

УДК 621.137:621.002

### КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИЙ КОМПЛЕКС ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ ЛАНОК ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

**Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vla-ruslan@yandex.ru, seemAl@kdu.edu.ua

Тенденція розвитку енергозберігаючих технологій призводить до впровадження сучасних напівпровідникових пристроїв та систем управління ними, які покращують режими роботи технологічних об'єктів, викликаючи при цьому негативні електромагнітні явища. Механізми виникнення, розповсюдження та боротьби з указаними явищами розкриваються в ході підготовки фахівців напряму «Електротехніка та електротехнології» в дисциплінах «Електромагнітна сумісність в системах електроспоживання» та «Контроль та управління якістю електричної енергії». Якісне вивчення дисциплін вимагає сучасного лабораторного обладнання. Приведений в роботі комп'ютеризований комплекс включає керовані силові напівпровідникові пристрої, підключення яких може комбінуватися відповідними комутаційними елементами, при цьому в схему введені фільтруючі елементи. В роботі наведені приклади можливих досліджень.

**Ключові слова:** тиристорний регулятор напруги, тиристорний перетворювач, вищі гармоніки.

### КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

**Р. В. Власенко, А. В. Бялобржеский**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vla-ruslan@yandex.ru, seemAl@kdu.edu.ua

Тенденция развития энергосберегающих технологий приводит к внедрению современных полупроводниковых устройств и систем управления ими, которые улучшают режимы работы технологических объектов, вызывая при этом негативные электромагнитные явления. Механизмы возникновения, распространения и борьбы с указанными явлениями раскрываются в ходе подготовки специалистов направления «Электротехника и электротехнологии» в дисциплинах «Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения» и «Контроль и управление качества электрической энергии». Качественное изучение дисциплин требует современного лабораторного оборудования. Представленный в работе компьютеризированный комплекс включает управляемые силовые полупроводниковые устройства, подключение которых может комбинироваться соответствующими коммутационными элементами, при этом в схему введены фильтрующие элементы. В работе приведены примеры возможных исследований

**Ключевые слова:** тиристорный регулятор напряжения, тиристорный преобразователь, высшие гармоники.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** На даний час актуальним є завдання забезпечення електромагнітної сумісності, тобто здатності технічних засобів одночасно функціонувати в реальних умовах експлуатації з необхідною якістю при дії на них електромагнітних перешкод не створюючи недопустимих завад іншим технічним засобам. Зростання насиченості виробничих, учбових, житлових приміщень електричними та електронними технічними засобами потребує постійного вдосконалення організаційно-технічних і санітарно-гігієнічних заходів щодо підвищення рівня електромагнітної безпеки та надійності функціонування технічних засобів. Останнє значною мірою визначається електромагнітною сумісністю обладнання, тобто ступенем взаємного впливу приладів через генеровані ними електромагнітні поля. Режими роботи електротехнологічних установок характеризуються нерівномірним споживанням реактивної потужності впродовж роботи, а також її коливаннями, які викликають коливання напруги. Внаслідок нерівномірності споживання потужності по фазах і нелінійної вольт-амперної характеристики навантаження виникає несиметрія і несинусоїдальність живлячої напруги [1]. Тенденція розвитку енергозберігаючих технологій призводить до впровадження сучасних напівпровідникових систем управління, які покращують режими роботи техно-

логічних об'єктів, викликаючи при цьому електромагнітні перешкоди. Програма підготовки фахівців електротехніків передбачає опанування дисциплін «Електромагнітна сумісності в системах електроспоживання» та «Контроль та управління якістю електричної енергії».

*Аналіз попередніх досліджень.* Тиристорні перетворювачі та тиристорні регулятори напруги використовуються для управління режимами електротехнічних установок. Для дослідження їх характеристик роботи розробляють лабораторні стенди [1]. Застосовані в даний час лабораторні стенди, що включають в свій склад електротехнічні системи, контроль параметрів яких здійснюється аналоговими приладами, низькоінформативні. Обґрунтований спектр лабораторного устаткування, що включає різноманітні електротехнічні системи та пристрої, різноманітні перетворюючі агрегати, як нового, так і старого покоління, релейно-контактні схеми управління, дозволяє вивчати загальні принципи функціонування електротехнічних установок та пристроїв. Вимірювання параметрів традиційними приладами дозволяє досліджувати і аналізувати статичні режими роботи системи електроспоживання. Наявність складних пристроїв управління і комп'ютеризованих вимірювальних систем розширює функціональність лабораторного обладнання. Наявність комп'ютери-

зованої системи і вимірювальних датчиків дозволяє реалізувати складні алгоритми обробки контрольованих параметрів [2]. На основі проведеного аналізу існуючих комп'ютеризованих комплексів, в основу яких покладені такі основні елементи: електрична мережа; вимірювальні елементи; системи захисту та виконуючий елемент, можна констатувати, що комп'ютеризований електротехнічний комплекс задовольнить потреби, як з позиції проведення дослідницьких робіт, так і з позиції підвищення якості навчального процесу.

Мета роботи – розробка структури комплексу із дослідження процесів енергоспоживання тиристорного перетворювача і тиристорного регулятора напруги та елементів фільтрації вищих гармонік струму різної конфігурації.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Тиристорний перетворювач і тиристорний регулятор напруги застосовуються в якості пристрою для плавного пуску, пристроїв регулювання напруги або струму в процесі пуску, асинхронних чи синхронних машин. Традиційною сферою застосування тиристорних перетворювачів є системи збудження електричних машин. Режими роботи тиристорних перетворювачів обумовлюють появу в системах електропостачання вищих гармонічних складових. Тиристорний перетворювач характеризується нерівномірним споживанням реактивної потужності впродовж

роботи, а також її коливаннями, які викликають коливання напруги. Вищі гармоніки негативно впливають на роботу промислових електромереж, систем автоматики, телемеханіки і зв'язку, зменшують надійність і термін служби електроустаткування. Регулювання напруги виконується за рахунок зміни кута відкриття силових тиристорів. У зв'язку з неможливістю відображення існуючим лабораторним обладнанням повних електроенергетичних процесів, які проходять в електричній мережі, поставлену задачу створення комплексу, впровадження якого дозволить більш глибоко вивчити процеси, що відбуваються в електротехнічних пристроях та в системі електропостачання, а також допомогти організувати навчальний процес та розширити спектр питань, що вивчаються.

Основними задачами комп'ютеризованого лабораторного стенду є: дослідження процесів споживання електричної енергії в трифазній мережі змінного струму тиристорним перетворювачем та тиристорним регулятором напруги; дослідження їх режимів роботи; дослідження споживання електричної енергії, їх показників якості, та використання фільтрів для покращення цих показників. Для визначення всього переліку робіт, що виконуються на лабораторному комплексі було розглянуте схемне рішення – рис. 1.

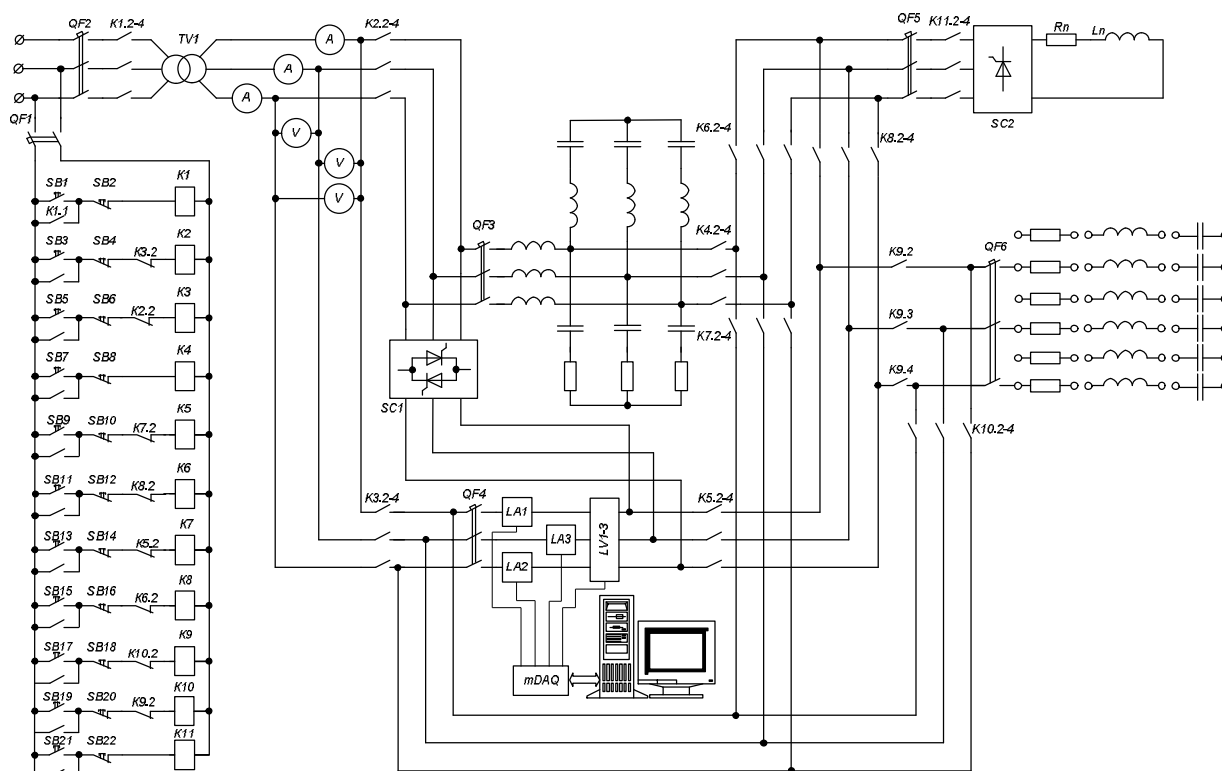


Рисунок 1 – Функціональна схема лабораторного комплексу

Комп'ютеризований лабораторний комплекс, розроблений професорсько-викладацьким складом Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, складається з тиристорного перетворювача, тиристорного регулятора напруги, контактної апаратури, вимірювальних при-

строїв, блоку датчиків, пристрою аналогово-цифрового перетворення, активно-індуктивного навантаження, промислового фільтра типу  $E\Phi-32$  та набору  $RLC$ -елементів для створення фільтрів різних типів. Для контролю параметрів використовуються вимірювальні пристрої та датчики струму і

напруги. Комутація силових кіл стенду здійснюється контакторами, функції захисту відповідних кіл реалізують автоматичні вимикачі. Структура стенду дозволяє проводити місцеве і дистанційне управління силовими перетворювачами від зовнішніх пристроїв, зокрема від електронно-обчислювальної машини, при програмній побудові системи регулювання.

Живлення стенду відбувається від лабораторної мережі трифазної напруги змінного струму промислової частоти з діючим значенням лінійної напруги 380В. Силове коло стенда захищається трифазним автоматичним вимикачем QF2. Стенд підключається до мережі за допомогою лінійного контактора K1 за умов натискання кнопки SB1. Відключення контактора відбувається за умов дії на кнопку SB2. Робота контактора K2 управляється кнопками SB3 та SB4. Струм та напруга мережі контролюються відповідними вимірювальними приладами, автоматизований контроль струму та напруги мережі реалізується датчиками струму LA1-LA3 та датчиками напруги LV1-LV3. Контактор K3 (кнопки управління SB5, SB6) забезпечує підключення до мережі тиристорного регулятора напруги (SC1). Контактор K11 підключає до мережі тиристорний перетворювач (SC2), який захищено автоматичним вимикачем QF5. Контактор K4 (кнопки управління SB7, SB8) підключає до мережі промисловий фільтр, який відповідно захищено автоматичним вимикачем QF3. Контактор K10, який управляється кнопками SB19, SB20 вмикає до мережі набір RLC-елементів для створення фільтру, який захищено автоматичним вимикачем QF6. Виходи датчиків під'єднанні до пристрою USB 6008 (National Instruments) за допомогою інтерфейсу вводу-виводу цей пристрій з'єднується з ЕОМ.

Закон зміни струму для кожної групи тиристорного регулятора може бути знайдений з рівняння рівноваги кола [3], справедливого для струму через тиристор в інтервалі провідності  $\alpha \leq \theta \leq \alpha + \lambda$ , поза яким струм не існує:

$$U_m \sin \theta = i \cdot r_n + \omega L_n \frac{di}{d\theta}. \quad (1)$$

Рівняння для струму:

$$i(\theta) = \frac{U_m}{Z_n} \sin(\theta - \varphi) + A e^{tg\varphi}, \quad (2)$$

де  $Z_n = \sqrt{r_n^2 + (\omega L_n)^2}$ ;  $\varphi = \arctg \frac{\omega L_n}{r_n}$ ;  $A$  – постійна

інтегрування, для знаходження якої необхідно врахувати, що при  $\theta = \alpha$ ,  $i = 0$ ;  $\theta$  – інтервал часу;  $\alpha$  – кут відмикання тиристор;  $\lambda$  – кут відімкненого стану тиристор;  $r_n$  – активне навантаження;  $\omega L_n$  – індуктивне навантаження.

З урахуванням цього вираз для струму навантаження:

$$i(\theta) = \frac{U_m}{Z_n} \left[ \sin(\theta + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{tg\varphi} \right]. \quad (3)$$

За період живлення напруги діюче значення струму тиристора:

$$I_{B\alpha.d} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}, \quad (4)$$

де  $I$  – діюче значення струму при повністю відімкнених тиристорах.

Середнє значення струму тиристора:

$$I_{B\alpha.s} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{\pi}. \quad (5)$$

Коефіцієнт форми кривої струму тиристора:

$$D = \frac{I_{B\alpha.d}}{I_{B\alpha.s}} = \sqrt{\pi} \frac{\sqrt{\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2}}}{1 + \cos \alpha}. \quad (6)$$

Коефіцієнт форми вихідної напруги:

$$K_\phi = \frac{U_{\alpha.d}}{U_{\alpha.s}} = \frac{1}{1 + \cos \alpha} \sqrt{\frac{\pi}{2} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right)}, \quad (7)$$

де  $U_{\alpha.s} = \frac{U \cdot \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$  – середнє значення напруги на навантаженні за півперіод живлячої напруги;  $U_{\alpha.d}$  – діюче значення напруги на навантаженні за півперіод живлячої напруги.

Активна потужність, споживана з мережі:

$$P_s = \frac{P}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right), \quad (8)$$

де  $P$  – потужність, споживана з мережі при повністю відімкнених тиристорах.

Споживання реактивної потужності напівпровідниковими пристроями обумовлене в основному двома причинами: природним комутаційним процесом і штучною затримкою моменту відкриття вентилів в цілях регулювання напруги [4].

Наявність в стенді датчиків електричних величин (LA1-LA3, LV1-LV3), пристрою аналогово-цифрового перетворення та ЕОМ дозволяє отримувати під час досліджень миттєві значення напруги та струмів при відповідних кутах та спостерігати їх зміну у часі. У результаті дослідження системи отримують графіки струму, напруги, активної і реактивної потужності в трьох фазах лінії в точці підключення. На рис. 2 і 3 наведений приклад розрахунку вищих гармонік струму тиристорного регулятора напруги і тиристорного перетворювача, значення яких були отримані з відповідних датчиків. Аналогічним чином отримують розподіл гармонік струму в фазах В і С.

Із рис. 2 і 3 видно, що перша гармоніка струму має найбільше значення. Інші гармоніки мають незначні значення. При зміні діапазону фазового кута регулювання значення струму гармонік зменшуються.

Відповідно до рис. 3 видно, що при максимальному струмі через тиристор, тобто коли фазовий кут регулювання  $\alpha = 0$  гармоніки 1, 5, 7, 9, 11, 13 струму

мережі мають максимальні значення. Це враховується при налаштуванні фільтру.

Проведено аналіз споживання активної і реактивної потужності тиристорного регулятора напруги [6] (на рис. 4 і 5).

На рис. 5 приведено розподіл вищих гармонік реактивної потужності тиристорного регулятора напруги при зміні діапазону фазового кута управління від 0 до 150 градусів, отримане шляхом виміру та розрахунку з використанням комплексу (рис. 1).

Для дослідження впливу режимів роботи тиристорних перетворювачів і тиристорних регуляторів напруги на показники якості електричної енергії за властивістю несинусоїдальності [5] визначають коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму та коефіцієнт гармонійної складової струму, що визначаються відповідно до виразів:

$$K_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (i_k)^2}}{i_1} \cdot 100\%, \quad (9)$$

$$K_n = \frac{i_k}{i_1} \cdot 100\%. \quad (10)$$

де  $i_k$  – амплітуда  $k$ -ої гармоніки;  $i_1$  – амплітуда основної гармоніки.

На рис. 6 і рис. 7 зображено залежність коефіцієнту спотворення синусоїдальності кривої струму тиристорного перетворювача і регулятора напруги, які отримані при дослідженнях.

Приклад залежності коефіцієнту  $n$ -ої гармонійної складової струму тиристорного перетворювача та тиристорного регулятора напруги показаний на рис. 8 і 9 відповідно.

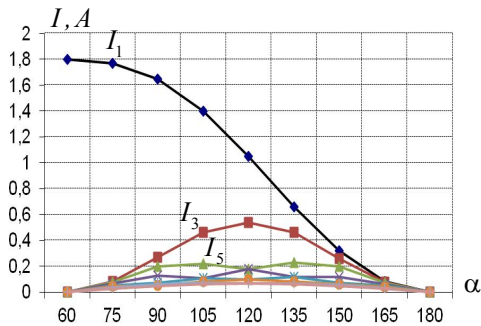


Рисунок 2 – Струм вищих гармонік тиристорного регулятора напруги

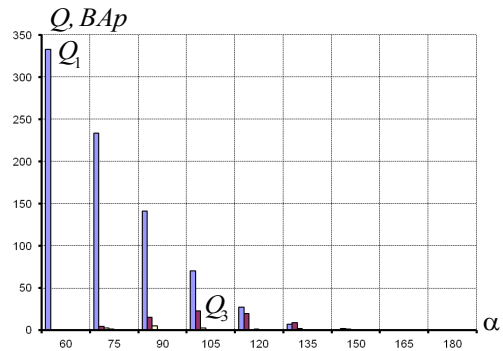


Рисунок 5 – Вищі гармоніки реактивної потужності

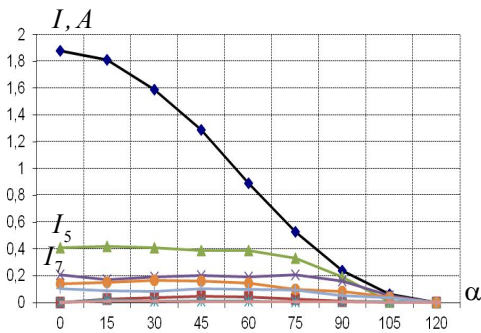


Рисунок 3 – Струм вищих гармонік тиристорного перетворювача

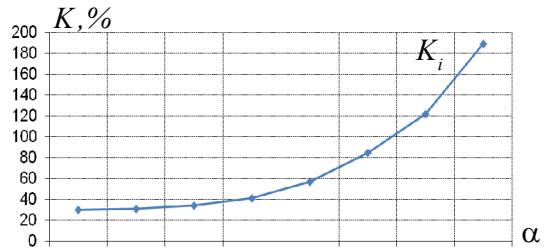


Рисунок 6 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму тиристорного перетворювача

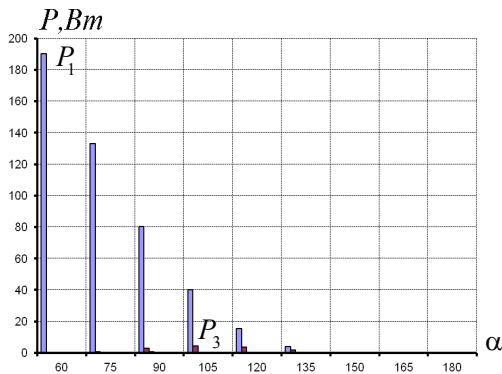


Рисунок 4 – Вищі гармоніки активної потужності

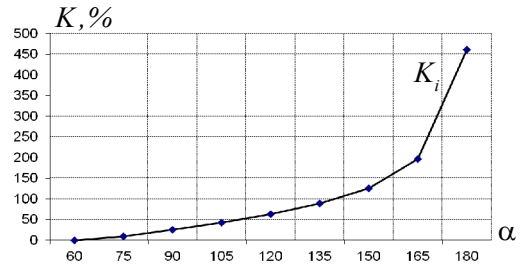


Рисунок 7 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої струму тиристорного регулятора напруги

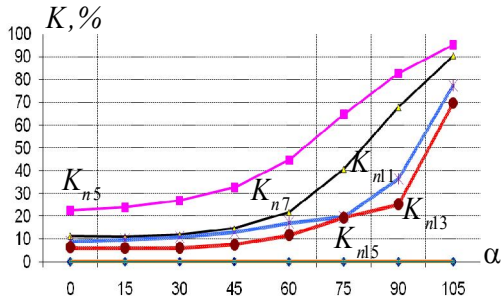


Рисунок 8 – Коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової струму тиристорного перетворювача

Для зниження рівня вищих гармонік на стенді встановлюються паралельні фільтри окремо на кожну гармоніку [6]. Наприклад за схемою рис. 10.

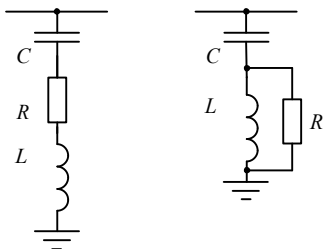


Рисунок 10 – Схема вузькосмугового фільтру

При розрахунку силових фільтрів вищих гармонік, що складаються з  $R$ ,  $L$ ,  $C$  елементів, необхідно, щоб допустимий рівень напруги і струму та їх номінальні значення для конденсаторів не перевищували допустимих значень.

При установці фільтру через нього протікає струм:

$$I_{Fk} = I_k \frac{X_{Ck}}{k \cdot X_{Ck} + \left( k \cdot X_{Lk} - \frac{X_{Ck}}{k} \right)}, \quad (11)$$

при резонансі  $I_{Fk} = I_k$ ,  $I_{Ck} = 0$ .

При резонансній частоті, коли  $\omega_{\phi} = \omega$ , має місце граничне значення імпедансу: послідовний резонанс  $Z_F = 0$ , паралельний резонанс  $Z_F = \infty$ .

При цьому опір вузькосмугового фільтру:

$$Z_F = R + j \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right). \quad (12)$$

Резонанс встановлюється при рівності нулю результуючого реактивного опору, а його частота:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (13)$$

при цьому  $Z_F = R$ .

Важливим показником фільтру є його добротність:

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{Z_0}{R}. \quad (14)$$

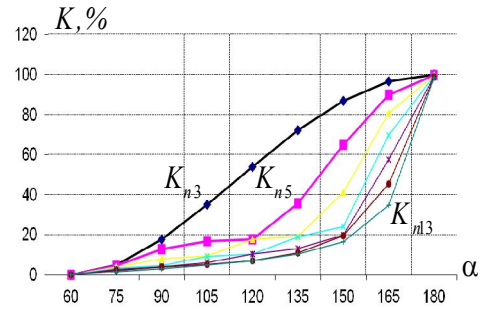


Рисунок 9 – Коефіцієнт  $n$ -ої гармонійної складової струму тиристорного регулятора напруги

Добротність фільтру визначає його частоту пропускання. Фільтр з високим рівнем добротності настроюється чітко на одну частоту. Фільтр же з низьким рівнем добротності має знижений опір в достатньо широкому спектрі частот.

Описані види фільтрів реалізуються на лабораторному стенді за допомогою з'єднання клем між резисторами, індуктивностями і конденсаторами.

Виходячи з функціонального складу лабораторного стенду, можливо виділити наступні спрямування експериментальних та лабораторних досліджень, що можуть бути на ньому реалізовані:

- дослідження комп'ютеризованої системи вимірювання параметрів струму та напруги в трифазній електричній мережі;
- дослідження рівня гармонік, діючого, середнього значень струму та напруги в трифазній мережі змінного струму за умов зміни навантаження;
- дослідження складових активної, реактивної, повної потужності в електричній мережі змінного струму з несинусоїдальним струмом;
- дослідження показників якості електричної енергії в трифазній мережі змінного струму з нелінійним несиметричним навантаженням;
- синтез та дослідження режимів роботи системи корекції коефіцієнту потужності в трифазній мережі змінного струму;
- дослідження силових резонансних фільтрів;
- дослідження статичних і динамічних характеристик трифазного тиристорного регулятора з активно-індуктивним навантаженням.

**ВИСНОВКИ.** Комп'ютеризований комплекс дослідження фільтруючих елементів для споживачів з нелінійним навантаженням за використанням сучасних методів аналізу енергетичних показників та показників якості режиму електричних систем є потужним інструментом для підготовки фахівців електротехніків.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В., Рабинович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
2. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М.: ДОДЭКА XXI, 2005. – 384 с.

3. Руденко В.С. Основы преобразовательной техники. – К.: Техніка 1978. – 376 с.

4. F. Chaki, I. Hermann, I. Ipsits, A. Karpati and P. Magyar. Power electronics: problems manual. – В.: Budapest, 1979. – 384 p.

5. Жежеленко І.В., Саенко Ю.Л. Показники яко-

сті електроенергії і їх контроль на промислових підприємствах. – М.: Енергоатомвид, 2000. – 252 с.

6. Висяшев А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах: учебное пособие. – И., 1997. – Част. 2. – 92 с.

#### COMPUTERIZED RESEARCH COMPLEX OF FILTER CIRCUITS FOR NON-LINEAR LOAD

**R. Vlasenko, O. Bialobrzewski**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: vla-ruslan@yandex.ru, seemAl@kdu.edu.ua

The development tendencies in energy saving technologies conduce to introduction of modern semiconductor devices and management systems that improve the operation modes of technological objects but cause electromagnetic interference. As new disciplines, "Electromagnetic compatibility in power systems" and "Control and management of energy quality", were introduced in the studying programmes for students, the problem of development of modern computerized complex for laboratory research has become an urgent one. The paper considers a functional diagram of the new elaborated laboratory complex that includes thyristor converter and thyristor voltage regulator, which can use combined switching elements in the output circuit. To study the scheme, the filter elements were imbedded in it. The paper also presents some examples of the research available using the elaborated scheme.

**Key words:** thyristor voltage regulator, thyristor converter, higher harmonics.

#### REFERENCES

1. Zhezhelenko, I.V., Rabinovich, M.L., and Bogko, V.M. (1981), *Yakist' electrychnoyi energii na promyslovyh pidpryyemstvah* [Divinity the quality of electricity in the industry], Tekhnika, Kyiv, Ukraine.

2. Voronin, P. (2005), *Silovye poluprovodnikovye kluchi: semeystva, haracteristiki, primenenie* [Power semiconductor switches: family, features, application], DODEKA XXI, Moscow, Russia.

3. Rudenko, V. (1978), *Osnovy preobrazovatelnoy tekhniki* [Transformative technology basics], Technika, Kyiv, Ukraine.

4. Chaki, F., Hermann, I., Ipsits, I., Karpati, A., and Magyar, P. (1979), *Power electronics: problems manual*, Budapest, Hungary.

5. Zhezhelenko, I. and Saenko, Y. (2000), *Pokaznyky yakosti electroenergiyi I yih kontrol' na promyslovyh pidpryyemstvah* [Indicators of quality power and their control in the industry], Energoatomizd, Moscow, Russia.

6. Visyashev, A. (1997), *Kachestvo electrichekoy energii i electromagnitnaya sovmostimost' v electroenergeticheskikh sistemah* [Power quality and electromagnetic compatibility in power systems], part 2, Irkutsk, Russia.

Стаття надійшла 03.02.2014.