УДК 621.311: 621.314.2

МОЖЛИВОСТІ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЧРП НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПІДПРИЄМСТВ ТА ВАРТОСТІ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

КАЧАН Ю.Г. д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kachan@zntu.edu.ua;

ШРАМ О.А. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: alexshrum@yahoo.com;

СВЕРГУН А.В. аспірант кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: temas2517@gmail.com;

Мета роботи. *Імітаційне моделювання внутрішньоцехових систем електропостачання й порівняльна оцінка на його основі коефіцієнтів спотворення синусоїдальної кривої напруги.*

Методи дослідження. *Методи імітаційного моделювання внутрішньоцехових систем електропостачання. Чисельні методи обробки отриманих результатів. Методи обчислення дискретного перетворення Фур'є.*

Отримані результати. *Для підвищення рівня автоматизації технологічних процесів в промислових електроустановках знаходять широке застосування перетворювачі частоти. Разом з усіма перевагами використання частотно-регульованого привода призводить до спотворення синусоїдальної форми графіка напруги. В статті проведено оцінку коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги для двох варіантів побудови внутрішньоцехової мережі промислового підприємства. Запропоноване рішення дозволяє покращити форму кривої напруги приводу за рахунок зменшення кількості нелінійних напівпровідникових елементів в системі електропостачання та знизити вплив вищих гармонічних складових на електромережу. Одночасно це дає можливість здешевити використання ЧРП на підприємстві.*

Наукова новизна. *Шляхом експериментального дослідження встановлено, що використання загального випрямляча у поєднанні з загальною шиною постійного струму та індивідуальних інверторів дозволяє знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги.*

Практична цінність. *Розроблені імітаційні моделі роботи цехової мережі дозволяють досліджувати показники якості електричної енергії як в стаціонарних, так і в перехідних режимах роботи.*

Ключові слова: частотно-регульований привод; якість електричної енергії; коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги; внутрішньоцехова мережа; вартість використання ЧРП.

I. ВСТУП

Частотно-регульований привод (ЧРП) широко застосовується на промислових підприємствах для підвищення енергоефективності, надійності та забезпечення оптимальних режимів роботи електротехнічних комплексів та систем [1] – [3]. Використання ЧРП дозволяє підвищити точність та розширити діапазон регулювання, знизити споживання електричної енергії, забезпечити плавний пуск двигунів, збільшити термін служби механічної частини привода тощо [1] – [11].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Але разом з цим необхідно зазначити, що застосування ЧРП негативно впливає на ряд показників якості електричної енергії. В ряді робіт автори відмічають, що наявність великої кількості напівпровідникових елементів в електричній мережі призводить до збільшення рівня вищих гармонічних складових струмів та напруг. Так, в промислових мережах з великою кількістю перетворювачів рівень вищих гармонічних складових може сягати 20 – 25% [4]. Причому топологія електромережі, тип перетворювачів та параметри їх системи керування впливають на рівень та склад гармонік [1], [2], [3].

Збільшення коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги викликає додаткові втрати енергії в елементах мережі та обмотках електричних машин [12] – [16]. Також наявність вищих гармонічних складових призводить до зростання діелектричних втрат в ізоляції та скорочення терміну експлуатації електрообладнання.

Таким чином пошуки можливостей щодо зменшення впливу частотно-регульованого привода на якість електроенергії в електромережах промислових підприємств є важливою та актуальною

© Качан Ю.Г., Шрам О.А., Свергун А.В., 2022
DOI 10.15588/1607-6761-2022-3-3

задачею.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є імітаційне моделювання різних варіантів побудови внутрішньоцехових систем електропостачання й порівняльна оцінка на його основі коефіцієнтів спотворення синусоїдальної кривої напруги у кожному конкретному випадку використання частотно-регульованого електропривода.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження впливу ЧРП на якість електричної енергії доцільно реалізовувати в сучасних математичних програмних пакетах. При цьому значно скорочуються витрати на проведення безпосереднього чисельного експерименту, оскільки параметри моделі уточнюються ще в ході комп'ютерного моделювання [4]. Оцінку коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги зручно проводити за допомогою швидкого алгоритму обчислення дискретного перетворення Фур'є (FFT Analisys).

Дискретне перетворення Фур'є базується на математичному принципі розкладання сигналу на синусоїдні та несинусоїдні складові з різними частотами у вигляді нескінченної суми. Функція отримана таким чином називається перетворенням Фур'є. Для обчислення результату перетворення застосовують спектральний метод та алгоритми швидкого перетворення Фур'є:

$$U_{\Pi} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)K(\omega)e^{j\omega\tau}d\tau;$$

де S(ω) - спектр сигналу,

K(ω) - передатна функція ланцюга, що інтегрується.

Для порівняння та оцінки коефіцієнта спотворення синусоїдальної кривої напруги у внутрішньоцеховій мережі із споживачами, що використовують частотно-регульований привод була розроблена імітаційна модель. Вона складається з джерела змінного трифазного струму, знижувального трансформатора, електроспоживачів з індивідуальними частотно-регульованими приводами до складу яких входять некеровані діодні мости, ланка постійного струму, генератори ШІМ-імпульсів, та інвертори (рис. 1). Трифазний змінний струм випрямляється за допомогою діодного моста. У ланці постійного струму пульсації напруги компенсуються за допомогою LC-контуру. Випрямлений та скомпенсований струм подається на інвертор, де за допомогою керуючих ШІМ-імпульсів перетворюється на змінний заданої частоти і передається на асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором.

.

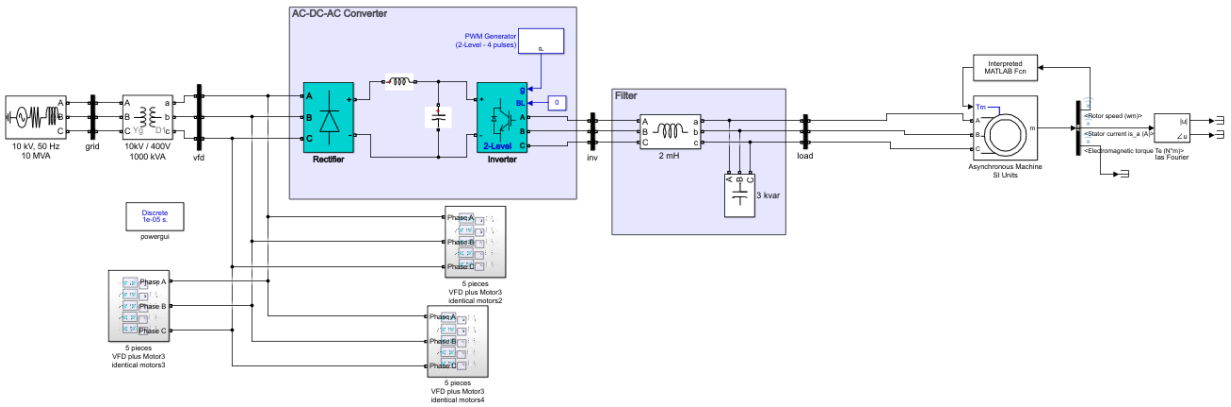

Рисунок 1. Імітаційна модель фрагмента системи електропостачання з індивідуальними ЧРП

В результаті проведених розрахунків отримані осцилограми струмів і напруг до яких в подальшому був застосований алгоритм швидкого перетворення Фур'є (рис. 2, рис. 3). Отримані під час моделювання результати показали, що при використанні індивідуальних частотно-регульованих приводів коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги K_U (THD) складає 2.30 %. В спектральному складі переважають 5-та, 7-ма, 11-та та 13-та гармоніки, що характерно для 6-ти пульсного випрямляча.

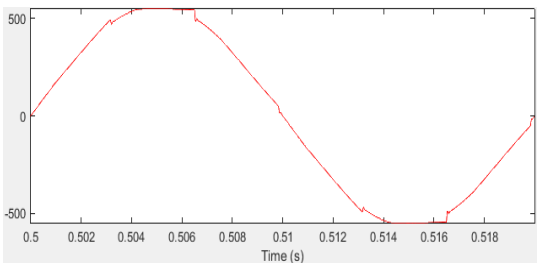

Рисунок 2. Форма кривої напруги для моделі з індивідуальними ЧРП.

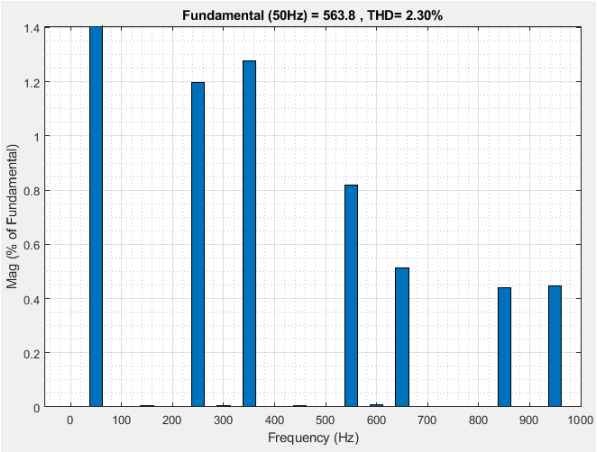

Рисунок 3. Спектральний аналіз складових напруги для моделі з індивідуальними ЧРП.

Розглянемо другий варіант системи електропостачання, в якому замість індивідуальних ЧРП застосовується загальний випрямляч, лінія постійного струму та індивідуальні інвертори для кожного споживача електричної енергії. Такий підхід до формування внутрішньоцехової мережі електропостачання дозволяє знизити кількість напівпровідникових елементів і, відповідно, покращити електромагнітну сумісність. Імітаційна модель такого варіанта системи електропостачання показана на (рис. 4.)

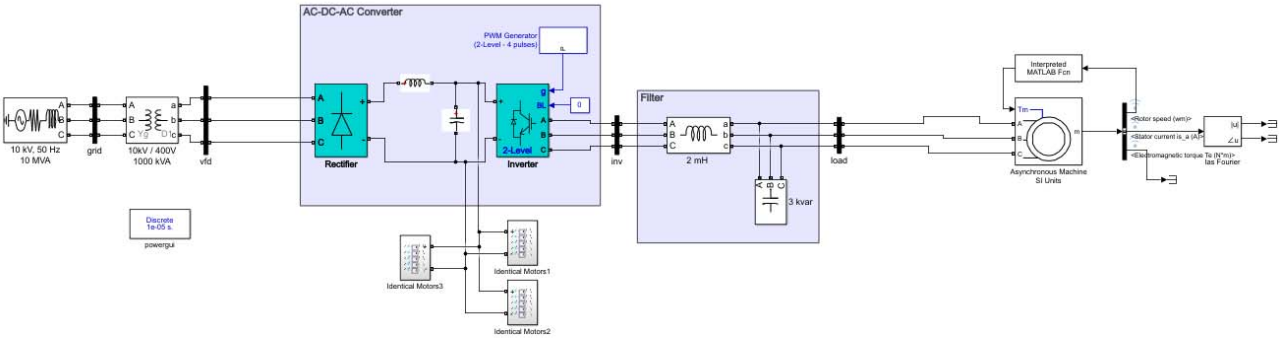

Рисунок 4. Імітаційна модель фрагмента системи електропостачання із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами

Результати розрахунків щодо такої системи представлені на рисунках 5 - 6. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги KU (THD) у цьому випадку склав 1.77 %. Таким чином, зменшення кількості напівпровідникових елементів в системі електропостачання дозволило знизити коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги на 23 %. В спектральному складі майже відсутні вищі гармонічні складові окрім 5-ї та 7-ї.

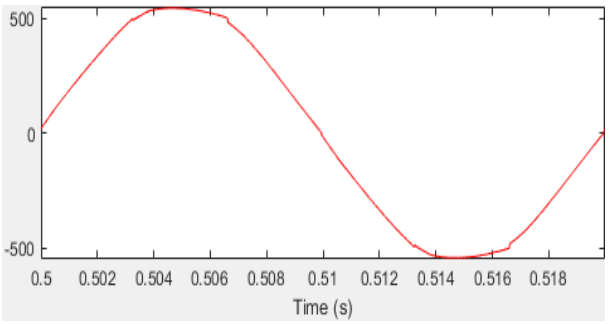

Рисунок 5. Форма кривої напруги для моделі із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами

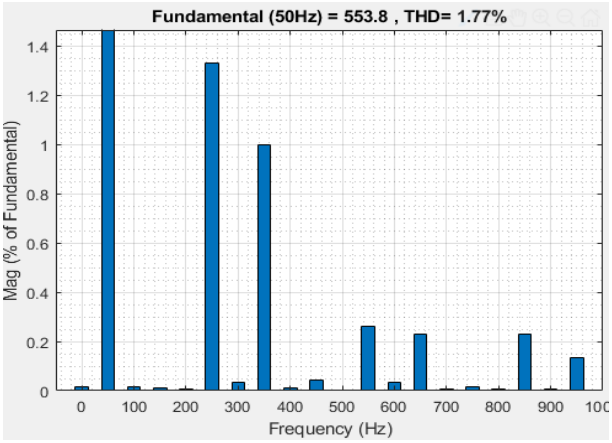

Рисунок 6. Спектральний аналіз складових напруги для моделі із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами.

Для оцінки впливу кількості приймачів ЕЕ з ЧРП на коефіцієнт несинусоїдальності напруги було змодельовано режими роботи з різною кількістю двигунів з частотним керуванням. В результаті розрахунків встановлено, що при збільшенні кількості приймачів ЕЕ з ЧРП, для яких може бути

застосований загальний випрямляч з лінією постійного струму, технічний ефект від запропонованого підходу зростає. Так, для 6-ти приймачів коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги KU (THD) зменшився на 40,68%, для 16-ти приймачів - на 49,13%, для 26-ти приймачів - на 49,26% (рис. 7)

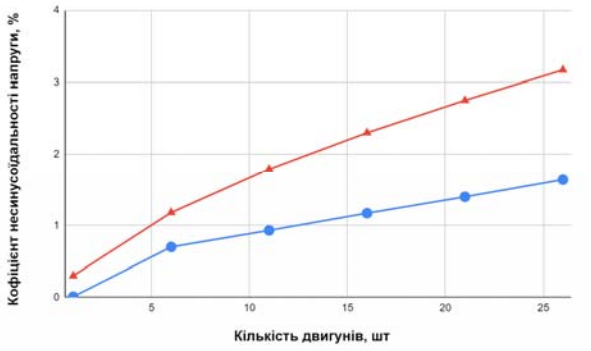

Рисунок 7. Залежність коефіцієнта несинусоїдальност і напруги від кількості двигунів в системі електропостачання цеху з ПЧ(Δ) та в системі електропостачання цеху із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами (о)

Проведемо оцінку економічного ефекту від використання запропонованого підходу щодо формування внутрішньоцехової електромережі із загальним випрямлячем та індивідуальними інверторами. Орієнтовна вартість, на теперішній час, пристроїв для споживачів із ЧРП та індивідуальними інверторами наведено у таблиці 1.

Незважаючи на значно меншу кількість напівпровідникових елементів в одному випрямлячі та інверторах, вартість їх у порівнянні з перетворювачами частоти не є суттєвою. Але це викликано ціновою політикою, яка залежить від попиту на ті чи інші товари. Очевидно, що у разі розповсюдження мереж із загальним випрямлячем вона зменшиться на користь перших.

Економічний ефект від заміни індивідуальних ЧРП загальним випрямлячем з індивідуальними інверторами складе

$$E = \frac{K_1 - K_2}{K_1} \cdot 100\% = \frac{416000 - 374400}{416000} \cdot 100\% = 10\%$$

Тут не врахована вартість лінії постійного струму між випрямлячем і інверторами, протяжність якої залежить від розосередженості електродвигунів по території цеху. Тож виходить, що зазначений економічний ефект є таким, до якого можна лише наблизитися. Але у будь-якому випадку побудова мережі у запропонованому вигляді, навіть тепер, не буде збитковою. А в майбутньому, без сумніву, економічно вигідною.

Таблиця 1. Орієнтовна вартість перетворювачів частоти, випрямляча та інверторів

Тип пристрою	Кількість, шт.	Вартість одиниці, грн	Капітальні вкладення, грн	
Перетворювач частоти	26	16 000	416 000	416 000
Випрямляч	1	124 800	124 800	374 400
Інвертор	26	9 600	249 600	

V. ВИСНОВКИ

1.Розроблені імітаційні моделі роботи цехової мережі дозволяють досліджувати показники якості електричної енергії як в стаціонарних, так і в перехідних режимах роботи.

2. Використання загального некерованого випрямляча у поєднанні з загальною шиною постійного струму та індивідуальними інверторами позитивно впливає на якість електричної енергії в цеховій мережі. При цьому коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги K_U (THD) зменшується на 23%.

3. Економічний ефект від використання запропонованого підходу щодо формування внутрішньоцехових електромереж залежить від ступеню розосередженості двигунів і у найкращому випадку може наближатися до 10%. Очевидно, що при поширенні таких мереж економічний ефект буде значно більшим.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Егоров А.Б., Харитонов Я.М., Шевчук В.А., (2020).Влияние высших гармоник на работу преобразователя частоты в условиях подземного рудника. 331 141-151. DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2683

[2] Исаева Т.М. (2016) О результатах исследования высших гармоник на высоковольтной подстанции Главный энергетик., 11, 32–35.

[3] Качан Ю.Г., Шрам О.А., (2022) Щодо доцільних обсягів якісної енергії в електромережах

підприємств. Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки), 1. 121–131. DOI:10.31319/2519-2884.40.2022.15.

[4] Авербух М.А. (2014) Анализ электродинамических процессов и электромагнитной совместимости частотного электропривода в пакете MATLAB 7.12 Известия вищих учебных заведений. Электромеханика, 4. 57–62.

[5] He, Zhiwei & Zhou, Guangyan & Gao, Mingyu. (2013). An Improved Variable-Frequency Drive Based on Current Tracking. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 11. 10.11591/telkomnika.v11i11.3508.

[6] Иванова В.Р. (2019) Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электромеханических комплексах. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики Т. 21, 5. – С. 59–70. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70

[7] Абрамов Б.И., Коган А.И., Бреслав Б.М. и др. (2009) Частотно-регулируемый электропривод буровых установок БУ-4200/250. Электротехника. М.: Издательство. Фирма Знак №1, 8- 13.

[8] Бабакин В.И (2014) Энергосберегающий частотно-регулируемый электропривод кустовой насосной станции. Электротехника: сетевой электронный научный журнал – Т. 1, 2 21–25 .

[9] Глоба М.Д. (2016) Разработка программного комплекса для дистанционного управления частотным электроприводом. Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальних проблем XXI века 4, 204-206.

[10] Иванова В.Р. (2019) Исследование работоспособности асинхронных электродвигателей совместно с преобразователем частоты. Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» 283-286.

[11] Sharygin G.S., Sharygina L.I. (2015) Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century. ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. pp. 1–4. DOI:10.1109/HISTELCON.2015.7307319

[12] Пугачева Э.Е., Степанов В.М., Иванов А.С., Нусратов П.Р., Букарев А.А (2018) Усовершенствованный электропривод шахтных установок с возможностью рекуперации электроенергии. Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 6, 412-418.

[13] Фашиленко В.Н., Решетняк С.Н. (2016) Энергоэффективный резонансный режим электромеханических систем органов резания горных машин на базе современных структур управления. Горное оборудование и электромеханика, 4 (122) 41–45.

[14] Харитонов Я. С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н. (2019) Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 4, 54-59.

[15] Abramov B.I. (2016) Instrumental research of electric power quality in oil fields in conditions of wide application of frequency – controlled drives // Oil industry, vol.1, pp. 90-92.

[16] Плехов А.С., Титов Д.Ю., Шевырев Ю.В., Шевырева Н.Ю. (2018) Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством выпрямителя напряжения. Интеллектуальная электротехника, 1, 101-111. DOI 10.46960/2658-6754_2018_1_101.

[17] Luchinin V., Afanasjev A., Ilyin V., Korlyakov A., Petrov A. (2017) Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty. 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). St. Petersburg, Russia, pp. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089

[18] Костыгов А.М., Кичкин А.В., Артемов С.А. (2015) Автоматизированная система удаленного энергомониторинга подвижных объектов с электроприводом. Электротехника, 11, 48-50.

Стаття надійшла до редакції 01.10.2022

POSSIBILITIES TO REDUCE THE IMPACT OF VFD ON THE QUALITY OF ELECTRIC POWER IN THE NETWORKS OF ENTERPRISES AND THE COST OF ITS USE

KACHAN YU.G. Sci.D, Professor, Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kachan@zntu.edu.ua;

SHRAM O.A. Ph.D, Associate Professor, Head of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine,

e-mail: alexshrum@yahoo.com;

SVERHUN A.V. Graduate student of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: temas2517@gmail.com

Purpose. *Simulation modeling of internal power supply systems and comparative assessment on its basis of the total distortion coefficients of the sinusoidal voltage curve.*

Methodology. *Methods of simulating modeling of internal power supply systems. Numerous methods for processing the obtained results. Methods for calculating the discrete Fourier transform.*

Findings. *To increase the level of automation of technological processes in industrial electrical installations, frequency converters are widely used. Together with all the advantages of using a variable frequency drive, it leads to a distortion of the sinusoidal shape of the voltage graph. The article evaluates the total distortion factor of the sinusoidal voltage curve for two options for constructing an internal network of an industrial enterprise. The proposed solution makes it possible to improve the shape of the voltage curve by reducing the number of non-linear semiconductor elements in the power supply system and reduce the influence of higher harmonic components on the power grid. At the same time, this makes it possible to reduce the cost of using VFD at the enterprise.*

Originality. *Through experimental research, it has been established that the use of a common rectifier in combination with a common DC bus and individual inverters can reduce the total distortion coefficient of the sinusoidal voltage curve.*

Practical value. *The developed simulation models of the workshop network's operation make it possible to study the indicators of the electric energy quality both in stationary and in transient modes of operation.*

Keywords: variable frequency drive; quality of electrical energy; the total distortion factor of the sinusoidal voltage curve; internal power supply systems; cost of using VFD.

REFERENCES

[1] Egorov A.B., Haritonov Ja. M., Shevchuk V. A., Semenov A.Ju., (2020).Vlijanie vysshih garmonik na rabotu preobrazovatelja chastoty v uslovijah podzemnogo rudnika [The influence of higher harmonics on the operation of a frequency converter in an underground mine.]. 331 141-151 (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2020/6/2683

[2] Isaeva T.M. (2016) O rezul'tatah issledovanija vysshih garmonik na vysokovol'tnoj podstancii [On the results of the study of higher harmonics at a high-voltage substation] Glavnyj jenergetik., 11, 32–35

[3] Kachan Ju. G., Shram O. A (2022). Shhodo docil'nyh obsjagiv jakisnoi' energii' v elektromerezhah pidpr-yjemstv [Concerning expedient volumes of qualitative energy in electric networks of the enterprises]. Zbirnyk naukovyh prac' Dniprovs'kogo derzhavno-go tehnichnogo universytetu (tehnichni nauky), 1. 121–131 (in Ukrainian). DOI:10.31319/2519-2884.40.2022.15.

[4] Averbuh M. A. (2014) Analiz jelektrodinamicheskih processov i jelektromagnitnoj sovmestimosti chastotnogo jelektroprivoda v pakete MATLAB 7.12 [Analysis of electrodynamic processes and electromagnetic compatibility of a frequency electric drive in the MATLAB 7.12 package]. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jelektromehanika, 4. 57–62 (in Russian).

[5] He, Zhiwei & Zhou, Guangyan & Gao, Mingyu. (2013). An Improved Variable-Frequency Drive Based on Current Tracking. TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 11. 10.11591/telkomnika.v11i11.3508.

[6] Ivanova V. R. (2019) Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod dlja jenergosberezhenija i optimizacii tehnologicheskih processov v jelektrotehnicheskih kompleksah [Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes]. Power engineering: research, equipment, technology, T.21, 5. 59–70. (in Russian) https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70

[7] Abramov B.I, Kogan A.I., Breslav B.M, i dr. (2009) Chastotno-reguliruemyj jelektroprivod burovyh ustanovok BU-4200/250 [Frequency-controlled electric drive of drilling rigs BU-4200/250]. Jelektrotehnika. M.: Izdatel'stvo. Firma Znak.. №1, 8-13 (in Russian)

[8] Babakin V. I. (2014) Jenergosberegajushhij chastotno-reguliruemyj jelektroprivod kustovoj nasosnoj stancii [Energy-saving frequency-controlled electric drive of a cluster pumping station]. Jelektrotehnika: setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal – T. 1, 2 21–25 (in Russian).

[9] Globa M.D. (2016) Razrabotka programmnogo kom-pleksa dlja distancionnogo upravlenija chastotnym jelektroprivodom [Development of a software pack-age for remote control of a frequency electric drive]. Nauchno-obrazovatel'nyj potencial molodezhi v reshenii aktual'nyh problem XXI veka, 4, 204-206.(in Russian)

[10] Ivanova V.R. (2019) Issledovanie rabotosposobnosti asinhronnyh jelektrodvigatelej sovmestno s preobrazovatelem chastity [Study of the performance of asynchronous electric motors together with a frequency converter]. Materialy 1 Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Problemy i perspektivy razvitija jelektrojenergetiki i jelektrotehniki» 283-286. (in Russian)

[11] Sharygin G.S., Sharygina L.I. Siberian electronics and cultural progress in the east Russia during the last century. (2015) ICOHTEC/IEEE International

History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON). Tel-Aviv, Israel, 18–19 August, 2015. pp. 1–4. DOI:10.1109/HISTELCON.2015.7307319

[12] Pugachèva Je.E., Stepanov V.M., Ivanov A.S., Nusratov P.R., Bukarev A.A. (2018) Usovershenstvo-vannyj jelektroprivod shahtnyh ustanovok s vozmozhnost'ju rekuperacii jelektrojenergii [Im-proved electric drive of mine installations with the possibility of energy recovery]. Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 6 412-418 (in Russian).

[13] Fashhilenko V.N., Reshetnjak S.N. (2016) Jenergojeffektivnyj rezonansnyj rezhim jelektromehanicheskih sistem organov rezanija gornyh mashin na baze sovremennyh struktur upravlenija [Energy Efficient Resonance Mode of Electromechanical Systems of Mining Machine Cutting Organs Based on Modern Control Structures]. Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. 4 (122) 41–45 (in Russian).

[14] Haritonov Ja.S., Bebihov Ju.V., Egorov A.N. (2019) Sopostavlenie i analiz rezul'tatov kontrolja kachestva jelektrojenergii v sistemah jelektrosnabzhenija gornyh predprijatij [Comparison and analysis of the results of power quality control in power supply systems of mining enterprises]. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij, 4. 54-59.(in Russian)

[15] B.I. Abramov. Instrumental research of electric power quality in oil fields in conditions of wide application of frequency – controlled drives // Oil industry, vol.1, pp. 90-92, 2016.

[16] A. S. Plehov, D. Ju. Titov, Ju. V. Shevyrev, N. Ju. Shevyreva (2018) Upravlenie kachestvom jelektrojenergii slabyh setej posredstvom aktivnogo vyprjamitelja naprjazhenija [Power quality control of weak grids with Active Front End]. Intelektual'naja jelektrotehnika, 1, 101-111 (in Russian) DOI 10.46960/2658-6754_2018_1_101.

[17] Luchinin V., Afanasjev A., Ilyin V., Korlyakov A., Petrov A. Family of micro switches based on silicon carbide for extreme conditions and duty. (2017) 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo). St. Petersburg, Russia, pp. 97–99. DOI: 10.1109/EMCCompo.2017.7998089

[18] Kostygov A.M., Kychkin A.V., Artemov S.A. (2015) Avtomatizirovannaja sistema udalennogo jenergo-monitoringa podvizhnyh objektov s jelektro-privodom [Automated system for remote energy monitoring of moving objects with an electric drive]. Jelektrotehnika, 11 48-50. (in Russian).