

РАЗРАБОТКА ФОРМАЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЦИКЛОГРАММНЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ И ВЫПОЛНЕНИЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ НА КОРРЕКТНОСТЬ

А.Е. Вергер, А.С. Перванюк (ООО "Лаборатория автоматизированных систем (АС)")

Разработан формальный аппарат описания циклограмм в интервальной темпоральной логике. Показано его применение для моделирования и верификации циклограммных моделей (ЦМ) на корректность. Описано применение продукционной базы знаний ЦМ и инструментария по формированию алгоритмов выдачи дискретных управляющих воздействий для повышения качества проведения испытаний.

Ключевые слова: формальный аппарат, темпоральная логика, циклограммная модель, база знаний, правила вывода, метод верификации.

В настоящее время актуальной проблемой построения систем автоматизации испытаний является низкая выразительность средств разработки АСУТП в части создания программных систем, способных эффективно функционировать в условиях изменяющегося ТП. Это особенно остро ощущается при решении комплексных задач по созданию систем управления (СУ) испытаниями, в рамках которых требуется предоставить поддержку использования различных алгоритмов выдачи управляющих воздействий, а также обеспечить высокое качество испытаний.

Традиционным подходом к построению программного обеспечения АСУТП в целом и СУ испытаниями, в частности, является детальное определение всех программных алгоритмов управления техническими средствами (контроллерами) на этапе спецификации. При этом подразумевается, что условия проведения испытаний и параметры объекта контроля неизменны и заранее известны. При таком подходе оператор может выбирать требуемый алгоритм из фиксированного перечня реализованных алгоритмов в зависимости от режима испытаний непосредственно во время их проведения.

Но что делать, если испытываемые объекты имеют различные конструктивные и технологические особенности, а соответственно, и различные параметры и условия проведения испытаний? Очевидно, необходимо снова обращаться к разработчику СУ или, что зачастую еще более проблематично, передавать часть исходного кода системы и организовывать соответствующий режим доступа для стороннего разработчика.

Эффективным решением данной проблемы является обеспечение возможности для оператора СУ самостоятельно задавать и редактировать алгоритмы проведения испытания без написания кода — "программировать без программистов". Для этого необходимо выполнить предварительное моделирование конкретного ТП управления испытаниями. Получен-

ная модель может быть использована в качестве основы при разработке соответствующего программного обеспечения СУ. Такое решение можно считать удачным в случае построения конкретной системы автоматизации. С другой стороны, легкое развитие и масштабирование частных систем автоматизации возможно, если их построение велось максимально "технологично" — с применением универсальных методик и инструментальных средств. В этом случае системы обладают свойством "комплементарности", и появляется возможность строить комплексные системы автоматизации. Этот путь является наиболее эффективным решением модернизации экспериментально-испытательной базы предприятия в целом¹. Технологичность построения систем автоматизации подразумевает использование единого подхода к разработке отдельных элементов и подсистем. В связи с этим разработка специализированных моделей процесса управления испытаниями "с нуля" для каждого вида испытательной установки или ТП становится неоптимальной и трудоемкой. В этом случае целесообразным является создание специального механизма, предназначенного для формирования моделей различных процессов управления.

Одним из наиболее распространенных способов управления является выдача дискретных управляющих сигналов. В связи с этим для построения такого специального механизма целесообразно использовать циклограммные модели (ЦМ) управления.

Необходимым этапом создания модели является ее верификация на корректность. В качестве средства обеспечения верификации может быть применена база знаний (БЗ) ЦМ.

Для реализации процессов моделирования и верификации необходимо разработать формальный аппарат (ФА), определяющий формальный язык представления знаний о процессе управления. Такой ФА позволяет задать временные (темпоральные) зависи-

¹ Перцовский М.И. Стратегия развития и модернизация экспериментально-испытательной базы крупных промышленных предприятий // Автоматизация в промышленности. 2009. №6.

мости, события, факты, действия и процессы, происходящие в проблемной области, и может быть использован для формирования множества моделей, налагающих комплекс ограничений в соответствии с моделируемым ТП, режимами проведения испытаний и параметрами контролируемых объектов.

Для разработки ФА требуется определить основные понятия рассматриваемой предметной области, выделить ее ключевые объекты и типы отношений между ними. Для этого сначала необходимо проанализировать особенности моделирования процесса выдачи дискретных сигналов, распределенных во времени, а затем провести исследования целевой предметной области – области циклограммных процессов управления.

При моделировании ТП проведения испытаний важно задавать свойства модели, не привязываясь к конкретной временной шкале. Это обусловлено необходимостью применения алгоритмов, в которых управляющие воздействия на разных каналах не всегда имеют четко выраженную взаимную временную зависимость, а определяются множеством внешних событий системы. Использование нечеткой временной оси позволяет определять условия запуска выдачи управляющих воздействий по отдельному каналу управления, и тем самым обособливать алгоритмы управления по каждому каналу.

В качестве основы разрабатываемого ФА целесообразным является использование интервальной темпоральной (временной) логики. Последняя позволяет задавать интервалы, через которые произойдет переход канала управления в противоположное состояние, и привязывать необходимые свойства к задаваемым интервалам. Именно специфика использования темпоральной логики в рамках разрабатываемого ФА позволяет выполнить описание процессов управления без привязки к единой, заранее определенной для всех каналов управления временной оси и осуществить распределение моделируемых событий по нескольким временным осям, задав условия запуска этих событий и их временные параметры.

Предварительное исследование целевой предметной области проводилось на основе циклограмм ряда процессов управления испытаниями, в том числе рассматривались СУ: поршневыми газодинамическими установками для исследования теплообмена и аэродинамики изделий РКТ при гиперзвуковых скоростях; испытаниями пиротехнических изделий; испытаниями ракетных двигателей; испытаниями плазмой; процессом нагружения.

В результате проведения исследований был выявлен ряд основных концепций и взаимосвязей понятий рассматриваемой предметной области, которые могут быть использованы для построения формальной системы описания ЦМ и их верификации. В их число вошли:

1) внешние и внутренние события системы управления. Внешние события используются для управле-

ния циклограммой в качестве условных нулей (условий) для запуска последовательности переходов в дискретные состояния одного или нескольких каналов управления. Внутренние события представляют собой непосредственно переходы каналов управления в различные состояния, а также могут являться условными нулями. Примеры подобных событий: достижение заданного уровня жидкости в резервуаре, готовность к поджигу, перевод канала управления в заданное состояние;

2) классы взаимодействия каналов управления, определяющие характер темпоральных отношений между двумя и более каналами. Были выявлены следующие классы взаимодействия:

- временно-зависимый, описывающий отношения между каналами управления, определяющие порядок перехода этих каналов в дискретные состояния. Промежуток между переходами может быть как фиксированный, так и заданный отношениями "не меньше, чем через" и "не больше, чем через". Пример: включение регистрирующей аппаратуры после появления сигнала о готовности к проведению эксперимента;

- последовательный с наложением определяет такие темпоральные отношения, при которых между соответствующими каналами существует четкая последовательность перехода в дискретные состояния, причем переход следующего по порядку канала должен быть выполнен до того, как предыдущий канал выйдет из текущего состояния. Пример: подача газа не должна прекращаться даже после поджига;

- последовательный фиксированный характеризует отношения, при которых определена четкая последовательность перехода каналов, причем переход в другое дискретное состояние следующего по порядку канала не может быть выполнен до тех пор, пока состояние предыдущего канала не изменится. Пример: включение электропневмоклапана подачи аргона должно производиться только после того, как в полости будет напущен воздух;

- параллельный задает соответствующие название класса отношения между переходами каналов управления. Пример: параллельное включение всех тепловизоров;

- антагонистический определяет такие темпоральные отношения, при которых запрещены определенные состояния заданных каналов управления в зависимости от состояния других каналов. Пример: при проведении эксперимента не могут быть одновременно запущены верхний и нижний механизмы ввода модели в поток плазмы;

3) параметры каналов управления, определяющие темпоральные свойства отдельных каналов. К данным параметрам относятся: постоянное, вариативное, среднее и суммарное время нахождения канала в определенном состоянии; время между переходными состояниями канала; постоянная, вариативная и средняя частоты переключения канала. Детальное

исследование специальных параметров каналов управления выходит за рамки данной статьи, и при построении моделей циклограммного процесса управления они не рассматриваются;

4) время перехода канала, определяемое техническими ограничениями устройства управления. При задании параметров каналов управления и отношений на основе классов взаимодействия необходимо учитывать минимальное и максимальное время перевода канала в дискретное состояние. Значение этого времени может быть обусловлено техническими характеристиками таймера контроллера, например, минимальное значение переменной типа Timer (а соответственно, и минимальное время перехода канала), используемой для ожидания между переходами канала в требуемое состояние, в контроллерах Siemens равно 1 мс, а максимальное – 2,7 ч. Следовательно, задаваемое значение каждого временного интервала темпоральных отношений должно входить в этот диапазон.

Таким образом, после проведенного анализа и исследований предметной области и на основе выявленных понятий, объектов и их свойств можно перейти к построению формальной системы моделирования циклограммного процесса управления и выполнения верификации полученных моделей.

Рассмотрим синтаксис разработанной формальной системы, образованный следующим множеством термов, связей и операций: N, Z, R – множества натуральных, целых и вещественных чисел; $Y = \{y, j \in N\}$ – множество каналов управления; $Q = \{0, 1\}$ – множество состояний, в которых могут находиться каналы управления; $\Downarrow = \{\uparrow, \downarrow\}$ – множество идентификаторов, обозначающих направление перехода канала управления $y_j \in Y$ в дискретное состояние $q_1 \in Q$, где \uparrow и \downarrow – элементы множества, идентифицирующие переходы канала во включенное/выключенное состояние соответственно; $C = \{TD, PAR, SO, SF, OP\}$ – множество классов временных отношений, где TD – временно-зависимый класс, PAR – параллельный, SO – последовательный с наложением, SF – последовательный фиксированный и OP – антагонистический; $O = \{On, Off, OnOff, OffOn\}$ – множество комбинаций состояний для двух каналов управления, где On/Off – включенное/выключенное состояние обоих каналов, $OnOff/OffOn$ – включенное/выключенное состояние первого канала и выключенное/включенное состояние второго канала;

$$B = \left\{ \begin{matrix} c_w \\ o_c \end{matrix} \right\}, c_w \in C, o_c \in O -$$

множество подклассов временных отношений, образованное сочетанием отдельных классов временных отношений каналов управления с комбинациями состояний этих каналов; $E = \{e_i, i \in N\}$ – множество внешних событий системы; $K = Y \cup E$ – множество переменных (каналов и внешних событий) системы; $P = \{p_i, i \in N\}$ – множество внутренних событий, элементы которого представлены следующим образом:

$p_i = y_j D_r g$, где $y_j \in Y$, $D_r \in \Downarrow$, а $g \in Z \geq 0$ указывает, каким по счету является переход в состояние $q_1 \in Q$ для канала; $S = P \cup E$ – множество событий в системе (внутренних и внешних); $M = \{m\}$ – множество операторов, состоящее из одного элемента, указывающего, что для пары каналов системы, находящихся в заданных отношениях, должен быть определен временной интервал, границами которого являются переходы данных каналов в указанные состояния в соответствии с указанным порядковым номером, причем отношения могут также влиять и на формирование соседних интервалов (налагать ограничения); $W = \{J, G\}$ – множество операторов, указывающих на то, что свойство, представляющее собой совокупность элемента множества классов временных отношений и элемента множества комбинаций состояний каналов управления, задано для элементов множества каналов системы на определенном промежутке времени. Причем промежуток, на котором действует задаваемое свойство, и его продолжительность определяются элементом данного множества: оператор J характеризует принадлежность свойства определенному интервалу, ограниченному событиями системы, а оператор G означает, что отношение между каналами выполняется для каждого интервала временной оси (осей); $L = M \cup W$ – множество операторов системы; $T = \{t_d, t_d \in R \geq 0, d \in N\}$ – дискретная шкала времени.

Остальные знаки имеют стандартную интерпретацию и взяты из формальной логики (" \exists ", " \wedge ", " \vee ", " \rightarrow ", " \leftrightarrow ") и арифметики натуральных чисел (" $=$ ", " $+$ ", " $-$ ", " $<$ ", " $>$ ", " \leq ", " \geq "). Также используются знаки – разделители элементов формул (" $,$ ", " $;$ ", " $($ ", " $)$ ").

Правило V построения элементов множества высказываний $F = \{f_t, t \in N\}$, допустимых для заданных термов, имеет вид:

$$V: l_c c_w o_c (k_x, k_y; s_i, s_j) = \Delta t,$$

где $l_c \in L$ – элементы множества операторов, определяющих место приложения или образования свойства; комбинация элементов $c_w \in C$ и $o_c \in O$ – множество подклассов временных отношений; $k_x, k_y \in K$ – элементы множества каналов, находящихся в заданном отношении $c_w o_c$ на указанном интервале $[s_i, s_j]$ в случае оператора J , на всех временных осях в случае оператора G , либо образующих интервал $[s_i, s_j]$ согласно заданному отношению в случае оператора m ; $s_i, s_j \in S$ – границы интервала, на котором существует заданное отношение, или образованные заданным отношением; Δt – значение временного интервала.

Высказывания, неоднозначно определяющие интервал Δt , строятся с помощью знаков $<$, \leq , \geq , $>$.

Описываемая формальная система относится к типу теорий естественного вывода и аксиом не содержит, однако включает следующие множества: $I = \{i_q, q \in N\}$ – правила генерации высказываний для формул, определенных операторами $J, G \in L$, и правила сведения элементов множества

$$B = \left\{ \begin{matrix} c_w \\ o_c \end{matrix} \right\},$$

где $w \neq 5$, к элементам $\{c_1o_1, c_1o_2, c_1o_3, c_1o_4\}$; $H = \{h_p, p \in N\}$ – правила запрета, налагающие ограничения на использование элементов $b_{co} \in B$ на близлежащих интервалах.

В формальной системе задано множество правил вывода $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$:

$$r_1: ((\exists m_i c_1 o_m(k_x, k_y; s_i, s_j) = \Delta t_1) \vee (\exists m_i c_1 o_n(k_y, k_z; s_j, s_k) = \Delta t_2)) \rightarrow \exists m_i c_1 o_p(k_x, k_z; s_i, s_k) = \Delta t_1 + \Delta t_2$$

$$r_2: ((\exists m_i c_1 o_m(k_x, k_y; s_i, s_j) = \Delta t_1) \vee (\exists m_i c_1 o_n(k_x, k_z; s_i, s_k) = \Delta t_2)) \rightarrow ((\Delta t_1 > \Delta t_2) \rightarrow \exists m_i c_1 o_p(k_x, k_y; s_k, s_j) = \Delta t_1 - \Delta t_2) \wedge ((\Delta t_1 < \Delta t_2) \rightarrow \exists m_i c_1 o_q(k_y, k_z; s_j, s_k) = \Delta t_2 - \Delta t_1)$$

$$r_3: ((\exists m_i c_1 o_m(k_x, k_y; s_i, s_j) = \Delta t_1) \vee (\exists m_i c_1 o_n(k_x, k_y; s_k, s_j) = \Delta t_2)) \rightarrow ((\Delta t_1 > \Delta t_2) \rightarrow \exists m_i c_1 o_p(k_x, k_z; s_i, s_k) = \Delta t_1 - \Delta t_2) \wedge ((\Delta t_1 < \Delta t_2) \rightarrow \exists m_i c_1 o_q(k_x, k_z; s_k, s_j) = \Delta t_2 - \Delta t_1)$$

$$r_4: ((\exists w_1 c_p o_q(k_i, k_s; s_i, s_j)) \vee (\exists m_i c_1 o_m(k_x, k_y; s_i, s_j) = \Delta t_1) \vee (\exists m_i c_1 o_n(k_x, k_z; s_i, s_k) = \Delta t_2) \vee (\Delta t_1 > \Delta t_2)) \rightarrow \exists w_i c_p o_q(k_i, k_s; s_i, s_k) \vee \exists w_i c_p o_q(k_i, k_s; s_k, s_j)$$

$$r_5: ((\exists w_1 c_p o_q(k_i, k_s; s_i, s_j) \vee (m_i c_1 o_m(k_x, k_y; s_i, s_j) = \Delta t_1) \vee (\exists m_i c_1 o_n(k_x, k_y; s_k, s_j) = \Delta t_2) \vee (\Delta t_1 > \Delta t_2)) \rightarrow \exists w_i c_p o_q(k_i, k_s; s_i, s_k) \vee \exists w_i c_p o_q(k_i, k_s; s_k, s_j),$$

где $m_i \in M$; $w_1 \in W$; $c_1, c_p \in C$; $o_m, o_n, o_l, o_p, o_q \in O$; $s_i, s_j, s_k \in S$; $k_x, k_y, k_z, k_i, k_s \in K$.

Описанная формальная система позволяет моделировать циклограммные процессы управления и обеспечивает выполнение верификации полученных моделей. Авторами также проведен ряд дополнительных исследований, в результате которых ФА был значительно расширен в части описания темпоральных свойств процесса управления. Расширенный ФА ориентирован на более широкий круг задач моделирования процессов управления и в данной работе рассматриваться не будет. Вектор развития ФА как комплексной системы описания циклограммных процессов направлен на идентификацию темпоральных свойств, обусловленных специфическими особенностями процесса проведения испытания.

Используя созданную формальную систему, можно описать ЦМ следующим образом:

$$M = \langle A, V, I, H, R \rangle,$$

где $A: \{Y, Q, C, O, B, E, K, P, S, M, W, L, T\}$ – множество базовых элементов формальной системы темпоральных отношений.

Для верификации модели такого вида могут быть использованы специально разработанные производственная БЗ ЦМ и соответствующий механизм прямого вывода (алгоритм интерпретатора) в интервальной темпоральной логике. Процесс формирования знаний и верификации ЦМ выполняется согласно алгоритму интерпретатора и правилам ФА, заложенным в БЗ. В качестве знаний при этом используются элементы множества высказываний модели. Правилами продукции БЗ являются правила вывода и сведения формальной системы. Работа интерпретатора основана на применении указанных правил и правил за-

прета в процессе формирования и верификации знаний, а ее результатом является заключение о корректности ЦМ. Полученные знания могут быть использованы для проведения мониторинга корректности выполнения ЦМ в РВ.

Рассмотрим процесс формирования ЦМ и ее верификации, начиная от определения событий, каналов и их зависимостей, и заканчивая мониторингом корректности выполнения циклограммы. В качестве моделируемого процесса управления будем использовать СУ ТП испытаний взрывозащищенного оборудования.

При рассмотрении процесса построения модели и проведения ее верификации целесообразно разбить этот процесс на отдельные значимые этапы.

Этап 1. Определение базовых элементов ЦМ – в т.ч. перечня каналов системы, внешних и (при необходимости) внутренних событий и последовательность их наступления. Для этого требуется изучить ТП проведения испытаний.

При испытаниях взрывозащищенного оборудования необходимо управлять подачей смеси газов и зажиганием, которое должно происходить только после прекращения подачи смеси газов. Управление процессом подачи (останова) смеси и зажигания производится с помощью отдельных каналов управления. Условием запуска процесса испытаний является наступление некоторого внешнего события, определяющего готовность системы. Таким образом, можно выделить следующие базовые элементы ЦМ:

$Y = \{Y1, Y2\}$ – каналы управления. В рассматриваемом процессе используются каналы управления подачей и остановом смеси газов и выполнением зажигания.

$E = \{E1\}$ – внешние события системы, упорядоченные в соответствии с очередностью их наступления (если она известна). Для рассматриваемого процесса управления испытаниями взрывозащищенного оборудования определено одно внешнее управляющее событие – готовность к зажиганию, оно является условным нулем (условием запуска) циклограммы по каждому каналу.

$K = \{K1, K2, E1\}$ – множество переменных системы.

$C = \{TD\}$ – классы взаимодействия каналов управления. В рассматриваемом процессе управления будет использоваться только "временно-зависимый" класс временных отношений. Отношения между каналами управления подачей газов и зажиганием могут быть также определены с помощью подклассов: фиксированный на включение или антагонистический на включение.

$O = \{On, Off, OnOff, OffOn\}$ – комбинации состояний каналов управления.

$S = \{E1, P1, P2, P3, P4\}$ – множество событий в системе, включающих: $E1$ – внешнее событие, определяющее старт циклограммы; $P1 = K1 \uparrow 0$, $P2 = K1 \downarrow 0$, $P3 = K2 \uparrow 0$, $P4 = K2 \downarrow 0$ – переходы канала управления подачей газов ($P1$ и $P2$) во включенное и выключен-

ное состояние соответственно, а также переход во включенное состояние канала управления зажиганием и снятие с него напряжения ($P3$ и $P4$).

$L = \{m\}$ – множество операторов системы. В рассматриваемом процессе управления достаточно использовать только оператор m , операторы J и G не используются.

При описании сформированных высказываний будем использовать развернутый способ записи событий в системе, включающий канал, направление перехода и его порядковый номер.

В связи с тем, что начальное состояние, в которое необходимо перевести каналы управления $K1$ и $K2$, известно, могут быть сформированы следующие высказывания: $F1: m TD On\{E1, K1; E1, K1\uparrow 0\}$ и $F2: m TD On\{E1, K2; E1, K2\uparrow 0\}$.

Результатом этапа 1 является формирование базовой ЦМ.

Этап 2. Формирование ЦМ различного уровня путем определения множества ограничений процесса управления. С помощью параметризации базовой ЦМ, описываемой посредством ФА, можно получить ряд ЦМ различного уровня. К таким уровням относятся: ТП испытания, объекта контроля, режима проведения испытания. Также на данном этапе выполняется процесс формирования и верификации знаний ЦМ различного уровня. При выполнении верификации высказывания, сформированные для ЦМ ТП испытания, имеют высший приоритет, приоритеты же высказываний ЦМ режима проведения испытания и ЦМ объекта контроля эквивалентны.

ЦМ каждого уровня задается с помощью определения допустимых отношений каналов управления с использованием определенных на этапе 1 операторов и классов временных отношений. Для определения ограничений в рассматриваемом процессе управления необходимо задать лишь значения интервалов между соответствующими событиями системы, поскольку используется только оператор m и "временно-зависимый" класс временных отношений TD , при этом величины интервалов могут быть как нечеткими (определяемыми с помощью неравенств), так и четко определенными.

Для получения ЦМ ТП испытания необходимо задать параметры, которые относятся непосредственно к специфике ТП испытаний взрывозащищенного оборудования. В их состав входят минимальный и максимальный интервалы между выдачей сигналов "подача смеси" и "останов подачи смеси", составляющие 500 и 10000 мс соответственно; минимальный интервал между выдачей сигналов "останов подачи смеси" и "зажигание" составляет 100 мс. Высказывания ЦМ ТП могут быть записаны следующим образом: $F3: m 500 \leq TD OnOff\{K1, K1; K1\uparrow 0, K1\downarrow 0\} \leq 10000$; $F4: m TD OffOn\{K1, K2; K1\downarrow 0, K2\uparrow 0\} \geq 100$ мс.

На уровне ЦМ объекта контроля задаются параметры, характерные непосредственно для испытываемого объекта. При проведении испытаний конкретного взры-

вззащищенного оборудования таким параметром является интервал между подачей смеси газов и остановом подачи смеси, находящийся в диапазоне [700; 5000]мс. Высказывания ЦМ могут быть сформулированы и записаны так: $F5: m 700 \leq TD On\{K1, K2; K1\uparrow 0, K1\downarrow 0\} \leq 5000$.

На уровне "ЦМ режима проведения испытаний" задаются параметры, соответствующие конкретному режиму или способу проведения данных испытаний. Испытания взрывозащищенного оборудования могут проходить в разных режимах. Например, испытания конкретного взрывозащищенного оборудования могут происходить в следующих режимах согласно виду испытания: "определение давления взрыва", "испытания на взрывоустойчивость", "испытания на взрывонепроницаемость", "гидравлические испытания" и "температурные измерения". В рамках рассматриваемого примера будем использовать ограничения, накладываемые видом испытания "на взрывоустойчивость": минимальный и максимальный интервалы между выдачей сигналов "подача газов" и "останов подачи газов" составляют 1000 и 4000 мс соответственно. Высказывания ЦМ этого уровня имеют вид: $F6: m 1000 \leq TD OnOff\{K1, K1; K1\uparrow 0, K1\downarrow 0\} \leq 4000$.

Это этап приобретения знаний, которые представляют собой высказывания "эталонной модели" (ЦМ различного уровня). Необходимой операцией данного этапа является проведение верификации ЦМ на корректность, которая производится следующим образом:

- высказывания проверяются на непротиворечивость согласно множеству правил запрета H (данное действие не является обязательным и для рассматриваемого процесса не выполняется);

- к налагаемым ограничениям применяется множество правил сведения I , заполняется рабочая память БЗ;

- производится процесс выявления новых знаний об ограничениях процесса управления путем применения к высказываниям "эталонной" модели множества правил вывода R . На основе правил $r_1, r_2, r_3 \in R$ и загруженных формул $F4$ и $F6$ ограничений может быть выведено следующее высказывание: $F7: m TD On\{K1, K2; K1\uparrow 0, K2\uparrow 0\} \geq 1100$.

- проводится верификация всех высказываний в рабочей памяти на непротиворечивость (данная операция может проводиться и ранее, однако достаточно выполнить ее только после применения правил продукции).

При успешном выполнении операции верификации высказывания "эталонной" модели могут быть использованы на последующих этапах.

Этап 3. Формирование ЦМ конкретного алгоритма процесса управления испытаниями. На данном этапе выполняется параметризация базовой ЦМ. Задаются конкретные значения интервалов между наступлениями событий управления (выдачей сигналов управления) в соответствии с заданием на испытания. Данные значения определяются выбранным алгоритмом проведения испытаний. В рамках рассматриваемого

примера такими значениями являются: начало подачи смеси газов после срабатывания условия запуска (условного нуля) через 200 мс; длительность подачи смеси 2000 мс; выполнение зажигания после срабатывания условия запуска через 2500 мс; интервал между выдачей сигналов "зажигание" и "снять напряжение с канала зажигания" составляет 100 мс. Данные параметры и их значения могут быть представлены также в табличном виде (таблица).

Для ЦМ конкретного алгоритма могут быть сформулированы следующие высказывания: $F8: m TD On\{E1, K1; E1, K1\uparrow\} = 200$; $F9: m TD OnOff\{K1, K1; K1\uparrow, K1\downarrow\} = 2000$; $F10: m TD On\{E1, K2; E1, K2\uparrow\} = 2500$ и $F11: m TD OnOff\{K2, K2; K2\uparrow, K2\downarrow\} = 100$.

Этап 4. Верификация ЦМ конкретного алгоритма процесса управления испытаниями. На данном этапе проводится верификация высказываний "оцениваемой" модели (проведения конкретного испытания) относительно высказываний "эталонной" модели и выполняется процесс формирования новых знаний, используемых для построения последовательности наступления внешних событий системы.

Выполнение верификации проводится следующим образом:

- формируются новые высказывания "оцениваемой" модели. На основе правил $r1, r2, r3 \in R$ и загруженных формул могут быть выведены высказывания: $F12: m TD OnOff\{E1, K1; E1, K1\downarrow\} = 200 + 2000 = 2200$; $F13: m TD OnOff\{E1, K2; E1, K2\downarrow\} = 2500 + 100 = 2600$; $F14: m TD Off\{K1, K2; K1\downarrow, K2\downarrow\} = 2600 - 2200 = 400$ и $F15: m TD OffOn\{K1, K2; K1\downarrow, K2\uparrow\} = 2500 - 2200 = 300$;

- устанавливается соответствие высказываний "оцениваемой" модели высказываниям "эталонной" модели, причем проверка осуществляется для высказываний, определенных оператором m ;

- производится применение правил вывода ко всем высказываниям в рабочей памяти БЗ;

- проводится верификация на непротиворечивость высказываний, находящихся в рабочей памяти;

- выполняется определение последовательности наступления внешних событий (в рассматриваемом примере внешнее событие системы одно — $E1$) на основе всех выявленных и занесенных в рабочую память БЗ, и проводится верификация данной последовательности с зарезервированной на этапе формирования базовых элементов ТП;

- производится построение временных осей (в данном случае формируется единственная ось, представленная на рис. 1);

- выполняется верификация высказываний, определенных операторами J, G согласно построенной временной оси.

Этап 5. Применение полученной ЦМ при выдаче реальных дискретных управляющих сигналов. Когда верификация ЦМ была произведена, сформированный алгоритм загружается в контроллер на исполнение. В процессе выполнения циклограммы в РВ производится контроль наступления событий системы со-

Таблица. Табличное представление параметров конкретного алгоритма

Канал управления	Условный нуль	Ожидание, мс	Начальное состояние	$t1$
подача смеси	готовность	200	1	2000
зажигание	готовность	2500	1	100

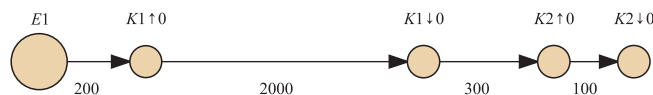


Рис. 1. Временная ось модели СУ ТП испытаний взрывозащищенного оборудования

гласно построенной временной последовательности, и в случае ее нарушения установка переводится в безопасный режим.

Для создания ЦМ с целью их дальнейшего использования при формировании последовательности управляющих воздействий во время проведения испытаний был спроектирован и реализован соответствующий инструментарий. Разработанный инструментарий представляет собой набор специализированных программных средств и структур данных, который может быть интегрирован в состав программной части АСУТП испытаний.

Основной задачей, решаемой при разработке инструментария, является создание такой программной системы, которая предоставляла бы следующие функции:

- создание базовой модели ТП и ее ступенчатая параметризация для формирования ЦМ различных уровней;

- формирование модели проведения конкретного испытания на основе базовой;

- выполнение верификации ЦМ различных уровней на корректность между собой;

- выполнение верификации модели проведения конкретного испытания относительно ЦМ различных уровней;

и при этом не требовала бы участия программиста для выполнения обозначенных функций.

Для решения такой задачи в качестве теоретической и математической основы был взят разработанный ФА для описания ЦМ. На базе ФА были определены основные функциональные возможности инструментария, выполнено проектирование, сформирована программная архитектура и разработана технология его построения. В соответствии с применяемыми в настоящее время на предприятиях типовыми системами разработки приложений верхнего уровня и устройствами непосредственного управления были выделены следующие требования для реализации инструментария:

- использование ОС MS Windows как базовой среды исполнения для программных средств АСУТП, в которые может быть интегрирован инструментарий;



Рис. 2. Редактор циклограммных моделей конкретных испытаний

- использование Active-X технологии для разработки отдельных компонент как стандарта, поддерживаемого большинством SCADA-систем;
- применение контроллеров Siemens для построения программы, реализующей непосредственную выдачу дискретных управляющих сигналов на объект испытания;

- использование SCADA-системы Wonderware InTouch в качестве примера программной среды верхнего уровня АСУТП, в рамках которой происходит применение разрабатываемого инструментария.

На основании сформированной архитектуры, описанных требований и разработанной технологии в состав инструментария вошли следующие компоненты и программные модули:

- редактор ЦМ ТП конкретной установки;
- редактор ЦМ конкретных испытаний (пользовательский интерфейс редактора представлен на рис. 2);
- БД ЦМ;
- продукционная БЗ, позволяющая проводить верификацию ЦМ;
- функциональный блок на нижнем уровне, представляющий собой обобщенную не параметризованную циклограмму проведения испытания;
- модуль адаптации формируемых ЦМ к обобщенной циклограмме.

Технология построения инструментария является надежной и эффективной за счет разделения функций формирования циклограмм на верхнем уровне и их непосредственной отработки на нижнем уровне.

Разработанный инструментарий обладает следующими базовыми функциональными возможностями:

- создание и редактирование циклограмм проведения испытания;
- сохранение и загрузка циклограмм из БД ЦМ;
- построение графического представления циклограмм;
- формирование отчета о структуре отдельной циклограммы;
- загрузка циклограмм в контроллер и выдача дискретных управляющих сигналов согласно заданному алгоритму.

К дополнительному функционалу инструментария можно отнести:

- разграничение прав доступа пользователей к базовому функционалу в соответствии с используемой системой авторизации и аутентификации;
- синхронизация с подсистемой просмотра данных о проведенных испытаниях;
- перевод каналов управления в безопасное состояние при наличии аварийных ситуаций в системе.

В процессе эксплуатации оператору предоставляется возможность изменения используемых в циклограмме каналов управления и условных нулей запуска последовательности выдачи дискретных сигналов управления по указанным каналам в соответствии с требованиями объектов контроля и режимов испытаний. На основе проведенных перекоммутаций стенда создается новый набор базовых элементов модели ТП и производится ее формирование согласно новым условиям.

Разработанный инструментарий успешно применялся ООО "Лабораторией автоматизированных систем (АС)" при выполнении ряда работ для разных организаций, примеры которых использованы в данной статье. В том числе были выполнены работы по построению АСУТП поршневых газодинамических установок для ФГУП "ЦНИИМАШ". Высокие требования по надежности и безопасности таких установок в сочетании со сложностью и разветвленностью реализуемого алгоритма процесса управления было бы практически невозможно выполнить без применения описанных выше методов и средств.

Авторы выражают благодарность Михаилу Изидоровичу Перцовскому, канд. физ.-мат. наук, директору ООО "Лаборатория автоматизированных систем (АС)", за помощь в подготовке статьи и Валерию Святославовичу Выхованцу, д-ру техн. наук за помощь в выборе направления исследований и научные консультации.

Вергер Елена Евгеньевна — инженер сектора программного обеспечения АСУТП,

Перванюк Алексей Степанович — начальник сектора программного обеспечения систем автоматизации испытаний и мониторинга, ООО "Лаборатория автоматизированных систем (АС)".

Контактный телефон (495) 730-36-32. E-mail averger@actech.ru

Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:

- в России — в любом почтовом отделении по каталогу "Газеты. Журналы" агентства "Роспечать" (подписной индекс **81874**) или по каталогу "Пресса России" (подписной индекс **39206**).
- в странах СНГ и дальнего зарубежья — через редакцию (www.avtprom.ru).

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, начиная с любого номера, прислав заявку в редакцию или заполнив анкету на сайте www.avtprom.ru. В редакции также имеются экземпляры журналов за прошлые годы.