

*П.Д. АНДРІЄНКО, О.В. НЕМИКІНА, А.А. АНДРІЄНКО*

### ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КРАНОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті проведено порівняльний аналіз електротехнічних кранових комплексів з системами живлення кранів на постійному і змінному струмі. Показано, що для знову споруджуваних комплексів або при глибокій модернізації найкращими є системи живлення постійного струму при використанні частотно-регульованих приводів з двохланковими перетворювачами частоти. При частковій модернізації найбільш доцільно використовувати системи живлення змінного струму. Альтернативою частотно-регульованим приводу з точки зору вартісних і енергетичних показників є енергоефективний електропривод з імпульсним регулюванням в ланцозі ротора асинхронного двигуна. Особливістю електроприводу є можливість рекуперації енергії ковзання у всіх режимах роботи: пуск гальмування, а також можливість компенсації реактивної потужності споживаної краном. При цьому номінальна потужність елементів, які забезпечують регулювання частоти обертання ротора, в 3 рази менше ніж в частотно-регульованому приводі при більш високому ККД. Зазначений електропривод дозволяє забезпечити широкий діапазон регулювання без датчиків на валу двигуна. Привід має мінімальну кількість керованих приладів, що істотно підвищує їх надійність. Зазначені електроприводи рекомендуються для кранів з важкими режимами роботи.

**Ключові слова:** електропривод, перетворювачами частоти, електротехнічний крановий комплекс, системи живлення кранів, ККД.

*П.Д. АНДРИЕНКО, О.В. НЕМЫКИНА, А.А. АНДРИЕНКО*

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРАНОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В статье проведен сравнительный анализ электротехнических крановых комплексов с системами питания кранов на постоянном и переменном токе. Показано, что для вновь строящихся комплексов или при глубокой модернизации наиболее предпочтительны системы питания постоянного тока при использовании частотно – регулируемых приводов с двухзвенными преобразователями частоты. При частичной модернизации наиболее целесообразно использовать системы питания переменного тока. Альтернативой частотно-регулируемому приводу с точки зрения стоимостных и энергетических показателей является энергоэффективный электропривод с импульсным регулированием в цепи ротора асинхронного двигателя. Особенностью электропривода является возможность рекуперации энергии скольжения во всех режимах работы: пуск торможения, а также возможность компенсации реактивной мощности потребляемой краном. При этом номинальная мощность элементов, обеспечивающих регулирования частоты вращения ротора, в 3 раза меньше чем в частотно-регулируемом приводе при более высоком КПД. Указанный электропривод позволяет обеспечить широкий диапазон регулирования без установки датчиков на валу двигателя. Привод имеет минимальное количество управляемых приборов, что существенно повышает их надежность. Указанные электропривода рекомендуются для кранов с тяжелыми режимами работы.

**Ключевые слова:** электропривод, преобразователями частоты, электротехнический крановый комплекс, системы питания кранов, КПД.

*P.D. ANDRIENKO, O.V. NEMYKINA, A.A. ANDRIENKO*

### COMPARATIVE ANALYSIS OF CRANE ELECTROTECHNICAL COMPLEXES

The article provides a comparative analysis of electrical crane systems with DC and AC power systems for cranes. It is shown that for newly built complexes or with deep modernization, DC power systems are most preferable when using frequency-controlled drives with two-link frequency converters. With a partial upgrade, it is most advisable to use AC power systems. An alternative to a frequency-controlled drive in terms of cost and energy indicators is an energy-efficient electric drive with pulse control in the rotor circuit of an induction motor. A feature of the electric drive is the ability to recover sliding energy in all operating modes: starting braking, as well as the ability to compensate for the reactive power consumed by the crane. At the same time, the rated power of the elements providing regulation of the rotor speed is 3 times less than in a variable frequency drive with a high efficiency. The specified drive allows you to provide a wide range of regulation without installing sensors on the motor shaft. The drive has a minimum number of controllable devices, which significantly increases their reliability. The specified electric drive is recommended for cranes with heavy operating modes.

**Key words:** electric drive, frequency converters, electrical crane complex, crane power systems, efficiency.

**Введение.** Развитие элементарной базы силовых полупроводниковых приборов и микроэлектроники привело к развитию и совершенствованию систем электропривода кранов, обеспечивающих более эффективную и надежную работу кранов. Современное состояние в Украине крановых электротехнических комплексов (ЭТК), в основном характеризуется применением энергозатратных электроприводов с параметрическим управлением и существенно отстает от развития элементарной базы силовой и микроэлектроники и соответственно современного электрооборудованию на их основе [1-3]. Внедрение плавного регулируемых приводов на кранах позволяет существенно повысить энергоэффективность, уменьшить износ крановых конструкций и подкрановых путей [1-4]. Поскольку парк кранового оборудования достаточно большой то естественно воз-

никает вопрос о создании определенного ряда унифицированных плавнорегулируемых электроприводов, позволяющих применять оптимальное решение при выборе в диапазоне «цена-качество» используемых электроприводов. Вопросы технико-экономического анализа при выборе систем электропривода привлекают все больше внимание разработчиков [2-4], в которых рассмотрены возможные варианты использования типовых решений в зависимости от режима работы, назначения крана и мощности электроприводов.

Для средних и тяжелых режимов работы несмотря на относительно высокую стоимость рекомендуется применение частотно – регулируемых приводов (ЧРП). Разработка энергоэффективного привода с плавным управлением в цепи выпрямленного тока ротора, благодаря относительно низкой стоимости, позволяет до-

полнить ряд унифицированных приводов [4, 5]. В работах [1-3] рекомендации по использованию электроприводов кранов рассматривались без учета потерь в системах питания кранов (СПК), которые, например, при использовании ЧРП приводят к снижению КПД кранового электротехнического комплекса СПК-ЧРП [6-8], что существенно влияет на сроки окупаемости электроприводов. Учитывая вышеизложенное комплексное исследование крановых ЭТК является актуальной задачей.

**Целью работы** является проведение сравнительной оценки крановых ЭТК с различными типами электроприводов, работающих в относительно тяжелых режимах работы.

**Основные результаты работы.** На рис. 1, 2 представлены функциональные схемы ЭТК с системой питания кранов (СПК) переменного тока и постоянного тока и ЧРП на основе двухзвенного преобразователя частоты. Фильтрующие устройства (ФУ), обеспечивающие показатели качества электроэнергии и электромагнитную совместимость с сетью включают: силовые активные фильтры (САФ), широкополосные UHF фильтры, резонансные фильтры (РФ), настроенные на определенный порядок гармоник и устанавливаются при необходимости [9-11]. На рис. 3 представлена функциональная схема ЭТК с импульсно-токовым управлением выпрямленного тока в цепи ротора.

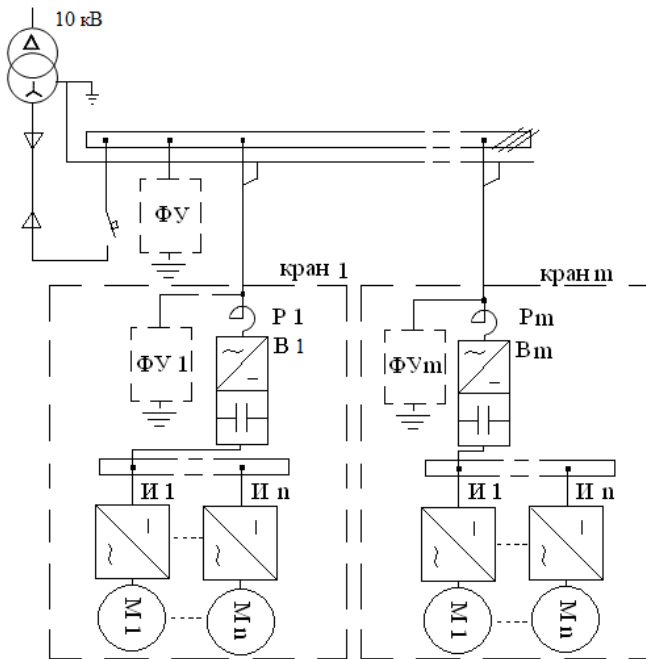


Рис. 1 – Схема ЭТК с СПК переменного тока и ЧРП

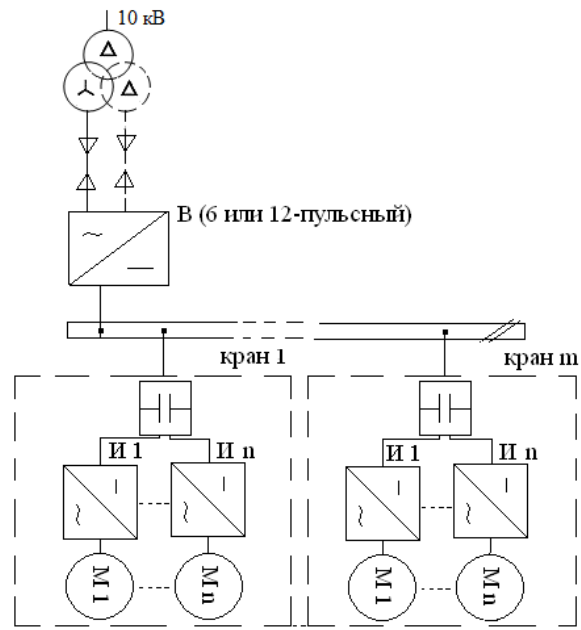


Рис. 2 – Схема ЭТК с СПК постоянного тока и ЧРП

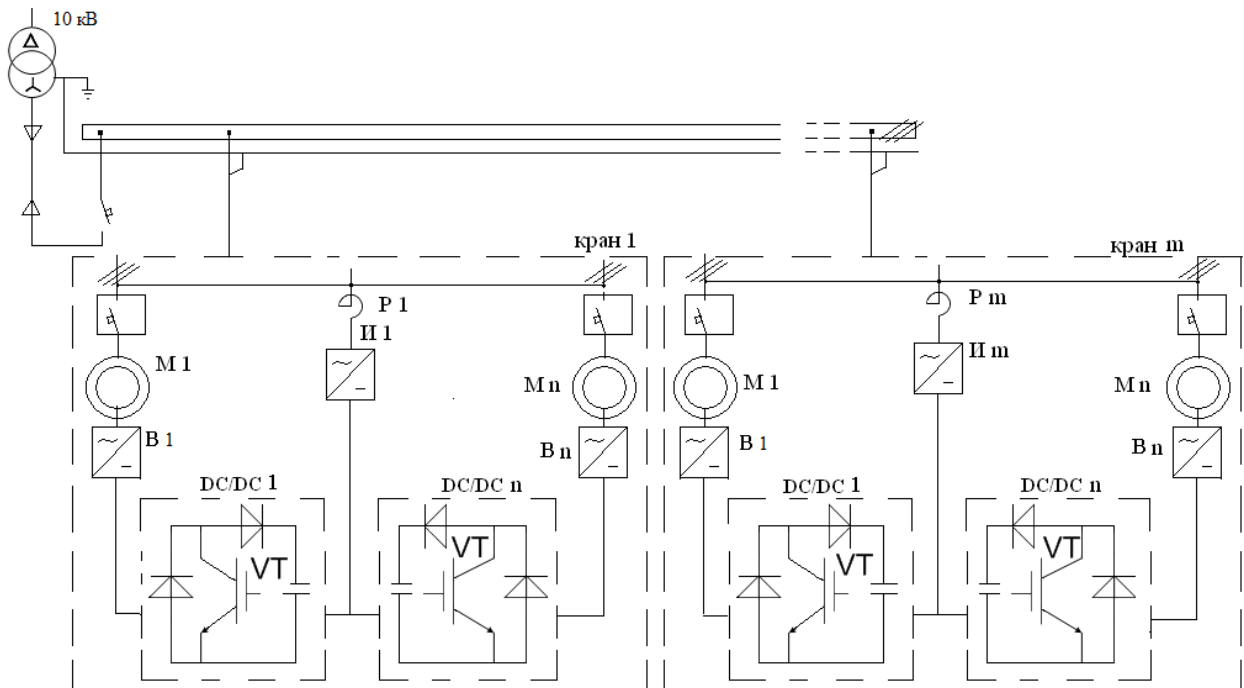


Рис. 3 – Схема ЭТК с СПК переменного тока и импульсно-токовым управлением выпрямленного тока в цепи ротора

Принцип работы схемы электроприводов (рис. 3) основан на импульсном регулировании частоты вращения ротора путем регулирования скважности работы транзисторов VT, которые формируют заданный выпрямленный ток ротора. При включении транзисторов VT ток ротора нарастает. При достижении заданного значения они выключаются, а энергия скольжения и энергия, запасенная в индуктивностях двигателя, сбрасывается в конденсатор (С) с последующей рекуперацией энергии в сеть при помощи автономного инвертора напряжения (АИН).

В [6, 7] показано, что СПК постоянного тока целесообразно применять при использовании ЧРП для всех механизмов крана или при модернизации кранов с приводами постоянного тока. При этом вспомогательные цепи должны питаться от вспомогательного инвертора

DC-AC или от токопровода постоянного тока. Использование активного выпрямителя в схемах рис. 1 и рис. 2 позволяет осуществить рекуперацию энергии. При этом СПК постоянного тока имеет существенные преимущества перед СПК переменного тока за счет уменьшения установленной мощности выпрямителя, уменьшения потерь мощности и напряжения и соответственно расхода материалов токопровода (алюминиевые шины, стальные уголки) [6]. СПК постоянного тока рекомендуется для вновь проектируемых цехов с количеством кранов более двух. При меньшем количестве кранов или при частичной модернизации преимущество остается за СПК переменного тока. В этом случае помимо ЧРП могут быть использованы более простые электропривода. Отдельную группу представляют энергоэффективные электроприводы с импульсным регулированием в цепи выпрямленного тока ротора [4, 5].

Таблица 1 – Сравнительная оценка крановых электротехнических комплексов

N	Наименование	Схема ЭТК		
		Рис. 1	Рис. 2	Рис. 3
1	Установленная мощность:			
	- выпрямителей	$P_B = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn} \frac{1}{\eta_{Mn} \eta_{In}}$ (в статорной цепи двигателей крана)	$P_B = k_{\max} \sum_{i=1}^{mn} k_{in} P_{Mn} \frac{1}{\eta_{Mn} \eta_{In}}$ (на подстанции)	$P_B = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn}$ (в роторной цепи)
	- инверторов	$P_{II} = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn} \frac{1}{\eta_{Mn}} +$ $\sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn} \frac{1}{\eta_{Mn} \eta_{In}}$ (второе слагаемое при наличии рекуперации)	$P_{II} = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn} \frac{1}{\eta_{Mn}}$	$P_{II} = \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn} S_n \eta_{Bn} \eta_{DCn}$
	- импульсных преобразователей	-	-	$P_{uII} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^m \sum_{i=1}^n P_{Mn} \eta_{Bn}$
2	Кол-во:			
	- выпрямителей	$m$	$l$	$m \times n$
	- инверторов	$m \times n$	$m \times n$	$m$
	- импульсных преобразователей	-	-	$m \times n$
3	Кол-во фаз токопровода:	3	2	3
4	Относительные потери мощности в токопроводах: ( $\cos \phi_1 = 1$ ; $v = 0,95$ ;) )			

-стального уголка	1	$0,9 \frac{R_-}{R} \sim \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{N=6k+1} \frac{\sqrt{f_N^*}}{(f_N^*)^2}}$	1
-Al шины	1	0,67	1
5 Кол-во полупроводниковых приборов	-	-	
-неуправляемых (диодов)	$6m(1+n)$	$6(1+mn)$	$6(m+1)+2mn$
-управляемых	$6mn$	$6mn$	$6m(1+n)$
-управляемых (при наличии рекуперации)	$6m(1+n)$	$6mn$	$6m(1+n)$

Особенностью электропривода является наличие рекуперации энергии скольжения в сеть во всех режимах работы. Торможение электропривода происходит в режиме противовключения. Возможна реализация динамического торможения с самовозбуждением при исчезновении напряжения сети.

В табл. 1 проведен сравнительный анализ крановых ЭТК для схем рис. 1, рис. 2 и рис. 3.

В табл. 1  $m, n$  – количество кранов, двигателей на кране;  $P_{Mn}$  – установленная мощность двигателя крана;  $\eta_{Mn}, \eta_{In}, \eta_{DCn}$  – КПД  $n$ -двигателя крана, КПД  $n$ -инвертора, КПД  $n$ -импульсного преобразователя DC/DC;  $n_{эф}$  – эффективное число электроприемников;  $S_n$  – скольжение  $n$ -двигателя;  $k_{in}$  – коэффициент использования  $n$ -двигателя крана;  $k_i$  – средневзвешенный коэффициент использования,  $k_{max}$  – коэффициент максимума;

$$k_{max} = 1 + \frac{1,5}{\sqrt{n_{эф}}} \cdot \sqrt{\frac{1-k_i}{k_i}};$$

$N$  – номер учитываемой гармоники,  $N=5,7$ ;

$f_N^* = f_N/50$  – относительная частота высших гармоник;

$\cos\varphi_1$  – коэффициент мощности основной гармоники;

$v$  – коэффициент искажения.

$R_-, R$  – сопротивление токопровода постоянного и переменного тока.

Анализ крановых ЭТК произведен при одинаковой суммарной номинальной нагрузки двигателей кранов. Для схемы ЭТК с СПК переменного тока и ЧРП (рис. 1) результаты расчета относительных потерь мощности представлены с учетом генерации высших гармоник ( $v = 0,95$ ) при  $\cos\varphi_1=1$ . Анализ табл. 1 показывает, что по рассматриваемым показателям наиболее предпочтительно использовать ЭТК с СПК постоянного тока с ЧРП. При использовании ЭТК с СПК переменного тока наиболее эффективная схема с импульсно-токовым управлением выпрямленного тока в цепи ротора. При этом следует принять во внимание, что КПД

у крановых двигателей с фазным ротором при мощности  $5 \div 200$  кВт на  $1 \div 5\%$  выше, чем у крановых двигателей с короткозамкнутым ротором. Более высокая эффективность схем ЭТК с СПК переменного тока и импульсно-токовым управлением выпрямленного тока в цепи ротора (рис.3) объясняется тем, что в ней осуществляется преобразование энергии скольжения. Указанные электроприводы позволяют обеспечить широкий диапазон регулирования частоты вращения без датчиков частоты вращения на валу.

Сравнение ЭТК с СПК переменного тока и СПК постоянного тока в каждом конкретном случае требует более тщательного технико-экономического сравнения, так как его эффективность зависит от мощности двигателей кранов, их количества, длины участков крановых токопроводов, используемых материалов крановых токопроводов, требований к электромагнитной совместимости.

**Выводы.** Проведенный сравнительный анализ показал:

1 При выборе типа кранового электропривода и проектировании СПК для кранового ЭТК необходимо проводить комплексную технико-экономическую оценку.

2 При построении новых ЭТК или при глубокой модернизации (при количестве кранов ( $m$ )  $\geq 3$ ) следует отдавать предпочтение ЭТК с СПК постоянного тока и ЧРП.

3 Электроприводы с двигателями с фазным ротором и импульсно-токовым управлением выпрямленного тока в цепи ротора и рекуперацией энергии скольжения в сеть (рис.3) являются серьезной альтернативой электроприводами с ЧРП (рис. 1), как наиболее энергоэффективные и менее материалоемкие.

#### Список литературы

1. Рапутов Б.М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий М.: Металлургия, 1990. 272 с.
2. Тищенко В.Н. Современное состояние электроприводов грузо-

- подъемных механизмов / Тищенко В.Н., Колотило В.И. // Вестник Харьк. политех. ин-та Проблемы автоматизированного электропривода. Темат. выпуск 45 С. 303-306.
3. Савич С.П. Альтернативные электропривода переменного тока крановых механизмов [Текст]: автореферат на соискание уч. степени кандидата технических наук 05.09.03 Одесса 2013. -19 С.
  4. Герасимьяк Р.П., Бушер В.В., Калинин А.Г. Электроприводы и системы управления крановых механизмов: уч. пособие. – Одесса: Наука и Техника, 2014. – 202 с.
  5. Коцур М.И. Сравнительный анализ энергоэффективности систем регулирования асинхронного двигателя с фазным ротором / Коцур М.И., Андриенко П. Д., Коцур И.М. // Ползуновский вестник Барнаул АлтГТУ -2013 №4 -2 С. 114-120.
  6. Андриенко П.Д. Энергоэффективный крановый электропривод/П.Д. Андриенко, А.А. Андриенко, Д.С. Андриенко, В.П. Метельский, О.В. Немыкина// Вісник НТУ «ХПІ», 2017. 27 (1249). С. 254-257
  7. Немыкина О.В. Выбор системы питания кранов с частотно-регулируемым приводом // Электротехнические и компьютерные системы. – 2015. – №19. – С. 54-57.
  8. Андриенко П. Д., Немыкина О.В., Андриенко А.А. Влияние высших гармоник тока на выбор токопроводов систем питания кранов// Электротехніка і Електромеханіка. - 2019. - №3.- С.11-16. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02
  9. IEC 61000-3-12:2012. Electromagnetic compatibility (EMC) of technical equipment. International Standard, 2012.
  10. 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. International Standard, 2004.
  11. J.M. Cano, G.A. Orcajo, J.F. Mayordomo, R. Asensi, M.F. Cabanas, M.G. Melero New Transfer Functions for an Accurate Estimation of Harmonic Distortion in AC/DC Converters Working Under Unbalanced Conditions //IEEE Transactions on Industry Applications vol. 37, no. 2, march/april 2001, pp.642-649
- mechanisms. *Transactions of NTU «KhPI». Chapter «Problems of automated electric drive». Theory and practice*, 2005, no.45, pp. 303-306. (Rus).
3. Savich S.P. vtoreferatna soiskanie uch. stepeni kandidata tehnikeskikh nauk Alternativnyie elektroprivoda peremennogo toka kranovyih mehanizmov ONPU 2013. 19 p. (Rus).
  4. Gerasimyak R.P., Busher V.V., Kalinin A.G. *Elektroprivody i sistemy upravleniia kranovykh mehanizmov* [Electric drives and control systems of crane mechanisms]. Odessa, Science and Technology Publ., 2014. 202 p. (Rus).
  5. Kotsur M.I. Sravnitelnyiy analiz energoeffektivnosti sistem regulirovaniya asinhronnogo dvigatelya s faznym rotorom / Kotsur M.I., Andrienko P. D., Kotsur I.M. // Polzunovskiy vestnik Barnaul AltGTU -2013 №4 -2 S. 114-120.
  6. Andrienko P.D. Energy-efficient crane electric drive / P.D. Andrienko, A.A. Andrienko, D.S. Andrienko, V.P. Metelsky, O.V. Nemykina // *Transactions of NTU «KhPI». Chapter «Problems of automated electric drive». Theory and practice*, 2017.27 (1249). pp. 254-257. (Rus).
  7. Nemykina O.V. The choice of the power supply system of cranes with variable frequency drive. *Electrotechnic and computer systems*, 2015, no.19, pp. 54-57. (Rus).
  8. P.D. Andrienko, O.V. Nemykina, A.A. Andrienko. Influence high current harmonics by the choice of conductors of crane power supply systems. // *Electrotechnics and Electromechanics.*- 2019, no.3, pp.-11-16. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.02
  9. IEC 61000-3-12:2012. Electromagnetic compatibility (EMC) of technical equipment. International Standard, 2012.
  10. 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. International Standard, 2004.
  11. J.M. Cano, G.A. Orcajo, J.F. Mayordomo, R. Asensi, M.F. Cabanas, M.G. Melero New Transfer Functions for an Accurate Estimation of Harmonic Distortion in AC/DC Converters Working Under Unbalanced Conditions //IEEE Transactions on Industry Applications vol. 37, no. 2, march/april 2001, pp. 642-649.

## References (transliterated)

1. Raputov V.M. Electrical equipment of cranes of metallurgical enterprises M.: Metallurgy, 1990.272 p. (Rus).
2. Tishchenko V.N., Kolotilo V.I. The current state of electric lifting

Поступила (received) 07.09.2019

## Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the authors

**Андрієнко Петро Дмитрієвич (Андриенко Петр Дмитриевич, Andrienko Petr)** – Національний університет «Запорізька Політехніка», д.т.н., професор, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів; м. Запоріжжя, Україна; e-mail: [andrpd@ukr.net](mailto:andrpd@ukr.net).

**Немыкіна Ольга Володимирівна (Немыкина Ольга Владимировна, Nemykina Olga)** – Національний університет «Запорізька Політехніка», к. т. н., доцент кафедри електропостачання промислових підприємств, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9447-0131>; e-mail: [olganemikina@ukr.net](mailto:olganemikina@ukr.net).

**Андрієнко Андрій Андрійович (Андриенко Андрей Андреевич, Andrienko Andrey)** – Національний університет «Запорізька Політехніка», аспірант кафедри електричних та електронних апаратів, м. Запоріжжя, Україна. e-mail: [yamoseandrey@mail.ru](mailto:yamoseandrey@mail.ru)