Л. Кравчук



ПРОГРАМА

**експериментальних вимірювань параметрів споживання
та показників якості електроенергії на основних приєднаннях
тягової підстанції змінного струму**

Узгоджено:

Начальник Куп'янської дистанції
електропостачання Південної залізниці

В. Г. Чуйко



м. Дніпропетровськ
2013

Експериментальним шляхом дослідити режими роботи тягової підстанції змінного струму в умовах наявності перетоків електроенергії з суміжною підстанцією.

Визначити баланс електроенергії за основними приєднаннями тягової підстанції: первинна мережа, районна мережа, тягова мережа.

Оцінити баланс електроенергії в тяговій мережі між дослідною та суміжною підстанціями, які паралельно живлять тягову мережу.

Дослідити можливість вирівнювання рівнів напруги на шинах суміжних тягових підстанцій для унеможливлення протікання вирівнювальних струмів.

Розробити рекомендації щодо виявлення причин виникнення вирівнювальних струмів та його впливу на баланс електричної енергії.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці Курилівка – Булацелівка Південної залізниці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	3
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	9
3.	Аналізатор якості електроенергії ПАРМА	1
9.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	4
10.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягової підстанції	ЕЧЕ
2.	Однолінійна схема тягової підстанції	ЕЧЕ
3.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
4.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
5.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОВЕ	ЕЕЛ
6.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіона	РРД
7.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ
8.	Поздовжній профіль ділянки	ЕЧТ

Експеримент проводиться на 2-х тягових підстанціях ЕЧЕ-24, ЕЧЕ-35 Південної залізниці.

ЕЧ-5 Південної залізниці відповідно з програмою готує місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання проводяться одночасно в наступних точках:

ЕЧЕ-24 Курилівка

1. Вторинні кола ТН-1-110 кВ, вторинні кола ТФНД-110М вводу 1Т-110 кВ;
2. Вторинні кола ТН-1-27,5 кВ, вторинні кола ТФН-35М вводу 1Т-27,5 кВ;

ЕЧЕ-35 Булацелівка

3. Вторинні кола ТН-1-110 кВ, вторинні кола ТВТ-110 вводу ТП-1 110 кВ;
4. Вторинні кола ТН-1-27,5 кВ, вторинні кола ТФНД-35М вводу ТП-1 27,5 кВ.

Схеми приєднання засобів вимірювальної техніки наведені на рис. 1.

Для підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів напруги і струму необхідне узгодження з відповідною службою електропередавальної компанії.

Підключення в кола вторинної напруги виконується контактним з'єднанням за допомогою «крокодилів».

Для підключення гнучких роз'ємних кліщів типу LEM-Flex та узгодження діапазону вимірювань вимагається послідовне врізання в кола струму провідників з шістьма повними витками або виконання таких витків \varnothing 25-40 мм за наявності достатньої довжини на проводах кожної фази трансформатора струму вторинної сторони (рис. 2). У разі можливості підключення гнучких кліщів до кабельного вводу 27,5 кВ, врізання у вторинні кола вимірювального трансформатора струму не вимагається.

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, а також за наявності сертифікату на обладнання та їх випробовування, згідно ПБЕЕС п.6.10.9

ТОВ «ЕТС» надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювань також залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікованим працівником ТОВ «ЕТС», які мають певну групу з електробезпеки та інші документи згідно ПБЕЕС п.6.10, під контролем представника РРД.

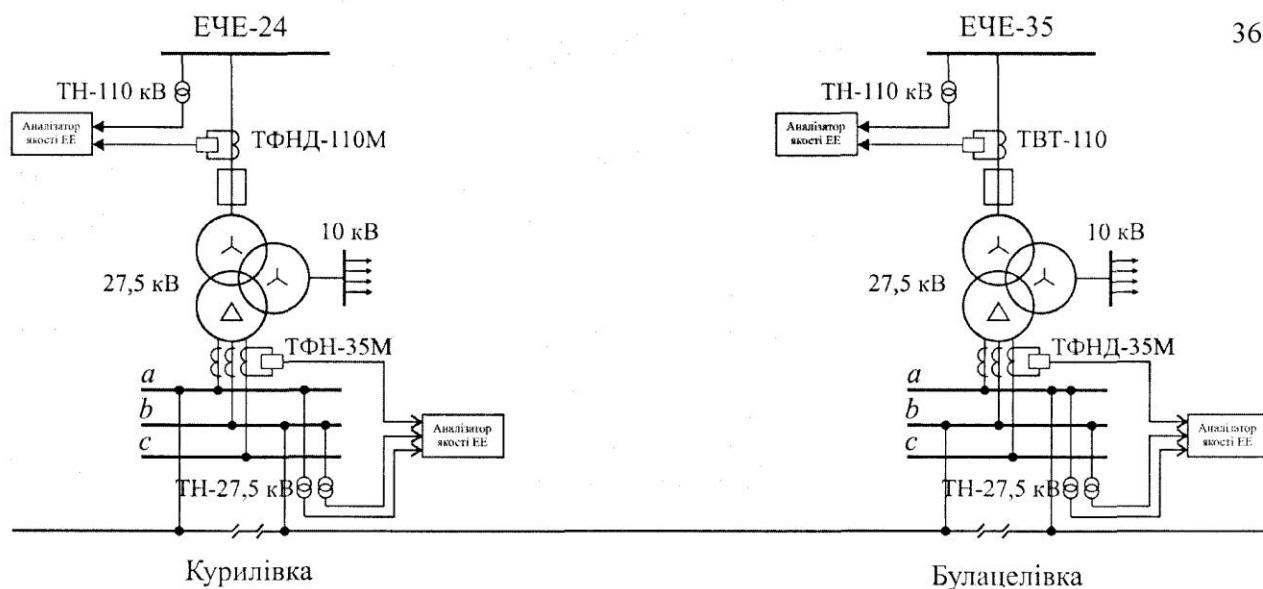


Рис 1. Загальна схема проведення вимірювань на тягових підстанціях

Оперативних перемикачів у схемі живлення пристроїв електропостачання для проведення вимірювань на тяговій підстанції не вимагається.

Дату та час проведення експерименту визначає служба електропостачання Південної залізниці. Служба призначає відповідальних за проведення експерименту.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснює підрозділ служби електропостачання у встановленому порядку.

Проведення вимірювань здійснюють представники ТОВ «ЕТС».

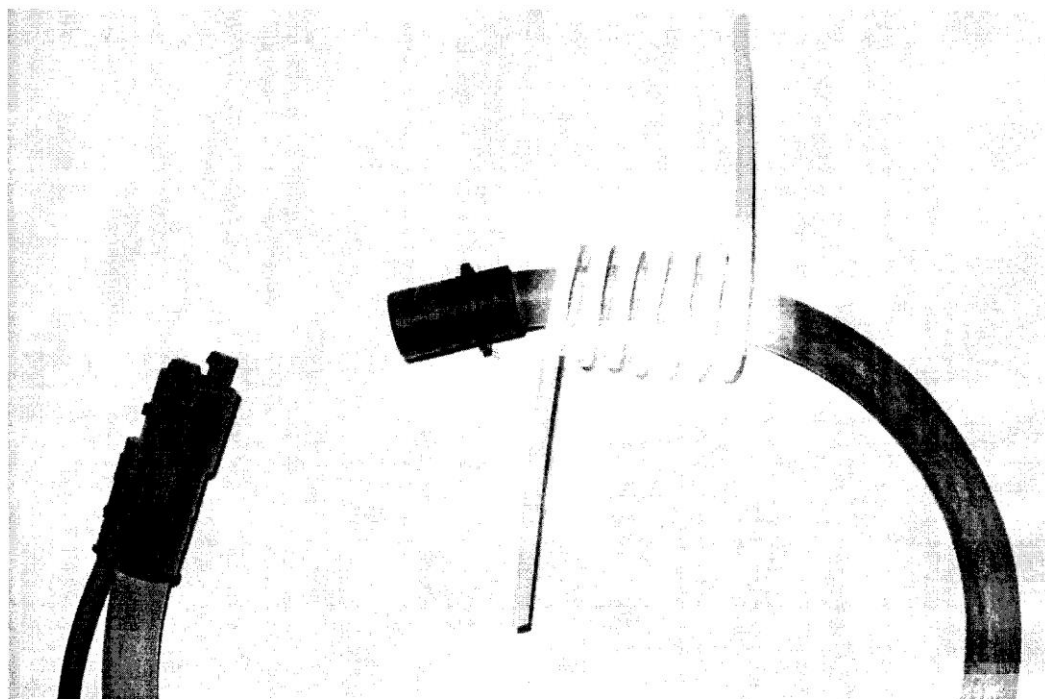


Рис. 2. Зразок виконання витків для підключення роз'ємних кліщів LEM-Flex

Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на ЕЧЕ-24, 35 Південної залізниці необхідно провести для нормального режиму роботи протягом повних 24 годин, тобто при роботі одного тягового трансформатора.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих реєстраторами та аналізаторами на тягових підстанціях.

Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднаннях 27,5 кВ тягових підстанцій. Виконується обчислення балансу електроенергії в межах дослідної ділянки та розподіл електроенергії між дослідними підстанціями в тяговій мережі з урахуванням перетікань електроенергії. Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – служба електропостачання, ТОВ «ЕТС».

Експеримент проводять – представники ТОВ «ЕТС», представник служби, представники дистанції електропостачання, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: д.т.н., с.н.с.  В. Г. Сиченко
д.т.н., професор  В. Г. Кузнецов
к.т.н., доцент  Д. О. Босий



ДП «ПІВДЕННА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник відокремленого підрозділу
«Служба електропостачання»
ДП «Південна залізниця»

С. Л. Кравчук



ПРОГРАМА

**експериментальних вимірювань параметрів споживання
та показників якості електроенергії на основних приєднаннях
тягової підстанції постійного струму**

Узгоджено:

Начальник Лозівської дистанції
електропостачання Південної залізниці



Ю. О. Шопін

м. Дніпропетровськ
2013

Експериментальним шляхом дослідити режими роботи тягової підстанції постійного струму в умовах спотворення якості електричної енергії.

Визначити баланс електроенергії за основними приєднаннями тягової підстанції: первинна мережа, районна мережа, тягова мережа.

Визначити раціональні рівні напруги на шинах тягових підстанцій та раціональну кількість паралельно працюючих силових і перетворювальних трансформаторів, випрямних агрегатів.

Оцінити баланс електроенергії в тяговій мережі між дослідною та двома суміжними підстанціями, які паралельно живлять тягову мережу.

Розробити рекомендації щодо виявлення джерел погіршення якості електричної енергії та його впливу на баланс електричної енергії.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці Лозова – Герсеваново – Біляївка Південної залізниці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	3
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	9
3.	Датчик напруги LEM CV4-6000	1
5.	Датчик постійного струму	2
6.	Високовольтний резистор діляника напруги ДН	3
7.	Аналогово-цифровий перетворювач типу USB-6009	1
8.	Комплект радіопередачі даних RFA1	4
9.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	6
10.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягової підстанції	ЕЧЕ
2.	Однолінійна схема тягової підстанції	ЕЧЕ
3.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
4.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
5.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	ЕЕЛ
6.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіна, ЦЗАФ-3,3	РРД
7.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ
8.	Поздовжній профіль ділянки	ЕЧТ

Експеримент проводиться на 3-х тягових підстанціях ЕЧ-6 Лозова Південної залізниці: ЕЧЕ-5 Біляївка, ЕЧЕ-6 Герсеваново, ЕЧЕ-7 Лозова.

ЕЧ-6 Південної залізниці відповідно з програмою готує місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання проводяться одночасно в наступних точках:

ЕЧЕ-5 Біляївка

1. Вторинні кола ТН-10-2 НТМИ-10 кВ, вторинні кола ТПОЛ-10-1000/5 вводу МВ-10-Т-2;
2. Комірка БАОД КВ-2 3,3 кВ.
3. Фільтруючий пристрій (відсос) 3,3 кВ.

ЕЧЕ-6 Герсеваново

4. Вторинні кола ТН2-10 НТМИ-10 кВ, вторинні кола ТПОЛ-10-800/5 вводу МВ-10-КВ-2;
5. Комірка БАОД КВ-2 3,3 кВ.
6. Фільтруючий пристрій (відсос) 3,3 кВ.

ЕЧЕ-7 Лозова

7. Вторинні кола ТН-10-2 НТМИ-10 кВ, вторинні кола ТПОФД-10-1000/5 вводу МВ-10-КВ-2;
8. Комірка БАОД КВ-2 3,3 кВ.
9. Фільтруючий пристрій (відсос) 3,3 кВ.

Схеми приєднання засобів вимірювальної техніки наведені на рис. 1.

Для підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів напруги і струму необхідне узгодження з відповідною службою електропередавальної компанії.

Підключення в кола вторинної напруги виконується контактним з'єднанням за допомогою «крокодилів».

Для підключення гнучких роз'ємних кліщів типу LEM-Flex та узгодження діапазону вимірювань вимагається послідовне врізання в кола струму провідників з шістьма повними витками або виконання таких витків \varnothing 25-40 мм за наявності достатньої довжини на проводах кожної фази трансформатора струму вторинної сторони (рис. 2).

Приєднання датчиків напруги LEM LV100-3000 виконується контактним способом безпосередньо на струмоведучі частини 3 кВ зі зняттям напруги.

Для приєднання інших датчиків постійного струму вимагається наявність вимірювального шунта у «+» та «-» шинах випрямного агрегату.

Для живлення аналізаторів, датчиків струму і напруги, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, а також за наявності сертифікату на обладнання та їх випробовування, згідно ПБЕЕС п.6.10.9

ТОВ «ЕТС» надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювань також залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікованим працівником ТОВ «ЕТС», які мають певну групу з електробезпеки та інші документи згідно ПБЕЕС п.6.10, під контролем представника РРД.

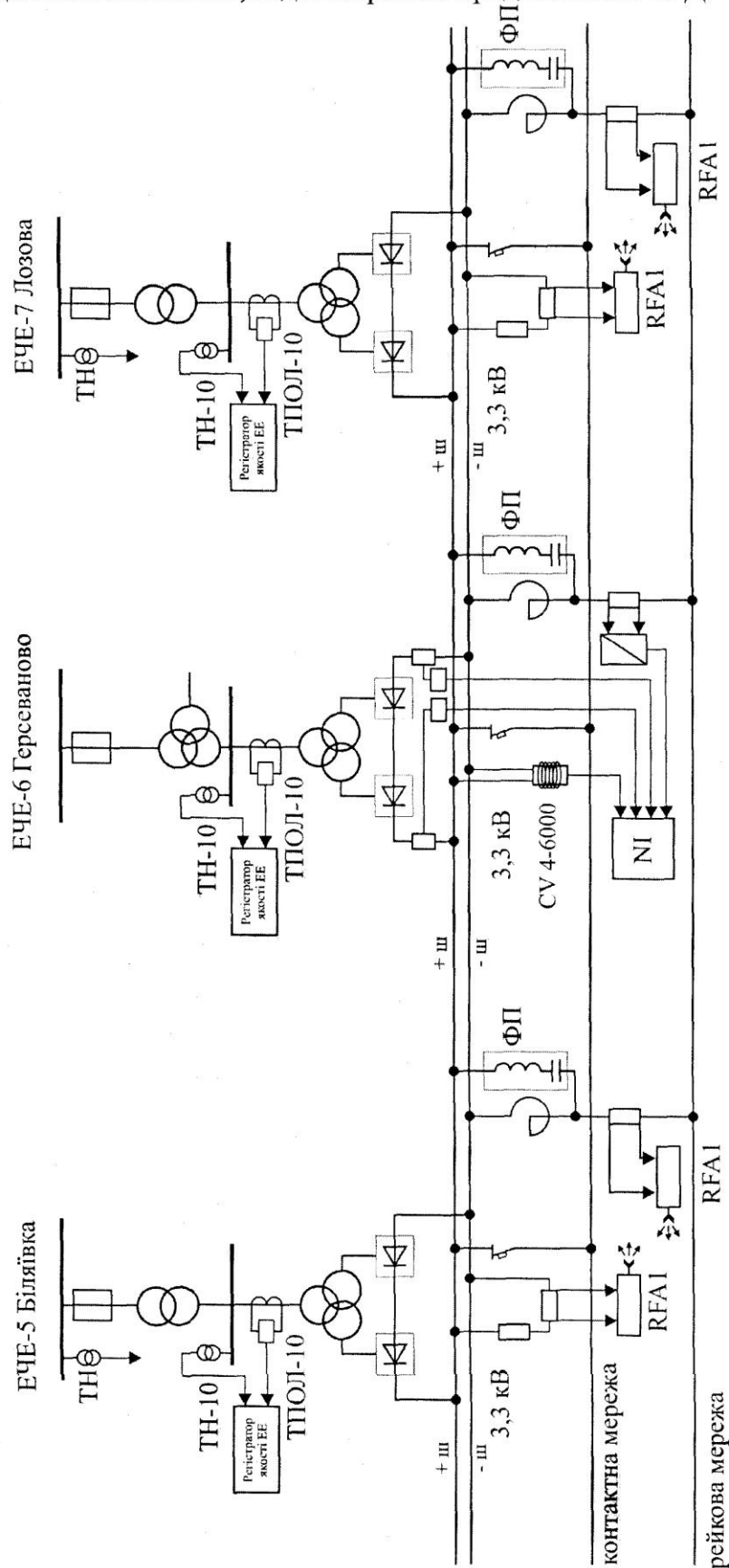


Рис 1. Загальна схема проведення вимірювань на тягових підстанціях

Оперативні перемикання у схемі живлення пристроїв електропостачання для проведення вимірювань на тяговій підстанції, виконуються енергодиспетчером у відповідності з погодженою зі службою електропостачання програмою за попереднім замовленням, або по бланкам перемикачів.

Порядок виконання оперативних перемикачів та підключень вимірювальної техніки у комірці БАОД-3,3 кВ на ЕЧЕ-6 Герсеваново наступний:

1. Відключити вимикач МВ-10 КВ-2 РУ-10 кВ
2. Відключити швидкодіючий вимикач БАОД КВ-2 РУ-3,3 кВ
3. Відключити шинні роз'єднувачі ШР-10 КВ-2, \pm РЗД КВ-2 РУ-3,3 кВ
4. Включити заземлюючі ножі Зн МВ-10 КВ-2, Зн \pm КВ-2 РУ-3,3 кВ
5. Виконати врізання вимірювального шунта у «+» шину 3,3 кВ
6. Підключити датчик напруги LEM CV4-6000 до «+» та «-» шини.
7. Підключити до вимірювальних шунтів пристрої оптичної ізоляції.
8. Виконати підключення інформаційних каналів датчиків до портативного комп'ютера через пристрій узгодження.
9. Підключити пристрій оптичної ізоляції до шунта загальнопідстанційного струму.
10. Увести в роботу випрямний агрегат КВ-2, виконуючи відповідні дії у зворотній послідовності.
11. Перевести навантаження на випрямний агрегат КВ-2 шляхом відключення КВ-1.

Підключення пристрою оптичної ізоляції до шунта загальнопідстанційного струму виконується при переведенні підстанції в режим поста секціонування та повному відключенні і заземленні РУ-3,3 кВ.

Порядок виконання оперативних перемикачів та підключень вимірювальної техніки на ЕЧЕ-5 Біляївка та ЕЧЕ-7 Лозова:

1. Вивести з роботи випрямний агрегат КВ-2 РУ-3,3 кВ для цього відключити відповідний вимикач МВ-10 кВ та БАОД КВ-2 РУ-3,3 кВ.
2. Виконати необхідні відключення роз'єднувачів та включення заземлюючих ножів.
3. Підключити до «+» та «-» шини резистивний дільник напруги з пристроєм передачі даних через радіоканал RFA1.
4. Підключити пристрій RFA1 до шунта загальнопідстанційного струму.
5. Увести в роботу випрямний агрегат КВ-2, виконуючи відповідні дії у зворотній послідовності.

Підключення радіопередаючого пристрою RFA1 до шунта загальнопідстанційного струму виконується при переведенні підстанції в режим поста секціонування та повному відключенні і заземленні РУ-3,3 кВ.

Дату та час проведення експерименту визначає служба електропостачання Південної залізниці. Служба призначає відповідальних за проведення експерименту.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснює підрозділ служби електропостачання у встановленому порядку.

Проведення вимірювань здійснюють представники ТОВ «ЕТС».

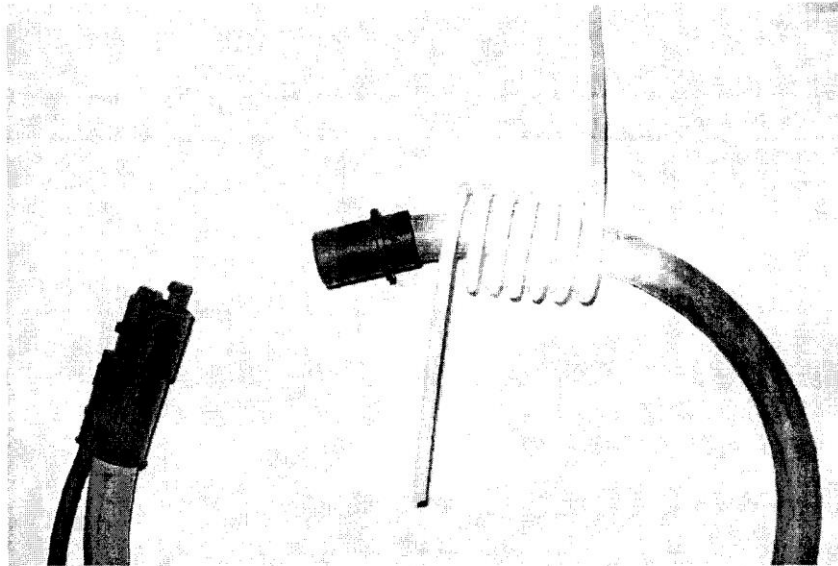


Рис. 2. Зразок виконання витків для підключення роз'ємних кліщів LEM-Flex

Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на ЕЧЕ-5, 6, 7 Південної залізниці необхідно провести нормального режиму роботи протягом повних 24 годин, тобто при роботі одного тягового трансформатора і одного випрямного агрегату.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих регістраторами та аналізаторами на тягових підстанціях.

Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднаннях тягової підстанції. Виконується обчислення балансу електроенергії в межах дослідної підстанції та розподіл електроенергії між дослідними підстанціями в тяговій мережі. Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – служба електропостачання, ТОВ «ЕТС».

Експеримент проводять представники ТОВ «ЕТС», представник служби, представники дистанції електропостачання, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: д.т.н., с.н.с.

д.т.н., професор

к.т.н., доцент

інженер

В. Г. Сиченко

В. Г. Кузнецов

Д. О. Босий

В. А. Зубенко




МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЗАТВЕРДЖУЮ:

ЗАТВЕРДЖУЮ:


Начальник служби електропостачання
Одеської залізниці


Проректор з наукової роботи
ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна


А. Г. Сажин



СЛУЖБА
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЗАЛІЗНИЦІ
24777408


С. В. Мямлін



МІНІСТЕРСТВО
ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА
В. ЛАЗАРЯНА

ПРОГРАМА

**проведення експериментальних вимірювань обліку витрат електроенергії
при виконанні заїздів електровозів за межі залізниці**

Узгоджено:

Узгоджено:

Начальник локомотивного депо
Знам'янка Одеської залізниці

Начальник Знам'янської дистанції
електропостачання Одеської залізниці


С. В. Греков



ЛОКОМОТИВНЕ
ДЕПО
Знам'янка


О. І. Критін



ДИСТАНЦІЯ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЗАЛІЗНИЦІ

Начальник Дорожньої електротехнічної
лабораторії Одеської залізниці


Ю. М. Сергатий



СЛУЖБА
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЗАЛІЗНИЦІ
24777408

Визначити розподіл витрат електроенергії, що споживається електровозами змінного струму при виконанні заїздів з Одеської на Південну і з Південної на Одеську залізницю.

Перевірити достовірність обліку електроенергії встановленими в електровозах лічильниками електроенергії.

Оцінити показники якості електроенергії в контактній мережі при русі дослідною ділянкою.

Підстава для проведення – лист № Е-16/3252 від 24.09.2014 р.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по ділянці Користівка – Кременчук

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища +10 ... +40°С.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії «SATEC»	2
2.	Датчик струму LEM-Flex	2
4.	Портативний комп'ютер (ноутбук)	2
5.	Блок безперебійного живлення (UPS)	2
6.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схеми зовнішнього електропостачання тягових підстанцій	ЕЧТ, ЕЧЕ
2.	Схеми нормальної роботи тягових підстанцій	ЕЧЦ
3.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
4.	Плановий графік руху поїздів на ділянці	ЕЧЦ
5.	Виконаний графік руху поїздів за період проведення вимірювань	ДНЦ
6.	Статистична звітність УЗ споживання та генерації реактивної енергії і плати за неї	Е

Експеримент проводиться на ділянці Користівка – Кременчук, що живиться від тягових підстанцій Олександрія, Кременчук та безпосередньо в електровозі змінного струму серії ВЛ-80.

ТЧ Знам'янка Одеської залізниці визначає номер електрорухомого складу та готує електровоз до експерименту. Електровоз у кожній секції обладнується портативним аналізатором якості електричної енергії з безперервним записом параметрів комп'ютером (рис 1). ДНУЗТ та ЕЧ-3 ст. Знам'янка надає необхідні пристрої та з'єднувальні проводи.

Підключення вимірювальних приладів здійснюється за участю метрологів локомотивного депо. Входи напруги приладу приєднуються до затискачів С4, С5 лічильника. Петля перетворювача струму LEM-Flex (трансформатор струму) встановлюється на земляний вивід первинного трансформатора.

Живлення вимірювальних пристроїв при прямуванні до дослідної ділянки здійснюється від обмотки власних потреб 230 В, а під час руху дослідною ділянкою для забезпечення чистоти експерименту – від автономного джерела живлення (UPS).

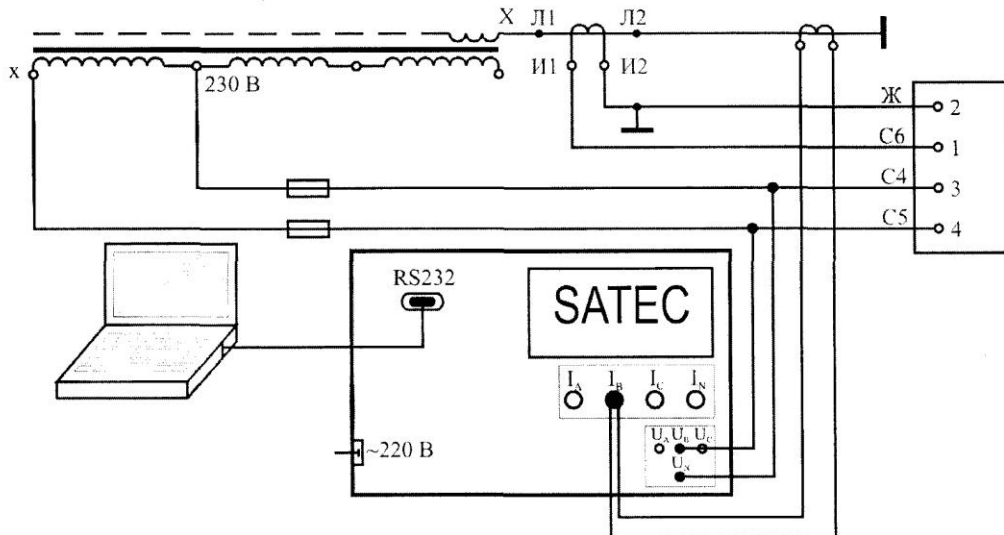


Рис 1. Підключення аналізатора SATEC у вимірювальні кола електровозу ВЛ-80

Основні технічні характеристики аналізатора «SATEC»

№ п/п	Найменування	Характеристика	Примітка
1.	Входи напруги U_A, U_B, U_C, U_N	лінійна напруга 690 В; фазна напруга 500 В; повна потужність <0.35 ВА;	допускається збільшення напруги до 15 % від номінальної
2.	Входи струму I_A, I_B, I_C, I_N	номінальний струм 5 А; повна потужність <0.15 ВА;	стійкість до перенавантаження: тривала – 10 А; на протязі 1 сек. – 250 А.
3.	Клас точності	0,2	
4.	Вага приладу	2,65 кг	
5.	Розміри приладу	280 x 85 x 185 мм	
6.	Датчик струму LEM-Flex	діапазон вимірів 30/300/3000 А; чутливість 100/10/1 мВ/А; точність при 25 °С ±1%	

При підготовці експерименту представниками ДНУЗТ проводиться синхронізація внутрішніх годинників засобів вимірювальної техніки.

Підключення вимірювальних пристроїв здійснюється з додержанням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Етап 3. Проведення експерименту

Для проведення експерименту необхідне прослідкування дослідного електровозу в парному та непарному напрямках ділянки Користівка – Кременчук.

На всьому протязі експерименту в електровозі контролюється споживання електроенергії та показники якості.

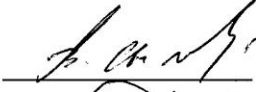

Інтервалом проведення вимірів необхідно встановити 1 с.

Представником ДНУЗТ під час руху здійснюється постійний нагляд над роботою засобів вимірювальної техніки та фіксація прослідкування електровозом проміжних станцій та границі залізниць синхронно з налаштуваннями приладів.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, отриманих з аналізаторів «SATEC» та записів прослідкування станцій.

Оброблені дані аналізуються та встановлюється розподіл витрат електроенергії, що приходить на споживання електровозом в залежності від його знаходження відносно межі залізниць.

Розроблено: зав. кафедрою ЕПЗ, д.т.н., доцент  В. Г. Сиченко
докторант кафедри ЕПЗ, к.т.н., доцент  Д. О. Босий

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту



С. В. Мямлін

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник Знам'янської дистанції
електропостачання Одеської залізниці



О. І. Критін

Начальник Помічянської дистанції
електропостачання Одеської залізниці



В. М. Яндович

ПРОГРАМА

**експериментальних вимірювань параметрів споживання електроенергії
фідерами суміжних тягових підстанцій змінного струму та лінією ДПР**

Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити режими споживання електроенергії фідерами тягових підстанцій змінного струму, що паралельно живлять міжпідстанційну зону між суміжними тяговими підстанціями.

Оцінити розподіл електроенергії між суміжними підстанціями, які паралельно живлять тягову мережу.

Перевірити відповідність основних показників якості електроенергії в лінії ДПР.

Дослідити можливість протікання вирівнювальних струмів між шинами суміжних тягових підстанцій.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Погодні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища $-10 \dots +40^{\circ}\text{C}$.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	3
2.	Датчики змінного струму LEM-Flex	3
9.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	3
10.	Цифровий мультиметр	1

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Схема зовнішнього електропостачання тягової підстанції	ЕЧЕ
2.	Однолінійна схема тягової підстанції	ЕЧЕ
3.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
4.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	БЕЛ
5.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіна	РРД

Етап 2. Організація експерименту

Вимірювання проводиться на 2-х тягових підстанціях ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 Одеської залізниці та безпосередньо у споживача, який живиться від лінії ДПР між дослідними тяговими підстанціями.

ЕЧ-3 та ЕЧ-8 Одеської залізниці відповідно з програмою готують місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання на тягових підстанціях проводяться у вторинних колах трансформаторів напруги ТН-27,5 кВ та трансформаторів струму відповідних фідерів контактної мережі.

Схема приєднання засобів вимірювальної техніки наведені на рис. 1.

Підключення вимірювальних приладів у вторинні кола трансформаторів на-
пруги і струму за необхідності узгодити з відповідною службою енергопередаю-³⁷⁹
чої компанії.

Підключення в кола вторинної напруги виконується контактним з'єднанням за
допомогою «крокодилів».

Підключення до струмових кіл виконується гнучкими роз'ємними кліщами ти-
пу LEM-Flex.

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань не-
обхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил
безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи.
Для вимірювань у разі необхідності залучаються прилади сторонніх організацій.

Монтаж та підключення вимірювальних приладів здійснюється кваліфікова-
ним працівником РРД під контролем представника ДНУЗТ.

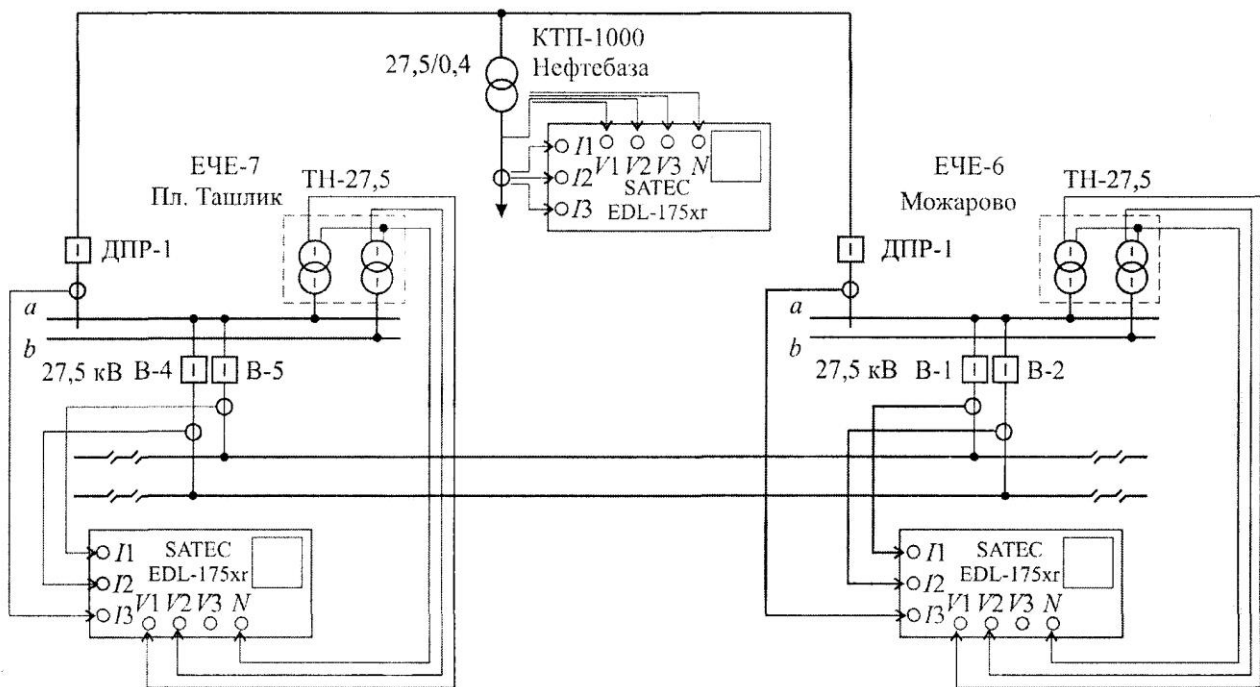


Рис 1. Схема проведення вимірювань на тяговій підстанції

Для проведення вимірювань на ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 не вимагається оперативних пе-
ремикання у схемі живлення пристроїв електропостачання. Схема живлення на
протязі експерименту повинна відповідати нормально встановленій.

Дату та час проведення експерименту визначає Помічянська дистанція елект-
ропостачання Одеської залізниці. Дистанція призначає відповідальних за прове-
дення експерименту та проводить інструктажі причетним.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причет-
ними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з
урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ,
зв'язку та інших здійснює дистанція електропостачання у встановленому порядку.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

Вимірювання на ЕЧЕ-6, ЕЧЕ-7 Одеської залізниці необхідно провести для нормального режиму роботи протягом однієї доби (24 год).

Вимірювання у споживача, що живиться від лінії ДПР провести протягом можливого періоду часу.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих регістраторами та аналізаторами на тягових підстанціях.

Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднанні фідерів контактної мережі 27,5 кВ тягової підстанції, в лінії ДПР-27,5 кВ. Виконується обчислення співвідношення спожитої електроенергії між дослідними фідерами підстанцій та оцінка наявності вирівнювальних струмів.

Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.


Відповідальні за проведення експерименту – дистанція електропостачання, ДНУЗТ.

Експеримент проводять – представники ДНУЗТ, представники дистанції електропостачання, фахівець ремонтно-ревізійної дільниці, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

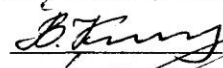
Розроблено: д.т.н., с.н.с.


В. Г. Сиченко

к.т.н., докторант


Д. О. Босий

к.т.н., доцент


В. В. Кузнецов

асистент


Є. М. Косарев

ДТГО «ЛЬВІВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби локомотивного господарства Львівської залізниці


М. Р. Хамевко



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання Львівської залізниці


М. О. Фесик



Начальник служби приміських перевезень Львівської залізниці


В. З. Вороний



Проректор з наукової роботи ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна


С. В. Мямлін



ПРОГРАМА

експериментального дослідження режимів роботи системи тягового електропостачання при рекуперації електроенергії на ділянці Воловець-Лавочне

Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити вплив режимів рекуперації поїздів на зміну режимів роботи тягових підстанцій постійного струму з випрямного на інверторний та на рівень спотворення якості електричної енергії в первинній мережі.

Дослідити вплив режимів живлячої мережі 10 (35) кВ на ефективність роботи інверторів і рівень перетоків надлишкової електроенергії рекуперації при існуючих розмірах руху.

Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності використання рекуперативної енергії.

Підстава для проведення – виконання держбюджетної НДР 23.00.15.16 «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», № ДР 0115U002311.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці Воловець-Лавочне Львівської залізниці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

Умови проведення експерименту

1. Кліматичні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища – 10 ... + 40 °С.

2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	2
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	6
3.	Датчик постійного струму з опторозв'язкою	2
4.	Високовольтний резистор дільника напруги ДС Р3033	2
5.	Комплект радіопередачі даних Atmega128RFA1	3
6.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	3
7.	Акумулятори 12 В	3

* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Однолінійна схема тягових підстанцій	ЕЧЕ
2.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
3.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
4.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	БЕЛ
5.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ

Етап 2. Організація експерименту

Вимірювання проводяться на тягових підстанціях, що обладнані інверторними агрегатами: ЕЧЕ Воловець, ЕЧЕ Скотарське Львівської залізниці та електровозі ВЛ11 чи електропоїзді ЕПЛ2Т.

ЕЧ Стрий Львівської залізниці відповідно з програмою готує місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання проводяться одночасно у вторинних колах ТН-35 кВ (ТН-10 кВ)

Схеми приєднання засобів вимірювальної техніки на тягових підстанціях наведені на рис. 1.

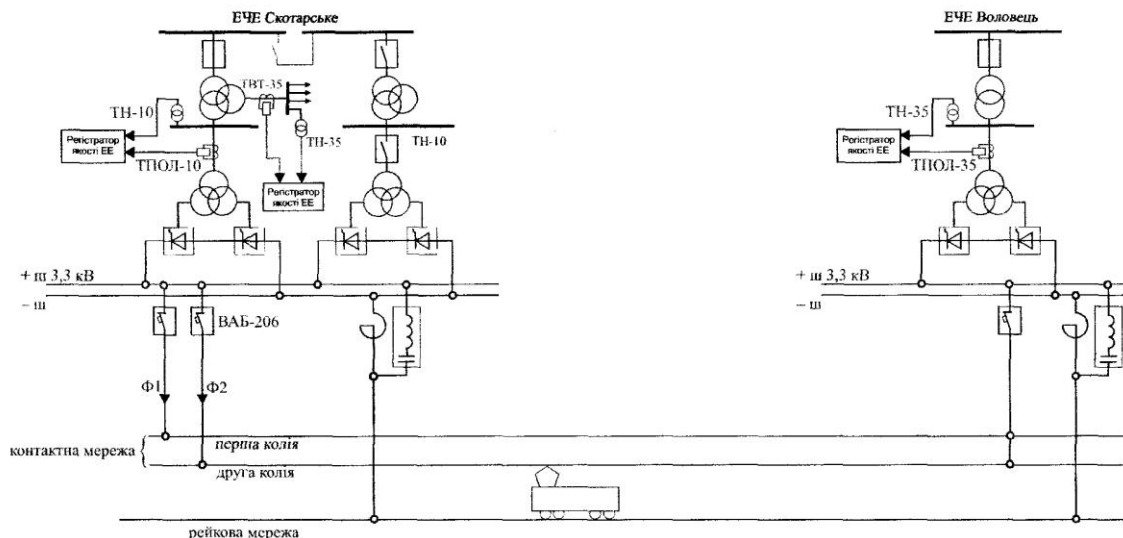


Рис. 1. Загальна схема підключення вимірювальних приладів на тягових підстанціях

Локомотивне депо Львів-Захід відповідно з програмою узгоджує проведення вимірювань та призначає відповідального фахівця для підключення вимірювальних приладів. При виконанні вимірювань в процесі руху дослідною ділянкою в неробочій кабіні електровозу чи салоні електропоїзду повинні знаходитись представники ДШТУ.

Вимірювання проводяться одночасно на двох суміжних тягових підстанціях і дослідному електровозі (електропоїзді), що слідує ділянкою із максимально можливим застосуванням рекуперативного гальмування з повноваговим поїздом (для електровозу) або за плановим графіком руху (для електропоїзду).

Локомотивне депо визначає електровоз (електропоїзд), що обладнаний лічильниками електроенергії тяги і рекуперації та готує його до експерименту. Для безперервного запису потрібних вимірюваних величин до кола підключення лічильників приєднуються вимірювальні пристрої, які являють собою аналогово-цифрові перетворювачі з бездротовою передачею даних.

Для вимірювання в колах електропоїзду виконується підключення чотирьох каналів:

- напруга в контактній мережі через дільник напруги (клема перед R27 – 3У);
- напруга в колі якорі тягових двигунів в режимі гальмування (клема перед R26 – 3У);
- струм загального шунта лічильника тяги (RS4);
- струм шунта амперметра кола якорів тягових двигунів (RS2).

Для вимірювання в колах електровозу виконується підключення двох каналів:
 – напруга в контактній мережі через дільник напруги (клемма перед R18 – 3У);^{3,84}
 – струм загального шунта лічильника тяги (ШнЗ).

Вимірювальна частина приладів розташовується у високовольтній камері, приєднується до елементів силового кола високовольтними ізолюваними проводами (напругою до 20 кВ). Вимірювання напруги виконується приєднанням дільників напруги на базі додаткового опору ДС Р3033 номінальною напругою 3 кВ зі встановленим на ньому АЦП та радіопередавачем. Вимірювання струму виконується ізолюваними датчиками з волоконно-оптичною гальванічною розв'язкою.

Підключення вимірювальних пристроїв до силових кіл електропоїзду виконується згідно схеми рис. 2, для електровозу – згідно схеми рис. 3.

Приєднання вимірювальних пристроїв до силового кола електрорухомого складу не потребує зміни її схеми.

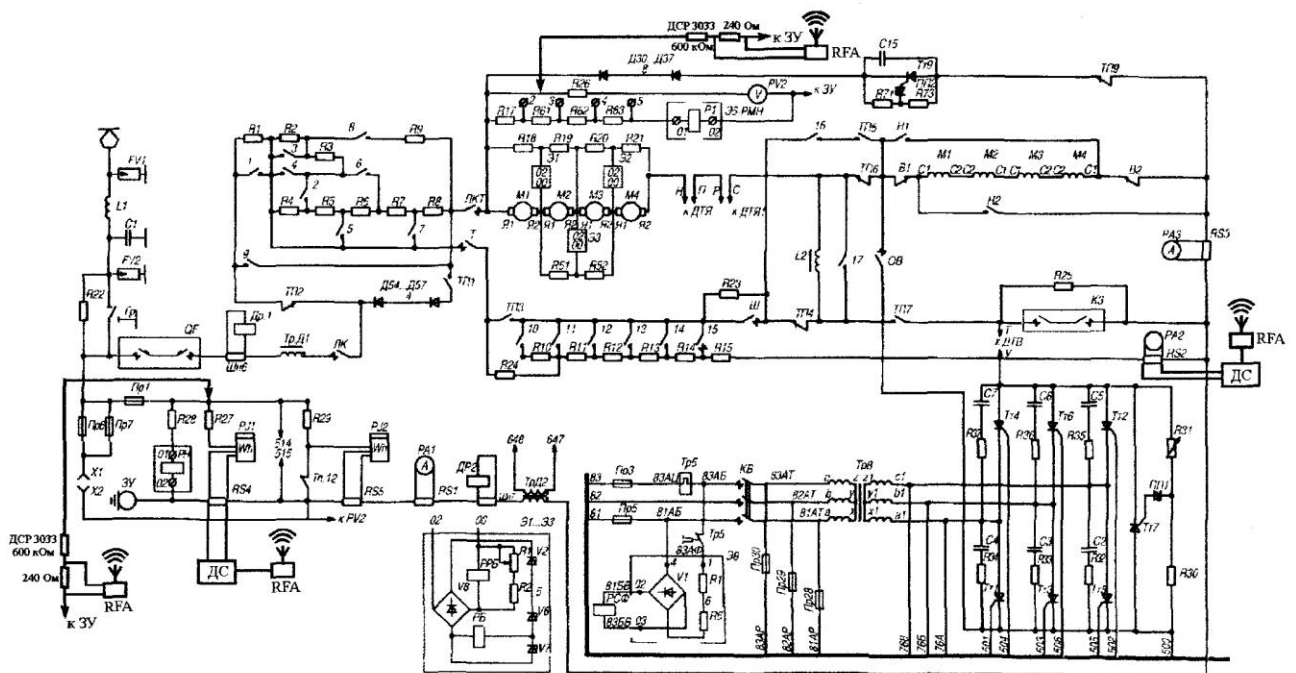


Рис. 2. Схема приєднання вимірювальних приладів до силових кіл електропоїзду ЕПЛ12Т

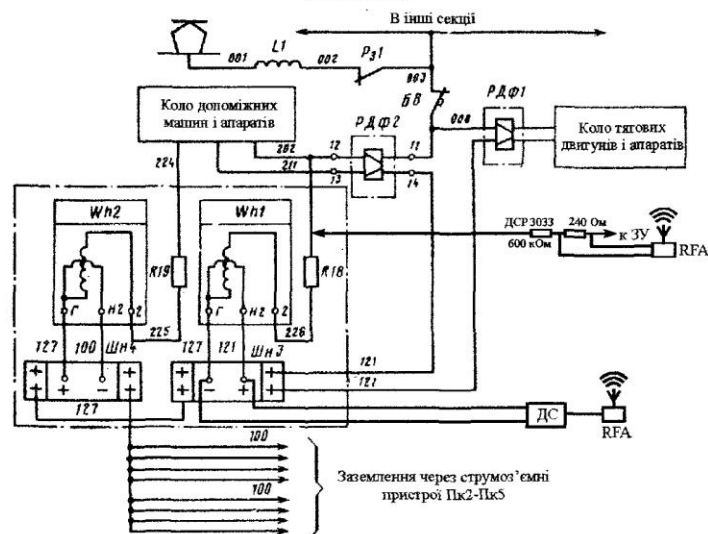


Рис. 3. Схема приєднання вимірювальних приладів до силових кіл електровозу ВЛ11

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб на тягових підстанціях та кіл управління електровозу (електропоїзду) 50 В.

Основні технічні характеристики аналізатора «PNA 296»

№ п/п	Найменування	Характеристика	Примітка
1.	Входи напруги U_A, U_B, U_C, U_N	лінійна напруга 690 В; фазна напруга 500 В; повна потужність <0.35 ВА;	допускається збільшення напруги до 15 % від номінальної
2.	Входи струму I_A, I_B, I_C, I_N	номінальний струм 5 А; повна потужність <0.15 ВА;	стійкість до перенавантаження: тривала – 10 А; на протязі 1 сек. – 250 А.
3.	Клас точності	0,2	
4.	Вага приладу	2,65 кг	
5.	Розміри приладу	280 x 85 x 185 мм	
6.	Датчик струму LEM-Flex	діапазон вимірів 30/300/3000 А; чутливість 100/10/1 мВ/А; точність при 25 °С ±1%	

Підключення вимірювальних пристроїв здійснюється з додержанням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Живлення регістраторів та аналізаторів під час експерименту здійснюється від власних потреб тягової підстанції та додаткових акумуляторів при вимірюванні в електровозі чи електропоїзді.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювання також залучаються прилади служби електропостачання. Підключення вимірювальних приладів на тягових підстанціях виконують працівники РРД під контролем представника ДНУЗТ.

Оперативних перемикачів у схемі живлення пристроїв електропостачання для проведення експерименту на тягових підстанціях не вимагається. Схема живлення пристроїв електропостачання повинна відповідати нормально встановленій.

Дату та час проведення експерименту визначає служба електропостачання Львівської залізниці. Служба призначає відповідальних за проведення експерименту та інструктажі причетних.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на тягових підстанціях Львівської залізниці та електровозі (електропоїзді) необхідно провести в нормальному режимі роботи протягом слідування дослідного електровозу (електропоїзду) у парному та непарному напрямках на ділянці Воловець – Скотарське.

Інтервал проведення вимірів – 1 с на всьому протягу експерименту.

На всьому протязі експерименту на підстанціях контролюються показники якості електроенергії, що споживається або генерується системою електричної тяги.

Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих регістраторами та аналізаторами на тягових підстанціях та електровозі (електропоїзді).

Оброблені дані аналізуються, зіставляються, визначаються якісні та кількісні показники процесу рекуперації енергії.




Відповідальні за проведення експерименту – служба електропостачання, служба локомотивного господарства, кафедра електропостачання залізниць ДНУЗТ.

Експеримент проводять – представники кафедри електропостачання залізниць ДНУЗТ, представники дистанції електропостачання та локомотивного депо, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: к.т.н., доцент

к.т.н., доцент

інженер

 О. І. Саблін
 Д. О. Босий
 С. М. Косарєв

ДОДАТОК В

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Департаменту
електрифікації та електропостачання
Максимчук В. Ф.

2016 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Босого Дмитра Олексійовича

«Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів
електропостачання електрифікованих залізниць»

Результати дисертаційної роботи Босого Д. О. будуть використані Департаментом електрифікації та електропостачання для оптимізації роботи електрифікованих ділянок залізниць з метою зниження втрат електроенергії в системі електропостачання постійного і змінного струму та зменшення транзитних перетікань потужності по тяговій мережі для ділянок змінного струму, а також для розробки та здійснення заходів із підвищення якості електричної енергії у тяговій мережі.

Особливо важливими, і тому практично цінними, вважаємо результати щодо:

1) запропонованої структури, аналітичних залежностей та методики управління режимом напруги в тягових мережах постійного струму, що фізично являє собою безперервний процес вимірювання напруги уздовж ділянки в режимі реального часу, обробці даних з обчисленням недостаючої потужності або пропускнуєї спроможності мереж та здійснення регулюючих впливів на елементи системи електропостачання;

2) розробленої системи моніторингу кута зсуву фаз векторів напруги суміжних тягових підстанцій змінного струму та методики розрахунку

пристроїв поздовжньої (поперечної) компенсації реактивної потужності для мінімізації транзитних перетікань електричної енергії (активної та реактивної) по тяговій мережі.

Оцінка техніко-економічних показників розроблених схемних рішень та рекомендацій свідчить, що модернізація системи на основі розробленого пристрою вимірювання напруги з бездротовою передачею даних має приведені витрати менші на 56,8 тис. грн. ніж для існуючих схемних рішень. Застосування систем стабілізації напруги в контактній мережі, маючи капіталомісткі витрати близько 5 млн. грн. на 1 МВт додаткової потужності для вантажонапружених ділянок характеризується терміном окупності до 2-х років.

Результати дисертаційної роботи Босого Д.О. можуть бути застосовані на полігонах електрифікованих залізниць для систем тягового електропостачання постійного та змінного струму, а також враховані при створенні відповідних автоматизованих (інтелектуальних) систем управління режимами роботи тягових мереж.

Головний інженер Департаменту
електрифікації та електропостачання



I. I. Лагута

Начальник технічного відділу
Департаменту електрифікації
та електропостачання



В.О. Фітін

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник виробничого структурного
підрозділу «Одеське регіональне
відділення» філії «Енергозбут»

ПАТ «Укрзалізниця»



О. С. Данильченко

2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник служби електропостачання
регіональної філії «Одеська залізниця»

ПАТ «Укрзалізниця»



А. Г. Сажин

2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Босого Дмитра Олексійовича

«Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів
електропостачання електрифікованих залізниць»

Цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Босого Д. О. в частині аналізу режимів роботи систем тягового електропостачання змінного струму і методів узгодженої взаємодії систем тягового і систем зовнішнього електропостачання прийняті до використання службою електропостачання регіональної філії «Одеська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця» та виробничим структурним підрозділом «Одеське регіональне відділення» філії «Енергозбут» ПАТ «Укрзалізниця».

Проведені автором дисертації дослідження використовуються з метою:

- зменшення втрат електроенергії в пристроях електропостачання;
- визначення достовірного обліку витрат електроенергії при виконанні взаємних заїздів електровозів регіональних філій «Південна залізниця» та «Одеська залізниця» ПАТ «Укрзалізниця»;
- зниження транзитних перетікань електроенергії між тяговими підстанціями змінного струму.

Найбільшої уваги з отриманих результатів дисертації заслуговують:

1. Методи розрахунку параметрів пристроїв компенсації реактивної потужності для зниження транзитних перетікань при паралельній роботі


тягових підстанцій змінного струму, що є актуальним для ділянки ³⁹¹
ім. Т. Шевченка – Фундукліївка;

2. Рекомендації з вибору електронних лічильників для зменшення впливу гармонійних складових тягових струмів на баланси закупленої та спожитої електроенергії.

Розроблені в дисертації наукові основи підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць враховують особливості систем тягового електропостачання змінного струму та можуть бути розповсюджені на всі залізниці, що електрифіковані змінним струмом.

Заступник начальника

ВСП «Одеське регіональне відділення»

філії «Енергозбут» ПАТ «Укрзалізниця»  Т. А. Верескун

Начальник дорожньої
електротехнічної лабораторії



І. В. Загородній

Начальник служби електропостачання

Південної залізниці



С. Л. Кравчук

05 2016 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Босого Дмитра Олексійовича

«Розвиток наукових основ підвищення енергосективності режимів
електропостачання електрифікованих залізниць»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Босого Д. О. в частині вибору раціональних режимів роботи систем тягового електропостачання прийняті до використання службою електропостачання Південної залізниці. Дослідження будуть впроваджуватись з метою зменшення втрат електроенергії в пристроях електропостачання та врахування наявних гармонійних спотворень при складанні балансів електричної енергії.

Найбільшої уваги з отриманих результатів дисертації заслуговують:

1. пропозиції по зниженню транзитних перетікань потужності при паралельній роботі тягових підстанцій змінного струму з врахуванням режиму роботи системи зовнішнього електропостачання, що є актуальним для ділянки Курилівка – Булацелівка Південної залізниці;
2. можливість використання розробленої системи синхронних вимірювань напруги уздовж ділянки постійного струму в якості системи технологічного обліку втрат електроенергії;
3. рекомендації з вибору електронних лічильників для зменшення впливу гармонік струму на баланси закупленої та спожитої електроенергії.

Результати дисертаційної роботи враховують особливості роботи систем тягового електропостачання як постійного так і змінного струму, тому можуть

бути розповсюджені на всі електрифіковані залізниці, насамперед при розробці 393 інтелектуальних систем управління режимами їх електропостачання.

Перший заступник начальника
служби електропостачання



В. М. Козачок

Заступник начальника
служби електропостачання



Р. В. Дашугін

ЗАТВЕРДЖУЮ

394

Перший проректор Дніпропетровського
національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна,
Д.Ф. професор



Б.Є. Боднар

про використання результатів дисертаційної роботи
Босого Дмитра Олексійовича «Розвиток наукових основ підвищення енерго-
ефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць»

м. Дніпро

«22» 12 2016р.

Цей акт складений про те, що у навчальному процесі, який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, отримані в дисертації Босого Д.О.:

1. Метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання з використанням функції опору тягової мережі (дисципліна «Електропостачання залізниць», курсовий проект «Розрахунок системи тягового електропостачання», для студентів четвертого курсу спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

2. Дослідний зразок пристрою вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних, фізичні моделі випрямляча тягової підстанції постійного струму та пристрою плавної компенсації реактивної потужності, програмний продукт для розрахунку режимних показників систем тягового електропостачання (дисципліни «Електропостачання залізниць», «Електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», лабораторні роботи для студентів 4-5 курсу спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

Проректор з навчальної роботи,
д.т.н., доцент

О. О. Матусевич

Декан факультету Управління
енергетичними процесами, д.т.н., професор

А. М. Афанасов

Зав. кафедри ІСЕ, д.т.н., професор

В. Г. Сиченко

Директор Державного підприємства
«Проектно-вишукувальний інститут
залізничного транспорту України
«Укрзалізничпроект», к.т.н.



І. В. Калашніков

«27» листопада 2015 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
Босого Дмитра Олексійовича
«Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів
електропостачання електрифікованих залізниць»

Даний акт складений у підтвердження того, що результати дисертаційної роботи Босого Д. О. у вигляді розроблених та удосконалених методик розрахунку миттєвих схемраціонально використовувати у проектній практиці при виконанні робіт з проектування електричних мереж систем електропостачання залізничного транспорту.

Найбільшої практичної цінності та значимості мають наступні результати:

1. Представлення електричних величин розподілених систем електропостачання в просторово-часових координатах, що дозволяє в подальшому визначити необхідні інтегральні характеристики та автоматизувати врахування більшої кількості впливаючих факторів.
2. Визначення недостаючої потужності та пропускнуєї спроможності електричної мережі на підставі режимної інформації у вигляді функції розподілу спаду напруги уздовж електрифікованої ділянки, що дозволяє впровадити сучасні Smart-Grid системи інтелектуального управління для підвищення енергетичної ефективності.
3. Побудова алгоритмів та розробка програмного продукту для розрахунку режимних показників, що особливо корисно на стадії передпроектних досліджень для нових ділянок в умовах неповної інформації.

Дисертаційна робота в цілому охоплює спектр актуальних проблем, пов'язаних з режимами електропостачання електрифікованих залізниць постійного та змінного струму і результати можуть бути використані іншими проектними установами, що виконують проектні роботи для електрифікованих ділянок залізниць.

Начальник науково-дослідного відділу
«Інфраструктура залізниць та електрична
тяга» ДП «Укрзалізничпроект» к.т.н.

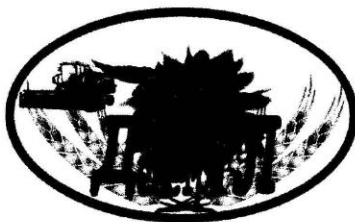


В. В. Божко

Начальник відділу енергетики
ДП «Укрзалізничпроект»



С. В. Шепеленко



Товариство з обмеженою відповідальністю

«ДЕМЕТРА Л»

25014, м. Кіровоград, вул. Мурманська, 31^а

Р/р 26006010543718 в ПАТ Укрсоцбанк м. Кіровоград,

МФО 300023, м. Кіровограда, Код 31008240 тел. 0522 561182

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи Босого Дмитра Олексійовича

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Босого Д. О. в якості інтелектуальної системи вимірювання параметрів електроспоживання впроваджені та використовуються ТОВ «Деметра Л» на приєднанні вводу 0,4 кВ трансформаторної підстанції, яка живиться від лінії ДПР 27,5 кВ ділянки Можарово – Плетений Ташлик Одеської залізниці.

Впроваджена система дозволяє контролювати якість електроенергії, що постачається Одеською залізницею, та прогнозувати і коригувати лімітовані обсяги постачання електричної енергії, що в свою чергу дозволяє уникнути двократних штрафних санкцій при перевикористанні заявленого обсягу електроенергії.

Витрати на впровадження системи склали близько 7000 грн.

За час експлуатації спостерігались порушення роботи системи, внаслідок виходу з ладу пристрою узгодження через індуктивний вплив електрифікованої залізниці, оскільки траса лінії зв'язку проходить уздовж залізниці. Порушення усунені автором дисертаційної роботи шляхом використання в пристрої узгодження гальванічно-розв'язаної інтерфейсної мікросхеми.

Найбільш важливими практично цінними вважаємо такі результати:

- 1) оцінки стану показників якості електроенергії для споживачів, які живляться від ліній ДПР електрифікованих залізниць змінного струму;
- 2) оптимізації режимів роботи систем тягового електропостачання на підставі розроблених систем синхронних вимірювань;

Результати дисертаційної роботи Босого Д.О. можуть бути застосовані іншими споживачами, що закупають електричну енергію у суб'єктів ліцензійної діяльності оптового ринку електроенергії та працюють в умовах спотворень якості електричної енергії.

Економічна ефективність використання інтелектуальної системи, розробленої в дисертаційній роботі для середньомісячного споживання 100 тис. кВт·год складає близько 800 грн. на місяць.

Директор

Бухгалтер



(Handwritten signature)

В. Ю. Ляхов

Г. А. Плакасова