

УДК 621.31

ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З МЕРЕЖЕЮ ЖИВЛЕННЯ

Т. П. Резніченко, А. П. Войцицький, І. В. Нездвєцька

e-mail: a.p.voytsitsky@gmail.com, inezd@ukr.net

Житомирський національний агроекологічний університет

Старий бульвар, 7, м. Житомир, 10008, Україна

Останнім часом проблеми якості електроенергії привернули особливу увагу багатьох дослідників, виробників електроенергії та її споживачів. Спотворення форми кривої напруги живлення є наслідком несинусоїдності струмів, що споживаються. Погіршення якості електроенергії відбувається як через збурення, що викликані перехідними процесами (кидки і просідання напруги, імпульсні перешкоди), так і в сталих режимах (гармонійні спотворення, несиметричність, флікер). Найбільш негативного впливу на електрообладнання завдають вищі гармоніки низьких порядків (третья, п'ята, сьома). В статті пропонується вирішення проблеми покращення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів за допомогою введення у силові схеми перетворювачів керованого пристрою та формування відповідного алгоритму його керування.

Ключові слова: напруга, електрична енергія, якість електричної енергії, коефіцієнт форми, форма кривої напруги, нелінійні елементи, комутація.

Постановка проблеми

Електрична енергія використовується практично у всіх процесах, пов'язаних з діяльністю людини. Володіючи специфічними властивостями, електроенергія безпосередньо бере участь у створенні інших видів енергії, при цьому визначальною складовою у цих перетвореннях є її якісні показники.

Поняття якості електричної енергії (ЯЕЕ) відрізняється від поняття якості інших видів продукції. Кожен електричний пристрій призначений для роботи при певних параметрах та умовах експлуатації повинен відповідати:

- номінальній частоті;
- напрузі;
- коефіцієнту форми кривої напруги;
- коефіцієнту часової перенапруги тощо.

Якість електроенергії – сукупність специфічних властивостей, які визначаються дією на електрообладнання, прилади та апарати і при цьому оцінюються показниками якості електроенергії. Ці показники характеризують рівні електромагнітних перешкод в системі електропостачання за: частотою, діючим значенні напруги, формою кривої тощо [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз спектру вищих гармонійних у системі електричних мереж пов'язаний з проблемою визначення якості електроенергії в системах електропостачання промислових підприємств і протягом достатньо тривалого часу залишається однією з найважливіших проблем, яка визначає

надійність та ефективність електропостачання споживачів. Ця проблема має декілька складових, однією з яких є проблема гармонійних складових, зокрема, вищих гармонік.

Джерелами вищих гармонік (ВГ) є промислові та побутові споживачі з нелінійними вольт-амперними характеристиками. Вищі гармоніки негативно впливають на роботу систем автоматики та телемеханіки, знижують економічність та надійність роботи електричних мереж, зменшують термін експлуатації електрообладнання та призводять до інших негативних наслідків [1, 2].

Вагомий внесок у вивчення режимів ВГ, розробку методик вимірювання, розрахунку та нормалізації внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: Жежеленко І. В., Железко Ю. С., Зикін Ф. А., Карташев І. І., Кордюков Е. І., Кузнецов В. Г., Курбацкий В. Г., Липський А. М., Сафронов П. С. та ін. Проте основними роботами у сфері аналізу несинусоїдальних режимів систем електропостачання промислових підприємств (СЕР ПП) є праці Жежеленка І. В. та Сафронова П. С. В них найбільш повно розкрито спектр питань, які пов'язані з режимами ВГ для мереж промислових підприємств.

Мета, завдання і методика досліджень

Метою дослідження є покращення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів за допомогою введення у силові схеми перетворювачів

керуваного пристрою та формування відповідного алгоритму його керування.

Для досягнення цієї мети в роботі розв'язані такі завдання:

– розробка алгоритму перемикання силових комутаційних пристроїв (тиристорів), які забезпечують найкращу електромагнітну сумісність напівпровідних перетворювачів (інверторів) з мережею;

– розробка електричної принципової схеми пристрою керування силових комутаційних виконавчих пристроїв;

Об'єктом дослідження є напівпровідникові перетворювачі з керованим обміном електроенергії між силовими вентилями інверторів.

Предметом дослідження є електромагнітні процеси у вентильних схемах напівпровідникових перетворювачів та їх електромагнітна сумісність з мережею живлення.

Методи дослідження. На базі фундаментальних положень теорії електричних та електронних нелінійних кіл проведено аналітичні дослідження.

Результати досліджень

З точки зору якості електроенергії, для нормальної роботи електричного та електронного обладнання, підключеного до мережі змінного струму, оптимальною є ідеально синусоїдальна форма напруги живлення (рис. 1).

Однак, на сучасних підприємствах значного поширення набули навантаження, вольт- і веберамперні характеристики, які мають нелінійний характер (нелінійні навантаження). Підключення споживачів, що мають у своєму складі нелінійні елементи, часто призводить до відхилення форми напруги від синусоїди. Осцилограма форми кривої синусоїдного струму силової мережі була знята в лабораторії теоретичних основ електротехніки ЖНАЕУ (рис. 1) і порівняна з ідеальною (рис. 2).

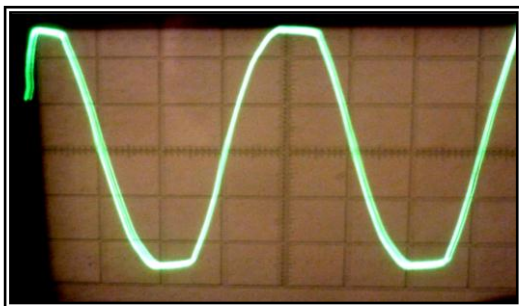


Рис. 1. Осцилограма форми кривої синусоїдного струму силової мережі

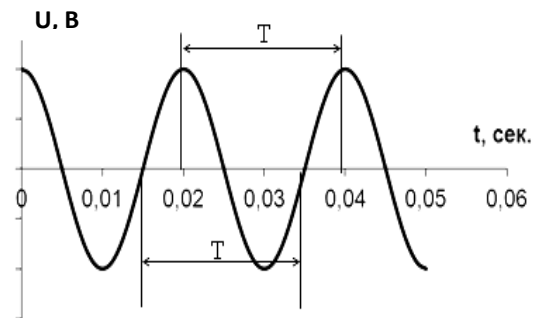


Рис. 2. Ідеальна синусоїдальна форма напруги частотою 50 Гц

До споживачів, які значно спотворюють форму кривої напруги, відносяться різного роду вентильні перетворювачі. Фізична сутність спотворення синусоїдності змінної напруги полягає у виникненні режиму короткого замикання ланцюга змінного струму в інтервали комутації струму діодних та тиристорних плечей випрямляча. В результат чого відбуваються провали в кривій синусоїдної напруги. Ці провали спотворюють форму кривої напруги і призводять до виникнення вищих гармонійних складових у частотному спектрі напруги [1].

Так як коливання напруги повторюються кожен напівперіод, то ця періодичність обмежує вентильну міцність випрямлячів і, внаслідок цього, призводить до швидкого виходу їх з ладу. Крім того, ці коливання з'являються в кривій випрямленої напруги, впливаючи на електромагнітні процеси, що протікають у ланцюзі випрямленого струму.

Перетворювачі усіх типів генерують прямі і зворотні гармоніки струмів порядку:

$$h = n \cdot p \pm 1,$$

де n – натуральний ряд чисел; p – число фаз перетворювача (3, 6, 12).

Ці струми створюють гармоніки напруг, що змінюються залежно від навантаження перетворювача. Дещо нова проблема – стрімке зростання кількості комп'ютерної техніки, яка створює проблему спотворення форми кривої синусоїдної напруги [4].

Відомо, що періодичні несинусоїдні функції, які задовольняють умовам Дирихле, можна розкласти у тригонометричний ряд Фур'є, тобто представити сумою гармонічних складових. Згідно з умовами Дирихле, така функція має кінцеве число відносних максимумів та

мінімумів, а також точок розриву першого роду на деякому кінцевому інтервалі [5].

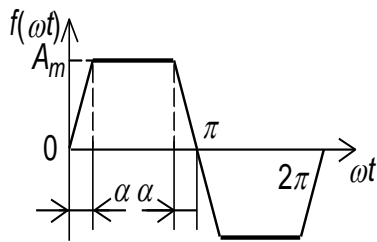


Рис. 3. Періодична функція трапеціодальної форми

Аналізуючи цю функцію, бачимо, що вона складається з непарних гармонік (3, 5, 7...). Відхилення форми змінної напруги від синусоїдної є одним з основних параметрів, що характеризують якість електричної енергії в силових мережах. Дані показники визначаються як значення, усереднені за період 3 с. Коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги визначають за формулою:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%,$$

де – значення n -ї гармонійної складової напруги; U_1 – значення першої (основної) гармоніки напруги.

Якість електроенергії за показником коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги і коефіцієнта n -ї гармонійної складової напруги в точці загального приєднання вважають відповідною вимогам стандарту, якщо найбільше з усіх вимірних протягом 24 год. значень коефіцієнтів спотворення не перевищує гранично допустимого значення. Також значення коефіцієнта спотворення, із ймовірністю 95 % за встановлений період часу, не повинно перевищувати нормально допустиме значення.

Розглянемо спрощену силову частину системи живлення електронної напівпровідникової техніки (рис. 4). Основним джерелом спотворення форми кривої напруги мережі є вентиляльні діоди (VD1–VD4) випрямляча та конденсатори фільтру (C_Φ) транзисторного перетворювача напруги (інвертора).

Згідно із спотвореннями синусоїдної форми напруги живлення, яка більш близька до періодичної функції, що має вигляд симетричної трапеції відносно до осі ординат, при розкладі такої функції в ряд Фур'є, остання має вигляд:

$$e(t) = 4A_m / a\pi(\sin a \sin \varpi) + 1/9 \sin a \sin 3\varpi + \\ + 1/25 \sin 5a \sin 5\varpi + \\ + 1/49 \sin 7a \sin 7\varpi \dots$$

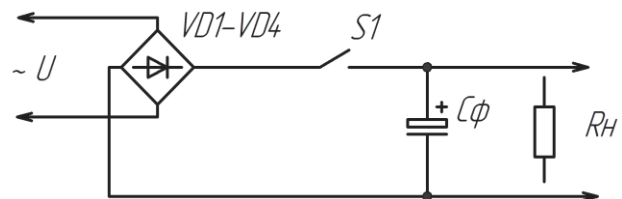


Рис. 4. Спрощена схема випрямляча інвертора

В момент підключення блока живлення до силової мережі, відповідно до другого закону комутації, напруга на конденсаторі фільтра C_Φ дорівнює напрузі до момента комутації – нулю. Під'єднання конденсатора C_Φ до вентилів може відбутися у будь-який момент часу (рис. 5). Якщо це відбудеться у момент часу t_{n-1} , який відповідає амплітудному значенню випрямленої напруги, то результат цієї комутації негативно вплине на силову мережу, оскільки у цей момент часу струм буде максимальний – наблизитиметься до струму короткого замикання і призведе до часткового провалу напруги мережі, що, в свою чергу, призведе до спотворення форми кривої напруги живлення і, як наслідок, знизить к.к.д. навантажувачів мережі та збільшить втрати.

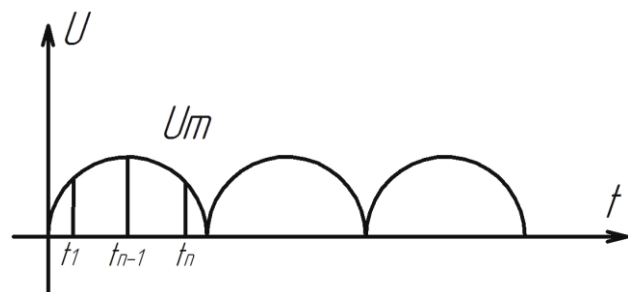


Рис. 5. Форма випрямленої напруги

Для уникнення цих явищ, пропонується схема комутації C_{ϕ} з діодами випрямляча, підключеними через керований вентиль (рис. 6).

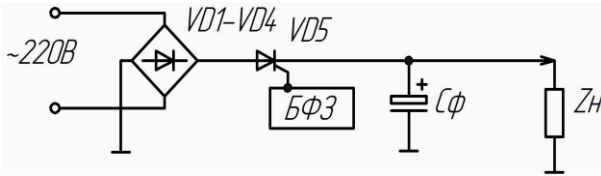


Рис 6. Запропонована схема комутації тиристора

Один з самих простих способів керування тиристорами – це подача на його керуючий електрод постійного струму, величини якої достатньо для перемикання тиристора. Для забезпечення протікання струму керування використовують додаткове джерело напруги керування u_k . Величина струму керування набагато менша від робочого струму. Цей струм подається від спеціальної системи керування (БФЗ).

Тиристор має специфічну особливість: він відкривається за допомогою керуючого електрода, проте закривається лише тоді, коли струм між анодом та катодом зникне. Домогтися цього за допомогою керуючого електрода неможливо.

Самим сприятливим моментом відкриття тиристора, для значного зменшення спотворень форми кривої напруги живлення, є момент “умовного” переходу пульсуючої напруги через нульову точку абсциси (рис. 7).

Для формування короткого імпульсу відкриття тиристора пропонується використання аналогового компаратора на основі операційного підсилювача.

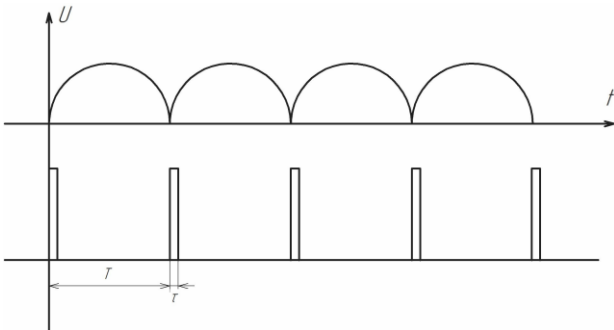


Рис. 7. Епюра формування імпульсу керування тиристора (включенням)

В залежності від схеми живлення, на виході компаратора формуються відповідні сигнали. Якщо компаратор підключений до однополярного джерела живлення, то на його виході можуть формуватися сигнали високого або низького рівнів (1 або 0). Напруга на виході компаратора визначається за виразом:

$$U_{\text{вих}} = -(\bar{U}_{\text{in}} - U_n).$$

Якщо $U_{\text{вих}}$ буде мати додатне значення, то це буде відповідати високому рівню сигналу, а якщо від’ємне – низькому. Для формування сигналу, спроможного для керування відкриттям тиристора, потрібно на неінвертуючий вхід компаратора подати додатну напругу, а на інвертуючий вхід – пульсуючу напругу з мостового випрямляча.

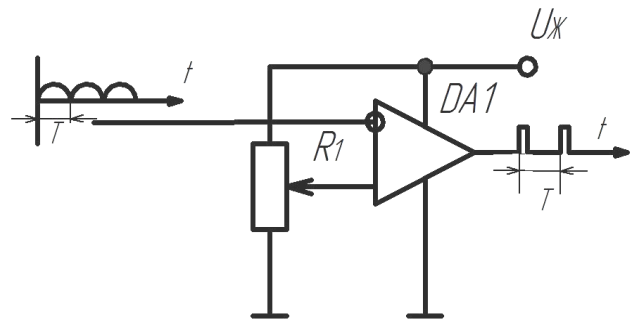


Рис. 8. Схема формування імпульсу відкриття тиристора

З метою підвищення надійності відкриття тиристора, формування необхідної тривалості імпульсу здійснюється потенціометром $R1$ (рис. 8). Відкриття тиристора відбудеться практично в момент “умовного” переходу пульсуючої напруги через нульову точку абсциси. Це самий найсприятливіший режим роботи випрямляча, при якому спотворення форми кривої напруги силової мережі будуть найнижчими.

З часом почне заряджатися конденсатор фільтра C_{ϕ} за експоненціальним законом (рис. 9). Крива заряду конденсатора фільтра на ділянці від 0 до $-\pi/2$ у першому наближенні співпадає з формою пульсуючої напруги. В цьому разі струм, який протікає крізь конденсатор, буде знижуватися плавно за експоненціальним законом, що значно знизить спотворення форми кривої напруги мережі живлення.

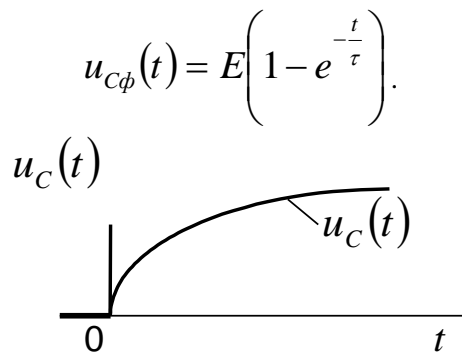


Рис. 9. Крива заряду конденсатора

Одним з варіантів зниження споживаної вузлом управління потужності є використання замість постійного струму неперервної послідовності імпульсів з відносно великою шорністю.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Необхідною умовою успішної роботи системи загального електро-постачання є забезпечення ЯЕЕ у вузлах підключення споживачів. Проведені дослідження представляють собою рішення завдань, які мають наукове та практичне значення для покращення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів (інверторів) з мережею живлення.

Зменшення несинусоїдності досягнуто за рахунок ведення пристрою під'єднання конденсатора фільтра C_{ϕ} до вентилів не у будь-який момент часу, а в момент часу, коли буде відсутня пульсуюча напруга на виході мостової схеми випрямляючого пристрою (VD1–VD4).

Перспективи подальших досліджень мають бути зосереджені на пошуку технічних рішень зменшення несиметричності навантажень в мережах живлення.

Література

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Жежеленко И. В. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Сезенко. – Мариуполь : ПГТУ, 1996. – 173 с.
3. Сафронов П. С. Система импульсно-фазового управления многоимпульсными

выпрямителями с широким диапазоном регулирования / П. С. Сафронов // Техническая электродинамика – 2000. – № 5. – С. 29–32.

4. Аррилага Д. Гармоники в электрических системах / Д. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

5. Войцицкий А. П. Анализ причин погіршення якості показників електроенергії, які характеризують форму напруги / А. П. Войцицкий, Ю. О. Колос // Вісник ЖНАЕУ. – 2016. – № 1, т. 1. – С. 264–270.

6. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

7. Сафронов П. С. Преобразователи напряжения с улучшенными энергетическими показателями / П. С. Сафронов, А. И. Анищенко, Ю. Э. Паэранд // Техническая электродинамика. – 2000. – Спец. вып., ч. 5. – С. 40–45.

IMPROVEMENT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SEMICONDUCTOR'S CONVERTER WITH THE MAINS SUPPLY

T. Reznichenko, A. Voytsytsky, I. Nezdvetka
e-mail: a.p.voytsitsky@gmail.com, inezd@ukr.net
 Zhytomyr National Agroecological University,
 Stary Boulevard, 7, Zhytomyr, 10002, Ukraine

In recent years the problem of power quality has attracted the attention of many researchers, producers and consumers of electricity. The distortion of the supply voltage is a consequence of the non-sinusoidal current consumption. The deterioration of food quality occurs due to interference caused by transients (throws and sagging voltage, transients) and in the steady state (harmonic distortion, unbalance, flicker).

The most negative impact on the electrical system are of low order harmonics (third, fifth, seventh). The paper proposes a solution to the problem of improving the electromagnetic compatibility of semiconductor converters by introducing into the power circuits converters of a controlled device and the formation of an appropriate control algorithm.

Keywords: *voltage, electric energy, electric energy quality; the shape factor of a sine wave, the distortion of the voltage waveform, the non-linear elements, switching.*

**УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
СОВМЕСТИМОСТИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
С ПИТАЮЩЕЙ СЕТЬЮ**

**Т. Ф. Резниченко, А. П. Войцицкий,
І. В. Незвецька**

e-mail: a.p.voytsitsky@gmail.com, inezd@ukr.net

Житомирский национальный
агроэкологический университет

Старый бульвар, 7, г. Житомир, 10002, Украина

В последнее время проблемы качества электроэнергии привлекли внимание многих исследователей, производителей и потребителей электроэнергии. Искажение формы кривой напряжения питания является следствием несинусоидальности потребляемых токов. Ухудшение качества электроэнергии происходит как из-за возмущений, вызванных переходными процессами (броски и проседания

напряжения, импульсные помехи), так и в установившихся режимах (гармонические искажения, несимметричность, фликер).

Наиболее негативное воздействие на электрооборудование наносят высшие гармоники низких порядков (третья, пятая, седьмая). В статье предлагается решение проблемы улучшения электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей за счёт введения в силовые схемы преобразователей управляемого устройства и формирования соответствующего алгоритма управления.

Ключевые слова: *напряжение, электрическая энергия, качество электрической энергии, коэффициент формы синусоидальной напряжения; искажение формы кривой напряжения, нелинейные элементы, коммутация.*