

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В АВТОНОМНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

(Представлено д.т.н. Щокіним В.П.)

Надано результати дослідження роботи систем керування процесом перетворення електричної енергії в автономних енергетичних системах (ЕС) що проводилися при керуванні ключами матричного перетворювача (МП) з комутацією вхідних фаз із граничними миттєвими значеннями напруги, з комутацією фаз з найближчими до бажаного рівня значеннями напруги та за запропонованим методом оптимального керування з мінімізацією впливу на живильну мережу із нечітким регулятором. Було складено комп'ютерну модель замкненої системи керування зі зворотним зв'язком.

**Ключові слова:** автономні енергетичні системи, перетворення електричної енергії, нечіткий регулятор.

**Постановка проблеми.** При дослідженні систем керування процесами перетворення електричної енергії в автономних ЕС за допомогою комп'ютерних моделей необхідно вирішувати ряд питань [1]:

1. Для забезпечення умов реалізації принципу модульного програмування, кожен елемент ЕС повинен бути реалізований своїм окремим програмним модулем. До складу моделі автономної ЕС належать: рушій (первинне джерело енергії), синхронний генератор (СГ), система перетворення електричної енергії (МК), навантаження, регулятор.

2. Для забезпечення необхідної точності і мінімально можливого часу розв'язання систем звичайних диференціальних й алгебраїчних рівнянь необхідно враховувати, що протягом процесу моделювання у фазних величинах змінні струми й напруги змінюються періодично приблизно із частотою мережі. Тому крок інтегрування обирається не більше ніж 0,01 від мінімальної постійної часу системи.

3. Нелінійні залежності, що описують функціонування окремих складових частин моделі, необхідно представити відповідними алгебраїчними функціями. При припущенні, що напівпровідникові елементи є ідеальними, задача дослідження електромагнітних процесів у системах перетворення електричної енергії значно спрощується і може бути зведена до дослідження електричних кіл зі змінними періодичними параметрами та такими, що стрибкоподібно змінюються [2].

**Викладення основного матеріалу.** Аналіз процесів перетворення електричної енергії за допомогою МП було проведено, використовуючи програмний комплекс МВТУ 3.5, що дозволяє досліджувати динаміку різноманітних систем і пристроїв та може бути застосований для проектування систем автоматичного керування [3].

Основою для побудови схеми моделювання процесу перетворення електричної енергії в автономній ЕС складають структури, наведені на рисунках 1 та 2.

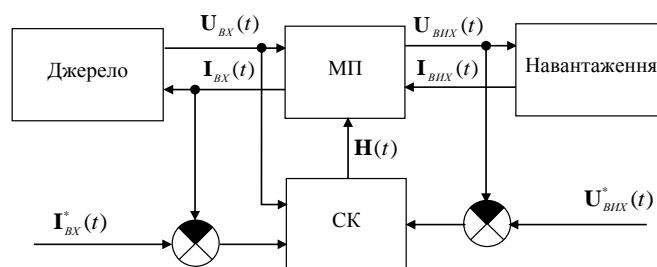


Рис. 1. Структура автономної ЕС із матричним перетворювачем

Загальну схему моделювання процесу перетворення електричної енергії в редакторі структурних схем програмного комплексу МВТУ 3.5 наведено на рисунку 3. До загальної моделі системи перетворення електричної енергії в автономних ЕС належать:

- Модель трифазного джерела електричної енергії ( $U_{вх}$ ), підключеного до входу перетворювача. Напруги джерела формуються у вигляді вектора, компоненти якого являють собою синусоїди, зсунуті відносно одна одної на фазовий кут, з амплітудами та частотами.

- Модель трифазного джерела зразкової напруги ( $U_{ВХ}^*$ ) з параметрами  $U_{ВХМ}^*$  та  $f_{ВХ}$ .
- Модель МК, представлена блоками матричного множення та транспонування, яка дозволяє формувати вектори вихідних напруг  $U_{ВХ}$  та вхідних струмів  $I_{ВХ}$ .
- Модель навантаження, представлена рівняннями у просторі станів, реакція якого на перетворену вихідну напругу визначає вектор вихідних струмів  $I_{ВХ}$ . Рівняння стану формуються для еквівалентної розрахункової схеми навантаження ЕС. Еквівалентування елементів ЕС здійснюється шляхом приведення їх до одного вузла, що дозволяє істотно спростити розрахунки різних режимів і скоротити об'єм обчислювальної роботи. Незважаючи на те, що процеси в еквівалентному елементі принципово відмінні від процесів у поєднаних елементах через різну кількість ступенів свободи в них, еквівалентування не вносить значних погрешностей у результати моделювання [4].

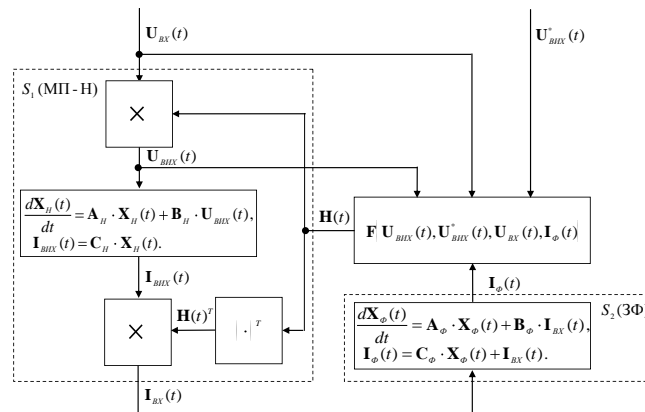


Рис. 2. Структура МП із 3Ф в контурі керування

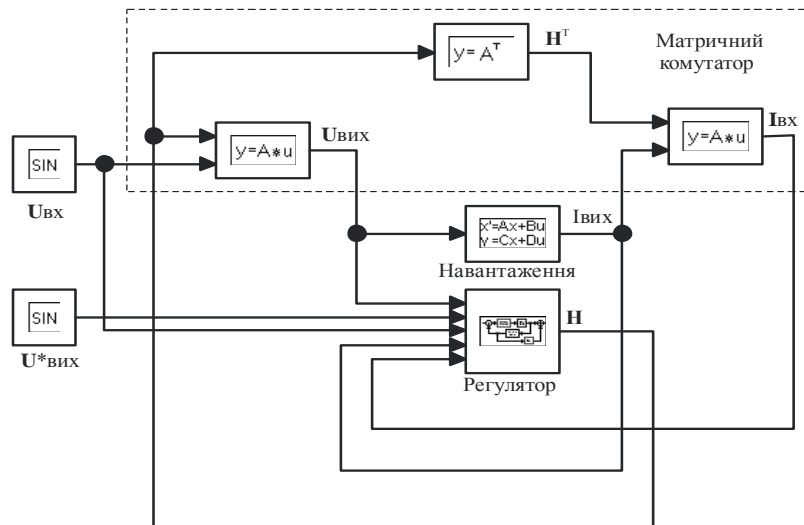


Рис. 3. Схема моделювання процесу перетворення електричної енергії

- Модель регулятора, наведена на рисунку у вигляді субмоделі, який на основі аналізу зразкової напруги завдання ( $U_{ВХ}^*$ ), вхідних і вихідних напруг ( $U_{ВХ}$ ,  $U_{ВХ}$ ) та струмів ( $I_{ВХ}$ ,  $I_{ВХ}$ ) формує перемикальну матрицю  $H$ , що надходить на матричний комутатор перетворювача. Регулятор реалізує один з наступних методів керування: комутація вхідних фаз із граничними миттєвими значеннями напруги («саме позитивне» та «саме негативне»); комутація фаз з найближчими до бажаного рівня значеннями напруги; запропонований метод оптимального керування за мінімумом впливу на живильну мережу із нечітким регулятором. Кожен з методів передбачає виконання обмеження за інтегральною помилкою перетвореної напруги, від граничного значення якої  $\mathcal{E}$  залежить якість перетворення.

Адаптивний регулятор трифазного МП містить 9 ідентичних компонент, кожна з яких відповідає за формування перемикальної функції  $h_{ij}$  певного ключа МК. Для моделювання окремої компоненти адаптивного нечіткого регулятора системи керування МП необхідно поділити всі лінгвістичні змінні на

вхідні й вихідні та представити модель як дерево, що містить два батьківські вузли – «Вхід» й «Вихід». Загальний вигляд моделі нечіткого виводу для кожного ключа перетворювача наведено на рисунку 4.

Нечіткі множини в модулях фазифікації задаються функціями приналежностей типу трапеції за чотирма точками за допомогою мови програмування, наближеної до природної мови.

Правила нечіткого виводу для розробленої системи представляються за допомогою редактора структурних схем [5]. Зв'язок кількох вхідних змінних у нечітких правилах виконується за допомогою операторів додавання та множення. Логічний вивід здійснюється шляхом агрегування й акумуляції всіх правил. Кожному введеному правилу привласнюється ваговий коефіцієнт, що дорівнює 1. Приклад реалізації правила нечіткого виводу IF  $T1_i$  IS «менша» AND  $T2_j$  IS «середня» AND  $T3_k$  IS «низьке» THAN  $T4_{ij} = 1$  наведено на рисунку 5.

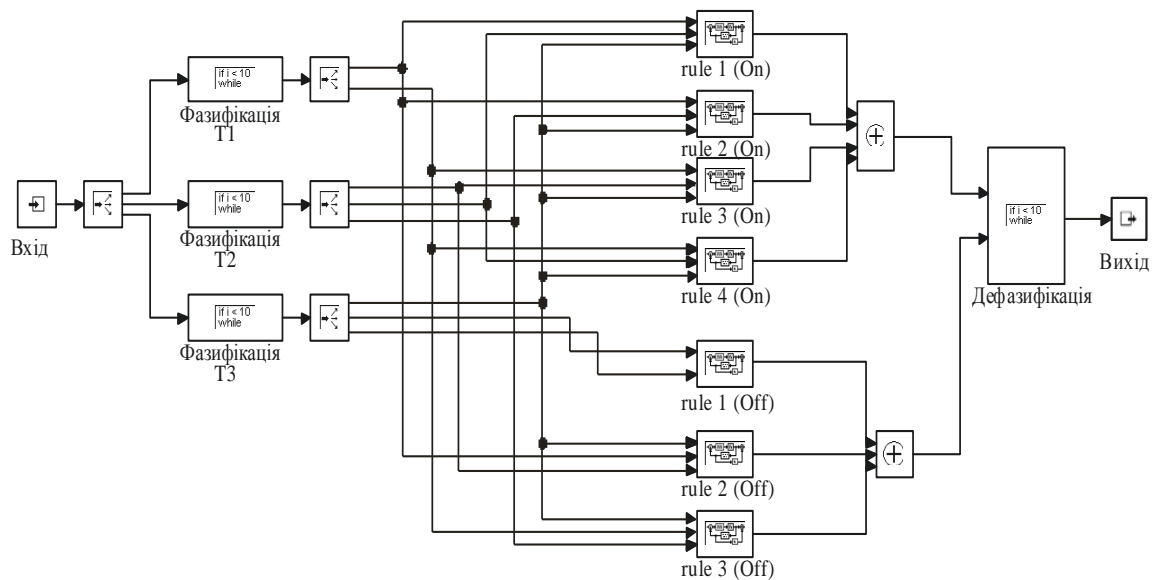


Рис. 4. Модель нечіткого виводу для визначення комутаційної функції  $h_{ij}$

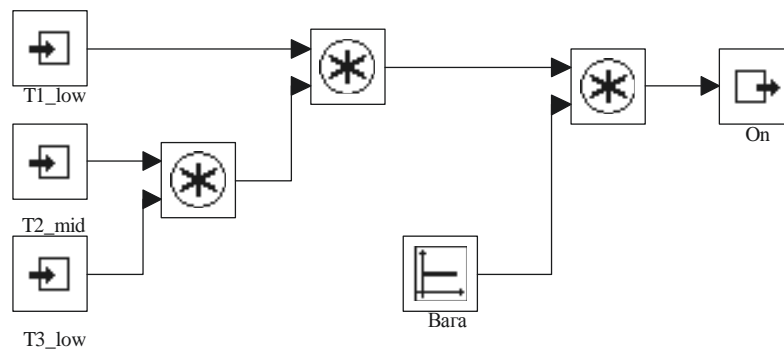


Рис. 5. Фрагмент бази правил

Отримані значення ступенів істинності кожного правила дозволяють провести активізацію, в процесі якої результуюча функція для кожної вихідної змінної набуває мінімального значення з відповідного ступеня істинності правила й вихідної функції належності зазначеної вихідної змінної. У результаті акумуляції отримується загальна функція належності для вихідної змінної  $T4_{ij}$  за всіма термами.

Поверхні рішення для вихідної змінної  $T4_{ij}$ , що формуються за розробленою базою правил, наведено на рисунку 6.

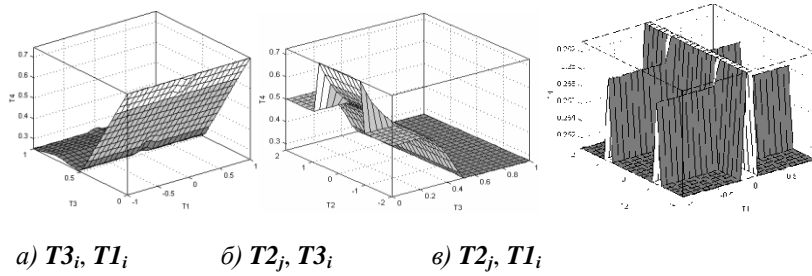


Рис. 6. Поверхні рішення для вихідної змінної  $T4_{ij}$

Дослідження роботи системи перетворення електричної енергії при постійних значеннях напруг, частот та незмінних характеристиках навантаження при різних законах керування проводилося у пакеті МВТУ 3.5 за схемою, наведеною на рисунку 3 для випадку  $U_{BXM} = 500$  В,  $f_{BX} = 60$  Гц,  $U_{BHXM}^* = 220\sqrt{2}$  В,  $f_{BHX} = 50$  Гц та  $\mathcal{E} = 0,05$  при симетричному  $RL$  навантаженні за схемою зірки з нульовим дротом з параметрами  $R = 1$  Ом,  $L = 0,1$  Гн.

Осцилограми вихідних напруг, вихідних та вхідних струмів системи перетворення електричної енергії, отримані при моделюванні різних методів керування матричним комутатором, наведено на рисунках 7–9.

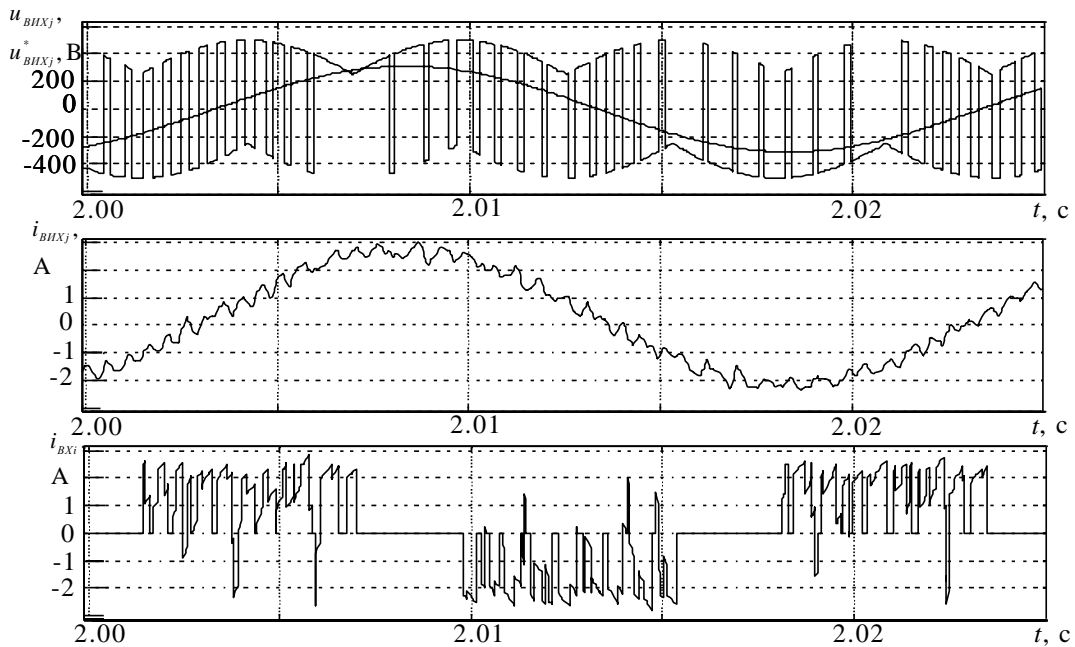


Рис. 7. Результати моделювання при комутації граничних значень

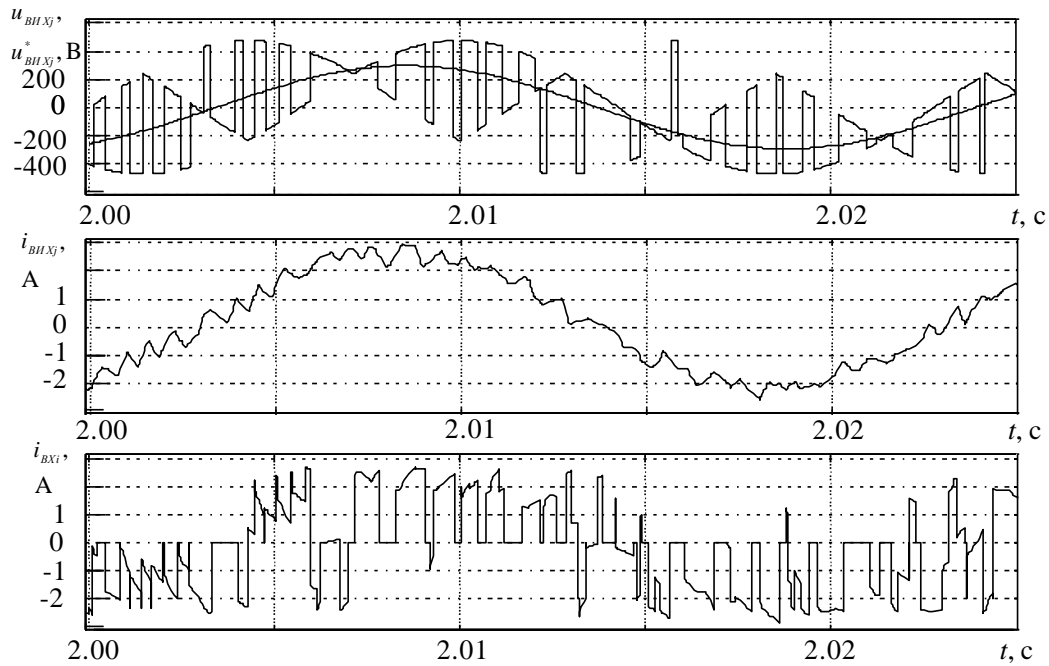


Рис. 8. Результати моделювання при комутації найближчих значень

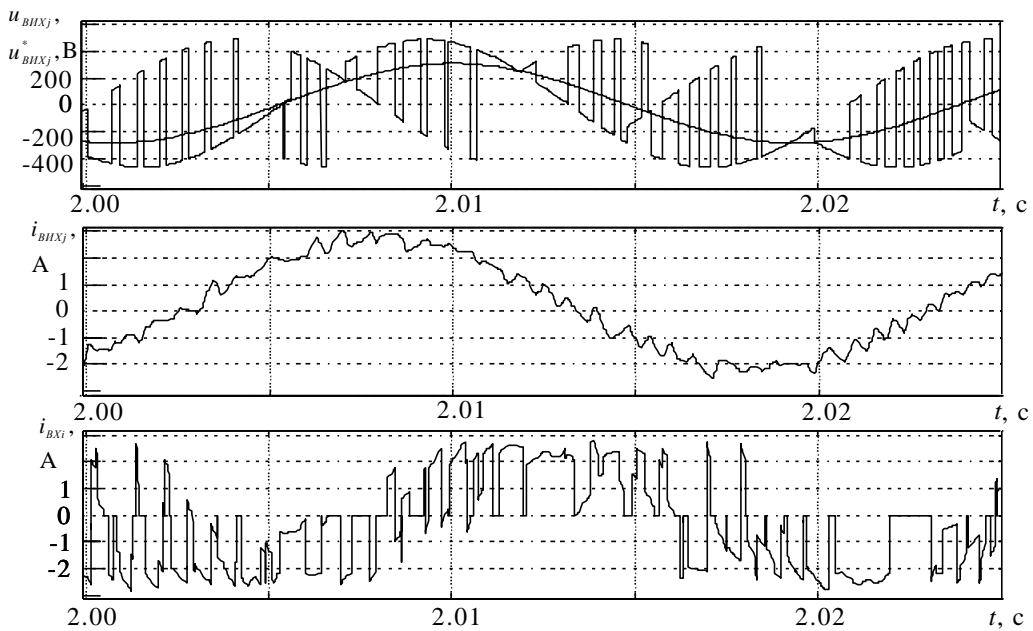


Рис. 9. Результати моделювання при запропонованому методі керування

З наведених осцилограм видно, що метод з комутацією граничних значень забезпечує більшу амплітуду пульсацій перетвореної напруги, порівняно з іншими методами, проте за умови інерційності навантаження вихідні струми для будь-якого з методів керування, що досліджуються, мають майже синусоїдальну форму завдяки придушенню високочастотних складових навантаженням.

Експлуатація АЕУ в реальних умовах характеризується неусталеними режимами роботи, які можуть складати 80–95 % всього часу напруцювання автономної електростанції, тому до сучасних електроустановок такого типу висуваються підвищені вимоги щодо забезпечення стабільної номінальної частоти обертання, мінімальної величини «провалів» обертів при накиді навантаження і мінімальної тривалості перехідного процесу.

Моделювання накиду навантаження здійснювалося шляхом збільшення в момент часу  $t = 0,5$  с активних та реактивних опорів споживачів у 2 рази одночасно за всіма фазами. Осцилограми нормованих вхідних та вихідних струмів наведено на рисунку 10.

З наведених осцилограм видно, що накид навантаження супроводжується перехідними процесами, протягом яких виникають додаткові спотворення форми кривої вхідного струму, що може призвести до виникнення іонізаційних процесів у ізоляції обмоток джерела (синхронатора), і, як наслідок, до зменшення його строку служби. Проте на всьому інтервалі моделювання симетрія струмів зберігається, що виключає протікання зрівняльного струму.

Аварійні процеси в енергосистемі є наслідком виникнення ушкоджень устаткування, перекриття й пробою ізоляції, помилкових спрацьовувань різних пристроїв й апаратів, помилкових дій персоналу, у результаті яких, як правило, відбуваються відключення елементів устаткування електростанцій, живильної мережі або споживачів. В аварійних режимах конфігурація ЕС змінюється, її параметри виходять за межі вимог технічних регламентів, що може становить загрозу життю людей та призводити до обмеження подачі електричної енергії і пошкодження устаткування. Аналіз аварійних режимів дозволяє виділити наступні типи аварій, що часто зустрічаються на практиці: технологічні перевантаження, що виникають при накиді навантаження в процесі функціонування ЕС, короткі замикання на землю або між фазами; обриви фаз або нульового дроту.

Осцилограми напруг та струмів системи перетворення електричної енергії при обриві однієї з живильної фаз в момент часу  $t = 0,5$  представлено на рисунку 11.

Виходячи з алгоритму функціонування системи керування, у випадку обриву однієї з живильних фаз МК формує вихідні напруги, спираючись тільки на напруги двох неушкоджених фаз. Через недостатність ресурсу форма вихідних напруг значно спотворюється. За відсутності напруги однієї з фаз періодично, на певних інтервалах часу, система перетворення стає неспроможною сформувати бажану вихідну напругу, що обумовлює збільшення в спектрі частки низькочастотних складових.

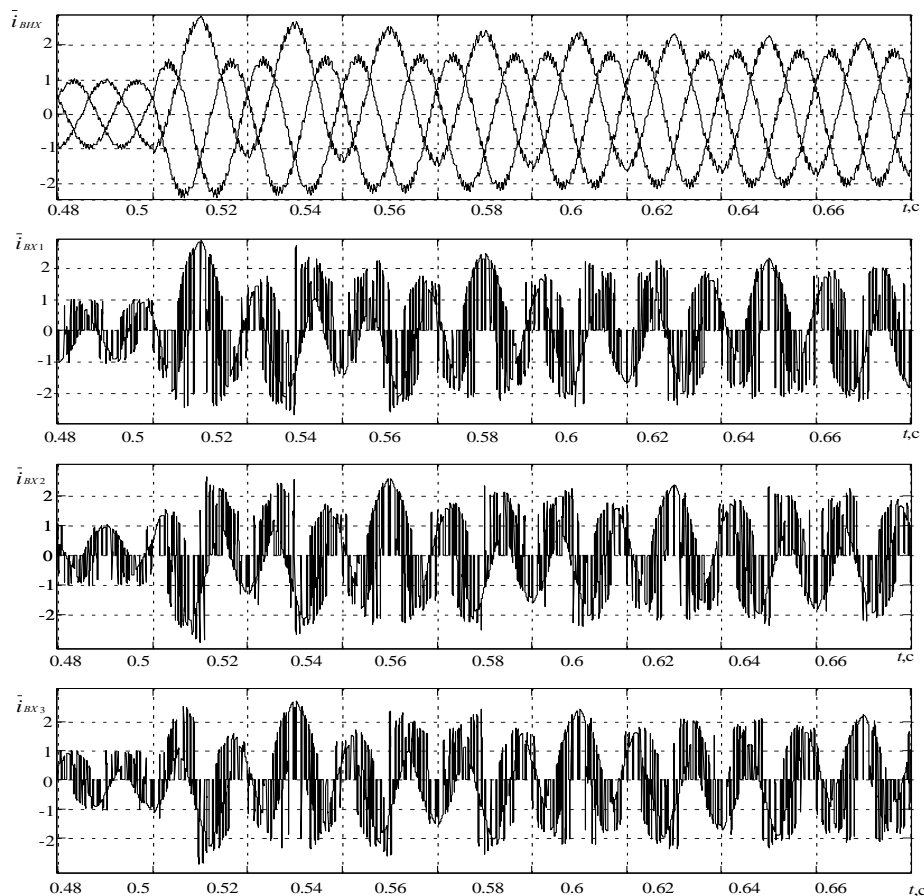


Рис. 10. Результати моделювання накиду навантаження

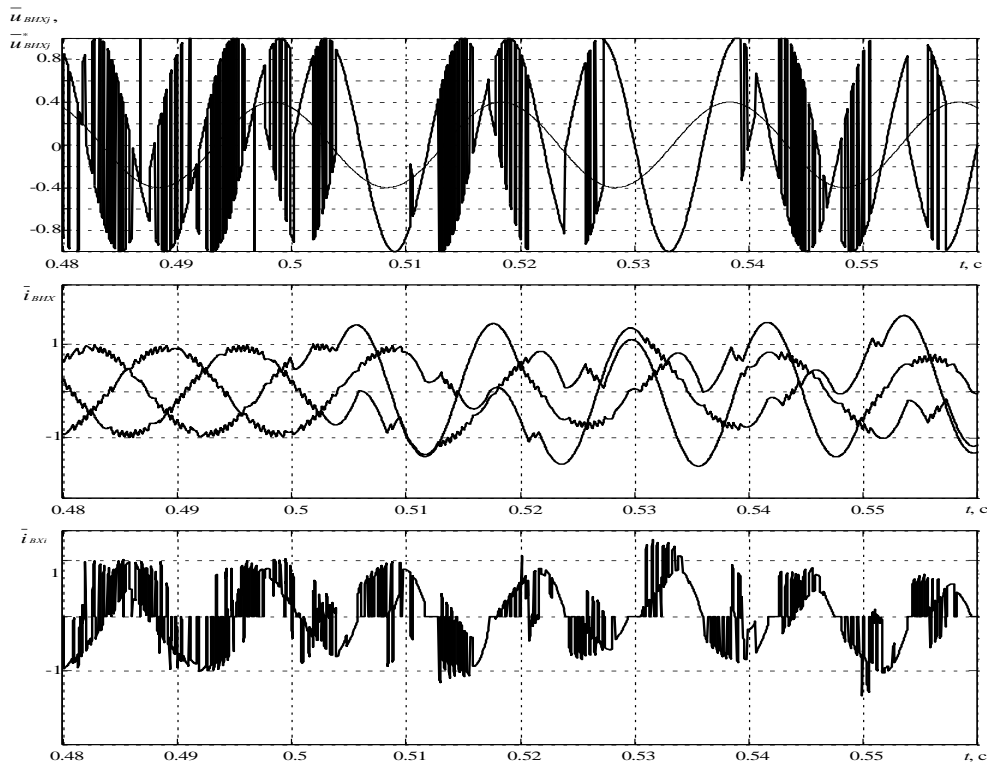


Рис. 11. Результати моделювання обриву фази мережі живлення

Наявність субгармонік у вихідній напрузі також викликає значні спотворення струмів неушкоджених вхідних фаз. Незважаючи на значні спотворення струмів та напруг, адаптивний нечіткий регулятор дозволяє забезпечити працездатність системи перетворення у випадку обриву однієї з живильних фаз, а її здатність забезпечувати симетрію вхідних струмів обумовлює стійкість щодо обриву нульового дроту.

**Висновки.** В результаті моделювання було підтверджено, що спектральні склади перетвореної напруги і вхідного струму містять частотні складові, що визначаються частотами повторення комутаційних функцій  $f_s^+ = f_{вих} + f_{вх}$  та  $f_s^- = f_{вих} - f_{вх}$ , тобто формування напруги при замкненому керуванні здійснюється за рахунок комбінації модуляційних функцій скалярних методів керування. Основні частоти мереж живлення та навантаження присутні у вихідній напрузі та вхідному струмі як гармоніки спектрів комутаційних функцій.

Результати моделювання статичних режимів довели, що запропонований метод керування силовими ключами перетворювача дозволяє мінімізувати його вплив на мережу живлення при забезпеченні необхідної вихідної напруги. Спектр складових, що спотворюють вихідну напругу, переноситься до області вищих частот, які можуть бути придушені за допомогою вихідного фільтра та за рахунок інерційності навантаження. Коефіцієнт спотворень вхідного струму зменшується на 7–38 %, залежно від співвідношення вхідних та вихідних амплітуд та частот.

При моделюванні динамічних режимів було доведено високу ефективність керування за запропонованим методом: при зміні частоти та амплітуди напруги живильної мережі параметри і форма струму навантаження майже не змінюються, частота огинаючої вхідного струму на всьому інтервалі часу відповідає частоті напруги живлення  $f_{вх}$ ; при накиді навантаження виникають додаткові спотворення, характерні при симетричному навантаженні протягом перехідних процесів.

Для аналізу функціонування системи перетворення електричної енергії в аварійних режимах проведено моделювання обриву однієї з живильних фаз. Показано, що адаптивна система керування з нечітким регулятором дозволяє забезпечити працездатність системи перетворення.

Отримані результати комп'ютерного моделювання системи керування процесом перетворення електричної енергії в автономних ЕС підтверджують підвищення ефективності перетворення при запропонованому методі керування.

#### Список використаної літератури:

1. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / *С.Г. Герман-Галкин.* – СПб. : КОРОНА. Принт, 2001. – 320 с.
2. *Руденко В.С.* Преобразовательная техника / *Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М.* – К. : Вища школа, 1983. – 431 с.
3. *Карташов Б.А.* Практикум по автоматике. Математическое моделирование систем автоматического регулирования / *Карташов Б.А., Карташов А.Б., Козлов О.С. и др.* – М. : КолосС, 2004. – 184 с.
4. *Баранов А.П.* Моделирование судового электрооборудования и средств автоматизации / *А.П. Баранов, М.М. Раимов.* – СПб. : Элмор, 1997. – 232 с.
5. *Тачков А.А.* Программное обеспечение для разработки моделей нечетких систем автоматического управления / *А.А. Тачков, С.В. Калиниченко* // Программные продукты и системы. – Тверь, 2009. – № 1. – С. 60–61.
6. *Чукреев Ю.Я.* Основы электроснабжения : учебн. пособие / *Ю.Я. Чукреев.* – Ухта : УГТУ, 2001. – 96 с.
7. *Выскуб В.Г.* Прецизионные цифровые системы автоматического управления / *В.Г. Выскуб.* – М. : Машиностроение, 1984. – 136 с.
8. *Винокуров Г.З.* Микропроцессорные системы управления в лёгкой промышленности / *Г.З. Винокуров.* – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 174 с.
9. *Чорний С.Г.* Застосування механізму інформаційних інтелектуальних моделей у системах автоматичного керування / *С.Г. Чорний* // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2012. – № 1(44). – С. 215–220.

ЖИЛЕНКОВ Антон Александрович – старший викладач кафедри «Електрообладнання суден та автоматизація виробництва» Керченського державного морського технологічного університету.

Наукові інтереси:

– системи управління силовими напівпровідниковими перетворювачами.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2013