

Д. А. Гапон¹, П. О. Качанов¹, А. В. Ольшевський¹, Є. Б. Петрик²

¹ Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

² Triol Corporation, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВНОГО ГАРМОНІЙНОГО СПОТВОРЕННЯ СТАНЦІЇ УПРАВЛІННЯ З ВХІДНИМ ФАЗОЗСУВНИМ АВТОТРАНСФОРМАТОРОМ

Анотація. При розробці корисних копалин на території України, таких як нафта, застосовуються механізовані методи видобутку, із застосуванням занурювальних електродвигунів. Такі методи видобутку забезпечують високу продуктивність і можливість підлаштовуватися під поточні параметри свердловини, що в свою чергу забезпечує максимальний дебіт. Для забезпечення оптимального режиму роботи насоса використовуються станції управління занурювальним електродвигуном з частотним регулюванням, які при роботі споживають з мережі живлення несинусоїдальний струм. Також для зниження спотворень споживаного струму застосовуються різні методи зниження загального гармонійного спотворення (THDi) вхідних струмів. Для вирішення даної задачі була розроблена станція управління з багатопульсним випрямлячем, який живиться від фазозсувного автотрансформатора, що дозволяє знизити THDi вхідних струмів. Дане рішення дозволяє покращити габаритні показники обладнання та його вартість за рахунок зменшення потужності фазозсувного трансформатора. Розглянуто функціональні можливості роботи станції управління електроприводом на основі експериментальних даних вимірювання THDi вхідних струмів мережі +30% в діапазоні частот 47,5-52,5 Гц. Такий діапазон частот обумовлений тим, що у багатьох випадках, на родовищах, робота ведеться з електроживленням від дизель-генераторів, при якому коливання частоти і напруги живлення знаходяться в значному діапазоні. Додатково досліджено можливість роботи приводу при вхідних напругах живлення 460-480В та 430-460В. Проведено аналіз результатів вимірів, та запропоновано рекомендації щодо підвищення енергоефективності станції.

Ключові слова: перетворювач частоти, станція управління, енергоефективність, THDi, багатопульсний випрямляч, фазозсувний трансформатор

Вступ

На промислових підприємствах, зокрема в нафтовидобувній галузі, все ширше використовуються сучасні електромеханічні системи з напівпровідниковими перетворювачами (НП), які є основою для реалізації економічних технологій з більш широкими функціональними можливостями. Водночас НП негативно впливають на показники якості електроенергії в системі електропостачання, в якій вони працюють [1]. В системі виникають спотворення синусоїдальної форми струму, відбувається генерація вищих гармонік. У свою чергу це викликає спотворення синусоїдальної форми напруги мережі живлення і може призвести до таких негативних наслідків, як збої в роботі електронних пристроїв, похибки в роботі вимірювальних приладів, неприпустиме нагрівання обладнання, передчасне старіння ізоляції [2].

Проблемам електромагнітної сумісності електромеханічних пристроїв на основі ПП присвячено багато теоретичних та експериментальних досліджень. У роботах [3] наведено результати експериментального дослідження ступеня спотворення синусоїдальності струму, що споживається з промислової мережі електроприводами з перетворювачами частоти (ПЧ) [4], побудованими на основі інверторів.

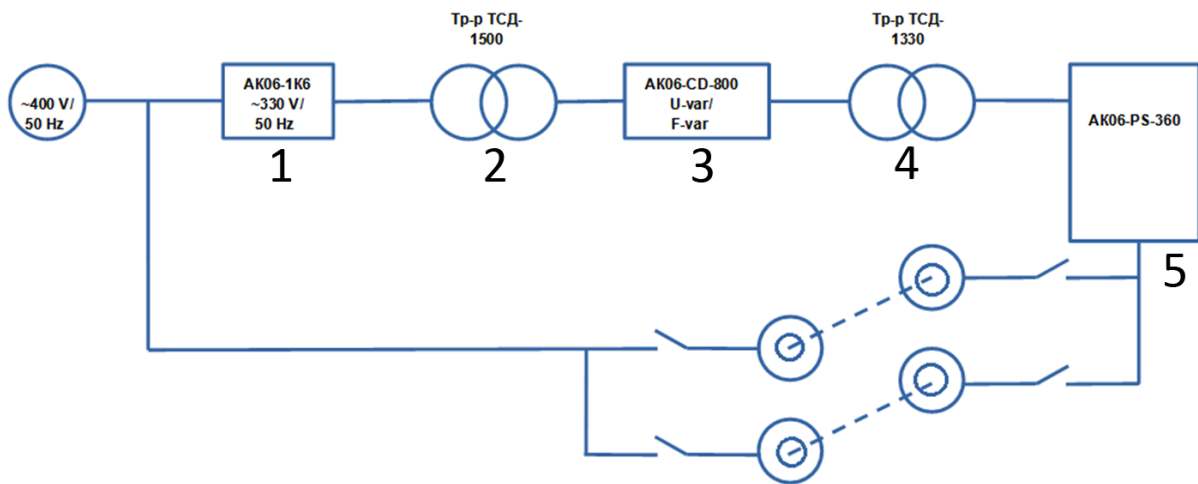
Експериментальні дослідження дозволили встановити функціональну залежність коефіцієнта несинусоїдальних спотворень мережевого струму вищими гармоніками (THDi – Total harmonic distortion) від навантаження перетворювача частоти у вигляді степеневої функції. У роботі [5] встановлено, що для найбільш значущих п'ятої та сьомої гармонік мереже-

вого струму їх функціональну залежність від навантаження ПЧ зручно записувати у вигляді експоненціальної регресії. Також показано, що 11-та і вищі гармоніки практично не залежать від навантаження ПЧ. У роботі [6] доведено принципову можливість проведення подібних досліджень на спрощених фізичних або математичних моделях, наприклад, MATLAB Simulink. У цих моделях відпадає необхідність у представленні вихідної частини ПЧ – автономного інвертора. Проведені дослідження на фізичних і математичних моделях частотного приводу підтверджують, що величина споживаного частотним приводом струму і ступінь спотворення його синусоїдальності визначається зміною напруги на конденсаторах ланки постійного струму, яке викликане зростанням або зниженням навантаження електроприводу [7]. У роботі [8] показано, що за допомогою комп'ютерного моделювання можна визначити джерело вищих гармонік у складних випадках, до яких відносяться ПЧ.

Мета даної статті експериментально встановити для станції AK06-PS функціональну залежність коефіцієнта несинусоїдальних спотворень мережевого струму вищими гармоніками (THDi) від частоти вихідного струму $F_s = 47,5/50/52,5$ Гц, а також перевірити можливості роботи приводу при вхідних напругах живлення 460-480В і 430-460В.

Матеріали і результати досліджень

Для кількісної оцінки гармонічного складу мережевого струму проводився запис осцилограм струму, що споживається з мережі при включеному навантаженні. На рис. 1 представлена схема електрична принципова досліджуваного обладнання.



1 – інвертор, 2 – підвищуючий трансформатор, 3 – частотний перетворювач, 4 – трансформатор, 5 – досліджувана станція

Рис. 1. Схема підключення станції AK06-PS-360-480-18-111

Інвертор та підвищуючий трансформатор, забезпечують підвищення напруги до рівня, необхідного для експерименту. Частотний перетворювач та трансформатор, забезпечують зміну частоти електричного струму, що подається на досліджувану станцію. Оскільки досліджується робота станції під навантаженням, то робота занурювального насоса імітується парою асинхронних двигунів, які жорстким валом об'єднані з парою асинхронних двигунів

в режимі генерації енергії, що повертається в промислову мережу.

Для експерименту використовувалася наступна контрольно-вимірювальна апаратура: осцилограф FLUKE зі струмовимірювальними кліщами та аналізатор мережі YOKOGAWA WT5000 (рис. 2).

Вимірювання проводилися в двох діапазонах напруги живлення на входах приводу: 430-460В і 460-480В.



Рис. 2. Контрольно-вимірювальна апаратура яка використовувалась для експерименту

Основні параметри вимірювалися для фіксованих значень вихідної частоти інвертору станції: $F_s = 47,5$ Гц, 50 Гц та 52,5 Гц. Для заданої частоти змінювалась напруга. Вимірювані параметри: U_s - напруга живлення, В, U_d - напруга ланки постійного струму, В, I_s - вхідний струм, А, I_{out} - вихідний струм, А, Load - навантаження, %, THDi - загальне гармонійне

спотворення по кожній з фаз, η - коефіцієнт корисної дії. Отримані в ході експерименту дані представлені в табл. 1-2.

В таблиці 3 наведені параметри виміряні на частоті мережі 52,5 Гц, при якій спостерігається поява коливання струмів на всіх входах і виходах станцій-джерел і приводу, що перевіряється.

Таблиця 1 – Дані виміру на частоті 47,5 Гц

F_s , Гц	U_s , В	U_d , В	I_s , А	I_{out} , А	% Load	THDi, % (фази)	Total THDi, %	η (ккд) %
47,5	Живлення 460-430 В							
	451,282	625	246,785	295,633	82,1	8,954/9,024/9,321	9,101	94,562
	450,138	623	277,464	327,447	90,9	7,926/7,799/8,232	7,988	94,690
	449,172	619	302,968	354,023	98,3	7,516/7,374/7,844	7,581	94,717
	445,790	612	380,047	437,199	121,4	6,612/6,845/7,018	6,827	94,622
	Живлення 480-460 В							
	474,866	658	249,788	310,294	86,2	9,90/9,775/10,162	9,949	94,272
	473,830	656	279,941	346,459	96,2	8,878/8,536/9,259	8,896	94,391

Таблиця 2 – Дані виміру на частоті 50 Гц

Fs, Гц	Us, В	Ud, В	Is, А	Iout, А	% Load	THDi, % (фази)	Total THDi, %	η (ккд) %
50	Живлення 460-430 В							
	452,204	629	215,730	267,407	74,3	9,107/9,327/9,223	9,219	94,498
	451,147	625	247,473	299,519	83,2	7,982/7,891/8,104	7,993	94,710
	449,928	621	278,482	331,213	92	7,359/7,172/7,408	7,314	94,796
	449,038	619	303,945	358,508	99,6	7,026/6,919/7,081	7,009	94,801
	446,036	612	377,888	437,064	121,4	6,515/6,356/6,641	6,505	94,677
	Живлення 480-460 В							
	503	780	37	129		47,39/43,94/51,06	47,552	
	475	661	213	282	78,3	8,85/8,80/8,94	8,864	
	472	656	246	309	85,8	7,58/7,52/7,69	7,597	
	470	652	266	337	93,6	7,20/6,96/7,27	7,145	94,449
	469	649	292	364	101,1	6,80/6,67/6,88	6,784	94,578
	464	639	349	431	119,7	6,97/6,48/7,94	7,156	94,424

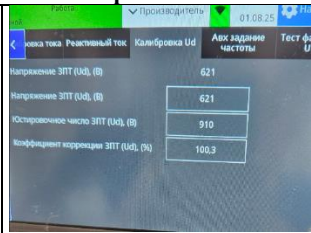
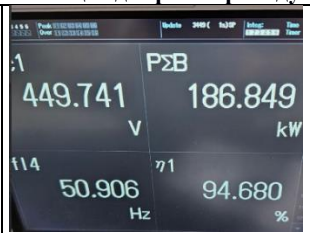
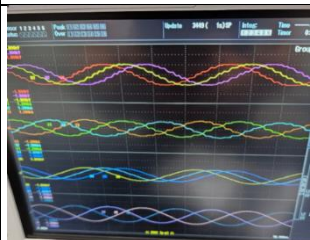
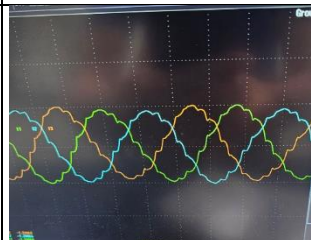
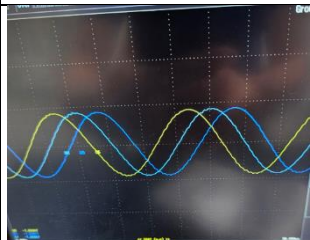
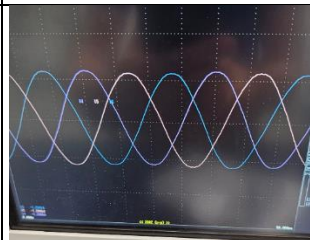
Таблиця 3 – Дані виміру на частоті 52,5 Гц

Fs, Гц	Us, В	Ud, В	Is, А	Iout, А	% Load	THDi, % (фази)	Total THDi, %	η (ккд) %
52,5	Живлення 460-430 В							
	453,517	633	179,936	232,264	64,5	10,771/11,043/10,828	10,881	94,245
	451,317	626	222,747	277,839	77,2	7,836/7,878/7,921	7,878	94,670
	450,295	623	250,429	316,836	88	7,341/7,328/7,388	7,352	94,673
	449,776	622	263,369	332,704	92,4	7,210/7,034/7,159	7,135	94,718
	449,533	621	265,504	334,728	93	7,817/7,419/7,871	7,705	94,680
	Живлення 480-460 В							
	477,348	664	201,225	262,326	72,9	10,252/10,387/10,178	10,273	94,356
	476,022	661	226,520	289,405	80,4	8,404/8,448/8,432	8,428	94,582
	474,773	657	260,012	326,047	90,6	7,362/7,384/7,392	7,379	94,727
	474,537	656	265,954	338,249	94	7,218/7,196/7,301	7,238	94,632

Для ілюстрації процесу проведення експерименту в табл. 4 наведено приклад фотофіксації показників

при появі коливання струмів на всіх входах і виходах станцій-джерел і приводу, що перевіряється (52,5Гц).

Таблиця 4 – Фотофіксація показників при появі коливання струмів на входах та виходах станцій-джерел і приводу

			
Вихідний струм по Fluke - "бобтанка"	Напруга ЗПТ приводу Ud = 656В	Вхідні та вихідні параметри	ККД привода при навантаженні Iout = 334,7А
			
Графіки вхідних та вихідних U/I	Вхідні струми привода («бобтанка»)	Вихідні струми привода (коливання)	Вихідна напруга привода

Обговорення результатів. Основною метою досліджень було знайти межі ефективності застосування станції, яка проектувалась під мережу 60Гц, при використанні в національній мережі 50Гц.

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. На частоті мережі Fs = (60+5)Гц привід працює з THDi < 8% в діапазоні навантажень 70% ...

100% (і навіть нижче) при напрузі живлення $U_s = 480V + 5\%/-15\%$ або $U_s = 460V + 10\%/-15\%$ (як у станції фірми «Toshiba»).

2. На частоті $F_s = (50 \pm 2,5)$ Гц діапазон навантажень наближається до необхідного, але тільки при зниженій напрузі живлення $U_s = 380V + 10\%/-15\%$.

3. На знижених частотах із зростанням напруги живлення «звужується» діапазон навантажень, де привід утримує $THDi < 8\%$, як можна побачити з рис.3, де наведено зведену інформацію про показники приводу АК06-PS-360-480-18-111 при різних напругах і частотах мережі.

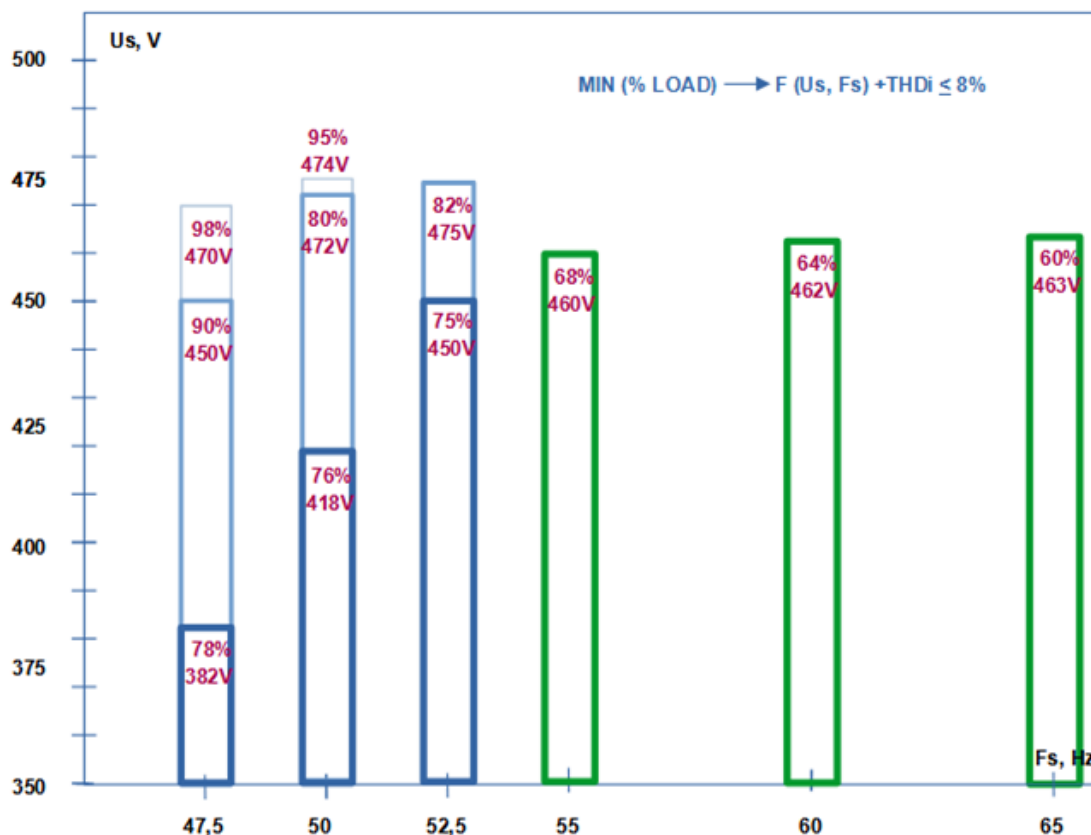


Рис. 3. Показники приводу АК06-PS-360-480-18-111 в залежності від частоти і напруги мережі

Зв'язок між частотою f мережі живлення, числом W витків обмоток (мережевих), перетином S_e осереддя і максимальною індукцією B_m пояснюється формулою для трансформаторної ЕРС (U) – вона працює для трансформаторів, дроселів і автотрансформаторів:

$$U_l = \frac{2\pi f \omega S_e B_m}{k_a} \approx 4,44 f \omega S_e B_m. \quad (1)$$

Оскільки розробка приводу АК06-PS-360-480-18-111 з 18-пульсним автотрансформатором велася для мережі $U_s = 480V$, 60 Гц, [9] то його застосування в мережі зі зниженою в 1,2 рази частотою 50 Гц вимагає як мінімум зміни числа витків і/або перетину осереддя для роботи з напругами $U = 480V$ [10].

Висновки

У поточній конфігурації станція управління не забезпечує заданих параметрів при роботі в широкому діапазоні напруг живлення і частот мережі

живлення, що можна побачити з таблиць 1-3. За вимогою $THDi$ повинно бути менше або дорівнювати 5%, а отримані значення перевищують цей поріг, оскільки частота нижче розрахункової. Для забезпечення заявлених параметрів $THDi$ по вхідному струму необхідно провести наступні доопрацювання:

- Знизити заявлену величину напруги живлення мережі до $380V + 10\%/-15\%$ /50 Гц – привід не вимагає конструктивних доопрацювань.

- Доопрацювати 18-пульсний автотрансформатор шляхом збільшення перетину осереддя не менше ніж в 1,2 рази, що приведе до необхідності виготовлення нових котушок трансформатора.

Після проведення доопрацювань доцільно провести додаткові дослідження приводу АК06-PS-360-480-18-111 з напругами мережі $U_s = 480V + 10\%/-15\%$ /50 $\pm$ 2,5 Гц, для того щоб підтвердити заявлені характеристики.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гудим В., Яцишин С., Мамцаж Д. Визначення коефіцієнта спотворення напруги в системах електропостачання. Вимірвальна техніка та метрологія. Том 80, вип. 3, 2019 р. с. 64-71. doi: 10.23939/istcmtm2019.03.064
2. ДСТУ 13109-97 (ГОСТ 13109-97). Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. – [Чинний від 1999-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1999. – 51 с.

3. Радимов С. М. Експериментальне дослідження ступеня спотворення мережевого струму частотного електроприводу / С. М. Радимов, В. Л. Беляєв, А. М. Бесараб [та ін.] // Електромашинобудування та електрообладнання: міжвід. наук.-техн. зб. – К., 2010. – Вип. 75. – С. 52–56. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2010_75_11.
4. A. von Jouanne, P. N. Enjeti and B. Banerjee, "Assessment of ride-through alternatives for adjustable-speed drives," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 35, no. 4, pp. 908-916, July-Aug. 1999, doi: 10.1109/28.777200.
5. Беляєв В. Л. Гармонійний склад мережевого струму частотних електроприводів з широтно-імпульсною модуляцією / В. Л. Беляєв, С. М. Радимов // Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематич. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода: теорія і практика». – Кременчук, 2012. – № 1(19). – С. 469–471.
6. Беляєв В. Л. Спрощені моделі електроприводів з широтно-імпульсною модуляцією / В. Л. Беляєв, С. М. Радимов // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах: наука, освіта і практика: зб. наук. пр. – Кременчук, 2014. – Вип. 1(2). – С. 240–242.
7. Das J. C. Passive Filters – Potentialities and Limitations / J. C. Das // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2004. – Vol. 40, No. 1. – P. 232–241.
8. Гапон Д. А. Визначення джерела вищих гармонік в системах електропостачання зі змішаним навантаженням / Д. А. Гапон, А. О. Зуєв, П. О. Качанов, Б. І. Кубрик // Сучасні інформаційні системи. – 2022. – Т. 6, № 1. – С. 66–74. DOI: doi: 10.20998/2522-9052.2022.1.09
9. S. Khan, X. Zhang, M. Saad, H. Ali, B. M. Khan, and H. Zaman, "Comparative analysis of 18-pulse autotransformer rectifier unittologies with intrinsic harmonic current cancellation", Energies, vol.11, no. 6, p. 1347, 2018. doi: 10.3390/en11061347.
10. R. Abdollahi, G. B. Gharehpetian, F. Mohammadi, and S. Prakash P., "Multi-pulse rectifier based on an optimal Pulse Doubling Technique", Energies, vol. 15, no. 15, p. 5567, 2022. doi: 10.3390/en15155567

Received (Надійшла) 28.08.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Гапон Дмитро Анатолійович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Dmytro Gapon – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Power Systems Automation and Cybersecurity, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Dmytro.Hapon@khp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57552659800&origin=recordpage>.

Качанов Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Petro Kachanov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: petro.kachanov@khp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-7532-5913>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190405644>.

Ольшевський Андрій Вікторович – аспірант кафедри автоматики та управління в технічних системах, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

Andrey Olshevskiy – PhD student of the Department of Automation and Control in Technical Systems, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: asd.andry.asd@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-2734-9491>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58749329700>.

Петрик Євген Борисович – кандидат технічних наук, Технічний лідер Triol Corporation, Харків, Україна;

Evgeniy Petrik – Candidate of Technical Sciences, Tech Lead of Triol Corporation, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Evgeniy_Petrik@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-5902-9295>.
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58749329700>.

Study of the parameters of the total harmonic distortion of a control station with an input phase-shift autotransformer

Dmytro Gapon, Petro Kachanov, Andrey Olshevskiy, Evgeniy Petrik

Abstract. When developing minerals in Ukraine, such as oil, mechanized extraction methods are used, using submersible electric motors. Such extraction methods provide high productivity and the ability to adjust to the current parameters of the well, which in turn provides maximum flow rate. To ensure the optimal operation of the pump, frequency-controlled submersible electric motor control stations are used, which consume non-sinusoidal current from the power supply network during operation. Also, to reduce distortions of the consumed current, various methods of reducing the total harmonic distortion (THDi) of input currents are used. To solve this problem, a control station with a multi-pulse rectifier powered by a phase-shifting autotransformer was developed, which allows you to reduce the THDi of input currents. This solution allows you to improve the overall performance of the equipment and its cost by reducing the power of the phase-shifting transformer. The functional capabilities of the electric drive control station are considered based on experimental data of measuring THDi of input currents of the network +30% in the frequency range of 47.5-52.5Hz. This frequency range is due to the fact that in many cases, in the fields, work is carried out with power supply from diesel generators, in which the fluctuations of frequency and supply voltage are in a significant range. Additionally, the possibility of drive operation at input supply voltages of 460-480V and 430-460V is investigated. The measurement results are analyzed, and recommendations are proposed for increasing the energy efficiency of the station.

Keywords: frequency converter, control station, energy efficiency, THDi, multi-pulse rectifier, phase-shifting transformer.