

**В.С.Смирнов, д-р техн. наук**

(Україна, Київ; Національний технічний університет України "КПІ")

## **ОРГАНІЗАЦІЯ ІНВАРІАНТНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Автономні об'єкти (АО) широко використовуються в різних сферах дослідницької та виробничої діяльності людини. Великий діапазон функціонального застосування АО, різноманітні задачі, що розв'язуються ними, обумовили використання як первинних систем електропостачання АО різних джерел енергії, які відрізняються видом вироблюваної електроенергії. При цьому сучасні АО відрізняються великою кількістю споживачів, які для забезпечення нормального функціонування вимагають 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 ставиться 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 обумовлює необхідність розширення функціональних і динамічних можливостей систем.

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. Крім того, 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 при побудові НП модуляційного типу використання положень теорії інваріантності ускладнено нелінійністю дискретних систем автоматичного керування, якими є сучасні НП. При цьому рівень інваріантності НП визначається повнотою реалізації його функціональних можливостей [3,4].

Багатофункціональність НП передбачає можливість формування заданого вихідного сигналу НП, взагалі, довільної форми, з певною точністю. При цьому структурна організація НП дозволяє, за необхідністю, вилучити вихідні енергетичні фільтри, що суттєво знижують суперечність між умовами інваріантності

та стійкості. Крім того, багатофункціональність передбачає інваріантність вихідних енергетичних координат НП як до координатно-параметричних збурень, так і до виду перетворюваної електроенергії, та варіаціям її енергетичних координат (напруга, частота, форма). Тоді може бути сформульований 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 – енергетичну та інформаційну (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  $f(t)$  згідно з заданим законом  $\tilde{f}(t)$  і заданою точністю, що обумовлює необхідність розробки та обґрунтування алгоритмів керування багатофункціональними НП на основі теорії інваріантності. Це визначається не-лінійністю та не-стаціонарністю структур НП з багаторазовою модуляцією. Реалізація алгоритмів координатно-параметричного керування НП при цьому дозволяє забезпечити виконання умов інваріантності в багатофункціональних НП з високою точністю [5].

При синтезі алгоритму керування НП головною задачею є визначення варіантів керування  $\text{var}(\alpha_{ij}^r)$  на кожному інтервалі. Керування координатою  $f(t)$  носить 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 реалізовуватися одночасно з умовами необхідного відтворення  $\tilde{f}(t)$ . Ці умови неподільні. Тому метою керування в такті, на основі якої формується  $(\alpha^r)$ , можна вважати

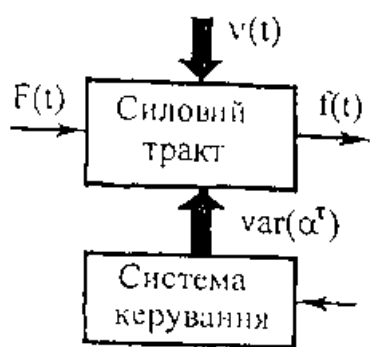


Рис.1. Узагальнена структура НП

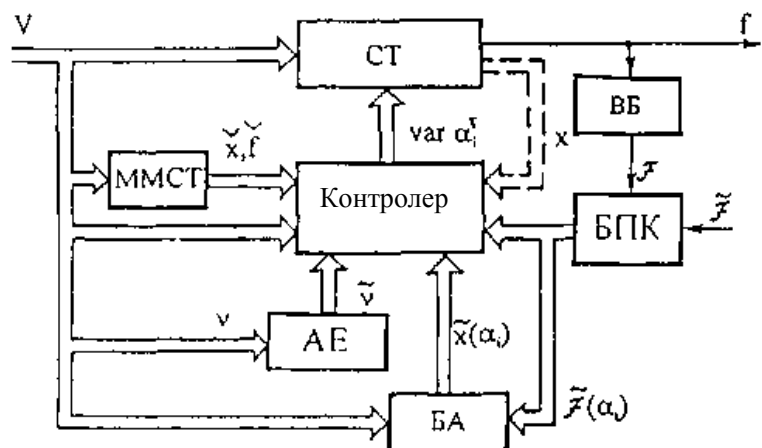


Рис.2. Організація інваріантного НП з адаптивним керуванням

забезпечення в умовах безперервно діючих  $v(t)$  співвідношення

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

Крім того, методи регулювання вихідного сигналу багатofункціональних 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.

При адаптивному координатному керуванні багатомірним 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'єкту 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 (АЕ), 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  $F(\alpha_i)$ :

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

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

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 таким чином: необхідно знайти умови, за яких структурна організація перетворювальної системи буде мати властивості дворазової структурної інваріантності відносно до координатних впливів і параметричних збурень.

Тоді досліджувана система може бути представлена рівнянням

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

де  $v$  — вектор впливових збурень і  $u$  — 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, представимо у виді

$$A_0(p)x = D_0(p)\Delta u + G_0(p)v,$$

де  $\Delta u$  — вхідний керуючий вплив.

З урахуванням введеної до розгляду помилки розузгодження руху синтезуємої інваріантної системи і еталонного оператора  $\varepsilon$  можна записати систему, що описує рух об'єкту 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. В результаті отримано рівняння

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

Звідки за умов

$$\begin{aligned} \Delta A(p,t) &= \Delta S(p,t), \\ \Delta D(p,t) &= \Delta T(p,t), \\ \Delta G(p,t) &= \Delta Z(p,t), \end{aligned} \tag{1}$$

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

$$A_0(p)\varepsilon = 0. \tag{2}$$

Отже, за нульових початкових умов і стійкості руху, а також за будь-яких допустимих видів вхідних координатних і параметричних впливів маємо  $\varepsilon(t) \equiv 0$ . Рівняння (1) і (2) є необхідними умовами структурної інваріантності перетворювальної системи по координаті  $\varepsilon$ .

Розгляд варіанту структурної організації НП (рис.3) дозволяє сформулювати положення про структурну інваріантність НП у вигляді необхідної та достатньої умов, а також умови фізичної реалізації, причому, достатньою умовою є наявність багаторазової, принаймні, дворазової, модуляції вхідного впливу. Умова апаратної реалізації призводить до мінімізації числа 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).

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

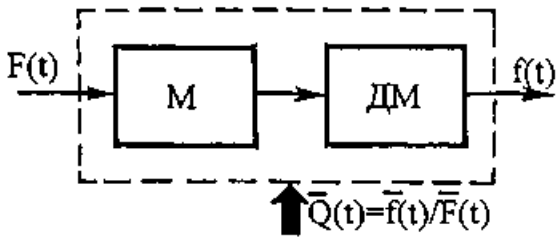


Рис.3. Структура силового тракту

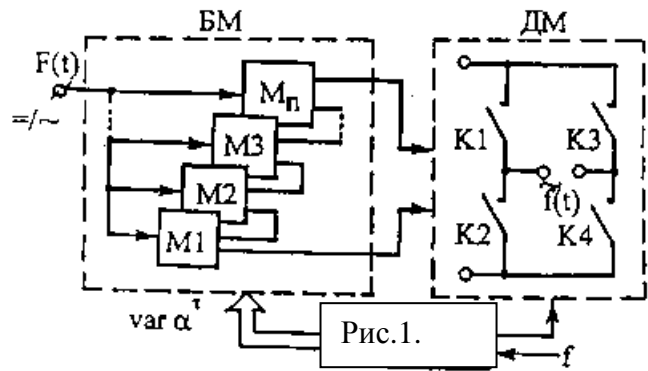


Рис.4. Функціональна організація силового тракту

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

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

Очевидно, що використання більшості існуючих методів аналізу при дослідженні НП з багаторазовою модуляцією не ефективно, що обумовлює застосування приблизних методів аналізу. Тому доцільна розробка теоретичних положень, які орієнтовані на дослідження перетворювальних систем з багаторазовою модуляцією на основі апарату гіперкомплексного обчислення [6]. Гіперкомплексні числові системи (ГЧС) є узагальненням поняття числової системи. Формулювання задач у гіперкомплексному уявленні досить перспективно з точки зору більш раціонального розв'язання деяких алгебраїчних та диференціальних рівнянь і систем, оскільки дозволяє здійснити стиснення оброблюємої інформації та одержати інформаційно повне рішення.

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

Здійснивши комплексне перетворення для складових комутаційної функції, одержимо

$$\left. \begin{aligned} a(t) &\doteq \dot{A}_m = a_m \cos \alpha_m + i a_m \sin \alpha_m \\ b(t) &\doteq \dot{B}_k = b_k \cos \beta_k + j b_k \sin \beta_k \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

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

$$a_m \sin \alpha_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} a(\varphi/\Omega) \cos m\varphi d\varphi; \quad b_k \sin \beta_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} b(\lambda/\omega) \cos k\lambda d\lambda \quad (4)$$

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

Підставивши вирази (4) в (3) і перемноживши  $\overset{\bullet}{A}_m$  і  $\overset{\bullet}{B}_k$  з урахуванням формули Ейлера, отримаємо інтегральне перетворення, яке назовемо квадріплексним:

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

Одержане перетворення є прямим квадріплексним перетворенням. Обернене квадріплексне перетворення запишемо як:

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

Зображення  $Ce^{i\alpha} e^{j\beta}$  назовемо 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  $Z = r + \varphi_0 L + (\varphi_0 C)^{-1}$ .

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 обумовило розв'язання проблеми створення багатофункціональних НП із заданими характеристиками функціонування для інваріантних СЕЖ автономних об'єктів.

### Список літератури

1. Алиев Р.А. Принцип инвариантности и его применение для проектирования промышленных систем управления. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128с.
2. Принцип инвариантности в измерительной технике /Б.Н. Петров, В.А. Викторов, Б.В. Лукин, А.С. Совлуков. – М.:Наука, 1976. – 244с.
3. Адаптивные системы автоматического управления /В.Н.Антонов, А.М.Пришвин, В.А.Терехов, А.Э.Янчевский: Под ред. В.Б.Яковлева. –Л.:Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. –204с.
4. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981. – 448с.
5. Смирнов В.С. Организация структурно-инвариантных вентильных преобразователей автономных систем электроснабжения // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Електротехніка. – Київ: ІЕД НАН України. – 1999. – С.34-53.
6. Кантор И.Л., Солодовников А.С. Гиперкомплексные числа. – М.: Наука, 1973. – 218 с.