

УДК 629.423.064.5 : 621.3.025

О. Ю. БАЛІЙЧУК (ДНУЗТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, ел. пошта: [ballichukaleksei@mail.ru](mailto:ballichukaleksei@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0003-0119-1446](http://orcid.org/0000-0003-0119-1446)

## ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ СИМЕТРУВАННЯ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ ТА ОБґРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ СИМЕТРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДА ЕР9М

### Вступ

Із практики експлуатації мереж загального користування, енергозабезпечення промислових підприємств [1, 2] відомо, що несиметрію напруг можна обмежити до значення  $k_{2U} \leq k_{2U_{\text{доп}}}$  застосовуючи як різні схемні рішення, так і спеціальні симетруючі пристрої [1, 2]. Аналогічні за суттю заходи є прийнятними для застосування на рухомих складах, зокрема на електропоїздах змінного струму ЕР9М, на яких живлення допоміжних машин в режимах, що відрізняються від номінальних, можливе трифазною напругою із значною несиметрією. Це призводить до виникнення додаткових нагрівань обмоток статорів допоміжних машин і, як наслідок, передчасного виходу з ладу допоміжних машин.

Якщо допустимих значень коефіцієнта несиметрії застосуванням схемних рішень досягти не вдається, необхідний рівень несиметрії забезпечують за допомогою симетруючих пристроїв (СП) [1, 2].

### Постановка задачі

Постає задача розробити структуру симетруючого пристрою для забезпечення живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, який би дозволив підтримувати допустиме значення коефіцієнту несиметрії напруги в умовах реальної експлуатації, а також розробити методику визначення параметрів симетруючих елементів даного пристрою.

### Заголовок розділу

Процес симетрування напруги за допомогою СП полягає в компенсації еквівалентного струму зворотної послідовності, що обумовлений напругою зворотної послідовності.

В залежності від місця встановлення СП розрізняють індивідуальний, груповий, централізований і комбінований способи симетрування [1, 2]. При цьому індивідуальний

спосіб полягає у встановленні СП безпосередньо біля допоміжної машини, при груповому симетруванні в системі допоміжних машин в різних точках приєднання встановлюють декілька СП, кожен із яких симетрує напругу лише частини системи допоміжних машин. При централізованому симетруванні встановлюється лише один СП. Комбінований спосіб поєднує в собі способи симетрування живлячої напруги, описані раніше.

Індивідуальний спосіб симетрування дозволяє знизити несиметрію напруги і струмів безпосередньо на допоміжній машині, але при цьому встановлена потужність СП використовується нераціонально [1, 2]. При централізованому способі симетрування потрібна менша встановлена потужність елементів СП.

Враховуючи вплив сумарного електричного навантаження на несиметрію напруги на виході розщеплювача фаз, зміну величини напруги в контактній мережі, а відповідно і напругу в системі живлення допоміжних машин, різну гранично допустиму несиметрію напруги за умови нормальної температури нагріву кожної допоміжної машини доцільним є застосування індивідуальних способів симетрування напруги керованими СП.

Керовані СП можуть мати як неперервне (аналогове) так і ступеневе (дискретне) керування.

Для симетрування системи лінійних напруг широкого застосування набули батареї конденсаторів із неоднаковими потужностями фаз. Так, зображені на рис. 1 конденсатори мають неоднакову реактивну потужність, тобто  $Q_{C_{AB}} \neq Q_{C_{BC}} \neq Q_{C_{AC}}$ .

В керованих дискретних СП батареї конденсаторів (БК) утворюються із декількох груп, з яких одна підключена постійно, а інші під'єднуються по мірі необхідності. Комутація груп БК здійснюється контактними, або тиристорними ключами.

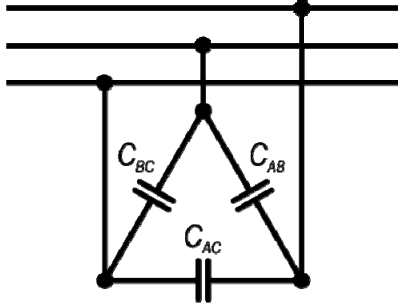


Рис. 1. Схема симетрування системи напруги із застосуванням батарей конденсаторів

На рис. 2. наведено загальний вигляд принципової схеми пропонованого автором пристрою для симетрування системи лінійних напруг в колах живлення допоміжних машин електропоїзда серії EP9M [3].

Симетрування напруги в даному пристрої виконується за допомогою під'єднання батареї конденсаторів паралельно до кожної допоміжної машини. Набір необхідної величини ємності відбувається шляхом почергового підключення до схеми кожної із батарей конденсаторів. Момент комутації батарей конденсаторів, а також послідовність їх комутації визначає мікроконтролерна система керування, яка відслідковує поточне значення лінійних напруг в системі живлення допоміжних машин, порівнюючи напругу в лінійних проводах і обчислює поточне значення

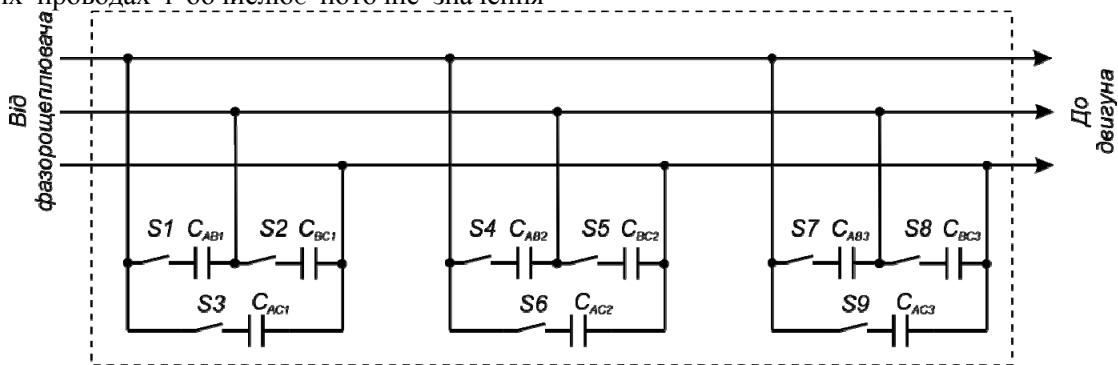


Рис. 2. Принципова схема силової частини пристрою для симетрування напруги живлення допоміжних машин електропоїзда EP9M

На рис. 3. пронумеровано зони в яких аргумент  $\varphi_2$  набуває певного значення. Таким чином:

Зона I:  $180^\circ \leq \varphi_2 \leq 300^\circ$ .

Зона II:  $300^\circ \leq \varphi_2 \leq 60^\circ$ .

Зона III:  $60^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$ .

В загальному випадку для визначення реактивної потужності БК використаємо наступну систему рівнянь [4]:

$$\begin{cases} Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_2), \varphi_2 \in I; \\ Q = 2\sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \varphi_2 \in II; \\ Q = \sqrt{3} \cdot U_{\text{НОМ}} \cdot I_2 \cdot (\sqrt{3} \cdot \sin \varphi_2 - \cos \varphi_2), \varphi_2 \in III. \end{cases}$$

несиметрії живлячої напруги. При досягненні значення несиметрії напруги, що перевищує гранично допустимі величини для конкретної допоміжної машини система керування формує сигнал на підключення до працюючого допоміжного двигуна симетруючих батарей конденсаторів, ємність яких компенсує реактивну потужність, що виникне в колі живлення внаслідок протікання струмів зворотної послідовності, які виникли в результаті дії напруги зворотної послідовності, що прикладена до симетричних допоміжних машин.

Комутація батарей конденсаторів відбувається за допомогою контакторів модульного виконання.

Сумарна потужність ємнісного СП обирається за умови компенсації реактивної потужності. Вона перерозподіляється по фазам СП (див. рис. 1) таким чином, щоб струм зворотної послідовності несиметричної БК компенсував струм зворотної послідовності симетричного навантаження, який обумовлено дією несиметричної вихідної системи напруг асинхронного розщеплювача фаз.

Потужність БК визначається в залежності від аргумента  $\varphi_2$  вектора струму зворотної послідовності  $I_2$  [1, 2, 4].

При цьому струм зворотної послідовності для асинхронної допоміжної машини [5]:

$$I_2 = k_2 U \cdot k_I \cdot I_{\text{НОМ}}, \quad (1)$$

де  $k_I$  – кратність початкового пускового струму – відношення сталого струму в обмотці електродвигуна при нерухомому роторі, номінальній підведеній напрузі і номінальній його частоті;

$I_{\text{НОМ}}$  – номінальний струм статорної обмотки асинхронного двигуна.

Асинхронна допоміжна машина являє собою активно-індуктивне навантаження, при цьому

$\cos \varphi_2 = 0,7 \dots 0,9$ , що відповідає II зоні, тому сумарна потужність БК при умові повної компенсації реактивної потужності пропонується визначати за виразом:

$$Q = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2. \quad (2)$$

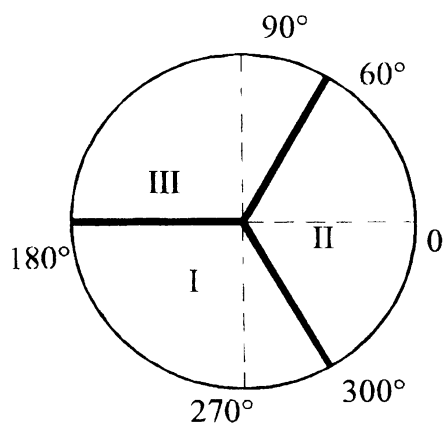


Рис. 3. Діаграма розподілу аргумента  $\varphi_2$  струму зворотньої послідовності  $I_{2\Sigma}$

Замість  $I_2$  у вираз (2) підставимо вираз (1), отримаємо

$$Q = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2. \quad (3)$$

Реактивна потужність конденсатора пропорційна його ємності і номінальній напрузі на його обкладках, тобто

$$Q = 2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2. \quad (4)$$

Ліві частини виразів (3) та (4) рівні, прирівняємо праві частини виразів, отримаємо

$$2\pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2 \quad (5)$$

Із виразу (5) знайдемо ємність БК для повного симетрування напруги живлення допоміжних машин. Після всіх необхідних перетворень і спрощень отримаємо

$$C = \frac{\sqrt{3} \cdot k_{2U} \cdot k_I \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_2}{\pi \cdot f \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (6)$$

де  $k_{2U}$  – коефіцієнт несиметрії напруги у в.о.;  
 $k_I$  – кратність усталеного пускового струму двигуна;

$I_{\text{ном}}$  – номінальний струм двигуна, А;

$U_{\text{ном}}$  – номінальна напруга двигуна, В;

$f$  – частота живлячої змінної напруги, Гц.

Для асинхронних двигунів справедливий вираз [6]

$$P_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (7)$$

де  $m_1$  – кількість фаз обмотки статора, для трифазних двигунів  $m_1 = 3$ , тому запишемо

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (8)$$

В номінальному режимі роботи вираз (8) набуде вигляду

$$P_{1\text{ном}} = 3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}. \quad (9)$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна [6]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (10)$$

В номінальному режимі споживана двигуном потужність становить

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}}, \quad (11)$$

Підставимо праву частину виразу (11) замість лівої частини виразу (9), отримаємо

$$\frac{P_2}{\eta_{\text{ном}}} = 3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot I_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}. \quad (12)$$

Із рівняння (12) виразимо номінальний струм статора  $I_{\text{ном}}$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_2}{3 \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{3 \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (13)$$

Підставимо вираз (13) замість  $I_{\text{ном}}$  до виразу (6), отримаємо

$$C = \frac{\sqrt{3} k_{2U} k_I \frac{P_2}{3 \eta_{\text{ном}} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}} \cos \varphi_2}{\pi f U_{\text{ном}}} = \frac{k_{2U} k_I P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} \pi f \eta_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2 \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (14)$$

Якщо прийняти в першому наближенні у виразі (14)  $\eta_{\text{ном}} = 0,75$ ;  $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$  і частоту живлячої мережі  $f = 50$  Гц. При прямому пуску асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором кратність пускового струму  $k_I = 4 \dots 7$  [6] в залежності від умов пуску.

Приймаємо важкі умови пуску для допоміжних машин, відповідно  $k_I = 7$ .

З урахуванням вищенаведеного після відповідних перетворень і спрощень вираз (14) матиме вигляд

$$C = 0,043 \cdot \frac{k_{2U} \cdot P_2 \cdot \cos \varphi_2}{U^2_{\text{ном}}} \quad (15)$$

Рівняння (15) являє собою наближені залежності  $C = f(k_{2U}, P_2)$  для симетрування системи лінійних напруг живлення допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М.

Використовуючи вираз (15), побудуємо графік орієнтовної залежності величини ємності батареї симетруючих конденсаторів при змінній потужності допоміжної машини і коефіцієнті несиметрії живлячої напруги. Для цього приймаємо, що потужність  $P_2$  змінюється в

межах  $P_2 = 0 \dots 6$  кВт, а коефіцієнт несиметрії  $0 \leq k_{2U} \leq 0,2$ . Отримані результати представлені у вигляді графіка на рис. 3.

За допомогою графіка на рис. 3 можна визначити орієнтовне значення сумарної ємності БК в СП для кожної допоміжної машини. Значення необхідної ємності лежить на поверхні графіка в точці, координати якої відповідають номінальній потужності допоміжної машини і гранично допустимому значенню несиметрії живлячої напруги за умов нормальної температури обмотки статора.

Для точного визначення ємності БК для симетрування лінійних напруг допоміжних машин необхідно враховувати реальний ккд та коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  допоміжної машини, тому для цього потрібно використовувати вираз (14).

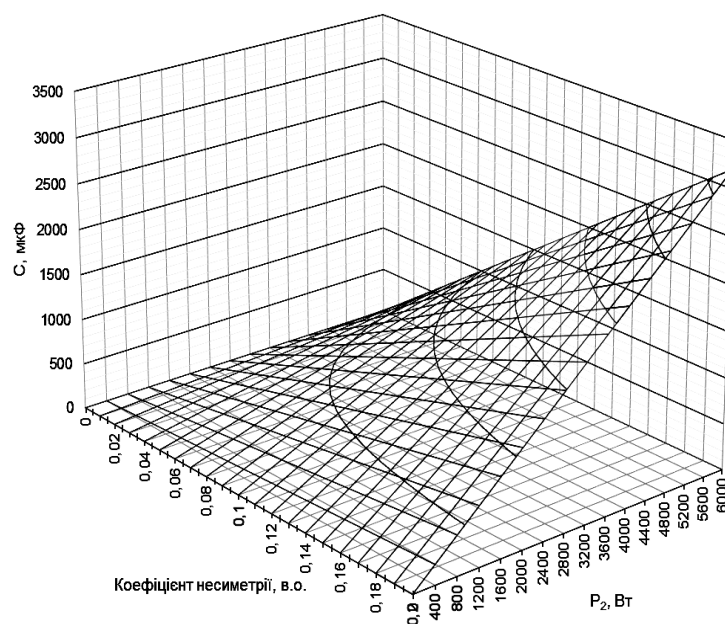


Рис. 3. Орієнтовна залежність  $C = f(k_{2U}, P_2)$  батарей конденсаторів СП в системі живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М

## Висновки

В ході аналізу розглянуто відомі способи симетрування системи лінійних напруг. Розглянуто можливість симетрування системи лінійних напруг допоміжних машин електропоїздів змінного струму за допомогою керованих індивідуальних ємнісних симетруючих пристроїв дискретної дії.

Запропоновано структуру та принципову схему пристрою для контролю якості електричної енергії, якою живляться допоміжні машини електропоїзда змінного струму серії ЕР9М, із системою керування на базі мікроконтролерів.

Розроблено методику визначення ємності батарей конденсаторів симетруючих пристроїв, за якою виконано розрахунок орієнтовних значень ємності симетруючих конденсаторів для всіх допоміжних машин електропоїзда змінного струму серії ЕР9М при умові повного симетрування системи лінійних напруг на затискачах машин. Дослідження показали, що для симетрування системи напруг, коефіцієнт несиметрії якої знаходиться в діапазоні від 2% до 14%, якою живляться допоміжні машини потрібно застосовувати конденсаторні батареї, ємності яких складають 50...1900 мкФ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Данцис, Я. Б. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий / Я.Б. Данцис, Т.М. Жилов. Л.: Энергия, 1980. – 176 с.
2. Кузнецов, В.Г. Снижение несимметрии и не-синусоидальности напряжения в электрических сетях / В.Г. Кузнецов, А.С. Григорьев, В.Б. Данилюк. – К.: Наукова думка, 1992. – 239 с.
3. Патент 95540 Україна, МПК G05F 1/00, H02M 3/24. Пристрій для забезпечення симетрії живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму / Балійчук О.Ю.; заявник і патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. - № u201408026; заявл. 16.07.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл.№ 24.
4. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
5. Некрасов, О. А. Вспомогательные машины электроподвижного состава переменного тока / О.А. Некрасов. – М.: Транспорт, 1967. – 168с.
6. Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высших технических учебных заведений / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

Надійшла до друку 12.05.2016.

Внутрішній рецензент *Муха А. М.*

## REFERENCES

1. Dancis Ja.B., Zhilov T.M. *Emkostnaja kompensacija reaktivnyh nagruzok moshhnyh tokopriemnikov promyshlennyh predpriyatij* [The capacitive compensation of reactive loads of powerful industrial enterprises for the current collectors]. Leningrad, Energija Publ., 1980. 176 p.
2. Kuznecov V.G., Grigor'ev A.S., Daniljuk V.B. *Snizhenie nesimmetrii i nesinusoidal'nosti naprjazhenija v jelektricheskikh setjah* [Reduction of asymmetry and non-sinusoidal voltage in electrical networks]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1992. 239 p.
3. Baliychuk O.Yu. *Prystriy dlya zabezpechennya symetriyi zhvylnennya dopomizhnykh mashyn elektropoyizdiv zminnoho strumu* [The device for symmetry of power supply of auxiliary motors of AC electric trains] Patent UA, no. u201408026, 2014.
4. Zhezhelenko I.V., Saenko Ju.L. *Pokazateli kachestva jelektoenergii i ih kontrol' na promyshlennyh predpriyatijah* [Quality parameters of power and control of industrial plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
5. Nekrasov O.A. *Vspomohatelnye mashyny elektropodvyzhnoho sostava peremennogo toka* [Auxiliary electric machines of the electric rolling stock AC]. Moscow, Transport Publ., 1967. 168 p.
6. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

Для електропоїздів серії ЕР9М характерною є значна несиметрія напруги, що живить допоміжні машини, в режимах які відрізняються від номінальних. Виникаючі при цьому додаткові перегріву обмоток статорів допоміжних машин призводять до ушкодження їх ізоляції і передчасного виходу з ладу.

Проведено аналіз відомих способів симетрування системи лінійних напруг з метою пошуку таких, які можна застосувати в системі живлення допоміжних машин електропоїздів змінного струму. Розглянуто можливість симетрування системи лінійних напруг допоміжних машин електропоїздів змінного струму за допомогою керованих індивідуальних ємнісних симетруючих пристроїв дискретної дії. Розроблено структуру симетруючого пристрою для забезпечення живлення допоміжних машин електропоїзда ЕР9М, який би дозволив підтримувати допустиме значення коефіцієнту несиметрії напруги в умовах реальної експлуатації, а також розроблено методику визначення параметрів симетруючих елементів названого пристрою.

В ході дослідження визначено, що для забезпечення повного симетрування напруги при коефіцієнту несиметрії 0,02..0,14 в колах живлення допоміжних машин потрібна ємність конденсаторних батарей повинна складати 50...1900 мкФ.

**Ключові слова:** допоміжні машини, електропоїзд змінного струму, симетрування системи лінійних напруг, симетруючий пристрій.

УДК 629.423.064.5:621.3.025

А. Ю. БАЛИЙЧУК (ДНУЖТ)

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 49010, г. Дніпропетровськ, Україна, г. Дніпропетровськ, ул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, ел. пошта: [baliichukaleksei@mail.ru](mailto:baliichukaleksei@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0003-0119-1446](http://orcid.org/0000-0003-0119-1446)

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СИММЕТРИРОВАНИЯ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПИТАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ЭР9М

Для электропоездов серии ЭР9М характерна значительная несимметрия питающего вспомогательные машины напряжения, в режимах которые отличаются от номинальных. Возникающие при этом дополни-

тельные перегрев обмоток статоров вспомогательных машин приводят к повреждению их изоляции и преждевременному выводу из строя.

Проведен анализ известных способов симметрирования системы линейных напряжений с целью поиска таких, которые можно применить в системе питания вспомогательных машин электропоездов переменного тока. Рассмотрена возможность симметрирования системы линейных напряжений вспомогательных машин электропоездов переменного тока с помощью управляемых индивидуальных емкостных симметрирующих устройств дискретного действия. Разработана структура симметрирующих устройства для обеспечения питания вспомогательных машин электропоезда ER9M, который бы позволил поддерживать допустимое значение коэффициента несимметрии напряжения в условиях реальной эксплуатации, а также разработана методика определения параметров симметрирующих элементов названного устройства.

В ходе исследования установлено, что для обеспечения полного симметрирования напряжения при коэффициенте несимметрии 0,02..0,14 в цепях питания вспомогательных машин потребная емкость конденсаторных батарей должна составлять 50 ... 1900 мкФ.

**Ключевые слова:** вспомогательные машины, электропоезд переменного тока, симметрирование системы линейных напряжений, симметрирующее устройство.

Внутренний рецензент *Муха А. Н.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

**UDC 629.423.064.5:621.3.025**

O.Yu. BALIICHUK (DNURT)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 373-15-47, e-mail: [baliichukaleksei@mail.ru](mailto:baliichukaleksei@mail.ru), ORCID: [orcid.org/0000-0003-0119-1446](http://orcid.org/0000-0003-0119-1446)

## **THEORETICAL BACKGROUND OF BALANCING SUPPLY VOLTAGE AND JUSTIFICATION OF STRUCTURE OF SYMMETRICAL UNIT FOR POWER SUPPLY OF AUXILIARY MOTORS OF ELECTRIC TRAINS ER9M**

The power supply voltage of auxiliary machines of multiple-unit train ER9M series is characterized by the considerable voltage asymmetry, especially in condition which differ from nominal. Emerging with additional overheating of the stator windings of auxiliary machines cause damage to their insulation and premature failure.

Was made the analysis of the known methods of balancing the system of line voltages in order to find those that may be apply in the system of auxiliary motors of AC electric multiple-unit train. Was shown the possibility of balancing electric system AC line voltage of auxiliary machines by means of individual controlled capacitive units discret action. Was developed the structure of the capacitor units to provide power supply to auxiliary electric machines of multiple-unit train ER9M series, which would allow to maintain the allowable voltage unbalance factor of importance in a real operation, and was developed the method of determining the parameters of balancing elements of the named device.

The study found that the required capacity of the capacitor banks must be 50 ... 1900 uF for full voltage balancing with the unbalance coefficient 2...14 percent in the supply circuits of auxiliary machines.

**Keywords:** auxiliary machine, AC electric multiple-unit train, balancing the system of line voltages, symmetrical unit.

Internal reviewer *Mukha A. M.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*