

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КИРПИЧНОДЕЛАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА СМК-350 С ПОМОЩЬЮ МОДЕРНИЗАЦИИ АСУТП

А.А. Сурниченко (Владимирский государственный университет)

Предлагается подход к повышению надежности кирпичноделательного комплекса непрерывного цикла с помощью модернизации АСУТП. Предлагаемая система построена на базе платформы SIMATIC PCS7, автоматизирующей сбор и анализ данных по параметрам производительности и качества, и включает ряд новых математических моделей для прогнозирования динамики изменения надежности, оптимального обслуживания, количества запасных элементов и оценки эффективности затрат на восстановление и ремонт.

Ключевые слова: АСУТП, надежность, кирпичноделательный комплекс, интенсивность отказов, модель надежности, оптимальное обслуживание, эффективность затрат, долговременные наблюдения.

Основной задачей системы эксплуатации кирпичноделательных комплексов (КДК) является поддержание их технического состояния и надежности на уровне, достаточном для выполнения ими заданных функций. Современные КДК работают на базе автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП) и являются технологическими системами с непрерывным циклом (ТС с НЦ). Для повышения надежности подобных комплексов необходимо провести исследования систем эксплуатации с организацией долговременных наблюдений за работой технологического оборудования и АСУТП. При использовании аналоговых контрольно-измерительных приборов, устройств релейной автоматики и контроллеров первых поколений для этого создавались бригады хронометражистов [1]. С появлением современной микропроцессорной техники стала возможной автоматизация сбора данных об отказах и восстановлении используемого технологического оборудования и отдельных агрегатов. Полученные данные можно использовать для построения ряда математических моделей, необходимых для исследования системы эксплуатации с целью получения максимальной эффективности использования ТС с НЦ:

- 1) модель динамики изменения надежности системы в процессе эксплуатации;
- 2) модель оптимального обслуживания;
- 3) модель оценки количества запасных элементов;
- 4) модель оценки эффективности затрат на восстановление и ремонт [2].

Основополагающими параметрами, необходимыми для построения математических моделей, являются интенсивности отказов  $\lambda_i$  и восстановлений  $\mu_i$ . Данные параметры вычислялись автором по статистическим данным, полученным в результате проведения долговременных наблюдений.

Достоверность данных и адекватность вышеперечисленных математических моделей проверялась на основе наблюдений, организованных на КДК СМК-350 (ОАО "МЗКСМ", ст. Мстера Владимирской области) в течение 10 лет (в 2000-2009 гг.) и продолжающихся до

сих пор. КДК СМК-350 был разработан и выполнен по инжиниринговому проекту фирмы UNIMORANDO (Италия) с использованием контроллеров S5-210B (SIEMENS, Германия). Однако в процессе эксплуатации возникла необходимость в реконструкции системы управления с целью замены устаревших узлов и агрегатов технологического оборудования и АСУТП, а также дополнении системы устройствами сбора, обработки, хранения и передачи информации о надежности ТС с НЦ по параметрам производительности и качества. Непрерывный технологический процесс (ТП) производства кирпича на КДК СМК-350 состоит из операций формовки, сушки, садки и обжига, которым соответствуют технологические участки и отделения. На рис.1 представлена технологическая схема КДК СМК-350, в которой обозначены связи отдельных технологических участков и отделений.

Анализ ТП и технологической схемы на рис. 1 позволяет однозначно определить ТС КДК СМК-350 как двухучастковую систему с промежуточным накопителем [1]. В качестве накопителя выступает сушильное отделение вместе со своим спецтранспортом.

Для описания модели надежности ТС с НЦ (модель 1) использовался математический аппарат Марковских случайных процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем, т.к. все возможные состояния системы  $S_1...S_n$  можно заранее перечислить

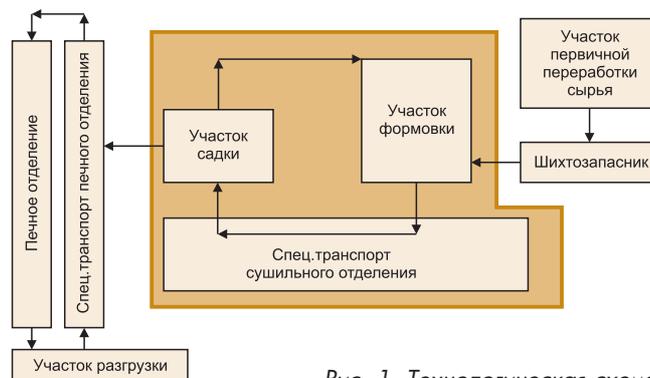


Рис. 1. Технологическая схема кирпичноделательного комплекса СМК-350

Таблица 1. Возможные состояния системы из трех элементов

Состояние	Элемент ТС с НЦ			Примечания
	1	2	3	
$S_0$	$p$	$p$	$p$	работоспособны все три элемента
$S_1$	$n$	$p$	$p$	неработоспособен 1-ый элемент
$S_2$	$p$	$n$	$p$	неработоспособен 2-ой элемент
$S_3$	$p$	$p$	$n$	неработоспособен 3-ий элемент
$S_4$	$n$	$n$	$p$	неработоспособны 1- и 2-ой элементы
$S_5$	$p$	$n$	$n$	неработоспособны 2- и 3-ий элементы
$S_6$	$n$	$p$	$n$	неработоспособны 1-ый и 3-ий элементы
$S_7$	$n$	$n$	$n$	все три элемента неработоспособны

Здесь:  $n$  – неработоспособен,  $p$  – работоспособен

(табл. 1). В модели задавались потоки отказов и восстановлений, для которых находились вероятности нахождения системы в работоспособном состоянии. Математическая модель надежности ТС с НЦ имеет восемь возможных состояний  $S_i$  и представляет собой систему дифференциальных уравнений Колмогорова [3]:

$$\begin{cases} dp_0/dt = p_1\mu_1 + p_2\mu_2 + p_3\mu_3 - p_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) \\ dp_1/dt = p_4\mu_2 + p_6\mu_3 + p_0\lambda_1 - p_1(\lambda_2 + \lambda_3 + \mu_1) \\ dp_2/dt = p_4\mu_1 + p_5\mu_3 + p_0\lambda_2 - p_2(\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2) \\ dp_3/dt = p_6\mu_1 + p_5\mu_2 + p_0\lambda_3 - p_3(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_3) \\ dp_4/dt = p_7\mu_3 + p_1\lambda_1 + p_2\lambda_1 - p_4(\lambda_3 + \mu_1 + \mu_2) \\ dp_5/dt = p_7\mu_1 + p_3\lambda_2 + p_2\lambda_3 - p_5(\lambda_1 + \mu_3 + \mu_2) \\ dp_6/dt = p_7\mu_2 + p_3\lambda_1 + p_1\lambda_3 - p_6(\mu_3 + \mu_1 + \lambda_2) \\ dp_7/dt = p_4\lambda_3 + p_5\lambda_1 + p_6\lambda_2 - p_7(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3) \end{cases} \quad (1)$$

где  $t$  – время, а  $p_0...p_7$  вероятности нахождения системы в одном из состояний,  $\lambda_i$  и  $\mu_i$  интенсивности отказов и восстановлений каждого из трех участков (формовки, сушки и садки).

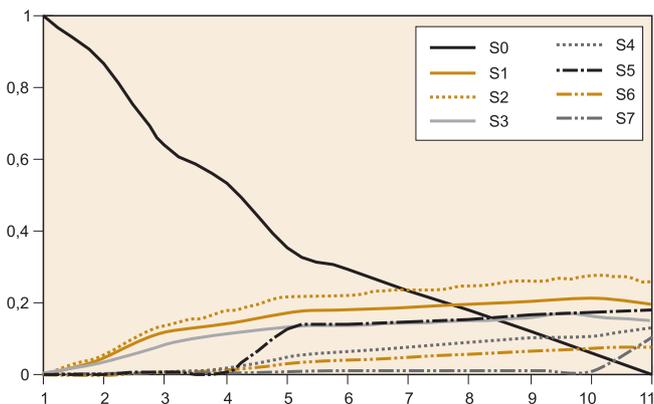


Рис. 2. График зависимости вероятности безотказной работы от времени (часы) при интенсивности восстановлений  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$

Таблица 2. Результаты вычислений по уравнениям (1)

при  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$ , строки соответствуют времени в часах

Состояния	Состояния							
	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,864	0,05	0,056	0,03	0	0	0	0	0
0,643	0,117	0,135	0,082	0,009	0,007	0,006	0	0
0,532	0,15	0,174	0,108	0,014	0,01	0,009	0	0
0,354	0,174	0,211	0,127	0,05	0,128	0,033	0,004	0
0,295	0,182	0,223	0,133	0,062	0,138	0,041	0,005	0
0,236	0,189	0,235	0,139	0,074	0,147	0,049	0,006	0
0,177	0,197	0,247	0,145	0,086	0,156	0,057	0,007	0
0,117	0,205	0,259	0,151	0,098	0,166	0,065	0,008	0
0,058	0,213	0,271	0,157	0,11	0,175	0,073	0,01	0
0	0,198	0,258	0,146	0,125	0,181	0,08	0,102	0

Для исследования математической модели, основанной на системе дифференциальных уравнений (1) с постоянными коэффициентами, использовался метод изменения численных значений коэффициентов дифференциальных уравнений с последующим решением всей системы и графическим представлением результатов вычислений. Сначала рассматривались крайние варианты – приравнивание всех интенсивностей восстановлений  $\mu_1; \mu_2; \mu_3$  к нулю (соответствует полному отсутствию ремонта на всех участках – табл. 2, рис. 2) и приравнивание всех интенсивностей отказов  $\mu_1; \mu_2; \mu_3$  к нулю (в этом случае вероятность безотказной работы равна 1).

Кривая поведения системы  $S_0$ , при интенсивностях восстановлений  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0$  повторяет по форме кривую экспоненциального закона и является графиком вероятности безотказной работы КДК СМК-350. Изменяя значения интенсивностей отказов и восстановлений, анализировалось поведение данной ТС с НЦ при различных условиях, и определялись элементы, отказы которых в наибольшей степени влияют на надежность КДК. Согласно результатам расчета (рис. 3), наибольшее влияние на надежность оказывает второй элемент (участок садки).

Введение в АСУТП математической модели надежности (модели 1) и обработанных статистических

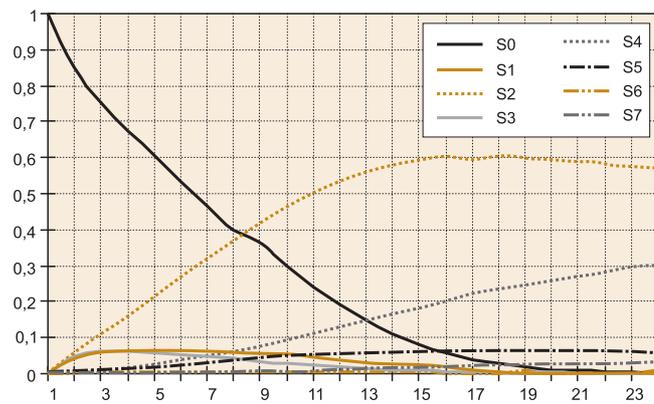


Рис. 3. График зависимости вероятности безотказной работы от времени (часы) (поток восстановлений на втором участке  $\mu_2 = 0$ )

данных об отказах, позволяет оценивать надежность ТС в любой момент времени и прогнозировать поведение отдельных узлов и агрегатов. Так при отсутствии восстановлений второго элемента КДК СМК-350 вероятность нахождения системы в нулевом состоянии  $S_0$  (исправны все три элемента) достигает критического значения  $p = 0,4$  уже через 7 часов работы системы, а еще через 10 часов работы система становится полностью неработоспособной ( $p \rightarrow 0$ ).

Создание модели оптимального обслуживания (модель 2) необходима для определения продолжительности работы системы  $T_n$  до очередного технического обслуживания (ТО). Требования к надежности ТС задаются в виде вероятности  $p_{mp}$  нахождения ее в технически исправном состоянии к началу очередного ТО. По статистическим данным эксплуатации оценивается вид функции  $\lambda(t)$ . Вероятность нахождения системы в технически исправном состоянии за время  $t_1 + T_n$  может быть представлена в виде

$$p(t_1 + T_n) = e^{-\int_0^{t_1 + T_n} \lambda(t) dt},$$

где  $t_1$  – время эксплуатации системы до рассматриваемого момента времени.

В результате преобразований получаем уравнение, из которого может быть определен требуемый период  $T_n$

$$\int_{t_1}^{t_1 + T_n} \lambda(t) dt = -\ln p_{mp}.$$

В случае  $\lambda(t) = a + bt$ , когда поведение системы описывается Марковским неоднородным процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем, получаем уравнение в виде:

$$aT_n + bt_1T_n + \frac{bT_n^2}{2} + \ln(p_{mp}) = 0. \quad (2)$$

По статистическим данным определяются и уточняются параметры  $a$  и  $b$ , по формуле (2) определяется очередной период  $T_n$ . После очередного технического обслуживания расчеты повторяются. Результатом анализа модели 2 может служить график (рис. 4).

Использование в АСУТП модели 2 позволяет корректировать параметры ТО в режиме реального времени, получать усредненные продолжительности работы, которые будут использоваться для составления графиков планово-предупредительного ремонта на продолжительный срок.

Модель оценки количества запасных элементов (модель 3) построена на основе задачи целочисленного нелинейного программирования. Для ТС, состоящей из элементов  $k$ -типов, назначается  $n_1$  резервных элементов 1-го типа,  $n_2$  – 2-го типа,  $n_3$  – 3-го типа,  $n_k$  –  $k$ -типа. В модели выбираются числа  $n_k$  при заданном числе рабочих элементов каждого типа так, чтобы вероятности безотказной работы были максимальны.

Модель оценки эффективности затрат на восстановление и ремонт (модель 4) может быть выражена уравнением:

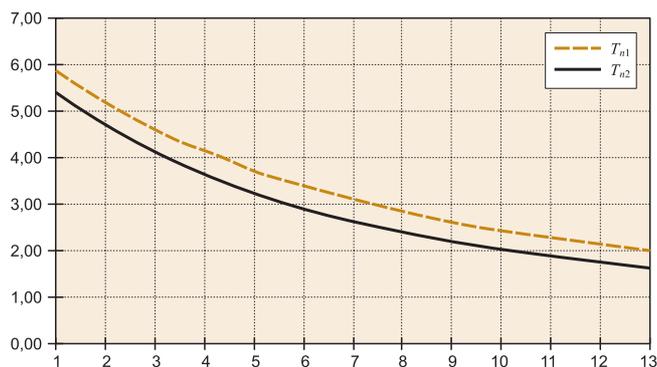


Рис. 4. График зависимости времени  $T_n$  до очередного ТО от времени работы участков (часы). На графике обозначено:  $T_{n1}$  – время до очередного ТО первого элемента системы,  $T_{n2}$  – время до очередного ТО второго элемента системы

$$\frac{W_0}{\alpha} + \frac{(1 + p_o W_0) \ln(1 - p_o W_0)}{1 - p_o} = 0, \quad (3)$$

где  $W_0$  – вероятность выполнения задания ТС с НЦ,  $p_o$  – обобщенный показатель надежности,  $\alpha$  – параметр, определяемый по статистическим данным [4].

Расчет вероятности  $W_0$  выполнения задания для случая, когда номинальная производительность ТС определяется номинальной производительностью второго участка, производим по формуле:

$$W_0(t_0, S_{01}) = e^{-(\lambda_2 + \lambda_n) t_0} \left( 1 - q e^{-\frac{(t-q)S_{01}}{T_{n1} Q_{n2}}} \right),$$

$$\text{где } q = \frac{\lambda_1 T_{b1} Q_{n2}}{Q_{n1} - Q_{n2}}, \quad Q_{n1} > Q_{n2}.$$

В качестве исходной информации для исследования модели используются следующие параметры и статистические данные:  $\lambda_i$  – интенсивности отказов участков ТС,  $Q_n$  – номинальные производительности участков ТС,  $\lambda_{ni}$  – интенсивности отказов межоперационных накопителей,  $S_{oi}$  – уровни начального заполнения накопителей,  $T_{bi}$  – средние времена восстановления накопителей,  $S_i$  – емкость  $i$ -го накопителя,  $T_{ni}$  – средние времена восстановления накопителей.

Стоимость эксплуатации ТС с НЦ  $C_1$  и ее обобщенный показатель надежности  $p_o$  связаны между собой математической зависимостью:

$$C_1 = C_0(1 - p_o)^{-\alpha}. \quad (4)$$

$$\text{Из (3) и (4) получим: } \alpha = \frac{\ln \bar{C}}{\ln(1 - p_o)}, \quad (5)$$

где  $\bar{C}$  относительная стоимость эксплуатации одной системы при надежности  $p_o$ :

$$\bar{C} = \frac{C_1}{C_0}.$$

Финальные вероятности состояний ТС с НЦ получаются путем решения системы алгебраических уравнений, которые получаются из (1). Если система

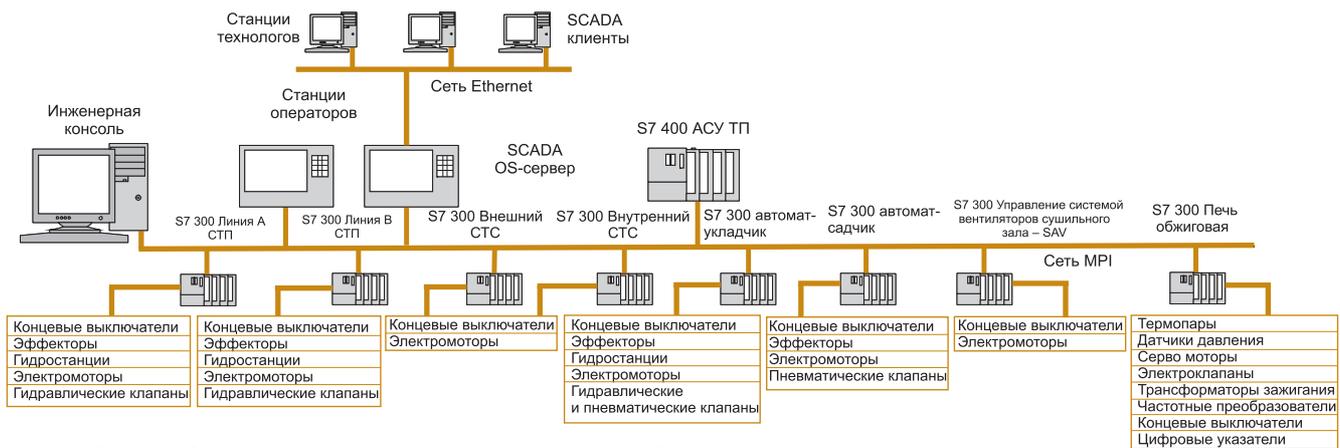


Рис. 5. Схема АСУТП на кирпичноделательном комплексе СМК-350

такова, что отказ на любом этапе приводит к одним и тем же последствиям (не выполнению задачи) и при этом "стоимость" отказа (потери, вызванные появлением отказов) на всех этапах одинакова, то определение оптимальных значений основных показателей надежности производим по формуле:

$$K_z = p(\tau_n) = p(\tau_{np}) = \sqrt[3]{p_0},$$

где  $p_0$  – значение обобщенного показателя надежности системы.  $K_z$  – коэффициент готовности системы,  $p(\tau_n)$  – вероятность исправности во время подготовки системы,  $p(\tau_{np})$  – вероятность исправности во время применения [4].

Если стоимость отказов на разных этапах разная, то для строгого решения задачи целесообразно показатели экономичности системы определять непосредственно через основные показатели ее надежности с последующим поиском оптимальных решений по каждому показателю надежности.

Таким образом, имея статистические данные о значениях  $W_0$  и  $p_0$ , можно вычислить значение  $\alpha$  по формуле (5) и относительную стоимость эксплуатации одной системы при заданной надежности  $p_0$ . Полученные показатели будут являться базовыми. Их можно использовать при расчете модернизируемой системы как систему-аналог. Величина  $\alpha$  зависит от способа повышения надежности системы. Наименее экономичным способом является способ дублирования всех элементов, отказ которых приводит к отказу системы ( $\bar{C} \approx 2$ ). Расчеты, проводившиеся для КДК СМК-350, показывают, что при повышении производительности на 20%, затраты на содержание вырастают на примерно 9%, а повышение производительности на 40% влечет за собой увеличение затрат уже на 38%. Поэтому с введением в систему моделей 3 и 4 становится возможным стоимостное обоснование принятия управленческого решения.

Для повышения надежности работы КДК СМК-350 предлагается схема построения АСУТП, представленная на рис. 5. Она основана на сочетании горизонтально интегрированных модульных элементов (контроллеров, блоков ввода/вывода, инженерной и операторских станций, объединяемых на общей внутренней шине MPI) и вертикально-интегрированных

элементов (приборы полевого уровня до информационной сети предприятия) с одновременным подключением моделей 1-4. Ядро системы состоит из следующих основных групп элементов:

1) контроллеры обжиговой печи, сушильного отделения, технологического оборудования (обеспечивают первичный сбор и предварительную обработку информации по работе управляемого оборудования, выдачу технологической информации и информацию об исправной работе управляемого оборудования на операторскую панель и для архивирования на сервер баз данных, а также поддержку в заданных параметрах ТП сушки и обжига);

2) панели оператора обжиговой печи и сушильного отделения для визуализации ТП и выдачи управляющих воздействий на исполнительные органы (с поддержкой многоуровневой системой парольной защиты и авторизации); инженерной станции контроля, конфигурирования и управления, включающей также инструментальные средства проектирования и отладки; системы архивирования производственных данных (сервер БД), интегрирующейся как самостоятельное устройство в локальную сеть предприятия и работающей под управлением SCADA/Server;

3) ПО контроллеров технологического оборудования, операторских станций, инженерной станции, сервера БД, этапа проектирования и настройки;

4) математические модели 1...4.

Ожидаемым результатом внедрения данной системы станет полный централизованный контроль и управление ТП производства кирпича, работы технологического оборудования с протоколированием и прогнозированием хода процесса. Использование в программном обеспечении системы описанного математического аппарата позволит предсказать поведение ТП и применить наиболее рациональные методы воздействия.

#### Выводы

Таким образом, АСУТП КДК СМК-350, построенная на базе микропроцессорной техники, помимо возможностей сбора, обработки, хранения и передачи данных об отказах и восстановлении системы, за счет использования разработанных математических моде-

лей, приобретает новую функцию контроля и диспетчеризации непрерывного технологического и производственного процесса. Это позволяет создавать эффективную систему эксплуатации с возможностью управления поведением системы в любой момент времени и повысить надежность работы КДК СМК-350 в целом. Используя автоматизированную систему, можно воздействовать на надежность работы комплекса различными методами: изменением ресурса отдельных элементов, наиболее влияющих на технологический процесс; прогнозированием выхода из строя элементов и своевременным проведением ТО; заменой элементов, приближающихся к критическому ресурсу; возможностью оценить методы повышения вероятности безотказной работы ТС с НЦ с экономической точки зрения; выбором наиболее оптимального по стоимостным показателям варианта решения.

На данный момент на предприятии внедрено и отлажено оборудование 1-ой группы, из группы 2 – панель оператора сушильного отделения, что позволило повысить качество выпускаемой продукции и анализа результатов по отказам технологического оборудования. Внедрение в полном объеме планируется в 2012 г.

#### Список литературы

1. Шандров Б.В. Технические средства автоматизации: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Издательский центр "Академия". 2007.
2. Надежность и эффективность в технике: Т.1. Методология. Организация. Терминология / Под ред. Рембе-зы А.И. М.: Машиностроение. 1989.
3. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Вш. 2000.
4. Капитанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем. М.: Физматлит. 2010.

*Сурниченко Александр Анатольевич – инженер каф. ТМС ВлГУ.*

*Контактный телефон (4922) 47-98-11.*

*E-mail: tms@vlsu.ru, surni1967@mail.ru*

## Модель преобразователя сигналов для проектирования гибридных систем управления в среде VISSIM

**В.К. Грызов, В.Г. Корольков (МГУТУ, Вяземский филиал)**

*В среде моделирования VisSim предлагается новый метод преобразования дискретных импульсных сигналов в непрерывные, отличный от известных традиционных. Дано поэтапное описание метода. Изложен принцип действия, алгоритм работы и представлена схема преобразователя. Показана возможность применения преобразователя в системах управления.*

*Ключевые слова: системы автоматического управления, цифровой регулятор, интерполятор, дельта- функция, период квантования, дискретный импульсный сигнал.*

При моделировании и проектировании систем управления разработчики используют различные прикладные пакеты программ, в частности, среду моделирования VisSim от компании Visual Solutions INCORPORATED. Эта программа широко используется в научных и образовательных целях в России.

В среде VisSim модели непрерывных систем строятся на интеграторах. Дискретные модели строятся с использованием дискретного Z-преобразования либо на регистрах задержки.

Возможности VisSim позволяют создавать гибридные модели, в которых непрерывная часть системы представлена в аналоговой непрерывной (естественной) форме, а система управления – в дискретной. Связующим звеном между непрерывной и дискретной частями системы служит преобразователь сигналов (ЦАП).

В среде VisSim известны два способа преобразования сигналов.

1. Первый способ основан на преобразовании дискретного сигнала в непрерывный с помощью традиционной схемы интерполятора нулевого порядка с передаточной функцией

$$W(s) = \frac{1 - e^{-sT_0}}{s}.$$

Схема собирается на интеграторах с блоком временной задержки, где время задержки соответствует частоте задающего генератора.

Дискретный сигнал единичных импульсов стандартного генератора не является дельта-импульсным, поэтому приходится нормировать импульсы на дельта-функцию. Нормировка производится введением дополнительных множителей, формирующих импульсы единичной площади. Значения этих множителей зависят от задаваемого шага симуляции.

В процессе моделирования неоднократно придется изменять шаг симуляции, что требует соответствующего проведения перенормировки значений нормирующих множителей преобразователя.

2. Второй способ базируется на использовании в качестве интерполятора регистра задержки. При этом нормировка дискретного входного сигнала на дельта-функцию не производится. Этот блок в процессе моделирования необходимо настраивать и производить внешнюю синхронизацию, что создает неудобства.

Для преодоления указанных неудобств в данной работе предлагается метод, основанный на использовании свойств схемы, преобразующей входные дискретные импульсные сигналы в непрерывные. Схема состоит из двух сумматоров с блоками временной за-