

Рис. 7. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 0,4 кВ

При розробці напрямків з підвищення якості електричної енергії в лініях нетягового електропостачання необхідно передбачати заходи, спрямовані не тільки на підтримку якості електроенергії, але й надійності електропостачання, підвищення енергоефективності та зменшення втрат в системах електропостачання.

#### Список літератури

1. Ратнер, М.П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. / М.П. Ратнер, Е.Л. Могилевский. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2014 році. – К. Укрзалізниця, 2015. – 240 с.
3. Темербаев, С. А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. / С.А. Темербаев, Н.П. Боярская, В.П. Довгун, В.О. Колмаков.// Электронный ресурс, режим доступа: [http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/9644/1/12\\_Temerbaev.pdf](http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/9644/1/12_Temerbaev.pdf).
4. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саченко, Д.О. Босий. – Д.: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.
5. Третьяков, Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей.// Транспорт Российской Федерации, 2011, № 3, с. 50-54.
6. IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Муха А.М.

УДК 621.331

Д.О. Босий, канд. техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

## ВЗАЄМОДІЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО З СИСТЕМАМИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

**Анотація.** Наведено результати досліджень на узагальнених моделях взаємодії систем електричної тяги постійного і змінного струму із системою зовнішнього електропостачання. В якості методів дослідження використано двовимірний розподіл величини тягового навантаження в припущенні, що ор-

тогональні складові струмів є випадковими та незалежними величинами. Для кількісного визначення гармонійних складових використано спрощені кусково-задані функції пульсуючого струму. Встановлено, що кореляція між складовими струмів тягового навантаження характерна лише системі постійного струму. У системі змінного струму через вплив більшої кількості факторів кореляція між цими складовими відсутня. Практичне значення полягає у ранжуванні систем електричної тяги залежно від емісії струмів вищих гармонік.

**Ключові слова:** електрична тяга, змінний струм, постійний струм, система електропостачання, випадкова величина, двовимірний розподіл, кореляція, якість електроенергії, несиметрія, емісія гармонік.

**Анотація.** Приведены результаты исследований на обобщенных моделях взаимодействия систем электрической тяги постоянного и переменного тока с системой внешнего электроснабжения. В качестве методов исследования использовано двумерное распределение величины тяговой нагрузки в предположении того, что ортогональные составляющие токов являются случайными и независимыми величинами. Для количественного определения гармонических составляющих использованы упрощенные кусочно-заданные функции пульсирующего тока. Установлено, что корреляция между составляющими токов тяговой нагрузки характерна только системе постоянного тока. В системе переменного тока из-за влияния большего количества факторов корреляция между составляющими отсутствует. Практическое значение заключается в ранжировании систем электрической тяги в зависимости от эмиссии токов высших гармоник.

**Ключевые слова:** электрическая тяга, переменный ток, постоянный ток, система электроснабжения, случайная величина, двумерное распределение, корреляция, качество электроэнергии, несимметрия, эмиссия гармоник.

**Abstract.** This article contains the results of studies on the generalization models of AC and DC electric traction systems interaction with the external power supply systems. The two-dimensional distribution of the traction load is used as the methods of investigation by the assumption that the orthogonal components of the currents are random and independent variables. The simplified piecewise-defined function of the pulsating current is used for calculating the harmonic components. It was found that only for the DC traction system the correlation between the components are characterized by the traction load currents. For the AC traction system due to the influence more factors the correlation between the components is absent. The practical value lies in the rankings of electric traction systems depending on the emission of current's harmonic.

**Keywords:** electric traction, alternating current, direct current, power supply system, random value, two-dimensional distribution, correlation, power quality, unbalance, harmonic emission.

### Вступ

Системи тягового електропостачання електрифікованих залізниць складаються з великої кількості відносно складних підсистем, які активним чином взаємодіють між собою. Складні процеси взаємодії систем тягового та зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи електроустаткування, 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 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, взаємодію з системами тягового електропостачання можна обмежити головними – створення відхилень напруги, спотворення синусоїдності кривої напруги (струму) та розбалансування трифазної системи.

Метою даної роботи є дослідження на узагальнених моделях взаємодії систем тягового електропостачання з системами зовнішнього електропостачання для подальшого використання в задачах вивчення енергообмінних процесів і, відповідно, поліпшення ефективності та забезпечення необхідного рівня електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги.

### Постановка задачі дослідження

Відомо, що будь-яка задача моделювання в динаміці, що пов'язана з розрахунками потоків енергії, зводиться до розв'язання диференціальних рівнянь [1]. 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 вентилялі, у яких стрибкоподібно змінюється провідність при переході з провідного стану в непровідний.

Кінцевий споживач в системі тягового електропостачання на частоті основної гармоніки є додатним 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 [2]. 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 [3]. 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 виявив низький рівень ефективності застосування ступеневих регульованих пристроїв у мережах, що живлять тягові навантаження, з метою регулювання балансу реактивної потужності через обмеженість 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 входять два види регульованих реактивних елементів: керовані реактори та комутуємі конденсатори. Зазвичай для згладження характеристики регулювання на два-чотири конденсаторних блоки використовують один керований реактор однакової потужності. Таким чином, це дає можливість керувати генерацією 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.

### **Методика та результати дослідження**

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, довкола яких орієнтуються ймовірності зміни режимів роботи системи електропостачання.

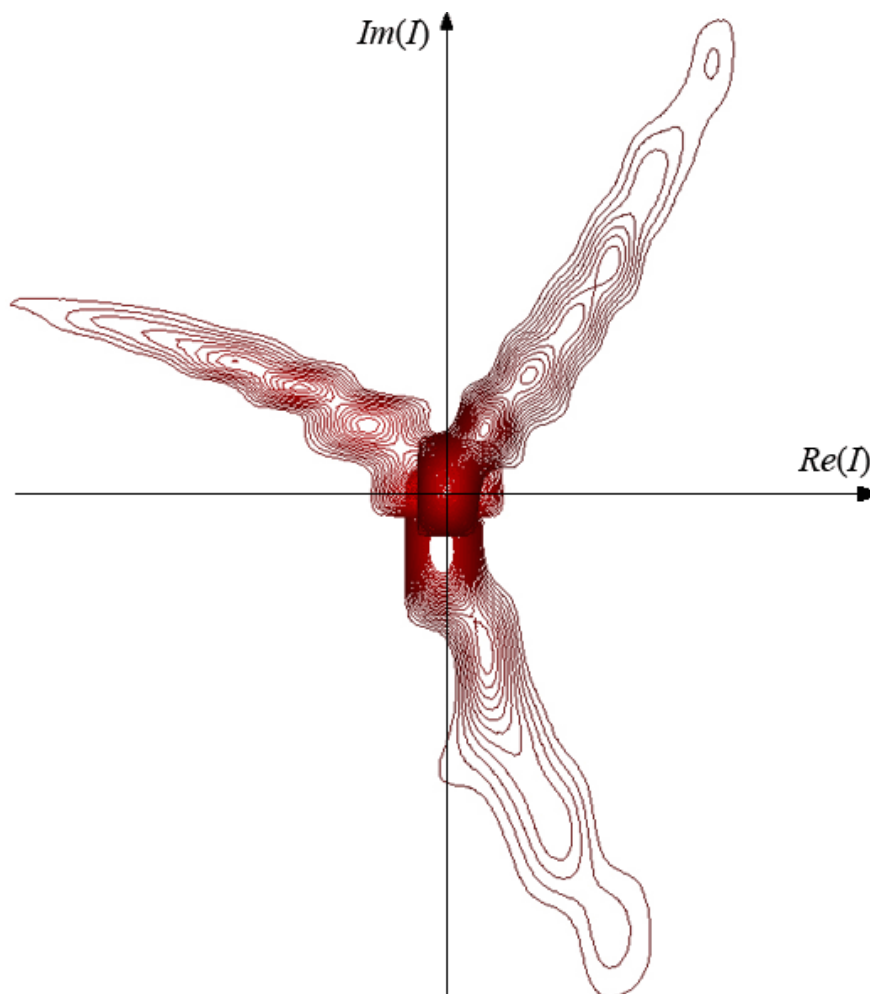
Шляхом узагальнення одновимірного розподілу, наприклад, до двовимірного нормального закону, загальна формула щільності ймовірностей

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\sigma_{12}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\sigma_{12}^2)}\left(\frac{(x_1-a_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\sigma_{12}(x_1-a_1)(x_2-a_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(x_2-a_2)^2}{\sigma_2^2}\right)\right], \quad (1)$$

де  $a_1, \sigma_1$  – математичне очікування та стандартне відхилення змінної  $x_1$ ;  $a_2, \sigma_2$  – те саме, змінної  $x_2$ ;  $\sigma_{12}$  – 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 [5] 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 електрорухомих склад постійного струму та його режими роботи не впливають на природу виникнення реактивної потужності [7]. Що не можна сказати про систему змінного струму, де кореляція в загальному випадку відсутня через прямий вплив додаткових факторів, що дозволяє вважати активні та реактивні складові тягових струмів незалежними величинами стосовно системи електропостачання. Якщо ж узяти окремо режим роботи одного електровозу, то простежується нелінійний кореляційний зв'язок між цими складовими [6].

Згідно з описаним на рис. 1 представлена щільність ймовірностей двовимірної випадкової величини трифазного струму навантаження тягової підстанції постійного струму, на рис. 2 – те саме, тільки для змінного струму. Концентрація ліній рівня навколо характерних точок вказує на найбільш вірогідні точки режимів та їх відповідну кількість. Так, у системі постійного струму спостерігається 3 стійких точки режиму електропостачання, причому в контексті загалом симетричної роботи кожної фази.



**Рис. 1. Лінії рівня струму тягової підстанції постійного струму як двовимірної випадкової величини**

У системі ж змінного струму режим електроспоживання у двох робочих фазах суттєво відрізняється від третьої (недозавантаженої) [8]. У порівнянні з системою постійного струму можна констатувати більшу степінь невизначеності та розкиду активної і реактивної складових струму [9].

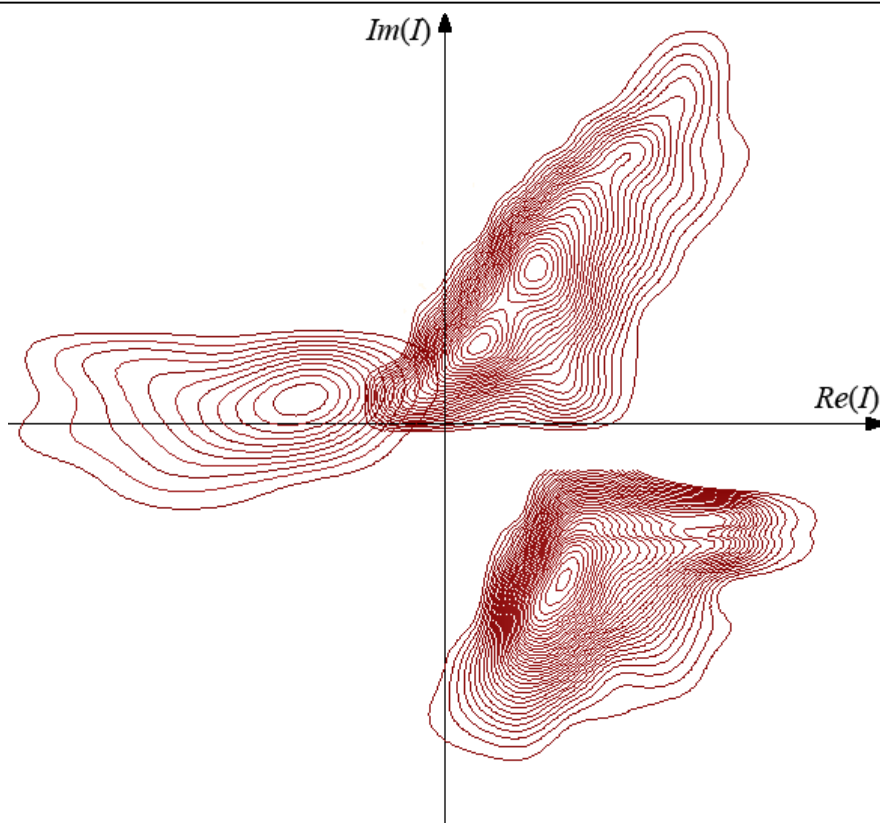


Рис. 2. Лінії рівня струму тягової підстанції змінного струму як двовимірної випадкової величини

Кількісно гармонійний вплив систем тягового електропостачання можна оцінити спрощеними моделями некерованих випрямлячів [4]. Так, для системи змінного струму гармонійний склад струму електровозу може бути визначений аналітичним розкладанням кусково-заданої функції пульсуючого струму для мостового однофазного випрямляча, а саме

$$i(t) = \begin{cases} -I_{dc}, & \frac{T}{4} < t < \frac{3T}{4}; \\ +I_{dc}, & t < \frac{T}{4}; t > \frac{3T}{4}; \end{cases} \quad (2)$$

$$I_h = \begin{cases} +\frac{2\sqrt{2}}{h} I_{dc}, & h = 1, 5, 9, 13, \dots \\ -\frac{2\sqrt{2}}{h} I_{dc}, & h = 3, 7, 11, 15, \dots \\ 0, & h = 0, 2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (3)$$

Для системи постійного струму, на прикладі 6-пульсового випрямляча, струм в одній фазі визначається

$$i_A(t) = \begin{cases} +I_{dc}, & 0 < t < \frac{T}{6}, \frac{5T}{6} < t < T; \\ 0, & \frac{T}{6} < t < \frac{2T}{6}, \frac{4T}{6} < t < \frac{5T}{6}; \\ -I_{dc}, & \frac{2T}{6} < t < \frac{4T}{6}. \end{cases} \quad (4)$$

$$I_h = \begin{cases} +\frac{\sqrt{6}}{h\pi} I_{dc}, & h = 1, 7, 13, 19, \dots \\ -\frac{\sqrt{6}}{h\pi} I_{dc}, & h = 5, 11, 17, 23, \dots \\ 0, & h = 2, 4, 6, 8, \dots \\ 0, & h = 3, 9, 15, 21, \dots \end{cases} \quad (5)$$

За допомогою розглянутих аналітичних моделей досить просто визначити емісію вищих гармонійних складових з боку тягового навантаження. Отримані відносні спектри струмів (рис. 3), також дозволяють визначити очікуване значення коефіцієнта нелінійних спотворень (THD) струму для систем постійного і змінного струму. Для першої системи змінного струму значення THD складає 42,6 %, для постійного струму і 6-пульсної схеми – 28,5 %, для 12-пульсної – 13,7 %.

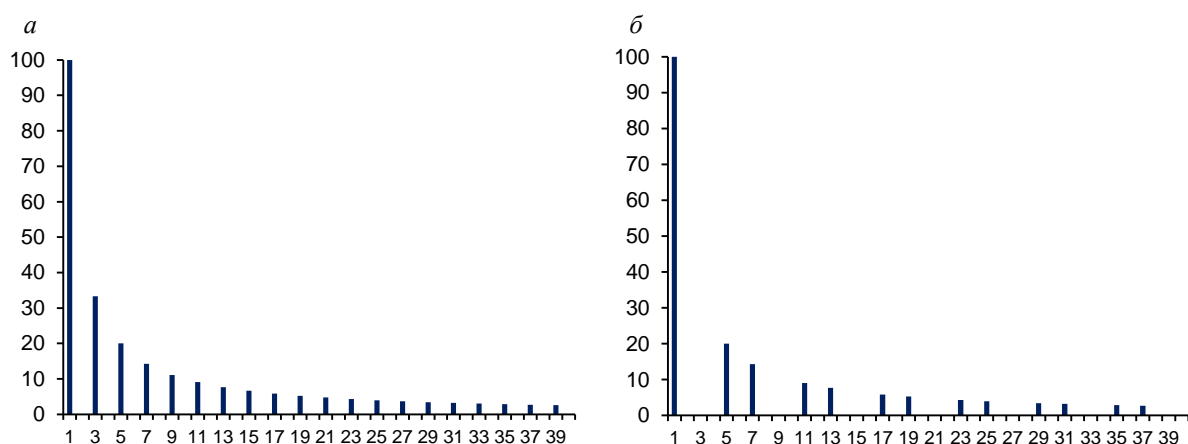


Рис. 3. Відносні спектри гармонік для електричної тяги змінного (а) та постійного струму (б)

Також за допомогою розглянутих моделей можна оцінити залежності зміни емісії струмів вищих гармонійних складових від споживаної потужності (рис. 4). Як бачимо, для однієї споживаної потужності найбільшою та найменшою емісією володіє система 3,3 кВ з 6-пульсною та 12-пульсною схемами випрямлення відповідно. Система змінного струму 27,5 кВ займає проміжне положення.

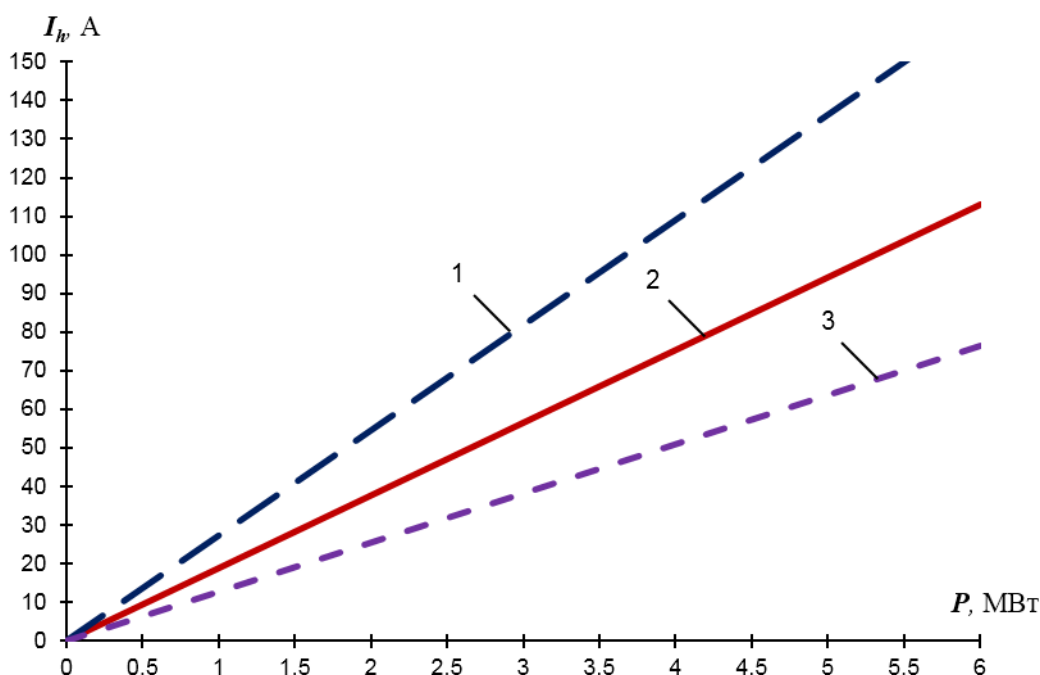


Рис. 4. Залежності емісії вищих гармонік струму від споживаної потужності для систем електричної тяги: 1 – 3,3 кВ (6-пульсна схема); 2 – 27,5 кВ; 3 – 3,3 кВ (12-пульсна схема)

### Висновки

Процеси взаємодії між системами тягового і зовнішнього електропостачання обумовлені специфічними режимами роботи електроустаткування, що містяться 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, а це вказує на те, що електрорухомий склад постійного струму не впливає на природу виникнення реактивної потужності.

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.

### Список літератури

1. 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. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т. – 2003. – Т. 2. – С. 159–165.
2. Мамошин Р.Р. Выбор режима напряжения в тяговой сети переменного тока / Р.Р. Мамошин // Энергосбережение, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: сб. трудов. – М.: МИИТ. – 2000. – С. 18–22.
3. Тамазов А.И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными тяговыми нагрузками / А.И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
4. Bollen M. H. J. Signal Processing of Power Quality Disturbances / M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. – Piscataway, NJ, IEEE Press, 2006. – 861 p.
5. 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.
6. 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.
7. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д.О. Босий, Д.Р. Земський // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 8(68). – С. 52–57.
8. Сиченко В.Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саенко, Д.О. Босий. – Д.: Стандарт-Сервіс, 2015. – 340 с.
9. Bosiy D.O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D.O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 4 (46). – С. 30–37.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Муха А.М.*

УДК 621.331

*Д.С. Белухин, канд. техн. наук*

*(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)*

## ВАРИАНТ МОДЕРНИЗАЦИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*Анотація. Розглянуто один із можливих варіантів модернізації системи живлення допоміжних приводів електровозів змінного струму з використанням типової схеми автономного інвертора напруги.*

*Ключові слова: електровоз, розчеплювач фаз, автономний інвертор.*

*Аннотация. Рассмотрен один из возможных вариантов модернизации системы питания вспомогательных приводов электровозов переменного тока с использованием типовой схемы автономного инвертора напряжения.*

*Ключевые слова: электровоз, расцепитель фаз, автономный инвертор.*