

УДК 681.3.06: 685.51

АКУНОВИЧ С. И., ГОНЧАРОВ А. А., Белорусский государственный технологический университет, Белорусский национальный технический университет

## ОБЪЕКТНО-СОБЫТИЙНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

*Предлагается способ проверки логических описаний сложных управляющих устройств при проектировании и реализации процесса управления. Он может быть использован при разработке и диагностировании управляющих программ для различного технологического оборудования (машин).*

*As IT-technologies application is significantly increased in the design and implementation of complex control devices for sophisticated technological equipment, a method for testing logical descriptions of these devices in the design and implementation of the management process is offered. It can be used in the development and diagnosis of control programs for different technological equipment (machines)*

### Введение

В настоящее время способность ученых, инженеров, других инженерно-технических работников поддерживать темпы научно-технического прогресса определяют информационные технологии. Знание этих технологий является также необходимым элементом подготовки специалистов высокой квалификации.

Это положение особенно существенно при проектировании и производстве сложных систем управления (или управляющих устройств), а также при обучении эффективному проектированию этих устройств.

Традиционно процесс создания сложных технических объектов, устройств состоит из нескольких этапов, важнейшим из которых является проектирование. Результатом этого этапа является проект некоторого изделия, устройства или технологической машины (ТМ).

С формальной точки зрения под проектом понимают некоторую совокупность взаимосвязанных документов, описывающих определенный объект или процесс [1].

В настоящее время ускорение разработки проектов достигается за счёт применения автоматизированных с помощью ЭВМ методов проектирования, которые также позволяют существенно повысить качество и уровень проектно-конструкторских работ. В таком случае проект Р, составляющие его элементы и их совокупности, части проекта представляются

терминами, понятиями операционной среды ЭВМ. Говорят, что проекты погружаются в среду ЭВМ (или вычислительной системы).

**Определение 1.** Некоторый проект Р, погружённый в среду мультимедийной системы SYS и дополненный специальными объектами и органами управления, назовём моделью проекта Р в SYS или гиперпроектом GP. Последний представляет собой отображение декартова произведения множеств Р и SYS, то есть  $P \times SYS \rightarrow GP$ , где Р и SYS определены выше;

$GP = \{PGP_1, PGP_2, \dots, PGPI_1, \dots, PGPI_1\}$  – множество объектов, называемых папками гиперпроекта;  $PGPI_1 = \{SGPI_{1,1}, SGPI_{1,2}, \dots, SGPI_1, i_2, \dots, SGPI_1, I_2\}$  – *i*-я папка гиперпроекта, состоящая из множества объектов  $SGPI_1, I_2$ , называемых его страницами, причём  $\{SGPI_3\}$  включается в GP, а  $I_3$  – мощность этого множества;  $I_1$  – мощность множества страниц *i*1-й папки;  $SGP = \{TP, TDO, IL, PR, DGO, DOD, SC, ME, ORU\}$  – *i*2-я страница папки  $PGPI_1$  гиперпроекта GP, состоящая из множеств (может быть и пустых), называемых текстовые поля TP, текстовые динамические окна TDO, рисунки (графики, чертежи и т. д.) IL, процессы PR, динамические графические окна DGO, диалоговые окна ввода-вывода данных DOD, сценарии SC, меню ME, органы управления ORU.

Известно, что если технологическое оборудование (или ТМ) можно представить в виде

двух взаимодействующих частей – устройства управления (УУ) и объекта управления, то эти части проектируют различные службы и специалисты [2]. Проектирование УУ состоит из нескольких этапов: алгоритмического (создание алгоритмов управления и функционирования), логического (разрабатывается логическая структура УУ) и технического (схематехнического).

В условиях всё усложняющихся УУ, использование программируемых контроллеров (ПК) всё больший удельный вес приобретают первые два этапа. Например, в [3] приводится таблица экспериментальных данных, свидетельствующая о том, что на них затрачивается до половины трудоёмкости на создание средств управления. При этом ошибки, допускаемые проектировщиками УУ на этих этапах, имеют принципиальный характер и более тяжёлые последствия, чем ошибки технической реализации. Поэтому всё более важное место занимает процесс проверки алгоритмов управления (АУ), являющихся фактически формализованным техническим заданием на проектирование УУ, в рамках системы моделирования.

В работе [4] излагаются основы построения комплексной САПР дискретных УУ технологическим оборудованием (ТМ) и процессами и рассматриваются вопросы использования мультимедийной среды ЭВМ для разработки этой САПР, которая получила название «Гиперсистема». В ней выполняется алгоритмическое (на уровне АУ), логическое (на уровне логической структуры) и схемное (на уровне принципиальной электрической схемы) моделирование проектов УУ ТМ и процессами.

В предлагаемой работе уделено внимание моделированию АУ ТМ на уровне их логического описания.

#### Моделирование АУ ТМ в виде СПФ

Рассмотрим в качестве описаний логических структур АУ ТМ систему предикатных формул (СПФ), которая отличается от систем логических уравнений (СЛУ) двумя существенными моментами, отмеченными в [5]:

в СПФ используются многозначные переменные, что существенно расширяет класс описываемых объектов;

при построении предикатных формул кроме логических операций И, ИЛИ, НЕ используются

операции сравнения, что существенно расширяет класс описываемых ситуаций в управлении.

Моделирование логических описаний АУ ТМ может осуществляться с помощью так называемого метода сплошного моделирования [6]. Для существенного сокращения времени моделирования логических структур АУ, при возрастании их размерности, используют принцип событийности.

При изложении методов моделирования логических структур АУ в разных литературных источниках используются различные термины, понятия и буквенные обозначения. Для удобства изложения используем единую систему обозначений и понятий, описанную в [7]. Отличительной особенностью используемой системы понятий является явное выделение в логическом описании (ЛЮ) АУ структурного и поведенческого аспектов.

Пусть имеем некоторый АУ. АУ назовем такое отображение

$$S: A(X) \times B(Z) \rightarrow Z, \text{ в котором}$$

1)  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_j, \dots, S_J\}$ , где  $J$  – мощность множества  $S$ , определяющая некоторое конечное число предикатных формул в  $S$ ;

2)  $S_j: a_j(X) \times b_j(Z) \rightarrow z_j$  – некоторая  $j$ -я формула из  $S$ , она соответствует описанию одного выхода АУ;

3)  $X$  и  $Z$  есть некоторые конечные непустые множества логических переменных, входных и выходных соответственно;

4)  $A(X)$  есть элемент  $\{A(X)\}$  и является некоторым набором переменных из множества всех наборов переменных из  $X$ ;

5)  $B(Z)$  есть элемент  $\{B(Z)\}$  и является некоторым набором выходных переменных из множества всех наборов переменных из  $Z$ ;

6)  $a_j(X)$  и  $b_j(Z)$  есть наборы входных и выходных переменных соответственно для  $j$ -й формулы, причем  $a_j(X) \in \{A(X)\}$ ,  $b_j(Z) \in \{B(Z)\}$ ,  $z_j \in Z$ ; для  $\forall(a, b) \text{ I } (a \in a_j(X), b \in b_j(Z)) [a \ q \ b]$ , где  $q \in \{\&, \text{I}, @, =, \neq, >, \geq, \leq, <, \leq\}$  есть символ логической операции или операции сравнения,  $a, b$  – многозначная или булева переменные либо их инверсии, т. е. любые переменные, являющиеся аргументами некоторой формулы  $S_j$ .

Структурная модель АУ может быть представлена также в скобочной форме.

**Определение 2.** Входной переменной  $x \in X$  логического описания  $S$  некоторого АУ будем

называть такую многозначную переменную, значение которой не зависит от состояния АУ, т. е.  $(\forall x, x \in X) [x \notin Z \& X \cap Z = 0]$ .

Соответственно, выходной переменной  $z \in Z$  логического описания  $S$  назовем такую переменную, значение которой определяется входными воздействиями  $A(X)$ , наборами выходных переменных  $B(Z)$  и некоторой формулой  $S_j$ , т. е.

$$(\forall z, z \in Z) [S_j: a_j(X) \times b_j(Z) \rightarrow Z].$$

**Определение 3.** Состоянием входной  $x$  (или выходной  $z$ ) переменной будем считать текущее значение указанной переменной из множества  $X$  (или множества  $Z$ ) значений, причем  $X \in \{1, 2, \dots\}$ , а  $Z \in \{0, 1\}$ . Состояния переменных (входных и выходных) будем обозначать теми же символами, что и соответствующие переменные, но с индексами. Изменения состояний входных переменных представляют собой входные воздействия.

**Определение 4.** Шагом моделирования логического описания  $S$  назовем отрезок времени  $\theta$  между поступлениями на вход СПФ двух соседних воздействий  $A_i(X)$  и  $A_{i+1}(X)$ , или  $(\forall \tau, \tau \in \theta \mid A_i(X) \rightarrow C_i(Z)) [A_{i+1}(X) \rightarrow C_{i+1}(Z)]$ , где  $i = 0, 1, 2, \dots$  – номера входных воздействий и наборов состояний выходных переменных;  $C_i(Z)$  – набор состояний выходных переменных, соответствующий  $i$ -му входному воздействию.

**Определение 5.** Тактом моделирования логического описания  $S$  будем называть отрезок времени  $T$ , в течение которого изменяет свое значение хотя бы одна выходная переменная  $z \in Z$ , или  $(\forall T) [\exists z, z \in Z \mid zT_k \neq zTk + 1]$ , где  $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$  – номер текущего такта моделирования;  $zTk$  – состояние некоторой выходной переменной после окончания  $k$ -го такта.

С учетом введенных понятий состояний переменных, шага и такта моделирования дадим определение поведенческой модели.

**Определение 6.** Поведенческой моделью АУ назовем такое отображение

$$F: A_i(X) \times B_i, k - 1(Z) \rightarrow C_i, k(Z), \text{ что}$$

1)  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_N\}$  – множество предикатных формул в модели  $F$ ;  $N$  – мощность указанного множества;

2)  $f_j: a_i(X) \times b_i, k - 1(Z) \rightarrow Z_i, k$  – описывает последовательное изменение состояний  $j$ -го

элемента АУ, где  $j \in \{1, 2, 3, \dots\}$  – номер описываемого элемента;  $(i, k) \in \{1, 2, 3, \dots\}$ ;  $i$  – номер шага и  $k$  – номер такта соответственно;

3)  $A_i \in \{A(X)\}$  – входное воздействие для  $i$ -го шага моделирования из множества всех входных воздействий;

4)  $B_i, k - 1(Z) \in \{B(Z)\}$  – является набором состояний тех выходных переменных, значения которых из  $(k - 1)$ -го такта участвуют в формировании набора состояний выходов на  $k$ -ом такте;

5)  $C_i, k(Z) \in \{Z\}$  – набор состояний выходных переменных для  $i$ -го шага и  $k$ -го такта моделирования из множества всех наборов состояний выходных переменных  $Z$ ;

6)  $a_i(X)$ ,  $b_i, k - 1(Z)$  и  $Z_i, k$  – входное воздействие, набор состояний выходных переменных и состояние выходной переменной соответственно для  $i$ -го шага,  $(k-1)$ -го и  $k$ -го такта моделирования.

Будем различать устойчивые и неустойчивые состояния алгоритмов управления ТМ, устойчивые и неустойчивые АУ.

**Определение 7.** Устойчивым состоянием некоторого АУ, функционирование которого описывается формулой  $F$ , называется такое состояние  $C_i + 1, k + p(Z)$ , которое достигается из некоторого состояния  $C_i, k$  при подаче нового входного воздействия  $A_i + 1(X)$  за конечное число тактов  $P$ .

Устойчивым назовем такой АУ, который в течение  $(i + 1)$ -го шага моделирования за  $P$  тактов переходит в устойчивое состояние  $C_i + 1, k + p(Z)$  из состояния  $C_i, k$ .

Начальному состоянию модели  $F$  соответствуют наборы  $A_0(X)$ ,  $B_0(Z)$  и  $C_0(Z)$ . Введем понятия ранга и множества рангов.

Пусть в СПФ некоторого АУ имеется множество  $\{f_1\}$  таких ПФ, что множество наборов из  $\{a_{j1}(X)\}$  есть  $A_{j1}(X) \in X$ , т. е.  $\{f_1\} \rightarrow \{a_{j1}(X)\}$ . Придадим такому множеству ПФ вес, равный 1, обозначив его через  $F_{j1,1}$ . Тогда множество формул  $\{f_2\} \rightarrow \{a_{j2}(X)\}$  будет иметь вес 2.

Следовательно, некоторому  $j$ -му множеству ПФ такому, что

$$\{f_j \mid j = 0, 1, 2, \dots \& \{f_j\} \rightarrow (\{a_{jq}(X)\} \& F_{j(q-1), q-1}) = F_{jq, q},$$

будет соответствовать вес  $q$ .

**Определение 8.** Рангом  $r$  некоторого множества  $Fjq$ ,  $q$  предикатных формул назовем численное значение веса  $q$  ( $q = 1, 2, \dots$ ), т. е.

$$(\forall fjq \in Fjq \mid q = 1, 2, \dots) [\exists r \mid r = |q|].$$

Объединение рангов  $r_k$  при изменении  $k$  от  $k = 1$  до  $K$ , образует множество  $R$  рангов ПФ некоторой рассматриваемой СПФ, где  $K$  – мощность этого множества.

Пусть имеем поведенческую модель  $F$  некоторого АУ такую, что

$$F: Ai(X) \times Bi, k-1(Z) \rightarrow Ci, k(Z);$$

Предлагаемый способ, который описан в [7], назван способом динамического ранжирования. Здесь сделана попытка учесть недостатки известного статического ранжирования и метода событийного моделирования. Суть динамического ранжирования состоит в реализации выборочного вычисления предикатных формул с помощью адресованных переходов. Моделирование здесь рассматривается как преобразование структурной модели в поведенческую модель. Для управления данным преобразованием используется матрица адресованных переходов.

Процесс активизации формул можно представить в виде дерева, каждый ярус которого соответствует одному этапу активизации. Номер яруса дерева активизации характеризует относительную упорядоченность формул и рассматривается нами как динамический ранг формулы, в отличие от общепринятого понятия ранга [6].

Пусть процесс активизации формул  $Sj$ , являющихся элементами системы  $S$ , представим в виде некоторого дерева  $G$ . Тогда вершину данного дерева обозначим через  $gk, l$ , где  $(k, l) - \{1, 2, 3, \dots\}$ ,  $k$  есть номер яруса дерева  $G$ ,  $l$  – номер вершины на  $k$ -м ярусе.

**Определение 9.** Дерево  $G$  назовем активизирующим графом, если:

а)  $gk, l$  является вершиной данного дерева;  $l \in L$  есть номер вершины  $k$ -го яруса,  $L$  – конечное число вершин на  $k$ -м ярусе;

б) имеется формула  $w: gk, l \rightarrow Sjk$ , которая сопоставляет каждой вершине графа  $G$  переход в активное состояние (т. е. изменение состояния) некоторой формулы  $Sjk$  на  $k$ -м шаге моделирования.

Теперь введем понятие динамического ранга.

**Определение 10.** Динамическим рангом ( $D$ -рангом) некоторой формулы  $Sj$  будем называть

число, равное номеру  $k$  яруса активизирующего графа  $G$ , или

$(\forall k, k \in K) [\exists D \mid D = k]$ ; где  $K$  – множество номеров ярусов активизирующего графа  $G$ .

Как следует из определения 10,  $D$ -ранг формулы изменяется в зависимости от того, какие входные воздействия поданы из СПФ (они соответствуют номеру такта моделирования  $k$ ) и какие формулы активизированы на предыдущем ярусе активизирующего графа  $G$ .

В нашем способе на каждом такте моделирования осуществляется определение активизированных формул и моделирование (вычисление) значений этих формул. При таком подходе такт моделирования и  $D$ -ранг формулы, согласно определений 9 и 10 имеют одинаковые численные выражения. Это обстоятельство позволяет существенно упростить процедуру алгоритмической и программной реализации разработанного способа моделирования.

Особенности данного способа состоят в следующем:

способ не требует анализа структуры СПФ с целью выявления и разрыва обратных связей; обеспечивает существенное сокращение времени моделирования для СПФ, описывающих АУ, так как для последних характерна слабая функциональная связность;

предложенный способ не накладывает ограничений на структуру СПФ, что обеспечивает высокую адаптивность его к изменениям в постановке задачи моделирования.

При использовании программируемых контроллеров (ПК) и персональных компьютеров для реализации сложных алгоритмов дискретного управления оборудованием этот этап становится определяющим. Хорошо и детально проработанный АУ обеспечивает простоту и эффективность разработки управляющих программ (УП) и другой проектной документации.

Наряду с этим все неточности и ошибки в АУ тиражируются и усиливаются на последующих этапах проектирования, изготовления, монтажа и запуска в эксплуатацию.

Рассмотрим реализацию описанного выше способа.

#### Объектно-событийная реализация динамического ранжирования

Рассмотрим исследованный в работах [5,7] язык предикатных формул. УП на этом

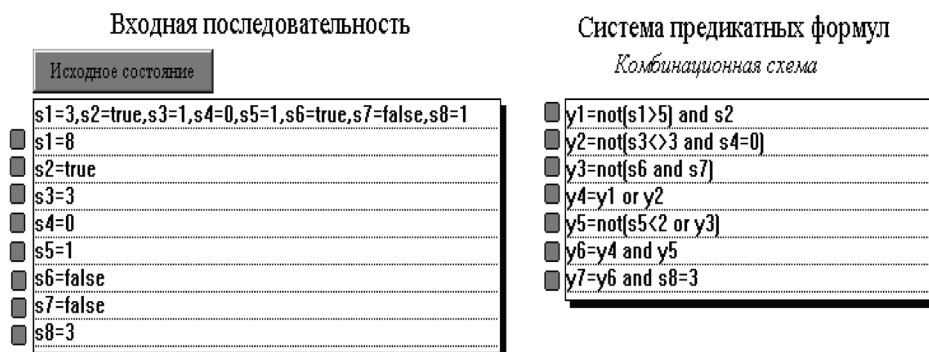


Рис. 1. Входная последовательность и СПФ

языке представляется в виде СПФ. Этот способ наиболее близок к таким языкам представления УП для ПК как язык булевой алгебры, язык программных команд (AWL), язык релейно-контактной символики (КОР), язык функциональных схем (FUP).

При проектировании бортовых систем спутников связи [8] СПФ рассматривается как логическое представление АУ и является базой (техническим заданием) для разработки принципиальных схем. В этом и ряде других случаев (УП сложных станков и автоматических линий) СПФ может состоять из нескольких тысяч предикатных формул. Например, для оценки эффективности разработанных в работе [5] средств моделирования были использованы СПФ, содержащие около 5000 предикатных формул.

Мы рассматриваем СПФ как общую платформу, взаимодействие которой с перечисленными выше языками оказывается простым и естественным. Более того, в настоящей работе предлагается функциональное расширение СПФ, включающее основные функции ПК, операции и отношения теории множеств. Реализация кванторов всеобщности и существования фактически обеспечивается используемой системой программирования на этапе интерпретации (компиляции). В связи с отмеченным излагаемый ниже поход и средства являются универсальными и особо ценными.

Основная идея реализации метода динамического ранжирования [4] при моделировании СПФ заключается в представлении

каждой предикатной формулы в виде объекта. СПФ представляется как совокупность объектов [9], взаимодействующих на основе событий. При этом в качестве события выступает изменение значения (переключение) предикатной формулы.

На рис. 1 представлены входная последовательность, СПФ и соответствующие модели объектов моделирования.

Более полное изложение этих, а также приведенных в дальнейшем сценариев приведено в [4, 9]. Для построения модели СПФ пользователю такие знания не обязательны, так как приведенный выше и другие сценарии генерируются в приложении «Гиперсистема» автоматически. При этом пользователь задает только имена объектов, их действия и предикатные формулы.

### Моделирование СПФ

Основной целью моделирования СПФ является выявление и устранение неизбежных при проектировании сложных систем ошибок, имитация сбоев и отказов аппаратуры и оборудования, ошибки управляющего персонала (анализ по принципу «что – если»), а также получение наглядного, подробного и точного описания процесса работы. Более подробное изложение этой цели дано в [4].

Моделирование начинается с воздействия пользователя на объект «Исходное состояние». Соответствующая входная последовательность, СПФ и граф управления представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты моделирования УП мочечной машины в начале цикла работы. В СПФ этого примера триггеры МРМС, МР1Р, МРМО, МГМО и МРС упро-

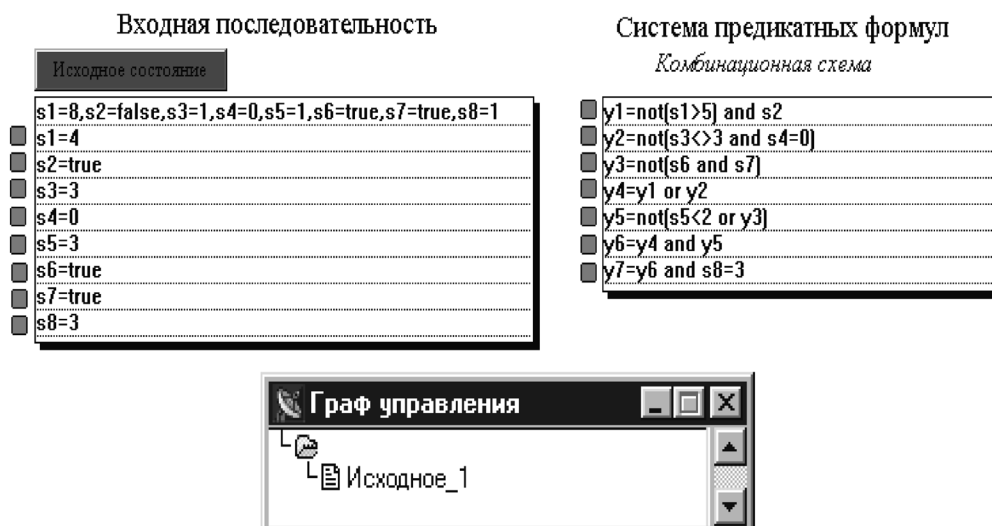


Рис. 2. Входная последовательность, СПФ и граф управления моечной машины



Рис. 3. Результаты моделирования УП

ценно представлены логическими формулами, хотя более адекватно их поведение можно представить специальными функциями, имеющимися в составе вышеупомянутого функционального расширения.

В заключение отметим, что функциональные отображения СПФ в виде графов управления – это важнейший инструмент анализа слож-

ных управляющих программ на всех этапах их жизненного цикла, включая проектирование, наладку, эксплуатацию и модернизацию. В самом деле, обычный умозрительный анализ даже простейших рассмотренных СПФ вызывает существенные затруднения. Получение таких отображений даже для систем средней сложности вручную практически невозможно.

### Литература

1. **Акунович С. И.** Дискретные системы логического управления технологических машин./ С. И. Акунович, А. А. Гончаров, Ю. Н. Петренко. – Минск: ЗАО «Юнипак», 2006.- 336 с.
2. **Добролюбов А. И., Акунович С. И.** Автоматизация проектирования систем управления технологических машин. – М.: Машиностроение, 1974. – 224 с..
3. **Калентьев А. А.** Автоматизация проектирования алгоритмов управления технологическими системами с множеством дискретных состояний./Автореф. диссертации на соиск. уч. степени д. т. н. (на правах рукописи). – Самара, 1998. – 34 с.
4. **Акунович С. И., Гончаров А. А., Дятко А. А.** Моделирование и анализ проектов систем дискретного управления. – В кн. Основы построения комплексной САПР систем дискретного управления технологическим оборудованием и процессами./Уч. пособие в 2-х частях. – Ч. 2. – Минск, изд-во БГТУ, 2002. – 38 с.
5. **Акунович С. И., Гончаров А. А.** Описание алгоритмов управления технологических машин системой предикатных формул. – В сб. Применение систем автоматизированного электропривода на промышленных предприятиях Белоруссии./Тезисы докл. респ. научн. техн. совещания. – Мн.: БелНИИНТИ, 1982. – с. 91–92.
6. **Гончаров А. А.** Резидентная и распределённая модели систем управления технологических машин// Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2006. – № 2 (март-апрель). – С. 49–52.
7. **Гончаров А. А.** Об одном подходе к моделированию логической структуры управляющих устройств// Информатизация образовательных процессов: автоматизация управления, технологии, дистанционное обучение: Сб. науч. ст.; Под ред. проф. Н. А. Цырельчука; В 2-х ч.(По итогам работы МНПК; Минск, 19–20 апр. 2001г.) / Мин-во образования РБ. Минск. гос. высш. радиотехн. колледж.—Минск, 2001г. – Ч.1. – С. 229–241.
8. Руководящий технический материал «Аппаратура радиоэлектронная бортовая. Типовая форма технических требований к радиоэлектронной аппаратуре в части выполнения логических операций (РТМ 154-13-83). – Красноярск: НПО ПМ, 1983.
9. **Гончаров А. А.** Функциональная агрегативная модель системы логического управления электроприводами технологического комплекса./ Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2006. – № 3 (май-июнь). – С. 54–61.