УДК 681.52 **doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.13**

М. І. ЧЕРПАКОВ

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ШЛЯХУ ТА МЕТОДІВ СИНТЕЗУ СХЕМ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ

Метою цієї статті є визначення основних методів синтезу схем гідропневмоагрегатів та побудування шляху, якого можна дотримуватись при побудові схем із управляючими автоматами. Завдяки визначенню основних підходів структурного синтезу, а саме елементний, агрегатний та їх комбінація, була побудована структурну організація цих підходів. Розглянуто основні методи синтезу схем гідропневмоагрегатів, які починаються з формалізованого опису завдання. Розглянуті принципи побудови схем на першій ланці містять у собі стандартну позиційну структуру. Розглянута сутність позиційної структури та перехід до мінімізованої структури. Визначені аспекти синтезу мінімізованої структури та стандартної позиційної структури у контексті систем лінійних рівнянь. Розглянуті методи із застосуванням систем логічних рівнянь та матриць відповідностей. Розглянуті методи синтезу логічних рівнянь та їх подальша мінімізація з урахуванням станів системи, елементів пам'яті та вихідних пристроїв. Визначені рамки застосування теорії графів та її роль у синтезі схем гідропневмоагрегатів. Розглянуті основні положення застосування методів декомпозиції. Розглянутий метод синтезу схем із позиціонуванням гідропневмоагрегатів шляхом реалізації на датчиках та несилових упорах. Звернена увага на застосування промислових логічних контролерів та їх роль у сучасних методах реалізації схем на практиці. Підкреслені переваги та недоліки цих методів, а також надані деякі алгоритми роботи.

Ключові слова: синтез схем, гідропневмоагрегат, методи декомпозиції, стандартна позиційна структура, позиціонування, управляючий автомат.

M. CHERPAKOV

ANALYTICAL REVIEW OF THE WAY AND METHODS OF SYNTHESIS OF HYDROPNEUMATIC UNITS SCHEMES

The purpose of this article is to determine the main methods of synthesizing hydropneumatic units circuits and to build a path that can be followed when building circuits with control machines. Thanks to the definition of the main approaches of structural synthesis, namely elemental, aggregate and their combination, the structural organization of these approaches was built. The article discusses the main methods of synthesizing schemes of hydropneumatic units, which begin with a formalized description of the task. The considered principles of building schemes on the first link contain a standard positional structure. The essence of the positional structure and the transition to a minimized structure are considered. Aspects of the synthesis of the minimized structure and the standard positional structure in the context of systems of linear equations are determined. Considered methods using systems of logical equations and correspondence matrices. The methods of synthesis of logic equations and their subsequent minimization taking into account the states of the system, memory elements and output devices are considered. The framework of the application of graph theory and its role in the synthesis of schemes of hydropneumatic units are defined. The main provisions of the application of decomposition methods are considered. The method of synthesis of schemes with positioning of hydropneumatic units by implementation on sensors and non-power stops is considered. Attention is drawn to the application of industrial logic controllers and their role in modern methods of implementation of schemes in practice. The advantages and disadvantages of these methods are highlighted, as well as some work algorithms are provided.

Keywords: synthesis of schemes, hydropneumatic unit, decomposition methods, standard positional structure, positioning, control machine.

Вступ. У проєктуванні схем гідропневмоагрегатів важливо розуміти який шлях розробник має пройти від початку своєї роботи до її здачі. Це базове розуміння принципів роботи, інструментів та методів синтезу схем. Грунтуючись на [1] можна виділити наступний шлях та методи у синтезі схем гідропневмоагрегатів.

Одним з перших та основних питань під час проектування схем є формалізація опису роботи системи управління. Формалізація опису роботи системи гідро- або пневмоприводів технологічного об'єкта дозволяє перейти від вербального до математичного опису роботи системи, тобто перетворити першоджерело у математичну модель, яка дозволить синтезувати необхідну схему системи управління.

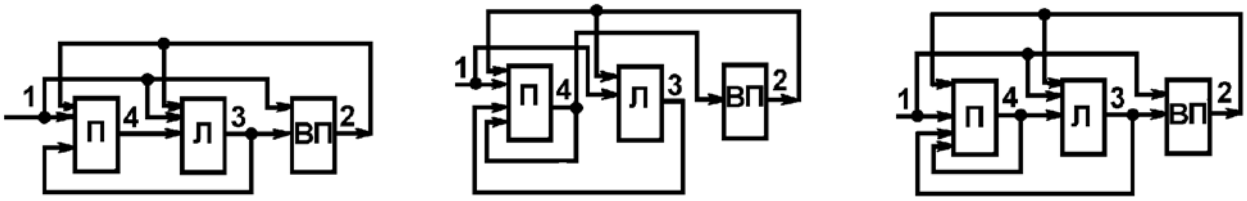
Етап формалізації опису тісно пов'язаний з етапом структурного синтезу, оскільки спосіб опису багато в чому визначає метод структурного синтезу. Можна визначити два методи для структурного синтезу гідро- і пневмоприводів різноманітних промислових роботів та автоматичних систем. Це елементний та агрегатний методи. [1]

Елементний підхід до логічного проектування [1, 2] включає такі основні етапи: складання формалізованого опису роботи управляючого апарата (наприклад, у вигляді таблиць вмикань); послідовне введення елементів пам'яті з перевірками реалізації; одержання системи логічних рівнянь та її мінімізація; реалізація системи рівнянь засобами автоматики.

Вхідні сигнали 1 (від зовнішніх джерел) і 2 (які контролюють положення виконавчих пристроїв) подаються на входи блока пам'яті П, який містить тригери з роздільними входами. Додатково, сигнали 3, отримані з виходу блока логіки Л, що містить логічні елементи, подаються на входи блока пам'яті, а також використовуються для включення виконавчих пристроїв. На входи блока логіки Л поступають вхідні сигнали 2, що контролюють положення виконавчих пристроїв, вхідні сигнали 1 від зовнішніх джерел і сигнали 4 з виходів блока пам'яті П. Схема представлена на рис. 1, *а*.

При структурному синтезі спочатку визначається послідовність роботи виконавчих пристроїв (наприклад, $Ц_1^+Ц_2^+Ц_2^-Ц_1^-$, де $Ц^+$ позначає переміщення штоку циліндра у кінцеву позицію, $Ц^-$ – переміщення штоку в початкову позицію), визначаються методи перемикання позиції циліндрів (перемикач, тощо) і на основі цього будується циклограма, яка є втіленням формалізованого опису.

© М. І. Черпаков, 2023



а *б* *в*

Рис. 1. Структурная організація систем гідро- і пневмоприводів:
а – елементний підхід; *б* – агрегатний підхід; *в* – симбіоз підходів

На основі даних такої таблиці-циклограми проводиться аналіз, який дозволяє визначити, в яких переходах з'являються однакові вхідні набори, які приводять до введення елемент пам'яті для даного циклу. Крім того, при складанні логічних рівнянь для даного циклу слід виконати інтуїтивну перевірку на відсутність помилкових спрацьовувань виконавчих пристроїв. Мінімізацію логічних рівнянь можна виконати з використанням відомих карт Карно.

Елементний принцип побудови (порівняно з агрегатним) помітно збільшує швидкодію схем; він використовується на практиці у швидкодіючих об'єктах автоматизації.

Агрегатний підхід [1, 3] дозволяє створити схему системи управляючого апарату шляхом компонування окремих блоків. Це спрощує процес побудови системи та скорочує час, потрібний для її проектування. Структурна організація агрегатного підходу представлена на рис. 1, *б*.

На входи блока пам'яті П подаються такі сигнали: вхідні сигнали 1 від зовнішніх джерел, сигнали 2, що відповідають за контроль положення виконавчих пристроїв, а також сигнали з виходів 3 блока логіки і сигнали з виходів 4 блока пам'яті. Блок логіки Л отримує на входи сигнали 1 і сигнали 2. Сигнали 4 для активації виконавчих пристроїв надходять з виходу блока пам'яті. Наявність блока пам'яті дозволяє вимкнути різні неприпустимі стани системи.

Цей опис може бути переведений на формалізовані мови для початкового аналізу. Під час структурного синтезу системи він використовується безпосередньо, і кількість тригерів у визначається кількістю переходів між технологічними операціями, а кількість логічних елементів – кількістю кон′юнкцій, що дорівнює числу тригерів плюс число блокувань, та ін.

Основним недоліком агрегатного підходу є надмірність структури, що ускладнює схему. Розвиток агрегатних методів проектування наклав відбиток і на формалізацію опису роботи управляючих автоматів великої розмірності. Були розроблені компактні форми опису у вигляді логічних схем алгоритмів і графів, а також методи їх мінімізації. Граф – це безліч яких-небудь елементів, зв'язаних між собою співвідношеннями [4]. Слід відзначити: логічні схеми алгоритмів (алгебраїчна форма) можуть бути подані у вигляді графів переходів (рис. 2 – приклад графа переходів).

Найбільш доцільними є методи проектування, які грунтуються на симбіозі двох існуючих підходів, з урахуванням їх позитивних особливостей (рис. 1, *в*). При цьому як формалізований опис був прийнятий граф операцій, повна мінімізація якого дозволяє одержати мінімальний блок пам'яті (мінімальне число елемент пам'яті), що використовується при агрегатному підході. З елементного підходу взята ідея подовження вхідних наборів, що викликають переходи між технологічними операціями. Для реалізації такого підходу слід користуватись математичною моделлю – матрицею відповідностей, розмірність якої, на відміну від таблиць переходів і вмикань, залежить не від кількості входів і виходів, а лише від кількості станів.

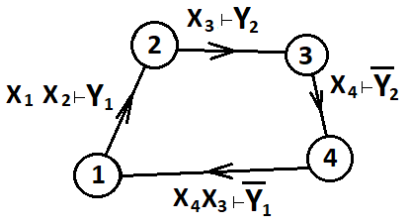


Рис. 2. Граф операцій для функцій переходів

Стандартна позиційна структура. Після складання формалізованого опису є не менш важливий – структурний синтез. Вибір методу структурного синтезу визначається багатьма факторами, наприклад складністю структури, швидкодією схеми та ін.

В основу принципу побудови схем з використанням стандартної позиційної структури покладено метод побудови схеми безпосередньо по графу операцій [1]. Тут використовується командоапаратний спосіб побудови. Число елементів пам'яті командоапарата вибирається таким, що дорівнює числу вершин графа операцій. У такий спосіб здійснюється одиничне кодування внутрішніх станів системи, а число внутрішніх станів збігається із числом операцій технологічного процесу. Функції включення елемент пам'яті $S = f(p, y)$ залежать від вхідного сигналу та від значення виходу попереднього елемента пам'яті:

$$S_i = p_i \cdot y_{i-1},$$

де S_i – сигнал включення i-го елемент пам'яті; p_i – вхідний набір сигналів, що переводить систему від одного стану в інший в i-му переході; y_{i-1} – вихідний сигнал елементу пам'яті у попередньому переході $(i - 1)$. Наступним за останнім переходом є перший.

Функції виходів у цьому випадку $z = f(y)$ залежать лише від внутрішніх станів і не залежать від

вхідних наборів:

$$z_m = y_i,$$

де z_m – функція виходу m.

Мінімізована структура. Метод М. Черкашенко. Після визначення структури її треба мінімізувати, тобто визначити число внутрішніх станів, які дорівнюють числу елементів пам'яті блока пам'яті. За наступним алгоритмом [1, 5–7] на виході отримуємо мінімізований граф операцій:

1. Вибираємо число вершин графа G_γ, яке дорівнює числу підмножин $|B|$ розбиття, яке має найбільше число блоків.

2. Однакові елементи блоків відносимо до однієї петлі й суміжної з нею наступної дуги графа G (якщо такі існують).

3. Розміщуємо на дугах, які не є петлями, останні елементи підмножин. Якщо на одній дузі, що не є петлею, виявляються неоднакові елементи (секвенції), то вони відзначаються номером контуру, до якого вони належать.

4. Записуємо (зверху вниз) на петлях упорядковані підмножини розбивки (без останніх елементів). Різні елементи, які належать до різних контурів, визначаються відповідними номерами.

Синтез логічних рівнянь. Наступним кроком йде синтезування безпосередньо логічних рівнянь. Метод структурного синтезу управляючих автоматів пневмо- і гідроприводів поєднує агрегатний та елементний підходи та дозволяє одержати систему лінійних рівнянь (СЛР), що описує схему управляючого автомата. У гідро- і пневмоприводах є різноманітні вузли, виконавчі пристрої, що отримують робочу рідину від пневморозподільників з дво- й однобічним управлінням.

Структурний синтез логічної схеми дозволяє одержати СЛР, що математично описує цю схему. СЛР містить рівняння для вмикання і вимикання кожного елемента пам'яті і кожного виконавчого пристрою. Мінімізація СЛР забезпечує на етапі побудови схеми скорочення кількості елементів, вибраних як базисні. Таким чином, забезпечивши при структурному синтезі одержання мінімального числа елементів пам'яті, ми, тим самим, скорочуємо число рівнянь, що входять до СЛР, а мінімізуючи кожне рівняння, скорочуємо число базисних пристроїв.

Метод скорочення числа рівнянь. Скорочення числа рівнянь досягається двома шляхами: зменшенням кількості рівнянь вмикань елементів пам'яті або зменшення кількості рівнянь вмикань та вимикань виконавчих пристроїв при невикористанні елементів пам'яті у вихідному блоці управляючого апарату [1].

Запропонований метод зменшує кількість рівнянь, синтезованих внаслідок подовження наборів. У зв'язку з цим мінімізується число стовпців матриці відповідностей. Подовження знаходимо за наступним алгоритмом.

1. Для секвенції подовжується набором (де для того, щоб з переміщенням виконавчих пристроїв не відбулося їх непередбачене перемикання. Якщо подовження не "усунуло" одиниці, зображені курсивом, то переходимо до п. 2, якщо "усунуло", то до п. 3.

2. Набір, подовжений за п. 1, подовжуємо сигналами з набору; переходимо до п. 3.

3. Якщо подовжений за пп. 1, 2 набір не входить до всіх наборів на часовому інтервалі дії, то переходимо до п. 5. Якщо входить, то до п. 4.

4. Одержуємо остаточне подовження набору, переходимо до п. 6.

5. Функцію формуємо диз'юнкцією вхідних наборів для переходів часового інтервалу їх дії.

6. Кінець процедури.

При подовженні слід враховувати можливості елемента пам'яті внутрішньої пам'яті.

Декомпозиція логічних рівнянь. Наступним після структурного синтезу етапом логічного проектування є побудова у вибраному апаратному базисі схеми управляючого апарату за логічними рівняннями, одержаними при структурному аналізі. [1, 2]. Таким чином, це безпосереднє підбирання модулів, які можуть виконувати функції синтезованих логічних рівнянь. До такого модуля може відноситись пропорційний гідророзподільник із специфічно визначеним управлінням або характеристиками, що комбінують у собі інші функції [8]. Тобто при застосуванні цього методу для вирішення задачі береться готовий модуль, що виконує декілька більш простих функцій всередині одного корпуса. Також ці модулі можуть виконувати різні задачі, заміняти декілька елементів на один, тощо.

Позиціонування. Одна з основних вимог, що висуваються до гідропневмоагрегатів – це можливість позиціонування, тобто зупинки вихідної ланки виконавчого механізму в ряді проміжних позицій. Є декілька варіантів реалізації цього методу. Один з них – це застосування електронних, індукційних датчиків положення, які контролюються вищезгаданими контролерами, а регулюються через положення у просторі. Інший метод – застосування несилового упору у гідропневмосистемі. Перевага таких систем – відсутність датчиків зворотного зв'язку та електронної системи управління, безударна зупинка і висока повторюваність позиціювання [2]. Таким чином, використовується вихідна ланка управляючого пристрою (гідро- або пневмоциліндру), яка забезпечує рівновагу у системі шляхом взаємодії із кінцевими перемикачами. Тобто позиціонування досягається почерговим комбінуванням натиску датчиків так, щоб на кожну позицію системи була своя кількість натиснутих або відкритих датчиків з урахуванням їх точок спрацьовування [9–12]. Одним із можливих методів реалізації схеми полягає у використанні програмованих систем. Серед них найбільше розповсюдження одержали мікропроцесорні електронні системи управління. При застосуванні цього методу елементи пам'яті переходять з фізичної форми у вигляді гідро- та пневморозподільників до форми електронної у вигляді осередків пам'яті в середині контролера. Таким чином, зростає функціональна можливість, але і зростає вартість

системи, бо така система потребує управляючі елементи із електромагнітним керуванням, а у сучасних реаліях для забезпечення більшої точності та позиціонування з використанням мінімальної кількості елементів, використовується пропорційна гідро- та пневмоапаратура.

Список літератури

1. Черкашенко М. В. *Автоматизація проектування систем гідро- і пневмоприводів з дискретним управлінням*. Харків: НТУ «ХПІ», 2001. 182 с.
2. Rohner P. Pneumatische Schaltkombinatoric fur den Praktiker. ***O****lhydraulik and pneumatik*. 1980. No. 9. P. 693–698.
3. Pessen D. W. Fast design of pneumatic sequencing circuits. Part 1: Introduction and fundamentals. *Hydraulics and pneumatics*. 1983. No. 8. P. 63–65. Part 2: Example 1 – one cylinder counting circuits. *Hydraulics and pneumatics*. 1983. No. 10. P. 57–58.
4. Harary F. *Graph Theory*. Boston: Addison-Wesley, 1971. 274 p.
5. Cherkashenko M. *Synthesis of minimum control systems of hydraulic and pneumatic drives*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. 125 p.
6. Cherkashenko M. Synthesis of discrete control systems of industrial robots. *Automation and Remote Control (USA)*. 1981. Vol. 42, no. 5. P. 676–680.
7. Cherkashenko M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation. *International Fluid Power Symposium in Aachen. The report no. 1. Fundamentals (20–22 March 2006, Aachen, Germany)*. Aachen: Apprimus, 2006. P. 147–154.
8. Cherkashenko M. Universal devices for building pneumatic control circuits for industrial robots and automatic machines. *Soviet engineering research (England)*. 1985. Vol. 5, no. 2. P. 29–31.
9. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Syntesis of control schemes of drives system*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. 120 p.
10. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects*. Germany: GmbH & Co, 2018. 214 p.
11. Mygushchenko R., Vurye B., Cherkashenko M., Kropachek O., Rezvaya K. *Logic devices of systems of electronic, hydraulic and pneumoautomatics*. Germany: GmbH & Co, 2021. 185 p.
12. Сокол Є., Черкашенко М., Потетенко О., Дранковський В., Гасюк О., Гриб О. *Гідроенергетика. Том 2. Гідравлічні машини*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 534 с.

References (transliterated)

1. Cherkashenko M. V. *Avtomatyzatsiya proektuvannya system hidro- i pnevmopryvodiv z dyskretnym upravlinnyam* [Automating the design of hydraulic and pneumatic drive systems with discrete control]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2001. 182 p.
2. Rohner P. Pneumatische Schaltkombinatoric fur den Praktiker. ***O****lhydraulik and pneumatik*. 1980, no. 9, pp. 693–698.
3. Pessen D. W. Fast design of pneumatic sequencing circuits. Part 1: Introduction and fundamentals. *Hydraulics and pneumatics*. 1983, no. 8, pp. 63–65. Part 2: Example 1 – one cylinder counting circuits. *Hydraulics and pneumatics*. 1983, no. 10, pp. 57–58.
4. Harary F. *Graph Theory*. Boston, Addison-Wesley Publ., 1971. 274 p.
5. Cherkashenko M. *Synthesis of minimum control systems of hydraulic and pneumatic drives*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. 125 p.
6. Cherkashenko M. Synthesis of discrete control systems of industrial robots. *Automation and Remote Control (USA)*. 1981, vol. 42, no. 5, pp. 676–680.
7. Cherkashenko M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation. *International Fluid Power Symposium in Aachen. The report no. 1. Fundamentals (20–22 March 2006, Aachen, Germany)*. Aachen, Apprimus Publ., 2006, pp. 147–154.
8. Cherkashenko M. Universal devices for building pneumatic control circuits for industrial robots and automatic machines. *Soviet engineering research (England)*. 1985, vol. 5, no. 2, pp. 29–31.
9. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Syntesis of control schemes of drives system*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. 120 p.
10. Sokol Ye., Cherkashenko M. *Synthesis of control schemes for hydroficated automation objects*. Germany, GmbH & Co Publ., 2018. 214 p.
11. Mygushchenko R., Vurye B., Cherkashenko M., Kropachek O., Rezvaya K. *Logic devices of systems of electronic, hydraulic and pneumoautomatics*. Germany, GmbH & Co Publ., 2021. 185 p.
12. Sokol Ye., Cherkashenko M., Potetenko O., Drankovs'kyy V., Hasyuk O., Hryb O. *Hidroenerhetyka. Tom 2. Hidravlichni mashyny* [Hydropower engineering. Vol. 2. Hydraulic machines]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020. 534 p.

Надійшла (received) 14.09.2023

Відомості про автора / About the Author

Черпаков Микита Ігорович (***Cherpakov Mykyta***) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8801-1489; e-mail: mykyta.cherpakov@gmail.com