УДК 621.311

Сергій Гулак

(старший викладач кафедри «Тяговий рухомий склад» Державного університету інфраструктури та технологій)

Едуард Єрмоленко

(аспірант кафедри «Тяговий рухомий склад» Державного університету інфраструктури та технологій)

Денис Заїка

(інженер кафедри «Тяговий рухомий склад» Державного університету інфраструктури та технологій)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТЯГОВОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Розглянуто та надано характеристику показникам якості електроенергії, які впливають на роботу тягового та допоміжного приводів електрорухомого складу. Проаналізовано, який вплив на кожен з показників якості електроенергії тягової системи електропостачання здійснюють тяговий та допоміжний приводи електрорухомого складу. Запропоновано заходи щодо зниження впливу зазначених приводів на показники якості тягової системи електропостачання.

Ключові слова: показники якості електроенергії, тягова система електропостачання, тяговий привод, допоміжний привод.

Вступ. Оптимізація конкретних технологічних процесів вимагає обґрунтованого вибору для даного об'єкту методів керування. Одним з таких технологічних процесів є система тягового електропостачання (СТЕ) [1]. Крім вибору методів керування технологічним процесом слід вибрати критерії, по яким буде оптимізуватись керування технологічним процесом.

Критеріями оптимальності для побудови оптимальної системи керування такими технологічними процесами розподілу, передачі і споживання електричної енергії можуть служити показники якості електроенергії (ПЯЕ). Дотримання ПЯЕ в допустимих значеннях гарантує нормальне функціонування будь-яких електротехнічних засобів, підключених до системи тягового електроспоживання [2].

Причини погіршення якості електроенергії, пов'язані з тяговою системою, це: коливання напруги, спотворення напруги і струму, провал напруги, виникнення вищих гармонійних складових напруги і струму, реактивна потужність і, як наслідок, зниження коефіцієнту потужності. Існує невизначеність щодо прибуття і відправлення локомотивного навантаження на тягову підстанцію.

DOI: 10.32703/2617-9040-2019-33-1-14

Якщо припустити, що одночасно надходить багато локомотивів, то виникає перевантаження, і це викликає падіння напруги, яке, в свою чергу, погіршує форму напруги, оскільки потреба в потужності залежить від трафіку локомотива. Пуск, прискорення, гальмування також впливають на форму напруги. Завдяки цьому спрацьовує система захисту навіть при відсутності несправності. Система тягового приводу електрорухомого складу має випрямну установку, яка створює вищі гармонійні складові, що також сприяють погіршенню форми напруги і струму. Через ці проблеми тяговий двигун споживає велику кількість енергії і пускає в хід систему захисту без будь-яких несправностей в тягових системах [3].

Роботи, присвячені розробці пристроїв підвищення показників якості енергії системи тягового електропостачання [4-8], свідчать про те, що велика увага приділяється підвищенню електричної ефективності систем тягового приводу електрорухомого складу. Пристрої, в основу яких лягли розробки, наведені в зазначених роботах, дозволяють зменшити негативний вплив тягових приводів електрорухомого складу на показники якості системи тягового електропостачання. Це свідчить про те, що дослідження, присвячені виявленню негативних факторів, що впливають на показники якості електроенергії, а також методам і засобам зменшення цих факторів, є актуальними.

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. В дослідженні [9] дана характеристика показникам якості електричної енергії, показано, як погіршення показників якості впливає на роботу споживачів електричної енергії. Проте, залишилось відкритим питання, як спотворення, що вносять приводи електрорухомого складу (ЕРС) в систему тягового постачання, будуть впливати на показники якості електроенергії системи тягового електропостачання, що, в свою чергу, живить інші споживачі електричної енергії. Подальший розвиток поглядів на вплив приводів ЕРС на показники якості електричної енергії можна знайти в роботі [3], в якій надається характеристика складових приводів ЕРС та показаний їх вплив на ПЯЕ. Крім того, в цьому дослідженні зазначається, що на ПЯЕ істотний вплив здійснює не тільки робота електроприводів ЕРС, але і режими роботи ЕРС (запуск, режим тяги, гальмування тощо), тип електроприводів та кількість ЕРС на ділянці. Але проблеми погіршення ПЯЕ в даній роботі освітлені лише концептуально. В них не розглядається кількісний вплив того чи іншого фактору на ПЯЕ і не має рекомендацій щодо усунення негативного впливу зазначених факторів на ПЯЕ.

Ряд робіт, присвячених питанню підвищення енергетичної ефективності розглядають тільки один негативний фактор впливу на ПЯЕ та шляхи зменшення цього впливу. Так, в дослідженні [10], проаналізовано негативний вплив тягового приводу ЕРС змінного струму з асинхронним тяговим двигуном, а в роботі [11] – тягового приводу з двигуном постійного струму послідовного збудження на такий показник якості, як рівень вищих гармонійних складових струму і напруги. Тобто, вплив тягових приводів ЕРС на спотворення форми напруги і струму та на коефіцієнт потужності. В цих дослідженнях зазначено, що найбільше спотворення форми напругу і струму відбувається в момент комутації вентилів випрямної установки. Крім того, в роботі [11] зазначено, що значний вплив на виникнення вищих гармонійних складових струму має нелінійна характеристика тягового двигуна постійного струму з послідовним збудженням. В роботах [12-13] показано вплив роботи приводу допоміжних машин електровозу, де як розщеплювач фаз використовується асинхронний двигун з несиметричними обмотками, а в якості

мотор-вентиляторів та мотор-компресорів – трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, на виникнення несиметричних режимів струмів і напруг. В дослідженні [14] показано, що якість струмознімання впливає на такі ПЯЕ, як спотворення форми струму та напруги, короточасні провали та викиди напруги, виникнення короточасних імпульсів. В роботі [15] зазначається, що для компенсації таких негативних впливів на ПЯЕ, як генерації вищих гармонійних складових струму і напруги, а також для обмеження впливу відхилення і коливання напруги і частоти слід застосовувати керовані стабілізатори. Але всі ці роботи присвячені розгляду одного або, максимум, двох факторів роботи ЕРС, що негативно впливають на ПЯЕ системи тягового електропостачання.

Крім того, як показано в дослідженні [3], невизначеність щодо прибуття і відправлення локомотивного навантаження на тягову підстанцію призводить до того, що процеси, які відбуваються в системі тягового електропостачання, слід розглядати як випадкові неергодичні. До факторів, що впливають на невизначеність процесів також впливають постійні відривання та притискання струмоприймача до контактного проводу, вхід під нейтральну вставку контактної мережі та вихід з неї [14]. Тобто, при аналізі впливу того чи іншого фактору роботи ЕРС, що впливає на ПЯЕ системи тягового електропостачання, слід враховувати, що електромагнітні процеси, які відбуваються в системі тягового електропостачання носять випадковий характер.

Систематизація результатів проведених досліджень дозволяє вважати, що існуючі підходи до вирішення проблеми аналізу впливу ЕРС на ПЯЕ та розробки заходів щодо підтримання цих показників в нормованих межах носять припущення, що електромагнітні процеси, які відбуваються в системі тягового електропостачання мають стаціонарний характер. Іншими словами, припускається, що прибуття і відправлення локомотивного навантаження на тягову підстанцію та робота струмоприймача ЕРС описуються детермінованою в часі функцією. Очевидно, подібні підходи дозволяють знаходити оптимальне рішення тільки в тому випадку, якщо можна прогнозувати час прибуття і відправлення та величину тягового навантаження, кількість відривань та притискань струмоприймача до контактного проводу за період та їх дискретність. Крім того, аналіз результатів проведених досліджень показав, що методика розрахунку цих параметрів справедлива тільки для системи тягового споживання в стаціонарних режимах. З цього слідує, що випадковий характер електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання не дасть можливості отримання ефективних рішень щодо зменшення негативного впливу ЕРС на ПЯЕ в реальних умовах експлуатації. Дана проблема може бути вирішена шляхом розробки аналізу негативного впливу ЕРС на кожен із ПЯЕ системи тягового електропостачання в реальних умовах експлуатації. Для цього при описі фізичних процесів слід вважати напругу на струмоприймачі ЕРС випадковою величиною.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є аналіз впливу приводів ЕРС на ПЯЕ системи тягового електропостачання при умові, що електромагнітні процеси, які відбуваються в системі, носять випадковий характер. Запропонований аналіз в подальшому може бути використаний для розробки заходів щодо зменшення негативного впливу ЕРС на ПЯЕ системи тягового електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати природу погіршення кожного з показників якості системи тягового електропостачання;

- виконати аналіз негативного впливу ЕРС на кожен із ПЯЕ системи тягового електропостачання;
- врахувати випадковий характер зміни параметрів електроенергії при оцінці допустимості режимів роботи приводів ЕРС;
- визначити фактичний внесок в спотворення кожного з факторів, що впливають на погіршення ПЯЕ та запропонувати заходи, щодо зменшення цих факторів.

Матеріали та методи дослідження. В даній статті будуть розглядатись лише фактори, роботою ЕРС, які здійснюють негативний вплив на ПЯЕ системи тягового електропостачання. При аналізі зазначених факторів особливу увагу слід приділити врахуванню випадкового характеру зміни параметрів електроенергії при оцінці допустимості режимів роботи приводів ЕРС. В загальному випадку до ПЯЕ системи тягового електропостачання можна віднести [9]:

- відхилення і коливання напруги та частоти;
- несиметрію трифазних напруг і струмів;
- несинусоїдальність напруг і струмів;
- імпульси, короточасні провали і викиди напруги.

В зв'язку зі зміною навантажень напруга і частота в мережі не можуть підтримуватися строго рівними їх номінальним значенням в будь-який момент часу і являють собою випадкові процеси, подібні зображеним на рис. 1. Для характеристики цих процесів використовують поняття відхилень і коливань.

Відхиленнями напруги δU і частоти δf називають відмінності їх значень U і f від номінальних $U_{ном}$ і $f_{ном}$, виражені в вольтах (герцах):

$$\begin{aligned}\delta U &= U - U_{ном}; \\ \delta f &= f - f_{ном}.\end{aligned}\tag{1}$$

Рис. 1. Процеси зміни відхилень напруги (частоти)

Показанні на рис. 1 процеси зміни відхилень напруги (частоти) знаходяться всередині діапазону допустимих відхилень (відзначені пунктирними лініями). Однак внутрішні структури процесів різні: якщо перший являє собою величину, що порівняно повільно змінюється в часі, то для другого характерні різкі її зміни. Різний і вплив цих процесів на систему електропостачання. Обертний момент двигуна, як відомо, залежить від напруги і частоти. При їх відхиленні від поминальних значень робочі характеристики двигуна змінюються. Однак, якщо відхилення знаходяться в допустимих межах, то і його характеристики також знаходяться в допустимих межах.

Для характеристики цього явища використовують поняття коливань напруги і частоти. Коливання напруги характеризують фактично вид зміни відхилення напруги в часі. На практиці до коливань напруги відносять її зміни, що відбуваються зі швидкістю більше $\frac{1\%}{с}$, а до коливань частоти – ті, що відбуваються зі швидкістю більше $\frac{0,2Гц}{с}$. Зазначені граничні значення не мають строгих обґрунтувань і встановлені, виходячи із загальних міркувань.

Коливання напруги і частоти викликаються роботою ЕС з різко змінним характером споживання потужності (тягові двигуни електрорухомого складу). В переважній більшості випадків коливання напруги і частоти супроводжують одне одного: при цьому різко змінюється характер споживання як активної, так і реактивної потужності. При зростанні навантаження кут вектору напруги збільшується, що призводить до збільшення періоду синусоїди протягом накиду (зниження частоти), а при скиданні навантаження - навпаки. Зміна частоти δf пов'язана зі зміною кута вектору напруги $\delta\varphi$, град, і тривалістю накидів навантаження t_δ , співвідношенням:

$$\delta f = \frac{\delta\varphi}{360} \cdot t_\delta. \quad (2)$$

Зміна кута вектору напруги визначають за формулою:

$$\operatorname{tg}(\delta\varphi) = \frac{P \cdot X - Q \cdot R}{U^2}, \quad (3)$$

де P - активна потужність, що споживається тяговим приводом ЕРС; Q - реактивна потужність, що віддає тяговий привод ЕРС в мережу; R - активний опір тягового приводу; X - реактивний опір тягового приводу; U - модуль напруги контактної мережі.

При періодичних накидах і скиданнях навантаження частота протягом часу накиду t_δ буде нижче робочого значення на δf , потім (протягом часу постійного навантаження) дорівнює робочому значенню, а протягом часу скидання навантаження - вище робочого значення на δf .

Несиметричні режими зумовлюються трьома причинами:

- неоднаковими навантаженнями фаз елементів мережі, що викликаються роботою ЕС з нестабільним навантаженням фаз і однофазних ЕС;
- неповнофазною роботою ліній, викликані короткочасним відключенням однієї з фаз лінії при коротких замиканнях або більш довготривалим відключенням при пофазних ремонтах, наявністю поперечних реакторів не у всіх фазах лінії і т. п.;
- нерівністю фазних параметрів ліній. Невелика відмінність фазних параметрів з відмінностями розташування проводів на опорі. Несиметрія напруг, зумовлена цією причиною, на порядок менше перших двох.

Найбільш частою причиною несиметрії напруг на практиці є нерівність струмових навантажень фаз. При цьому розрізняють два види несиметрії:

систематичну і ймовірну несиметрію. Характерною рисою систематичної несиметрії є постійне перевантаження однієї з фаз; в цьому випадку виконують вирівнювання навантажень фаз шляхом перемикання частини навантажень з перевантаженої на недовантажених фазу. Ймовірнісна несиметрія характеризується поперемінним перевантаженням то однієї, то іншої фази (переміжна несиметрія). В мережах високих напруг несиметрія викликається наявністю у споживачів потужних однофазних навантажень і трифазних, але з неоднаковим споживанням за фазами. Потужним джерелом несиметрії є тягові підстанції залізничного транспорту, електрифікованого на змінному струмі, так як електровози є однофазними електроприймачами.

Але питання вирівнювання навантаження фаз вирішується на стороні тягової підстанції і визначення фактичного внеску спотворення ПЯЕ цим негативним фактором розглядатись не буде.

Спотворення синусоїдальності кривих напруг і струмів викликаються роботою ЕС з нелінійної вольт-амперною характеристикою і регульованих перетворювачів змінного струму в постійний. Криві струму і напруги в цих випадках набувають вигляду, відмінного від синусоїди (крива U на рис. 2). Користуючись методом гармонійних складових, можна вихідну несинусоїдальну криву розкласти на суму синусоїдальних з певними значеннями амплітуд гармонік і їх початкових кутів. На рис. 2 приведена крива напруги, що містить першу U_1 і п'яту U_5 гармоніки. Вид кривої U залежить не тільки від амплітуди гармоніки, а й від її фазового кута щодо U_1 (кут φ_5). При збільшенні φ_5 точка a буде зсуватися праворуч і вгору, а точка b - вправоруч і вниз.

Максимальне значення миттєвої напруги знизиться. Для деяких типів електронного обладнання максимальне значення миттєвої напруги істотно впливає на нормальну роботу, тому контроль тільки амплітуд гармонік може виявитися недостатнім. Вплив на режими роботи ЕС напруги U такий же, як і сумарний вплив напруг U_1 і U_5 , тому гармонійний аналіз є зручним методом аналізу несинусоїдальних режимів.

Відомо, що індуктивні X_{Lv} і ємнісні X_{Cv} опори на частоті гармоніки ν пов'язані з опорами X_L і X_C на основній частоті співвідношеннями:

$$X_{Lv} = \nu \cdot X_L; \quad X_{Cv} = \frac{X_C}{\nu}. \quad (4)$$

Тому при виникненні на вході обладнання ν -й гармоніки напруги її струм в ЕС індуктивного характеру (наприклад, в реакторі) буде в процентному відношенні в ν разів менше, ніж при напрузі першої гармоніки U_1 , а в ЕС ємнісного характеру (наприклад, в батареї конденсаторів) - в ν раз більше. Це викликає перегрів конденсаторів і вихід їх з ладу.

Рис. 2. Розкладання несинусоїдної кривої на синусоїдальні складові

Перетворювальні агрегати генерують в мережу гармоніки, порядок яких визначається формулою $\nu = k \cdot n \pm 1$, де k - пульсність перетворювача, а n - цілі числа від 1 до ∞ . Так, шестипульсний перетворювач генерує в мережу гармоніки 5,7,11,13,17,19 і далі. Струм ν -й гармоніки перетворювача $I_\nu \approx \frac{I_1}{\nu}$, тому, наприклад, $I_5 \approx 0,2 \cdot I_1$, $I_{25} \approx 0,04 \cdot I_1$ і т. д.

Провали напруги зазвичай відбуваються при коротких замиканнях в мережі і тривають протягом часу, необхідного для спрацьовування пристроїв релейного захисту та автоматики (РЗА). Викиди напруги відбуваються при відключеннях великих навантажень. Тривалість цих явищ в високовольтних мережах може досягати декількох секунд (рис. 3,а).

Імпульси напруги виникають при ударах блискавки в повітряних лініях електропередачі і при комутаційних перемиканнях в мережах. Вони тривають протягом мілі- і мікросекунд і характеризуються імпульсною напругою U_{imn} , напругою кидка U_K і тривалістю імпульсу, яка визначається у його основі t_{imn} і на рівні половини напруги кидка $t_{imn0,5}$ (рис. 3,б).

Для їх обмеження до значень, безпечних для електроустаткування підстанцій електричних мереж високої напруги, застосовують вентильні розрядники і вентилі перенапруг. Амплітуда імпульсів напруги, що трансформуються в мережі низької напруги, істотно знижується за рахунок опорів силових трансформаторів. Якщо залишкова амплітуда імпульсів напруги залишається небезпечною для роботи чутливих ЕСП, на їх входах необхідно застосовувати спеціальні засоби гасіння імпульсів.

В даний час в Україні не існує легітимного документа, що встановлює методику розрахунку допустимого впливу споживача на ЯЕ і процедуру оцінки дотримання ним встановлених вимог. Нижче викладається методика, розроблена [16] на основі проведених розробок Дослідницького комітету № 36 Міжнародної конференції по великим енергетичним системам (СІГРЕ). Основні положення цих розробок використовуються на практиці в ряді зарубіжних країн.

Рис. 3. Короточасний провал і викид напруги (а); імпульс напруги (б)

Вимоги до ЯЕ за показниками «коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги», «коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги» встановлюють у вигляді зобов'язання енергопостачальної організації підтримувати значення ПЯЕ в точці контролю ЯЕ відповідно до норм ГОСТ 13109-97 [17] за умови не перевищення ЕРС встановленого в технічних умовах або в договорі електропостачання допустимого впливу його електроустановок на значення ПЯЕ в цій точці.

Допустимий вплив ЕРС на значення ПЯЕ, перерахованих вище, вказують у вигляді допустимого вкладу споживача (ДВС) в значення ПЯЕ або у вигляді допустимих значень струму (потужності) спотворень, які відповідають цій ПЯЕ.

Допустимий вплив на ЯЕ щодо великого споживача (яким є ЕРС), відношення дозволеної потужності якого до пропускної здатності мережі в точці приєднання $d_n > 0,2$ вказують у вигляді ДВС в значення ПЯЕ.

За показником «розмах зміни напруги» вимоги формують таким чином:

«Установки споживача не повинні викликати в точці приєднання розмахи зміни напруги з параметрами, що перевищують встановлені ГОСТ 13109-97 [17]. При виконанні цієї вимоги енергопостачальна організація забезпечує значення розмаху зміни напруги відповідно до норм ГОСТ 13109-97 [17]».

За показниками «доза флікера» (відхилення і коливання напруги), «коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги», «коефіцієнти гармонійних складових напруги вимоги формують таким чином:

«Споживач повинен забезпечити режими роботи своїх електроустановок, при яких їх вплив на значення перерахованих ПЯЕ в точці приєднання не перевищує допустимого впливу. При виконанні цієї умови енергопостачальна організація повинна забезпечувати значення зазначених ПЯЕ в межах норм ГОСТ 13109-97 [17]».

Допустимий внесок споживача в нормально допустиме або гранично допустиме значення ПЯЕ в точці приєднання визначають за формулою

$$ДВС = П_H \cdot (d_n \cdot d_{ПЯЕ})^{\frac{1}{a}}, \quad (5)$$

де $П_H$ - нормально або гранично допустиме значення ПЯЕ для даної мережі;

$d_{ПЯЕ}$ - частка нормованого значення ПКЕ, яка відноситься на допустимий сумарний внесок споживачів, які живляться від даної точки;

a - показник, чисельні значення якого наведені в [9].

При розрахунку ДВС в коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і коефіцієнт n -ї гармонійної складової напруги значення $d_{ПЯЕ}$ визначають за формулою

$$d_{ПЯЕ} = \frac{1}{1 + \frac{S_{К.Н}}{S_{К.В}}}, \quad (6)$$

де $S_{К.Н}$ - потужність трифазного короткого замикання на шинах низької напруги підстанції, від якої отримує живлення споживач;

$S_{К.В}$ - те саме, на шинах високої напруги.

Фактичні внески ЕРС як споживача (ФВС) в значення ПЯЕ (для споживача, відношення дозволеної потужності якого до пропускної здатності мережі в точці приєднання $d_n > 0.2$) визначають на основі вимірів спеціалізованими приладами [18]. При відсутності приладів ФВС з $d_n > 0.2$ в ПЯЕ в ТК може бути визначений на основі вимірів самих ПЯЕ в різних режимах роботи споживача. Для ЕРС в умовах експлуатації, коли відключення неприйнятне, ФВС визначається на основі вимірів ПЯЕ при різних навантаженнях споживача залежності ПЯЕ від навантаження і розрахунку по ній значень ПЯЕ, що відповідають нульовому і розрахунковому значенням навантаження споживача.

ФВС визначають на основі залежності ПЯЕ від обраного параметра, що характеризує навантаження споживача. Коефіцієнти залежності розраховують за результатами одночасних вимірювань значень ПЯЕ і параметра навантаження в періоди з різним складом включених ЕС. Як параметр навантаження можуть використовуватися: еквівалентна потужність ЕС, що вносять спотворення, активна, реактивна або повна потужність (струм) споживача в цілому або на окремих фідерах, до яких приєднана основна потужність ЕС, що вносять спотворення, а також інші параметри, кореляція яких з рівнем ПЯЕ передбачається виходячи з особливостей технологічного процесу.

В зв'язку з різними відносними вкладками різних типів ЕС в спотворення в якості параметра навантаження для споживачів, що мають потужні ЕС, які вносять спотворення різних типів, рекомендується приймати їх еквівалентну потужність, яка визначається за формулою (крім дози флікера):

$$S_{екв} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (k_i \cdot S_i)^2}, \quad (7)$$

де S_i - робоча потужність i -го ЕС, що вносить спотворення в розглянутому режимі;

k_i - коефіцієнт приведення потужності i -го ЕС до потужності ЕС базового типу;

m - кількість типів ЕС, що вносять спотворення.

При визначенні еквівалентної потужності навантажень, що створюють вищі гармоніки, як ЕС базового типу приймають 6-пульсної некерований випрямляч.

Коефіцієнти приведення потужності інших типів ЕС до еквівалентної потужності ЕС базового типу наведені в [9]. Еквівалентну потужність ЕП, що вносять спотворення, для визначення впливу на дозу флікера визначають як суму діапазонів можливої зміни потужностей цих ЕС.

Лінійна залежність показника Π від параметра навантаження споживача S має вигляд:

$$\Pi = b \cdot S + c. \quad (8)$$

Для визначення значень коефіцієнтів b і c розраховують допоміжні величини:

$$W = \sum_{j=1}^N \Pi_j; \quad X = \sum_{j=1}^N \Pi_j \cdot S_j; \quad Y = \sum_{j=1}^N S_j; \quad Z = \sum_{j=1}^N S_j^2. \quad (9)$$

а потім і самі коефіцієнти:

$$b = \frac{N \cdot X - W \cdot Y}{N \cdot Y - Y^2}; \quad c = \frac{W - b \cdot Y}{N}, \quad (10)$$

де N - кількість інтервалів вимірювань показника, для кожного з яких обчислено значення Π_j з відповідним йому значенням S_j .

Значення $\Pi_{\text{Виск.}}$ і $\Pi_{\text{Вкл.}}$ визначають за формулами:

$$\Pi_{\text{Виск.}} = c; \quad (11)$$

$$\Pi_{\text{Вкл.}} = c + b \cdot S_{\text{розр.}}, \quad (12)$$

де $S_{\text{розр.}}$ - розрахункове значення S .

В якості $S_{\text{розр.}}$ приймають потужність, відповідну режиму, в якому спостерігалось порушення норм стандарту, узгодженим робочого режиму з максимальною потужністю і т. п.

ФВС визначають за формулою

$$\Phi BC = \left(\Pi_{\text{вкл.}}^a - \Pi_{\text{виск.}}^a \right)^{\frac{1}{a}}, \quad (13)$$

Велике значення $\Pi_{\text{Виск.}}$ свідчить про істотний внесок обладнання суміжних споживачів, що вносять спотворення в значення ПЯЕ в ТК. При $b > 0$ вклад розглянутого споживача збільшує значення ПЯЕ в ТК (позитивний коефіцієнт кореляції спотворень, що вносяться споживачами), при $b < 0$ - зменшує (негативний коефіцієнт кореляції). В останньому випадку робота розглянутого споживача призводить до часткової компенсації спотворень, що вносяться іншими споживачами.

Ступінь випадкового впливу інших споживачів на значення ПЯЕ в ТК (коефіцієнт кореляції близький до нуля) визначають за формулою

$$B = \sqrt[4]{\frac{\sum_{j=1}^N (b \cdot S_j + c - \Pi_j)^2}{N-1}}. \quad (14)$$

Величина B не є фактичним внеском інших споживачів в значення ПЯЕ в ТК даного споживача, так як відображає не різницю значень ПЯЕ при включеному і вимкненому станах інших споживачів, а діапазон відхилень вимірних значень ПЯЕ від відповідної фізики процесу лінійної залежності ПЯЕ від потужності даного споживача. Співвідношення значень B і середнього значення ПЯЕ $\Pi_c = \frac{W}{N}$ говорить про значущість випадкового впливу інших споживачів на значення ПЯЕ в ТК даного споживача. При істотних значеннях співвідношення $\frac{B}{\Pi_c}$ доцільно провести повторні вимірювання в періоди з меншим впливом інших споживачів.

Розрахуємо, який допустимий внесок та фактичний внесок за дозою флікера і спотворення синусоїдальності вносить електровоз серії ВЛ-80, що має некеровану випрямну установку та потужність $S_{ВЛ} = 7,2 \text{ МВ} \cdot \text{А}$. Результати замірів граничних значень коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги і середніх значень робочої потужності S_j на 10 інтервалах однакової тривалості при відносно стабільних складах ЕС наведені в таблиці 1. Результати занесемо до таблиці 2.

Таблиця 1. Результати замірів граничних значень коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги і середніх значень робочої потужності S_j

$\Pi_j, \%$	2	6	3	5,5	4	9	2,5	7	6	8
$S_j, \text{МВ} \cdot \text{А}$	1,2	2,4	0,6	4,2	3	5,4	1,8	6	3,6	4,8

Як видно з таблиці 2, фактичні спотворення, що вносяться в показники якості електроенергії системи тягового електропостачання перевищують допустимі. Істотний вплив на спотворення, що вносяться електровозом здійснюють інші споживачі електричної енергії. Для зменшення впливу цих спотворень на ЕРС слід застосовувати гібридні компенсатори реактивної потужності, пасивна частина якого, компенсувала фазовий зсув між напругою та струмом, активна частина видаляла б вищі гармонійні складові струму, а система активною частиною – адаптувала б параметри активного фільтру до форми напруги в контактній мережі.

Таблиця 2. Результати розрахунків допустимого та фактичного внеску спотворень ПЯЕ, що вносяться в систему тягового електропостачання електровозом серії ВЛ-80Т,К

Тип спотворень	Параметр		Значення показника, %
Доза флікера	Допустимий внесок, ДВС	короткочасний	0.343
		довгостроковий	0.254

	Фактичний внесок, ΦBC		2.124
Спотворення синусоїдальності кривої напруги	Допустимий внесок, DBC		2.195
	Фактичний внесок, ΦBC		2.736
	Вплив інших споживачів, B		1,782

Висновки. Виконаний аналіз впливу роботи ЕРС на ПЯЕ системи тягового електропостачання дозволить врахувати особливості взаємодії ЕРС змінного струму із системою тягового електропостачання, оцінити вплив, який він вносить на ПЯЕ. Також за допомогою запропонованого аналізу можна більш ефективно розробити схеми компенсації реактивної потужності на ЕРС змінного струму з врахуванням випадкових процесів, які відбуваються в системі тягового електропостачання.

Виконаний аналіз дозволить в подальшому глибше вивчити електромагнітну сумісність роботи ЕРС з різними способами організації тягового приводу, що живляться від однієї підстанції.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сиченко В. Г. Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії. Гірничая електромеханіка та автоматика, зб. наук. пр. Дніпропетровськ, 2015. Вип. 94. С. 25—30.
2. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дніпропетровськ: Вид-во ПФ "Стандарт-Сервіс", 2015. 344 с.
3. Kale S. E., Joshi K. D. Railway Traction System: Current Status and Apportunities //Int. J. Elect. Eng. 2017. Vol. 10. №. 1. P. 47-56. ISSN 0974-2158.
4. Salah F. et al. Impact of electric vehicles on distribution substations: A Swiss case study //Applied Energy. 2015. Vol. 137. P. 88-96. doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.091.
5. Schuller A., Flath C. M., Gottwalt S. Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration//Applied Energy. 2015. Vol. 151. P. 335-344. doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.004.
6. Douglas H. et al. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks//Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 106. P. 1149-1165. doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.053.
7. González-Gil A., Palacin R., Batty P. Optimal energy management of urban rail systems: Key performance indicators//Energy Conversion and Management. 2015. Vol. 90. P. 282-291. - doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.035.
8. Yang X. et al. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit //IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016. Vol. 17. №. 1. P. 2-13. doi:10.1109/TITS.2015.2447507. ISSN:1558-001.
9. Железко Ю. Потери електроенергии. Реактивная мощность. Качество електроенергии: Руководство для практических расчетов. Litres. 2018. 456 с. ISBN 978-5-93196-958-9.
10. Milešević B., Uglešić I., Filipović-Grčić B. Power quality analysis in electric traction system with three-phase induction motors//Electric Power Systems Research. 2016. Vol. 138. P. 172-179. doi:10.1016/j.eprsr.2016.02.027.
11. Гулак С. О., Єрмоленко Е. К. Модель системи Тягова підстанція–контактна мережа–тяговий привід електровоза серії ВЛ-80 Т, К//Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Серія: Транспортні системи і технології. 2016. №. 28. С. 99-109.
12. Гулак С. О., Єрмоленко Е. К. Розробка математичної моделі для дослідження роботи приводу допоміжних машин електровозів серій вл-80т, к, що працюють в несинусоїдальному та несиметричному режимах //Вісник (Visnik). 2018. С. 80. ISSN 1998-7927.
13. Goolak S. Методичні рекомендації щодо застосування моделі фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні //Транспортні системи і технології. 2018. Т. 1. №. 32. С. 4-13. DOI: https://doi.org/10.32703/2617-9040-2018-32-1-4-13

14. Apollonskiy S. M. Problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system //Transportation systems and technology. 2015. Vol. 1. №. 2. P. 110-126. doi: <https://doi.org/10.17816/transsyst201512110-126>. ISSN:2413-9203.
15. Babu A., Sreejaya P. Reduced Rating Railway Power Conditioners in Co-phase Traction and Traditional traction system //2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC). IEEE, 2015. P. 291-296. doi:10.1109/ICCC.2015.7432908. ISBN:978-1-4673-7349-4.
16. Методика розрахунку технологічних втрат в пристроях електропостачання. ЦЕ 0007. Затв.: Наказ Укрзалізниці № 342 від 28.08.2003. Київ: 2003. 37 с. ГОСТ 13109-97.
17. ГОСТ 13109-97. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення.
18. Жиленков А. А. Повышение эффективности систем автоматического управления качеством энергии автономных электростанций//Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. №. 6 (9). С. 10-16. doi: 10.15587/1729-4061.2015.56752.

REFERENCES

1. Sychenko, V. G., & Sychenko, V. G. (2015). Influence of electric power processes in traction power supply systems on the quality of electric energy.
2. Sychenko, V. G., Sayenko, Y. L., & Bosyi, D. O. (2015). Quality of electric energy in traction networks of electrified railways: monograph.
3. Kale, S. E., & Joshi, K. D. (2017). Railway Traction System: Current Status and Apportunities. Int. J. Elect. Eng, 10(1), 47-56.
4. Salah, F., Ilg, J. P., Flath, C. M., Basse, H., & Van Dinther, C. (2015). Impact of electric vehicles on distribution substations: A Swiss case study. Applied Energy, 137, 88-96.
5. Schuller, A., Flath, C. M., & Gottwalt, S. (2015). Quantifying load flexibility of electric vehicles for renewable energy integration. Applied Energy, 151, 335-344.
6. Douglas H., Roberts C., Hillmansen S., & Schmid F. (2015). An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks //Energy Conversion and Management, 106, 1149-1165.
7. González-Gil, A., Palacin, R., & Batty, P. (2015). Optimal energy management of urban rail systems: Key performance indicators. Energy Conversion and Management, 90, 282-291.
8. Yang, X., Li, X., Ning, B., & Tang, T. (2016). A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(1), 2-13.
9. Zhelyezko, Y. (2018). Loss of electricity. Reactive power Electricity Quality: A Manual for Practical Calculations. Litres.
10. Milešević, B., Uglešić, I., & Filipović-Grčić, B. (2016). Power quality analysis in electric traction system with three-phase induction motors. Electric Power Systems Research, 138, 172-179.
11. Goolak, S. O., & Yermolenko, E. K. (2016). System model Traction substation-contact network-traction drive of the electric locomotive of series БЛ-80 Т, К. Collection of scientific works of the State economic-technological university of transport. Series: Transport Systems and Technologies, (28), 99-109.
12. Goolak, S. O., & Yermolenko, E. K. (2018). Development of a mathematical model for investigation of the operation of supplementary machines of electric ranges of series vl-80t, k, working in non-side and nosiometric modes. Herald visnik, 80.
13. Goolak, S. (2018). Методичні рекомендації щодо застосування моделі фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні. Транспортні системи і технології, 1(32), 4-13.
14. Apollonskiy, S. M. (2015). Problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system. Transportation systems and technology, 1(2), 110-126.
15. Babu, A., & Sreejaya, P. (2015, November). Reduced Rating Railway Power Conditioners in Co-phase Traction and Traditional traction system. In 2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC) (pp. 291-296). IEEE.
16. Methodology for calculation of technological losses in power supply devices. CE 0007. Approved: Ukrzaliznitsa Order No. 342 dated August 28, 2003. - Kyiv, 2003. - 37.
17. GOST 13109-97. Norms of quality of electric energy in general-purpose power systems.
18. Zhilenkov, A. A. (2015). Increase of efficiency of systems of automatic control of quality of energy of autonomous power stations. East European Magazine of Advanced Technology, (6 (9)), 10-16.

Сергей Гулак
(старший преподаватель кафедры «Тяговый подвижной состав»
Государственного университета инфраструктуры и технологий)
Эдуард Ермоленко
(аспирант кафедры «Тяговый подвижной состав» Государственного
университета инфраструктуры и технологий)
Денис Заика
(инженер кафедры «Тяговый подвижной состав» Государственного
университета инфраструктуры и технологий)

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА
ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СИСТЕМЫ
ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Рассмотрены и охарактеризованы показатели качества электроэнергии, которые влияют на работу тягового и вспомогательного приводов электроподвижного состава. Проанализировано, какое влияние на каждый из показателей качества электроэнергии тяговой системы электроснабжения осуществляют тяговый и вспомогательный приводы электроподвижного состава. Предложены мероприятия по снижению влияния указанных приводов на показатели качества тяговой системы электроснабжения.

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, тяговая система электроснабжения, тяговый привод, вспомогательный привод.

Sergey Goolak
(Senior Lecturer of the «Traction Rolling Stock Department» at the State University
of Infrastructure and Technologies)
Eduard Yermolenko
(Postgraduate of the «Traction Rolling Stock Department» at the State University of
Infrastructure and Technologies)
Zaika Denys
(Engineer of the «Traction Rolling Stock Department» at the State University of
Infrastructure and Technologies)

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF ELECTRIC COMPONENT ON THE
INDICATORS OF THE QUALITY OF TRACTION SYSTEM OF ELECTRICAL
SUPPLY**

The article describes and substantiates characteristics of electric power quality parameters that influence the work of traction and auxiliary drives of electric railroad rolling stock. It is analyzed how traction and auxiliary drives of an electromotive force influence on each of the parameters of electric power of the traction power supply system. It is shown how the work of electric drives affects the random nature of processes occurring in the traction power system of railways. The methodology of calculation of the allowable contribution of consumers for the indicators of electricity quality, as well as the actual contribution of distortions of consumers in the system of traction power supply is given. For such indicators of electric power quality as deviation of voltage and

frequency and distortion of the nonsinusoidality of the voltage curve for electric lines of the VL-80 series, allowable consumer inputs and actual consumption inputs are calculated, taking into account the distortion of these indicators by other consumers of electric power. Calculations were made taking into account the random nature of the electromagnetic processes occurring in the traction power system, and provided that the probability of output of the quality index with allowable limits is 0.95. Measures to reduce the impact of these drives on the power quality parameters of the traction power supply system are proposed.

Keywords: *indicators of electric power quality, traction system of power supply, traction drive, auxiliary drive..*