

УДК 62-525

## ЦИКЛИЧНО-МОДУЛЬНИЙ ПОДХІД В СТРУКТУРНОМ СИНТЕЗЕ СИСТЕМ МЕХАНОТРОНИКИ

*Губарев А.П., д.т.н., проф., Ганпанцурова О.С., асп., Шульга В.В., студ.*  
**Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", г. Киев**  
 03056, г. Киев, пр. Победы, 37  
 E-mail: gubarev@i.ua

Розглядається модульний підхід до побудови механотронних систем циклічної дії. Головною особливістю підходу є розклад всієї системи на окремі циклічні підсистеми (модулі). Всі модулі мають однакову структуру: виконавчий пристрій (привод), керуючий пристрій (розподільник), датчики контролю. Методики застосування підходу реалізовано за допомогою графів. Перевагою модульного підходу є можливість комбінації фізично різнорідних пристроїв (пневматичні та гідравлічні пристрої, електрорелейні схеми чи програми для ПЛК) не тільки в самій системі, але і в кожному окремому модулі. Такий синтез можливий завдяки мінімальності кожного модуля.

**Ключові слова:** механотронні системи, гідро- та електроприводи, засоби створення

The module approach for build-up of cyclic action systems is considered. The main property of approach is system decomposition on cyclic action subsystems (modules). All modules have same structure: actuating device (drive), control device (directional valve), status sensors. Methods of approach application are realized by means of graphs. Advantage of module approach is possibility of physically heterogeneous devices combination (devices with pneumatic or hydraulic control, electro-relay or PLC) not only in all system, but also inside of each modulus, that reduced a number of signal conditioning devices. Such synthesis is possible owing to a minimal structure of each modulus.

**Key words:** cyclic action systems, mechanotronic system, Methods of approach application

**Введение.** Современные тенденции развития промышленной автоматизации связаны с созданием разнородных систем. Методы разработки, типичные для одной области, например, электропневматики, должны быть согласованы в объекте автоматизации с другими техническими средствами, в том числе алгоритмами управления для ПЛК. Хорошие результаты показывают методы, основанные на формальных, аналитических, графовых, логических, моделях систем, инвариантных к средствам реализации [1, 2].

**Предпосылки подхода.** Предложенный подход первоначально предназначался для цикловых систем гидропривода и пневмопривода, для которых применение традиционных методов ограничивалось числом приводов и тактов работы системы, стоимостью, быстродействием и асинхронностью гидравлической и пневматической аппаратуры. Подход учитывает: увеличение количества задач реинжиниринга, необходимость быстрой смены типа выпускаемой продукции, сокращение времени поиска и устранения неполадок. Применение циклично-модульного подхода на всех этапах создания, отладки и функционирования системы ориентировано на решение с единых позиций как простых технических задач, так и более сложных структурных вопросов:

- декомпозиция больших систем на этапе проектирования;
- рациональная комбинация алгоритмических, электронных, электрических, пневматических и гидравлических средств контроля и управления;
- диагностика системы и отдельных модулей, поиск ошибок, поиск и устранение неисправностей;

- построение систем с открытой структурой, дополнение систем новыми функциями.

**Физические предпосылки подхода.** При детальном изучении строения и работы циклических систем гидропневмоавтоматики были выделены такие общие свойства:

- Объект автоматизации состоит из фиксированного числа элементов;
- Каждый элемент многократно выполняет действие, входящее в эксплуатационный процесс;
- Процесс работы объекта может быть представлен в форме эксплуатационного или технологического цикла, составленного из действий отдельных элементов;
- Отклонения от цикла могут быть представлены как альтернативные действия отдельных элементов.

**Теоретические предпосылки подхода.** Циклический процесс может рассматриваться как форма описания изделия (интегральный результат работы системы) в виде определенной функции (подынтегральной).

**Предпосылка 1.** Преимуществом объекта (производственной системы), процесса (технологии производства), изделия (результата процесса):

$$O(*,*,*, T) \oplus W \Leftrightarrow \exists P: \forall p \in P \Rightarrow \Rightarrow W \oplus O \xrightarrow{G} p \quad (1)$$

$$\forall t \in T \exists \Phi: O(*,*,*, t) \xleftarrow{\Phi} O(*,*,*, t-1) \quad (2)$$

где:  $W$  – среда функционирования объекта;  $O(E, \Phi, F, T)$  – объект;  $E = \{e_1, \dots, e_n\}$  – состоя-

ние объекта как совокупность состояний и его элементов;  $\Phi = \{j_1, \dots, j_m\}$  – функции управления объектом;  $F = \{f_1, \dots, f_m\}$  – функции действий (отработка управления);  $T = \{t_1, \dots, t_k\}$  – дискретное время (аргумент причинно-следственной связи между действиями);  $P = \{p_1, \dots, p_r\}$  – изделие (продукт взаимодействия объекта со средой функционирования);

**Предпосылка 2.** Автоматизируемая технология (траектория процесса) не изменяется в процессе функционирования:

$$\exists O(E, \Phi, F, T) \Rightarrow \forall (t_i \neq t_j): \begin{cases} \exists n: E(t_i) \equiv (F(\Phi(E(t_j))))^{(n)} \\ \exists m: E(t_j) \equiv (F(\Phi(E(t_i))))^{(m)} \end{cases} \quad (3)$$

**Предпосылка 3.** Между функциональными элементами  $e_i$  системы и отрезками процесса  $j_i$ , существует соответствие:

$$\begin{cases} \forall e_i \in E \exists j_j \in \Phi : e_i \leftarrow j_j \\ \forall j_j \in \Phi \exists e_i \in E : j_j \rightarrow e_i \end{cases} \quad (4)$$

1-й шаг: модель системы из элементов сводится к модели процесса из действий.

2-й шаг: система как процесс может быть разложена на действия и логические связи между ними.

3-й шаг: действие + связи с другими действиями, в следствие (4), одновременно является и функцией и структурным элементом объекта, то есть может использоваться как инвариантный элемент системы:

$$\{e_i\}_n = \{(f, j)_i\}_n = \{(x, y)_i\}_n \quad (5)$$

где  $X = \{x_1, \mathbf{L}, x_n\} = \{X\}_n$  – процесс (причина – действие – результат), вызванный логическими условиями в системе:

$$\left( \begin{array}{c} x_i=0 \\ e_i \\ y_i=1 \end{array} \Big|_t \equiv 0 \xrightarrow{f_i} \begin{array}{c} x_i=1 \\ e_i \\ y_i=1 \end{array} \Big|_{t+1} \equiv 1 \right) \Leftrightarrow \xrightarrow{X_i}$$

$Y = \{y_1, \mathbf{L}, y_m\} = \{Y\}_n$  – логические функции, связывающие последующие действия с предыдущими, аргументом которых являются результаты ранее выполненных действий  $y_i = y_i(\{X\}_n)$ :

$$\begin{cases} \forall (t_j, x_i) \exists! y_i : x_i(t_j) \Leftarrow \\ \Leftarrow y_i(\{X(t_j - 1)\}_n) \\ \forall (t_j, y_i) \exists! x_i : y_i(\{X(t_j - 1)\}_n) \Rightarrow \\ \Rightarrow x_i(t_j) \end{cases} \quad (6)$$

**Предпосылка 4.** Каждое действие должно многократно повторяться вследствие цикличности процесса:

$$\forall x_i \exists (t_{i1} < t_{i2} < t_{i3} < t_{i4}) \subset \{T\} : x_i(t_{i1}) \neq x_i(t_{i2}) \neq x_i(t_{i3}) \neq x_i(t_{i4}) \quad (7)$$

Аналогично, и причины, обуславливающие эти действия, также должны повторяться. Но, поскольку каждому «основному» действию, перед его повторением, предшествует «обратное» действие этого же модуля, то должны повторяться и причины «обратного» действия. Следовательно, и причины действий модуля составляют пары взаимоисключающих условий:

$$\forall y_i \in \{Y\}_n \exists! y_j \in \{Y\}_n : \begin{cases} \overline{x_i} \Leftarrow y_j(\{X\}_n) \\ \overline{x_j} \Leftarrow y_i(\{X\}_n) \end{cases} \quad (8)$$

С учетом (1) – (8):

- модель цикловой системы приводов однородна (все модули имеют одинаковое строение);

- модель состоит из циклических модулей, которые включают по два взаимообратных действия и по две логических функции, задающих контекст выполнения этих действий.

Графически модель системы состоит из функционального графа, изображающего процесс эксплуатации:

$$G = \{P, L, M\}, \quad (9)$$

где  $P = \{p\}_n : \forall p_i \exists (l_{i-1}, l_i) \in L \Rightarrow l_{i-1} \rightarrow p_i \rightarrow l_i$  – множество вершин, соответствующих завершению предыдущих действий и формированию условия начала следующих действий;

$L = \{l\}_m : \forall l_i \exists (p_{i-1}, p_i) \in P \Rightarrow p_{i-1} \rightarrow l_i \rightarrow p_i$  – множество дуг, соответствующих выполнению действий;

$M = \{m\}_m : \forall l_i \exists m_i = (k_{m1}, k_{m2}, \mathbf{L}) \neq \emptyset$  – множество маркировок дуг, соответствующих именам действий.

Процесс работы объекта разделен на отрезки. Каждый отрезок представлен направленным действием одного модуля или одновременными действиями нескольких модулей. Отрезок процесса изображается направленной дугой с именами действий. Циклический процесс получает вид цикла или замкнутого ориентированного графа, если есть параллельные цепочки действий. Дугами графа являются отрезки  $\{x_i\}$  циклических модулей (9). Участки формирования логических условий для действий циклических модулей (рис. 1а, обозначены пунктиром) соответствуют работе системы между результатом выполнения обратного действия и началом основного действия модуля.

Внутри функционального графа находятся подграфы связи для каждого из устройств. Подграф связывает в цикл конечные точки «основных» и «обратных» действий каждого модуля (рис. 1б).

Имитация работы объекта осуществляется выполнением графа по правилам входа, выхода и прохождения через дуги и вершины. В этом случае, действие можно рассматривать как результат выполнения условий ( $y_i=1$ ), достаточных для его начала. То есть действия являются интегралом от условий на отрезке одной дуги:

$$L(t) \Leftrightarrow \{x_1(t), x_2(t), \mathbf{L}, x_n(t)\}; \quad (10)$$

$$L \odot (t) \Leftrightarrow \{y_1(t), y_2(t), \mathbf{L}, y_n(t)\}; \quad (11)$$

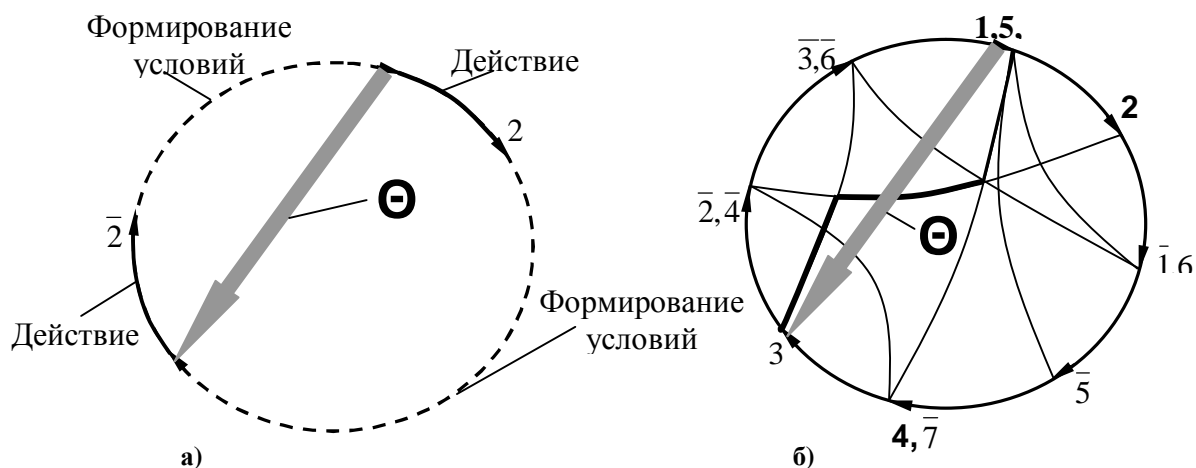


Рисунок 1 – Циклическая последовательность действий, представленная в виде замкнутого ориентированного графа

$$L(t_k) = \begin{cases} * : ((L(t_k - 1) = 1) \wedge (L'(t_k) = \bar{1})) \vee \\ \vee (L(t_k - 1) = 0) \wedge (L'(t_k) = 1) \end{cases}; \quad (12)$$

$$\frac{\mathcal{L}(x_i(t))}{\mathcal{L}t} \Big|_{t_k} = \begin{cases} 1 : ((x_i(t_k + 1) = 1) \wedge \\ \wedge (x_i(t_k) = 0)) \\ \bar{1} : ((x_i(t_k + 1) = 0) \wedge \\ \wedge (x_i(t_k) = 1)) \\ (0 \vee y_i(t_k - 1)) : x_i(t_k) = \\ = x_i(t_k + 1) \end{cases} \quad (13)$$

Исследование модели систем в общем виде показало, что вся информация о завершённых действиях записана в значениях  $\{X\}_n$  в алфавите  $(0, *, 1)$ . То есть  $\{X\}_n$  является выражением памяти системы, распределённым на статическую составляющую (значения 0 и 1 - о выполненных действиях) и динамическую составляющую (значение \* - о текущих действиях):

$$L(t_i) = \int_{t_0}^{t_i} L'(t) \partial t = L(t) \Big|_{t_0}^{t_i-1} + \int_{t_i}^{t_i} L(t) \partial t = L_c(t_0, t_i) + L_n(t_i), \quad (14)$$

где  $L_c(t_0, t_i)$  – статическая составляющая памяти, накопленная на интервале  $(t_0, t_i)$ ;  $L_n(t_i/o)$  – динамическая составляющая памяти.

Показано, что распределение памяти на  $L_c(t_0, t_i)$  и  $L_n(t_i/o)$  зависит от границ интервала  $(t_0, t_i)$ . Установлено, что наличие интервала  $(t_0, t_i)$  для которого значение памяти равно нулю соответствует разделению объекта на независимые части (от  $\tau_0$  до  $\tau_i$  и

от  $\tau_i$  до  $\tau_0$ ). Информационную полноту объекта отражают критерии замкнутости:

$$\forall t_i \exists L(t) \Big|_{t_i}^{t_i+1} + L(t) \Big|_{t_i+1}^{t_i} \equiv 0 \quad (15)$$

и целостности:

$$\begin{cases} \forall (t_i, t_j) : t_i \neq t_j \pm 1 \Rightarrow S_{i/j} \neq 0 \\ \forall t_k \exists L : (L(t_k) = 1) \wedge (L(t_k + 1) = \bar{1}) \vee \\ \vee (L(t_k) = \bar{1}) \wedge (L(t_k + 1) = 1). \end{cases} \quad (16)$$

Для системы, удовлетворяющей этим критериям, её разработка может быть сведена к построению комплекса циклических модулей. При создании одного модуля необходимо реализовать два действия и два условия. Основным действиям соответствуют дуги графа, при прохождении через которые значение  $x_i$  изменяется от «0» через «\*» до «1». В реальной системе этому соответствует выполнение продуктивной функции (например, работа привода, включение давления, подача смазки). Обратному действию соответствует изменение другого сигнала  $x_j$ : от «0» через «\*» до «1», а значение  $x_i$  восстанавливается от «1» через «\*» до «0».

Графическое представление условия – это вектор, замыкающий дуги и составленный из отрезков других действий (рис. 16). Логические условия состоят из нескольких компонентов: непосредственных причин, контекста действия, условия цикличности и других. Методика получения минимальных выражений логических условий сводится к построению замыкающего вектора [3].

**Техническое исполнение системы.** Анализ типовых схем гидропневмоавтоматики и модульных производственных станций механотроники показал, что они включают в себя 5-15 исполнительных устройств. Разработка схемы и отладка системы может занимать длительный период и требует, как правило, привлечения профессиональных проектировщиков и наладчиков. Сборка системы и её тестирование также приводит к значительным потерям времени. На

практике выявить ошибку в готовой схеме, состоящей из 15 и более асинхронных приводов и исполнительных устройств, будет тяжелее, чем собрать систему заново. При применении циклично-модульного подхода каждое исполнительное устройство объединяется с оборудованием (датчики, распределительные клапаны, дроссели) в самостоятельный циклический модуль - минисистему. Работа системы при этом будет выглядеть как замкнутый цикл следующих друг за другом действий. При такой структуре сложность системы линейно зависит от количества входящих в нее модулей, количество исполнительных устройств (модулей) может варьироваться в широком диапазоне. Отладка всей системы может быть произведена отдельно для каждого модуля.

**Действия одного модуля ( $x_i$  и  $x_i'$ ).** В техническом исполнении привод оборудуется средствами управления и контроля за выполнением заданной функции. Например, пневматический цилиндр, выполняющий прижим пленки во время ее сварки (рис. 2). Управляющим устройством является пневматический распределительный клапан. Средства контроля – датчик давления (усилие прижима), датчики положения (исходного и рабочего), реле времени (время сварки пленки). Сварка завершена если: привод прошел датчик среднего положения  $X'_{2S}$ , движение штока не остановлено крышкой цилиндра, после достижения усилия сварки привод выдержал заданный технологией интервал времени.

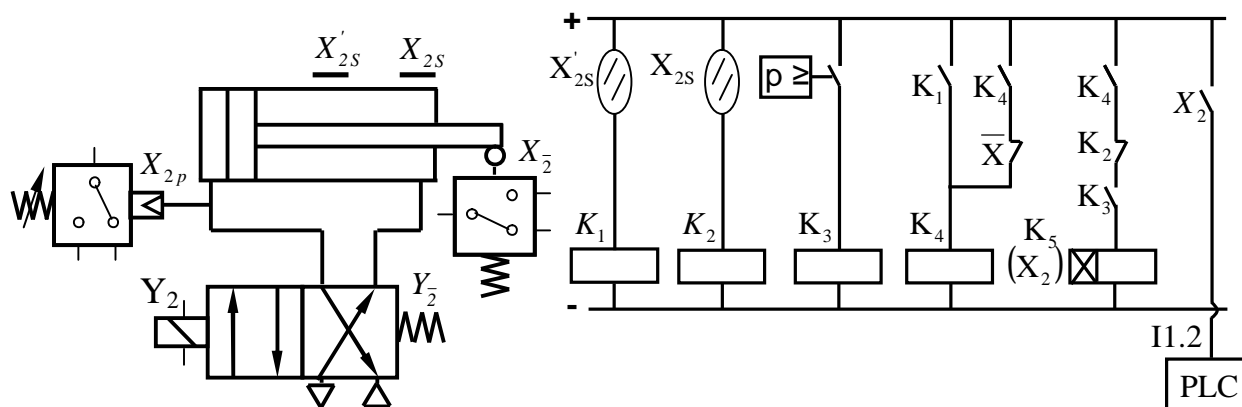


Рисунок 2 – Исполнительная часть и средства контроля состояния модуля №2

**Условия одного модуля ( $Y_i$  и  $Y_i'$ ).** В техническом исполнении условиям соответствуют схемы управления (релейные, пневматические, гидравлические) или алгоритмы программ для ПЛК. Условия составляются для всех модулей в минимальной форме. Методики составления условий учитывают применение бистабильных и моностабильных клапанов. Например, для построения логической команды управления для основного действия второго модуля (рис. 1б) строится вектор  $\Theta$ , который идет от начала основного действия 2 до начала обратного действия  $\bar{2}$ . Вектор  $\Theta$  замыкается сегментами линий связи модулей:  $7 + 2 \cdot \bar{3}$ . Первое условие дополняется непосредственными причинами  $7 \rightarrow 7 \cdot 5 \cdot 1$ , последнее условие инвертируем  $\bar{3} \rightarrow 3$ . После чего записываем логическую функцию, которая и является командой управления:

$$Y_2 = X_1 \cdot X_5 \cdot X_7 + X_2 \cdot \bar{X}_3$$

Приведенная запись соответствует построению команды в случае применения в качестве управляющего устройства распределительного клапана с моностабильным управлением.

При этом схема управления приводом может быть реализована в зависимости от технического задания и особых требований как с помощью пневматических и гидравлических средств, так и с помощью программы

или электрорелейной схемы, или объединять в себе несколько физически разнородных устройств (рис. 3). Такой вариант возможен благодаря минимальным выражениям условий и следующей из них простоты системы. Это позволяет использовать дорогостоящие устройства гидравлики и пневматики неприменимые для аналоговых задач при других подходах, например, конечно-автоматном или с использованием циклограмм и весовых функций.

**Объединение модулей в систему.** Процесс объединения модулей в систему выполняется по асинхронной схеме: к каждому модулю подводятся сигналы, которые составляют логические условия его включения и выключения ( $Y_i$  и  $Y_i'$ ), ко всем элементам системы подается предусмотренное энергообеспечение. Как и при другом варианте структуры схемы, в системе предусматриваются средства включения системы, возможности остановки, другие варианты управления и режимы работы. составляют цикл работы системы. В информационном плане, процесс функционирования аналогичен процессу вычислений с «управлением потоком входных данных».

Такой метод объединения модулей может быть использован как при построении новых объектов, так и в качестве средства для модернизации существующих или задач реинжиниринга.

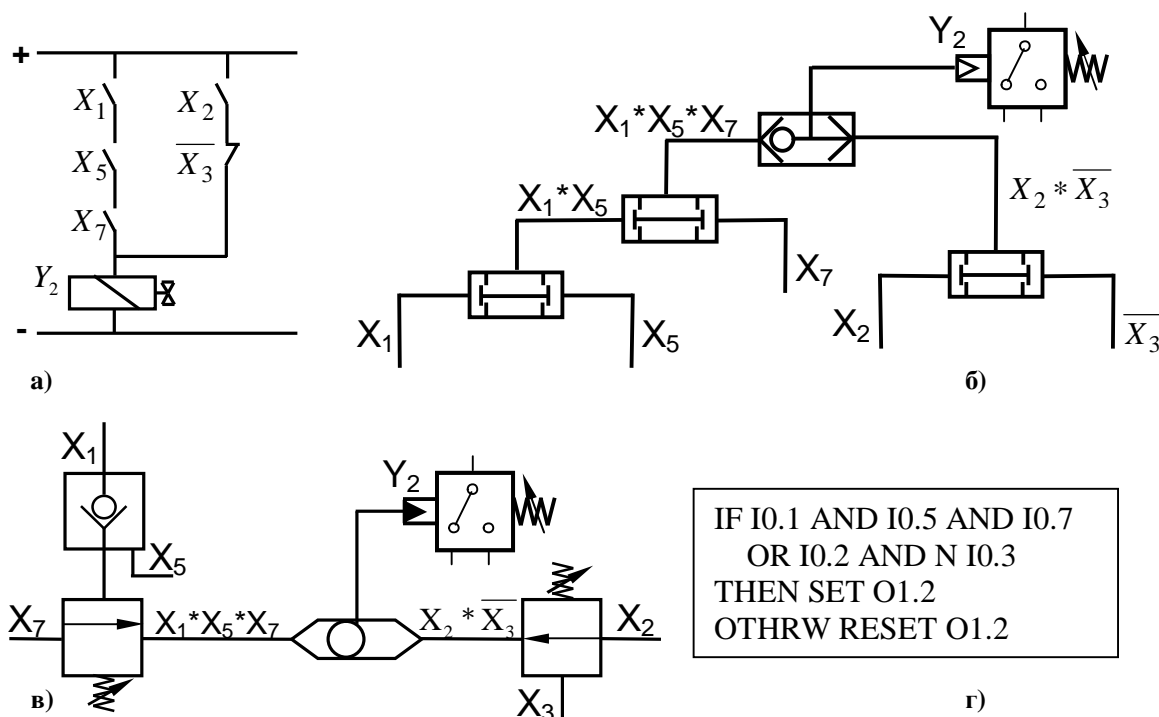


Рисунок 3 – Реализация команды управления: а) с помощью электро-релейной схемы; б) пневматическими средствами; в) гидравлическими аппаратами; г) путем создания алгоритма программы для ПЛК

Рассмотрим структуру алгоритма программы с учетом циклично-модульного подхода, написанную на языке STL. В начале алгоритма организовывается подготовка системы к работе: обнуляются все счетчики, флаги и таймеры, использованные в программе, происходит возврат приводов в исходное положение:

```
STEP 1 "PODGOTOVKA SISTEMY"
IF NOP
THEN RESET Y1
RESET Y2
SET YN2
RESET F0.1
IF XN2 AND XN1
THEN RESET YN2
JMP TO 2
```

Основная часть алгоритма имеет вид замкнутого цикла. В этой части приводится описание всех модулей, участвующих в работе системы:

```
STEP 2 "RABOTA MODULEJ"
IF N F0.1 AND S1
OR N XN2 AND S1
THEN SET Y1
OTHRW RESET Y1
IF X2
THEN SET F0.1
IF X1 AND N F0.1
THEN SET Y2
RESET YN2
```

Моностабильное управление

```
OTHRW RESET Y2
SET YN2
IF XN1
THEN RESET F0.1
JMP TO 2
```

Бистабильное управление

Аналогичный вид может быть применен при описании команд для работы флагов, таймеров, счетчиков, многопозиционных приводов и т.д. Преимуществами такого подхода являются уменьшение текста программы, не сложное дополнение системы новыми модулями, наличие формальных правил контроля логической корректности. Последнее существенно облегчает отладку не только программы, но и системы с выполнением параллельных цепочек асинхронных действий.

**Выводы.** Циклично-модульный подход эффективен при создании систем с близким к циклическому процессом работы и числом исполнительных устройств 5 и более. Эффективность подхода повышается, если он используется на всех этапах – от разработки технического задания, до составления инструкций по эксплуатации, выработки рекомендаций по поиску и устранению неисправностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ebel F., von Terzi M. Festo Didactic. Mechatronics.: Festo Didactic GmbH&Co., D73770 Denkendorf, 2000.- 108 S.
2. Mechatronika/ pod kier. Dietmara Schmidta.- Polish edition REA, Warszawa.- 2002.- 384p.

Стаття надійшла 05.05.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Саленком О.Ф.