

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОЇ НАПРУГИ ВИЩИМИ ГАРМОНІКАМИ

**А. М. ГЛАДКИЙ**, кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Національний університет біоресурсів  
природокористування України**  
E-mail: amglad@ukr/net

**Анотація.** Поширення сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій веде до збільшення частки споживачів із нелінійними навантаженнями, які спричиняють спотворення синусоїдальної напруги вищими гармоніками, що негативно впливає на інше обладнання, викликаючи його перегрів і пошкодження, порушення синхронізації пристроїв і збої в мережах передачі даних та інші негативні наслідки. Зазначені фактори зумовлюють необхідність розробки нових методів досліджень, аналізу і мінімізації нелінійних спотворень напруги.

**Мета дослідження** – аналіз динаміки спотворень форми синусоїдальної напруги вищими гармоніками, визначення числових характеристик спотворень та можливостей їх мінімізації.

Дослідження динаміки спотворень форми кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками проводилось шляхом числового моделювання миттєвого значення напруги за допомогою автоматизованої системи.

Оцінка спотворень форми напруги проводилась за відхиленням від синусоїди «опорних» точок – амплітудного значення напруги  $U$ , і фази амплітудного значення напруги  $\varphi$ .

Проведено моделювання та аналіз спотворень форми синусоїдальної напруги другою та третьою вищими гармоніками. Отримано залежності огинаючої напруги  $U$  від фази  $\varphi$  і фази  $\varphi$  огинаючої від початкової фази  $\varphi_1$  другої і третьої гармонік та проведено оцінки спричинених цими гармоніками спотворень. Приведено формули для оцінки граничних відхилень амплітуди:  $U_{\max}=1+Kn$ ; фази:  $\varphi_1=\arccos(nKn)$ ; розрахунку початкової фази гармоніки  $\varphi_n$ , за якої відхилення фази  $\varphi$  рівні нулю:  $\varphi_2=\pm\pi/2$  і  $\varphi_3=0$ ,  $\varphi_3=\pm\pi$ , та рівняння для  $\varphi_1$  і  $\varphi$ , за яких відхилення  $U$  дорівнюють нулю.

Отримані при моделюванні оцінки спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками можуть використовуватися для визначення допустимих рівнів нелінійних спотворень, обчислення похибок вимірювань амплітуди, частоти і різниці фаз від вищих гармонік, розробки методів мінімізації спотворень та ін.

**Ключові слова:** електроенергія, якість, гармоніки, спотворення напруги, моделювання

**Актуальність.** Застосування електроенергії забезпечує впровадження нових електротехнологій у промисловості та сільському господарстві. Водночас, постійне зростання обсягів нелінійних навантажень, зумовленого, зокрема, широким впровадженням комп'ютерно-інтегрованих технологій, енергозберігаючих джерел світла, частотно-регульованого приводу інших сучасних електроспоживачів із нелінійною вольт-амперною характеристикою негативно впливає на рівень якості електроенергії, зумовлюючи виникнення вищих гармонік.

Вищі гармоніки спричиняють спотворення синусоїдальності кривої напруги і негативно впливають на інше обладнання, викликаючи його перегрів і пошкодження, порушення синхронізації пристроїв і збої в мережах передачі даних та інші негативні наслідки. Зазначені фактори зумовлюють необхідність розробки нових методів дослідження нелінійних спотворень в електричних мережах, нових методів обробки спотворених сигналів і мінімізації спотворень [1–3].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Найвідомішими методами обробки сигналів для визначення показників якості електричної енергії є методи середньоквадратичних значень, перетворення Фур'є, вейвлет-аналізу та ін. [2]. Зазначені методи не дають змоги оцінити вплив кожної гармоніки та її параметрів на спотворення форми кривої. У [3] розроблено аналітичні методи визначення числових характеристик спотворень, у [4] – автоматизовану систему їх моделювання.

**Мета дослідження** – аналіз динаміки спотворень форми кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками, визначення числових характеристик спотворень та можливостей їх мінімізації.

**Матеріали і методи дослідження.** Дослідження динаміки спотворень форми кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками проводилося шляхом числового моделювання миттєвого значення напруги  $u(t)$  за допомогою автоматизованої системи [3] у вигляді:

$$u(t) = \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^N K_n \sin[n(\omega t + \varphi_1) + \varphi_n], \quad (1)$$

де  $t$  – час;  $\omega$  – частота;

$\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N$  – початкова фаза;

$n = 2, 3, \dots$  – номер;

$N$  – кількість;

$K_n = U_n / U_1$  – коефіцієнт;

$U_1, U_n$  – амплітуда гармоніки, відповідно.

Оцінка спотворень форми кривої напруги проводилася за відхиленням від синусоїди «опорних» точок напруги, які використовуються при вимірюваннях амплітуди і фази гармонійного коливання. До таких точок належать амплітудне значення напруги  $U$ , і фаза амплітудного значення напруги  $\varphi$ . Значення напруги  $U$ , і фази  $\varphi$  визначалися з рівнянь:

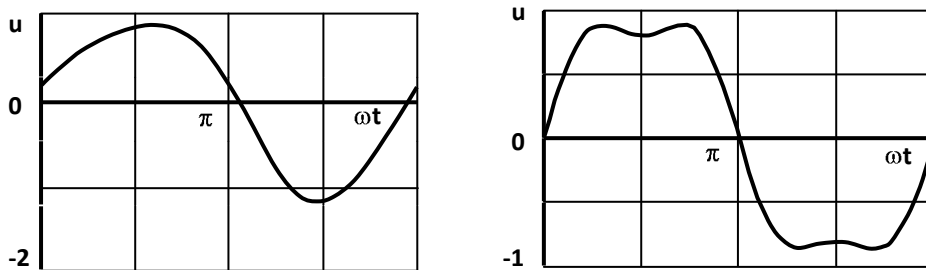
$$\frac{du(t)}{dt} = 0; \quad \frac{d^2u(t)}{dt^2} > 0 \quad (2)$$

$$\begin{cases} U = u(t_m), & \text{для } t = t_m, 0 \leq t_m \leq 2\pi/\omega; \\ U \geq u(t), & \text{для } t \neq t_m, 0 \leq t \leq 2\pi/\omega. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \cos \varphi + nK_n \cos(n\varphi + \varphi_n) = 0; \\ \sin \varphi + n^2 K_n \sin(n\varphi + \varphi_n) > 0. \end{cases} \quad (4)$$

При  $K_n$ , обмеженому значеннями  $0 \leq K_n \leq n^{-2}$ , напруга  $U$ , визначена умовами (2–3) задовольняє всім вимогам до огинаючої [3], фаза  $\varphi$ , обчислена за формулами (4), визначає фазу  $U$ .

**Результати досліджень та їх обговорення.** Проведено моделювання спотворень форми напруги  $u(t)$  другою та третьою гармоніками, рис. 1.

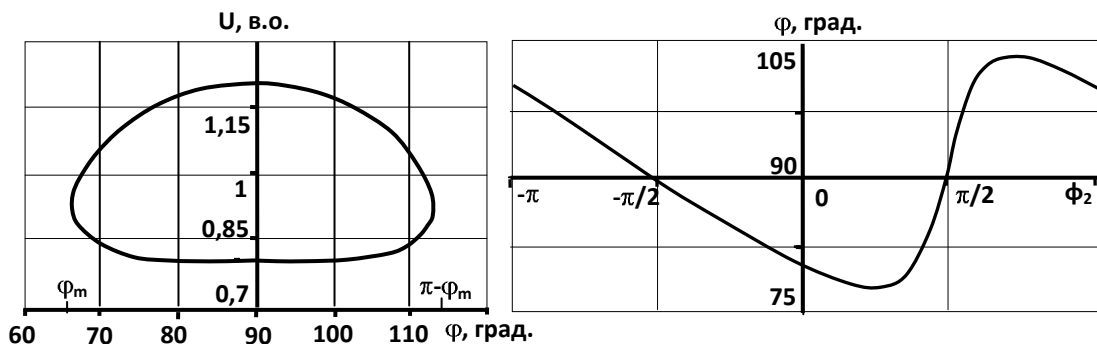


**Рис. 1. Форма напруги  $u(t)$  при:**

$n = 2, K_2 = 0,2; \varphi_2 = \pi/2$  (зліва) та  $n = 3, K_3 = 0,2 \varphi_3 = 0$  (справа).

З наведених графіків видно, що при однакових рівнях гармонік третя гармоніка вносить більш суттєві спотворення форми напруги, які пояснюються вищою частотою цієї гармоніки.

Результати досліджень динаміки спотворень амплітуди напруги  $u(t)$ , спричинених другою гармонікою, проведених згідно з формулами (1–3) методом обчислення огинаючої  $U$ , та фази напруги  $u(t)$ , проведених шляхом обчислення фази огинаючої  $\varphi$ , згідно із залежностями (1–2, 4), наведено на рис. 2.



**Рис. 2. Залежності огинаючої  $U$  від фази  $\varphi$  і фази  $\varphi$  від початкової фази  $\varphi_2$  при  $K_2 = 0,2$**

Результати, отримані при моделюванні, і наведені залежності дають змогу провести кількісні оцінки спотворень амплітуди і фази напруги  $u(t)$ , спричинені другою гармонікою. Огинаюча  $U$  напруги  $u(t)$  може перевищувати амплітуду першої гармоніки, бути меншою від неї або рівною їй. Максимальні значення огинаючої  $U_{\max}$  і, відповідно, граничні відхилення огинаючої  $U$  від одиничної амплітуди першої гармоніки, спостерігаються при значенні фази  $\varphi=\pi/2$ , початковій фазі другої гармоніки  $\varphi_2=-\pi/2$  і становлять  $U_{\max}=1+K_2$ . При певних значеннях  $\varphi\neq\pi/2$ , які залежать від значень  $K_2$ ,  $\varphi_2$  і визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \cos\varphi + 2K_2 \cos(2\varphi + \varphi_2) = 0; \\ \sin\varphi + K_2 \sin(2\varphi + \varphi_2) = 1; \\ K_2^2 + 2K_2 \cos(\varphi + \varphi_2) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

огинаюча  $U$  дорівнює амплітуді першої гармоніки, рис. 2, точки  $U=1$ , а граничні відхилення огинаючої  $U$  дорівнюють нулю.

Фаза напруги  $u(t)$  може випереджати фазу першої гармоніки, відставати від неї, або співпадати з нею, рис. 2. Максимальні відхилення фази  $\varphi_m$  від значення  $\pi/2$  і, відповідно, граничні відхилення фази  $\varphi_m$  від фази першої гармоніки  $\varphi_1$  становлять  $\varphi_m=\arccos(2K_2)$  і  $\varphi_m=\pi-\arccos(2K_2)$ , і спостерігаються при значеннях початкової фази другої гармоніки  $\varphi_2=\pi-\arccos(2K_2)$  і  $\varphi_2=2\arccos(2K_2)$  відповідно. При значеннях початкової фази  $\varphi_2=\pm\pi/2$  фаза  $\varphi$  огинаючої  $U$  співпадає з фазою першої гармоніки  $\varphi=\varphi_1=\pm\pi/2$  і відхилення фази  $\varphi$  будуть дорівнювати нулю.

На рис. 3 наведено результати досліджень динаміки огинаючої  $U$  та фази огинаючої  $\varphi$ , за наявності в спектрі напруги третьої гармоніки.

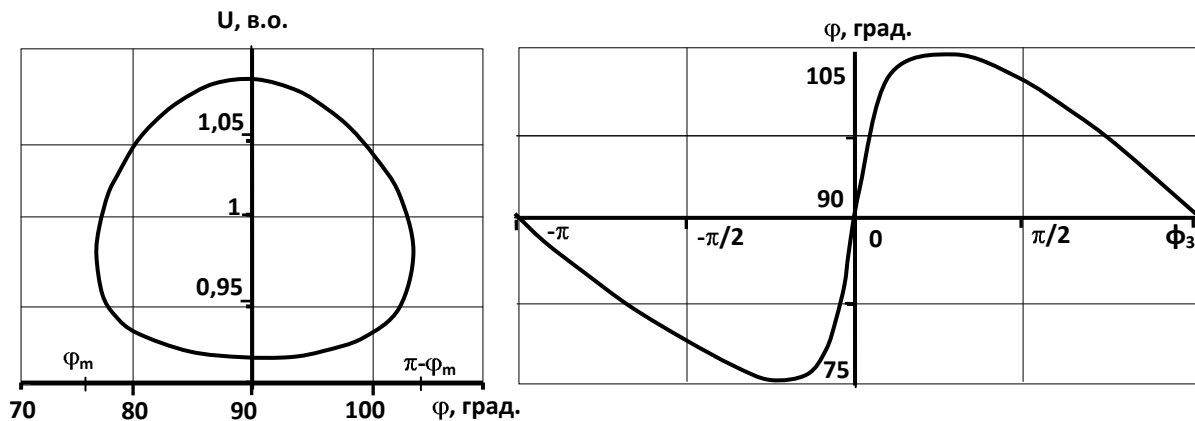


Рис. 3. Залежності огинаючої  $U$  від фази  $\varphi$  і фази  $\varphi$  від початкової фази  $\varphi_3$  при  $K_3=1/12$

Граничні відхилення огинаючої  $U$  від одиничної амплітуди першої гармоніки спостерігаються при значенні фази  $\varphi=\pi/2$ , початковій фазі третьої гармоніки  $\varphi_3=\pi$  і становлять  $U_{\max}=1+K_3$ . За певних значень  $\varphi\neq\pi/2$ , які визначаються системою рівнянь:

$$\begin{cases} \cos\varphi + 3K_3 \cos(3\varphi + \varphi_3) = 0; \\ \sin\varphi + K_3 \sin(3\varphi + \varphi_3) = 1; \\ K_3^2 + 2K_3 \cos(2\varphi + \varphi_3) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

огинача  $U$  дорівнює амплітуді першої гармоніки, рис. 3, точки  $U=1$ , а граничні відхилення огиначаючої  $U$  дорівнюють нулю.

Граничні відхилення фази  $\varphi_m$  від фази першої гармоніки  $\varphi_1$  становлять  $\varphi_m = \arccos(3K_3)$  і  $\varphi_m = \pi - \arccos(3K_3)$  і досягаються при значеннях початкової фази третьої гармоніки  $\varphi_3 = \pi - 3\arccos(3K_3)$  і  $\varphi_3 = -\pi + 3\arccos(3K_3)$  відповідно. При значеннях початкової фази  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_3 = \pm\pi$  фаза  $\varphi$  огиначаючої  $U$  співпадає з фазою першої гармоніки  $\varphi = \varphi_1 = \pm\pi/2$ , і її відхилення стають рівними нулю.

Аналіз результатів оцінок спотворень, зумовлених другою і третьою гармоніками, свідчить, що при однакових, пропорційних  $K_n$  граничних відхиленнях амплітуди третя гармоніка спричинює більші у  $\arccos(3K_n)/\arccos(2K_n)$  раз граничні спотворення фази і більш значні спотворення синусоїдальності форми напруги.

**Висновки і перспективи.** Вищі гармоніки спотворюють форму кривої синусоїдальної напруги, змінюючи значення амплітуди і фази напруги. Результати роботи дозволяють проводити оцінки максимальних відхилень амплітуди  $U$  і фази  $\varphi$  синусоїдальної напруги, зумовлених другою і третьою гармоніками. За рівних значень коефіцієнтів гармонік максимальні відхилення фази напруги, зумовлені третьою гармонікою, перевищують максимальні відхилення фази, зумовлені другою гармонікою. Встановлено амплітудно-фазові співвідношення, за яких спотворення фази та амплітуди напруги, спричинені другою та третьою гармоніками, відсутні.

Отримані при моделюванні оцінки спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками, зокрема, їх максимальних і нульових значень, можуть використовуватися для встановлення допустимих рівнів гармонік, електромагнітної сумісності, обчислення похибок вимірювань амплітуди, частоти і різниці фаз від вищих гармонік, розробки методів мінімізації гармонічних спотворень, їх впливу на обладнання та ін.

### Список літератури

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, – 2010. – 375.
2. Володарський Є. Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання / Є. Т. Володарський, А. В. Волошко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – 3/8 (69). – С. 10–17.
3. Гладкий А. М. Распределение вероятностей смеси случайных сигналов с кратными частотами / А. М. Гладкий // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43, № 7–8. – С. 75–78.

4. Гладкий А. М. Автоматизована система дослідження спотворень кривої синусоїдальної напруги вищими гармоніками / А. М. Гладкий // Науковий вісник НУБіП України. – 2015. – № 209, ч. 1. – С. 223–228.

5. Гладкий А. М. Дослідження спотворень синусоїдальної напруги вищими гармоніками: 24 Міжнародна конференція "Автоматика-2017" / А. М. Гладкий // Збірник тез доповідей 24 Міжнародної конференції "Автоматика-2017". – К., 2017. – С. 63.

### References

1. Zhezhelenko, I. V. (2010). Vysshie harmoniki v sistemah elektroснабzhenia [Higher harmonics in power supply systems]. Moscow, Russia: Energoatomizdat, 375.

2. Volodarskij, Ye. T., Voloshko, A. V. (2014). Systema monitorynhu yakosti elektrychnoi enerhii v detsentralizovanykh systemakh elektropostachannia [System for monitoring the quality of electric energy in decentralized power supply systems]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/8 (69), 10–17.

3. Gladkij, A. M. (2000). Raspredelenie veroyatnostey smesi sluchaynyih signalov s kratnyimi chastotami [Probability distribution of a mixture of random signals with multiple frequencies]. Radioelectronics and Communications Systems, 43 (7–8), 75–78.

4. Gladkij, A. M. (2015). Avtomatysovana systema doslidzhennia spotvoren kryvoi synusoidalnoi napruhy vyshchymy harmonikamy [Automated research system distortion of the curve sinusoidal voltage from higher harmonics]. Scientific Herald NULES of Ukraine, 209 (1), 223–228.

5. Gladkij, A. M. (2017). Doslidzhennia spotvoren synusoidalnoi napruhy vyshchymy harmonikamy [Study of distortion of the sinusoidal voltage from higher harmonics]. Collection of abstracts 24th International Conference "Automation-2017". Kyiv, 63.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫСШИМИ ГАРМОНИКАМИ

А. М. Гладкий

**Аннотация.** *Распространение современных компьютерно-интегрированных технологий ведет к увеличению доли потребителей с нелинейными нагрузками, которые вызывают искажения синусоидального напряжения высшими гармониками, что негативно влияет на другое оборудование, вызывая его перегрев и повреждение, нарушение синхронизации устройств и сбои в сетях передачи данных и другие негативные последствия. Указанные факторы обуславливают необходимость разработки новых методов исследований, анализа и минимизации нелинейных искажений напряжения*

*Цель работы – исследования динамики искажений формы синусоидального напряжения высшими гармониками, определения числовых характеристик искажений и возможностей их минимизации.*

*Исследование динамики искажений формы кривой синусоидального напряжения высшими гармониками проводилось путем численного моделирования мгновенного значения напряжения с помощью автоматизированной системы.*

Оценка искажений формы напряжения проводилась по отклонению от синусоиды «опорных» точек – амплитудного значения напряжения  $U$  и фазы амплитудного значения напряжения  $\varphi$ .

Проведено моделирование и анализ искажений формы синусоидального напряжения второй и третьей высшими гармониками. Получены зависимости огибающей напряжения  $U$  от фазы  $\varphi$  и фазы  $\varphi$  огибающей от начальной фазы  $\varphi_n$  второй и третьей гармоник и проведены оценки вызванных этими гармониками искажений. Приведены формулы для оценки предельных отклонений амплитуды:  $U_{\max}=1+K_n$ ; фазы:  $\varphi_m = \arccos(nK_n)$ , начальной фазы гармоники  $\varphi_n$ , при которой отклонения фазы  $\varphi$  равны нулю:  $\varphi_2 = \pm \pi/2$  и  $\varphi_3 = 0$ ,  $\varphi_3 = \pm \pi$ , и уравнения для  $\varphi_n$  и  $\varphi$ , при которых отклонения  $U$  равны нулю.

Полученные при моделировании оценки искажений синусоидального напряжения высшими гармониками могут использоваться для определения допустимых уровней нелинейных искажений, вычисления погрешностей измерений амплитуды, частоты и разности фаз от высших гармоник, разработки методов минимизации искажений и др.

**Ключевые слова:** электроэнергия, качество, гармоники, искажения напряжения, моделирование

## DYNAMICS EXAMINATION OF THE PROCESS OF SPINNING OF SYNOZOIDAL STRESS BY HIGH HARMONY

A. Gladkyi

**Abstract.** *The spread of modern computer-integrated technologies leads to an increase in the proportion of consumers with nonlinear loads that cause distortion of the sinusoidal voltage by higher harmonics, which adversely affects other equipment, causing it to overheat and damage, disturbing device synchronization and interruptions in data networks and other negative consequences. These factors necessitate the development of new methods for research, analysis and minimization of nonlinear voltage distortions*

*The purpose of the work – the study of the distortion dynamics of the form of sinusoidal voltage by higher harmonics, the definition of numerical characteristics of distortions and the possibilities for their minimization.*

*The study of the distortion dynamics of the shape of the sinusoidal voltage curve by higher harmonics was carried out by numerical simulation of the instantaneous voltage value using an automated system.*

*The estimation of distortions of the form of voltage was carried out on the deviation from the sinusoid of the "reference" points - the amplitude value of the voltage  $U$ , and the phase of the amplitude value of the voltage  $\varphi$ .*

*The simulation and analysis of distortions of the sinusoidal voltage form with the second and third highest harmonics was carried out. Dependences of the bending voltage  $U$  on the phase  $\varphi$  and the phase  $\varphi$  of the envelope of the second phase and the third harmonic of the  $\varphi_n$  phase have been obtained and the*

estimates of the distortions caused by these harmonics have been carried out. The formulas for estimating boundary variations of the amplitude are given:  $U_{max} = 1 + Kn$ ; phases:  $j_m = \arcsos(nKn)$ ; the calculation of the initial phase of the harmonic  $j_n$ , in which the phase deviation  $\varphi$  is equal to zero:  $j_2 = \pm p / 2$  and  $j_3 = 0$ ,  $j_3 = \pm p$ , and the equation for  $j_n$  and  $\varphi$ , at which deviations  $U$  are zero.

The obtained harmonics in the simulation of distortion of sinusoidal voltage can be used to determine the permissible levels of nonlinear distortions, to calculate the errors of measurements of amplitude, frequency and phase difference from higher harmonics, to develop methods for minimizing distortions, etc.

**Keywords: electric power, quality, harmonics, voltage distortion, modeling**

УДК 621.3.067

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У СНАББЕРНОМУ ВУЗЛІ ЕЛЕКТРОННОГО КЛЮЧА РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ**

**І. М. ГОЛОДНИЙ**, кандидат технічних наук

**О. В. САНЧЕНКО**, аспірант\*

E-mail: golodnyi@ukr.net

**Анотація.** Сучасний асинхронний регульований електропривод базується на використанні напівпровідникових перетворювачів напруги різних типів, дослідженню різних робочих характеристик яких, через складність чи високу вартість, мало приділено уваги. З розвитком комп'ютерного моделювання з'явилася можливість поглибити дослідження даних процесів.

Мета дослідження – покращення якості гармонічного складу вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів регульованого трифазного асинхронного електропривода.

Дослідження трифазного напівпровідникового перетворювача напруги з широтно-імпульсним керуванням проводився з використанням положень теорії електричних кіл синусоїдального і несинусоїдального періодичного струму та комп'ютерного моделювання в системі MatLab.

На створеній комп'ютерній моделі приведена методика вибору і вибрані параметри RC-снаббера для захисту електронного ключа і покращення гармонічного складу вихідної напруги та струму перетворювача.

Результати досліджень на комп'ютерній моделі електромагнітних процесів у колі силового електронного ключа показали, що при активно-індуктивному навантаженні ( $R = 48 \text{ Ом}$ ,  $L =$

---

\*Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент І. М. Голодний

© І. М. Голодний, О. В. Санченко, 2018