

УДК 621.311

В.В. Шевчук, аспірант, ORCID 0000-0003-0535-2630
Т.Е. Джеря, аспірантка, ORCID 0000-0002-9519-2951
Науковий керівник: д-р техн. наук, проф Волошко А.В.
Кафедра електропостачання

ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ: ОСНОВНІ СПОСОБИ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

У статті висвітлено питання впливу електроприймачів із нелінійною вольт-амперною характеристикою на показники якості електроенергії. Проведено аналіз сучасних способів управління параметрами енергетичних систем для зменшення впливу нелінійних навантажень на якість електричної енергії, зокрема на спотворення форми напруги та струму. Зазначається закордонний досвід проведення заходів для зниження впливу нелінійних навантажень, визначено найперспективніші напрями підвищення якості електроенергії.

Крім проведеного аналізу, авторами запропоновано оригінальний пристрій на основі використання автоматичної стабілізації форми напруги та струму. Наводяться спектральні характеристики струму однієї фази без використання пристрою стабілізації струму і з використанням пристрою, порівняння яких дозволяє зробити висновок про високу ефективність застосування розробленого пристрою зниження впливу тягових підстанцій змінного струму на якість електричної енергії розподільних мереж.

Ключові слова: електрична мережа, електромашинна установка, фільтр, споживач, спотворення форми, якість електричної енергії, нелінійне навантаження.

Вступ. Найбільш важливим показником якості електричної енергії є ступінь спотворення синусоїди напруги та струму. Основною причиною спотворення форми напруги та струму є наявність нелінійного навантаження чи нелінійних елементів у мережі електропостачання. В даний час широкого поширення набули напівпровідникові перетворювачі змінного струму в постійний та постійного струму в змінний. Напівпровідникові елементи перетворювачів працюють у ключовому режимі, що призводить до різкої зміни струмів та напруг на елементах та викликає спотворення форми напруги та струму в системах електропостачання.

Спотворення синусоїдальної форми струмів і напруг призводить до значного зниження ефективності використання електричної енергії. Поява високочастотних складових напруги викликає зростання втрат у магнітопроводах та провідниках елементів систем електропостачання та споживачів. Наявність складових високої частоти за певних умов призводить до виникнення хвильових ефектів у лініях електропередач щодо малої довжини.

Мета та задачі. Аналіз сучасних способів управління параметрами енергетичних систем для зменшення впливу нелінійних навантажень на якість електричної енергії, зокрема на спотворення форми напруги та струму.

Матеріал і результати досліджень. В даний час розроблені заходи щодо придушення 3, 5 та 7-ї гармонійних складових, оскільки присутність гармонічних складових низьких частот може викликати перенапруги (за наявності сприятливих умов)

у магістральних лініях. Не слід забувати про те, що, крім гармонічних складових низької частоти (3, 5, 7-й гармонік), нелінійні навантаження забезпечують присутність гармонічних складових більш високих частот. Довжина ліній електропередачі (ЛЕП) розподільних мереж змінюється не більше від 10-15 до 100-200 км, навантаження розподільних ліній навіть упродовж доби змінюється від номінальної величини до режиму, близького до режиму холостого ходу. Імовірність появи хвильового ефекту в таких лініях на частотах, більших за частоту 5-ї гармоніки, досить висока [3]. Все це вказує на те, що розробка заходів, що зменшують вплив нелінійного навантаження та інших факторів на форму напруги та струмів, є в даний час однією з найактуальніших проблем систем електропостачання.

Аналіз гармонійного складу струмів електричних мереж проводиться регіональними електроенергетичними компаніями Швейцарії з 1995 року. Дослідження показали, що перебіг відносно невеликого струму 7-ї гармоніки з ЛЕП-380 кВ може призвести до перевищення допустимого значення гармонік у низьковольтних мережах, підключених до цих підстанцій (рівень гармонік в одній із мереж 0,4 кВ становив 14%).

Таким чином, гармонічний склад напруги (струму) магістральних або розподільних ЛЕП може перебувати в межах допустимих значень, зміст гармонік може виходити за допустимі межі. Тому аналіз гармонійного складу напруг і струмів та розробка заходів щодо придушення гармонік розподільних мереж та мереж низької напруги є дуже актуальною проблемою [1; 2].

Для покращення форми напруги та струму вітчизняні та зарубіжні фахівці використовують різноманітні способи. За принципом дії існуючі способи придушення вищих гармонійних складових напруг і струмів можна поділити на такі підгрупи:

- зміна топології мережі електропостачання регіону;
- використання пасивних фільтрів у мережах;
- використання активних фільтрів для захисту мереж електропостачання;
- використання пристроїв з автоматичною стабілізацією форми напруги;
- використання вольтододаткових пристроїв;
- використання електромашинних установок.

Зміна топології мережі електропостачання регіону.

Вплив топології системи електропостачання на гармонійний склад напруги споживачів досить детально проаналізовано у Швейцарії. При певних конфігураціях мережі електропостачання амплітуда 5-ї та 7-ї гармоніки різко зростали і перевищували допустимі значення. Моделювання мережі електропостачання показало, що частотна характеристика системи електропостачання має резонансну частоту, близьку до 5 або 7 гармонікам і становить приблизно 350 Гц. У цьому вона залежить від параметрів елементів, а й від режиму роботи цієї системи, тобто від параметрів навантаження.

Енергетичні компанії розглянули можливість зміни топології мережі шляхом підключення мережі, що використовується лише в аварійних ситуаціях. Результатом таких змін стало зменшення рівня гармонійних спотворень вузла до допустимих значень. Крім того, запровадження нової міжсистемної ЛЕП між Швейцарією та Італією призвело до додаткового зниження гармонійних складових.

Зміна конфігурації мережі електропостачання не є універсальним способом зменшення спотворення форми напруги, так як частотна характеристика системи залежить не тільки від її конфігурації, але і від зміни характеру та величини навантаження.

Використання пасивних фільтрів у мережах.

Фільтруючі пристрої, розроблені на основі пасивних реактивних елементів, досить

різноманітні. Для придушення гармонійних складових використовуються наступні пасивні пристрої, що фільтрують:

- поперечні компенсатори;
- поздовжні загороджувальні контури;
- поперечні резонансні ланцюги;
- п-подібні фільтруючі ланки.

Звичайні компенсатори, крім своєї основної функції, що полягає в компенсації реактивної потужності, зменшують процентний склад гармонік, так як конденсатори компенсаторів разом з реактивними опорами мережі та навантаження утворюють коливальний контур, який може бути налаштований на одну з складових гармонійних.

Розрізняють регульовані та нерегульовані компенсатори. Регульований компенсатор дозволяє змінювати характер реактивної потужності, що забезпечує можливість підтримки заданого режиму роботи мережі при зміні факторів, що впливають на нього. Такого типу компенсатори встановлюють на електровозах, які є нелінійними споживачами, що призводять до викривлення форми напруги [1].

Послідовний фільтр, що загороджує, являє собою невеликий реактор з повітряним сердечником, включений паралельно з конденсатором. Цей комбінований послідовно-паралельний ланцюг налаштований на резонансну частоту 350 Гц.

Ефективність роботи фільтра, що загороджує, істотно залежить від конфігурації мережі. Найбільш доцільним є його розміщення на висновках трансформатора. Це є економічно ефективним, т.к. використовується менша кількість конденсаторних установок, не потрібне застосування автоматичних вимикачів, проте необхідні відносно складні схеми захисту.

Одним із способів придушення вищих гармонік є встановлення пасивних паралельно з'єднаних послідовних контурів. Подібні фільтруючі пристрої використовуються на тягових підстанціях постійного струму [3], де встановлюють фільтри, що згладжують, для придушення пульсацій випрямленої напруги. На рис. 1 представлено схему такого фільтра. Послідовні контури L_1C_1 , L_2C_2 , L_3C_3 налаштовані на частоти 100, 200 та 300 Гц відповідно. Ці фільтри згладжують гармоніки шестифазної схеми випрямлення, а також гармоніки, викликані асиметрією напруги живлення. Згідно з технічними умовами пульсація напруги тягової мережі не повинна перевищувати 2,8 при номінальній напрузі 3000 В. Для обмеження змінної складової випрямленого струму у фільтр включають баластні елементи L_4C_4 , L_5C_5 . Але основним завданням такого фільтра є згладжування пульсацій випрямленої напруги.

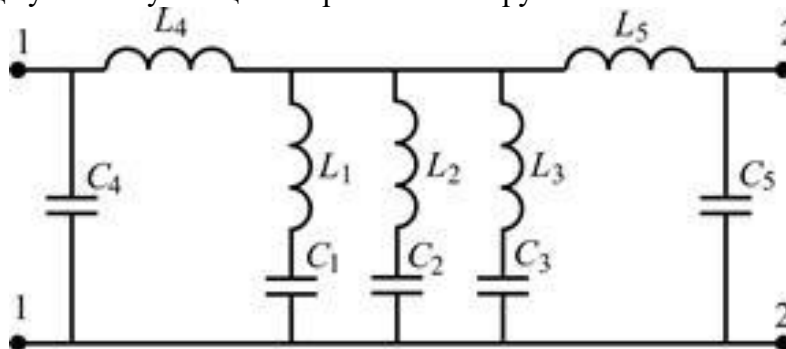


Рис. 1. Схема фільтра підстанції постійного струму

Подібними за фільтруючими властивостями є П-подібні пасивні фільтри низьких частот. Частота зрізу таких ланок, що фільтрують, становить 50 Гц. Зі збільшенням частоти власне згасання такої ланки зростає.

Активні фільтри.

Одним із способів боротьби з гармонійними спотвореннями є застосування активних фільтрів, побудованих на базі потужних силових напівпровідникових перетворювачів. Принцип роботи активного фільтра заснований на введенні у високовольтний ланцюг через підвищуючий трансформатор сигналу гармонічного струму або напруги таким чином, щоб зменшити вміст гармонік цього ланцюга. Активні фільтри є найбільш доцільним рішенням з погляду їх експлуатаційних характеристик та вартості.

Використання пристроїв з автоматичною стабілізацією форми напруги.

Одним із способів боротьби з гармоніками є розробка пристроїв стабілізації миттєвих значень струмів та напруг. До розряду таких пристроїв відноситься магнітний синтезатор [5], який забезпечує захист навантаження від різних спотворень синусоїдальної форми вхідної напруги, зокрема від провалів та викидів напруги, імпульсних та високочастотних перешкод та вищих гармонік.

Вихідна напруга магнітного синтезатора на кожному напівперіоді основної частоти генерується шляхом поєднання шести прямокутних імпульсів від зв'язаних між собою трансформаторів з насиченням. Магнітний синтезатор не містить будь-яких силових напівпровідникових елементів, виконуючи функцію стабілізатора напруги. Він формує ступінчасту, близьку за формою до синусоїди, напругу, яка подається на навантаження. Таким чином, йдеться про своєрідний фільтр вхідної напруги, принцип дії якого заснований на формуванні вихідної напруги заданої форми.

Авторами розроблено пристрій стабілізації форми струму мережі електропостачання нелінійних споживачів, блок-схема якого представлена рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема пристрою стабілізації струму

Стабілізатор струму складається з датчика струму, високочастотного фільтра, фазоінвертора, схеми порівняння, підсилювача потужності та баластного споживача.

Датчик струму забезпечує на своєму виході напругу, пропорційну його миттєвому значенню струму. Ця напруга подана на вхід високочастотного фільтра, частота зрізу якого дорівнює 50 Гц. Схема активного високочастотного фільтра представлена рис. 3.

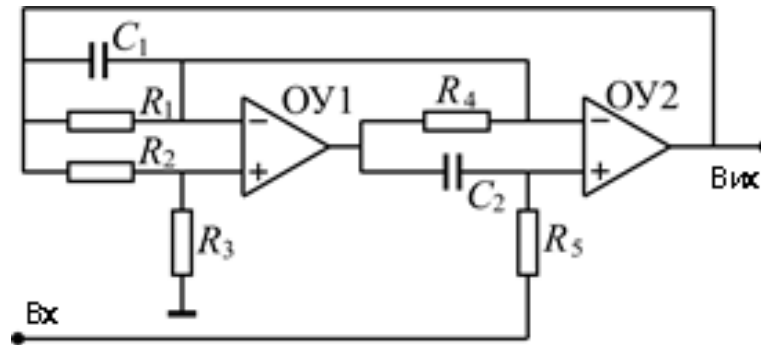


Рис. 3. Схема активного фільтра

Напруга на виході фільтра має практично ідеальну синусоїдальну форму. Ця напруга через фазообертальний ланцюг подається на схему порівняння. Фазообертальний ланцюг забезпечує компенсацію повороту фази фільтром основної гармоніки вхідної напруги. Схема порівняння визначає різницю миттєвих значень реального струму та ідеального струму. Різна напруга подається на вхід підсилювача для забезпечення потужності, достатньої для керування баластним споживачем.

Спектральна характеристика струму однієї фази без використання пристрою стабілізації струму та з використанням пристрою представлена на рис. 4.

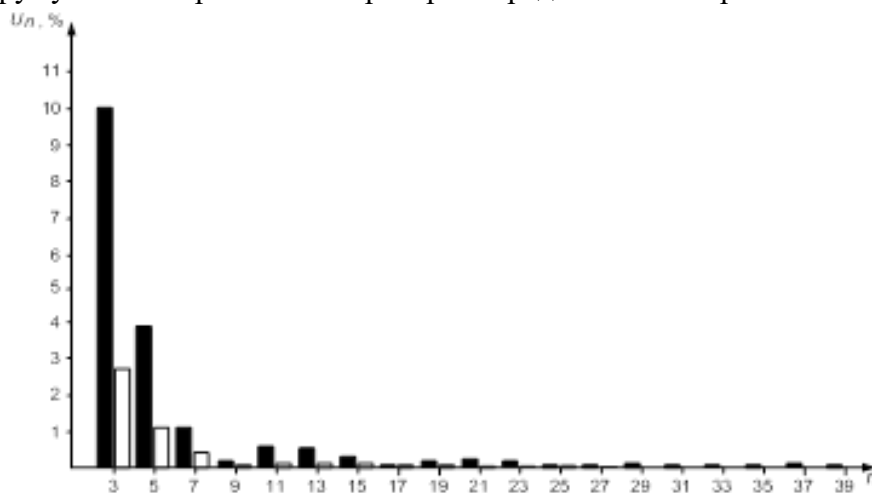


Рис. 4. Спектральна характеристика струму
(■) – без влаштування стабілізації, (□) – з пристроєм стабілізації.

Завдяки використанню запропонованого пристрою вдалося досягти зниження коефіцієнта гармонічних спотворень напруги з 9,82 до 2,69%, тобто майже вчетверо. Тому пристрій придушення гармонік, запропонований у цій роботі, може бути високоефективним пристроєм усунення гармонічних спотворень у мережі з нелінійним навантаженням.

Вольтододаткові пристрої.

Вольтододатковий перетворювач використовується для стабілізації та регулювання вихідної напруги тягової підстанції постійного струму. Однак проведені дослідження показали, що його можна використовувати як активний фільтр для зменшення амплітуд гармонік вхідних струмів випрямляючої установки. Силловий трансформатор підстанції перетворює і розподіляє напруги на основний випрямляч і випрямляч, що виконує роль перетворювача вольтодобавки. У первинному ланцюзі

силового трансформатора встановлені датчики струму. Оптимізатор за результатами гармонійного аналізу виділяє задані гармоніки вхідних струмів і виробляє керуючі на джерело компенсуючого сигналу [5].

Використання електромашинних перетворювачів.

Одним з найкращих варіантів виключення впливу нелінійних навантажень на основну мережу електропостачання є використання машинного перетворювача змінної напруги одного рівня змінну напругу іншого або того ж рівня. Перетворення характеризується повною електромагнітною ізоляцією розподільних мереж від мереж, які забезпечують харчування споживачів із нелінійною характеристикою.

Пристрій є установкою, що складається з потужного синхронного двигуна і синхронного генератора, що знаходиться на одному валу з двигуном. І тут забезпечується повна гальванічна розв'язка між ланцюгами, оскільки передача енергії виробляється через вал системи «генератор – двигун». Недолік такого варіанту полягає в тому, що для споживачів малої потужності подібна установка матиме дуже малий коефіцієнт корисної дії. Для споживачів великої потужності подібна установка за розрахунковими даними матиме ККД, близький до 90%. Необхідність розробки та використання такої установки має бути обґрунтовано економічно.

Висновки

Отже, проведено аналіз сучасних способів управління параметрами енергетичних систем для зменшення впливу нелінійних навантажень на якість електричної енергії, зокрема на спотворення форми напруги та струму. Крім проведеного аналізу, авторами запропоновано оригінальний пристрій на основі використання автоматичної стабілізації форми напруги та струму.

Слід відзначити актуальність розробки пристроїв, що виключають вплив нелінійних навантажень на розподільні мережі. В умовах дедалі більших вимог до якості електричної енергії, зумовлених глобалізацією розвитку систем електропостачання, використання локальних пристроїв покращення якості електричної енергії стає недостатнім. Перспективним шляхом розвитку елементів, що виключають погіршення показників якості, можна вважати розробку ефективних електромашинних установок, а також систем стабілізації миттєвих значень напруг та струмів великої потужності.

Список літератури

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий. – 5-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. Жежеленко И.В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения / И.В. Жежеленко // Электрика. – 2010. - №4.
3. Жежеленко И.В. Комплексный подход к проблеме повышения энергетической эффективности электрических сетей / И.В. Жежеленко, Г.Г. Трофимов, В.Э. Воротницкий, В.А. Исаев // Энергетика, 2017. - №2 (610). – с.14-16
4. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – 376 с.
5. Hugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. – 265 p.
6. The Datawave Magnetic Synthesizer As a Solution to Harmonics // Liebert Corporation, 1997. – 6 p.
7. Волошко, А. В. Устранение влияния неустойчивости частоты сети на точность определения качества электрической энергии [Текст] / А. В. Волошко, О. В. Коцарь // Техническая электродинамика. –1994. – № 4. – С. 73–77.

V.V. Shevchuk, graduate student, ORCID 0000-0003-0535-2630

T.E. Dzheria, graduate student, ORCID 0000-0002-9519-2951

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

REDUCTION OF THE INFLUENCE OF NONLINEAR LOADS ON ELECTRICITY QUALITY INDICATORS: MAIN WAYS OF MANAGING PARAMETERS OF ENERGY SYSTEMS

The article highlights the impact of power consumers of the nonlinear current-voltage characteristics on quality of electricity. The analysis of modern methods of controlling the parameters of energy systems to reduce the impact of non-linear loads on the quality of electric power, and in particular, on the distortion of the voltage and current. Celebrated international experience for activities to reduce the impact of non-linear loads, identify the most promising areas to improve the quality of electricity. In addition to the analysis by the authors proposed an original device based on the use of automatic stabilization of the form of voltage and current. Given the spectral characteristics of a current of one phase without using the constant current, and using the device and compares them to draw a conclusion about the effectiveness of high developed device to reduce the impact of traction substations AC electrical energy quality of distribution networks.

Key words: *nonlinear load, the quality of electric power, distortion, the consumer, filters, electrical installation, electrical network.*

References

1. I.V. Zhezhelenko. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. - 5th ed., Reworked. and ext. / I.V. Zhezhelenko. - M.: Energoatomizdat, 2004.
2. I.V. Zhezhelenko. Electrical losses from higher harmonics in power supply systems / I.V. Zhezhelenko // Electricity. - 2010. - №4.
3. I.V. Zhezhelenko. A comprehensive approach to the problem of increasing the energy efficiency of electrical networks / I.V. Zhezhelenko, G.G. Trofimov, V.E. Vorotnitsky, V.A. Isaev // Energetika, 2017. - №2 (610). - p.14-16
4. Special modes of electrical networks: Textbook / G.G. Pivnyak, A.K. Shidlovsky, G.A. Kigel, A.Y. Rybalko, O.I. Khovanska. - D.: National Mining University, 2009. - 376 p.
5. Hugen R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill, 1996. - 265 p.
6. The Datawave Magnetic Synthesizer As a Solution to Harmonics // Liebert Corporation, 1997. - 6 p.
7. A.V. Voloshko. Elimination of the influence of network frequency instability on the accuracy of determining the quality of electric energy [Text] / A.V. Voloshko, O.V. Kotsar // Technical electrodynamics. - 1994 - № 4. - P. 73–77.