

УДК 621.314

В.С. Смирнов

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

## АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ІНВАРІАНТНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ АВТОНОМНИХ ОБ’ЄКТІВ

© Смирнов В.С., 2003

Робота присвячена розвитку теорії побудови інваріантних систем перетворення параметрів електроенергії з багаторазовою модуляцією. На основі теоретичних досліджень розроблені та обґрунтовані положення про структурну інваріантність перетворювачів, основи квадріплексного перетворення в гіперкомплексному форматі до аналізу перетворювальних систем з багаторазовою модуляцією. Запропоновані і досліджені принципи організації та алгоритми керування багатофункціональними перетворювачами.

The work is devoted to the development of the construction theory invariant systems of conversion of the electric power parameters with a multiple modulation. On the basis of theoretical researches and generalized rule about structural invariancy, fundamentals of the quadriplex conversion in the hypercomplex format concerning the analysis of conversion systems with a multiple modulation are developed and justified. The principles of organization and control algorithms of multifunction converters are proposed and researched.

### Постановка проблеми

Широкий діапазон функціонального застосування сучасних автономних об’єктів (АО), різноманітні задачі, що розв’язуються ними, зумовили використання первинними системами електропостачання АО різних джерел енергії, що відрізняються видом електроенергії, яка виробляється. При цьому АО відрізняються великою кількістю споживачів, які вимагають для забезпечення нормального функціонування енергію певного виду і якості. Тому системи вторинного електроживлення АО мають забезпечувати перетворення електроенергії, що надходить від первинних джерел енергії, в електроенергію необхідного для її споживачів виду і якості з заданими параметрами енергетичних координат. До системи вторинного електроживлення АО при цьому пред’являється вимога реалізації заданих характеристик функціонування за умови найбільш повного забезпечення інваріантності вихідних енергетичних координат до процесів у первинних джерелах енергії та споживачах, особливо у динамічних режимах. Реалізація заданих характеристик функціонування передбачає інваріантність вихідних енергетичних координат систем електроживлення не лише до впливових збурень, але й до виду перетворюваної електроенергії, що зумовлює необхідність розширення функціональних і динамічних можливостей систем. При цьому відсутність єдиного методологічного підходу до побудови й аналізу інваріантних систем електроживлення з заданими характеристиками функціонування значно ускладнює задачу їх створення і не дозволяє забезпечити реалізацію вимог, які пред’являються до таких систем. У зв’язку з цим розробка методів побудови та дослідження ефективних інваріантних систем електроживлення з заданими характеристиками функціонування, що забезпечують високі техніко-економічні показники АО, є важливою науковою проблемою, вирішення

якої відповідає тематиці координаційного плану Наукової Ради НАН України з комплексної проблеми “Наукові проблеми електроенергетики”.

#### **Аналіз останніх досліджень**

До складу систем електроживлення (СЕЖ) АО, як правило, входить низка напівпровідникових перетворювачів (НП) параметрів електроенергії, які служать для узгодження джерел електроенергії та споживачів за видом електроенергії, її якості та номінальним значенням енергетичних координат. При цьому особливого значення надається не лише покращенню масогабаритних показників НП, але й забезпеченню заданих характеристик їх функціонування. Варто підкреслити тенденцію до розширення функцій, покладених на засоби керування, які все частіше залучаються до розв’язання задач енергетичного характеру. Ефективним засобом забезпечення заданих характеристик НП є використання положень теорії інваріантності [1, 2]. Проте використання положень теорії інваріантності при побудові НП модуляційного типу ускладнено нелінійністю дискретних систем автоматичного керування, якими є сучасні НП. До цього часу не вирішено багато питань теоретичного і практичного характеру, пов’язаних зі створенням інваріантних НП. Крім того, актуальною проблемою управління НП є збереження заданих характеристик функціонування при апріорній неповноті або відсутності інформації про властивості об’єкта керування, що спричиняє необхідність застосування адаптивного підходу [3, 4].

#### **Задачі досліджень**

У роботі поставлено задачу розвитку теорії побудови інваріантних СЕЖ з багаторазовою модуляцією та розробки теоретичних положень аналізу багатofункціональних НП у гіперкомплексному форматі.

#### **Виклад основного матеріалу**

Багатofункціональність НП передбачає можливість формування заданого вихідного сигналу НП, взагалі, довільної форми, з певною точністю. При цьому структурна організація НП дозволяє, за необхідності, вилучити вихідні енергетичні фільтри, що суттєво знижує протиріччя між умовами інваріантності та стійкості. Крім того, багатofункціональність передбачає інваріантність вихідних енергетичних координат НП як до координатно-параметричних збурень, так і до виду електроенергії, що перетворюється, та варіаціям її енергетичних координат (напруга, частота, форма). Тоді можна сформулювати єдиний методологічний підхід до одержання умов інваріантності у вигляді вимоги незалежності розв’язання системи диференціальних рівнянь, що описує НП, від вектора впливових координатно-параметричних збурень. Керований НП модуляційного типу виконує дві функції принципово різної природи – енергетичної та інформаційної (рис. 1). Відповідно до цього у структурі НП функціонально можна виділити силовий тракт (СТ) і систему керування (СК). Математично обидві частини структури НП пов’язані загальною функцією – варіантою керування  $\text{var}(\alpha^r)$ . Основною функцією СК є реалізація закону зміни вихідної координати  $f(t)$  відповідно до заданого закону  $\tilde{f}(t)$  і заданої точності, що зумовлює необхідність розробки та обґрунтування алгоритмів керування багатofункціональними НП на основі теорії інваріантності. Це визначається нелінійністю та нестационарністю структур НП з багаторазовою модуляцією. Реалізація алгоритмів координатно-параметричного керування НП при цьому дозволяє забезпечити виконання умов інваріантності в багатofункціональних НП з високою точністю [5].

При синтезі алгоритму керування НП головним завданням є визначення варіанти керування  $\text{var}(\alpha_i^r)$  на кожному інтервалі. Керування координатою  $f(t)$  має дискретний характер, здійснюється за рахунок дискретної зміни оператора зв'язку за законом, що визначається варіантою керування  $\text{var}(\alpha^r)$ .

Умови інваріантності  $f(t)$  відносно збурення  $v(t)$  мають реалізовуватись одночасно з умовами необхідного відтворення  $\tilde{f}(t)$ . Ці умови неподільні. Тому метою керування в такті, на основі якої формується  $(\alpha^r)$ , можна вважати забезпечення в умовах безперервно діючих  $v(t)$  співвідношення

$$F(\alpha_i) = \tilde{F}(\alpha_i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Крім того, методи регулювання вихідного сигналу багатофункціональних НП мають забезпечити глибоке, безінерційне та незалежне регулювання вихідних координат НП за умови мінімізації додаткових спотворень сигналу. При цьому необхідне забезпечення виконання умов інваріантності при збереженні робастності структури НП.

Основним завданням теорії інваріантності є знаходження таких умов структурної побудови перетворювальної системи, при виконанні яких рух однієї або декількох координат системи не залежить від одного або більшого числа вхідних впливів, що подаються на систему. Отже, перед СК НП є завдання зміни коефіцієнтів варіанти керування  $\text{var}(\alpha_i^r)$  основного контуру координатного керування НП шляхом переведення стану СТ протягом такту керування з деякого стану  $x(\alpha_{i-1})$  у заданий кінцевий стан  $\tilde{x}(\alpha_i)$  у визначені моменти  $\alpha_i$ , та забезпечення реалізації умов адаптації (1).

При цьому помилку розузгодження руху основного контуру і бажаного еталонного руху необхідно мати інваріантною по відношенню до зовнішніх впливів. В ідеальному випадку ця помилка має тотожно дорівнювати нулю, незалежно від вхідних керуючих впливів, координатних і параметричних збурень. Тоді при адаптивному керуванні досягається інваріантність НП не тільки до зовнішніх, але й до початкових внутрішніх впливів, тобто значень  $x(\alpha_{i-1})$ . При адаптивному координатному керуванні багатовимірним об'єктом для забезпечення повної керованості СТ НП і досягнення інваріантності  $F(\alpha_i)$  до  $v(t)$  необхідно, щоб розмірність вектора  $(\alpha_i^r)$  певним чином співвідносилась з розмірністю об'єкта керування. Невиконання цієї умови свідчить про неможливість фізичного здійснення в НП умов інваріантності  $F(\alpha_i)$  до  $v(t)$ . Для реалізації адаптивного координатного керування СК, крім обчислювального контролера і аналізатора-екстраполятора, повинна мати блок, який формує адаптивні значення вектора  $x(\alpha_i)$ , тобто блок адаптації (БА). Тоді адаптаційні значення  $\tilde{x}(\alpha_i)$  мають бути функцією  $v(t)$  і  $F(\alpha_i)$

$$\tilde{x}(\alpha_i) = \varphi[v(t), y, \tilde{F}(\alpha_i); t \in (\alpha_{i-1}, \alpha_i)].$$

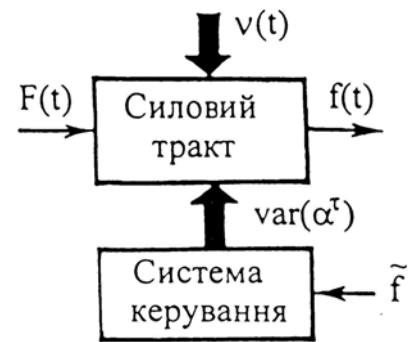


Рис. 1. Узагальнена структура НП

Структурна організація інваріантного НП з адаптивним координатним керуванням зображена на рис. 2.

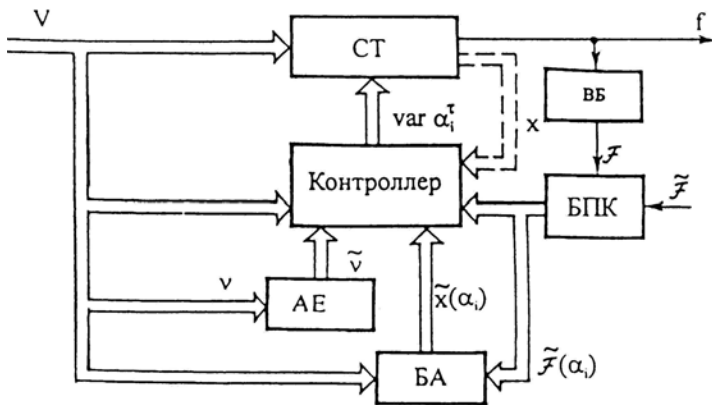


Рис. 2. Організація інваріантного НП з адаптивним керуванням

Розгляд алгоритмів перетворення НП дозволяє сформулювати положення про структурну інваріантність НП, за якої структурна організація НП не залежала б від функціонального призначення НП, тобто безумовно забезпечувалась багатоопераційність НП. Структурна інваріантність передбачає інваріантність вихідних енергетичних координат НП до виду вхідної перетворюваної електроенергії та варіаціям її енергетичних координат

(величина напруги, частота, форма) за умови формування заданого вихідного сигналу НП, взагалі, довільної форми, а також інваріантність вихідних енергетичних координат НП до координатно-параметричних збурень.

Задачу інваріантності у класі адаптивного координатно-параметричного керування сформулюємо так: необхідно знайти умови, за яких структурна організація перетворювальної системи буде мати властивості дворазової структурної інваріантності по відношенню до координатних впливів і параметричних збурень.

Тоді досліджувану систему можна зобразити рівнянням

$$A(p,t)x = D(p,t)u + G(p,t)v.$$

де  $v$  — вектор впливових збурень,  $u$  — вектор координатного керування.

Зазначимо, що оператори  $A(p,t)$ ,  $D(p,t)$ ,  $G(p,t)$  мають інформацію про параметричні збурення, які позначимо  $\Delta A(p,t)$ ,  $\Delta D(p,t)$ ,  $\Delta G(p,t)$ .

Рівняння, що описує стійку систему і відповідний еталонний рух, подамо у вигляді

$$A_0(p)x = D_0(p)\Delta u + G_0(p)v, \text{ де } \Delta u \text{ — вхідний керуючий вплив.}$$

З урахуванням введеної до розгляду помилки розузгодження руху синтезуючої інваріантної системи і еталонного оператора  $\varepsilon$  можна записати систему, що описує рух об'єкта відносно помилки розузгодження  $\varepsilon$ . З цією метою об'єднаємо рівняння і позначимо через  $\Delta S$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta Z$  оператори компенсуючих керуючих пристроїв блока адаптації основного контуру. У результаті одержимо таке рівняння:

$$\Delta A_0(p) \cdot \varepsilon = [\Delta A(p,t) - \Delta S(p,t)] \cdot x + [\Delta D(p,t) - \Delta T(p,t)] \cdot u + [\Delta G(p,t) - \Delta Z(p,t)] \cdot v.$$

Звідси за умов

$$\begin{aligned} \Delta A(p,t) &= \Delta S(p,t), \\ \Delta D(p,t) &= \Delta T(p,t), \\ \Delta G(p,t) &= \Delta Z(p,t), \end{aligned} \quad (2)$$

а також обмеженості координат  $x, u, v$  і відповідних похідних одержимо

$$A_0(p) \cdot \varepsilon = 0. \quad (3)$$

Отже, за нульових початкових умов і стійкості руху маємо  $\varepsilon(t) \equiv 0$  за будь-яких допустимих видів вхідних координатних і параметричних впливів. Умови (2), (3) є необхідними умовами структурної інваріантності перетворювальної системи по координаті  $\varepsilon$ .

Розгляд варіанта структурної організації НП (рис. 3) дозволяє сформулювати положення про структурну інваріантність НП у вигляді необхідної та достатньої умов, а також умови фізичної реалізованості, причому достатньою умовою є наявність багаторазової, принаймні, дворазової, модуляції вхідного впливу, а умова апаратної реалізованості призводить до мінімізації кількості некерованих ланцюгів силового тракту, які піддаються впливу координатно-параметричних збурень, при одночасному суміщенні функцій формування, регулювання вихідного сигналу і компенсації координатно-параметричних збурень у єдиному функціональному вузлі. Умовою фізичної реалізованості структурно-інваріантного НП є сепаратна організація СТ НП відповідно до алгоритму “модуляція-демодуляція” (рис. 4).

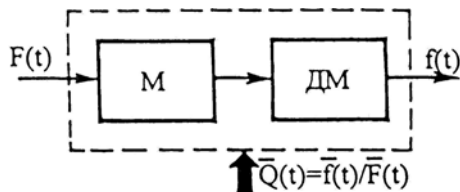


Рис. 3. Структура силового тракту

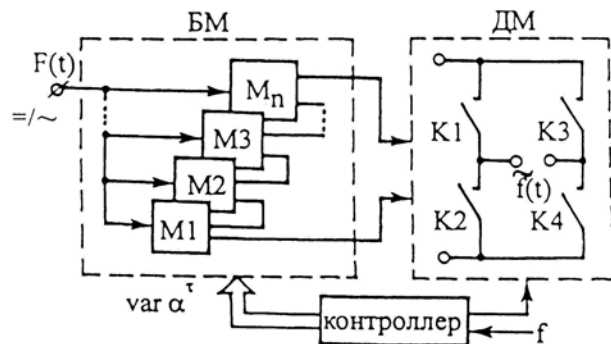


Рис. 4. Функціональна організація силового тракту

Виконання умов структурної інваріантності дозволяє реалізувати положення про симетрування нелінійних каналів передачі загального збурення на програмному рівні, надати системі властивість робастності при забезпеченні необхідної точності.

Отже, будемо вважати, що структура перетворювальної системи, яку розглядаємо, має властивості структурної дворазової інваріантності по координаті  $\varepsilon$ , якщо в неї включено пристрій, наприклад, пристрій адаптації, який перестроює параметри системи або навіть її структуру для підтримування відповідних умов структурної дворазової інваріантності. Звідси можна зробити таке твердження.

#### Твердження

При дотриманні умов стійкості і дворазової структурної інваріантності перетворювальна система є адаптивною структурно-інваріантною по координаті  $\varepsilon$  по відношенню до вхідних координатних та параметричних впливів.

Очевидно, що використання більшості існуючих методів аналізу при дослідженні НП з багаторазовою модуляцією не ефективно, що зумовлює використання приблизних методів аналізу. Тому доцільна розробка теоретичних положень, які орієнтовані на дослідження перетворювальних систем з багаторазовою модуляцією на основі апарата гіперкомплексного обчислення [6].

Гіперкомплексні числові системи (ГЧС) є узагальненням поняття числової системи. Формулювання задач у гіперкомплексному уявленні досить перспективне з погляду раціональнішого розв'язання деяких алгебраїчних і диференціальних рівнянь і систем, оскільки дозволяє здійснити стиснення оброблюваної інформації та одержати інформаційно повний розв'язок. При цьому можна одержати ГЧС різних розмірностей з різноманітними властивостями, що зумовлено можливістю надання різних значень добуткам уявних одиниць. Разом з тим комутативність і асоціативність поширюється як на уявні одиниці, так і на речовинні числа ГЧС. набір уявних одиниць конкретної ГЧС є базисом ГЧС, причому ізоморфні ГЧС мають однакові теоретико-числові властивості.

При дослідженні перетворювальної системи з багаторазовою модуляцією, що розглядається, особливого значення набуває розгляд комутаційної функції.

Комутаційна функція у загальному вигляді зображена добутком двох різних за частотою кусково-безперервних функцій:  $\bar{Q}(t) \equiv a(\omega t) \times b(\Omega t)$ .

Для дослідження таких систем можна використати апарат гіперкомплексного обчислення, що дозволяє з єдиних методологічних позицій розглядати технічні системи з багаторазовою модуляцією.

Розглянемо детальніше вираз для комутаційної функції, яку приводимо до вигляду

$$Ce^{i\alpha} e^{j\beta} = C(\cos \alpha + i \sin \alpha)(\cos \beta + j \sin \beta) = C \cos \alpha \cos \beta + jC \cos \alpha \sin \beta + iC \sin \alpha \cos \beta + ji \sin \alpha \sin \beta = a + i_1 b + i_2 c + i_3 d.$$

У результаті одержано гіперкомплексне число четвертого порядку. Проте кількість класів ізоморфізмів ГЧС четвертого порядку досить велика (квадріплексні числа, комплекс Клейна, кватерніони), тому для вибору ГЧС необхідна постановка додаткових умов. Такими умовами, очевидно, можуть бути комутативність і асоціативність ГЧС. У цьому разі вибір ГЧС зводиться до системи квадріплексних чисел – комутативної системи з одиничним базисним елементом і трьома уявними одиницями. Зазначимо, що  $i_1, i_2$  — уявні одиниці, для яких  $i_1^2 = i_2^2 = -1$ , проте  $i_1 \neq \pm i_2$ , а  $i_3 = i_1 \cdot i_2$ , причому  $i_3^2 = 1$ ,  $i_3 \neq \pm 1$ . Квадріплексні числа можна одержати комутативним подвоєнням поля комплексних чисел комплексними числами.

Здійснивши комплексне перетворення для складових комутаційної функції, одержимо

$$\left. \begin{aligned} a(t) &\doteq \dot{A}_m = a_m \cos \alpha_m + i a_m \sin \alpha_m \\ b(t) &\doteq \dot{B}_k = b_k \cos \beta_k + j b_k \sin \beta_k \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де  $m, k$  — номери гармонік для  $\Omega$  і  $\omega$ ;  $i, j$  — різні уявні одиниці, які відповідні різним частотам  $\Omega$  і  $\omega$ ; а складові матимуть вигляд

$$a_m \sin \alpha_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\Omega) \cos m\varphi d\varphi; \quad b_k \sin \beta_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} b(\lambda/\omega) \cos k\lambda d\lambda; \quad (5)$$

причому  $\varphi = \Omega t$ ,  $\lambda = \omega t$ .

Підставляючи вирази (5) в (4), після перемноження  $\dot{A}_m$  і  $\dot{B}_k$  з урахуванням формули Ейлера одержимо інтегральне перетворення, яке назвемо квадріплексним перетворенням

$$\overset{\circ}{Q}_{mk} = \overset{\circ}{A}_m \overset{\circ}{B}_k = ij \frac{1}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\Omega) \times b(\lambda/\omega) e^{-im\varphi} e^{-jk\lambda} d\varphi d\lambda. \quad (6)$$

Одержане перетворення є прямим квадріплексним перетворенням. Обернене квадріплексне перетворення введемо так:

$$Q(t) = Q(\varphi/\Omega, \lambda/\omega) = \frac{1}{4ij} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \overset{\circ}{Q}_{mk} e^{im\varphi} e^{jk\lambda}. \quad (7)$$

Зображення  $Ce^{i\alpha}e^{j\beta}$  назвемо квадріплексною амплітудою гіпергармонічної функції  $C \sin(\Omega t + \alpha) \sin(\omega t + \beta)$ , а величину  $i\Omega + j\omega = \varphi_0$  — квадріплексною узагальненою частотою. Тоді для квадріплексного імпедансу ділянки ланцюга можна записати  $Z = r + \varphi_0 L + (\varphi_0 C)^{-1}$ .

### Висновки

Високі техніко-економічні характеристики розроблених інваріантних СЕЖ підтверджують достовірність результатів теоретичних досліджень, що у сукупності з розробленими принципами організації інваріантних НП з багаторазовою модуляцією, теоретичними положеннями квадріплексного перетворення та засобами адаптивного координатно-параметричного керування зумовило вирішення проблеми створення багатофункціональних НП з заданими характеристиками функціонування для інваріантних СЕЖ автономних об'єктів.

1. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б.Н. Петров, В.А. Викторов, Б.В. Лукин, А.С. Совлуков. – М., 1976. – 244 с. 2. Алиев Р.А. Принцип инвариантности и его применение для проектирования промышленных систем управления. – М., 1985. – 128 с. 3. Адаптивные системы автоматического управления / В.Н. Антонов, А.М. Пришивин, В.А. Терехов, А.Э. Янчевский / Под ред. В.Б. Яковлева. – Л., 1984. – 204 с. 4. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М., 1981. – 448 с. 5. Смирнов В.С. Организация структурно-инвариантных вентильных преобразователей автономных систем электроснабжения // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Електротехніка. – К., 1999. – С. 34–53. 6. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа. – М., 1973.