



УДК 681.513.67

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АДАПТИВНОГО ТРЕХПОЗИЦИОННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЕГО АППАРАТНЫХ И ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ

**В.А. ПОРХАЛО**  
**А.Г. БАЖАНОВ**  
**В.З. МАГЕРГУТ**

*Белгородский  
государственный  
технологический  
университет  
им. В. Г. Шухова*

*e-mail: porhalo@mail.ru*

Рассмотрены различные информационные представления адаптивного трехпозиционного алгоритма, описанного в способе по патенту РФ №2220432. Варианты программной реализации алгоритма рассмотрены с проведением аналогий с принципами его аппаратной реализации и с отражением особенностей вариантов, в том числе, в части реализации адаптивной приставки. Приведены достоинства этих представлений в зависимости от вида реализации. Описана программная АСР температуры нагревательного элемента и приведены сравнительные результаты ее работы с системой традиционного трехпозиционного регулирования.

Ключевые слова: трехпозиционный, адаптивный, регулятор, качество, система, структура, управление, эксперимент.

Объекты с позиционным управлением являются довольно распространенными как в промышленности, так и в быту. В промышленности доля таких объектов составляет порядка 15–20%, а в бытовой технике – 80–90%. Примерами таких объектов являются водогрейные котлоагрегаты, бытовые и промышленные холодильники, системы отопления жилых помещений, электрические печи и нагреватели, экструдеры, прессовое оборудование и др.

Несмотря на возможности современной контроллерной техники, управление названными объектами в настоящее время осуществляется в большинстве случаев с применением простейших двух- либо трехпозиционных алгоритмов, что не обеспечивает достаточное качество регулирования.

На кафедре «Техническая кибернетика» БГТУ им. В.Г. Шухова на протяжении ряда лет разрабатываются программно-аппаратные регуляторы и приставки адаптивного позиционного регулирования и нечеткого позиционного управления. Их внедрение улучшает показатели качества названных выше систем со всеми вытекающими из этого результатами. Кроме того, это позволяет снижать энергопотребление объектов на 5–7%, а в ряде случаев на 10–12%.

Ниже рассмотрена блок-схема адаптивной трехпозиционной приставки, ориентированная на ее аппаратную реализацию в соответствии со способом по патенту РФ №2220432 [1], и описан алгоритм ее работы, а затем рассмотрено два варианта написания этого алгоритма (в виде блок-схемы и графа операций) для его программной реализации.

Суть приставки заключается в преобразовании традиционного трехпозиционного алгоритма с фиксированными позициями в алгоритм с адаптивной средней позицией. При этом в приставке обеспечивается бесконтактность подключения функционального звена перенастройки (ФЗП) в сравнении, например, с контактным его подключением [2], что повышает надежность работы приставки при ее аппаратной реализации. Бесконтактность подключения ФЗП достигается его подключением на выход аппаратного трехпозиционного регулятора с фиксированными позициями параллельно с усилительным звеном с коэффициентом усиления  $K \geq 2$  и последующей подачей суммарного сигнала этих двух параллельных ветвей на звено типа насыщения с единичным коэффициентом усиления и значениями сигналов насыщения, равными значениям крайних позиций исходного трехпозиционного регулятора относительно



средней. Принцип работы устройства демонстрируется блок-схемой, показанной на рис.1.

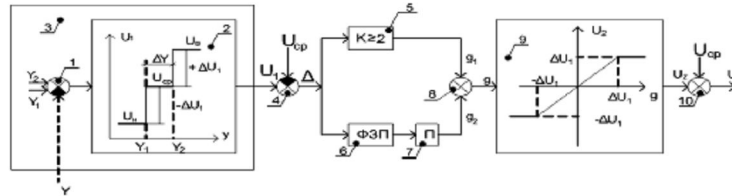


Рис. 1. Блок-схема работы адаптивного трехпозиционного алгоритма

На схеме цифрами обозначены: 1 – элемент сравнения, 2 – пороговые устройства переключения позиций, 3 – трехпозиционный регулятор с фиксированными позициями и зоной нечувствительности, 4 – алгебраический сумматор, 5 – усилительное звено с коэффициентом усиления, равным или большим двух ( $K \geq 2$ ); 6 – функциональное звено перенастройки (ФЗП); 7 – звено памяти (П) сигнала ФЗП; 8, 10 – сумматоры; 9 – звено типа насыщения. Элемент сравнения 1 предназначен для сравнения сигналов задания зоны нечувствительности  $Y_1$  и  $Y_2$  с сигналом  $Y$  регулируемой величины.

Пороговые устройства 2 обеспечивают пороговые (скачкообразные) изменения сигналов, соответствующих позициям регулятора, причем значения сигналов крайних позиций – верхней  $U_B$  и нижней  $U_H$  имеют равные по модулю значения  $|\Delta U_1|$  относительно сигнала средней позиции  $U_{CP}$ . Переключение сигналов позиций с нижней на среднюю или со средней на верхнюю (или наоборот) происходит при достижении регулируемой величиной  $Y$  соответствующих сигналов заданий зоны  $Y_1$  или  $Y_2$ . То есть, переключение имеет место при вхождении (или выбеге) регулируемой величины в зону (из зоны) нечувствительности  $\Delta Y = Y_2 - Y_1$ , которая также является фиксированной. Выходным сигналом  $U_1$  пороговых устройств 2 является один из сигналов позиций  $U_B$ ,  $U_{CP}$  или  $U_H$ .

Элемент сравнения 1 совместно с пороговыми устройствами 2 образуют трехпозиционный регулятор 3 с фиксированными позициями – нижней, средней, верхней и зоной нечувствительности  $\Delta Y$ , на выходе которого при достижении сигналом регулируемой величины  $Y$  сигналов задания зоны нечувствительности  $Y_1$  и  $Y_2$  появляются сигналы соответствующих позиций  $U_H$ ,  $U_{CP}$  или  $U_B$ .

На положительный вход алгебраического сумматора 4 подается выходной сигнал  $U_1$  трехпозиционного регулятора 3, а на отрицательный – опорный сигнал, равный значению сигнала средней позиции  $U_{CP}$  трехпозиционного регулятора 3. Выходной сигнал  $\Delta$  алгебраического сумматора 4, равный нулю при  $U_1 = U_{CP}$  или  $\pm \Delta U_1$ , при  $U_1 = U_B$  или  $U_1 = U_H$  подается одновременно на усилительное звено 5 с  $K \geq 2$  и ФЗП 6.

ФЗП выбирается в зависимости от желаемого вида реализации адаптации средней позиции: дискретного или аналогового. Так, при аналоговой реализации ФЗП в качестве него берется, например, интегрирующее звено с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{1}{T_{\text{И}} \cdot s}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{И}}$  – время интегрирования (параметр настройки ФЗП),  $s$  – оператор Лапласа, реализующее линейное изменение адаптивной средней позиции в соответствии с уравнением

$$g_1 = \frac{\omega \Delta}{T_{\text{И}}}, \quad (2)$$

или аperiodическое первого порядка с передаточной функцией



$$W(s) = \frac{1}{1 + T_A \cdot s}, \quad (3)$$

где  $T_A$  – постоянная времени звена (также параметр настройки ФЗП), реализующего экспоненциальное изменение адаптивной средней позиции в соответствии с уравнением

$$g_2 = \left( 1 - e^{-\frac{v}{T_A}} \right) \Delta, \quad (4)$$

где в (2), (4)  $v$  – время нахождения (выбег) регулируемой величины вне (из) зоны нечувствительности  $\Delta Y$ , а  $\Delta = U_1 - U_{cp}$ .

При дискретном выборе реализации адаптивной средней позиции на выходе ФЗП сигнал  $g_2$  изменяется скачком на какую-то величину  $\Delta g_2$ .

Последовательно с ФЗП в случае его реализации в виде аperiodического звена первого порядка включается звено памяти 7 запоминания сигнала ФЗП, имеющего место в моменты переключения входного сигнала на ФЗП с сигнала крайней позиции на среднюю, то есть в моменты появления сигнала  $\Delta = 0$ . Такое звено памяти (П) удерживает значение сигнала ФЗП, соответствующего значению вновь сформированного сигнала адаптивной средней позиции, при вхождении регулируемой величины  $Y$  в зону нечувствительности  $\Delta Y$  и переключении регулятора 3 на среднюю позицию. При реализации ФЗП в виде интегрирующего звена необходимость в звене памяти 7 отпадает, так как при переключении регулятора 3 на среднюю позицию сигнал  $\Delta = 0$  и сигнал в соответствии с (2) перестает изменяться, то есть запоминается. То же происходит и при дискретном изменении сигнала в ФЗП, так как такое запоминание происходит путем конструктивного выполнения ФЗП.

На представленной на рисунке 2 блок-схеме программной реализации алгоритма блоки 2–8 соответствуют обычному трехпозиционному алгоритму, то есть блоку 3 на рис. 1, а блоки 9–27, обведенные в пунктирную рамку, соответствуют программной приставке, которая позволяет реализовать адаптивный трехпозиционный алгоритм (программный аналог аппаратной приставки на рисунке 1, то есть его части после исключения блока 3).

Переменные блок-схемы, соответствуют рис. 1 за исключением `timer1` и `timer2`, которые являются таймерами определяющими время, через которое происходит перенастройка звена ФЗП приставки по выходу из средней позиции на верхнюю или нижнюю позицию. Они необходимы только в программной реализации вследствие быстрогодействия контроллера и слишком быстрого перестроения ФЗП.

Сигналы после усилительного звена 5 –  $g_1$  (блок 10 на рис. 2) и после ФЗП 6 и звена памяти 7 –  $g_2$  (блок 19 на рис. 2) суммируются на сумматоре 8 (блок 20 на рис. 2) и подаются на элемент насыщения 9 (блоки 21 – 26 на рис. 2), который конструктивно может быть выполнен в виде двух последовательно соединенных ограничителей сиг-

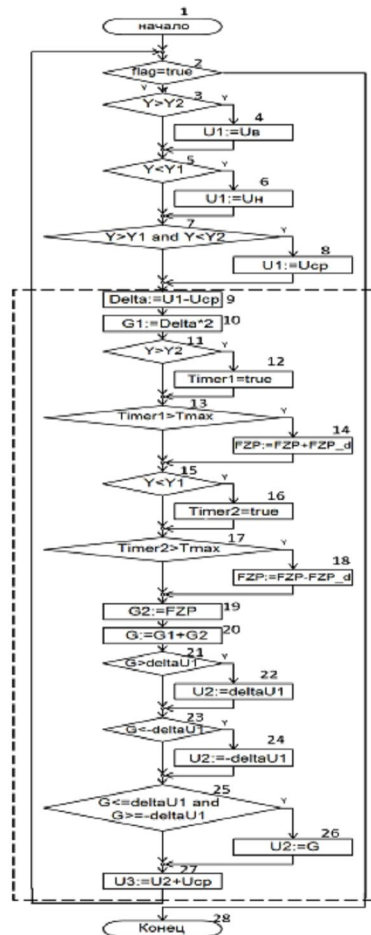


Рис. 2. Блок-схема программной реализации алгоритма



налов, один из которых настроен на ограничение сигнала по минимуму, а другой – по максимуму, причем значения этих ограничений соответствуют значениям  $|\Delta U_1|$ .

Сигнал на выходе элемента насыщения 9 (на входе блока 27 на рис. 2) в точности соответствует сигналам крайних позиций регулятора 3 относительно сигнала его средней позиции  $U_{CP}$  при нахождении регулируемой величины  $Y$  вне его зоны нечувствительности  $\Delta Y$  и сигналу адаптивной средней позиции, обеспечиваемой ФЗП, при нахождении регулируемой величины в зоне регулятора 3. При этом никаких контактных устройств подключения ФЗП схема на рис. 1 не содержит.

Для перехода к реальным сигналам, воздействующим на объект управления –  $U_3$ , сигнал с выхода элемента насыщения 9  $U_2$  суммируется на сумматоре 10 (блок 27 на рис. 2) с сигналом  $U_{CP}$ , то есть  $U_3 = U_2 + U_{CP}$ .

Предлагаемый алгоритм целесообразно применять для преобразования традиционного трехпозиционного алгоритма с фиксированными позициями в адаптивный с адаптивной средней позицией путем подключения к выходу традиционного трехпозиционного аппаратного регулятора приставки, содержащей звенья 4–10 в соответствии с рисунком 1, или к выходу традиционного трехпозиционного программного регулятора программной приставки, содержащей блоки 9–27 в соответствии с рис. 2.

Отметим также, что в случае нулевого сигнала средней позиции трехпозиционного регулятора  $U_{CP} = 0$  сигнал выхода последнего можно непосредственно подавать на параллельно включенное усилительное звено 5 с  $K \geq 2$  и ФЗП 6 с последовательно соединенным с ним звеном памяти (П) 7, то есть исключить из цепочки передачи сигналов алгебраический сумматор 4, а также за выходной сигнал предлагаемого регулятора брать сигнал  $U_2$  с выхода звена типа насыщения 9, то есть исключить из схемы также и последний сумматор 10. Аналогично соответствующие блоки (9 и 27 на рис. 2) можно исключить при программной реализации алгоритма. Наконец отметим, что в реальной программе выходной сигнал блока 27 подается на реальный объект управления через ШИМ блок, а с объекта, в виде сигнала с датчика, на блок 2 блок-схемы. С этого же блока подается «фиктивная» команда на прекращение работы программы.

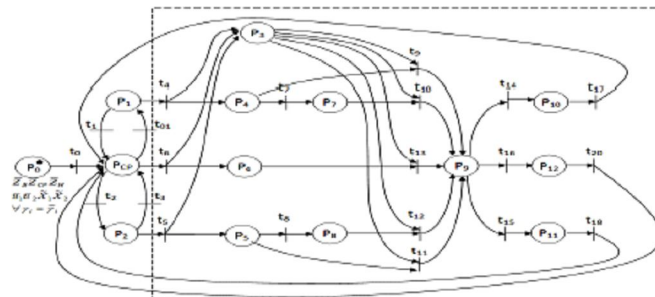


Рис. 3. Реализация трехпозиционного адаптивного алгоритма помеченной сетью Петри (графом операций)

Программная реализация трехпозиционного адаптивного алгоритма в виде помеченной сети Петри (графа операций) [3] представлена на рис. 3. Здесь можно выделить алгоритм трехпозиционного регулятора (позиции  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) и алгоритм программной приставки, реализующей адаптацию (позиции заключенные в пунктирный прямоугольник). Обозначения и пометки операций и переходов этой помеченной сети Петри представлены в таблице 1.

Представление алгоритма в виде помеченной сети Петри дает возможность реализации алгоритма с помощью универсальной программы логического управления (УПЛУ) [4], что намного упрощает механизм реализации программы, поскольку в УПЛУ достаточно вписать лишь шесть матриц, описывающих структуру и работу графа операций.



Для проверки алгоритма была собрана система управления нагревательным элементом. Элемент представляет собой коммутируемую спираль, изготовленную из нихромовой проволоки. Для коммутации используется высоковольтное реле с логическим управлением потенциалом 24В. В качестве устройства управления использовался контроллер Siemens S7 200 CPU-224, для измерения температуры дополнительно использовался модуль ввода аналоговых сигналов EM231.

Таблица 1

**Обозначения датчиков, команд, исполнительных устройств и условий их срабатывания, пометки переходов и позиций сети Петри адаптивного трехпозиционного алгоритма**

Обозначения датчиков, исполнительных устройств, переменных, таймеров	Пометки переходов	Обозначения и пометки позиций
1	2	3
<p><math>X_1</math> – датчик выхода за нижнюю зону нечувствительности трехпозиционного регулятора <math>X_1 = Y &lt; Y_1, \bar{X}_1 = Y \geq Y_1</math></p> <p><math>X_2</math> – датчик превышения верхней зоны нечувствительности трехпозиционного регулятора <math>X_2 = Y &gt; Y_2, \bar{X}_2 = Y \leq Y_2</math></p> <p><math>\gamma_0</math> – команда на включение ПЛК</p> <p><math>\gamma_1</math> – перестроение 3-х позиционного неадаптированного регулятора <math>\{\gamma_{1B}(U_1=U_B), \gamma_{1H}(U_1=U_H), \gamma_{1CP}(U_1=U_{CP})\}</math></p> <p><math>\gamma_2</math> – флаг выполнения операции <math>P_3</math></p> <p><math>\gamma_3</math> – флаг перестроения ФЗП</p> <p><math>\gamma_4</math> – флаг выполнения операции ФЗП + <math>P_3</math></p> <p><math>\gamma_5</math> условие <math>(\text{ФЗП} + P_3) &lt; -\Delta U_1</math></p> <p><math>\gamma_6</math> условие <math>(\text{ФЗП} + P_3) &gt; \Delta U_1</math></p> <p><math>t_1</math> – сработал таймер <math>u_1</math> нахождения в верхней позиции</p> <p><math>t_2</math> – сработал таймер <math>u_2</math> нахождения в нижней позиции</p> <p><math>\gamma_7</math> – флаг окончания построения звена, насыщения <math>\{\gamma_{7B}(U_{CP} + \Delta U_1), \gamma_{7H}(U_{CP} - \Delta U_1)\}</math></p> <p><math>\gamma_{7CP}(\text{ФЗП} + P_3) + U_{CP}</math></p> <p><math>Z_B, Z_H, Z_{CP}</math> – флаги соответствия верхнему, нижнему и среднему насыщению</p> <p><math>u_1</math> – таймер 1</p> <p><math>u_2</math> – таймер 2</p>	<p><math>t_0: \gamma_0</math></p> <p><math>t_{01}: X_2 \bar{X}_1</math></p> <p><math>t_1: \bar{X}_1 \bar{X}_2</math></p> <p><math>t_2: X_1 \bar{X}_2</math></p> <p><math>t_3: \bar{X}_1 \bar{X}_2</math></p> <p><math>t_4: \gamma_{1B}</math></p> <p><math>t_5: \gamma_{1H}</math></p> <p><math>t_6: \gamma_{1CP}</math></p> <p><math>t_7: \tau_1</math></p> <p><math>t_8: \tau_2</math></p> <p><math>t_9: \gamma_2 \bar{\tau}_1</math></p> <p><math>t_{10}: \gamma_2 \gamma_3</math></p> <p><math>t_{11}: \gamma_2 \bar{\tau}_2</math></p> <p><math>t_{12}: \gamma_2 \gamma_3</math></p> <p><math>t_{13}: \gamma_2</math></p> <p><math>t_{14}: \gamma_4 \gamma_6</math></p> <p><math>t_{15}: \gamma_4 \gamma_5</math></p> <p><math>t_{16}: \gamma_4 \bar{\gamma}_5 \bar{\gamma}_6</math></p> <p><math>t_{17}: \gamma_{7B}</math></p> <p><math>t_{18}: \gamma_{7H}</math></p> <p><math>t_{19}: \gamma_{7CP}</math></p>	<p><math>P_0</math>: начальная позиция сети</p> <p><math>P_{CP}</math>: средняя фиксированная позиция</p> <p><math>P_1</math>: верхняя фиксированная позиция <math>\gamma_{1B} \wedge \bar{\gamma}_{1CP}</math></p> <p><math>P_2</math>: нижняя фиксированная позиция <math>\gamma_{1H} \wedge \bar{\gamma}_{1CP}</math></p> <p><math>P_3</math>: вычисление <math>G_1 = (U_1 - U_{CP}) \cdot 2\gamma_2</math></p> <p><math>P_4</math>: запуск таймера <math>u_1</math></p> <p><math>P_5</math>: запуск таймера <math>u_2</math></p> <p><math>P_6</math>: выключение таймеров <math>u_1 u_2</math></p> <p><math>P_7</math>: перенастройка ФЗП <math>(\text{ФЗП} + \Delta \text{ФЗП}) \wedge \gamma_3 \bar{U}_1</math></p> <p><math>P_8</math>: перенастройка ФЗП <math>(\text{ФЗП} - \Delta \text{ФЗП}) \wedge \gamma_3 \bar{U}_2</math></p> <p><math>P_9</math>: вычисление <math>G = G_1 + G_2</math></p> <p><math>P_{10}</math>: верхняя позиция зоны насыщения <math>\gamma_{7B} \wedge Z_B \wedge \bar{Z}_H \wedge \bar{Z}_{CP}</math></p> <p><math>P_{11}</math>: нижняя позиция зоны насыщения <math>\gamma_{7H} \wedge \bar{Z}_B \wedge Z_H \wedge \bar{Z}_{CP}</math></p> <p><math>P_{12}</math>: выход из зоны нечувствительности СП <math>\gamma_{7CP} \wedge \bar{Z}_B \wedge \bar{Z}_H \wedge Z_{CP}</math></p>

Система управления изображена на рис. 4. В состав системы управления входит контроллер (К), в котором зашит алгоритм регулятора, термopара Метран-286-02 (Т), измеряющая значение температуры, модуль ввода (МВ), преобразующий сигнал термopары в сигнал уровня 4–20 мА, реле (Р) для коммутации нагревателя и блок питания (БП).

Далее представлены графики, полученные при работе установки по адаптивному трехпозиционному алгоритму, описанному в патенте РФ №2220432 и реализованному теперь программно по блок-схеме рис. 2, а также по алгоритму с типовым неадаптивным трехпозиционным алгоритмом. Улучшение качества работы адаптивного регулятора можно однозначно определить при сравнении трендов, представленных на рис. 5 и 6.

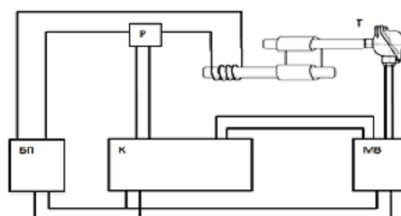


Рис. 4. Функциональная схема системы регулирования температуры

На рис. 5 представлен тренд работы традиционного трехпозиционного (неадаптивного) алгоритма управления, где 1 – измеренное значение температуры, 2 – заданное, 3 и 4 – соответственно верхняя и нижняя граница зоны нечувствительности, 5 – мощность ШИМ сигнала (время включения нагревателя, максимум – 100%).

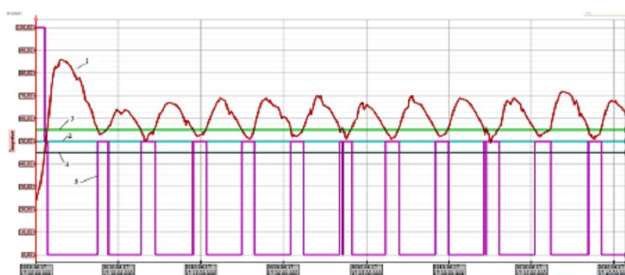


Рис. 5. Тренд работы нагревателя при традиционном (неадаптивном) трехпозиционном алгоритме регулирования

Как видно, неадаптивный алгоритм не в состоянии стабилизировать температуру в заданном интервале зоны, причем, наблюдается неудовлетворительное качество регулирования.

На рисунке 6 представлен тренд работы адаптивного трехпозиционного алгоритма управления, из которого видно, что стабилизация режима работы нагревателя происходит достаточно быстро, а температура входит в заданные границы зоны. Отметим, что на рис. 5 и 6, из-за трудности показа адаптации средней позиции с использованием ШИМ сигнала (в силу большой скорости переключения), это сделано в аналоговой его интерпретации.

Отметим, что даже при снижении значения средней позиции неадаптивного трехпозиционного регулятора до 30% вместо 50% его работа не может приблизиться к качеству и скорости работы адаптивного трехпозиционного алгоритма.

Программная реализация адаптивной приставки была выполнена в среде Siemens Step7 MicroWin на контроллере Siemens S7-200 CPU-224, а весь алгоритм был собран в единый функциональный блок. На рис. 7 представлен универсальный FBD-блок, представляющий собой программную реализацию адаптивной приставки, который может включаться в библиотеку программирования среды Siemens Step7 и позволяет использовать этот блок для аналогичных задач адаптивного трехпозиционного регулирования.

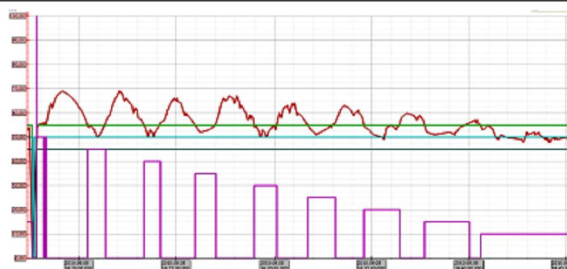


Рис. 6. Тренд работы нагревателя при адаптивном трехпозиционном алгоритме регулирования

Таким образом, имеем несколько различных представлений адаптивного трехпозиционного алгоритма: в виде блок-схем аппаратной (рисунок 1) или программной (рис. 2) реализаций, помеченной сети Петри (рис. 3) и FBD-блока (рис. 7), что позволяет использовать их для тех или иных целей, причем, каждый из вариантов представления имеет свою преимущественную область применения.

В целом же, анализируя результаты экспериментов, можно сделать вывод, что трехпозиционный адаптивный алгоритм является предпочтительным для использования в системах позиционного регулирования, особенно, с меняющейся нагрузкой объекта, поскольку он как улучшает качество АСР, так и приводит к экономии энергии.

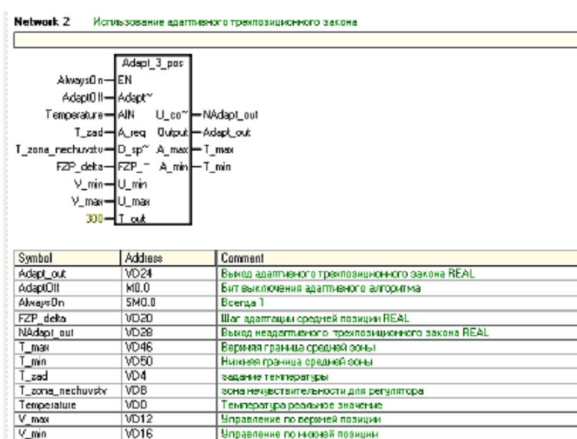


Рис. 7. Программный блок, реализующий адаптивный трехпозиционный алгоритм

Указанный алгоритм также апробирован на промышленных объектах, а именно, внедрен для регулирования плотности текучей смеси в шламосмесителе на ОАО «Себряковцемент», существенно зависящей от состава подаваемых в шламосмеситель компонентов, что доказывает его применимость в реальных производственных условиях.

*Работа выполнена в рамках проекта 2.1.2/1183 «Программно-аппаратные приставки адаптивного позиционного регулирования для систем регулирования промышленных и бытовых объектов» по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.)».*

#### Литература

1. Пат. 2220432 Российская Федерация, МПК7 G 05 B 13/02, G 05 B 11/18. Способ реализации трехпозиционного регулятора / Магергут В.З., Соболев А.В., Вент Д.П., Аль Таамнех Мо-



хаммед; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. – №2001101600; заявл.18.01.2001; опубл.27.12.2003, Бюл. №36. – 9 с.

2. Магергут, В.З. Выбор промышленных регуляторов и расчет их оптимальных настроек: монография / В.З. Магергут, Д.П. Вент, И.А. Кацер. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 239 с.

3. Юдицкий, С.А. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез: монография / С.А. Юдицкий, В.З. Магергут – М.: Машиностроение, 1987. – 176 с.

4. Магергут, В.З. Разработка и применение программ логического управления и адаптивной настройки регуляторов в управлении технологическими процессами / В.З. Магергут, Д.П. Вент, А.В. Ермолаев. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2003. – №6. – С. 164–166.

## **INFORMATION REPRESENTATIONS OF ADAPTIVE THREE-POSITION ALGORITHM FOR ITS HARDWARE AND SOFTWARE REALIZATION**

**V. A. PORKHALO**  
**A.G. BAZHANOV**  
**V.Z. MAGERGUT**

*Belgorod state technological  
university named  
after V.G. Shoukhov*

*e-mail:  
Porkhalo@mail.ru*

This article is concerned with different information representations of adaptive three-position algorithm described in method based on patent (RF) 2220432. Versions of the software algorithm realization are considered with draw an analogy with principles of its hardware realization and with reflection of versions specificity, including in the part of adaptive attachment realization. Also in this article are presented advantages of these representations according to the kind of realization. Here are described software automatic control system of the heater element's temperature and represented comparative results of its work with system of traditional three-position regulation.

Key words: three-position, controller, regulator, quality, system, structure, control, experiment.