

## ГЕОМЕТРИЧНЕ ТРАКТУВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЙОГО ЗВ'ЯЗОК ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ СКЛАДОМ ТЯГОВИХ НАПРУГИ ТА СТРУМУ ШВИДКІСНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

*Впровадження в Україні швидкісного руху поїздів з підвищеним їх рухом до 200 км/год вимагає застосування більш потужних, ніж при звичайному русі, видів електрорухомого складу змінного струму, зокрема електро-возів. А більш потужні електровози, як відомо, являються і більш потужними генераторами реактивної потужності, транзит якої в системі електричної тяги являється однією із проблем, яку до цього часу не вдалось розв'язати. Тому проектування нових швидкісних ділянок чи перехід існуючих із системи постійного струму на змінний повинні здійснюватись з урахуванням генерування і транзиту в системі електротяги реактивної потужності. Навіть до цього часу в електротехніці існує проблема оцінки реактивної потужності та енергетичних показників нелінійних, тим більше нестаціонарних, споживачів електроенергії. Тому перевагу віддають тій теорії, яка, по-перше, відображає максимум інформації про енергетичний процес і, по-друге, дозволяє оперувати з миттєвими характеристиками системи. В роботі встановлено, що існує певний зв'язок між ВАХ і спектральним складом кіл з несинусоїдними напругою та струмом в колі двополюсника. За результатами досліджень виконано чисельний аналіз зазначеного зв'язку для швидкісного електровоза ДС 3М.*

**Ключові слова:** двополюсник, реактивна потужність, несинусоїдна величина, електровоз, спектральний склад, вольт-амперна характеристика, гармоніка

### ВСТУП

Згідно з Транспортною стратегією України на період до 2020 року, схваленого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010 р. № 2818-VI, одним з основних завдань щодо розвитку транспортної інфраструктури є «впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів» з підвищенням швидкості їх руху до 160...200 км/год. При цьому, істотно, першим питанням, яке треба вирішувати – це, на якій системі електричної тяги здійснювати впровадження швидкісного руху, постійно чи змінного струму.

Аналіз літературних джерел показує переважне застосування електричної тяги змінного струму для живлення швидкісних магістралей як в Європі, так і в Азії. Однак наукові дискусії щодо того, яка система краща, ведуться здавна і продовжуються і зараз [1–4]. Це обумовлено тим, що електрична тяга змінного струму створює нові проблеми, які до цього часу остаточно не розв'язані [2, 3]. І однією з таких проблем, тобто одним з суттєвих недоліків, є значний об'єм транзиту реактивної потужності [2], обумовлений, насамперед, тим, що швидкісний рух може забезпечуватись більш потужним, ніж при звичайному існуючому русі, електрорухомим складом змінного струму, зокрема, електровозами [4]. А більш потужні електровози, як відомо, являються і більш потужними генераторами реактивної енергії. Тому проектування нових швидкісних ділянок чи перехід існуючих із системи постійного струму на змінний повинні здійснюватись з технологічною і техніко-економічною оцінками кожної системи, особливо по їх «вузьким» пи-

танням і зокрема, по генеруванню і транзиту реактивної потужності.

Проблемі визначення та методам розрахунку реактивної потужності при несинусоїдних режимах присвячені роботи багатьох вчених [5–11]. В теперішній час в електротехніці не існує єдиного підходу до оцінки реактивної потужності та енергетичних показників нелінійних, тим більше нестаціонарних, споживачів електроенергії, тому ця проблема залишається дискусійною.

Поширення поняття реактивної потужності та методів її визначення, що використовуються для синусоїдних процесів, до кіл з несинусоїдними величинами призводить до втрат зв'язку з фізикою процесів в електричних колах та до труднощів при інтерпретації отриманих результатів. При цьому більшість спеціалістів-енергетиків у своїх пропозиціях по визначенню реактивної потужності  $Q$  виходять із понять ортогональної системи потужностей. При цьому вони автоматично переносять ці поняття із теорії кіл синусоїдного струму на кола з несинусоїдними величинами історично вважаючи, що причиною появи  $Q$  завжди є наявність накопичувальних реактивних елементів. Але, якщо в колах синусоїдного струму це єдина причина появи реактивної потужності, то в колах несинусоїдного струму не кожна наявність зазначених елементів обумовлює реактивну потужність. Перенесення ортогональної системи, активної, реактивної та повної потужностей на кола несинусоїдного струму часто призводить до неоднозначних, інколи суперечливих, висновків відносно енергопроцесів, що протікають в досліджуваній системі.

Методи розрахунку реактивної потужності розробляються окремо для конкретних нелінійних споживачів, умов та режимів їх роботи. При виборі підходу до визначення реактивної потужності в колах несинусоїдних напруг та струмів треба віддати перевагу тій теорії потужності, яка, по-перше, відображає максимум інформації про енергетичний процес і, по-друге, дозволяє отримати аналітичне співвідношення миттєвих напруг та струмів навантаження, тобто оперує з миттєвими характеристиками системи. Зазначене вище особливо стосується систем електричної тяги, характерними рисами яких є наявність різних типів перетворювачів та нелінійних нестационарних навантажень.

### ГЕОМЕТРИЧНЕ ПОДАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Найбільш повну інформацію про електромагнітні процеси, що протікають у колі з напругою та струмом довільної форми, містять їх миттєві величини. Виходячи із цього, О. А. Маєвський [12] запропонував визначити реактивну потужність  $Q$  нелінійного двополосника (рис. 1) через інтегральні величини добутків однієї електричної величини на швидкість зміни іншої (у вигляді інтеграла Рімана):

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^T u(t) \frac{di(t)}{dt} dt, \quad (1)$$

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \int_0^T i(t) \frac{du(t)}{dt} dt, \quad (2)$$

де в (2) знак мінус відповідає генеруванню реактивної потужності, а плюс її споживанню.

Реактивній потужності  $Q$  може бути подано і геометричне трактування [12]. Для цього скористаємося тим, що, згідно основам теоретичної електротехніки, будь-який пасивний двополосник (рис. 1) яким можна замінити будь-який пристрій чи підсистему системи електричної тяги, однозначно в даному режимі його роботи описується (характеризується) вольт-амперною характеристикою (ВАХ), побудованою за заданими вхідними напругою та струмом. ВАХ може бути побудована за експериментально отриманими миттєвими величинами напруги  $u(t)$  та струму  $i(t)$  (динамічна ВАХ), для діючих значень  $U(I)$ , за середніми значеннями або для перших гармонік  $U^{(1)}$  та  $I^{(1)}$  [3]. Для аналізу процесів в перехідних режимах застосовується тільки динамічна ВАХ, тобто  $u(i)$ . Графічний вид цієї ВАХ залежить від характеру

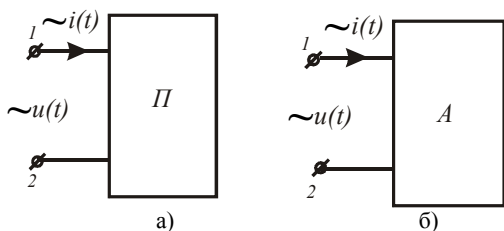


Рисунок 1 – Пасивний та активний двополосники з заданими вхідними напругою та струмом

зміни  $u(t)$  та  $i(t)$ . Якщо  $u(t)$  та  $i(t)$  несинусоїдні, але періодичні, мають місце наступні випадки [12, 13]:

а) напруга та струм співпадають за фазою, існує пряма пропорційність між ними у часі і, як результат, миттєвий повний опір  $Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} = const$ ; в цьому випадку

$u(i)$  лінійна залежність (рис. 2). Зазначимо, що це характерно для лінійного пасивного двополосника;

б)  $u(t)$  та  $i(t)$  співпадають за фазою, але немає прямої пропорційності між ними, тобто  $Z(t) \neq const$ , однак  $u(t)$ ,  $i(t)$  однаково симетричні відносно вісі ординат; в цьому випадку ВАХ  $u(t)$  – однозначна нелінійна залежність (рис. 3). Такі «властивості»  $u(t)$ ,  $i(t)$  та ВАХ характерні для нелінійного двополосника;

в) те ж саме, що і випадку «б»), але має місце симетрія  $u(t)$  та  $i(t)$  відносно початку координат, а не вісі ординат; в цьому випадку ВАХ представляє собою нелінійну неоднозначну пелостково-циклічну залежність (рис. 4);

г) і, насамкінець, найбільш загальний випадок: напруга та струм не співпадають за фазою, немає прямої пропорційності між ними, тобто  $Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \neq const$ , немає симетрії кривих  $u(t)$  та  $i(t)$ ; в цьому випадку динамічна ВАХ представляє собою нелінійну неоднозначну циклічну залежність (рис. 5).

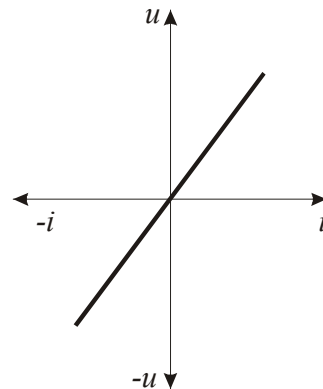


Рисунок 2

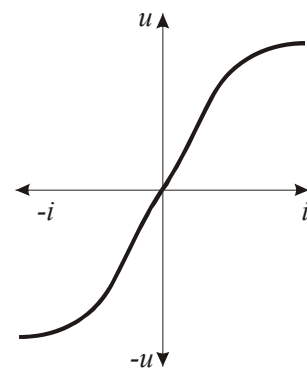


Рисунок 3

Доведемо, що реактивна потужність двополюсника завжди пропорційна площі  $S$  його циклічної ВАХ, яка описується за період  $T$  зміни  $u(t)$  та  $i(t)$ . Для цього перейдемо у виразі (2) від інтегрування за часом до інтегрування за напругою і врахуємо, що для періодичної напруги  $u(T)=u(0)$ , тоді отримаємо [11]:

$$Q = -\frac{1}{2\pi} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt = -\frac{1}{2\pi} \oint idu = \pm \frac{1}{2\pi} |S| m_u m_i, \quad (3)$$

де  $m_u$  та  $m_i$  – масштаби по вісі абсцис і відповідно по вісі ординат;  $S$  – площа циклічної ВАХ (рис. 5).

Знак «+» в (3) отримується у випадку, якщо зі збільшенням  $t$  робоча точка переміщується по ВАХ проти ходу годинникової стрілки, а отримувана реактивна потужність являється додатною ( $Q > 0$ ), тобто буде споживатися. В той же час, знак «-» отримується, якщо робоча точка переміщується за годинниковою стрілкою і тоді  $Q$  буде від’ємною ( $Q < 0$ ), тобто, буде генеруватись. Якщо при побудові ВАХ по вісі ординат відкладається напруга  $u$ , а по вісі абсцис струм  $i$  (тобто, інакше, ніж на рис. 5), тоді напрямок руху робочої точки ВАХ зміниться на зворотній у порівнянні з рис. 5.

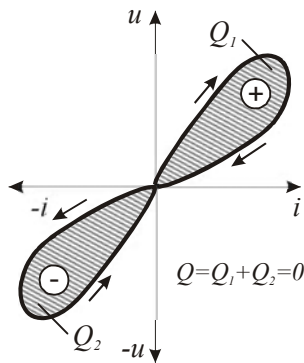


Рисунок 4

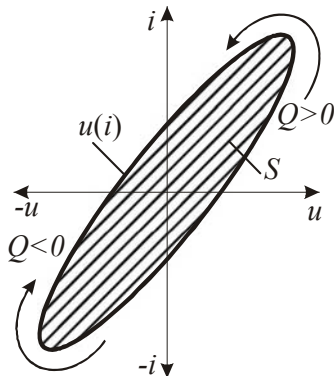


Рисунок 5 – Геометричне трактування реактивної потужності

## ЗВ’ЯЗОК ВАХ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ СКЛАДОМ

Користуючись вищевикладеним, можна для будь-якого двополюсника пояснити причину виникнення реактивної потужності, визначити її величину і знак. Крім того, маємо зв’язок ВАХ двополюсника з його реактивною потужністю. І в той же час, в загальному випадку у колі з несинусоїдними напругою та струмом з’явиться реактивна потужність на першій і вищих гармоніках. Отже, повинен існувати певний зв’язок між формою ВАХ і спектральним складом  $u(t)$  та  $i(t)$  двополюсника; встановимо його на прикладі нового електровозу змінного струму ДС 3М [4]. З цією метою було виконано часовий моніторинг змінних вхідних напруги  $u(t)$  (на струмоприймачі) і струму  $i(t)$  цього електровозу при різних величинах діючого значення струму навантаження  $I$ , рівного 10; 20; 50 та 100А. За отриманими даними побудовано ВАХ, що представлені на рис. 6, і здійснено спектральний аналіз струму  $i(t)$ , поданого на рис. 7.

Значення коефіцієнта  $n$ -ї гармоніки  $K_{i(k)}$ , що визначається (згідно з ГОСТ 13109-97) за формулою

$$K_{i(k)} = \frac{I(k)}{I(1)} \cdot 100\%, \quad (4)$$

приведені в таблиці при різних  $I$ .

Із порівняння рис. 6–7, а також таблиці впливає наступне.

Якщо при побудові ВАХ робоча точка рухалась за годинниковою стрілкою, тоді  $Q > 0$ , отже, являється споживаною.

Зі збільшенням тягового навантаження ( $I$  від 10 до 100А) ВАХ розширюється ( $S$  збільшується), тобто закономірно збільшується реактивна потужність.

У випадку, коли у струмі  $i(t)$  переважає основна гармоніка 50 Гц (наприклад, при  $I = 100$  А, рис. 7, з), тобто  $i(t)$  майже «чисто» синусоїдний, тоді ВАХ за формою являється еліпсоподібною (рис. 6, з). Зі збільшенням вищих гармонік в спектрі струму (рис. 7, в, б, а) форма ВАХ все більше спотворюється (рис. 6, в, б, а). Імовірно, математично можна знайти певний параметр, який би чисельно визначав степінь спотворення ВАХ в залежності від кількості і амплітуд вищих гармонік в несинусоїдній величині.

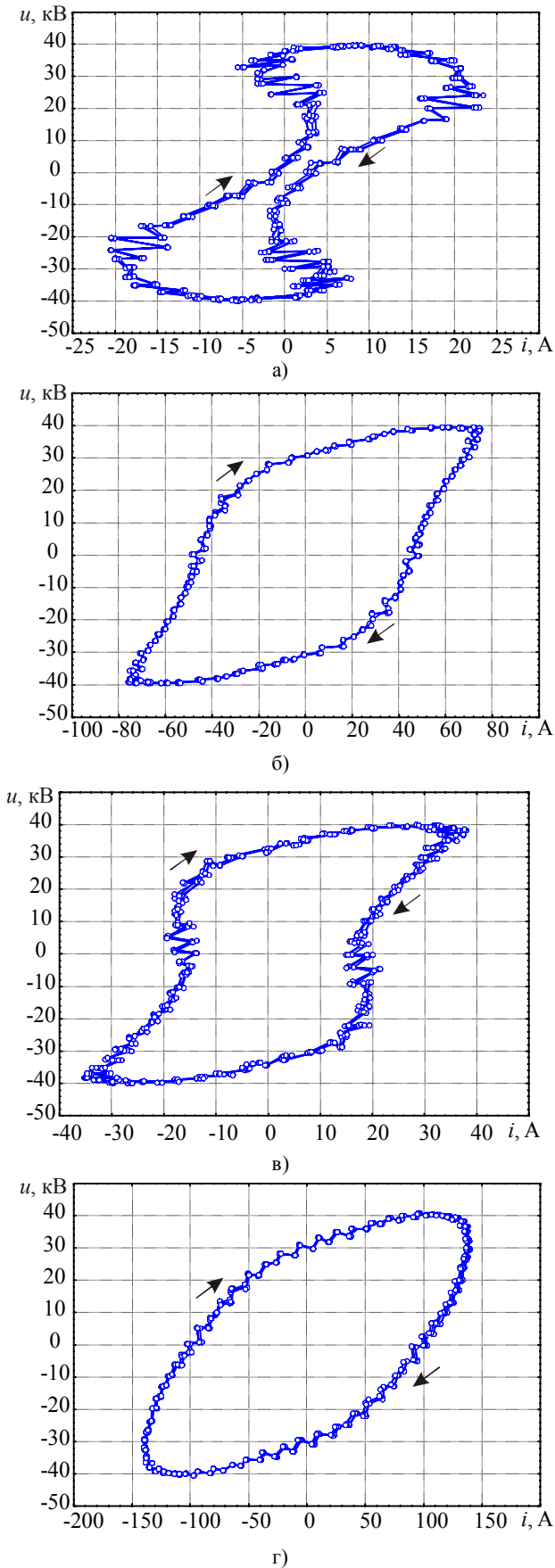
## ВИСНОВКИ

1. Геометрично площа циклічної ВАХ будь-якого пристрою чи системи пропорційна значенню реактивної потужності, яка споживається (чи генерується) цим пристроєм чи системою.

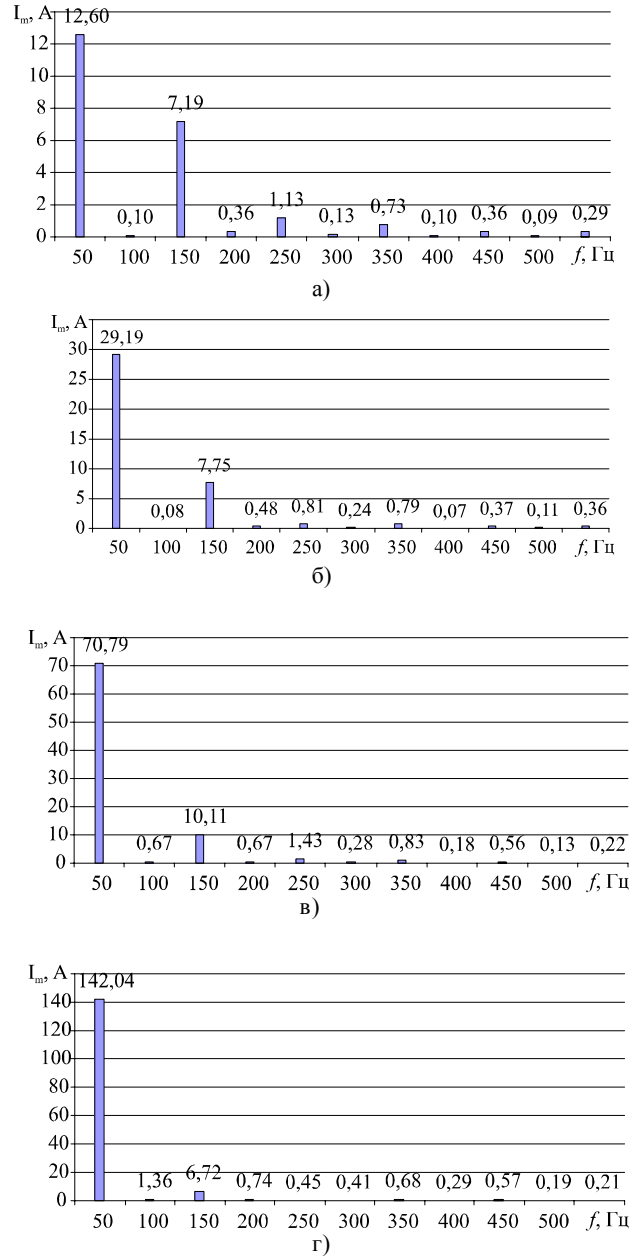
2. Знак реактивної потужності визначається напрямком руху робочої точки при побудові ВАХ.

3. ВАХ пристрою чи системи, у вхідних напрузі чи струму в яких переважає перша гармоніка, за формою являє собою еліпс.

4. Зі збільшенням у вхідних напрузі і струмі вищих гармонік форма ВАХ поступово спотворюється.



**Рисунок 6** – Циклічні динамічні ВАХ електровоза ДС3 при струмі навантаження  $I$  (А): а) 10; б) 20; в) 50; г) 100



**Рисунок 7** – Дискретний спектральний аналіз електровоза ДС3 при діючому значенні струму навантаження  $I$  (А): а) - 10; б) - 20; в) - 50; г) - 100

Таблиця

Значення струму $I$ , А	Коефіцієнт $K_{i(k)}$ гармоні, %			
	3	5	7	9
10	57,07	9,0	5,79	2,86
20	26,55	2,79	2,69	1,28
50	14,28	2,02	1,17	0,79
100	4,72	0,31	0,48	0,40

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Курбасов А. С. Система электрической тяги XXI века / А. С. Курбасов // Железные дороги мира. – 1999. – №4. – С. 19–22
2. Аржанников Б. А. Перспектива разработки системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 24 кВ для скоростной магистрали Москва–Екатеринбург / Б. А. Аржанников, // Тренды. События. Рынки. – 2012. – №7. – С. 48–50
3. О переходе с постоянного тока на переменный // Железные дороги мира. – 2013. – №6. – С. 68–71
4. Міщенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів. / Т.М. Міщенко // Електротехніка та Електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 19–28.
5. Демирчян К. С. Реактивная или обменная мощность / К. С. Демирчян // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – №2. – С. 66–72
6. Жарков Ф. П. Об одном способе определения реактивной мощности / Ф. П. Жарков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1984. – №2. – С. 73–81
7. Жежеленко И. В. Реактивная мощность в задачах электроэнергетики / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко // Электричество. – 1987. – №2. – С. 7–12
8. Демирчян К. С. Реактивная мощность на случай несинусоидальных функций / К. С. Демирчян // Изв. РАН Энергетика. – 1992. – №1. – С. 3–18
9. Тонкаль В. Е. Баланс энергии в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, В. А. Новосельцев, С. П. Денисюк “К. : Наук. думка, 1992. – 312 с.
10. Демирчян К. С. Разложение мгновенной мощности на составляющие / К. С. Демирчян // Изв. РАН Энергетика. – 1994. – №5. – С. 73–79
11. Саенко Ю. Л. Реактивная мощность в системах электроснабжения с нелинейными нагрузками: дис. ...доктора техн. наук: 05.09.05 / Саенко Юрий Леонидович. – Мариуполь, «Приазов. Гос. тех. университет», 2002. – 349 с.
12. Маевский О. А. Энергетические показатели вентилярных преобразователей / О. А. Маевский. – М. : Энергия, 1978. – 320 с.
13. Маевский О. А. Методы определения реактивной мощности нелинейных электрических цепей с помощью их циклических вольт-амперных характеристик [Текст] / О. А. Маевский // Харьков: Вестник ХПИ. №45(93) Преобразовательная техника, 1970. – Вып.4. – С. 9–17.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2015

Мищенко Т. Н.

Канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Украина

**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ТРАКТОВКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЕЕ СВЯЗЬ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ ТЯГОВЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА СКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ**

*Внедрения в Украине скоростного движения поездов с повышенным их движением до 200 км / ч требует применения более мощных, чем при обычном движении, видов электроподвижного состава переменного тока, в частности электровозов. А более мощные электровозы, как известно, являются и более мощными генераторами реактивной мощности, транзит которой в системе электрической тяги является одной из проблем, которую до сих пор не удалось решить. Поэтому проектирование новых скоростных участков или переход существующих из системы постоянного тока в переменный должны осуществляться с учетом генерирования и транзита в системе электротяги реактивной мощности. До сих пор в электротехнике существует проблема оценки реактивной мощности и энергетических показателей нелинейных, тем более нестационарных, потребителей электроэнергии. Поэтому предпочтение отдают той теории, которая, во-первых, отражает максимум информации об энергетическом процесс и, во-вторых, позволяет оперировать с мгновенными характеристиками системы. В работе установлено, что существует определенная связь между ВАХ и спектральным составом кругов с несинусоидальным напряжением и током в цепи двухполюсника. По результатам исследований выполнен численный анализ указанной связи для скоростного электровоза ДС 3М.*

**Ключевые слова:** двухполюсник, реактивная мощность, несинусоидальных величина, электровоз, спектральный состав, вольт-амперная характеристика, гармоника

Mishchenko T. M.

Ph.D., Associate Professor, Dept. «Electricity railways», Department of Electric Power Supply of Railroads of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

**GEOMETRIC INTERPRETATION OF REACTIVE POWER AND ITS RELATION WITH THE SPECTRAL COMPOSITION OF THE TRACTION VOLTAGE AND CURRENT OF HIGH-SPEED LOCOMOTIVES**

*The introduction in Ukraine of high-speed trains with increased of their traffic up to 200 km/h requires the more powerful than the normal movement of types of alternating current electric rolling stock, in particular, electric locomotives. It is known that the more powerful electric locomotives are the more powerful generators of reactive power, in which the transit system of AC electric traction is one of the problems that are still not resolved. Therefore the design of new special stages or the transition of the existing ones from the DC system to AC should be done taken into account the generation and transit in system of the electric drive train of the reactive power: Even to this day there is a problem in electrical engineering of reactive power estimation and energy performance of the non-linear, or even the more unsteady, consumers. Therefore, preference is given to the theory, which, firstly, reflects the maximum information about the energy process and, secondly, allows to operate with the instant system characteristics. The paper found that there is some connection between CVC and spectral composition circles with non-sinusoidal voltage and current in the two-terminal circuit. According to the research the numerical analysis of the specified connection is performed for high-speed electric locomotive DS 3M.*

**Keywords:** two-terminal, reactive power, non-sinusoidal value, electric, electric locomotive, spectral composition, current-voltage characteristics, harmonica

## REFERENCES

1. Kurbasov A. S. Sistema elektricheskoy tyagi XXI veka. ZHeleznye dorogi mira. 1999, No 4, S. 19–22
2. Arzhannikov B. A. Perspektiva razrabotki sistemy elektricheskoy tyagi postoyannogo toka povyshennogo napryazheniya 24 kV dlya skorostnoj magistrali Moskva-Ekaterinburg. Trendy, Sobytiya, Rynki, 2012, No 7, S. 48–50
3. O perehode s postoyannogo toka na peremennyj. ZHeleznye dorogi mira. 2013, No 6, S. 68–71
4. Mishchenko T. M. Perspektivy skhemotekhnichnykh rishen i modeliuvannia pidsystem elektrychnoi tiahyy pry vysokoshvydkisnomu rusi poizdiv. *Elektrotehnika ta Elektroenerhetyka*. 2014, No 1, pp. 19–28.
5. Demirchyan K. S. Reaktivnaya ili obmennaya moshchnost'. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport*. 1984, No 2, S. 66–72
6. ZHarkov F. P. Ob odnom sposobe opredeleniya reaktivnoy moshchnosti. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport*, 1984, No 2, pp. 73–81
7. ZHezhelenko I. V. Reaktivnaya moshchnost' v zadachah elektroenergetiki. *Elektrichestvo* 1987, No 2, pp. 7–12
8. Demirchyan K. S. Reaktivnaya moshchnost' na sluchaj nesinusoidal'nykh funktsiy. K. S. Demirchyan. *Izv. RAN Energetika*. 1992, No 1, pp. 3–18
9. Tonkal' V. E., Novosel'cev V. A., Denisyuk S. P. Balans energii v elektricheskikh cepyah. *Nauk. dumka*, 1992, 312 s.
10. Demirchyan K. S. Razlozhenie mgnovennoy moshchnost' na sostavlyayushchie. *Izv. RAN Energetika*, 1994, No 5, pp. 73–79
11. Saenko YU. L. Reaktivnaya moshchnost' v sistemah elektrosnabzheniya s nelinejnymi nagruzkami: dis. ...doktora tehn. nauk: 05.09.05. Mariupol', «Priazov. Gos. teh. universitet», 2002. 349 s.
12. Maevskij O. A. Energeticheskie pokazateli ventil'nykh preobrazovatelej. Moscow, Energiya, 1978, 320 s.
13. Maevskij O. A. Metody opredeleniya reaktivnoy moshchnosti nelinejnykh elektricheskikh cepej s pomoshch'yu ih ciklicheskih vol't-ampernykh harakteristik [Tekst]. Hr'kov. Bestnik HPI. No 45 (93) Preobrazovatel'naya tehnika, 1970, Vyp.4, pp. 9–17.