

УДК 621.316.176: 62-83

**С. Н. Радимов**, д-р техн. наук,  
**В. Л. Беляев, А. Н. Бесараб**, кандидаты техн. наук,  
**К. А. Аниченко, Я. А. Соколов**

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КРАНОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТПН-АД С СЕТЬЮ

*Аннотация.* На основе проведенных экспериментальных исследований определены коэффициент искажения синусоидальности напряжения питающей сети при пуско-тормозных переходных процессах кранового привода, выполненного по системе ТПН-АД, соотношение номинальных токов источника питания и приводных двигателей, при уменьшении которого возможно нарушение норм качества электроэнергии, а также установлено предельно допустимое по этим нормам число циклов работы крана в течение суток.

*Ключевые слова:* порталный кран, электропривод подъема, тиристорный преобразователь напряжения, асинхронный двигатель, питающая сеть, качество электроэнергии, коэффициент искажения синусоидальности напряжения, экспериментальные исследования, нормально и предельно допустимые значения, периоды разгона и торможения

**S. N. Radimov**, ScD.,  
**V. L. Biliaiev** PhD., **A. N. Besarab**, PhD.,  
**K. A. Anichenko, Y. A. Sokolov**

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF GANTRY CRANE THYRISTOR VOLTAGE CONVERTER ELECTRIC DRIVE AND SUPPLY MAINS

*Abstract.* On the basis of the conducted experimental researches a total harmonic distortion of supply mains voltage is estimated during the starting and braking transient processes of gantry crane electric drive fulfilled as a thyristor voltage converter and asynchronous motor. The correlation of supply mains and drive motors nominal currents is determined as well, by descent of which violation of electric power quality norms is possible. It was also set the possible number of gantry crane work cycles in accordance with electric power quality norms during twenty-four hours.

*Keywords:* gantry crane, hoisting electric drive, thyristor voltage converter, asynchronous motor, supply mains, electric power quality, total harmonic distortion, experimental researches, normally and maximum legitimate values, periods of acceleration and braking

**С. М. Радімов**, д-р техн. наук,  
**В. Л. Беляев, О. М. Бесараб**, кандидати техн. наук,  
**К. А. Аніченко, Я. О. Соколов**

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ КРАНОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТПН-АД З МЕРЕЖЕЮ

*Анотація.* На основі проведених експериментальних досліджень визначено коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги мережі живлення під час пуско-гальмівних перехідних процесів приводу крана, виконаного за системою ТПН-АД, співвідношення номінальних струмів джерела живлення і привідних двигунів, при зменшенні якого можливе порушення норм якості електроенергії, а також встановлено гранично допустиме за цими нормами число циклів роботи крану протягом доби.

*Ключові слова:* порталний кран, електропривод підйому, тиристорний перетворювач напруги, асинхронний двигун, мережа живлення, якість електроенергії, коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги, експериментальні дослідження, нормально і гранично допустимі значення, періоди розгону і гальмування

#### Постановка проблемы

На предприятиях промышленности и транспорта, в частности на кранах морских и речных портов, применяются электроприводы по системе «тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель» (ТПН-АД). Указанные системы привода используются достаточно давно – с 60–70-х

годов XX века и, ввиду сравнительно невысокой стоимости, рассматриваются как конкуренты другим системам электропривода [1], например, частотным электроприводам на основе автономных инверторов напряжения с формированием выходного напряжения по методу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Исходя из того, что в последние два-три десятилетия предприятия промышленных отраслей и транспорта насыщались силовой преобразовательной техникой, которая оказы-

© Радимов С.Н., Беляев В.Л., Бесараб А.Н.,  
Аниченко К.А., Соколов Я.А., 2013

вает существенное воздействие на качество электроэнергии, прежде всего, на искажение синусоидальности напряжения за счет высших гармонических составляющих, приходится учитывать это воздействие и принимать меры к снижению его негативных последствий [2].

### Задачи исследования

В Одесском морском торговом порту проведены эксперименты, основной задачей которых являлась оценка искажения синусоидальности напряжения питающей сети при работе механизмов портального крана "Альбрехт", приводы которого выполнены по системе ТПН-АД. Номинальная грузоподъемность крана в крюковом и грейферном режимах – 10 т. Мощность установленных приводных двигателей замыкающей и поддерживающей лебедок – по 90 кВт, номинальный ток каждого двигателя  $I_{но}=220$  А. Проектная релейно-контакторная система управления приводами механизмов несколько лет назад была заменена системой ТПН-АД (система "АСЕ" финской фирмы Коне).

### Изложение основного материала

В ходе экспериментальных исследований с помощью измерительной системы [3-5] регистрировались токи, потребляемые краном из сети, и напряжение питающей сети при выполнении ряда технологических операций, связанных с работой привода подъема в крюковом режиме как без груза, так и с грузом 6 т. Эта же система применялась при проведении экспериментов, описанных в [6].

Кран получал питание от крановой колонки, подключенной к трансформаторной подстанции (ТП) 6/0,4 кВ с двумя включенными параллельно силовыми трансформаторами мощностью 630 кВ·А каждый.

Коэффициент искажения синусоидальности напряжения (КИС) питающей сети определялся в соответствии с выражением

$$THDu_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1} 100\% , \quad (1)$$

где  $U_1$  – действующее значение первой гармоники напряжения,  $v$  – номер гармоники,  $U_v$  – действующее значение напряжения гармоники с номером  $v$ .

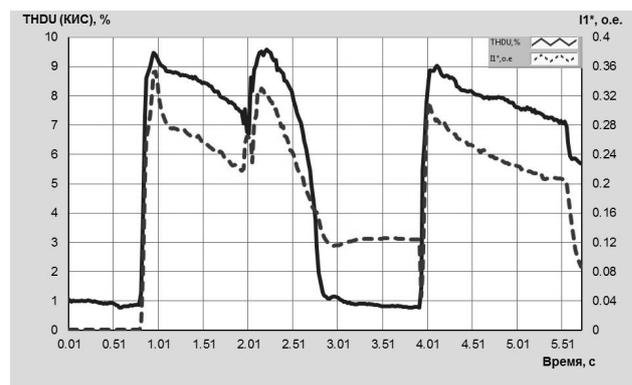
Нагрузка электропривода определялась относительной величиной действующего зна-

чения первой гармоники сетевого тока

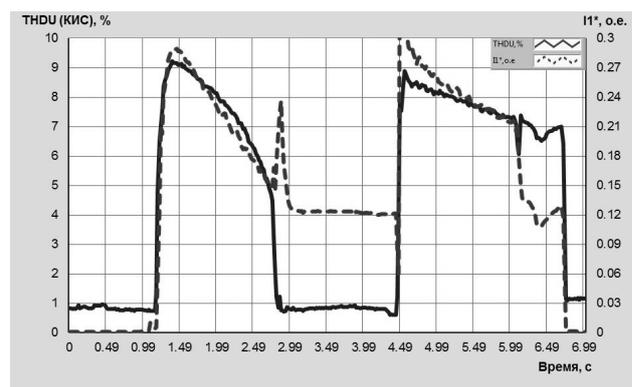
$$I_{I^*} = \frac{I_1}{I_{I_{ном}}} , \quad (2)$$

где в качестве базисной величины принято действующее значение первой гармоники сетевого тока  $I_{I_{ном}}=1820$  А, соответствующее номинальному току  $I_{н,тр}$  двух силовых трансформаторов, включенных на параллельную работу.

На рисунках 1 и 2 представлены графики изменения коэффициента искажения синусоидальности (КИС) напряжения  $THDu_{\%}$  и относительной величины действующего значения первой гармоники сетевого тока  $I_{I^*}$  на протяжении цикла "разгон – установившееся движение с номинальной скоростью – торможение" работы привода лебедок, рассчитанные по методам, изложенным в [7, 8].

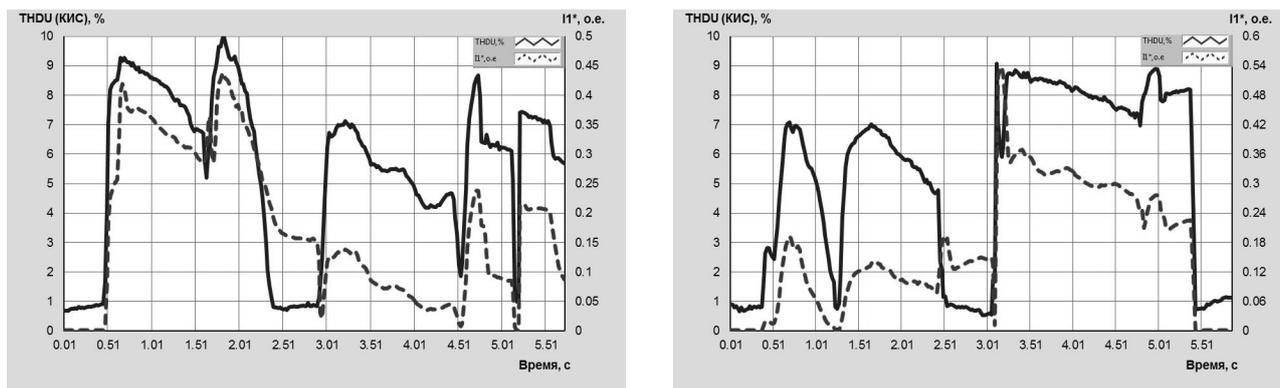


а



б

Рис. 1. Зависимости КИС и первой гармоники тока от времени:  
 а – подъем без груза; б – опускание без груза



а

б

Рис. 2. Зависимости КИС и первой гармоники тока от времени:  
 а – подъем груза б т; б – опускание груза б т

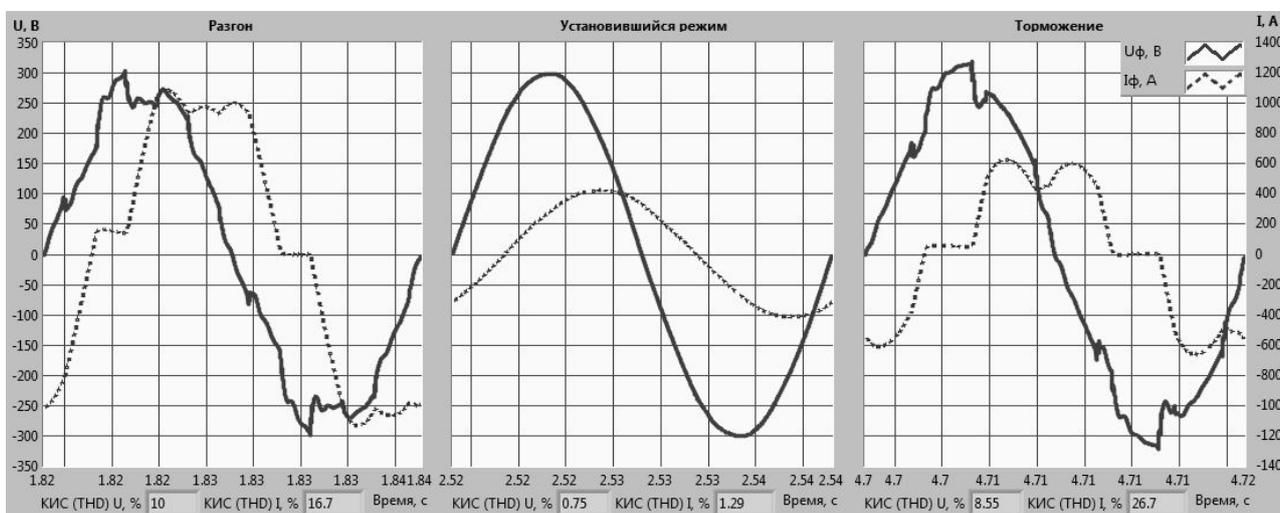


Рис. 3. Осциллограммы фазного напряжения сети и тока, соответствующие участкам разгона, установившегося движения и торможения привода при подъеме груза массой б т

Графики на рис. 1 получены при работе привода лебедок без груза, а на рис. 2 – с грузом массой б т. На рис. 3 показаны осциллограммы фазного напряжения сети и тока той же фазы, соответствующие участкам разгона, установившегося движения и торможения привода при подъеме груза массой б т.

Отметим, что искажение синусоидальности напряжения сети происходит только на участках разгона и торможения привода, когда пары тиристорov, включенные встречно–параллельно в каждую фазу статора, работают с изменяющимися углами управления, благодаря чему токи обмоток статора отличаются от синусоидальных.

Несинусоидальные токи динамических режимов, превышающие в 2,5–3 раза токи установившихся режимов, протекая по крановой сети и обмоткам трансформаторов, вызывают искажения синусоидальности напряжения сети, превышающие нормально допустимые ГОСТом [9] значения  $THDu\%$ , равные 8 %. При проведении эксперимента в производственных условиях удалось зафиксировать параметры работы крана только в крюковом режиме. В таблице приведены данные о временных интервалах превышения уровня  $THDu = 8\%$  в переходных процессах разгона  $t_{np.}$ , торможения  $t_{nm.}$  и их суммарного значения  $t_{npt.}$  при работе без груза и грузом массой б т.

1. Длительности превышения уровня  $THDu=8\%$  в переходных процессах

Масса груза $m_{гр.}$ , т	Операция	Время, с		
		$t_{н.р.}$	$t_{н.м.}$	$t_{н.р.м.}$
0	Подъем	1,30	0,58	1,88
0	Опускание	0,74	0,70	1,44
6	Подъем	1,08	0,06	1,14
6	Опускание	0,00	1,46	1,46

Как следует из данных таблицы, суммарное время  $t_{н.р.м.}$  превышения  $THDu$  уровня  $8\%$  существенно зависит от массы груза и практически не изменяется при опускании. С учетом того, что в переходных процессах разгона и торможения зафиксировано превышение допустимого уровня искажения синусоидальности кривой напряжения, следует рассмотреть работу крана в наиболее напряженном и производительном грейферном режиме. В этом режиме масса грейфера с грузом должна соответствовать номинальной грузоподъемности крана, а масса пустого грейфера составляет  $0,4$  номинальной грузоподъемности. Для крана «Альбрехт» масса грейфера с грузом –  $10$  т, а пустого грейфера –  $4$  т.

Полагая, что в первом приближении величина  $t_{н.р.м.}$  линейно зависит от массы поднимаемого груза, оценим величину  $t_{п.р.т.}$  для масс  $m_{гр.} = 4$  т и  $m_{гр.} = 10$  т, соответствующих подъему пустого и заполненного грейфера. Для этого воспользуемся уравнением

$$t_{н.р.м.} = -0,1233m_{гр.} + 1,88, \quad (3)$$

полученным по данным таблицы. Оценки времени  $t_{н.р.м.}$  при подъеме составляют:  $1,38$  ( $m_{гр.} = 4$  т) и  $0,65$  с ( $m_{гр.} = 10$  т).

С учетом приведенных оценок времени  $t_{п.р.т.}$  суммарное время за цикл работы, состоящий из последовательности операций подъема и опускания груза массой  $m_{гр.} = 10$  т, а затем и с грузом массой  $m_{гр.} = 4$  т, определяется

$$\Sigma t_{н.р.м.ц.} = 0,65 + 1,46 + 1,38 + 1,45 = 4,94 \text{ с.}$$

Стандартом [9] допускается определять соответствие нормам по суммарной продолжительности времени выхода измеренных значений коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения за нормально и предельно допустимые значения. При этом

качество электрической энергии по коэффициенту искажения синусоидальности кривой напряжения считают соответствующим требованиям ГОСТ, если суммарная продолжительность времени выхода за нормально допустимые значения составляет не более  $5\%$  от периода времени, равного  $24$  ч, т. е.  $1$  ч  $12$  мин, а за предельно допустимые значения –  $0\%$  от этого периода времени.

Определим допустимое число циклов  $N_{доп.}$  в течение суток при работе крана в грейферном режиме исходя из условия, что суммарное время превышения уровня  $THDu = 8\%$  за сутки не должно превышать  $1$  ч.  $12$  мин =  $4320$  с

$$N_{доп.} = 4320/4,94 = 875 \text{ циклов.}$$

Фактическое время работы кранов в портах на протяжении суток при двух сменах ( $2$  смены по  $12$  ч каждая), с учетом перерывов на обед и при сдаче-приемке смены, составляет  $20$  ч.

По данным [10], среднее время цикла работы крана в грейферном режиме при загрузке (разгрузке) трюма равно  $110$  с. Тогда количество циклов работы крана за сутки составит  $655$ , т.е. меньше допустимого числа циклов ( $N_{доп.} = 875$ ) при данных параметрах крановой сети.

Если кран работает в тылу и обеспечивает подсыпку груза крану, работающему на морском грузовом фронте, время цикла существенно сокращается и составляет  $60$  с. В этом случае количество циклов работы крана за сутки составит  $1200$ , которое превышает в  $1,37$  раза допустимое число циклов по показателю времени превышения параметром  $THDu\%$  величины  $8\%$ . Информация, полученная при проведении экспериментов, позволяет определить соотношение номинальных токов питающего трансформатора и двигателей подъема, при котором величина  $THDu$  достигнет предельно допустимого значения, равного  $12\%$ . При проведении эксперимента зафиксированы два значения  $THDu$  напряжения крановой сети:

- максимальное  $THDu_{м.}$ , равное  $10\%$  на участке разгона при подъеме груза массой  $6$  т;

- исходное, фоновое значение  $THDu_{ф.}$  при отключенных приводах крана, равное  $1\%$ .

В данном случае можно рассматривать приращение искажения синусоидальности напряжения крановой сети, обусловленное работой привода подъема

$$\Delta THDu = THDu_{.м.} - THDu_{.ф.} = 9 \%. \quad (4)$$

Очевидно, что при меньших значениях мощности и номинального тока трансформатора, питающего крановую сеть,  $THDu$  возрастет. При фоновом значении  $THDu_{.ф.} = 1 \%$  для достижения предельно допустимого уровня  $THDu_{.пр.} = 12 \%$  максимальное значение приращения  $\Delta THDu_{.м.}$  не должно превышать 11 %. Исходя из этого, определим граничное значение номинального тока трансформатора  $I_{н.гр.}$ , при котором  $THDu$  будет достигать предельно допустимого значения 12 %:

$$I_{н.гр.} = I_{н.тр.} \cdot \Delta THDu / \Delta THDu_{.м.}; \quad (5)$$
$$I_{н.гр.} = 1820 \cdot 9 / 11 = 1490 \text{ А.}$$

Найдем также соотношение номинальных токов питающего трансформатора и двигателей подъема крана, когда уровень  $THDu_{.пр.}$  не превышает 12 %:

$$k_{гр.} = I_{н.гр.} / 2 \cdot I_{н.д.}; \quad (6)$$
$$k_{гр.} = 1490 / 2 \cdot 220 \approx 3,4.$$

### Выводы

1 Искажение синусоидальности напряжения сети определяется работой привода подъема при разгоне, торможении и несущественном влиянии на этот показатель динамических режимов приводов поворота и изменения вылета стрелы.

2 При сохранении соотношения номинальных токов трансформаторов (1820 А) и двигателей (2x220 А), как в условиях проведения эксперимента, допустима работа одного крана с длительностью цикла не менее 82,3 с.

3 Можно утверждать, что в рассмотренных условиях недопустима одновременная работа двух аналогичных кранов с приводом ТПН–АД ввиду возможности наложения их пуско–тормозных режимов, при которых будет превышено предельно допустимое значение  $THDu$ , равное 12 %.

### Список использованной литературы

1. Герасимьяк, Р. П. Энергетичні показники електроприводів підйомних механізмів / Р. П. Герасимьяк, Д. О. Махортова // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : Техніка. – 2009. – № 73. – С. 31 – 35.

2. Жежеленко, И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

3. Бесараб, А. Н. Измерительная система для экспериментальных исследований переходных режимов электродвигателей / А. Н. Бесараб, Ю. В. Кузнецов // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : Техніка. – 2007. – № 68. – С.30 – 33.

4. Бесараб, А. Н. Измерительная система для регистрации и анализа переходных и установившихся режимов в системах электропитания / А. Н. Бесараб // *Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: VI міжнародна науково-технічна конф.: зб. праць*. – М. : Вид-во ПДТУ. – 2008. – С. 388 – 390.

5. Бесараб, А. Н. Аппаратно-программный комплекс для анализа показателей качества электрической энергии / А. Н. Бесараб, Я. А. Соколов // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : Техніка. – 2009. – № 74. – С.53–57.

6. Радимов, С. Н. Экспериментальное исследование степени искажения сетевого тока частотного электропривода / С. Н. Радимов, В. Л. Беляев, А. Н. Бесараб и др. // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К. : Техніка. – 2010. – № 75. – С.52 – 56.

7. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2003. – 604с.

8. Harold, Klee. Simulation of Dynamic System with MATLAB and Simulink / Klee Harold, Randal Allen – CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York : 2011. – 783 p.

9 ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ13109-87. Введ. 01.01.1999. – К. : Госстандарт Украины, 1993.

10. Ерофеев, Н. И. Автоматика и автоматизация портовых перегрузочных процессов / Н. И. Ерофеев, Л. А. Орлов – М. : Транспорт, 1973. – 269 с.

Получено 16.04.2013

#### References

1. Gerasymiak, R. P. Energy of power lift electric drives / R. P. Gerasymiak, D. O. Makhortova // *Elektromashinobud. ta elektrooblad.* – Kiev : Tekhnika. – 2009. – Iss. 73. – P. 31 – 35 [in Ukrainian].

2. Zhezhelenko, I. V. Electric power quality indicators and their control at enterprises. / I. V., Zhezhelenko, Y. L. Saenko. – Moscow : Energoatomizdat, 2000. – 252 p. [in Russian].

3. Besarab, A. N. Measuring system for researches of electric motors transient modes/ A. N. Besarab, Y. V. Kuznetsov // *Elektromashinobud. ta elektrooblad.* – Kiev : Tekhnika. – 2007. – Iss. 68. – P. 30 – 33 [in Russian].

4. Besarab, A. N. Measuring system for experimental researches of electric power systems transient and steady state modes / A. N. Besarab // *Effectiveness and quality of enterprises power supply. – VI international technical conference: VI international scientific and technical conference.: works collection.* – Moscow : ed. PDTU 2008. – P. 388 – 390 [in Russian].

5. Besarab, A. N. Apparatus-software complex for power quality indicators analysis / A. N. Besarab, Y. A. Sokolov // *Elektromashinobud. ta elektrooblad.* – Kiev : Tekhnika. – 2009. – Iss. 73. – P. 31 – 35 [in Russian].

6. Radimov, S. N. Experimental research of distortion degree of network current of AC adjustable speed drive / S. N. Radimov, V. L. Bilyayev, A. N. Besarab and other // *Electrical machinery and Electrical equipment.* – Kiev : Tekhnika. – 2010. – Iss. 75. – P. 52 – 56 [in Russian].

7. Sergienko, A. B. Digital signal processing / A. B. Sergienko. – SPb.: Piter, 2003. – 604 p. [in Russian].

8. Harold, Klee. Simulation of Dynamic System with MATLAB and Simulink / Klee Harold, Randal Allen – CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton, London, New York : – 2011. – 783 p. [in English].

9. GOST 13109-97. Electric energy. Compatibility electromagnetic of hardware. Standard specifications of electric power quality at general-purpose power supply systems. Instead GOST 13109-87. – Kiev : Gosstandart of Ukraine, 1993 [in Russian].

10. Erofeev, N. I. Automatic and automation of port cargo processes / N. I. Erofeev. – Moscow : Transport, 1973. – 269 p. [in Russian].



Радимов  
Сергей Николаевич,  
д-р техн. наук, каф. электро-  
снабжения и энергоменедж-  
мента Одесского нац. поли-  
техн. ун-та  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса,  
65044



Беляев Владимир  
Леонидович, канд. техн.  
наук, каф. электроснабжения  
и энергоменеджмента Одес-  
ского нац. политехн.  
ун-та



Бесараб Александр  
Николаевич, канд. техн.  
наук, каф. электроснабжения  
и энергоменеджмента Одес-  
ского нац. политехн.  
ун-та



Аниченко Константин  
Анатольевич, ст. препода-  
ват., ОНМУ,  
ул. Мечникова, 34 г. Одесса,  
65029



Соколов Ярослав  
Александрович, ассистент  
каф. электроснабжения и  
энергоменеджмента Одес-  
ского нац. политехн. ун-та