

С. С. МИХАЙКОВ

ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ ПЛК

У роботі представлено пристрій керування навантаженням на базі ПЛК ALPHA2 фірми Mitsubishi Electric, який є частиною електромеханічного стенду з оцінки якості електроенергії суднової електромережі та енергоефективності роботи частотно-регульованого електропривода. В якості об'єкта дослідження розглядається електропривод системи охолодження дизель-генераторів з частотним регулюванням фірми Danfoss типу VLT AQUA Drive потужністю 48,5 кВт. Експериментальні дослідження було проведено у лабораторних умовах з використанням розробленого електромеханічного стенда. Запропонований пристрій керування навантаженням забезпечує два режими управління: ручний та автоматичний. Програмування пристрою керування навантаженням здійснено у програмному середовищі AL-PCS/WIN-EU фірми Mitsubishi Electric на мові функціональних блок-діаграм (FBD). Для отримання показників якості електроенергії та показників енергоефективності роботи електропривода використано багатофункціональний пристрій Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS фірми Mitsubishi Electric. Проведені експериментальні дослідження засвідчили, що розроблений пристрій керування навантаженням є зручним інструментом для проведення детального аналізу якості електромережі та оцінки енергоефективності роботи електропривода.

Ключові слова: якість електроенергії, енергоефективність роботи електропривода, частотний перетворювач, асинхронний двигун, програмований логічний контролер (ПЛК), змінне навантаження, сумарний коефіцієнт гармонік (THD), коефіцієнт потужності.

С. С. МИХАЙКОВ

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ НАГРУЗКОЙ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗЕ ПЛК

В работе представлено устройство управления нагрузкой на базе ПЛК ALPHA2 фирмы Mitsubishi Electric, которое является частью электромеханического стенда по оценке качества электроэнергии судовой электросети и энергоэффективности работы частотно-регулируемого электропривода. В качестве объекта исследования рассматривается электропривод системы охлаждения дизель-генераторов с частотным регулированием фирмы Danfoss типа VLT AQUA Drive мощностью 48,5 кВт. Экспериментальные исследования были проведены в лабораторных условиях с использованием разработанного электромеханического стенда. Предлагаемое устройство управления обеспечивает два режима управления: ручной и автоматический. Программирование устройства управления нагрузкой проведено в программной среде AL-PCS / WIN-EU на языке функциональных блок-диаграмм (FBD). Для получения показателей качества электроэнергии и показателей энергоэффективности работы электропривода использовано многофункциональное устройство Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS фирмы Mitsubishi Electric. Полученные экспериментальные исследования подтвердили, что разработанное устройство управления нагрузкой является удобным инструментом для проведения детального анализа качества электросети и оценки энергоэффективности работы электропривода.

Ключевые слова: качество электроэнергии, энергоэффективность работы электропривода, частотный преобразователь, асинхронный двигатель, программируемый логический контроллер (ПЛК), переменная нагрузка, суммарный коэффициент гармоник (THD), коэффициент мощности.

S. S. MIKHAYKOV

THE LOAD CONTROL DEVICE OF THE VARIABLE FREQUENCY DRIVE ON THE BASIS OF PLC

The work presents the load control device for the variable frequency drive (VFD) based on the ALPHA2 PLC produced by Mitsubishi Electric, which is the part of an electromechanical stand for assessment of an electricity quality of the ship's electrical network and VFD energy efficiency. As an object of study, we are considering an electric drive of the diesel generators cooling system with frequency converter made by Danfoss type VLT AQUA Drive with a capacity of 48.5 kW. Experimental studies were carried out in laboratory conditions using the developed electromechanical stand. The proposed control device provides two control modes: manual and automatic. The load control device was programmed in the AL-PCS / WIN-EU software environment in the language of functional block diagrams (FBD). To obtain indicators of electric power quality and energy efficiency indicators of electric drive operation, an Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS was used. The conducted experimental studies have confirmed the feasibility of using the developed VFD load control device for a detailed analysis of the quality of the electric network and assess the energy efficiency of the drive.

Keywords: power quality, energy efficiency of electric drive, frequency converter, induction motor, programmable logic controller (PLC), variable load, total harmonic distortion (THD), power factor

Вступ. Частотно - регульований електропривод (ЧРП) є невід'ємною складовою при проектуванні сучасних суднових систем і комплексів, де широко використовуються енерго- і ресурсозберігаючі технології [1,2]. В роботі розглядається ЧРП системи охолодження дизель-генераторів, котрий є частиною загально-суднової системи охолодження. Зміна продуктивності системи охолодження дизель-генераторів забезпечується частотними перетворювачами типу VLT AQUA Drive фірми Danfoss задля підтримки режимних параметрів приводних двигунів дизель-генераторів. Дослідження та аналіз експлуатаційних режимів

роботи суднових турбомеханізмів з частотно-регульованими електроприводами у реальних умовах при змінному навантаженні є актуальним науковим і практичним завданням.

Для оцінки якості електромережі та проведення експериментів з дослідження показників енергоефективності частотно-керованого електроприводу суднових турбомеханізмів на кафедрі суднової електромеханіки і електротехніки Національного університету «Одеська морська академія» було проведено модернізацію електромеханічного лабораторного стенду, функціональна схема якого представлена на рис. 1 [3,4].

© С. С. Михайков, 2020

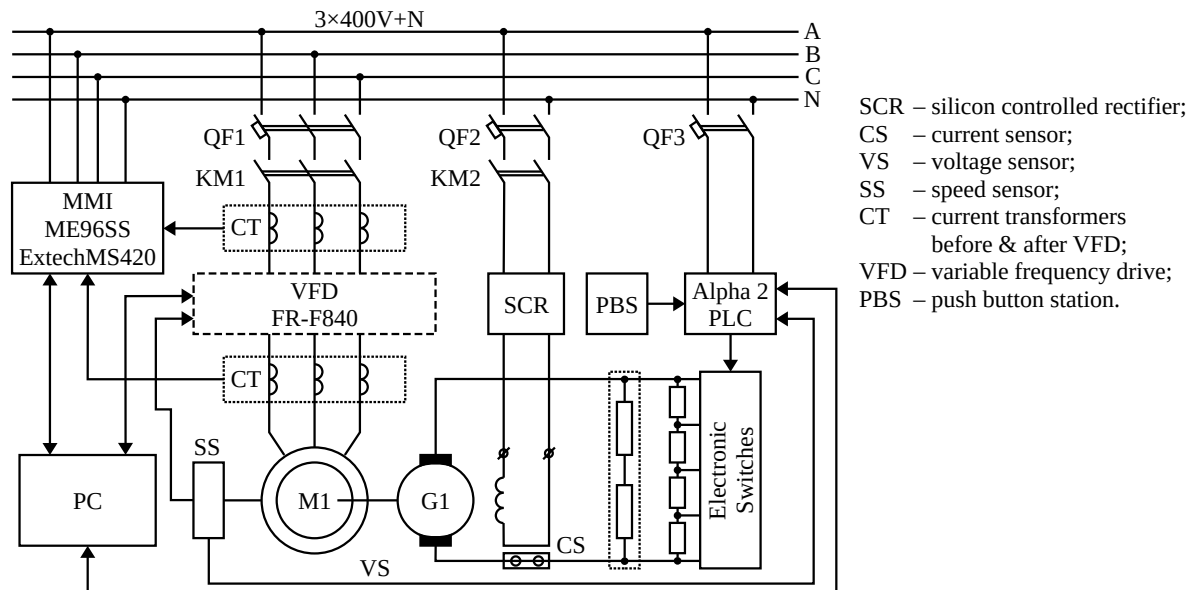


Рис. 1. Функціональна схема електромеханічного лабораторного стенду з ЧРП

Імітатором навантаження для асинхронного двигуна (АД) був генератор постійного струму з незалежним збудженням. Комутація резисторів навантаження генератора і відповідно асинхронного двигуна здійснювалась за алгоритмом, що забезпечував типовий характер навантаження турбомеханізмів, який реалізовано за допомогою ПЛК Alpha2, електронних твердотільних реле та давача частоти обертання машинного агрегату.

Мета дослідження. Оцінка показників якості електромережі та енергоефективності частотно-регульованого електропривода суднових насосів заборотної води при змінному навантаженні. У експериментальному дослідженні реєструвались наступні показники якості електромережі: відхилення напруги, відхилення частоти, несиметрія напруги, несинусоїдальність напруги. Коефіцієнт потужності та коефіцієнт кори-

сної дії використовувались як показники енергоефективності роботи електроприводу.

Методи дослідження. Для забезпечення зміни навантаження було розроблено пристрій керування навантаженням асинхронного двигуна, який забезпечує зміну навантаження асинхронного двигуна у відповідності до роботи електропривода насоса заборотної води у реальних експлуатаційних режимах.

Принципова схема пристрою керування навантаженням асинхронного двигуна з використанням ПЛК ALPHA2 зображена на рис. 2.

У пристрої використано ПЛК модифікації AL2-14-MR-D без адаптерних модулів, який має вісім каналів введення та 6 каналів виводу. Живлення ПЛК здійснено від зовнішнього джерела 24В постійного струму [5]. Пристрій забезпечує два режими роботи: ручний та автоматичний (Static/Dynamic).

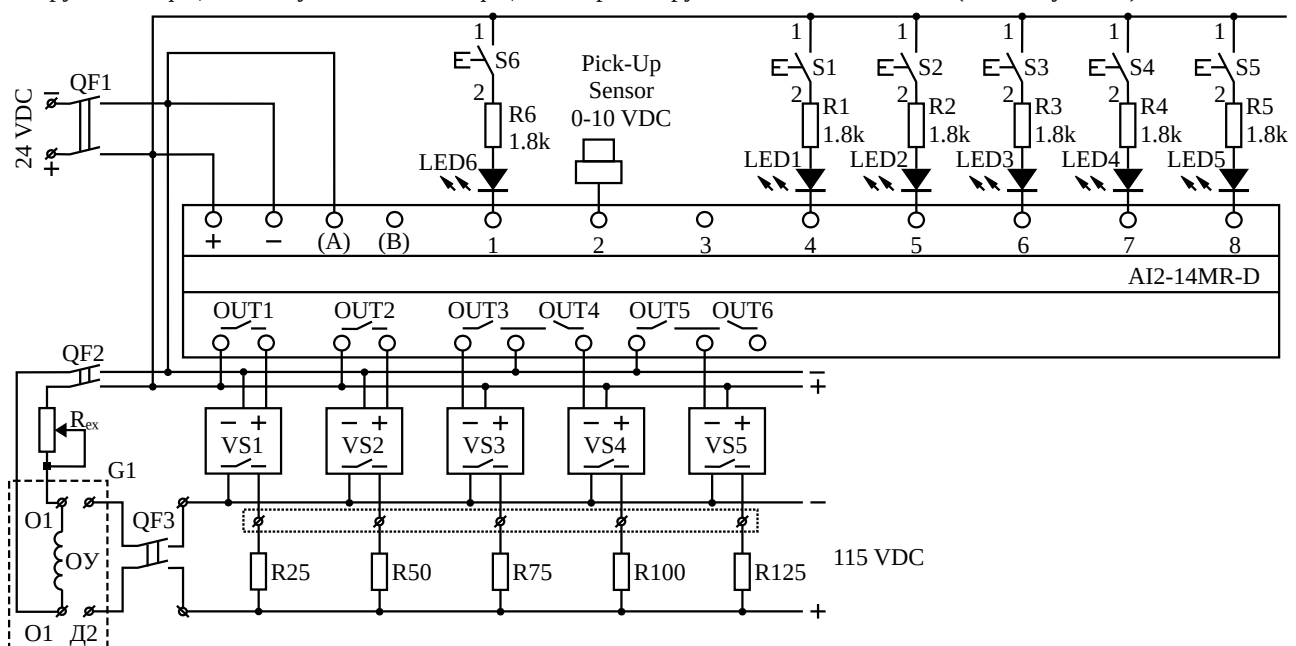


Рис. 2. Принципова схема пристрою керування навантаженням АД

В обох режимах канали виводу (O01 ÷ O05) контролера комутують відповідну ступень активного резисторного навантаження за допомогою напівпровідникових реле. Дискретні канали введення I04 ÷ I08 відповідають обраному відсотку навантаження (25%, 50%, 75%, 100%, 125%), яке підключено до якірного кола генератора G1 та навантажувальних резисторів R25 ÷ R125. Ручний режим дозволяє навантажити асинхронний двигун у вигляді ступенів обраного навантаження, а автоматичний режим налаштовується на типовий характер навантаження з урахуванням сигналу датчика обертів асинхронного двигуна (Pick-Up Sensor). Аналоговий сигнал від датчика обертів подається на канал введення I02.

Програмування ПЛК ALPHA2 здійснено на мові функціональних блок-діаграм (FBD) у програмному середовищі AL-PCS/WIN-E, рис. 3 [6]. Програма використовує логічні блоки, блоки затримки, тригерні блоки та блок DINAMIC UNIT, який створено для забезпечення автоматичного режиму керування навантаженням. Логіка програми налаштована на пріоритетне опитування датчика обертів у автоматичному режимі. У ручному режимі вибір навантаження (25%, 50%, 75% та 100%) здійснюється при натисканні на відповідні кнопки (I04, I05, I06, I07). Кнопка режиму перенавантаження (125%) підключена до каналу введення I08. Програма має один резервний канал введення та один резервний канал виводу.

У лабораторному стенді використано перетворювач частоти (ПЧ) VFD FR-F840 фірми Mitsubishi Electric [7] та електромашинний підсилювач ЭМУ-12А з приводним асинхронним двигуном потужністю споживання 1,68 кВт.

Стенд обладнано багатфункціональним вимірювальним пристроєм Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS фірми Mitsubishi Electric [8], завдяки якому отримуються значення діючих та миттєвих напруг, струмів; значення активної, реактивної та повної потужностей; значення коефіцієнту потужності, а також показники якості електромережі (THD_U та THD_I).

Результати моделювання. Проведені експерименти дозволили отримати кількісні показники якості електроенергії та оцінити енергоефективність роботи електропривода у цілому. Графік залежності коефіцієнта потужності від зміни навантаження (рис. 4) демонструє, що середнє значення коефіцієнта потужності електромережі коливається від 0,78 до 0,95 та має тенденцію до зменшення при зростанні навантаження. Середнє значення коефіцієнта потужності становить 0,83. Також можна зауважити, що коефіцієнт потужності електромережі при номінальному навантаженні не суттєво залежить від зміни частоти перетворювача при законі управління $U/f = \text{const}$. В ході експериментів були отримані сумарні коефіцієнти спотворення напруги з боку електромережі та сумарні коефіцієнти спотворення струму – з боку асинхронного електропривода (на виході ПЧ), на всьому діапазоні навантаження, включно з режимом перевантаження (125%).

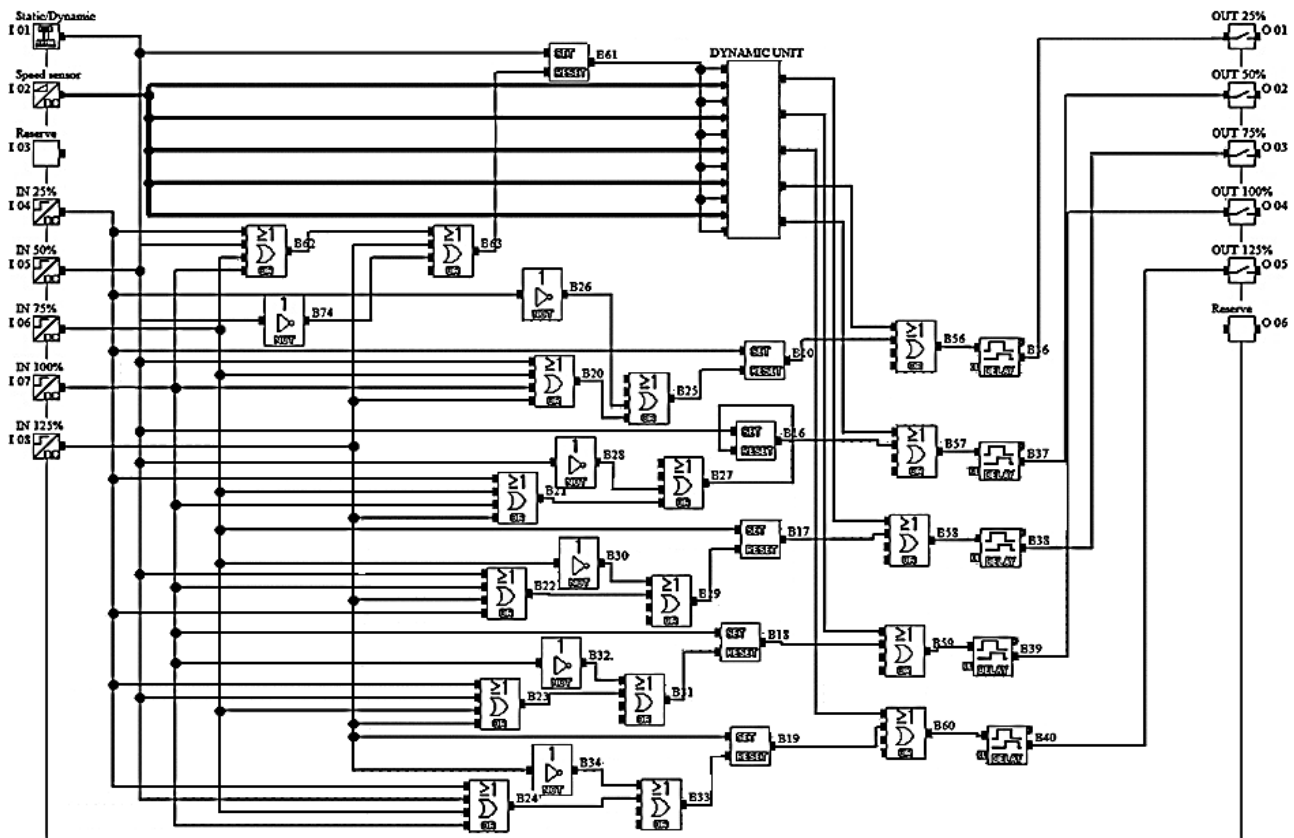


Рис. 3. Програми керування навантаженням на мові функціональних блок-діаграм (FBD)

Сумарний коефіцієнт спотворень напруги THD_U (рис. 5) відповідає вимогам морських Класифікаційних Товариств до якості суднової електромережі [9] та має значення менш 5%.

Чисельні значення THD_U лежать у межах з 3,97% до 3,77%. Середнє значення THD_U є 3,83%. Сумарний коефіцієнт спотворень струму THD_I (рис. 6) коливається в межах від 2,66% до 4,33%, що свідчить про синусоїдність живлючого струму АД. Середнє значення THD_I є 3,36%. Отримані графічні залежності показують, що THD_U зменшується при зміні навантаження на 5%, а THD_I – на 15%. На протязі експериментів була зафіксована фазна несиметрія за напругою, яка становить 3÷4%.

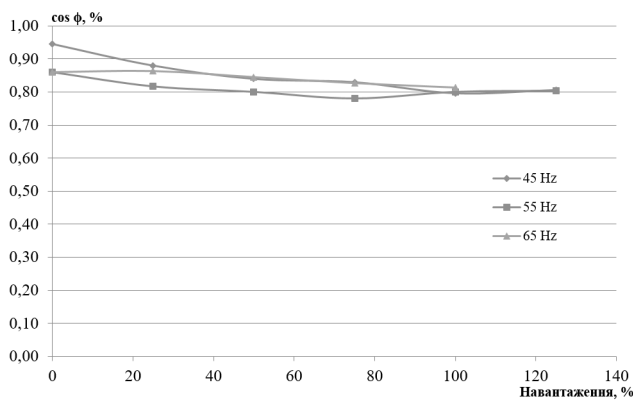


Рис. 4. Графік залежності коефіцієнта потужності від навантаження

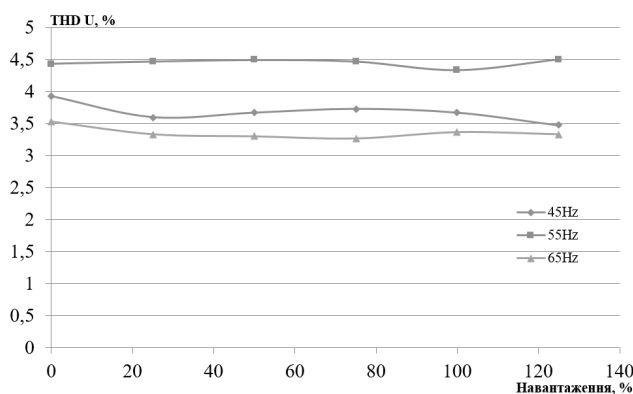


Рис. 5. Графік залежності THD_U від навантаження

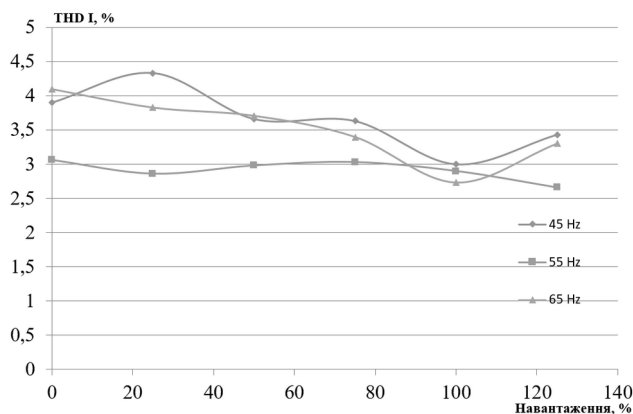


Рис. 6. Графік залежності THD_I від навантаження

Використання багатофункціонального пристрою Electronic Multi-Measuring Instrument ME96SS дозволило отримати кількісні показники гармонійного складу напруги (табл. 1).

Рівень 3-ої гармоніки напруги складає більше 3%, що свідчить про наявність у електромережі люмінесцентних ламп освітлення.

Таблиця 1. Кількісні показники гармонійного складу напруги

Гармоніка напруги / навантаження, %	25%	50%	75%	100%	125%
3-я гармоніка	3,23	3,33	3,4	3,3	3,13
5-а гармоніка	0,9	0,9	0,93	0,83	0,7
7-а гармоніка	0,4	0,5	0,7	0,63	0,66
11-а гармоніка	0,133	0,16	0,2	0,26	0,36
13- гармоніка	0,43	0,4	0,4	0,33	0,3

Висновки. Проведені експериментальні дослідження довели, що електромеханічний стенд з пристроєм керування навантаженням частотно-регульованого електропривода на базі ПЛК ALPNA2 може використовуватися для дослідження якості електромережі та енергоефективності роботи електроприводу. Типовий характер навантаження електроприводів забезпечується перепрограмування ПЛК. Отримані результати дозволяють провести детальний аналіз якості електромережі та дати оцінку енергоефективності роботи електроприводу.

Список літератури

1. Дранкова А.О., Муха М.Й., Міхайков С.С., Красовський І.І. Підвищення якості електроенергії шляхом використання пасивної фільтрації в електромеханічних системах з нелінійним навантаженням. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса: Астропрінт. 2018, №27 (103). С.118 – 124.
2. Петрушин В.С., Еноктаєв Р.Н., Шестаков О.И., Прокопенко Н.С. Учет потерь от высших гармонических в регулируемых асинхронных двигателях. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Сер.: Електричні машини та електромеханічне перетворювання енергії. Харків: НТУ «ХПІ», 2001, №1 (1223). С. 101 – 105.
3. Drankova A, Mukha M., Mikhaykov S., Krasovskiy I. Electro-mechanical laboratory complex for power quality studies of the ship electrical system. *Proceedings of the 20th International conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv-Slavske: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18 September, 2019. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
4. Муха Н., Дранкова А. Полномасштабный тренажерный комплекс судовой автоматизированной электроэнергетической системы для подготовки судовых электромехаников и механиков. *Modern problems of power engineering and ways of solving them: Materials of the 1th International scientific and technological conference 07-11 October 2019*. Tbilisi: Georgian Academy of Power Engineering, 2019, Part I. №3 (91). pp. 42 – 47.
5. Руководство по программному обеспечению: простые прикладные контроллеры α2 Mitsubishi Electric. URL: https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/mymitsubishi/download_manager?id=1673. (дата обращения 15.12.2019).
6. Руководство по программному обеспечению: простые прикладные контроллеры α2 Mitsubishi Electric. URL: <http://www.sovras.com/images/File/prman2.pdf>. (дата обращения 15.12.2019).
7. Семейство FR. Преобразователи частоты Mitsubishi Electric: каталог. URL: https://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/FR-Family_spec_rus.pdf. (дата обращения 15.12.2019).

8. *Electronic multi-measuring instrument model ME96SSRA-MB: user's manual*. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/pmd/ym-i-ib63c45/ib63c45a.pdf>. (дата обращения 15.12.2019).
 9. Prousalidis J., Styvaktakis E., Hatzilau I.K., Kanellos F., Perros S. Sofras E. Electric power supply quality in ship systems: an overview. *International Journal of Ocean Systems Management*. 2008, Vol. 1, №1. pp.68 – 83.
- References (transliterated)**
1. Drankova A.O., Mukha M.I., Mikhaikov S.S., Krasovskiy I.I. *Pidvyshchennia yakosti elektroenerhii shliakhom vykorystannia pasyvoi filtryatsii v elektromekhanichnykh systemakh z neliniinym navantazhennia* [Methods to improve the quality of electrical supply of ship system with nonlinear load]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy* [Electrotechnic and computer systems]. Odesa: Astroprint. 2018, №27 (103). pp. 118 – 124.
 2. Petrushin V.S., Enoktaev R.N., SHehtakov O.I., Prokopenko N.S. Uchet poter' ot vysshih garmonicheskikh v reguliruemymy asinhronnyh dvigatelyah [Allowance for loss of the higher harmonic in the controlled induction motors]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*. Ser.: *Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvoriuvannia enerhii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, №1(1223). pp. 101 – 105.
 3. Drankova A., Mukha M., Mikhaikov S., Krasovskiy I. Electromechanical laboratory complex for power quality studies of the ship electrical system. *Proceedings of the 20th International conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*. Lviv-Slavske: Lviv Polytechnic National University, Ukraine, 15-18 September, 2019. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949147.
 4. Muha N., Drankova A. Polnomasshtabnyy trenazhernyy kompleks sudovoy avtomatizirovannoy elektroenergeticheskoy sistemy dlya podgotovki sudovyh elektromekhanikov i mekhanikov [A full-scale simulator complex for a ship automated electric power system for training ship electricians and mechanics]. *Modern problems of power engineering and ways of solving them: Materials of the 1th International scientific and technological conference 07-11 October 2019 r.* Tbilisi: Georgian Academy of Power Engineering, 2019, Part I. №3 (91). pp. 42 – 47.
 5. *Rukovodstvo po apparatnoj chasti: prostye prikladnye kontrollery α2 Mitsubishi Electric* [Hardware manual: α2 simple application controller Mitsubishi Electric]. URL: https://ru3a.mitsubishielectric.com/fa/ru/mymitsubishi/download_manager?id=1673. (accessed 15.12.2019).
 6. *Rukovodstvo po programnomu obespecheniyu: prostye prikladnye kontrollery α2 Mitsubishi Electric* [Software manual: α2 Simple Application Controllers]. URL: <http://www.sovras.com/images/File/prman2.pdf>. (accessed 15.12.2019).
 7. *Semejstvo FR. Preobrazovateli chastoty Mitsubishi Electric: katalog* [Family FR. Mitsubishi Electric frequency converters: catalogue]. URL: https://www.plcsystems.ru/catalog/Mitsubishi/doc/FR-Family_spec_rus.pdf. (accessed 15.12.2019).
 8. *Electronic multi-measuring instrument model ME96SSRA-MB: user's manual*. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/pmd/ym-i-ib63c45/ib63c45a.pdf>. (accessed 15.12.2019).
 9. Prousalidis J., Styvaktakis E., Hatzilau I.K., Kanellos F., Perros S. Sofras E. *Electric power supply quality in ship systems: an overview*. *International Journal of Ocean Systems Management*. 2008. Vol. 1, №1. pp.68 – 83.

Поступила 09.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Міхайков Сергій Сергійович (Михайков Сергей Сергеевич, Mikhaikov Sergiy) – магістр електромеханіки, компанія «Stolt Tankers LTD», судновий електромеханік; м. Одеса, Україна; e-mail: pilot.vodolaz@gmail.com