

П. Д. АНДРИЕНКО, О. В. НЕМЫКИНА, А. А. АНДРИЕНКО, И. В. АВДЕЕВ, В. Л. ПРИХНО

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИ РАБОТЕ ГРУППЫ КРАНОВ С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПРИВОДАМИ

В статье приведены результаты исследований электромагнитной совместимости систем питания кранов с частотно-регулируемыми приводами в режимах потребления и рекуперации энергии при их одновременной работе. Показано, что при одновременной работе показатели электромагнитной совместимости ухудшаются, что требует установки дополнительных групповых фильтров.

Ключевые слова: высшие гармоники, потери напряжения, токопроводы, алюминиевые шины, системы питания кранов, активный выпрямитель.

П. Д. АНДРІЄНКО, О. В. НЕМИКІНА, А. А. АНДРІЄНКО, І. В. АВДЄЄВ, В. Л. ПРИХНО

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ПРИ РОБОТІ ГРУПИ КРАНІВ З ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИМИ ПРИВОДАМИ

У статті наведено результати досліджень електромагнітної сумісності систем живлення кранів з частотно-регульованими приводами в режимах споживання і рекуператії енергії при їх одночасній роботі. Показано, що при одночасній роботі показники електромагнітної сумісності погіршуються, що вимагає установки додаткових групових фільтрів.

Ключові слова: вищі гармоніки, втрати напруги, струмопроводи, алюмінієві шини, системи живлення кранів, активний випрямляч.

P. D. ANDRIENKO, O. V. NEMYKINA, A. A. ANDRIENKO, I. V. AVDEEV, V. L. PRIHNO

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN OPERATION OF GROUP CRANES WITH VARIABLE FREQUENCY DRIVE

The article presents the results of electromagnetic compatibility's research of power supply cranes' systems with variable frequency drives in the modes of consumption and energy recovery by their simultaneous operation. It is shown that the installation individual filters on cranes with a frequency-variable drive, providing electromagnetic compatibility with a power source, does not allow to obtain satisfactory compatibility by group work of cranes. This circumstance is caused by the influence of variable and non-linear of trolley conductors in the power supply circuits of individual cranes on the magnitude of the voltage loss, power factor, current distortion factor and voltage distortion factor.

Keywords: higher harmonics, voltage loss, conductors, aluminum tires, crane supply systems, active rectifier.

Введение. Широкое внедрение частотно-регулируемых приводов (ЧРП) в различных областях промышленности приводит к искажению тока и напряжения в питающей сети. Указанное обстоятельство вызвало достаточный большой объем исследований электромагнитной совместимости (ЭМС) ЧРП с сетью, а также поиск наиболее оптимальных технических решений для решения указанной задачи, среди которых широкое распространение получили пассивные и активные фильтры высших гармоник. Среди промышленных объектов особое внимание уделяется проблема ЭМС промышленных установок, работающих в тяжёлых режимах и имеющих установленную мощность электроприводов соизмеримую с мощностью цеховых трансформаторов. К таким установкам следует отнести 30-60т мостовые краны металлургических цехов, порталные краны, экскаваторы, конвейеры. Многочисленные исследования [1-5], связанные с ЭМС позволяют сделать рекомендации по обеспечению допустимого уровня искажений напряжения и токов в питающей сети.

Среди упомянутых промышленных установок с ЧРП следует выделить крановые установки металлургических цехов, порталных кранов, которые имеют значительную протяженность токопроводов (200 м и более). Решение проблемы ЭМС крановых установок с ЧРП при их одновременной работе требует дополнительных исследований.

Целью работы является проведение исследований взаимного влияния крановых установок и ЭМС группы кранов при их одновременной работе.

Основные результаты работы. Исследования проведены на примере систем питания порталных кранов «Сокол» 150-метрового причала порта «Южный», рис. 1. Установленная мощность крана «Сокол» $P_{уст.} = 342$ кВт (грузоподъёмностью 16 т, при вылете стрелы 32 м). Двигатели крана «Сокол» имеют такие параметры (подъем: 2×110 кВт, ПВ = 60 %; поворот: 2×26 кВт, ПВ = 40 %; вылет стрелы: 2×20 кВт, ПВ = 40 %; передвижение: $4 \times 7,5$ кВт, ПВ = 25 %).

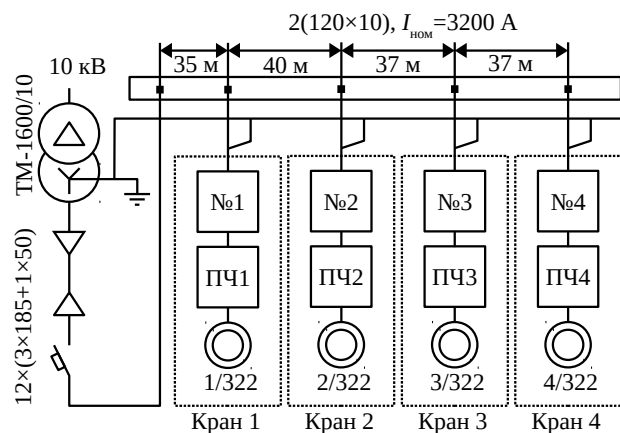


Рис. 1. Схема электропитания группы порталных кранов

Электропитание ЧРП кранов осуществляется от шинопровода через электрические колонки. Размещение колонок предусматривается по длине шинопровода с дистанцией 35 ÷ 40 м. Питание кранов осуществляется трансформатором ТМ-1600/10 береговой ПС. Соединение длиной 150 м между трансформатором и началом шин ($I_{ном.} = 3200$ А) сечением 2 (120×10) выполнено через 12 кабельных линий (3×185 + 1×150) мм² (КЛ). Изменение напряжения короткого замыкания токоподвода $U_{кз}$ относительно мощности ПЧ в диапазоне $U_{кз} (S_{пч}) = 1,61\% - 7,6\%$ [6]. Исследования проводилось на имитационной модели выполненной в программном пакете Matlab/Simulink, представленной на рис. 2 [7-9].

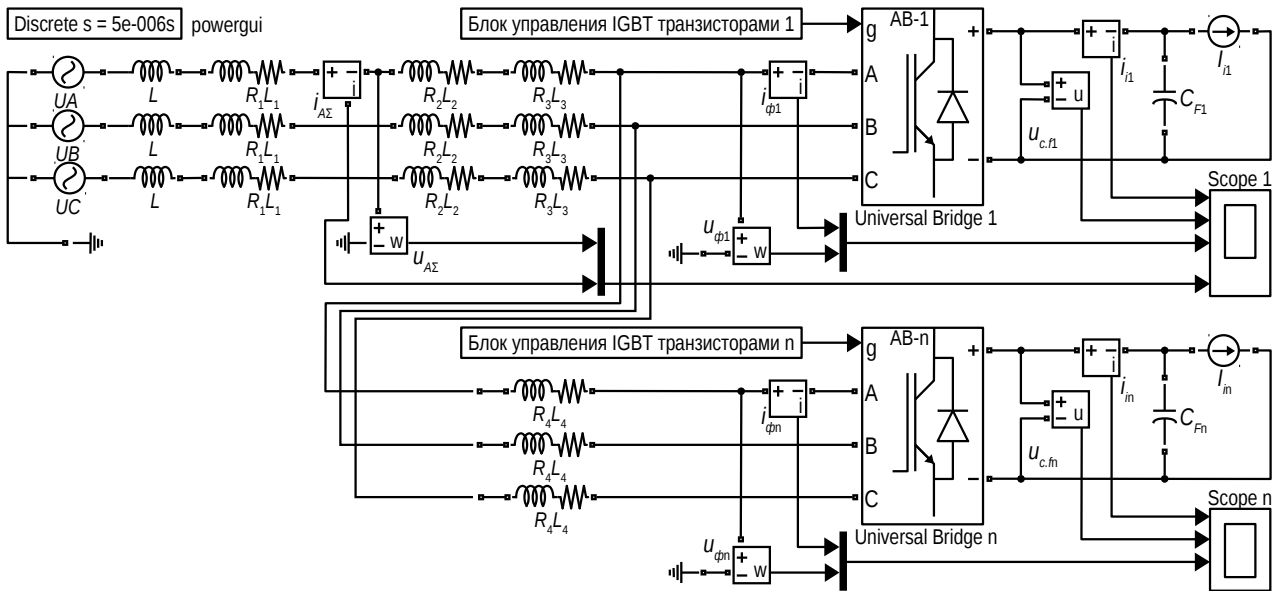


Рис. 2. Модель системы питания порталных кранов

В качестве выпрямителя ЧРП кранов используется активный выпрямитель с двухсторонней проводимостью. На интервале проводимости (120°) двунаправленного ключа АВ автоматически обеспечивается обмен энергией для режимов работы: режим потребления (РП) электроэнергии или режим рекуперации (РР) энергии в питающую сеть.

При выпрямлении открыты диоды мостового выпрямителя на интервале проводимости. Эквивалентный источник тока работает в режиме потребления (условно положительное направление тока) и отображает процесс преобразования энергии сети переменного тока в энергию постоянного тока на выходе.

При рекуперации открыты IGBT-транзисторы. Эквивалентный источник тока в звене выпрямления работает в режиме генерации (условно отрицательное направление тока) и отображает процесс передачи постоянного тока в питающую сеть.

На рис. 3 и 4 приведены осциллограммы тока i_{ϕ} на входе каждого преобразователя частоты ПЧ без реактора при номинальном токе кранов в РП и РР. Значение индуктивного сопротивления шины составляет 63,81 % от суммарного сопротивления.

Для рассмотренного случая была построена зависимость THD_I и K_U ПЧ без реактора, и с входным 4,5 % – реактором от длины шины переменного тока l при номинальном токе всех кранов в РП (рис. 5,а) и РР (рис. 5,б).

Анализ зависимости THD_I (рис. 5) показывает, что установка ПЧ без реактора приводит к ухудшению значения THD_I на шине переменного тока, который находится в диапазоне 58 % ÷ 68 % в режиме потребления и 60 % ÷ 75 % в режиме рекуперации. Установка входного 4,5 %-реактора, приводит к улучшению THD_I до значений 30 % ÷ 40 % в РП, и до 40 % ÷ 50 % в РР, что меньше требований стандартов [10, 11] в РП.

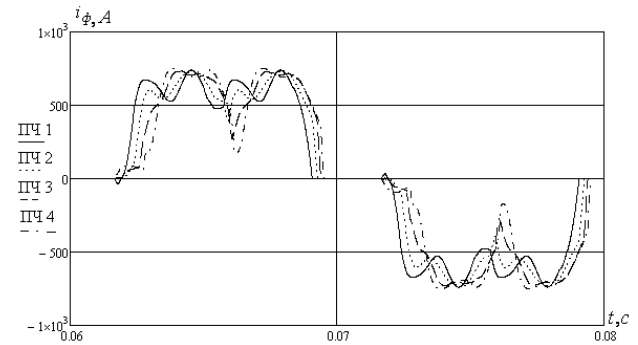


Рис. 3. Осциллограмма тока i_{ϕ} на входе каждого ПЧ в РП

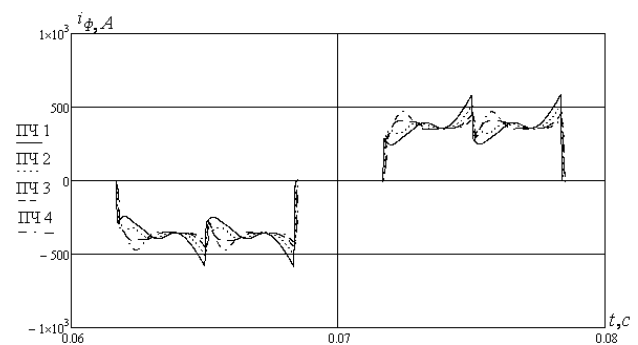


Рис. 4. Осциллограмма тока i_{ϕ} на входе каждого ПЧ в РР

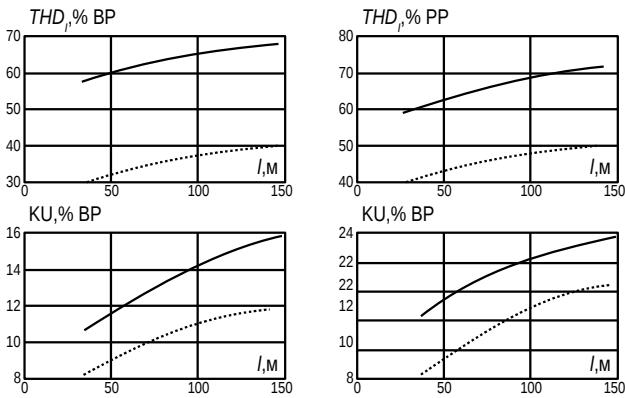


Рис. 5. Зависимости значения THD_r входного тока и K_U напряжения питания на шине переменного тока в РП (а) РР (б) от длины шины l :
(-) – $U_{kз} = 3,1\%$; (- · -) – $U_{kз} = 7,6(3,1+4,5)\%$

Значения K_U напряжения питания на шине переменного тока без реактора изменяются в диапазоне 11 % ÷ 16 % в РП и 17 % ÷ 24 % в РР.

При установке входного 4,5%-реактора значение K_U составляет 9 % ÷ 12 % в РП и 14 % ÷ 21 % в РР, что превосходит предельно-допустимое значение 12 %, и требует проведения дополнительных мероприятий.

Зависимости коэффициента сдвига $\cos\varphi$ фазного тока и потери напряжения на основной и высших гармониках (ΔU_1 , ΔU_5 , ΔU_7), рассчитанными по соотношению (1) в зависимости от длины шины переменного тока (сечением $2(120 \times 10 \text{ мм}^2)$), в режиме потребления ($I_1 = 1600 \text{ А}$), представлены на рис. 6.

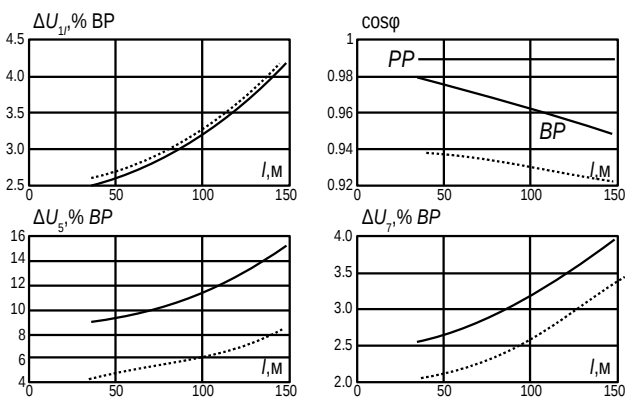


Рис. 6. Зависимость значений $\cos\varphi$ фазного тока и потери напряжения: ΔU_1 , ΔU_5 , ΔU_7 от длины шины l , при $U_{kз} = \text{const}$ (-) – $U_{kз} = 3,1\%$; (- · -) – $U_{kз} = 7,6(3,1+4,5)\%$

Потери напряжения от основной и высших гармоник:

$$\Delta U_n = \frac{k_{\text{пик}} \cdot I_n \cdot R_{\text{ш}} \cdot n (\cos \varphi_1 + \text{tg} \varphi_{\text{шн}} \cdot \sin \varphi_1)}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $k_{\text{пик}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение пикового тока относительно расчетного значения тока; I_n , φ_1 – значение фазного тока n -гармоники, угла сдвига для основной гармоники; $R_{\text{шн}}$ – сопротивление шины; $\text{tg} \varphi_{\text{шн}}$ – отношение активного и индуктивного сопротивления шины для n -гармоники.

В общем случае потери напряжения определяются соотношением:

$$\Delta U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta U_i^2}, \quad (2)$$

где ΔU_n – потери напряжения для гармоник n -го порядка в токопроводах.

Расчеты по соотношениям (1) и (2) показывают, что при установке входного реактора АВ с $U_{kз} = 4,5\%$ приводит к увеличению потери напряжения в 2,6 раза по сравнению с потерей напряжения на основной гармонике.

Анализ результатов показывает, что одновременная работа кранов приводит к ухудшению показателей ЭМС: THD_r , $\cos\varphi$ и K_U по сравнению с показателями раздельной работы одного крана. THD_r возрастает в 1,2 ÷ 1,5 раза, K_U в 2 ÷ 2,7 раза по сравнению с работой одного крана.

Выводы

1. Установка фильтров обеспечивающих показатели ЭМС THD_r , $\cos\varphi$ и K_U для индивидуального привода не обеспечивает удовлетворительную ЭМС при групповой работе ЧРП с распределительной системой питания.

2. Для обеспечения показателей ЭМС в пункте подключения электроприводов с ЧРП наиболее целесообразно устанавливать групповой фильтр.

Список литературы

- Медведев В. Н., Карандаев А. С., Евдокимов С. А. Способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных преобразователей частоты с электродвигателем и сетью. *Электродвигатели переменного тока: Труды международной XV науч. практ. конф. 12-16 марта 2012*. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 161 – 165.
- Микитченко А. Я., Могучев М. В., Шевченко А. Н. Выбор емкости силовых конденсаторов в двухзвенных преобразователях частоты с рекуперацией. *Электричество*. Москва: Знак. 2008, №6. С. 63 – 66.
- Колб А. А. Система группового питания приводов с емкостными накопителями и параллельными активными фильтрами. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ: Техніка. 2011, №3 (79). С. 404 – 407.
- Фираго Б. И., Медведев К. М., Павлячик Л. Б. Электромагнитная совместимость системы "преобразователь частоты – асинхронный двигатель" с системой электроснабжения. *Електромашинобудування та електрообладнання*. Київ: Техніка. 2006, Вип. 66. С. 263 – 264.
- Zhezhelienko I., Sayenko Y. Centralized Compensation of High Harmonics in Electrical Networks. *Electrical Power Quality and Utilization*. 1999. Vol. 5, №2. pp. 29 – 35.
- Радимов С. Н. Экспериментальное определение фактических электрических параметров крановых шинопроводов – информационная основа оптимизации их функционирования. *Вісник Одеського державного морського університету*. Одеса: ОДМУ, 2001, Вип. 7. С. 161 – 168.
- Немыкина О. В. Энергосберегающий аспект при выборе индуктивности сети, питающей частотно-регулируемый привод. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2011, № 2 (14). С. 101 – 104.
- Немыкина О. В. Исследование процессов в сети, питающей группу частотно-регулируемых приводов для крановых установок. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Київ: Техніка. 2011, № 03 (79). С. 355 – 356.

9. Авдєєв І. В., Немикіна О. В., Клишко О. М., Прихно В. Л., Баранец В. В. Вплив на показники якості електроенергії вхідної індуктивності мережі, що живить частотно-регульований привід. *Електротехніка та електроенергетика*. Запоріжжя: ЗНТУ. 2012, № 1. С. 51 – 57.
10. IEC 61000-3-12:2012. *Electromagnetic Compatibility (EMC) of Technical Equipment*, 2012. (International Standard).
11. IEC 61000-3-12:2004. *Limitation of Emission of Harmonic Currents in low Voltage Power Supply Systems for Equipment with rated Current Greater than 16 A Per Phase*, 2004. (International Standard).

References (transliterated)

1. Medvedev V. N., Karandaev A. S., Evdokimov S. A. Sposoby obezpecheniya elektromagnitnoy sovmestimosti moshchnykh preobrazovatelej chastoty s elektrodvigatelem i set'yu [Ways to ensure the electromagnetic compatibility of high-power frequency converters with an electric motor and a network]. *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy mezhdunarodnoj XV nauchn. prakt. konf. 12-16 marta 2012 goda, Ekaterinburg* [Alternating current electrical drives: Proceeding of The fifteenth international scientific-technical conference 12-16 march 2012]. Ekaterinburg: UrFU, 2012. p.p. 161 – 165.
2. Mikitchenko A. YA., Moguchev M. V., Shevchenko A. N. Vybore emkosti silovykh kondensatorov v dvuhzvennykh preobrazovatelyah chastoty s rekuperaciej [Choosing the capacity of power capacitors in two-unit frequency converters with recuperation]. *Elektrichestvo* [Electricity]. Moskva: Znak, 2008, №6. p.p. 63 – 66.
3. Kolb A. A. Sistema gruppovogo pitaniya privodov s emkostnyimi nakopitelnyami i parallelnymi aktivnyimi filtrami [The group power supply system of drives with capacitive drives and parallel active filters]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy* [Electrical and computer systems]. Kyiv: Tehnika. 2011, №3 (79). p.p. 404 – 407.
4. Firago B. I., Medvedev K. M., Pavlyachik L. B. *Elektromagnitnaya sovmestimost' sistemy "preobrazovatel' chastoty – asinhronnyj dvigatel'" s sistemoy elektrosnabzheniya* [Electromagnetic compatibility of the system "frequency converter - asynchronous motor" with the power supply system]. *Elektromashynobuduvannia ta elektroobladnannia* [Electrical machine-building and electrical equipment]. Kyiv: Tehnika. 2006, vyp. 66. p.p. 263 – 264.
5. Zhezhelienko I., Sayenko Y. Centralized Compensation of High Harmonics in Electrical Networks. *Electrical Power Quality and Utilization*. 1999, vol. 5, №2. p.p. 29 – 35.
6. Radimov S. N. Eksperimental'noe opredelenie fakticheskikh elektricheskikh parametrov kranovykh shinoprovodov – informacionnaya osnova optimizacii ih funkcionirovaniya. [Experimental determination of the actual electrical parameters of crane busbars - an informational basis for optimizing their operation]. *Visnyk Odeskoho derzhavnoho morskoho universytetu* [Bulletin of the Odessa National Maritime University]. Odesa: ODMU, 2001, vyp. 7. p.p. 161 – 168.
7. Nemykina O. V. *Energoberegayushchii aspekt pri vybore induktivnosti seti, pitayuschej chastotno-reguliruemyy privod* [Energy saving aspect when choosing the inductance of the network that supplies the frequency-controlled drive]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy* [Electromechanical and energy saving systems]. Kremenchuk: KrNU. 2011, № 2(14). p.p. 101 – 104.
8. Nemykina O. V. *Issledovanie protsessov v seti, pitayuschej gruppu chastotno-reguliruemyykh privodov dlya kranovykh ustanovok*. [Study of processes in the network supplying a group of variable frequency drives for crane installations]. *Elektrotehnicheskie i kompyuternyye sistemy* [Electrotechnic and computer systems]. Kyiv: Tehnika. 2011, № 03(79). p.p. 355 – 356.
9. Avdieiev I. V., Nemykina O. V., Klymko O. M., Prikhno V. L., Baraniets V. V. *Vplyv na pokaznyky yakosti elektroenerhii vkhidnoi induktivnosti merezhi, shcho zhyvyt chastotno-rehulovanyi pryvod* [Influence on the Indicators of the Quality of the Electricity of the Input Inductance of the Network Feeding the Frequency-Regulated Drive]. *Elektrotehnika ta elektroenerhetika* [Electrical Engineering and Power Engineering]. Zaporizhzhia: ZNTU. 2012, № 1. p.p. 51 – 57.
10. IEC 61000-3-12:2012. *Electromagnetic Compatibility (EMC) of Technical Equipment*, 2012. (International Standard).
11. IEC 61000-3-12:2004. *Limitation of Emission of Harmonic Currents in low Voltage Power Supply Systems for Equipment with rated Current Greater than 16 A Per Phase*, 2004. (International Standard).

Поступила 30.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Андриєнко Петро Дмитрович (Андриєнко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr Dmitrievich) – доктор технічних наук, професор, Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: andrpd@ukr.net

Немикіна Ольга Володимирівна (Немыкина Ольга Владимировна, Nemykina Olga Vladimirovna) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електропостачання промислових підприємств; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: olganemikina@ukr.net

Андриєнко Андрій Андрійович (Андриєнко Андрей Андреевич, Andrienko Andrej Andreevich) – Запорізький національний технічний університет, аспірант кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: vamoaseandrey@mail.ru

Авдєєв Ігор Вікторович (Авдеев Игорь Викторович, Avdeev Igor Viktorovich) – кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри електропостачання промислових підприємств; м. Запоріжжя, Україна; e-mail:

Прихно Валерія Леонідівна (Прихно Валерия Леонидовна, Prihno Valeria Leonidovna) – Запорізький національний технічний університет, ст. викладач кафедри електропостачання промислових підприємств; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: