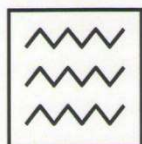




НУВГП

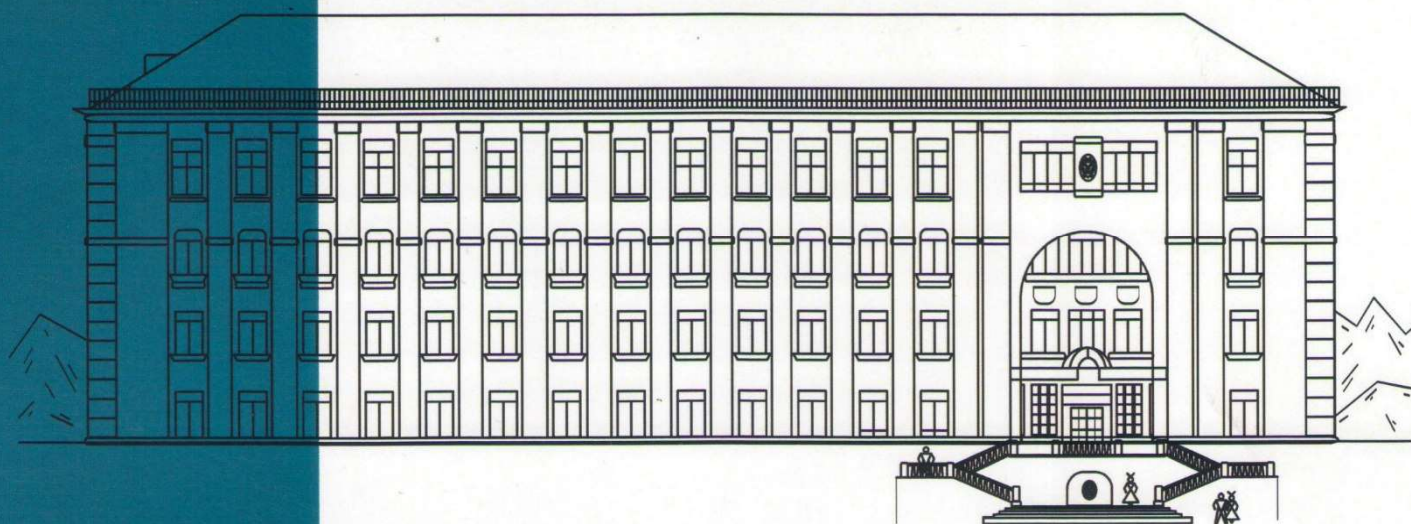


Національний університет
водного господарства
та природокористування

ЗБІРНИК МАТЕРІАЛІВ КОНФЕРЕНЦІЇ

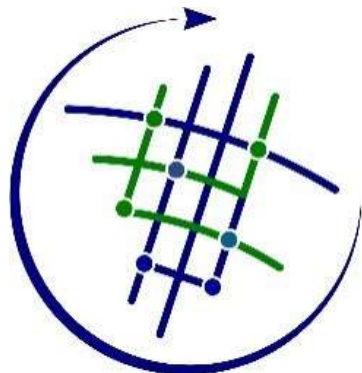
ЧЕТВЕРТА
ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА
ІНТЕРНЕТ-КОНФЕРЕНЦІЯ
«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ
МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ЕФЕКТИВНОГО
ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ
СИСТЕМ»

26-27 КВІТНЯ 2023 року



Рівне 2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
КАФЕДРА ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ**



INTERMARIUM
FUNDACJA

**IV ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА
ІНТЕРНЕТ-КОНФЕРЕНЦІЯ**

У СПІВПРАЦІ З ФОНДОМ INTERMARIUM

**«ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА
ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ»**

26–27 КВІТНЯ 2023 р.

РІВНЕ – 2023

УДК 621:656.13:347.763:378:001.895

I–66

Рецензенти:

Савіна Н. Б., проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків Національного університету водного господарства та природокористування, д.е.н., професор;

Сорока В. С., проректор з науково-педагогічної та навчальної роботи Національного університету водного господарства та природокористування, к.с.-г.н., доцент;

Марчук М. М., директор навчально-наукового механічного інституту Національного університету водного господарства та природокористування, к.т.н., професор;

Кравець С. В., д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання Національного університету водного господарства та природокористування;

Кристончук М. Є., к.т.н., доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування;

Козяр М. М., д.пед.н., професор, завідувач кафедри теоретичної механіки, інженерної графіки та машинознавства Національного університету водного господарства та природокористування.

Рекомендовано вченю радою Національного університету водного господарства та природокористування.

Протокол № 5 від 26 травня 2023 р.

Відповідальний за випуск:

Никончук В. М., д.е.н., в.о. завідувача кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування.

I–66 Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем: матеріали тез IV Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції 26–27 квітня 2023 р. [Електронне видання]. – Рівне: НУВГП, 2023. – 196 с.

ISBN 978-966-327-554-3

У збірнику представлені теоретичні та практичні результати напрацювань в царині інноваційних технологій в машинобудуванні, ефективного функціонування транспортних систем, логістичного забезпечення транспортних процесів, конструювання, технічної експлуатації і ремонту транспортних засобів, а також вітчизняного та зарубіжного досвіду підготовки фахівців у закладах вищої освіти, виконаних науково-педагогічними та науковими працівниками, докторантами, аспірантами та студентами закладів освіти, науки та інших організацій.

УДК 621:656.13:347.763:378:001.895

ISBN 978-966-327-554-3

© Національний університет водного господарства та природокористування, 2023

Плекан Уляна Цьонь Олег	Внутрішній контроль логістичних процесів автотранспортного підприємства	101
Постранський Микола Король Софія	Тенденції зміни обсягів перевезення вантажів в Україні у період 2017–2021 років	103
Приходько Всеволод Вікович Ігор	Ціноутворення на перевезення вантажів великогабаритними автопоїздами	105
Семенюк Назар Сорока Валерій	Порівняння транспортних коридорів на основі загальних економічних витрат	108
Ткач Владислав	Впровадження електронної черги у міжнародному пункті пропуску «Рава-Руська – Хребенне»: доцільність та можливість	115
Швець Микола Михальчук Назарій	Сторони логістики в ланцюгах постачань	117
Шевчук Роман Пашкевич Світлана	Поняття та особливості каршерингу	119
Яценюк Микола	Аналіз функціонування транспортних коридорів в Україні під час війни	121
Яценюк Микола	Функціонування та перспективи розвитку транспортної системи міста Рівне	124

СЕКЦІЯ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ТА ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Воронков Олексій	Модель технології транспортного процесу перевезення зернового збіжжя	126
Демидов Денис Давидюк Віталій	Організація досліджень транспортних потоків на перехрестях	128
Нерубацький Володимир Хоменко Ігор Гордієнко Денис	Дослідження та розрахунок рівнів вищих гармонік обертальних електричних машин в активно-адаптивних мережах	131
Нерубацький Володимир Гордієнко Денис	Система керування автоматизованим електроприводом постійного струму з частотно-імпульсним керуванням	135
Пашкевич Світлана Денисюк Віктор	Організація злагодженої роботи різних типів пасажирів транспорту в транспортно-пересадочних вузлах	139
Півторак Галина Суслов Владислав	Оцінка доступності транспортних районів міста в системі громадського транспорту	143
Хітров Ігор	До питання транспортного моделювання в програмному середовищі PTV VISSIM	145
Яценюк Микола	Імітаційне мікромоделювання та розробка моделі транспортних вузлів (динамічний розподіл в програмному середовищі Vissim)	146

УДК 621.313

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК РІВНІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК ОБЕРТАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН В АКТИВНО-АДАПТИВНИХ МЕРЕЖАХ

Володимир Нерубацький¹, Ігор Хоменко², Денис Гордієнко¹

¹Український державний університет залізничного транспорту,
майдан Фейєрбаха, 7, м. Харків, 61050

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Якість електричної енергії суттєво впливає на надійність та ефективність роботи електричних мереж та силового обладнання. Одним з важливих показників якості електричної енергії є рівень вищих гармонік, що обумовлює несинусоїдальні режими роботи електричних мереж [1; 2].

Природа вищих гармонік має різноманітний характер [3; 4]. Вплив вищих гармонік оберտальних електричних машин (синхронний генератор, асинхронний двигун і т. п.) на режими роботи електричної мережі недостатньо досліджений.

Сучасні тенденції розвитку електричних мереж, а саме, впровадження активно-адаптивних мереж вносять нові аспекти щодо якості електричної енергії. Це потребує постійного контролю параметрів якості електроенергії, і зокрема рівнів вищих гармонік, в режимі реального часу. Суттєве практичне значення мають дослідження природи окремих гармонік. Підтвердженням цього є дослідження, наприклад, третіх (насичення магнітопроводу) та зубцевих гармонік, що з'являються в результаті нерівномірності повітряного зазору оберտальних електричних машин [5].

Вищі гармоніки розподільчих електричних мереж мають конструктивну або технологічну природу [6; 7]. Кожна гармонічна складова має одне або декілька джерел та визначений простір розповсюдження. Амплітудне значення вищої гармоніки та її шляхи протікання обумовлені взаємодією індуктивних та ємнісних елементів електричної мережі. Найбільш неприємним випадком є випадок резонансу вищих гармонік струму або напруги в електричних мережах та на великих підприємствах. Проявлення у часі обумовлює випадковий або системний характер вищих гармонік. У процесі експлуатації електричні оберտальні машини генерують в електричну мережу так звані пазові гармоніки [8]. Природа цих гармонік пов'язана з магніторушійною силою обмотки ротора. Амплітудне значення цих гармонік обумовлено конструктивними параметрами електричної машини та напругою мережі. Суттєва небезпека пазових гармонік викликана залежністю цих частот від частоти мережі та ковзання, що може призводити до резонансних явищ [9].

Визначення рівнів вищих гармонік за рахунок експериментального зняття кривих з урахуванням електромагнітної асиметрії на реальних електричних машинах пов'язано з великою трудомісткістю, обумовленою необхідністю виготовлення спеціальних тарувальних стендів. Знаходження розрахунковим шляхом значень вищих гармонік, що відповідають гранично допустимій несиметрії електричної машини, дає змогу уникнути роботи з громіздкими тарувальними стендами.

Методика розрахунку енергетичного рівня вищих гармонік у вигляді суми квадратів електрорушійної сили пазової гармоніки, знятих при послідовному відключенні кожної з трьох фаз обмотки статора, ґрунтується на визначенні залежності магнітних втрат від пазових гармонік магнітного поля в повітряному зазорі від ступеня електромагнітної асиметрії. Енергетичний рівень гармонік індукції пазової частоти характеризує собою магнітні втрати в сталі від магнітного поля пазового порядку. Визначимо питомі магнітні втрати в сталі від пазової гармоніки індукції:

$$P_{mg} = \varepsilon_g \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{1}{2\pi \cdot T_z} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{T_z} B_n^2(\varphi, t) d\varphi \cdot dt + \sigma \left(\frac{f_n}{50} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\pi \cdot T_n} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{T_n} B_n^2(\varphi, t) d\varphi \cdot dt, \quad (1)$$

де B – магнітна індукція; f – частота магнітної індукції; ε_g – питомі втрати від гістерезису; σ – питомі втрати від вихрових струмів; $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ – електрична частота пазової гармоніки індукції; $T_z = \frac{2\pi}{\omega_z}$ – період пазової гармоніки індукції; $K_n = \varepsilon_g \cdot \frac{f_z}{50} + \sigma \left(\frac{f_n}{50} \right)^2$ – коефіцієнт втрат потужності; $B_n(\varphi, t)$ – просторово-часовий розподіл магнітної індукції поля в зазорі з електромагнітною несиметрією; ω_n – кутова частота пазової гармоніки індукції.

Знайдемо питомі магнітні втрати від верхньої пазової гармоніки індукції з частотою $\omega_{up} = \omega_1 \cdot \left[\frac{z_n}{p} \cdot (1-S) + 1 \right]$ в трифазному режимі роботи, підставляючи вираз для просторово-часового розподілу індукції пазової частоти для трифазного режиму:

$$P_{mg3} = K_n \cdot \frac{1}{2\pi \cdot T_n} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{T_n} B_{up}^2(\varphi, t) d\varphi \cdot dt. \quad (2)$$

У загальному випадку з урахуванням всіх доданків ряду Фур'є λ_n вираз для питомих магнітних втрат від верхньої пазової частоти індукції буде мати вигляд:

$$P_{mgup} = \frac{1}{16} \cdot K_{an} \cdot (\lambda_0 \cdot \lambda_{j1} \cdot F_1)^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \lambda_{l1}^2 \right) \cdot K_{an}, \quad (3)$$

де K_{an} – коефіцієнт електромагнітної асиметрії.

Зростання амплітуди магнітної індукції вищих гармонік магнітного поля обумовлює різке зростання магнітних втрат від пазових гармонік із збільшенням електромагнітної асиметрії відповідно до залежності $K_{an} = f(a_m)$. Значне зростання додаткових втрат при збільшенні електромагнітної асиметрії підтверджується і цілим рядом експериментальних досліджень [10].

Пазові гармонічні складові магнітного поля в повітряному зазорі наводять в обмотках статора електрорушійні сили з частотами ω_n . У провіднику кожного поза обмотки статора наводиться електрорушійна сила пазової чистоти, яка пропорційна зміні індукції. Відповідно квадрат електрорушійної сили буде пропорційний $B_n^2(\varphi, t)$ і пропорційний пульсаційним втратам в сталі від пазових гармонік індукції в елементарному обсязі пазової зони поблизу k -го паза. Тоді сума квадратів електрорушійної сили в провідниках всіх пазів обмотки статора $\sum_{k=1}^n E_{nk}^2$ буде пропорційна сумарним магнітним втратам електричної машини від пазових гармонік поля в зазорі, а оскільки рівень пульсаційних втрат залежить від ступеня електромагнітної асиметрії, то дана величина буде при інших рівних умовах пропорційна енергетичному рівню пазових гармонік і буде деякою функцією несиметрії.

Електрорушійна сила пазової чистоти, що виникає в котушці обмотки статора, яка

містить W витків, сторони яких лежать в пазах з кутовими координатами φ , визначається як похідна потокозчеплення за часом:

$$e_{kn}(t) = -W_k \cdot l_s \cdot R \cdot \frac{d}{dt} \int_{\varphi_k}^{\varphi_n} \frac{1}{2} \cdot \lambda_0 \cdot \lambda_{j1} \cdot F_f \cdot (1 + \lambda_{j1} \cdot \cos Z_1 \cdot \varphi) \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \lambda_{\alpha 0} + \lambda_{n1} \cdot \cos(\varphi - \psi_\alpha) \right] \times \\ \times \cos(p \cdot \varphi - \psi_f) \cdot \cos(Z_2 \cdot \varphi - \omega_z \cdot t) \cdot d\varphi, \quad (4)$$

де l_s – ефективна довжина провідника в пазу статора; R – радіус розточення статора.

Амплітуда електрорушійної сили пазової гармоніки окремої фази обмотки статора може як зростати зі збільшенням електромагнітної асиметрії відносно розподілу витків даної фази, так і зменшуватися, тоді як сума квадратів електрорушійної сили пазової гармоніки всіх трьох фаз однозначно зростає із збільшенням α , відображаючи собою збільшення пульсаційних втрат при наявності несиметрії, за характером близької до квадратичної.

Таким чином, згідно з запропонованою методикою енергетичний рівень вищих гармонік можна оцінювати за сумою квадратів електрорушійної сили пазової гармоніки, знятих при послідовному відключенні кожної з трьох фаз обмотки статора при роботі випробуваної машини на холостому ході. Для виключення впливу явищ насичення на результат контролю та для зниження струмових перевантажень електродвигуна при роботі в режимі з відключеною фазою вимірювання необхідно проводити при живленні працюючих двох фаз обмотки пониженою однофазною напругою.

Алгоритм розрахунку залежностей електрорушійної сили пазової гармоніки від електромагнітної асиметрії наведено на рисунку.

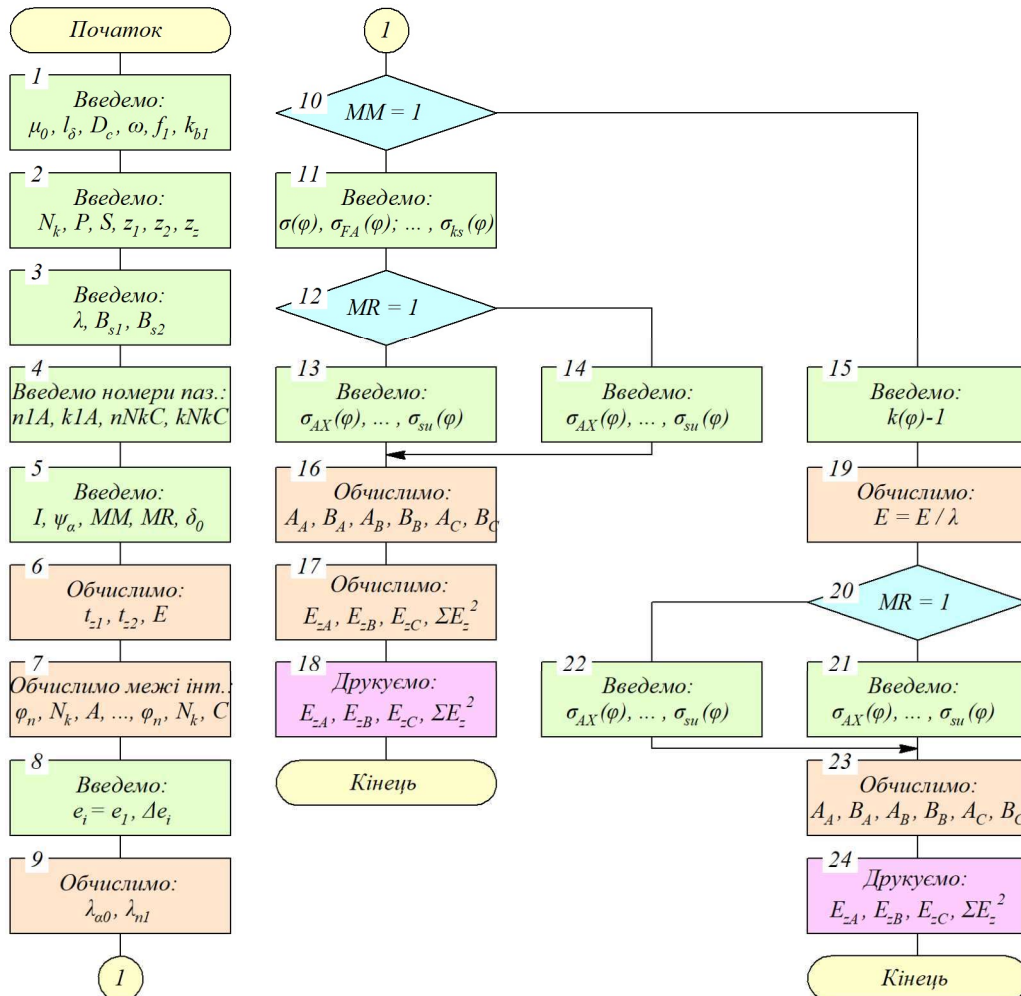


Рисунок. Розрахунковий алгоритм

Запропонована методика дає змогу визначати рівні пазових гармонічних складових у фазних обмотках електричних машин. Ці гармоніки залежно від схеми з'єднань обмоток асинхронного двигуна (зірка, трикутник), схеми і навантаження електричної мережі поширюються електричною мережею, створюючи гармоніки струму чи гармоніки напруги. При аналізі асиметричних і несинусоїдальних режимів на окремих частотах виникають різноманітні гармонічні складові, що призводить до виникнення специфічних гармонік струму і напруги. Всі ці явища необхідно враховувати при аналізі режимів розподільних мереж.

Сучасний рівень розвитку електронних обчислювальних машин та їх програмного забезпечення дає змогу формувати математичні моделі електричної мережі на пазовій частоті в несиметричних режимах, розглядаючи всі її елементи як трифазні. При цьому як математичні моделі як мережі в цілому, так і її окремих елементів служать рівняння в фазних координатах – рівняння, що містять як шукані та задані величини параметри режиму (напруги, струми, потужності фаз).

Всі несиметричні аварійні пошкодження в електричній мережі (відключення фаз, короткі замикання окремих фаз між собою і на землю та ін.) можуть бути досить просто відображені за рахунок формування вузлових рівнянь з урахуванням відповідних комутацій у вузлах і гілках трифазної мережі. Причому наявність декількох несиметричних пошкоджень не призводить до яких-небудь ускладнень алгоритмів формування та рішення вузлових рівнянь порівняно з випадком місцевих ушкоджень. Тому математичні моделі, засновані на рівняннях в фазних координатах, більш гнучкі і універсальні, можуть застосовуватися для аналізу несиметричних режимів роботи як з простою, так і зі складною не симетрією.

1. Gundebommu S., Hunko I., Rubanenko O., Kuchansky V. Assessment of the Power Quality in Electric Networks with Wind Power Plants. *2020 IEEE : 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. P. 190–194. DOI: 10.1109/ESS50319.2020.9160231.

2. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D. Control and accounting of parameters of electricity consumption in distribution networks. *2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*. 2021. P. 114–117. DOI: 10.1109/MMA52675.2021.9610907.

3. Lin C., Han G., Du J., Xu T., Peng Y. Adaptive Traffic Engineering Based on Active Network Measurement Towards Software Defined Internet of Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Vol. 22 (6). P. 3697–3706. DOI: 10.1109/TITS.2020.3028990.

4. Huang T., Tan L., Wang R., Li C., Li H., Huang X. Research on Suppression of Higher Harmonics in Wireless Power Transmission System. *2020 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*. 2020. P. 228–232. DOI: 10.1109/WoW47795.2020.9291304.

5. Cheng M., Zhu X., Wang Y., Wang R., Wang W. Effect and Inhibition Method of Armature-Reaction Field on Superconducting Coil in Field-Modulation Superconducting Electrical Machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2019. P. 1–12. DOI: 10.1109/TEC.2019.2948974.

6. Syvokobylenko V. F., Lysenko V. A. Use of higher harmonics in currents and voltages for phase-to-ground fault protection in medium voltage networks. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 172–176. DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569967.

7. Dalai S., Sahu R., Tripathy C. Harmonic Mitigation in Single-Phase Grid Connected Photovoltaic System Using SPWM Inverter. *2020 International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSE)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/CISPSSE49931.2020.

8. Sangilivadamalu R., Beidl C. Adaptive Harmonic and Disturbance Estimators for Rotary Machines With Applications to Engines. *IEEE / ASME Transactions on Mechatronics*. 2020. P. 1–11.

9. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Scherbak Ya., Mashura A., Khomenko I. Energy efficiency criterion of power active filter in a three-phase network. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. P. 165–170. DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250073.

10. Khomenko I., Stasiuk I., Iglis S. On the Influence of Electromagnetic Processes of Power Transformer on Parameters of Normal Regime of Electric Network Operation. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. 2018. P. 248–252. DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559528.