

УДК 62-82.001.2

М.В. ЧЕРКАШЕНКО, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»

СИНТЕЗ МИНИМАЛЬНЫХ СХЕМ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ

Представлены методы синтеза минимальных систем и схем гидропневмоагрегатов.

Ключевые слова: гидропневмоагрегат, синтез, система управления, схема, граф операций, система уравнений, декомпозиция уравнений.

Введение. При синтезе систем гидропневмоагрегатов используется стандартная позиционная структура, имеющая известные преимущества, основным недостатком которой является сложность схем. Частичная минимизация стандартной позиционной структуры была предложена в работах Юдицкого С.А., Goedecke W., Belforte G., Рэйдзо Я. и др. (см. обзор [1]).

Метод полной минимизации стандартной позиционной структуры был впервые опубликован автором в [2]. Он основан на синтезе минимального графа операций [2, 3] и синтезе уравнений с использованием матрицы соответствий [2, 4].

При синтезе схем гидропневмоагрегатов ранее использовались методы раздельной декомпозиции уравнений, они описаны в работах Юдицкого С.А., Bettini A., Middleton F., Gauthier D., Eng B., Rohner P. и др. (см. обзор [1]). Основным недостатком данных методов является сложность схем.

Впервые принципы безраздельной декомпозиции уравнений и метод синтеза схем на распределительной аппаратуре были представлены автором в [5]. Методы безраздельной декомпозиции уравнений приводят к минимальным схемам, они основаны на разложении уравнения по двум переменным, выбора переменных разложения и вычисления остаточных функций [6], что приводит в сочетании с модульной элементной базой [7–12] к схемам с минимальным числом модулей и элементов.

В настоящей статье даны основные принципы построения минимальных схем гидропневмоагрегатов и эффективный метод синтеза схем с использованием минимального количества распределительной аппаратуры.

Синтез систем гидропневмоагрегатов. В качестве математического описания работы системы гидропневмоагрегатов целесообразно использовать графы операций С.А. Юдицкого.

В основу методов полной минимизации стандартной позиционной структуры положено получение абсолютно минимального графа операций [2, 3], при этом справедливо следующее

Утверждение. Граф разбиения G_γ реализуется стандартной позиционной структурой, если в нем одинаковые входные наборы P_γ , вызывающие появление различных выходных наборов z_ν и z_μ , приписаны несмежным дугам. Доказательство данного утверждения и синтез минимального графа операций представлено в [3].

На первом этапе проектирования определяем число внутренних состояний, которое равняется числу элементов памяти (ЭП) блока памяти. Для этого проведем разбиение π последовательности входных наборов P управляющего устройства (УУ) на непересекающиеся подмножества – блоки B такие, что $\bigcup B_\alpha = P$, а $B_\alpha \cap B_\beta = 0$. В случае многоконтурного графа операций для любого контура разбиение проводят в

© М.В. Черкашенко, 2014

отдельности. Одинаковые наборы P_γ , которые вызывают появление разных выходных наборов УУ z_v и z_μ , при разбиении должны быть в разных блоках и не быть последними элементами соседних блоков B_α и $B_{\alpha+1}$ (следующим блоком за последним считается первый). Кроме того, любой набор P_γ следующего блока не должен быть тождественным последнему набору предшествующего блока B_α .

Последнее утверждение можно изобразить как два соседних блока, где $\{\dots, P_\gamma \mapsto z_v\}$, $\{\dots, P_\gamma \mapsto z_\mu, \dots\}$. Если предположить такое размещение наборов с целью сокращения количества блоков $|B|$, то необходимо введение дополнительной задержки при синтезе выхода z_c .

Для иллюстрации на рис. 1 представлены графы операций пневмоагрегата загрузчика к токарному станку исходный и минимальный.

Синтез уравнений, описывающих схему, ведется с использованием матрицы соответствий (МС) [2, 4]. Использование МС позволяет синтезировать систему уравнений независимо от числа входов и выходов, поскольку размерность МС определяется числом переходов системы управления. Строки МС отвечают наборам P с учетом сигналов Y с выходов ЭП, а столбцы – сигналам, которые вызывают переходы УУ. На пересечении строки i и столбца j элемент МС $r_{ij} = 1$, если все входные сигналы УУ, отвечающие столбцу j , входят во входной набор УУ, отвечающий строке i , $r_{ij} = 0$ – в остальных случаях. Матрицы соответствий составляют для любого контура графа операций G в отдельности. Таким образом, для получения минимальных наборов необходимо провести удлинения поднаборов Q минимальным числом сигналов из множества X_c для переходов, которые вступают в противоречия, вызванные несвоевременным переключением ИУ, стремясь к использованию в переходах лишь сигналов из Q . МС является удобной математической моделью для выявления «противоречий» входной последовательности УУ и синтеза минимальной системы уравнений, описывающих схему гидропневмоагрегата.

Синтез схем гидропневмоагрегатов. Принцип безраздельной декомпозиции основан на разложении уравнений по $n - 1$ переменной и вычислении остаточных функций, он включает в себя, также, этап реализации отдельных фрагментов, основанный на вычислении всех функций, реализующихся на выходе распределителя.

Формула Шеннона разложения функции по $k - 1$ переменной имеет вид

$$y = \bar{x}_1 \dots \bar{x}_{k-2} \bar{x}_{k-1} \varphi_1(0, \dots, 0, 0, x_k) + \bar{x}_1 \dots \bar{x}_{k-2} x_{k-1} \varphi_2(0, \dots, 0, 1, x_k) + \dots + x_1 \dots x_{k-2} \bar{x}_{k-1} \varphi_{2^{k-1}}(1, \dots, 1, 0, x_k) + x_1 \dots x_{k-2} x_{k-1} \varphi_{2^{k-1}}(1, \dots, 1, 1, x_k).$$

где $x_1 - x_k$ – переменные; $\varphi_1 - \varphi_{2^{k-1}}$ – остаточные функции.

На рис. 1 представлена построенная на распределителях схема предельно-универсального модуля, реализующего функцию

$$y = \bar{x}_1 \dots (\bar{x}_{k-1} (\bar{x}_k \varphi_1 + x_k \varphi_2) + x_{k-1} (\bar{x}_k \varphi_3 + x_k \varphi_4) \dots) + \dots + x_1 \dots (\bar{x}_{k-1} (x_k \varphi_{2^{k-1}-3} + x_k \varphi_{2^{k-1}-2}) + x_{k-1} (\bar{x}_k \varphi_{2^{k-1}-1} + x_k \varphi_{2^{k-1}}) \dots),$$

где $\varphi_1, \dots, \varphi_{2^{k-1}}$ – функции одной переменной $\{0, 1, X, \bar{X}\}$.

Данное уравнение легко получить методом подстановки функции, реализующейся на выходах каждого распределителя.

Данное уравнение совпадает с формулой Шеннона.

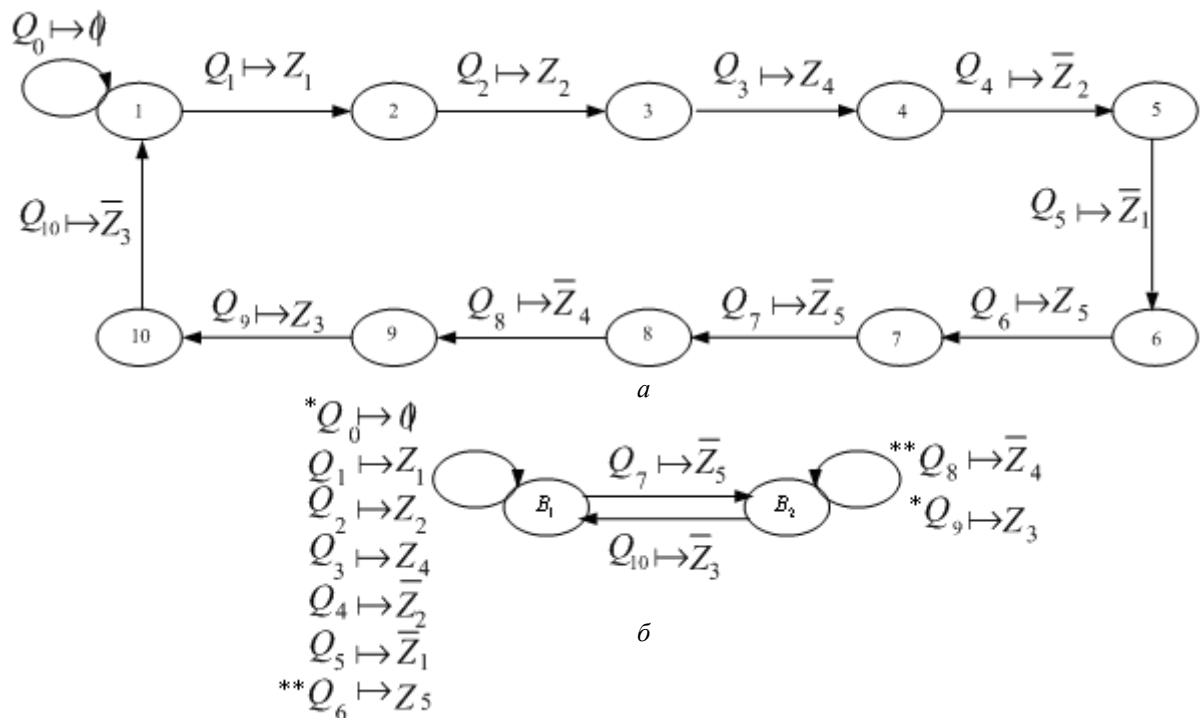


Рис. 1 – Графы описания условий работы пневмоагрегата загрузчика:
 а – граф операций; б – минимальный граф операций;
 Q – поднаборы, вызывающие переходы УУ между операциями;
 звездочками помечены одинаковые входные наборы

Рассмотрим, построенные на распределителях, универсальные устройства, которые позволяют реализовать любую гидро- и пневмосхему, а также метод проектирования схем с применением таких устройств [7].

Имеем два типа универсальных логических устройств: с гидро- и пневмоаппаратурой, выпускаемых серийно, и с оригинальной l -линейной распределительной аппаратурой.

Устройства первого типа содержат серийные двухпозиционные распределители (например, трехлинейные) с односторонним управлением. Аналогичные устройства могут быть построены с использованием четырех- и пятилинейных распределителей. На рис. 2а показана схема устройства первого типа, которое содержит трехлинейные распределители.

Из схемы видно, что в устройстве первого типа каждый выходной канал распределителя следующего яруса соединен с одним входным каналом распределителя предшествующего яруса дерева устройства. При этом входные каналы распределителей последнего яруса, а также камеры управления распределителей являются входами устройства, а выходной канал распределителя первого яруса соединен с выходом устройства. Для устройства первого типа справедливы приведенные ниже соотношения. Число распределителей, которые входят в универсальное устройство, реализующее любую логическую функцию при $k \geq 2$ переменных, определяется из соотношения $n = 2^{k-1} - 1$; число управляющих входов $|x| = k - 1$; число настроечных входов $|\varphi| = 2^{k-1}$.

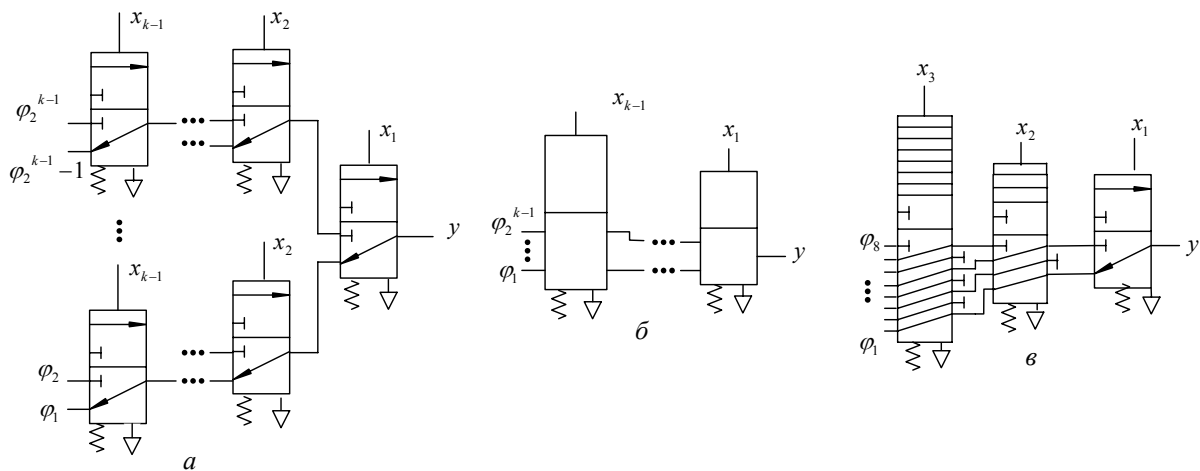


Рис. 2 – Схемы устройств на предельно универсальных логических модулях

Универсальное устройство второго типа (рис. 2б) включает оригинальные распределители, для которых при $k \geq 2$ существует зависимость $n = k - 1$. Линейность распределителя i (где $i = 1, \dots, n$) вычисляют по формуле $l = 2^{i+1} - 1$. Число входов определяют по ранее приведенным формулам.

Пример устройства второго типа, которое реализует функции четырех переменных, приведен на рис. 2в. Из рис. 2в видно, что входные каналы предшествующего распределителя соединены с выходными каналами следующего, расположенного через один, остальные выходные каналы заперты. По соответствующим формулам вычисляем $|x| = 3, |\varphi| = 8, n = 3, l_1 = 3, l_2 = 7, l_3 = 15$.

Таким образом, для реализации логической функции k переменных с использованием устройств следует в управляющие входы подать сигналы, которые отвечают переменным разложения, а в настроечные входы – сигналы, которые отвечают множеству значений $\{0, 1, X, \bar{X}\}$. Итак, реализация уравнений сводится к вычислению функций

$$\varphi_1 = f(0, \dots, 0, 0, x_k); \varphi_2 = f(0, \dots, 0, 1, x_k); \dots; \varphi_{2^{k-1}} = f(1, \dots, 1, 1, x_k).$$

Например, требуется построить схему по уравнению

$$y = \bar{z}_1 \bar{z}_2 \bar{z}_3 + z_1 z_2 z_3.$$

Данное уравнение трех переменных. Выберем модуль, реализующий все функции трех переменных, например, построенный по принципу (рис. 2в). Находим остаточные функции

$$\varphi_1 = f(0, 0) = \bar{z}_3; \varphi_2 = f(0, 1) = 0; \varphi_3 = f(1, 0) = 0; \varphi_4 = f(1, 1) = z_3.$$

Построенная схема показана на рис. 3.

В ряде случаев на практике целесообразно создавать устройства, которые реализуют любую логическую функцию любого числа переменных путем использования небольшого количества элементов. Поэтому были созданы предельно-универсальные модули, которые реализуют, например, полный набор функций трех переменных, и декомпозиционные методы, которые позволяют реализовать любую логическую схему с n входными сигналами.

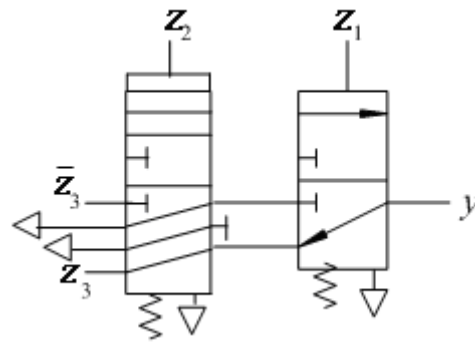


Рис. 3 – Пример построения схемы

Реализация функций трех переменных осуществляется данными модулями по схемам, показанным на рис. 4. Данные модули реализуют на своем выходе логическую функцию $\bar{x}_1\bar{x}_2f_0(0,0) + \bar{x}_1x_2f_1(0,1) + x_1\bar{x}_2f_2(1,0) + x_1x_2f_3(1,1)$. Модуль на рис. 4а построен на основе модуля [8], на рис. 4б построен на основе модуля [9], на рис. 4в построен на основе модуля [10].

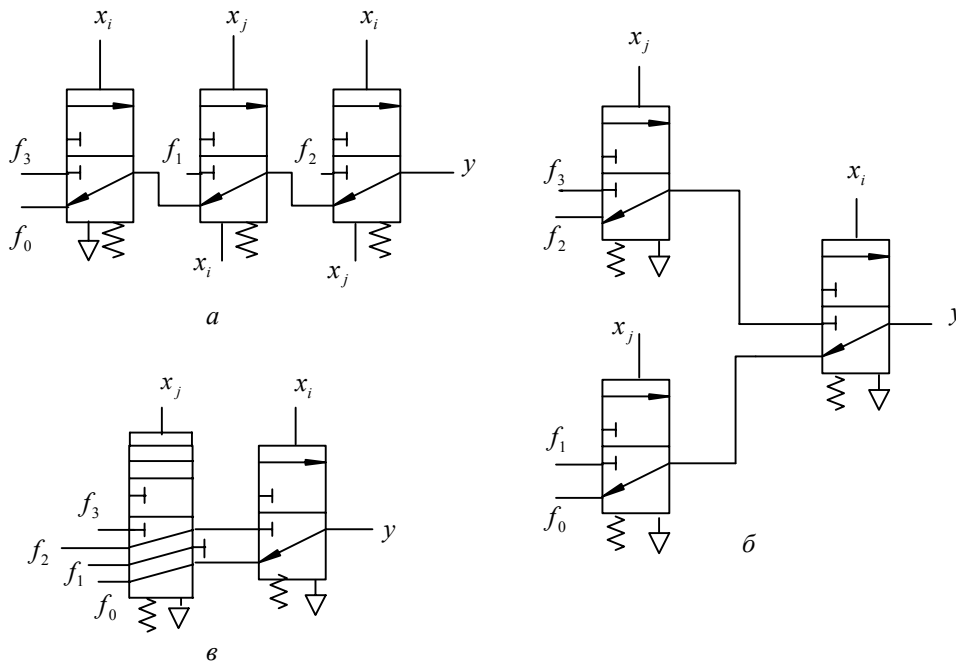


Рис. 4 – Модули, реализующие формулу разложения функций по двум переменным

Метод безраздельной декомпозиции состоит из следующих разделов.

1) Анализ серийно выпускаемых элементов и модулей систем гидропневмоавтоматики с использованием упрощенных таблиц состояний.

2) Разработка базовых схем разложения уравнений по одной и двум переменным.

3) Непосредственное разложение уравнений путем определения переменных разложения и вычисления остаточных функций.

4) Реализация остаточных функций путем их дальнейшего разложения либо с использованием полученных (по пункту 1) схемных решений.

Анализ элементов и модулей схем гидропневмоавтоматики. Покажем построение упрощенной таблицы состояний за счет рассмотрения различных состояний

лишь для управляющих входов распределительной аппаратуры. Размерность таблицы в этом случае составит для одного управляющего входа $2m$, а для двух управляющих входов $4m$, где m – число выходов. Это позволяет получить удобный аппарат анализа. Отметим, что размерность обычной таблицы состояний – $2^n(n + m)$.

Составим таблицу состояний для управляющих входов, а в столбцах для выходов будем записывать соответствующие настроечные входы, если сигнал на рассматриваемом выходе равен 1, и 0 – в противном случае. В табл. 1 показан гидравлический либо пневматический распределитель. Каналы распределителей отмечены цифрами, соответствующими международной маркировке. Построенная таблица для двух управляющих входов имеет вид (см. табл. 1). Так, находим для двух управляющих входов $y = a(\bar{x}_i\bar{x}_j + \bar{x}_ix_j + x_ix_j) + bx_i\bar{x}_j = a(\bar{x}_i + x_j) + bx_i\bar{x}_j$, что соответствует модулю представленному на рис. 4б.

Основанием для безраздельной декомпозиции является сопоставление уравнений, реализующихся на выходах устройств с формулой Шеннона разложения логической функции по одной и двум переменным.

Таблица 1
Функции на выходах для двух управляющих входов

| Для двух управляющих входов x_i / x_j | Выход y | |
|--|--------------|--|
| $\bar{x}_i\bar{x}_j$ | a | |
| \bar{x}_ix_j | a | |
| $x_i\bar{x}_j$ | b | |
| x_ix_j | a | |

Если принять $a = f_0(0); b = f_1(1)$, то получаем формулу $y = \bar{x}_if_0(0) + x_if_1(1)$ разложения логической функции по одной переменной, позволяющей понизить уравнение на один порядок, такой модуль представлен на рис. 5а.

Формула разложения функции по двум переменным имеет вид

$$y = \bar{x}_i\bar{x}_jg + \bar{x}_ix_jc + x_i\bar{x}_jb + x_ix_jq. \tag{1}$$

Здесь $g = f_0(0,0); c = f_1(0,1); b = f_2(1,0); q = f_3(1,1)$ – остаточные функции от разложения, меньшие исходной на два порядка.

Модули на рис. 5в [11], рис. 5з [12], реализуют уравнение

$$y = (\bar{x}_i\bar{x}_j + x_ix_j)d + \bar{x}_ix_jc + x_i\bar{x}_jb. \tag{2}$$

Если принять $d = \bar{x}_ig + x_iq = \bar{x}_if_0(0,0) + x_if_3(1,1); c = f_1(0,1); b = f_2(1,0)$ и подставить в уравнение (2) выражения для d, c и b , то получаем $y_2 = (\bar{x}_i\bar{x}_j + x_ix_j)(\bar{x}_ig + x_iq) + \bar{x}_ix_jc + x_i\bar{x}_jb$, и далее, раскрывая скобки, имеем уравнение (1).

Для модуля рис. 5б уравнение имеет вид

$$a(\bar{x}_i + x_j) + bx_i\bar{x}_j. \tag{3}$$

Если принять $a = \bar{x}_j g + x_i q + \bar{x}_i x_j c = \bar{x}_j f_0(0,0) + x_i f_3(1,1) + \bar{x}_i x_j f_1(0,1)$; $b = f_2(1,0)$ и подставить в уравнение (3) выражения для a и b , то получаем $y = (\bar{x}_i + x_j)(\bar{x}_j g + x_i q + \bar{x}_i x_j c) + x_i \bar{x}_j b$, и далее, раскрывая скобки, имеем уравнение (1).

Алгоритм реализации схемы представлен на рис. 5 в его основу положен метод [6]. Представляем логическое уравнение в минимизированном виде в дизъюнктивной нормальной форме. Проверяем функцию на минимальность. Затем, если функция бесповторная, то обращаемся к реализации по табл. 2. Здесь в верхней части приведено подключение каналов распределителя при реализации всех бесповторных функций трех переменных, а в нижней части – реализация всех типов функций двух переменных с использованием распределителя. Если число повторений переменной или ее инверсии в слагаемых равно единице, то реализацию целесообразно провести по схеме рис. 5а. Если число повторений два и более, то проводим разложение функции по двум переменным (схемы рис. 5б–г). Схемы рис. 5в и рис. 5г различаются типом распределителей. Далее, если остаточные функции бесповторные, то проводим их реализацию по табл. 2, в противном случае остаточные функции представляем как исходную, и проводим их реализацию по алгоритму (рис. 6).

Пусть задано уравнение в минимальной дизъюнктивной нормальной форме в виде: $y = z_1 \bar{z}_6 z_7 + z_2 z_6 \bar{z}_7 + z_3 z_4 \bar{z}_5 z_6 z_7 + z_3 z_4 \bar{z}_5 \bar{z}_6 \bar{z}_7$. Проведем декомпозицию данного уравнения. Так как наиболее часто повторяются переменные \bar{z}_6 и \bar{z}_7 в слагаемых 4 раза (здесь волнистой линией показано как прямое, так и инверсное значение переменной), то в качестве переменных разложения целесообразно выбрать [6] $x_i = z_6$ и $x_j = z_7$.

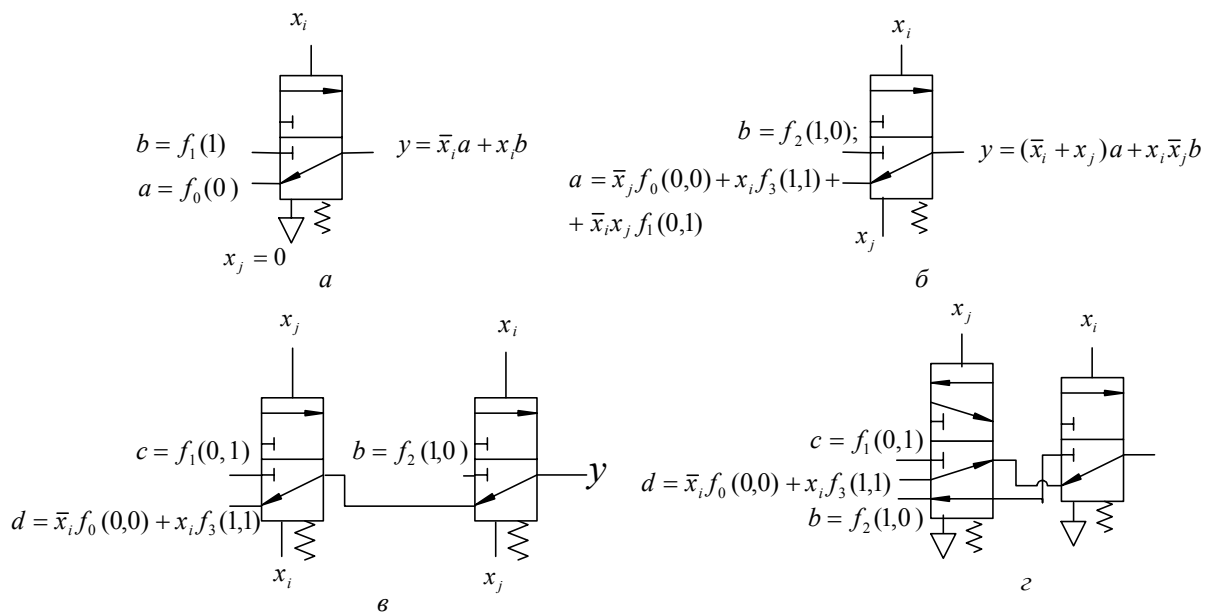


Рис. 5 – Модули:

а – модуль, реализующий формулу разложения функции по одной переменной;
б-г – модули для реализации разложения функции по двум переменным

Определим остаточные функции от разложения $f_0(0,0) = z_3 z_4 \bar{z}_5$; $f_1(0,1) = z_1$; $f_2(1,0) = z_2$; $f_3(1,1) = z_3 z_4 \bar{z}_5$. Здесь функции $f_0(0,0) = z_3 z_4 \bar{z}_5$ и $f_3(1,1) = z_3 z_4 \bar{z}_5$ одинаковые. Функция $f_2(1,0) = z_2$, а функция $f_1(0,1) = z_1$. Выбираем схему разложения по двум

переменним рис. 4в (либо рис. 4з). Функцию $f_0(0,0) = z_3 z_4 \bar{z}_5$ равную $f_3(1,1) = z_3 z_4 \bar{z}_5$ реализуем либо схемой подключения в строке 3 табл. 2. Схема реализации функции представлена на рис. 7.

Таким образом, при ранее известных методах, где на каждую операцию необходим распределитель, в данном случае понадобилось бы 15 распределителей. В случае реализации схемы непосредственно по представленной здесь табл. 2 – понадобилось бы 8 распределителей.

Предложенный метод безраздельной декомпозиции уравнений позволяет синтезировать минимальные по числу распределителей схемы. Так для конкретного примера необходимо всего 3 распределителя.

Таким образом метод является эффективным, а его использование – целесообразным.

Таблица 2

Реализация функций на выходе 2

| Функция входов | Настройка входов | | | | Функция на выходе 2 |
|--|------------------|-----|-----|-------|--|
| | 12 | 1 | 3 | 32 | |
| $y = a(\bar{x}_i + x_j) + x_i b \bar{x}_j$ | x_i | b | a | x_j | $y = a(\bar{x}_i + x_j) + x_i b \bar{x}_j$ |
| | x_i | b | a | 0 | $y = \bar{x}_i a + x_i b$ |
| | x_i | b | 0 | x_j | $y = x_i b \bar{x}_j$ |
| | x_i | 0 | a | x_j | $y = a(\bar{x}_i + x_j)$ |
| | x_i | b | 1 | x_j | $y = \bar{x}_i + x_j + b$ |
| | x_i | 1 | a | x_j | $y = a + x_i \bar{x}_j$ |
| $y = \bar{x}_i a + x_i b$ | x_i | b | a | 0 | $y = \bar{x}_i a + x_i b$ |
| | x_i | b | 0 | 0 | $y = x_i b$ |
| | x_i | 0 | a | 0 | $y = \bar{x}_i a$ |
| | x_i | b | 1 | 0 | $y = \bar{x}_i + b$ |
| | x_i | 1 | a | 0 | $y = x_i + a$ |

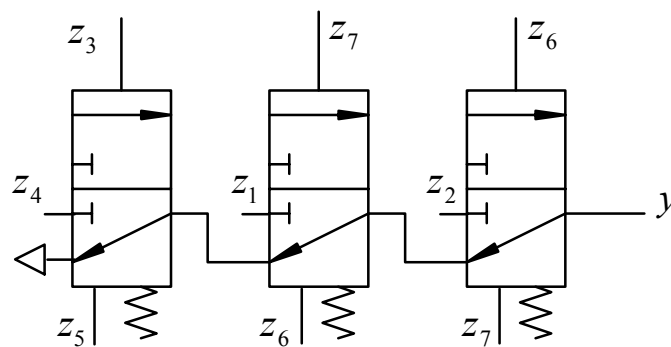


Рис. 7 – Схема реализации функции z

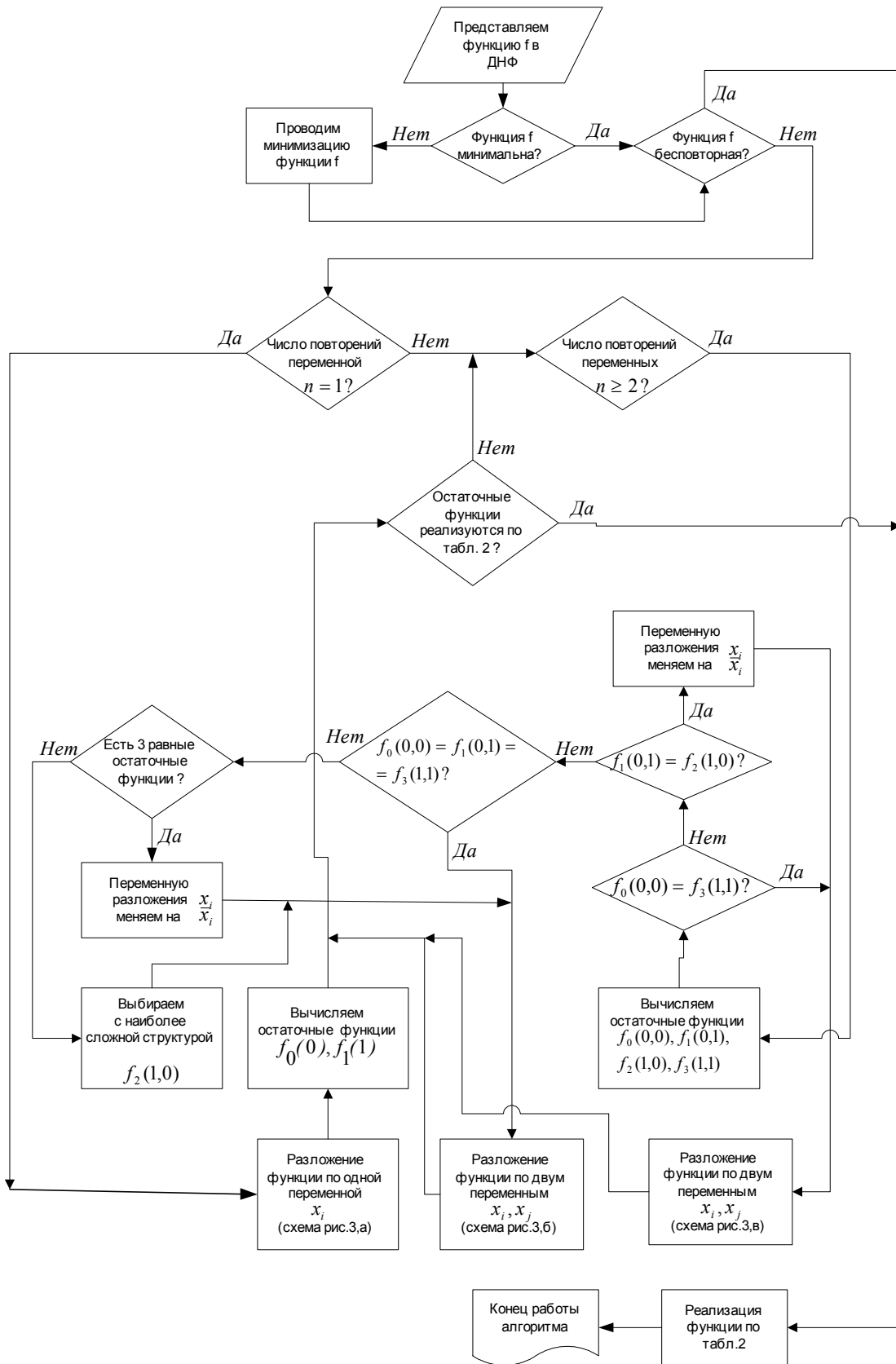


Рис. 6 – Алгоритм синтеза схем

Список литературы: 1. Черкашенко, М.В. Методы автоматизированного проектирования логических схем систем гидро- и пневмоприводов (Обзор) [Текст] / М.В. Черкашенко. – М.: ВНИИТЭМР, 1988. – 38 с. 2. Черкашенко, М.В. Построение гидравлических дискретных управляющих устройств роботов и машин-автоматов [Текст] / М.В. Черкашенко // Доклады всесоюзного научно-технического совещания по применению гидравлической автоматики в промышленности. – М.: ИПУ АН СССР, 1977. – С. 217-220. 3. Cherkashenko, M. Synthesis of discrete control systems of industrial robots [Text] / M. Cherkashenko and ets. // Automation and Remote Control (USA). – 1981. – V 42, N5. – P. 676-680. 4. Cherkashenko, M.V. Computer-aided design of diskret control fluid pover system [Text] / M.V. Cherkashenko // 2 Internationales Fluidtechnishes colloquium. Germany. 16–17 march. – 2000. – Band 1. – P. 495-500. 5. Черкашенко, М.В. Автоматизация синтеза логических схем устройств управления системами пневмо- и гидроприводов [Текст] / М.В. Черкашенко // Приборы и системы управления. – 1983. – М.: ИПУ АН СССР и Машиностроение. – № 8. – С. 20-21. 6. Cherkashenko, M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation [Text] / M. Cherkashenko // International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. 20–22 march. – 2006. – Fundamentals. The report N1. – P. 147-154. 7. Cherkashenko, M. Universal devices for building pneumatic control circuits for industrial robots and automatic machines [Text] / M. Cherkashenko // Soviet engineering research (England). – 1985. – V5, N2. – P. 29-31. 8. А.с. 1020811 СССР. Многофункциональный пневматический логический модуль / М.В. Черкашенко, В.Н. Дмитриев (СССР). – опубл. 1983, Б.И. № 20. 9. А.с. 1140109 СССР Многофункциональный пневматический логический модуль / М.В. Черкашенко (СССР). – опубл. 1984, Б.И. N 6. 10. А.с. 1142816 СССР. Пневматическое логическое устройство / М.В. Черкашенко (СССР). – опубл. 1985, Б.И. N 8. 11. А.с. 1026137 СССР. Многофункциональный пневматический логический модуль М.В. Черкашенко (СССР). – опубл. 1983, Б.И. N 24. 12. А.с. 1015365 СССР. Многофункциональный пневматический логический модуль М.В. Черкашенко (СССР). – опубл. 1983, Б.И. N 16.

Поступила в редколлегию 02.09.13

УДК 62-82.001.2

Синтез минимальных схем гидропневмоагрегатов [Текст] / М.В. Черкашенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 1(1044). – С. 22-31. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X.

Запропоновані методи синтезу мінімальних систем та схем гідропневмоагрегатів.

Ключові слова: гідропневмоагрегат, синтез, система управління, схема, граф операцій, система рівнянь, декомпозиція рівнянь.

Methods of synthesis of the minimal systems and schemes of hydropneumounits are presented.

Keywords: the hydropneumounit, synthesis, a control system, the scheme, activity graph, system of the equations, decomposition of the equations.