

О.В. Бялобржеський*

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, Полтавської обл., 39600, Україна
Телефон: +380 96 2525717, E-mail: seemal@kdu.edu.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1669-4580>

А.І. Гладир

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, Полтавської обл., 39600, Україна
Телефон: +380 50 9008110, E-mail: andrii.gladyr@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3521-9112>

В.Ю. Ноженко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, Полтавської обл., 39600, Україна
Телефон: +380 66 1797254, E-mail: nozhenkovika@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0126-6970>

ВПЛИВ ПРОЦЕСУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ НА ВИМОГИ ДО СИСТЕМИ ОБЛІКУ

Раціональний облік споживання електричної енергії на електрифікованій залізниці є актуальним завданням, як для тягових одиниць так і для тягових підстанцій. Тягові одиниці характеризуються змінним графіком електроспоживання, спотворенням струму та впливом на напругу у точці контакту. Структура приєднання тягових обмоток тягових трансформаторів до контактної мережі викликає несиметричне їх завантаження. Додатково спотворений струм декількох тягових одиниць, на ділянці мережі, призводить до спотворення електричної енергії трансформаторів. Стаття присвячена аналізу структури та алгоритмів обробки параметрів режиму первинних вимірювальних пристроїв у системі автоматизованого контролю та обліку електричної енергії при визначенні складових потужності на тягових підстанціях. У роботі наведено структуру організації системи контролю споживання електричної енергії на електрорухомому складі, де встановлені два комплекти інформаційно-обчислювальних комплексів на вводах тягового трансформатора і фідерах контактної мережі тягової підстанції для проведення вимірювань. Проведено дослідження ділянки мережі з тяговими навантаженнями, які дозволяють визначити потоки потужності, споживані з системи зовнішнього електропостачання і віддаванні в тягову мережу.

© Бялобржеський О.В., Гладир А.І., Ноженко В.Ю., 2022

Отримана інформація може використовуватися для визначення поточного стану електроенергетичної системи вироблення керуючих впливів для регулювання режимів роботи системи електропостачання вищої напруги.

У роботі розглянуто алгоритми для визначення показників споживання електричної енергії на електрорухомому складі та на фідерах контактної мережі.

В основу процедури розрахунку показників покладено рекомендації стандарту IEEE 1459-2010, який на теперішній час найбільш всебічно розкриває якісні показники електричної потужності. Реалізація запропонованих алгоритмів у системі автоматизованого контролю електроспоживання дозволяє оцінювати показники, які характеризують основні величини електроспоживання – активну та реактивну потужності за першою гармонікою; додаткові величини електроспоживання – потужності, зумовлені спотворенням струму, спотворенням напруги та взаємодією вищих гармонік струму та напруги. Для трифазних кіл розвинені процедури визначення активної та реактивної потужностей фундаментальної гармоніки прямої послідовності.

Ключові слова: тягова підстанція, енергоспоживання, автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії, електровоз.

А.В. Бялобржеский*

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39600, Украина
Телефон: +380 96 2525717, E-mail: seemal@kdu.edu.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1669-4580>

А.И. Гладыр

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39600, Украина
Телефон: +380 50 9008110, E-mail: andrii.gladyr@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3521-9112>

В.Ю. Ноженко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская 20, г. Кременчуг, Полтавской обл., 39600, Украина
Телефон: +380 66 1797254, E-mail: nozhenkovika@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0126-6970>

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЭНЕРГОПОТРЕБОВАНИЯ ТЯГОВОЙ ПОДСТАЦИИ НА ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ УЧЕТА

Рациональный учет потребления электрической энергии на электрифицированной железной дороге является актуальной задачей, как для тяговых единиц, так и для тяговых подстанций. Тяговые единицы характеризуются переменным графиком электропотребления, искажением тока и влиянием на напряжение в точке контакта. Структура присоединения тяговых обмоток тяговых трансформаторов к контактной сети вызывает несимметричную их загрузку. Дополнительно искаженный ток нескольких тяговых единиц, на участ-

ке сети, приводит к искажению электрической энергии трансформаторов. Статья посвящена анализу структуры и алгоритмов обработки параметров режима первичных измерительных устройств в системе автоматизированного контроля и учета электроэнергии при определении составляющих мощности на тяговых подстанциях. В работе приведена структура организации системы контроля потребления электрической энергии на электроподвижном составе, где установлены два комплекта информационно-вычислительных комплексов на вводах тягового трансформатора и фидерах контактной сети тяговой подстанции для проведения измерений. Проведены исследование участка сети с тяговыми нагрузками, позволяющими определить потоки мощности, потребляемые из системы внешнего электроснабжения и отдачи в тяговую сеть.

Полученная информация может использоваться для определения текущего состояния электроэнергетической системы выработки управляющих воздействий для регулирования режимов работы системы электроснабжения высшего напряжения.

В работе рассмотрены алгоритмы для определения показателей потребления электрической энергии на электроподвижном составе и на фидерах контактной сети. В основу процедуры расчета показателей положены рекомендации стандарта IEEE 1459-2010, который в настоящее время наиболее всесторонне раскрывает какие-либо показатели электрической мощности. Реализация предложенных алгоритмов в системе автоматизированного контроля электропотребления позволяет оценивать показатели, характеризующие основные величины электропотребления – активную и реактивную мощности по первой гармонике; дополнительные величины электропотребления – мощности, обусловленные искажением тока, искажением напряжения и взаимодействием высших гармоник тока и напряжения. Для трехфазных цепей развиты процедуры определения активной и реактивной мощностей фундаментальной гармоники прямойпоследовательности.

Ключевые слова: тяговая подстанция, энергопотребление, автоматизированные системы коммерческого учета электроэнергии, электровоз.

Вступ Залізничний транспорт України є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни, який забезпечує 82 % вантажних і майже 50 % пасажирських перевезень, здійснюваних всіма видами транспорту. Експлуатаційна мережа залізниць України складає майже 22 тис. км, з яких 65 % електрифіковано [1]. Застосування електрообладнання на основі силових напівпровідникових елементів, а саме, використання тиристорів у випрямно-інверторних перетворювачах електровозів змінного струму дозволяє плавно регулювати напругу на тягових двигунах, забезпечуючи високі тягово-енергетичні характеристики електрорухомого складу [2, 3]. З іншого боку, нелінійність вольт-амперної характеристики напівпровідникових елементів приводить до значних спотворень форми кривої тягового струму та синусоїдальної форми кривої робочої напруги контактної мережі на струмоприймачі електровозу, що погіршує показники якості електричної енергії. У таких умовах експлуатації ефективне функціонування електрорухомого складу та системи електропостачання ускладнене [4]. Тому все частіше постають питання контролю показників електричної енергії з урахуванням її якості як на електрорухомому складі, так і на тягових підстанціях [5].

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Ефективність розроблювальних технічних рішень покращення якості електричної енергії та економії при впровадженні енергозберігаючих технологій на електрорухомому складі необхідно оцінювати із застосуванням сучасних засобів вимірювання. Вони дозволяють здійснювати реєстрацію миттєвих значень електричних параметрів, та подальшу їх обробку [4, 5]. Для забезпечення господарської діяльності з передачі та постачання електроенергії, починаючи з 2001 р., на залізницях України активно впроваджуються автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) [5].

Мета роботи. Аналіз структури та алгоритмів обробки параметрів режиму первинних вимірювальних пристроїв у системі автоматизованого контролю та обліку електричної енергії при визначенні складових потужності.

Матеріали та результати досліджень. Основна мета впровадження АСКОЕ – отримання достовірної інформації щодо обсягів споживання, генерації, передачі та розподілу електроенергії і потужностей всіма об'єктами системи електропостачання [6]. Така система передбачає наявність двох підрівнів: автоматизованої системи обліку електроенергії на фідерах контактної мережі (АСОЕ ФКМ) та автоматизованої системи обліку електроенергії на електрорухомому складі (АСОЕ ЕРС), синхронізованих між собою; причому до обох підсистем повинні висуватися жорсткі вимоги за функціональністю, точністю вимірювань і надійністю.

Після програмної обробки інформації з двох систем (АСОЕ ФКМ і АСОЕ ЕРС) на єдиному сервері АСКОЕ базово можуть отримати дані [7] про:

- витрати і повернення електроенергії за лічильниками ЕРС під час поїздки;
- витрати і повернення електроенергії на тягу поїздів за лічильниками на ФКМ тягових підстанцій і ЕРС в межах залізниці, тарифної зони, дистанції електропостачання або міжпідстанційної зони за необхідний період часу;
- значення питомої витрати і небалансу електроенергії на тягу поїздів у межах залізниці, тарифної зони, дистанції електропостачання, міжпідстанційної зони за період;
- значення небалансу прийому і розподілу електричної енергії по шинах тягової підстанції за необхідний період часу;
- витрати і повернення електроенергії на тягу поїздів по тяговій підстанції і окремим ФКМ за необхідний період часу.

Отримана інформація дозволяє:

- виявляти міжпідстанційні зони з нерівномірно завантаженими тяговими підстанціями;
- визначати на базі даних про рух потужності по ФКС середні значення зрівняльних струмів у контактній мережі міжпідстанційних зон ділянок;
- забезпечувати підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування без аналізу поїзних умов і визначення конкретного місця розташування у фідерній зоні ЕРС за рахунок оперативного контролю поточного навантаження на ФКМ;
- виконувати синхронне осцилографування процесів, що виникають у контактній мережі, що дає змогу оцінити поточний розподіл енергії рекуперації та якість електроенергії на ФКМ і ЕРС;
- забезпечувати достовірний контроль питомої витрати та небалансу електричної енергії на тягу поїздів, що дозволить підвищити ефективність планування витрат електроенергії на тягу поїздів на всіх рівнях, а також обґрунтувати

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

мережеву складову тарифу на електроенергію на основі фактично вимірних величин споживання електроенергії при експлуатації приватного ЕРС;

– оптимізувати закупівлі електроенергії на оптовому ринку за рахунок оперативного прогнозу споживання електроенергії на найближчі часи та коригування добових прогнозів про витрату на тягу поїздів;

– оцінювати зниження енергетичної ефективності тяги поїздів з урахуванням системи тягового електропостачання, обумовленого обмеженням швидкості руху поїздів з подальшим адресним визначенням претензій до винуватців збільшення вартості залізничних перевезень.

Розглянемо структуру організації системи контролю споживання електричної енергії на ЕРС (рис. 1) [8]. Для проведення вимірювань на вводах тягового трансформатора і фідерах контактної мережі (ФКМ) тягової підстанції встановлені два комплекти інформаційно-обчислювальних комплексів (ІОК).

Як бачимо за даними досліджень [8] показників якості електричної енергії з міжпідстанційної зони двостороннього живлення, можуть бути сформовані результати вимірювань профілю активної потужності на вводах (27,5; 220 кВ) трансформатора (рис. 2, а) та фідера контактної мережі (рис. 2, б). Ділянка тягової мережі, яка досліджувалася складається з трьох тягових підстанцій і двох міжпідстанційних зон (L1, L2). При проведенні експерименту ця ділянка розглядалася як єдина частина ЕЕС з тяговими навантаженнями. Графіки на рис. 2 дозволяють визначити потоки потужності, споживані з системи зовнішнього електропостачання і віддавані в тягову мережу.

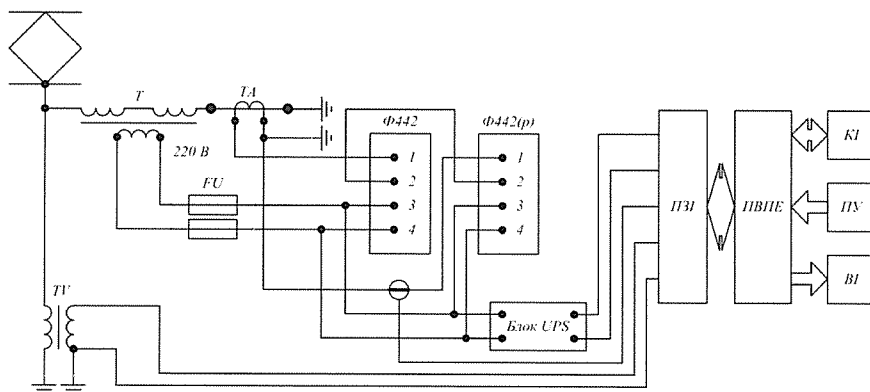


Рис. 1. Схема з'єднання ІОК на електровозі:

T – трансформатор; TA – трансформатор струму; TV – трансформатор напруги;
FU – запобіжник плавкий; Ф442 – лічильник активної електричної енергії; Ф442(р) – лічильник реактивної електричної енергії; ПЗІ – пристрій збору інформації; ПВПЕ – пристрій визначення показників енергоспоживання; КІ – комутаційний інтерфейс; ПУ – пульт управління;
ВІ – візуальний інтерфейс

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

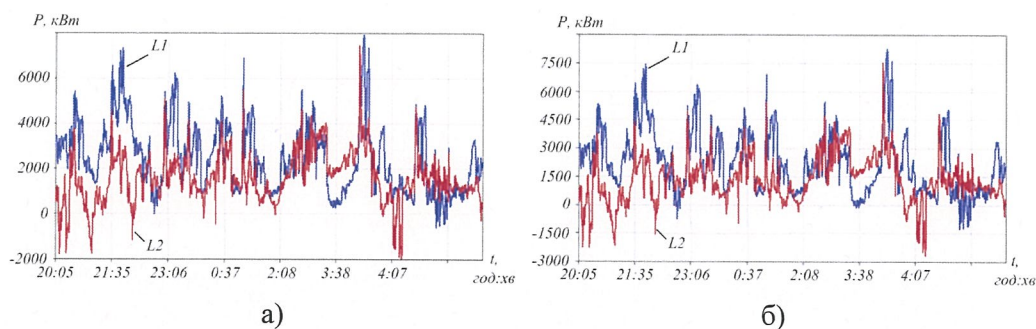


Рис. 2. Осцилограми з уведення в дію активної потужності 220 кВ тягового трансформатора (а), активна потужність на фідері 27,5 кВ тягового трансформатора (б) у випадку двостороннього живлення ділянки

Наведені дані свідчать про співвідношення цих потужностей. Ця інформація може використовуватися для визначення поточного стану електроенергетичної системи вироблення керуючих впливів для регулювання режимів роботи ЕЕС. Для визначення структури втрат електроенергії для одного зрізу за результатами експерименту визначають розподіл потужності від вхідних введів тягового трансформатора до електровоза при консольному живленні від одного трансформатора. Це раціонально виконувати за допомогою комбінованого контролю показників споживання на ЕРС та ФКМ.

Традиційно для визначення втрат потужності використовують значення активної, реактивної і повної потужності [9]. Останнім часом, зважаючи на збільшення ЕРС з напівпровідниковими перетворювальними агрегатами, враховують наявність вищих гармонік у струмі та напрузі, що потребує корекції процедури визначення показників енергоспоживання. Досвід розрахунку та експлуатації [8] показує наступні показники розподілу потужності в системі електропостачання ЕРС – рис. 3.

Величину неактивної потужності визначають як таку, що складається з реактивної потужності основної гармоніки і складової неактивної потужності, яка визначається наявністю вищих гармонік [9]. При цьому відзначають, що вищі гармоніки в складі активної потужності складають 22–25%. Зважаючи на експлуатацію ЕРС з напівпровідниковими перетворювачами та викривлення струмів та напруг контактної мережі, ФКМ та силових трансформаторів підстанції, слід враховувати вплив цих викривлень на потужність та споживання електричної енергії [10]. Таким чином, за наявності якісної апаратної частини постає питання визначення відповідного алгоритму обчислення показників енергоспоживання. При цьому лінії зовнішнього електропостачання, елементи тягової мережі, розподільні лінії поздовжнього електропостачання і автоблокування, маючи певні частотні характеристики, впливають на розподіл гармонійного складу напруги та струму. Все це негативно впливає на роботу приладів обліку електричної енергії та піднімає проблему електромагнітної сумісності засобів обліку з факторами, що впливають на точність обліку.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

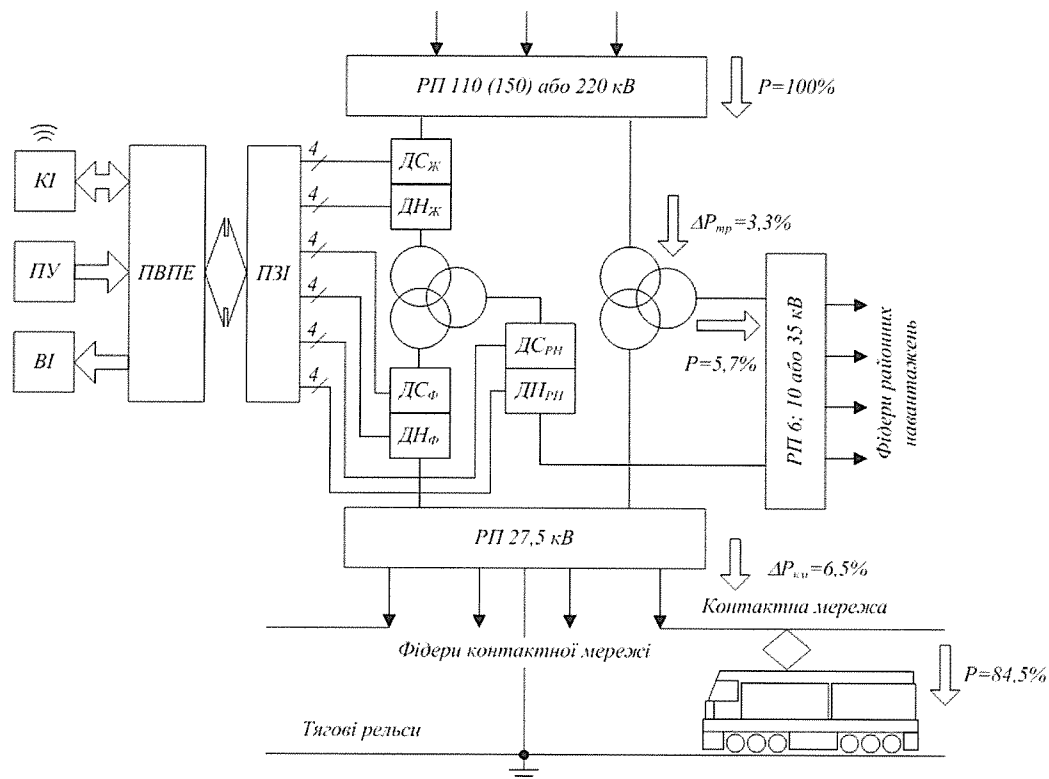


Рис. 3. Структура вимірювальної системи тягової підстанції

Наразі єдина методика визначення реактивної потужності відсутня. Існує досить широкий спектр думок з приводу реактивної потужності. Незважаючи на відмінності, для кожного виразу є своя фізична інтерпретація [8]:

- фундаментальна реактивна потужність – визначаються тільки основні гармоніки і дає інформацію про ефективності перенесення енергії;
- реактивна потужність за Будаєну – об'єднує потужність яка визначає процеси обміну енергією між реактивними елементами мережі та споживача, з урахуванням викривлення струму та напруги;
- реактивна потужність за Фрізе – визначено з умов поділу струму в часовому інтервалі на дві частини, одна з яких переносить активну енергію (не залежить від частоти) і додатковий струм;
- реактивна ємнісна (індуктивна потужність) за Кастерсом-Муром – визначається шляхом поділу струму на частини, що протікає через один еквівалентний конденсатор або котушку індуктивності;
- реактивна потужність за Шароном – максимальна реактивна потужність, яка може бути компенсована за допомогою пасивних елементів;
- реактивна потужність за Чарнецьким – передбачає декомпозицію миттєвого струму на дві ортогональні складові: активну і реактивну. Неактивна потужність визначається як величина середньоквадратичних значень напруг і струмів, коли вектори напруг і струмів обчислюються як комплекси квадратичних значень для кожної гармонійної частоти;

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

– реактивна потужність за формулами Маєвського – геометричне трактування цього підходу полягає в тому, що площа вольт-амперної характеристики двополюсника, описаної за період, пропорційна реактивній потужності;

– теорія миттєвої потужності поділяє складові потужності на два типи: потужність, що передається від джерела в навантаження, що здійснює корисну роботу, і всі інші, які визначають перетоки потужності в системі електропостачання і втрати. За допомогою активних компенсаторів, наприклад, типу СТАТКОМ, можна компенсувати частину зазначених втрат потужності.

Аналіз різних теорій потужності виявив, що у кожній методиці є свої недоліки та переваги. Для визначення показників споживання електричної енергії ЕРС та ФКМ, які б раціонально характеризували процес, розглянемо декілька існуючих алгоритмів, які використовуються в ІВК. На рис. 4 наведений алгоритм розрахунку показників енергоспоживання, який використовують для ЕРС та ФКМ [11, 12], а на рис. 5 – подібний алгоритм для аналізу електроспоживання тягової підстанції на стороні високої напруги, зважаючи на споживання за трьома фазами.

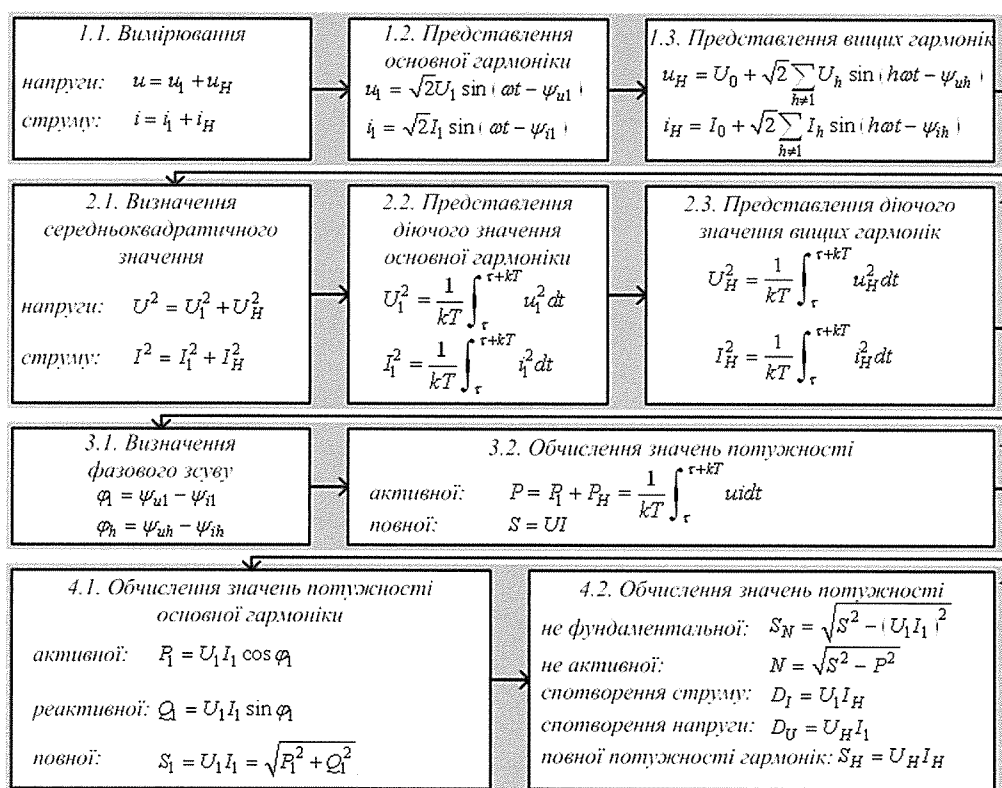


Рис. 4. Алгоритм визначення потужності в однофазному колі з несинусоїдальними сигналами

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

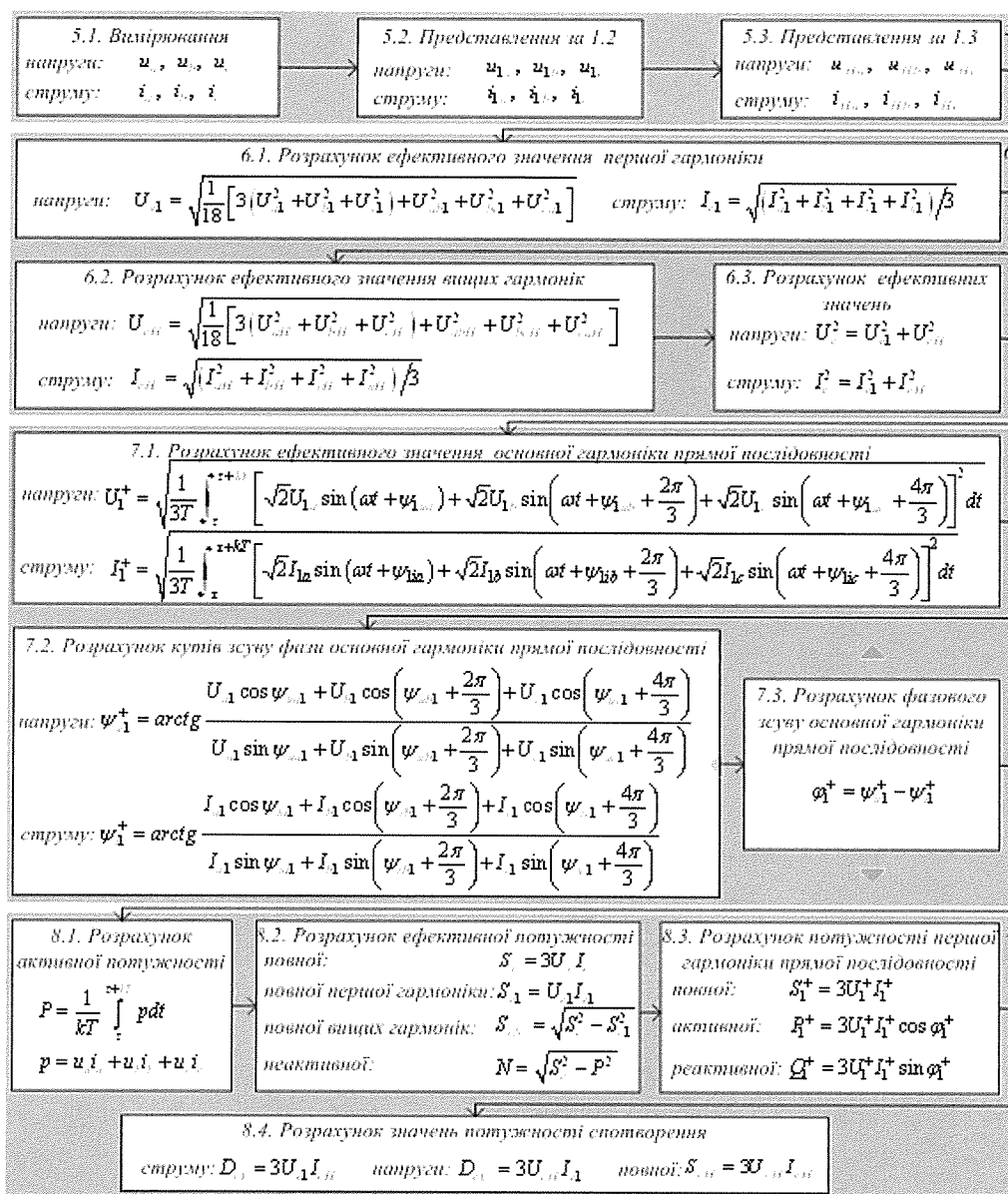


Рис. 5. Алгоритм визначення показників потужності в трифазних несиметричних колах

Використані індекси означають: «1» – основна гармоніка, «+» – пряма послідовність, «e» – ефективне значення. Таким чином, у результаті реалізації алгоритмів, наведених на рис. 4 і 5 в системі автоматизованого контролю електроспоживання стають доступними показники, які характеризують основні величини електроспоживання – активну та реактивну потужності за першою гармонікою; додаткові величини електроспоживання – потужності, зумовлені спотворенням струму, спотворенням напруги та взаємодією вищих гармонік струму та напруги.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

На відміну від показників ФКМ та ЕРС, в ЕЕС додатково визначаються такі величини електроспоживання, які відображають вплив несиметрії, напруга та струм прямої послідовності, а також відповідні потужності прямої послідовності: повна, активна та реактивна.

Висновки.

На базі аналізу вимог до автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії, зважаючи на характер потужності, яка циркулює в елементах електропостачання електрорухомого складу, та структуру тягової підстанції, сформована структура комплексу визначення складових потужності для обох об'єктів контролю.

Запропоновано алгоритми визначення складових потужності для обліку електричної енергії та її показників з урахуванням спотворення струму, напруги та несиметрії зазначених параметрів, який ґрунтується на положеннях стандарту IEEE STD/1459-2010.

ЛІТЕРАТУРА

1. Феоктистов В.П., Просвиров Ю.Е. Электрические железные дороги: учебник. Москва: Моск. ун-т путей сообщения, 2006. 312 с.
2. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. пособ. Москва: Юрайт, 2012. 667 с.
3. Грищенко А.В. Электрические машины и преобразователи подвижного состава: учебник. Москва: «Академия», 2005. 320 с.
4. Кабалык Ю.С. Системы управления электроподвижным составом: учеб. пособ. Хабаровск: ДВГУПС, 2013. 119 с.
5. Малоземов Б.В. Энергосберегающие технологии технического обслуживания электрического транспорта. *Электроэнергия и будущее цивилизации: материалы международной науч.-техн. конф.* г. Томск, 13 апреля 2004 г. Томск, 2004. С. 391–393.
6. Пантелеев В.И., Машкин А.Г., Лукьянов П.Ю. Модернизация систем тягового электроснабжения переменного тока. *Энергетика*. 2011. № 7. С. 13–15.
7. Черемисин В.Т., Емельяненко Е.Л., Ушаков С.Ю. Снижение небаланса электрической энергии на тягу поездов по счетчикам тяговых подстанций и электроподвижного состава. *Железнодорожный транспорт*. 2011. № 2. С. 43–48.
8. Совалов С.А. Экспериментальные исследования режимов энергосистем. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 448 с.
9. Крогерис А.Ф. Мощность переменного тока. Рига: Физ.-энерг. ин-т Латв. АН, 1993. 149 с.
10. Слепцов М.А. Основы электрического транспорта: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. Москва: «Академия», 2006. 464 с.
11. IEEE STD/1459-2010. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2000. 52 с.
12. Бялобржеський О.В., Давидов О.Ю. Розробка автоматизованої вимірювальної системи по дослідженню несинусоїдності та несиметрії напруги трифазної системи мережі. *Вісник КДУ: наукові праці КДУ*. Кременчук: КДУ, 2010. Вип. 3 (62). Ч. 2. С. 170–174.

O.V. Bialobrzheskyi

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine
tel.: +380 96 2525717, E-mail: seemal@kdu.edu.ua
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1669-4580>

A.I. Gladyr

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine
tel.: +380 50 9008110, E-mail: andrii.gladyr@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3521-9112>

V.Yu. Nozhenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
20 Pershotravneva Str., Kremenchuk, Poltava region, 39600, Ukraine
tel.: +380 66 1797254, E-mail: nozhenkovika@gmail.com
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0126-6970>

**THE INFLUENCE OF THE ENERGY CONSUMPTION PROCESS
OF THE TRACTION SUBSTATION ON THE REQUIREMENTS
FOR THE ELECTRICITY METERING SYSTEM**

Rational metering of electricity consumption on the electrified railway is an urgent task for both traction units and traction substations. Traction units are characterized by a variable schedule of power consumption, current distortion, and the impact on the voltage at the point of electrical contact. The structure of connection of traction windings of traction transformers to catenary causes their asymmetric loading. Additionally distorted current of several traction units at the network section distorts the electrical energy of transformers. The paper is devoted to the analysis of the structure and algorithms of processing the mode's parameters of primary measuring devices in the system of automated control and metering of electric energy in determining the power components at traction substations. The structure of the electricity consumption control system on the electric rolling stock with two sets of information and computing systems at the inputs of the traction transformer and feeders of the traction substation catenary for measurements is presented. A study of the local part of the catenary with traction loads which allow determining the power flows consumed from and recovered to the external power supply system – the traction network is carried out.

The obtained information can be used to determine the current state of the power system in order to generate control effects for regulating the modes of operation of the higher voltage power supply system.

Algorithms for determining the indicators of electric energy consumption on the electric rolling stock and on the catenary feeders are considered in the work.

The recommendations of the IEEE 1459-2010 standard, which currently most comprehensively discloses the quality of electric power, are based on the procedure for calculating the indicators. Implementation of the proposed algorithms for the automated system of electricity metering allows evaluation of the indicators that characterize the main values of electricity consumption - active and reactive power on the first harmon-

ic; additional values of power consumption - power due to current distortion, voltage distortion and the interaction of higher current and voltage harmonics. For three-phase circuits, procedures for determining the active and reactive powers of the fundamental harmonics of the direct sequence are developed.

Key words: traction substation, energy consumption, automated systems of commercial electricity metering, electric locomotive.

REFERENCES

1. Feoktistov V. and Prosvirov Yu. (2006). *Elektricheskiye zheleznyye dorogi: uchebnik. [Electric Railways]*. Moscow: Mosc. un-t putey soobshcheniya, p. 312. [in Russian]
2. Zinovyev G. (2012). *Silovaya elektronika: ucheb. posob. [Power electronics]*. Moscow: Yurayt, p. 667. [in Russian]
3. Grishchenko A. (2005). *Elektricheskiye mashiny i preobrazovateli podvizhnogo sostava: uchebnik [Electric machines and rolling stock converters]*. Moscow: «Akademiya», p. 320. [in Russian]
4. Kabalyk Yu. (2013). *Sistemy upravleniya elektropodvizhnym sostavom: ucheb. posob. [Control systems for electric rolling stock]*. Khabarovsk: DVGUPS, p. 119. [in Russian]
5. Malozemov B. (2004). “Energy-saving technologies for the maintenance of electric vehicles”. *Elektroenergiya i budushcheye tsivilizatsii: materialy mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. - Electricity and the future of civilization: materials of the international scientific and technical. conf.* Tomsk. pp. 391–393. [in Russian]
6. Panteleyev V., Mashkin A. and Lukyanov P. (2011). “Modernization of AC traction power supply systems”. *Energetika*. No. 7. pp. 13–15. [in Russian]
7. Cheremisin V., Yemelyanenkova Ye. and Ushakov S. (2011). Reducing the imbalance of electrical energy for train traction according to the meters of traction substations and electric rolling stock. *Zheleznodorozhnyy transport – Railway Transport*, No. 2. pp. 43–48. [in Russian]
8. Sovalov S. (1985). *Eksperimentalnyye issledovaniya rezhimov energosistem [Experimental studies of power system regimes]*. Moscow: Energoatomizdat. p. 448. [in Russian]
9. Krogeris A. (1993). *Moshchnost peremennogo toka [AC power]*. Riga: Fiz.-energ. in-t Latv. AN. p. 149. [in Russian]
10. Sleptsov M. (2006). *Osnovy elektricheskogo transporta: ucheb. dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniy [Fundamentals of electric transport]*. Moscow: «Akademiya». p. 464. [in Russian]
11. IEEE STD/1459-2010. IEEE Trial Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. Institute of Electrical and Electronics Engineers (2000). p. 52.
12. Byalobrzheskiy O. and Davydov O. (2010). “Development of an automated measuring system for the study of non-sinusoid and voltage asymmetry of a three-phase network system”. *Visnyk KDU*. Vol. 3. no. 62. pp. 170–174. [in Ukrainian]