

УДК 681.5

В.А. СУХАНОВ

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», г. Москва

АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ СЛОЖНЫХ САР НА ОСНОВЕ СОЗ-ТЕХНОЛОГИИ

Ключевые слова: система автоматического регулирования; сети Петри; структурная схема; производственные правила; база знаний; передаточная функция.

Аннотация: В работе рассматриваются вопросы анализа систем автоматического регулирования. Задача: сформировать такое описание структурных схем, которое бы достаточно легко воспринималось человеком и средствами компьютерной техники. Способ описания связей между переменными предполагает оперирование совокупностью производственных правил, организация и структурирование которых дают возможность сформировать базу знаний. Предлагается разработать модель сложной системы автоматического регулирования в виде сети Петри, что позволит при анализе опираться на технологию систем, основанных на знаниях, и интерактивно использовать квалифицированную помощь, взаимодействуя с экспертной системой. Разработано программное обеспечение, поддерживающее работу с предложенной моделью, что позволит более эффективно проводить соответствующие исследования за счет обеспечения квалифицированной (интеллектуальной) поддержки пользователю при решении определенного класса задач.

При анализе и синтезе систем автоматического регулирования (САР), помимо их описания в переменных «вход-выход» или в пространстве состояний, часто используется представление в виде структурных схем [3]. Такое описание является наглядным и простым для восприятия. Однако структурные преобразования сложных многосвязных линейных систем являются весьма трудоемким процессом. Они требуют применения многочисленных рутинных промежуточных процедур преобразо-

вания объединений звеньев и установления их передаточных функций, при этом возможны ошибки в силу значительных изменений при неоднократных локальных коррекциях и перестроении структурной схемы [5; 6].

Следует, однако, отметить, что характеристики и показатели качества системы определяются как раз по моделям со свернутой структурой, то есть типа «вход-выход» [4; 9]. Полученная эквивалентная передаточная функция позволяет провести анализ устойчивости (характеристический полином), определить временные и частотные характеристики.

Кроме того, часто имеется необходимость в простом доступе к различной сопровождающей информации о компонентах системы (динамических звеньях, локальных контурах отрицательной или положительной обратной связи и т.д.), а также в доступе к экспертной поддержке [2].

Таким образом, целесообразно сформировать такое описание структурных схем, которое бы достаточно легко воспринималось человеком и средствами компьютерной техники, позволяло бы использовать квалифицированную помощь непосредственно от специалистов/экспертов либо интерактивно, взаимодействуя с разработанной для этих целей системой интеллектуальной поддержки, в которую заложена база знаний для данной предметной области [10].

Предлагается модель системы в виде двудольного графа специального вида – сети Петри (СП) (рис. 1). Переход от сигнальных графов (обычных графов) к СП дает возможность использовать присущие им следующие свойства и характеристики:

- а) трансформирование СП в совокупность производственных правил;
- б) разметку СП и динамику функционирования СП;

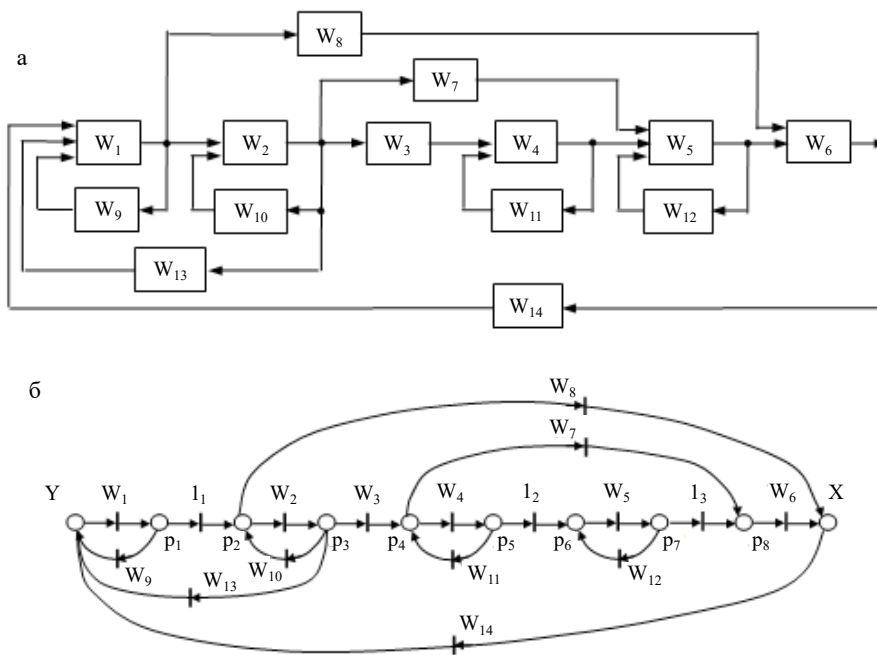


Рис. 1. Отображение структурной схемы (а) на сеть Петри (б):
 W_i – передаточные функции элементов и устройств системы; l_j – единичные операторы

в) граф достижимости;
 г) расширения СП (цветные, временные, ингибиторные, стохастические и другие типы СП).

Сеть Петри однозначно соответствует структурной схеме, однако более проста в восприятии, позволяет описать связи между переменными различными способами:

а) графически (собственно сеть Петри);
 б) в матричной форме (матрицы инцидентий или векторно-матричное рекуррентное соотношение);

в) в виде множества элементарных формул, которые можно представить посредством продукционных правил.

Наибольший интерес вызывает третий способ, так как организация и структурирование продукционных правил дают возможность сформировать базу знаний, что позволяет в дальнейшем опираться на технологию систем, основанных на знаниях (СОЗ), например в рамках экспертной системы [1; 11].

Такая модель в основе своей опирается на топологический подход (сигнальные графы, правила/формулы Мейсона [1; 7]), в соответствии с которым передаточная функция между двумя точками структурной схемы определяет-

ся в соответствии с соотношением:

$$W_{YX} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^n W_i(L_i) \Delta_i, \quad (1)$$

где n – число прямых путей между позициями Y и X ; W_i – передаточная функция i -го прямого пути (равна произведению передаточных функций, входящих в этот путь звеньев); Δ – определитель сигнального графа; Δ_i – i -й минор определителя.

Определитель находится по формуле:

$$\Delta = 1 - \sum_j W_j + \sum_{j,k} W_j W_k - \sum_{j,k,l} W_j W_k W_l + \dots, \quad (2)$$

где W_j – передаточные функции различных контуров; j – номер контура; $W_j W_k$ – произведения передаточных функций некасающихся пар контуров (комбинаций из 2-х некасающихся контуров); $W_j W_k W_l$ – произведения передаточных функций некасающихся троек контуров (комбинаций из 3-х некасающихся контуров) и т.д.

Минор определителя равен определителю при удалении i -го пути (всех дуг и позиций, лежащих на i -м пути).

Правила отображения структурной схемы на сеть Петри заключаются в следующем.

1. Каждой переменной (сигналу) схемы

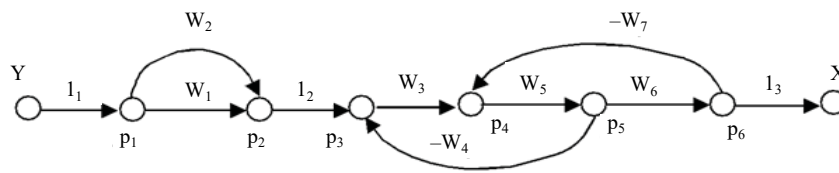


Рис. 2. Сеть Петри, соответствующая некоторой структурной схеме

сопоставляется позиция сети Петри.

2. Каждому оператору динамического звена (например, передаточной функции) сопоставляется переход сети Петри.

3. Дуги сети Петри – это направленные связи между звеньями в схеме.

4. Выходная величина оператора определяется как результат преобразования оператором входной величины, например (рис. 1б): $p_4 = p_3 W_3$.

5. Точке суммирования сопоставляется позиция, к которой подходит несколько дуг. При этом соответствующая такой позиции переменная равна сумме выходных величин операторов. Это делает ненужным использование в качестве суммирующих элементов других (отличных от позиций) элементов. На сумматоре знаки входных величин не указываются, так как они переносятся в знаки операторов W_{ij} . Например, на рис. 1б позиция p_4 моделирует сумматор: $p_4 = p_3 W_3 + p_5 W_{11}$.

6. Точке разветвления сопоставляется позиция, из которой исходит несколько дуг.

7. Входному сигналу системы (внешнему воздействию), представленному на схеме в явном виде (т.е. он не является выходом какого-либо оператора/динамического звена в рамках схемы), сопоставляется позиция, являющаяся входной для фиктивного (единичного) оператора.

8. Выходному сигналу системы (выходному воздействию), представленному на схеме в явном виде (т.е. он не является входом какого-либо оператора/динамического звена в рамках схемы), сопоставляется позиция, являющаяся выходной для перехода, соответствующего фиктивному (единичному) оператору, например сигнал/переменная X на рис. 2. Примечание: для большей наглядности на рис. 2 переходы не указаны, а только соответствующие им операторы.

9. Обратные связи (ОС) представляются

операторами с указанием знака, например $-W_4$ и $-W_7$ на рис. 2 для отрицательной ОС, для положительной ОС знак $+$ можно опускать.

Топологический анализ предполагает выполнение следующих процедур:

- 1) выявление всех прямых путей между выбранными точками, относительно которых нужно определить передаточную функцию;
- 2) выявление всех замкнутых контуров;
- 3) определение, есть ли контуры, которые не касаются друг друга, есть ли пары, тройки и т.д. таких контуров;

- 4) на основании полученных данных вычисляется определитель Δ по формуле (1);

- 5) определители (миноры) Δ_i также вычисляются по формуле (1), но при этом учитываются только те контуры, которые остаются после изъятия i -го прямого пути; если после этого не остается ни одного замкнутого контура, минор принимается равным единице.

Примечание: Все эти процедуры и другие вычисления реализуются программой *iSim* (рассмотрена ниже).

Этапы алгоритмизации предлагаемой модели:

- 1) структурная схема системы отображается на сеть Петри;

- 2) сеть Петри представляется в виде системы элементарных формул – продукционных правил;

- 3) формируется база знаний и механизм вывода на основе продукционного подхода и свойств сети Петри;

- 4) разрабатываются алгоритмы и программное обеспечение (в перспективе экспертная система советующего типа) для автоматического или интерактивного анализа систем: выделение и анализ элементов и фрагментов схем (контуров положительной и отрицательной обратной связи, параллельное соединение и т.д.); хранение дополнительной информации (в виде продукционных правил) об операторах,

Таблица 1. Описание структурной схемы в виде таблицы (матрицы) инцидентов

Матрица инцидентов (Ф матрица, $\Phi = O - I$)										
Переходы/позиции	l_1	W_1	W_2	l_2	W_3	W_5	W_6	l_3	$-W_4$	$-W_7$
Y	-1									
p_1	1	-1	-1							
p_2		1	1	-1						
p_3				1	-1				1	
p_4					1	-1				1
p_5						1	-1		-1	
p_6							1	-1		-1
X								1		

Таблица 2. Описание структурной схемы в виде совокупности продукционных правил

Продукционные правила				
1.	ЕСЛИ	Y	ТО	$p_1 = Y \cdot l_1$
2.	ЕСЛИ	p_1	ТО	$p_2 = p_1 \cdot W_1$
3.	ЕСЛИ	p_1	ТО	$p_2 = p_1 \cdot W_2$
4.	ЕСЛИ	p_2	ТО	$p_3 = p_2 \cdot l_2$
5.	ЕСЛИ	p_3	ТО	$p_4 = p_3 \cdot W_3$
6.	ЕСЛИ	p_4	ТО	$p_5 = p_4 \cdot W_5$
7.	ЕСЛИ	p_5	ТО	$p_6 = p_5 \cdot W_6$
8.	ЕСЛИ	p_6	ТО	$X = p_6 \cdot l_3$
9.	ЕСЛИ	p_5	ТО	$p_3 = p_6 \cdot (-W_4)$
10.	ЕСЛИ	p_6	ТО	$p_4 = p_6 \cdot (-W_7)$

контурах, воздействиях и т.д. (основа подсистемы объяснения экспертной системы); файловое хранение структурных схем с возможностью последующего их восстановления.

Рис. 2 и табл. 1, 2 иллюстрируют способы описания структурных схем: графический (рис. 2), матричный (табл. 1) и продукционный (табл. 2).

База знаний (продукционных правил) формируется в виде иерархии продукционных правил [8]: разделы, источники знаний, продукционные правила (ПП). В ней можно выделить раздел, связанный с описанием непосредственно структурной схемы, и раздел, связанный с использованием сопровождающей информации при анализе этих схем. Использование разделов базы знаний, не связанных с непосредственными вычислениями передаточных функций, а предназначенных для автоматического или автоматизированного поиска и анализа отдельных

узлов и контуров модели системы (структурной схемы), предполагает наличие механизмов вывода на знаниях.

В качестве такого механизма будем использовать динамические рекуррентные процедуры описания функционирования сети Петри, определяющие изменение разметки сети Петри в результате срабатывания переходов:

$$M(k+1) = M(k) + \Phi \cdot V(k), \quad M(0) = M_0, \quad (3)$$

где $M(k)$ и $M(k+1)$ – соответственно текущая и новая разметка сети Петри; V – вектор запуска (размерности m – число переходов), с помощью которого указывается тот переход, который будет срабатывать в текущий момент времени; Φ – матрица инцидентов, $\Phi = O - I$, $\Phi(t_i) = O(t_i) - I(t_i)$, где $I(t_i)$ и $O(t_i)$ – векторы (размерности n – число позиций), содержащие соответственно сведения о количестве входных

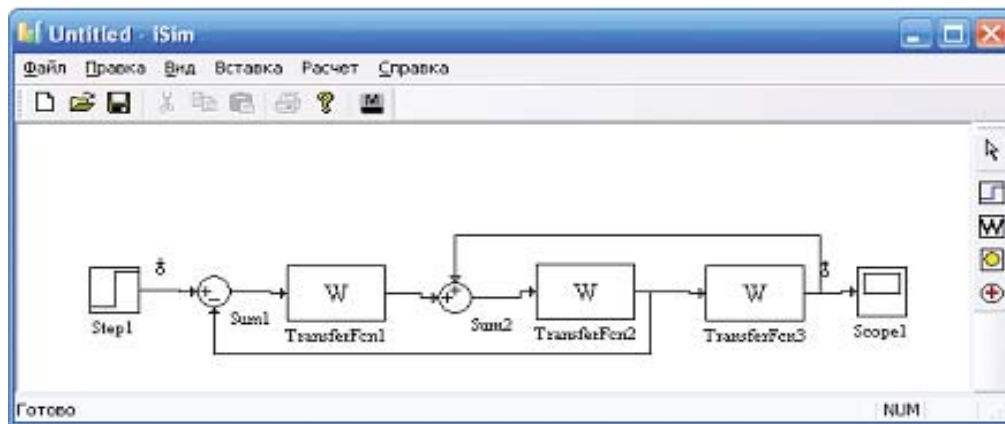


Рис. 3. Установка точек для расчета

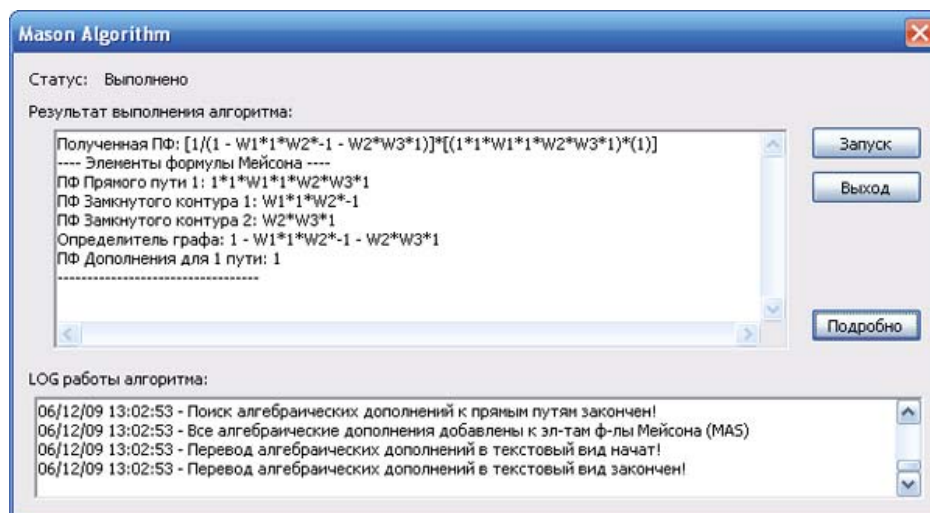


Рис. 4. Результаты работы механизма поиска

и выходных дуг для перехода t_i .

Представив вектор V в виде:

$$V(k) = \psi[M(k), I(k)]U(k), \quad (4)$$

и подставив его в (3), получим

$$M(k+1) = M(k) + \Phi\psi[M(k), I(k)]U(k), \quad (5)$$

где матрица ψ определяет набор готовых к срабатыванию (активизированных) переходов, а вектор управления U позволяет указать тот переход, который нужно запустить.

Соотношение (5) описывает функционирование сети Петри в форме многошагового управляемого динамического процесса в пря-

мом направлении (вывод на знаниях типа «от данных к цели»), здесь шаг – это изменение разметки в результате срабатывания одного перехода. Соотношение, соответствующее процессу в обратном направлении, записывается аналогично (вывод на знаниях типа «от цели к данным»).

В базу знаний включаются ПП, характеризующие тип позиций (сумматор, точка ветвления и т.д.), тип замкнутых контуров (отрицательная/положительная обратная связь, параллельное соединение и т.д.) и др.

Естественно, что для этих целей необходимо разработать соответствующие программные средства, обеспечивающие: естественный для человека способ ввода и редактирования мо-

делей систем управления в виде структурных схем, хранение различного рода сопровождающей информации о компонентах системы в базах данных и знаний в виде файлов, загрузку ранее сохраненной модели и ее дальнейшее редактирование, механизм вывода на знаниях.

Разработано программное обеспечение (программа *iSim* разработана А.И. Прилепским), которое позволяет определять передаточные функции при задании системы в виде структурной схемы и точек входа и выхода. Основное назначение программы – оказание помощи специалистам, работающим со сложными многоконтурными схемами систем автоматического регулирования.

Программа позволяет не только получить правильное решение, но и объяснить ход расчета, учитывая, что пользователь имеет представление о правиле Мейсона.

Программа предоставляет следующие возможности:

- 1) составление структурных схем в рабочей области программы;
- 2) расчет передаточной функции в набранной схеме по заданным входу и выходу;
- 3) вывод данных для отладки алгоритма;
- 4) вывод данных подсистемы объяснения.

На рис. 3 изображено главное окно программы. В правой части окна располагается па-

нель объектов САР. В рабочем поле приведена структурная схема системы, в которой установлены точки для расчета (между какими входом и выходом нужно проводить расчет).

На рис. 4 приведены элементы расчета передаточной функции системы – объяснения в виде сгенерированного отчета.

Таким образом, в результате предложенной модели способ формализации знаний о САР представляется в виде совокупности продукционных правил, структурированных в соответствии правилами построения и функционирования сети Петри; передаточные функции между заданными точками структурной схемы определяются, основываясь на топологическом методе анализа и знаниях эксперта (непосредственно или формализованных в виде базы знаний, в которую включена функция эксперта), что позволяет алгоритмизировать расчетные операции по определению передаточных функций одноконтурных и многоконтурных систем, причем в зависимости от используемой моделирующей системы их можно получать как в символьной, так и в числовой форме.

Все это позволит более эффективно проводить соответствующие исследования за счет обеспечения квалифицированной (интеллектуальной) поддержки пользователю при решении определенного класса задач.

Список литературы

1. Бондарев В.А. Применение технологий, основанных на знаниях, в управлении пилотируемые космическими аппаратами / В.А. Бондарев, Ю.Н. Жигулевцев, В.А. Суханов // В книге: XL Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. – М., 2015. – С. 356.
2. Гаврилов, А.И. Методы исследования и анализ сложных систем управления и обработки информации / А.И. Гаврилов, Т.Ю. Цибизова, В.Я. Родионов. – М. : РАДЭКОН, 2006. – 48 с.
3. Гаврилов, А.И. Моделирование систем автоматического управления / А.И. Гаврилов, Т.Ю. Цибизова. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 40 с.
4. Зубов, Н.Е. Управление по выходу спектром движения космического аппарата / Н.Е. Зубов, Е.Ю. Зыбин, Е.А. Микрин, М.Ш. Мисриханов, А.В. Пролетарский, В.Н. Рябченко // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 111.
5. Малахов, Н.А. Разработка алгоритмического и программного обеспечения рекуррентных многомерного и параметрического методов «быстрого» моделирования динамических систем / Н.А. Малахов, И.Р. Танташев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 10(22). – С. 6.
6. Малахов, Н.А. Система аналитико-числового моделирования систем и сигналов реального времени / Н.А. Малахов // Наука и бизнес: пути развития. – М. : ТМБпринт. – 2018. – № 10(88). – С. 25–31.
7. Мэзон, С. Электронные цепи, сигналы и системы / С. Мэзон, Г. Циммерман; пер. с англ.; под ред. П.А. Ионкина. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1963. – 622 с.
8. Плотников, В.Н. Системы, основанные на знаниях / В.Н. Плотников, В.А. Суханов. – М. :

Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1996. – 88 с.

9. Пролетарский, А.В. Концепция системного синтеза динамических объектов / А.В. Пролетарский // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 8. – С. 28–33.

10. Селезнева, М.С. Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой / М.С. Селезнева, К.А. Неусыпин // Измерительная техника. – 2016. – № 9. – С. 10–14.

11. Фам, С.Ф. Методы построения математических моделей: генетические алгоритмы / С.Ф. Фам, Т.Ю. Цибизова // В сборнике: Достижения вузовской науки. Труды международной научно-практической конференции. – М. : МГОУ, 2014. – С. 158–162.

References

1. Bondarev V.A. Primenenie tehnologij, osnovannyh na znanijah, v upravlenii pilotiruemyimi kosmicheskimi apparatami / V.A. Bondarev, Ju.N. Zhigulevcev, V.A. Suhanov // V knige: XL Akademicheskie chtenija po kosmonavtike posvjashhennye pamjati akademika S.P. Koroleva i drugih vydajushhihsja otechestvennyh uchenyh – pionerov osvoenija kosmicheskogo prostranstva: sbornik tezisov. – M., 2015. – S. 356.

2. Gavrilov, A.I. Metody issledovanija i analiz slozhnyh sistem upravlenija i obrabotki informacii / A.I. Gavrilov, T.Ju. Cibizova, V.Ja. Rodionov. – M. : RADJeKON, 2006. – 48 s.

3. Gavrilov, A.I. Modelirovanie sistem avtomaticheskogo upravlenija / A.I. Gavrilov, T.Ju. Cibizova. – M. : MGТУ im. N.Je. Baumana, 2006. – 40 s.

4. Zubov, N.E. Upravlenie po vyhodu spektrom dvizhenija kosmicheskogo apparata / N.E. Zubov, E.Ju. Zybin, E.A. Mikrin, M.Sh. Misrihanov, A.V. Proletarskij, V.N. Rjabchenko // Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija. – 2014. – № 4. – S. 111.

5. Malahov, N.A. Razrabotka algoritmicheskogo i programmnoho obespechenija rekurrentnyh mnogomernogo i parametricheskogo metodov «bystrogo» modelirovanija dinamicheskikh sistem / N.A. Malahov, I.R. Tantashev // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. – 2013. – № 10(22). – S. 6.

6. Malahov, N.A. Sistema analitiko-chislovogo modelirovanija sistem i signalov real'nogo vremeni / N.A. Malahov // Nauka i biznes: puti razvitija. – M. : TMBprint. – 2018. – № 10(88). – S. 25–31.

7. Mjezon, S. Jelektronnye cepi, signaly i sistemy / S. Mjezon, G. Cimmerman; per. s angl.; pod red. P.A. Ionkina. – M. : Izd-vo inostrannoju literatury, 1963. – 622 s.

8. Plotnikov, V.N. Sistemy, osnovannye na znanijah / V.N. Plotnikov, V.A. Suhanov. – M. : Izdatel'stvo MGТУ im. N.Je. Baumana, 1996. – 88 s.

9. Proletarskij, A.V. Konceptija sistemnogo sinteza dinamicheskikh ob#ektov / A.V. Proletarskij // Avtomatizacija i sovremennye tehnologii. – 2007. – № 8. – S. 28–33.

10. Selezneva, M.S. Razrabotka izmeritel'nogo kompleksa s intellektual'noj komponentoj / M.S. Selezneva, K.A. Neusypin // Izmeritel'naja tehnika. – 2016. – № 9. – S. 10–14.

11. Fam, S.F. Metody postroenija matematicheskikh modelej: geneticheskie algoritmy / S.F. Fam, T.Ju. Cibizova // V sbornike: Dostizhenija vuzovskoj nauki. Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii. – M. : MGOU, 2014. – S. 158–162.

V.A. Sukhanov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow

Analysis of Structural Schemes of Complex Systems of Automated Regulation on the Basis of Technology of Knowledge-Based Systems

Keywords: automated control system; Petri nets; structural scheme; production rules; knowledge base; transfer function.

Abstract: The paper deals with the analysis of automated control systems. The objective is to form such a description of structural schemes, which would be quite easily perceived by man and the means of computer technology. The method of describing relationships between variables involves operating with a set of production rules, the organization and structuring of which make it possible to form a knowledge base. It is proposed to develop a model of a complex automated control system in the form of a Petri net, which will allow us to rely on the technology of knowledge-based systems and use qualified assistance interactively when interacting with an expert system. Software that supports work with the proposed model, which will make it possible to more effectively carry out relevant research by providing qualified (intellectual) support to the user in solving a certain class of problems has been developed.

© В.А. Суханов, 2018