

РОЗРОБКА МОДЕЛІ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ВИЩИХ ГАРМОНІК ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**В. Я. Бунько, кандидат технічних наук
ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»
e-mail: vbunco@gmail.com**

Анотація. Проведено обґрунтування розробки моделі активного фільтра вищих гармонік на базі програмного середовища *MATLAB*, які впливають на показники якості електричної енергії в розподільних мережах системи електропостачання сільськогосподарських та промислових підприємств. Побудовано модель, яка дасть змогу аналізувати режими роботи різних перетворювальних схем і електронних пристроїв для дослідження показників якості електричної енергії.

Ключові слова: активний фільтр, *MATLAB*, вищі гармоніки, якість електричної енергії, нелінійне навантаження, спектральний аналіз, коефіцієнт несиметрії

Активний фільтр гармонічних складових струму і напруги представляє собою складну електротехнічну систему. Широке застосування в інженерній практиці різних методів автоматизації проектування дає змогу перейти від традиційного макетування розроблюваного пристрою до побудови його віртуальної моделі за допомогою універсальних програм. Це дозволить уникнути великих матеріальних затрат, а також зменшити час на проектування.

Нині існує велика кількість універсальних програм для моделювання, які орієнтовані на аналогові або цифрові схеми [1]. За їх допомогою можна здійснювати аналіз режимів роботи різних перетворювачів електронних пристроїв та блоків [2]. Для дослідження й проектування електронних блоків добре зарекомендували себе прикладні програми, в основі яких використовується пакет *Pspice*. До цих пакетів відносяться *OrCAD 9*, *DesignLab* та інші [3].

В даній статті основною задачею комп'ютерного моделювання є підтвердження результатів теоретичного аналізу електромагнітних процесів, які протікають в активному фільтрі гармонік, а також правильності основних принципів системи управління й прийнятих при цьому припущень. Для даного середовища моделювання активного фільтра гармонік вибрано програмний комплекс *MATLAB*.

Перевагою програмного комплексу *MATLAB*, порівняно з іншими спеціалізованими пакетами для моделювання електричних схем, є великий вибір алгоритмів, як зі змінним, так і з фіксованим кроком

розрахунку. Це дасть змогу скоротити час розрахунку при зберіганні високої точності, за рахунок підбору більш підходящого алгоритму. Також, існує можливість зберігання та подальшого опрацювання результатів моделювання в *Simulink* за допомогою командних засобів *MATLAB* [8].

Мета дослідження – моделювання активного фільтра гармонік, для забезпечення показників якості електричної енергії в розподільних установках систем електропостачання.

Матеріали та методика досліджень. У статті розглянуто питання моделювання активного фільтра, який забезпечує якість електричної енергії в розподільних мережах. Як оптимальне середовище для моделювання компенсуючого пристрою вибрано програмний комплекс *MATLAB*, який є потужним середовищем для проведення математичних розрахунків і моделювання.

Результати досліджень. На рис. 1 подано модель трифазної системи з нелінійним та несиметричним навантаженням, в яку ввімкнено активний фільтр гармонік, реалізовану в програмі *Simulink* програмного комплексу *MATLAB* [8].

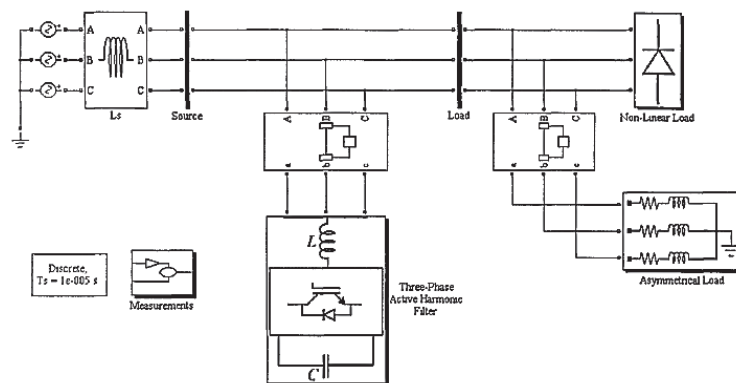


Рис. 1. Модель трифазної системи з нелінійним і несиметричним навантаженням у середовищі *MATLAB*

Для моделювання трифазної мережі в середовищі *MATLAB* використовуємо з бази даних *SimPowerSystems* блок *AC Voltage Source* і блок *Series RLC Branch*. За допомогою даних блоків задаємося напругою і індуктивним опором живильної мережі. Вони показані на рис. 2 та 3.

Для моделювання живильної мережі взято джерело з дійсним значенням лінійної напруги (*Phase-to-phase rms voltage*), рівною 400В, і частотою (*Frequency*), рівною 50Гц [4, 5].



Рис. 2. Ідеальне джерело змінної напруги *AC Voltage Source*

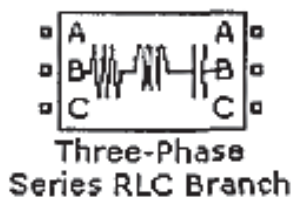


Рис. 3. Послідовна RLC-ланка Series RLC Branch

Як навантаження подано два блоки, один із яких моделює нелінійне навантаження (*Non-Linear Load*) (рис. 4), а інший – несиметричне активно-індуктивне навантаження (*Asymmetrical Load*) (рис. 5). Кожен із елементів може змінювати свої характеристики під час моделювання.

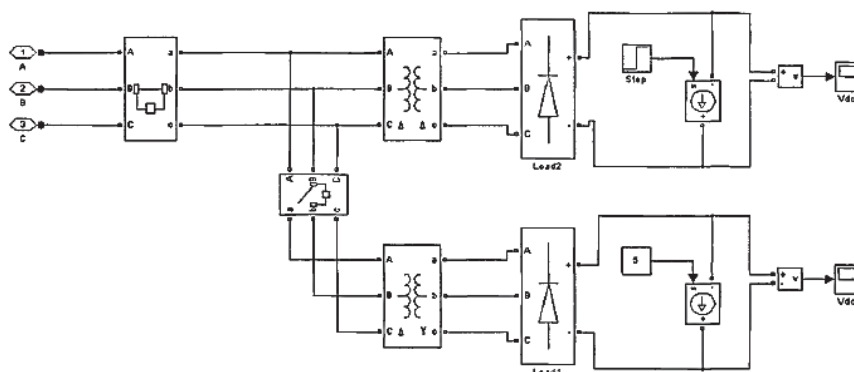


Рис. 4. Блок трифазного нелінійного навантаження (*Non-Linear Load*)

Скористаємося діалоговим вікном для задавання параметрів. При моделюванні задаємо наступні параметри блоку. Опір діода у відкритому стані (*Diodeon-state inductance*) задаємо 0,01 Ом. Це значення характерне для сучасних потужних діодів. Індуктивність діода у відкритому стані (*Diodeon-state inductance*) задаємо рівною 0, оскільки у реальних потужних діодів значення індуктивності дуже мале. Мінімальна напруга анод-катод, необхідна для того, щоб діод відкрився, задаємо рівною 1В. Це значення повністю характерне для всіх потужних діодів [6, 7].

Модель активного фільтра гармонік складається зі стандартного активного фільтра, побудованого на *IGBT*-транзисторах, конденсатора на стороні постійного струму. Активний фільтр використовує блок «*PLL*» для генерації ідеальної синусоїди, яка співпадає по фазі й середньоквадратичному значенню струму навантаження. Миттєва помилка між ідеальною та реальною синусоїдою струму генерується *IGBT*-інвертором через перемикання блока «*Hysteresis*». активний фільтр генерує сигнал помилки в мережу з невеликою витримкою часу, тим самим, забезпечуючи близьку до ідеальної форми синусоїду струму навантаження, і, як наслідок, забезпечує необхідну кількість електричної енергії.

Основні елементи, які входять до складу блоку активного фільтра, подано на рис. 6.

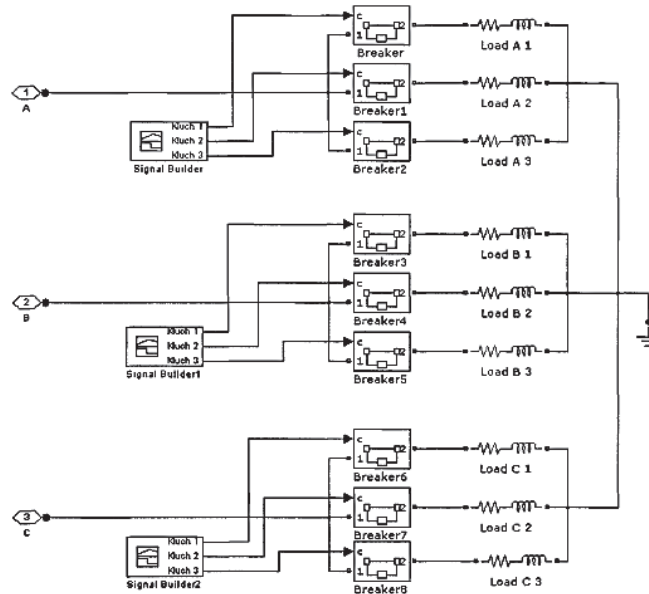


Рис. 5. Блок моделювання трифазного несиметричного активно-індуктивного навантаження

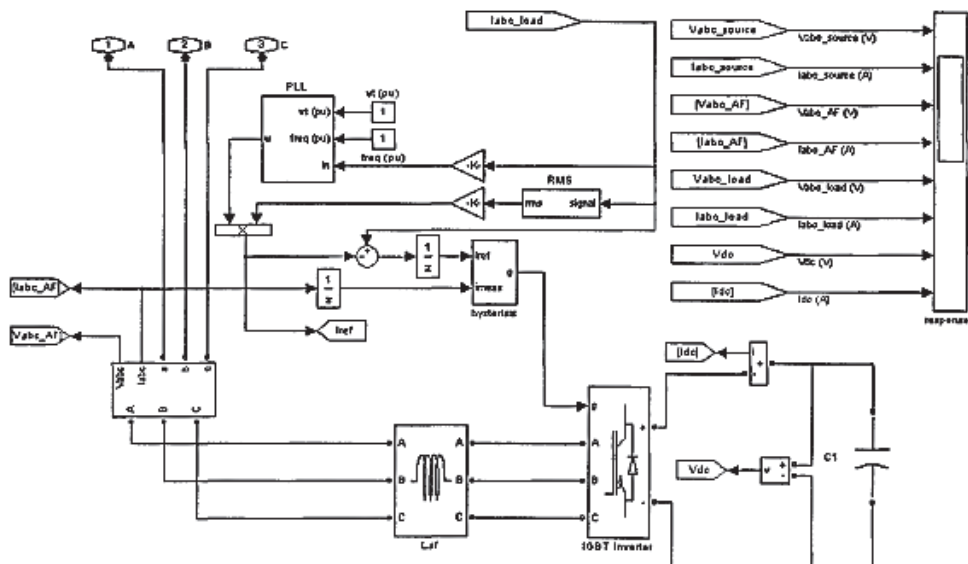


Рис. 6. Модель трифазного активного фільтра в середовищі MATLAB

Параметри силової частини активного фільтра, які використовуються під час моделювання, з урахуванням заданого активно-індуктивного та нелінійного навантаження, мають такі значення:

- накопичувальний конденсатор – ємність $C=3\text{мФ}$;
- індуктивність фільтруючого дроселя (L) на виході активного фільтра, виходячи з потреб фільтрації, рівна $L=10\text{мГн}$.

Для компенсації вищих гармонік використовується пристрій, який складається з восьми блоків *IGBT*-транзисторів, котушок індуктивності, двох конденсаторів на стороні постійного струму й системи управління. Компенсуючий пристрій використовує блок «Control» для модуляції керуючого сигналу силової частини [8].

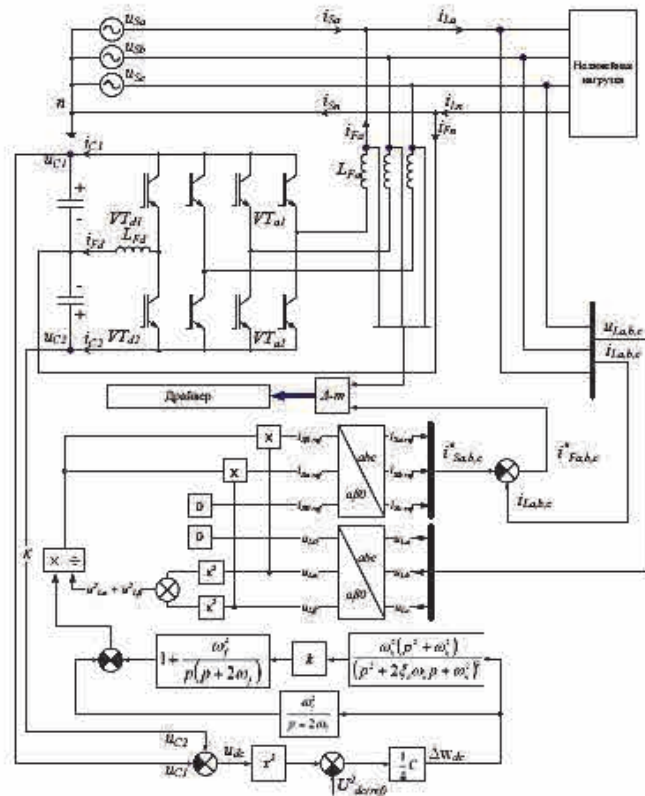


Рис. 7. Схема компенсуючого пристрою вищих гармонік

Для перевірки ефективності роботи отриманої моделі активного фільтра гармонік і системи управління було змодельовано різні режими навантаження, а також проведено оцінку якості компенсації вищих гармонік. Розглянемо режим зі змінним у часі несиметричним навантаженням, яке є несиметричним.

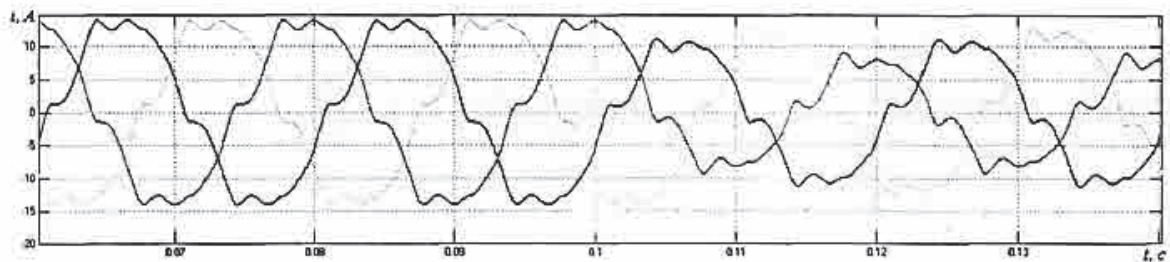


Рис. 8. Струм навантаження до увімкнення фільтра

Спектральний аналіз струму до вимірювання навантаження й після подано на рис. 9 і 10, відповідно. Із даних діаграм видно, що до увімкнення активного фільтра гармонік коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги були рівні $K_u=7,76\%$ і $K_u=9,72\%$ відповідно, до зміни навантаження та після.

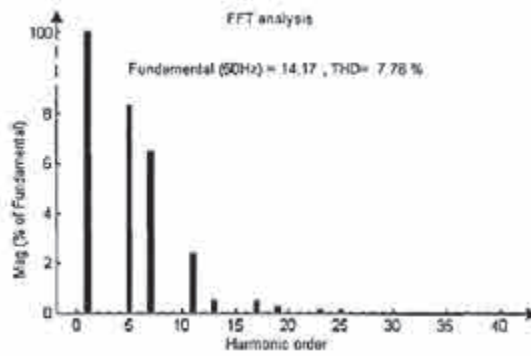


Рис. 9. Спектральний аналіз струму до зміни навантаження з непрацюючим фільтром

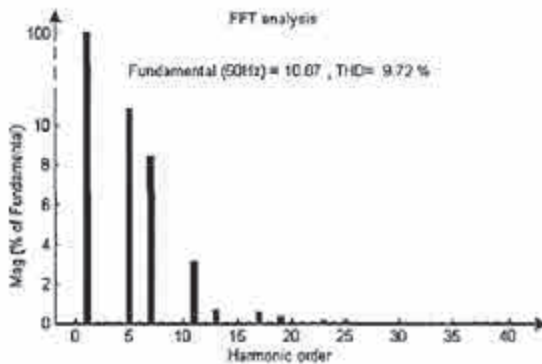


Рис. 10. Спектральний аналіз струму зміни навантаження з непрацюючим фільтром

На рис. 11 подано графік зміни струму навантаження після увімкнення активного фільтра гармонік.

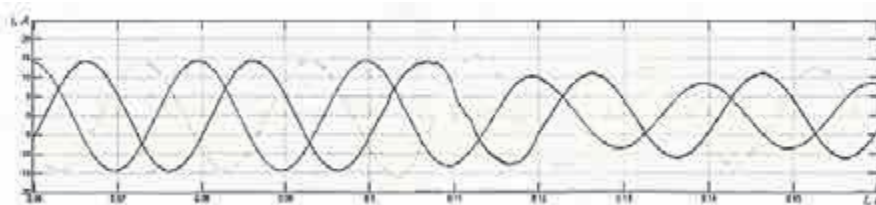


Рис. 11. Струм навантаження після увімкнення фільтра

Кількість компенсації вищих гармонік у режимі зі змінним у часі несиметричним навантаженням можна оцінити по рис. 12 і 13, де подано спектральний аналіз струму навантаження після увімкнення активного фільтра гармонік до його зміни й після. Як видно з графіків, коефіцієнти спотворення синусоїдальності кривої напруги після ввімкнення фільтра рівні $K_u=0,6\%$ і $K_u=0,81\%$ відповідно до та після зміни несиметричного навантаження.

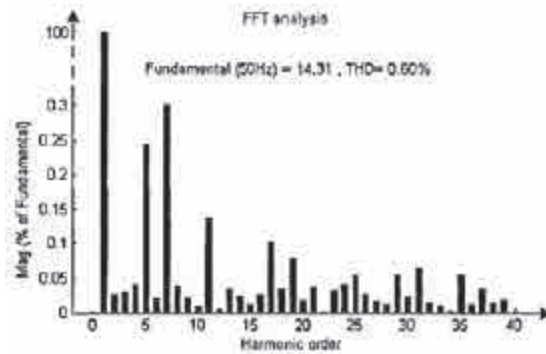


Рис. 12. Спектральний аналіз струму до зміни навантаження з увімкненим фільтром

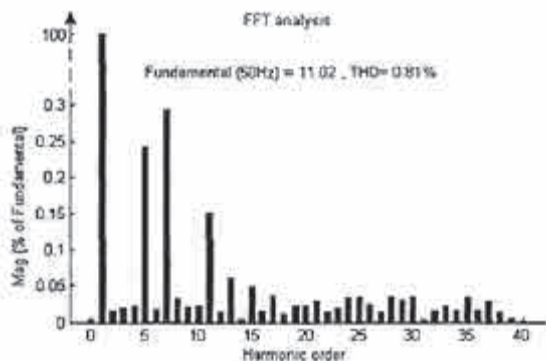


Рис. 13. Спектральний аналіз струму до зміни навантаження з увімкненим фільтром

Висновки

У цілому проведений аналіз роботи моделі трифазного компенсуючого пристрою демонструє коректність та ефективність його роботи в усіх змодельованих режимах. Побудовано віртуальну модель активного фільтра гармонік і його системи управління в додатку *Simulink* програмного забезпечення *MATLAB*. Побудовано віртуальну модель системи електропостачання, яка дає змогу моделювати різні режими навантаження, обумовлені в часі та нелінійністю. Досліджено якість компенсації вищих гармонік у цих режимах. У розглянутих режимах коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги після увімкнення активного фільтра вищих гармонік знижується у 12 разів, що задовольняє вимоги ГОСТ 13109-97 щодо забезпечення показників якості електричної енергії в розподільних мережах системи електропостачання.

Список літератури

1. Бунько В. Я. Обґрунтування впливу вищих гармонік на елементи систем електропостачання та якість електричної енергії / В. Я. Бунько // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2014. Вип. 194, ч.1. – С.127–133.
2. Бунько В. Я. Аналіз електромагнітної сумісності системи «мережа-активний фільтр гармонік», яка впливає на якість електричної енергії / В. Я. Бунько // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2015. – Вип. 209, ч.1. – С. 105–112.

3. Дилингер С. Ю. Вопросы моделирования устройств обеспечения качества электрической энергии / С. Ю. Дилингер // Омский научный вестник. – 2013. – № 1 (117). – С. 168–173.

4. Куско А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, М. Томпсон. – М. : Додэка-XXI, 2008. – 336 с.

5. Лозинова Н. Г. Подавление высших гармоник в схемах передач постоянного тока с применением активных фильтров / Н. Г. Лозинова, М. И. Мазуров, А. В. Николаев // Электрические станции. – 2005. – № 12. – С. 59–63.

6. Лютаревич А. Г. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник / А. Г. Лютаревич, В. Н. Горюнов, Д. С. Осипов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – № 6. – С. 20–24.

7. Остриров В. Н. Экспериментальные исследования трехфазного активного фильтра для применения в современных электронных преобразователях / В. Н. Остриров, Р. В. Мосин // Электричество. – 2003. – № 7. – С. 63–66.

8. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В. Я. Бунько

Аннотация. *Проведено обоснование разработки модели активного фильтра высших гармоник на базе программной среды MATLAB, влияющих на показатели качества электрической энергии в распределительных сетях системы электроснабжения сельскохозяйственных и промышленных предприятий. Построена модель, которая позволит анализировать режимы работы различных преобразовательных схем и электронных устройств для исследования показателей качества электрической энергии.*

Ключевые слова: *активный фильтр, MATLAB, высшие гармоники, качество электрической энергии, нелинейная нагрузка, спектральный анализ, коэффициент несимметрии*

DEVELOPMENT OF ACTIVE FILTER MODEL OF HIGHER HARMONICS INDICATORS FOR QUALITY ELECTRIC POWER

V. Bunko

Annotation. *A study of development models of higher harmonics active filter based software environment MATLAB, affecting the quality parameters of electricity distribution networks in the electrical system of agricultural and industrial enterprises. The model that will analyze different modes of conversion circuits and electronic devices for research quality indicators of electricity.*

Key words: *the active filter, MATLAB, harmonics, quality of electricity, nonlinear load, spectral analysis, the coefficient of asymmetry*