

А.В. Моргун, аспір.

Науковий керівник – Ю.С. Ямненко, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

РОЗШИРЕНА АЛГЕБРА СТРУКТУРНИХ ЧИСЕЛ ДЛЯ ПОБУДОВИ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ

Структурні числа та алгебра структурних чисел завдяки простоті відображення, гнучкості та наявним алгебраїчним операціям є потужним інструментом для вирішення широкого спектра завдань. Зокрема, у автономних системах електроживлення та системах із розподіленою генерацією (Micro Grid) математичний апарат структурних чисел може ефективно використовуватися для розрахунку параметрів робочих режимів споживання електричної енергії.

Метою статті є висвітлення розширеної алгебри структурних чисел. Було запропоновано доповнити стандартну алгебру структурних чисел шляхом введення додаткових операцій та модифікації чинних з метою розширення сфери їхнього використання, а саме для побудови гнучких, адаптивних алгоритмів керування електроспоживанням. Це досягається за рахунок можливості враховувати параметри окремих компонентів системи та здійснювати керування як всією системою, так і окремими її складовими. Таким чином, структурні числа з розширеною алгеброю є перспективним напрямком досліджень та потребує детального опрацювання.

Ключові слова: структурні числа; алгоритм керування; Smart House; Micro Grid.

Вступ. Враховуючи властивості структурних чисел та їх алгебру (АСЧ) можна прогнозувати їх успішне використання у системах керування завдяки своїй простоті та наочності. Однак, стандартна АСЧ не може повністю задовольнити вимоги до формування спеціального структурного числа системи, що підлягає керуванню. За особливістю будови структурне число не може містити однакові елементи у колонках та містити однакові колонки. Колонки вважаються однаковими, якщо вони містять ідентичний набір елементів незалежно від їх розташування. Такі колонки підлягають видаленню.

У реальних системах, наприклад, Smart House та Micro Grid, наявна достатня кількість об'єктів керування, кожен з яких має свої характеристики. Таким чином, кожен об'єкт може бути описаний власним структурним числом, а взаємодія цих об'єктів – іншим, утвореним внаслідок АСЧ, що описує стан системи.

АСЧ містить такі визначені операції: додавання, множення, пряма та зворотна похідна. У прийнятій алгебрі структурних чисел операцію віднімання було прирівняно до операції додавання, а ділення – до множення. Даного набору операцій досі було цілком достатньо для визначення параметрів електричних кіл як з лінійними, так і нелінійними компонентами.

У даній роботі запропоновано розширити стандартну АСЧ шляхом введення таких особливостей:

1. Виділити повне, часткове та сформоване структурне число.
2. Визначити операцію віднімання, не тотожну операції додавання.
3. Розширити список параметрів для проведення зворотної і прямої похідної.
4. Додати операцію рядкової, колонкової та повної уніфікації для формування структурного числа без повторень елементів у вказаних місцях.

Аналіз публікацій. На даний час досліджень щодо застосування структурних чисел для побудови алгоритмів керування електротехнічними системами не було проведено. З часу публікації у 1972 році монографії польських вчених [1] застосування методу структурних чисел як для цієї, так і для інших задач не спостерігалось. У [2, 3] запропоновано використання методу структурних чисел у педагогічній галузі, а саме для побудови варіантів тестових завдань з метою здійснення дистанційного та стаціонарного тестування контролю знань. Завдяки властивостям структурних чисел вдалося досягти автоматизованої генерації множини унікальних варіантів тестових завдань (кожен варіант містить хоча б одне завдання, відсутнє в інших варіантах). У [4] запропоновано використати структурні числа для планування «розумної» мережі електроживлення Smart Grid, де задачі ефективного керування споживанням та генерацією електричної енергії є дуже важливими та актуальними [5][6].

Повне, часткове та сформоване структурне число. При побудові стандартного структурного числа варто враховувати, що кожна колонка має бути унікальною та не містити однакових елементів. Таке структурне число у розширеній АСЧ є сформованим структурним числом:

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix} = [\emptyset] = [0]. \quad (1)$$

Повне структурне число можна назвати характеристичним структурним числом – це таке число, що описує всі елементи системи та їх параметри.

Однак, якщо вважати елементи структурного числа (1) параметрами деякої системи, то видаляти такі колонки не потрібно, оскільки вони відображають різні її стани або стек з операцій, що необхідно запровадити в системі. Отже, таке структурне число, до якого не застосовуються правила формування колонок, є повним структурним числом:

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

У деяких системах кожен елемент та набір його характеристик не може дублюватися. У такому випадку необхідно прибрати всі відповідні колонки, окрім першої:

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \\ 2 & 5 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Елементи структурних чисел розширеної АСЧ не можуть бути нулями, оскільки нуль еквівалентний порожній множині.

Додавання та віднімання структурних чисел. Операція додавання у стандартній АСЧ є утворенням єдиного структурного числа (суми) шляхом приписування до першого структурного числа (доданка) колонок усіх інших структурних чисел (доданків):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix}; A + B = C = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Утворене структурне число є повним. Воно може бути перетворене до сформованого або часткового структурного числа, якщо цього вимагає алгоритм керування.

Враховуючи той факт, що процеси у системах електроживлення є динамічними та стаціонарними, то зміна параметрів системи є неминучою. А, отже, характеристичне структурне число має змінюватися відповідно до обставин, що виникають при роботі системи. Для цього необхідно ввести операцію віднімання, від'ємником якої є колонка (4) або номер колонки. Важливо звернути увагу на те, що нумерація колонок починається з нуля.

$$C - A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$C - \{= 1\} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} - \{= 1\} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$C - \{> 1\} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} - \{> 1\} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 2 & 4 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$C - \{\leq 1\} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 1 & 4 & 6 \end{bmatrix} - \{\leq 1\} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 5 \\ 1 & 4 & 6 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Вказана операція віднімання може бути використана, якщо у системі вже не використовується компонент або його наявність не впливає на подальшу роботу.

Пряма та зворотна похідна структурних чисел. Стандартна АСЧ визначає таку операцію визначення прямої похідної структурного числа: видалити з нього такі колонки, що не містять заданого значення α , за яким здійснюється операція похідної. Позначається ця операція як:

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha} \quad (9)$$

Наприклад, похідна вказаного вище сформованого структурного числа C при $\alpha = 1$ буде дорівнювати:

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha} = |2 \ 2|. \quad (10)$$

Дана операція є основною у випадку здійснення розрахунку параметрів електричного кола, однак недостатньою для побудови алгоритмів систем керування. Це пояснюється тим, що стан системи є динамічним, а цільова функція керування може формулюватися по-різному. Тому запропоновано розширити операцію визначення прямої похідної додаванням додаткових критеріїв вибірки. Вибірка може бути здійснена як при врахуванні всіх параметрів одночасно, так і при появі одного з них:

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha_1 \& \partial \alpha_2 \partial \alpha_3 \dots \partial \alpha_n} | \varepsilon = m, \quad (11)$$

де C – структурне число, $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ – кількість параметрів, за якими провадиться процес знаходження похідної, ε – номер параметра, який не буде відображено в утвореному структурному числі. Зазвичай, ε – це номер основного параметра, який об'єднує всі інші. Позначення $\partial\alpha_1 \& \partial\alpha_2$ означає, що у колонці має бути обидва параметри, у той же час параметр $\partial\alpha_3$ може бути відсутнім. Якщо $\varepsilon = 0$, то всі параметри будуть показані. Наприклад, необхідно визначити похідну від сформованого структурного числа C при $\alpha_1 = 1$ та $\alpha_2 = 5$:

$$\frac{\partial C}{\partial\alpha_1 \partial\alpha_2} |_{\varepsilon = 0} = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 2 \\ 2 & 6 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\frac{\partial C}{\partial\alpha_1 \partial\alpha_2} |_{\varepsilon = 1} = \begin{bmatrix} \emptyset & 5 & 2 \\ 2 & 6 & \emptyset \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial\alpha_1 \partial\alpha_2} |_{\varepsilon = 2} = \begin{bmatrix} \emptyset & \emptyset & 2 \\ 2 & 6 & \emptyset \end{bmatrix} \quad (14)$$

Операція прямої похідної може бути використана в тому випадку, коли необхідно сформувати сигнали керування для вказаних у параметрах компонентів системи. Дана особливість призводить до збільшення швидкодії алгоритмів керування, оскільки формуються лише необхідні сигнали керування для цільових елементів.

Зворотна похідна є оберненою операцією до прямої похідної й слугує для виокремлення вказаних у параметрах елементів. Дана операція може бути використана, якщо необхідно сформувати сигнали керування тим пристроям системи, що не містять вказаних елементів. Позначенням зворотної похідної є:

$$\frac{\delta A}{\delta \alpha} \quad (15)$$

Наприклад, похідна сформованого структурного числа C при $\alpha = 1$ буде рівною:

$$\frac{\delta C}{\delta \alpha} = \begin{bmatrix} 3 & 3 & 5 \\ 4 & 4 & 6 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Запропоновано розширити операцію визначення зворотної похідної доданням додаткових критерії вибірки, аналогічним до (11):

$$\frac{\delta C}{\delta\alpha_1 \& \delta\alpha_2 \delta\alpha_3 \dots \delta\alpha_n}, \quad (17)$$

де C – структурне число, $\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$ – кількість параметрів, за якими здійснюється процес знаходження похідної. Наприклад, необхідно визначити похідну від сформованого структурного числа C при $\alpha_1 = 1$ та $\alpha_2 = 5$:

$$\frac{\delta C}{\delta\alpha_1 \delta\alpha_2} = \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ 4 & 4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Рядкова, колонкова та повна уніфікація структурного числа. У стандартній АСЧ за замовчуванням застосовується операція колонкової уніфікації – видалення таких колонок, елементи яких повторюються. Операція колонкової уніфікації є такою:

$$uni_{col} \left(\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 4 & 4 \\ 5 & 3 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

У розширену АСЧ додано операцію рядкової (20) та повної уніфікації (21). Дія даних операцій аналогічна колонковій, лише щодо рядків або до рядків і колонок одночасно:

$$uni_{row} \left(\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

$$uni_{col} \left(\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 2 & 4 & 4 \\ 2 & 5 & 3 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 5 & 3 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Дані операції можуть бути використані у системах, де порядок елементів є чітко визначеним, і повторення його у визначених позиціях неприпустимо.

Таким чином, введені додаткові операції дозволяють побудувати алгоритм керування режимами роботи електротехнічних пристроїв та систем з урахуванням їх особливостей.

Висновки. У даній роботі було запропоновано таке доповнення стандартної АСЧ з метою розширення її функціональних можливостей:

- виділення повного, часткового та сформованого структурного числа. Дане виділення необхідне для формування загальної характеристики системи, що підлягає керуванню з урахуванням особливостей її елементів.

- визначення операції віднімання не тотожною операції додавання з метою забезпечення реагування системи на зміну кількості її елементів;
- розширення списку параметрів для взяття зворотної й прямої похідної з метою збільшення швидкодії при формуванні сигналів керування;
- додання операції рядкової, колонкової та повної уніфікації для формування структурного числа без повторень елементів у вказаних місцях для систем, у яких положення елементів або їх параметрів має бути чітко ідентифіковано.

Розширена АСЧ є новим інструментом для побудови алгоритмів керування електротехнічними системами. Враховуючи її особливості, необхідно проводити подальші дослідження з метою їх практичного застосування в реальних системах.

Список використаної літератури:

1. Беллер С., Возняцькі Г. Анализ и синтез электрических цепей методом структурных чисел / С.Беллер, Г.Возняцькі. – М. : Издательство «МИР», 1972. – 334 с.
2. Абакумова О.О., Моргун А.В. Алгоритм генерації тестових завдань на основі структурних чисел / О.О. Абакумова, А.В. Моргун // Електроніка й зв'язок. – С. 109–113.
3. Моргун А.В. Навчально-методичний комплекс «Додаткові розділи мікропроцесорної техніки» / А.В. Моргун // Конференція молодих вчених. – 2014. – Вип. 1. – С. 251–255.
4. Осипенко К.С. Планування Smart Grid з використанням методу структурних чисел / К.С. Осипенко // VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2015» / Збірник статей. – С. 223–226.
5. Zhuikov Valery Electro-cost models of sources and loads for local object power control / Valery Zhuikov, Julia Petergerya, Olexander Ivanin // Przegląd elektrotechniczny electrical review «Computational Problems of Electrical Engineering». – Poland. – 2010. – Pp. 71–73.
6. Zhuikov V. Intellectual systems to control energy generation and consumption in local objects / V.Zhuikov, J.Petergerya // Proceeding of 2-nd Conference «Power Electronic Devices Compatibility». – PEDC-2001. – Poland. – Zielona Gora : Technical University Press. – Pp. 208–212.

References:

1. Beller, S. and Voznyatski, G. (1972), *Analiz i sintez elektricheskikh tsepey metodom strukturnykh chisel*, Izdatel'stvo "MIR", Moscow, 334 p.
2. Abakumova, O.O. and Morgun, A.V., Algorithm generatsii testovykh zavdan' na osnovi strukturnykh chisel, *Elektronika j zv'jazok*, pp. 109–113.
3. Morgun, A.V. (2014), "Navchal'no-metodychnyj kompleks "Dodatkovi rozdily mikroprocesornoj tehniky", *Proceedings of the Conference of Young Scientists – 2014*, Vol. 1, pp. 251–255.
4. Osypenko, K.S. (2015), "Planuvannja Smart Grid z vykorystannjam metodu strukturnykh chisel" *Proceedings of the VIII International Scientific Conference of Young Scientists "Elektronika-2015"*, pp. 223–226.
5. Zhuikov, V., Petergerya, J. and Ivanin, O. (2010), "Electro-cost models of sources and loads for local object power control", *Computational Problems of Electrical Engineering*, pp. 71–73.
6. Zhuikov, V. and Petergerya, J. (2001), "Intellectual systems to control energy generation and consumption in local objects", *Proceeding of 2-nd Conference "Power Electronic Devices Compatibility" PEDC-2001*, Technical University Press, Zielona Gora, Poland, pp. 208–212.

МОРГУН Артем В. – аспірант Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту».

Наукові інтереси:

- системи розподіленої генерації електроенергії у мережі Smart Grid та Micro Grid.

E-mail: art.morhun@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 13.09.2016.