

**В.Ю. Качалка, О.В. Бялобржеський, канд. техн. наук**

(Україна, м. Кременчук, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ МЕТОДА І ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ОДНОФАЗНОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА**

**Вступ.** У зв'язку з підвищенням ціни за використання електроенергії, що спостерігається останнім часом, все більше уваги в Україні та за кордоном приділяється енергозбереженню в системах електропостачання. Гостро стоять питання в області створення і застосування ефективних технічних засобів зі збереження електроенергії при передачі її до електроспоживачів [1,2].

Традиційно для керування потоком електроенергії використовувалися такі методи: компенсація реактивної потужності за рахунок паралельного підключення вимикачами реакторів або конденсаторів; компенсація реактивної потужності за допомогою послідовного включення в лінію конденсаторів; включення фазоповоротних пристроїв.

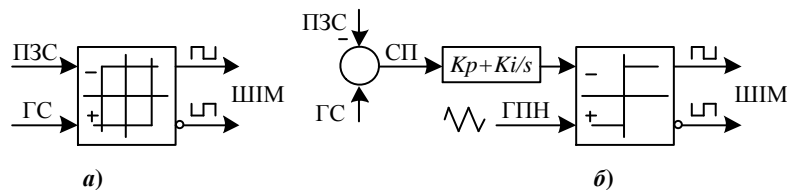
Розвиток силової електроніки сприяв створенню і широкому застосуванню потужних, швидкодіючих і повністю керованих електронних ключів типу IGBT, GTO, IGCT та ін. У результаті стала можливою імпульсна модуляція перетворюваних струмів і напруг. Одночасно почали розвиватися багаторівневі схеми, що дозволяють підвищити вихідну напругу перетворювачів і якість імпульсної модуляції струмів і напруги за рахунок поєднання амплітудної та частотної їх реалізації. Це призвело не тільки до створення нових типів перетворювачів з малим спотворенням, але і засобів забезпечення якості електроенергії, споживаної і генерованої існуючими джерелами [3].

Сучасний тип повністю керованих, швидкодіючих ключів (на транзисторах та тиристорах, що запираються) стало базою для розробки нового виду силових електронних пристроїв – силових активних фільтрів (АФ), які здатні одночасно з високою точністю та швидкодією здійснювати компенсацію споживаної з мережі реактивної потужності, потужності спотворення і симетрувати фазні струми мережі [2].

Зазначені пристрої та системи керування ними забезпечують певне підвищення якості електричної енергії за деякими показниками, але в силу принципів їх дії мають обмежену ефективність [3]. Як показано в роботі [4], залежно від алгоритму керування вентилями перетворювача АФ сам може бути генератором вищих гармонік.

Таким чином, його робота полягає у визначенні механізму та залежностей коефіцієнта викривлення струму активного фільтра від параметрів режиму керування вентилями.

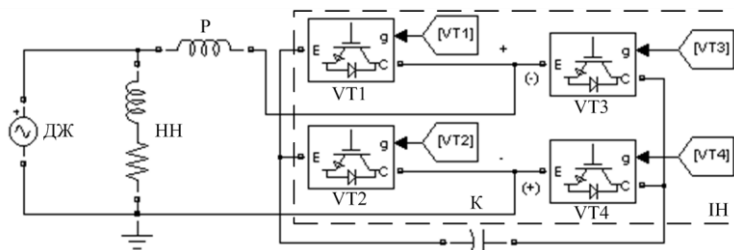
**Матеріал та результати досліджень.** Згідно з роботами [4-6] виділяють два базових методи керування АФ: релейне регулювання з певною шириною петлі гістерезису (рис. 1, а); широтно-імпульсне регулювання модулюючим пілклоподібним сигналом певної частоти (рис. 1, б) [4].



**Рис. 1. Блок-схема релейної системи керування (а) та системи керування з ШІМ (б)**

Для виконання досліджень синтезовано модель однофазного АФ (рис. 2), транзистори якого керуються підсистемами, реалізованими за описаними алгоритмами регулювання.

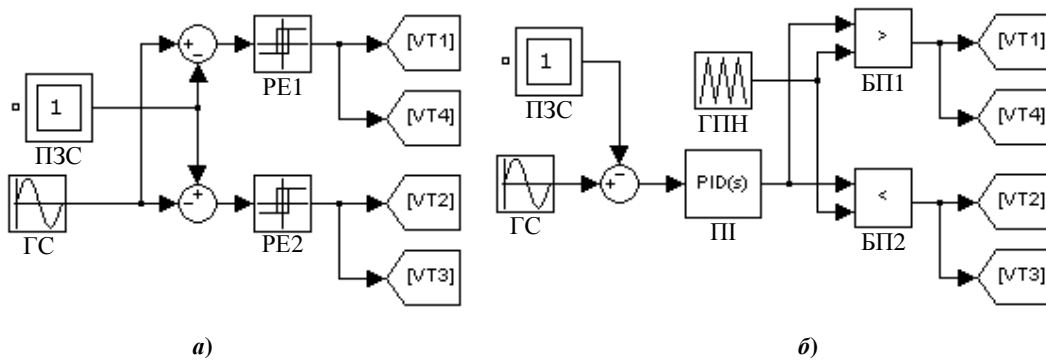
Модель АФ (рис. 2) складається з однофазного джерела електричної енергії ( $U=220$  В,  $f=50$  Гц), навантаження ( $R_n=10,4$  Ом,  $L_n=0,058$  Гн), реактора ( $L_p=0,0054$  Гн), автономного інвертора, до складу якого



**Рис. 2. Схема силової частини АФ**

входять чотири повністю керованих транзистори (VT1–VT4), накопичувальний конденсатор ( $C_k=0,002\text{Ф}$ ). Параметри реактора та конденсатора розраховані для зазначеної мережі та навантаження відповідно до рекомендацій, викладених у роботі [7].

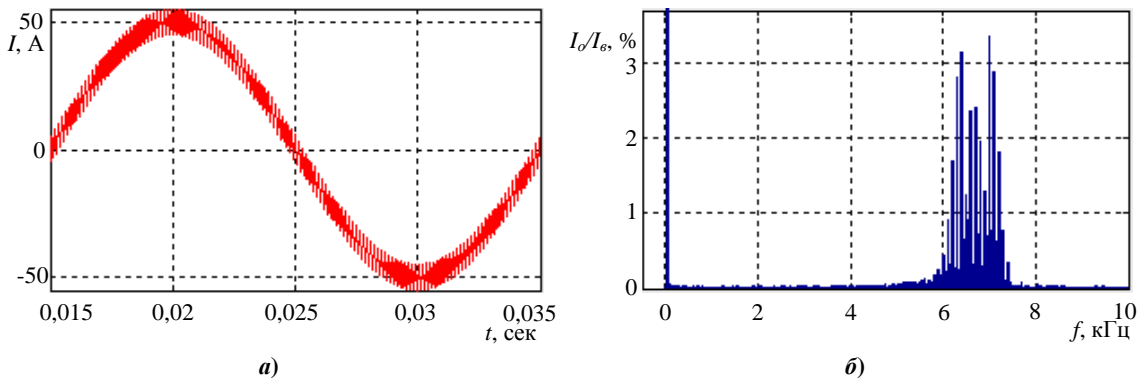
Релейний режим керування перетворювачем реалізовано схемою (рис. 3, а) відповідно до рекомендацій [6]. Заданий струм, який подається на входи компараторів з протилежними знаками, генерується блоком ГС. На інші входи компараторів подається сигнал, пропорційний поточному значенню струму з виходу блока контролю поточного значення струму (ПЗС). Сигнал помилки з виходу компараторів надходить на входи релейних елементів (РЕ), на виходах яких залежно від величини сигналу помилки формуються імпульси. Значення амплітуди струму та ширина петлі гістерезису в планованих дослідженнях є факторами керування.



**Рис. 3. Математична модель релейної системи керування (а) та системи керування з ШІМ (б)**

Режим широтно-імпульсного керування перетворювачем реалізований схемою (рис. 3, б) відповідно до рекомендацій [6]. Сигнал помилки (СП) з виходу компаратора надходить на вхід пропорційно-інтегрального регулятора (ПІ), вихід якого з'єднаний з блоками порівняння (БП). На другий вхід блока порівняння надходить сигнал з генератора пилоподібної напруги (ГПН). У результаті порівняння на виходах БП формуються імпульси керування транзисторами, ширина яких залежить від режиму та параметрів регулятора.

Унаслідок проведення попередніх експериментів для АФ з релейною системою керування за умов заданого струму компенсатора  $I_f=50\text{А}$  та зони релейного регулювання  $\Delta I=0,1\text{А}$  було отримано графік струму (рис. 4, а) та його спектральний склад (рис. 4, б). При цьому окрім основної гармоніки струму, відстеження якої є задачею роботи пристрою, спостерігаються високочастотні пульсації в діапазоні частот 6–7,5 кГц. Ці пульсації в даному разі призводять до спотворень струму  $THD=8,41\%$ .



**Рис. 4. Часова залежність (а) та спектральний склад струму (б) АФ релейної системи керування протягом періоду**

Так само проведений експеримент із системою керування (рис. 3, б). За умов заданого струму компенсатора  $I_f=50 \text{ А}$ , коефіцієнта підсилення ПІ-регулятора  $K_p=0,5$  [8] та заданої частоти модуляції  $f=7500\text{Гц}$  було отримано графік струму та його спектральний склад (рис. 5). При цьому в спектральному складі струму чітко виражені основна гармоніка та гармоніка, яка відповідає частоті модуляції. Слід відзначити, що відпрацювання системи за фазою струму  $\Delta\varphi=50$  град та коефіцієнт гармонік струму  $THD=7,44 \%$ .

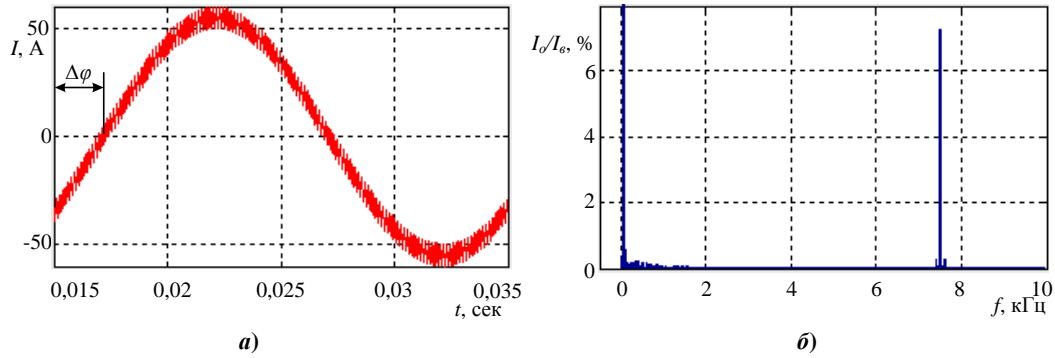


Рис. 5. Часова залежність (а) та спектральний склад струму (б) АФ системи керування з ШІМ протягом одного періоду

У результаті проведення експериментів для пристрою із системою керування за рис. 3, а (змінювалися  $I$  та  $\Delta I$ ) досліджувалися основна гармоніка струму, коефіцієнт гармонік ( $THD$ ) та частота пульсацій гармонік. Для даної системи керування при  $I_1=10$  А,  $I_2=50$  А,  $I_3=100$  А, змінах  $\Delta I=0,01\dots 0,5$  А було отримано графічні залежності коефіцієнта гармонік від зазначених параметрів (рис. 6).

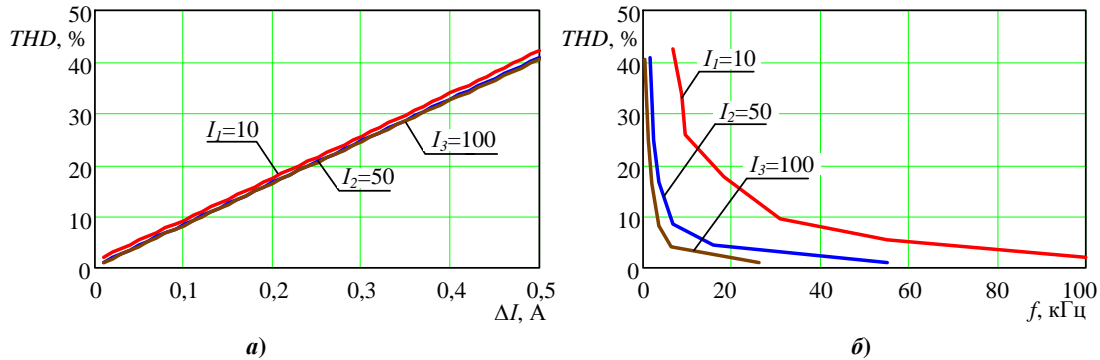


Рис. 6. Графіки залежності коефіцієнта гармонік від зони релейного регулювання (а) та частоти пульсацій гармонік (б)

Лінійність графіка (рис. 6, а) зумовлена аналітичною залежністю [9]. Залежність  $THD$  від частоти пульсацій (рис. 6, б) емпірично можна подати у вигляді гіперболічної кривої та відповідно апроксимувати для кривої  $I_3=100$  А:

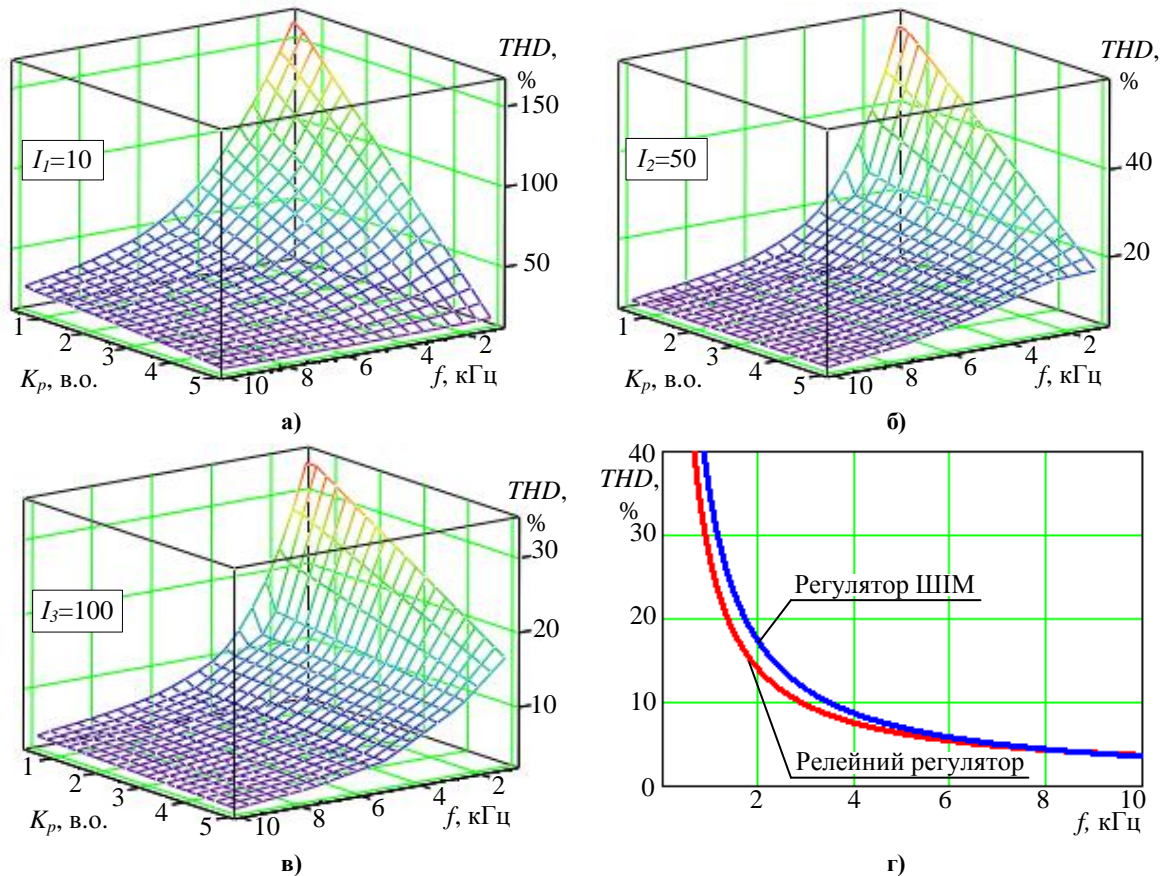
$$THD(f) = a + b/f, \quad (1)$$

де  $a, b$  – коефіцієнти апроксимації ( $a = 1,14065652736$ ,  $b = 2,56544982184 \cdot 10^4$ );  $f$  – частота пульсацій струму, Гц.

При роботі пристрою із системою керування за рис. 3, б змінними були: основна гармоніка струму, коефіцієнт підсилення пропорційної складової ПІ-регулятора та частота модуляції. Відповідно до рекомендацій з вибору параметрів [5] проведено серію експериментів, контролюючи  $THD$ , за якими побудовано графіки залежності коефіцієнта гармонік від коефіцієнта підсилення ПІ-регулятора та від частоти модуляції при  $I_1=10$  А (рис. 7, а),  $I_2=50$  А (рис. 7, б),  $I_3=100$  А (рис. 7, в).

Аналізуючи графіки, наведені на рис. 7, а, слід відзначити, що залежність  $THD$  для різних частот (наприклад, для основної гармоніки струму 10 А) на частотах, більших за 2,5кГц, мають установлений характер, це явище можна прогнозувати і для інших значень струму, але при більших коефіцієнтах підсилення. Таким чином, суттєве підвищення частоти модуляції при великих значеннях коефіцієнта підсилення не є раціональним з позиції зниження  $THD$  та підвищення втрат у напівпровідникових елементах.

Для залежності зображеної на рис. 7, з, при струмі  $I_3=100$  А та коефіцієнті регулювання  $K_p=0,5$  виконано апроксимацію гіперболічною функцією (1) з коефіцієнтами  $a=1,3611999498 \cdot 10^{-1}$  та  $b=3,42924000014 \cdot 10^4$ . На рис. 7, з побудовано аналітичні залежності  $THD$  від частоти вищих гармонійних складових струму, отримані для двох варіантів систем керування. Із графіків випливає, що за умов вибору параметрів керування обидві схеми регулювання (рис. 3, а та б) можуть бути зведені до однакових умов за параметром  $THD$ .



**Рис. 7.** Графіки залежності коефіцієнта гармонік від коефіцієнта підсилення ШІ-регулятора та частоти модуляції при  $I_1=10$  А (а),  $I_2=50$  А (б),  $I_3=100$  А (в); залежність коефіцієнта гармонік від частоти модуляції для різних систем керування (г)

**Висновки.** 1. Залежності коефіцієнта гармонік від частоти модуляції в обох випадках є гіперболічними та знижуються зі зростанням коефіцієнта підсилення у разі широтно-імпульсного керування, що дозволяє використовувати це для зменшення частоти модуляції.

2. При зміні параметрів керування обидві схеми регулювання (рис. 3, а та б) можуть бути зведені до однакових умов за параметром коефіцієнта гармонік.

#### Список літератури

1. Волков А.В., Метельский В.П. Исследование функционирования и энергоэффективности применения силового активного фильтра для четырехпроводной трехфазной сети переменного напряжения // ISSN 1607-7970. Техн. электродинамика. 2010. №5
2. Волков В.А. Снижение сетевых потерь мощности посредством симметрирования сетевых фазных токов активным фильтром // Вісник КДУ і мені Михайла Остроградського . Випуск 3/2010 (62). Частина 2
3. Бурман А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие / А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.
4. Juan W. Dixon, Sebastian Tepper M. Analysis and evaluation of different modulation techniques for active power filters. IEEE 1994, Dept. of Electrical Engineering Universidad Catolica de Chile Casilla 306, Santiago, CHILE.
5. Mihaela Popescu. Optimum control strategy of three-phase shunt active filter system, World Academy of Science, Engineering and Technology № 58. – 2009.
6. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Екатеринбург: УРО РАН, – 2000. – 654 с.
7. Zakis J., Vinnikov D., Laugis J., Rankis I, Feasibility study of flexible systems for reactive power compensation // Науково-прикладний журнал «Технічна електродинаміка» – Київ: ІЕД НАН України, 2010 ч.2, с. 16-21.
8. Гусев А.А. Моделирование трехфазного фильтрокомпенсирующего преобразователя // Зб. наук. пр. «Проблеми сучасної електротехніки-2010», м. Київ, Україна, 2010.
9. Жук А.К. Анализ несинусоидальности напряжения в системах с тиристорными преобразователями при наличии коммутационных колебаний / А.К. Жук, Д.А. Жук, С.Л. Трибулькевич // Електромашинобуд. та електрообладн.: Міжвід. наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 64. – С. 37-44

*Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, доц. Якімцем С.М.*