

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АПС-ЭГ СРЕДСТВАМИ ПАКЕТА MATLAB SIMULINK+STATEFLOW

\* Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев, Украина

---

**Анотація.** Стаття присвячена проблемі імітаційного моделювання гарантоздатної системи для забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. Приведено результати моделювання засобами пакета Matlab Simulink+Stateflow алгоритму функціонування електронної гарантоздатної системи автоматичної переїзної сигналізації нової генерації з можливістю сигналізації про зайнятість переїзду на шляховий залізничний світлофор і в кабіну машиніста.

**Ключові слова:** резервування, відмовостійкість, гарантоздатна система, імітаційне моделювання.

**Аннотация.** Статья посвящена проблеме имитационного моделирования гарантоспособной системы для обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах. Приводятся результаты моделирования средствами пакета Matlab Simulink+Stateflow алгоритма функционирования электронной гарантоспособной системы автоматической переездной сигнализации нового поколения с возможностью сигнализации о занятости переезда на путевой железнодорожный светофор и в кабину машиниста.

**Ключевые слова:** резервирование, отказоустойчивость, гарантоспособная система, имитационное моделирование.

**Abstract.** The article is devoted to the problem of simulation dependability system to ensure safety at level crossings. The results of simulating by tools of Matlab Simulink+Stateflow package of operation algorithm of an electronic system of dependable automatic crossing signals the possibility of a new generation signaling employment railroad track crossing at a traffic light and the driver's cab are given.

**Keywords:** redundancy, fault tolerance, dependable system, simulation modeling.

### 1. Введение

С целью повышения уровня безопасности и надежности разрабатываемой автоматической переездной сигнализации АПС-ЭГ [1] было проведено моделирование ее функционирования с использованием технологии имитационного моделирования [2]. Целью моделирования системы являлось исключение из ее алгоритма работы конфликтных состояний, которые могут возникать вследствие отказов элементов системы или подачи ложной информации вследствие их неисправности. Также осуществлена отладка внедренных методов обеспечения гарантоспособности, среди которых:

- определение «подозрительных» элементов системы за счет сравнения и согласования входной информации с другими элементами;
- выявление отказавших элементов системы после повторного определения элемента как «подозрительного»;
- маскирование сигнала отказавших элементов системы для дальнейшего недопущения искажения информации в системе.

Моделирование проводилось в системе Matlab Simulink с применением пакета Stateflow, что позволило выполнить описание модели в виде состояний и переходов, используя язык описания конечных автоматов.

## 2. Описание модели

Алгоритм работы АПС-ЭГ составлен с учетом действующих стандартов функционирования, а именно инструкции по оборудованию и эксплуатации железнодорожных переездов [3].

Для описания модели введем следующие условные обозначения:

УЗП1, УЗП2, УЗП3, УЗП4 – устройства заграждения переезда (составляют комплекс устройств заграждения переезда КУЗП);

ПС1, ПС2 – переездные светофоры;

ДП1, ДП2, ДП3 – датчики перемещения (входят в блок контроля свободности переезда БКСП);

ПР РЦА1, ПР РЦА2 – путевые реле рельсовых цепей системы автоблокировки;

ПР РЦТ1У, ПР РЦТ2У, ПР РЦТ3У, ПР РЦТ4У – путевые реле тональных рельсовых цепей наложения на участках приближения (удаления);

ДС1, ДС2, ДС3, ДС4 – датчики регистрации прохождения колесной пары (входят в блоки анализа скорости БАС1 и БАС2);

ПСЧ – проходной светофор системы автоблокировки четного направления;

ПСН – проходной светофор системы автоблокировки нечетного направления;

з – оптический сигнал зеленого цвета ПСЧ или ПСН;

ж – оптический сигнал зеленого цвета ПСЧ или ПСН;

к – оптический сигнал зеленого цвета ПСЧ или ПСН;

ЗС – звуковой сигнал;

↑ – сигнал логической 1 или «включено», или сигнал аварийной ситуации на переезде;

↓ – сигнал логического 0 или «выключено»;

↕ – сигнал перехода от логической 1 к логическому 0 и обратно или «импульсная работа»;

САЛС – система автоматической локомотивной сигнализации;

СДК – система диспетчерского контроля;

ПЕ – подвижная единица;

АТС – автотранспортное средство.

В форме таблицы состояний (ТС) (табл. 1) описана работа системы АПС-ЭГ при прохождении в четном направлении длиной ПЕ (более 500 м) по однопутному участку с двухсторонним движением. В аналогичном виде описываются состояния системы АПС-ЭГ при аварийной остановке автотранспортного средства (АТС) на переезде в момент, когда ПЕ находится на блок-участке перед проходным светофором ПСЧ на расстоянии тормозного пути, достаточного для остановки ПЕ перед ПСЧ. Если сигнал от БКСП поступит в момент, когда ПЕ находится в зоне приближения к переезду (участок 1У или 2У), то САЛС выдаст сигнал экстренного торможения ПЕ. Если тормозного пути будет достаточно, то ПЕ остановится перед переездом. Если тормозного пути недостаточно и АТС не успели эвакуировать из зоны габарита ПЕ, то необходима срочная эвакуация людей из АТС. В этом случае произойдет аварийное столкновение АТС с ПЕ, движущейся с пониженной скоростью в режиме экстренного торможения, и последствия аварии будут минимальными.

В соответствии с ТС разработана модель системы АПС-ЭГ, которая позволяет также усовершенствовать алгоритм ее работы, применив метод обнаружения отказов ПР РЦА и ПР РЦТ, а также обеспечив корректную работу системы при отказах путевых реле. Модель позволяет осуществлять проверку функционирования системы при различных комбинациях отказавших элементов системы и изменении входных характеристик, таких как скорость движения ПЕ, длина участка приближения, длинная ПЕ, а также позволяет контролировать корректность работы системы в случае аварийной остановки АТС в зоне

переезда. В результате исследований функционирования системы удалось уточнить необходимую длину участков приближения и допустимую скорость движения ПЕ перед переездом.

Таблица 1. Состояния системы АПС-ЭГ (длинная ПЕ, однопутный участок с двухсторонним движением, четное направление)

№	Источники информации									Исполнительные устройства							Примечания	
	ПР РЦА1	БАС1	ПР РЦТ1У	ПР РЦТ2У	БКСП	ПР РЦТ3У	ПР РЦТ4У	БАС2	ПР РЦА2	ПСЧ	ПС1	ПС2	ЗС	КУЗП	ПСН	САЛС		СДК
1	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	з	↓	↓	↓	↓	з	↓	↓	В зоне переезда ПЕ отсутствует
2	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	к	↓	↓	↓	↓	ж	↓	↓	Вступление ПЕ (в четном направлении) на РЦА1
3	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	к	↓	↓	↓	↓	ж	↓	↓	Начало работы БАС1, определение скорости движения ПЕ
4	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	к	↓	↓	↓	↓	ж	↓	↓	Одновременное занятие ПЕ РЦА1 и РЦТ1У, начало работы ПС1 и ПС2 и ЗС в импульсном режиме
5	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↑	к	↓	↓	↓	↑	ж	↓	↓	Одновременное занятие ПЕ РЦА1, РЦТ1У и РЦТ2У, окончание работы БАС1, определение момента и включение КУЗП
6	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↑	к	↓	↓	↓	↑	ж	↓	↓	Освобождение ПЕ РЦТ1У
7	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓	к	↓	↓	↓	↑	к	↓	↓	Одновременное занятие ПЕ РЦТ2У, РЦА2 и РЦТ3У, вход ПЕ на переезд
8	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	к	↓	↓	↓	↑	к	↓	↓	Одновременное занятие ПЕ РЦТ2У, РЦА2, РЦТ3У и РЦТ4У
9	↑	↓	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	ж	↓	↓	↓	↑	к	↓	↓	Освобождение ПЕ РЦТ2У и РЦА1, проследование ПЕ переезда
10	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	ж	↓	↓	↓	↓	к	↓	↓	Освобождение ПЕ РЦТ3У, выключение ПС1, ПС2 и ЗС, выключение КУЗП
11	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↓	ж	↓	↓	↓	↓	к	↓	↓	Освобождение ПЕ РЦТ4У
12	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	з	↓	↓	↓	↓	з	↓	↓	Освобождение ПЕ РЦА2, переход системы в исходное состояние

Модель описана в среде Matlab Simulink+Stateflow и представляет собой:

1. Набор входных параметров системы:
  - длина участков приближения ( $RCA1/2length$ ,  $RCT1/4length$ ,  $RCT2/3 length$ );
  - скорость движения ПЕ (Train speed);
  - длина ПЕ (Train length).
  - задержка следования ПЕ (Train, Train delay, Time).
2. Блок формирования входных сигналов (Signal imitator).
3. Алгоритм функционирования (APS-EG) средств изменения входных сигналов.

#### 4. Блок интерпретации результатов (Result).

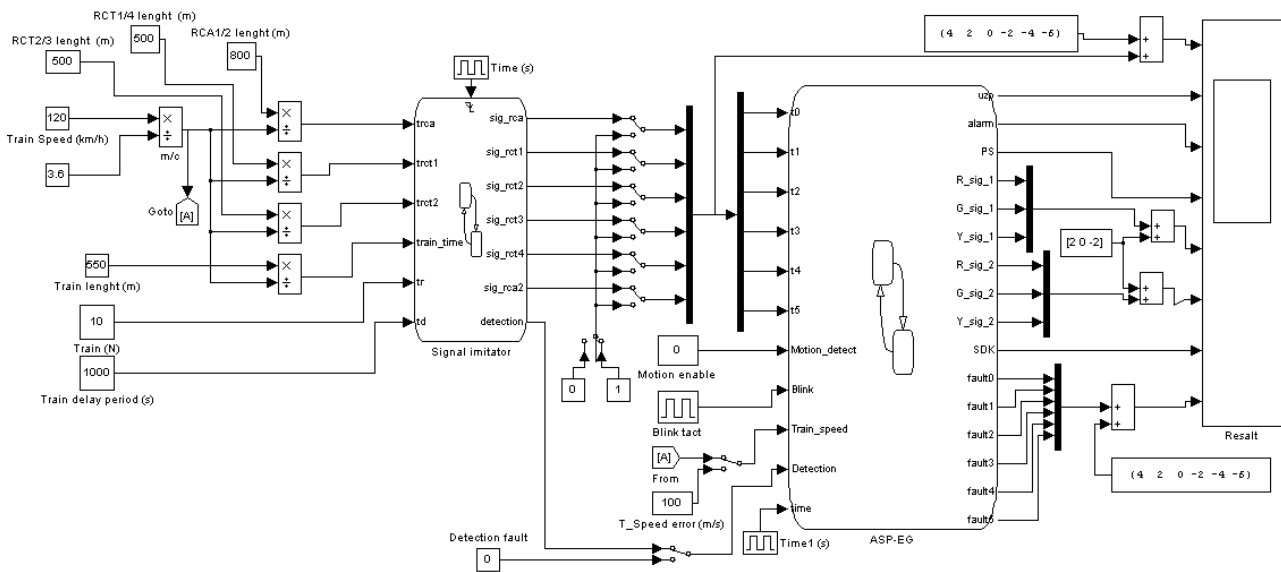


Рис. 1. Модель системы АПС-ЭГ (Simulink)

Работа блоков БАС1 и БАС2 заключается в выдаче определенного значения скорости движения ПЕ (Train speed) и генерации сигнала (1 – четное направление, 2 – нечетное направление) в зависимости от направления движения ПЕ (блок Signal imitator выход detection) и длины ПЕ (Train length). Работа блока БКСП обеспечивает выдачу сигнала 1,0 (Motion enable) для моделирования сигнала активности в опасной зоне при закрытом переезде.

#### 2.1. Входные параметры

Расчет границ участков приближения в зависимости от времени извещения о приближающейся ПЕ рассчитывается согласно требованиям [4] и исходя из следующих соображений:

$$L_p = V_{\max} \square T_i / 3,6, \quad (1)$$

где  $V_{\max}$  – максимальная скорость движения поездов на участке переезда (км/ч);  
3,6 – коэффициент перевода скорости из км/ч в м/с.

$$T_i = T_1 + T_2 + T_3, \quad (2)$$

где  $T_i$  – время извещения о приближении поезда к переезду;  
 $T_2$  – время срабатывания переездной сигнализации (с);  
 $T_3$  – гарантийное время (с).

$$T_1 = (L_u + L_a + L_0) / V_a, \quad (3)$$

где  $T_1$  – время, за которое АТС проедет переезд (с) и определяется по формуле (3);  
 $V_a$  – скорость АТС на переезде;  
 $L_u$  – длина участка переезда (м);  
 $L_a$  – длина АТС (м);  
 $L_0$  – расстояние АТС до УЗП (м).

На основе приведенных выше зависимостей получена модель зависимости длины участка приближения от скорости движения поезда с учетом требований к времени извещения о приближении ПЕ к переезду (рис. 2).

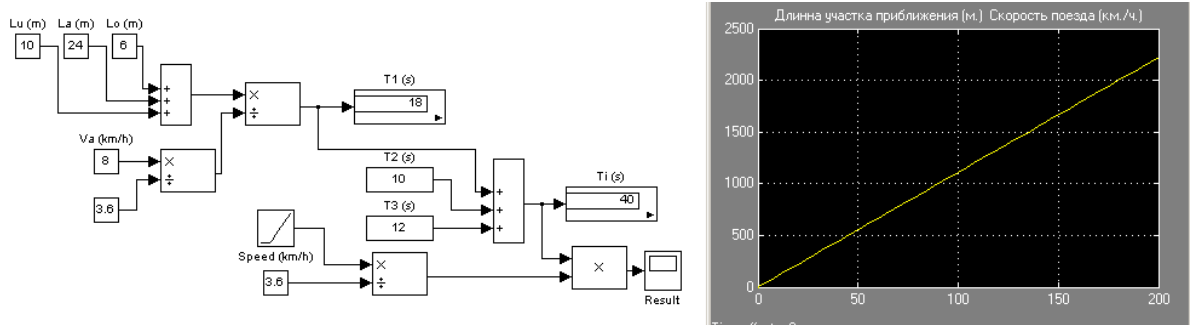


Рис. 2. Модель зависимости длины участка приближения от скорости движения поезда

Вычисляемые значения  $T_1$ ,  $T_i$  заносятся в модель (рис. 1) для обеспечения задержки включения ПС1, ПС2 и задержки закрытия КУЗП. В модели участок приближения по четному и нечетному направлениях разбит на несколько частей (рис. 3).

Поскольку ПЕ могут двигаться через переезд в двух направлениях, части расположены симметрично относительно переезда. Таким образом, длина части  $U_0=U_5$ ,  $U_1=U_4$ ,  $U_2=U_3$ , соответственно.

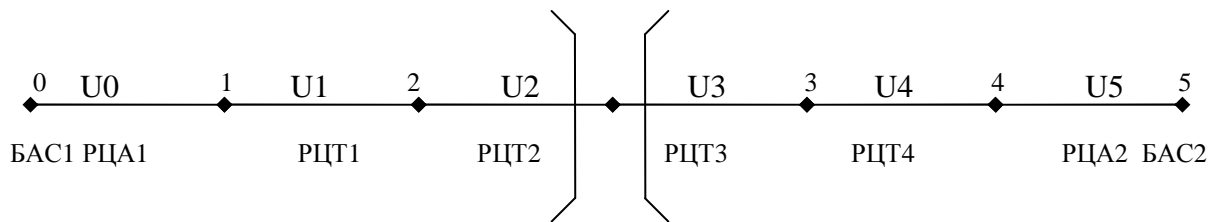


Рис. 3. Схема расположения участков приближения

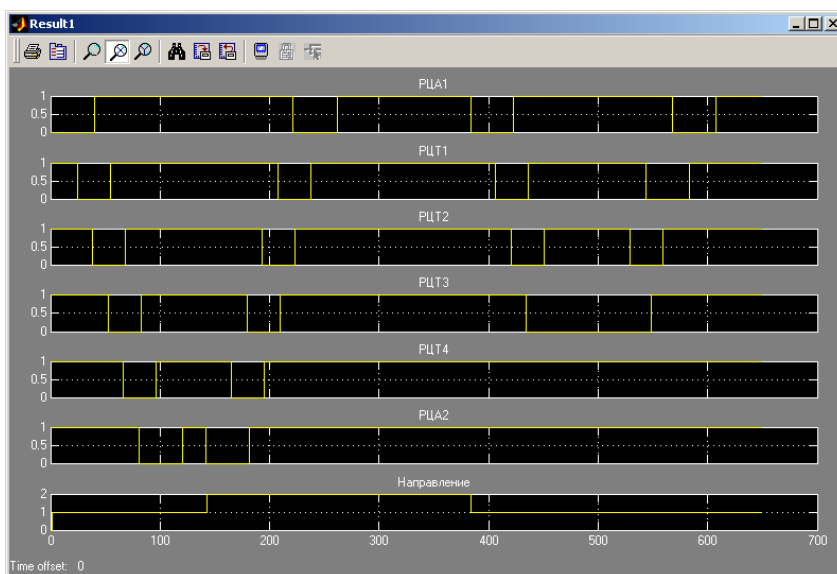


Рис. 4. Сигналы блока формирования входных сигналов (Signal imitator)

## 2.2. Блок формирования входных сигналов (Signal imitator)

Блок позволяет генерировать сигналы путевых реле РЦА1, РЦТ1, РЦТ2, РЦТ3, РЦТ4, РЦА2, сигналы блоков БАС1, БАС2 (направление (derection)).

Сигналы генерируются в соответствии с табл. 1 и другими регламентными таблицами в соответствии со скоростью движения ПЕ, его длиной, интервалом движения (задержкой) между ПЕ, количеством ПЕ за цикл моделирования.

Блок генерирует вы-

шеперечисленные сигналы, имитируя движение в четном (состояние N1), нечетном (N2) направлениях и остановки в зоне переезда (N3). В процессе моделирования блок выдает сигналы ПР РЦ (рис. 4), которые могут изменяться в зависимости от входных параметров и моделировать их отказы с заданной вероятностью.

### 2.3. Блок алгоритма функционирования системы (APS-EG)

Данный блок состоит из одновременно выполняющихся состояний (рис. 5), которые позволяют выполнять:

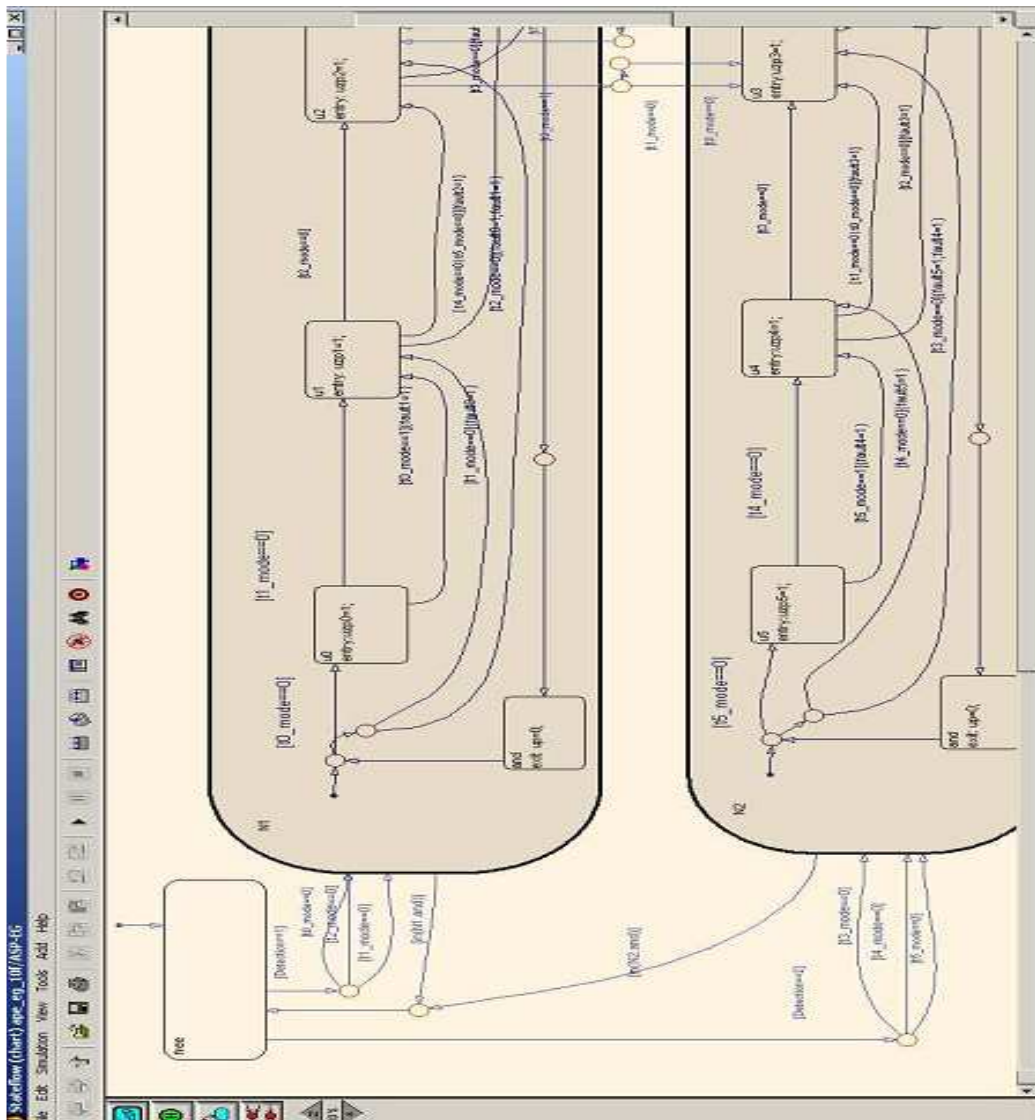
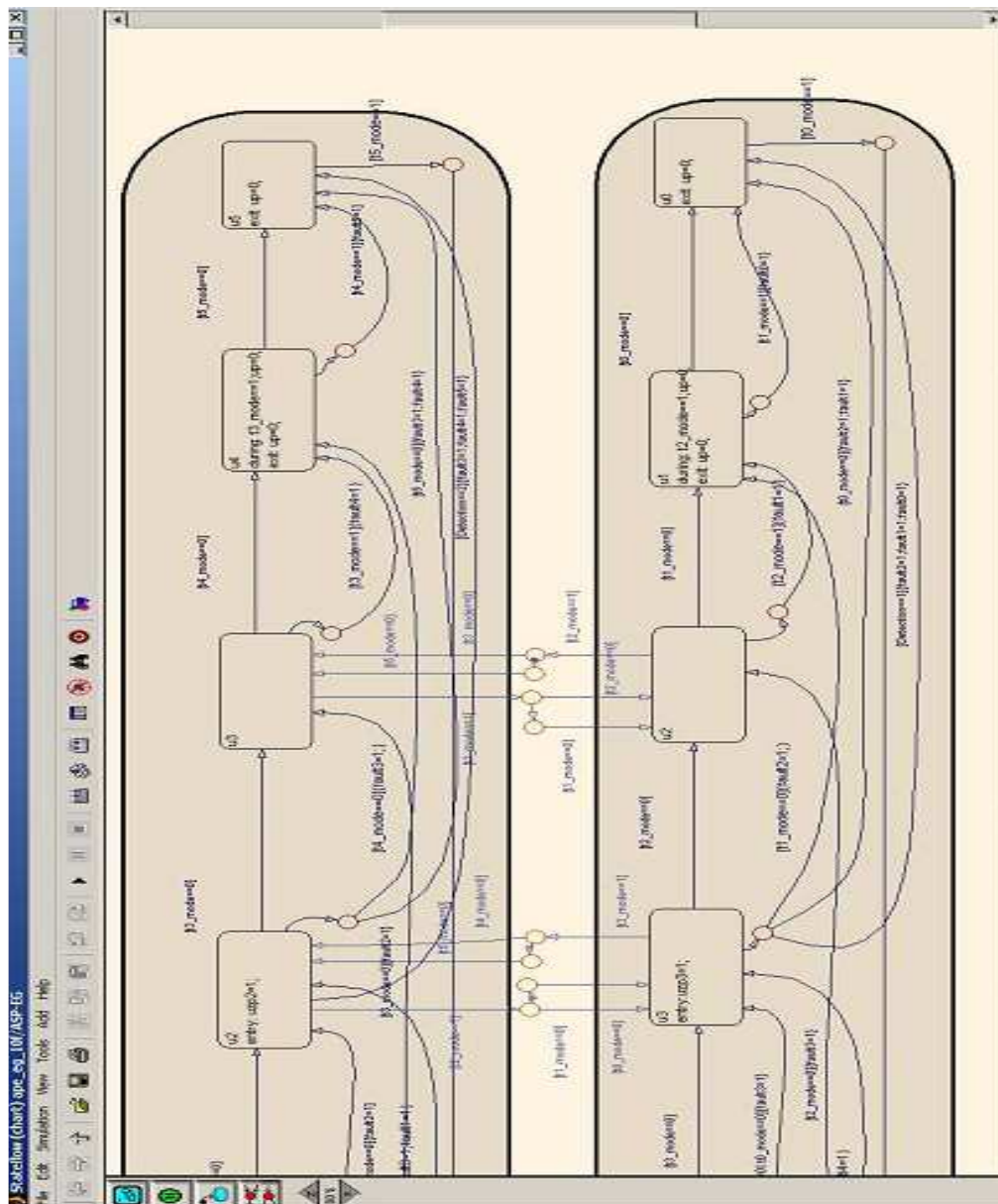


Рис. 5. Блок алгоритма функционирования системы (Stateflow APS-EG, ч. 1)

- идентификацию сигнала РЦА1, РЦТ1, РЦТ2, РЦТ3, РЦТ4, РЦА2, БАС (INPUT);
- контроль занятости частей участка приближения и передвижение ПЕ по нему (LOGIK);
- формирование выходных сигналов (OUTPUT): КУЗП, ПС1, ПС2, ПСЧ, ПСН, ЗС;
- регистрацию отказов ПР РЦ, БАС (Failure);
- вывод сигналов опасных ситуаций и отказов (Fault\_OUTPUT).



Продолж. рис. 5 (ч. 2)

Согласно логике, заложенной в блоке алгоритма функционирования системы (рис. 5), проверяется выполнение условий безопасности движения:

- своевременное закрытие переезда;
- своевременное включение ПС, ЗС, ПСЧ, ПСН;
- проведение контроля зоны переезда при закрытых КУЗП;
- информирование об отказах и опасных ситуациях на переезде по СДК;
- выполнение вышеперечисленных условий на разных скоростях движения ПЕ и разной длине ПЕ.

Также проверяется выполнение дополнительных условий:

- при движении ПЕ на малой скорости контролируется выполнение условия закрытия переезда за время  $T_1 + T_3 = 22c$  с целью обеспечения оптимального времени ожидания АТС на переезде.

Производятся выявление и нейтрализация отказов:

- отказов ПР РЦ;
- отказа определения скорости ПЕ.

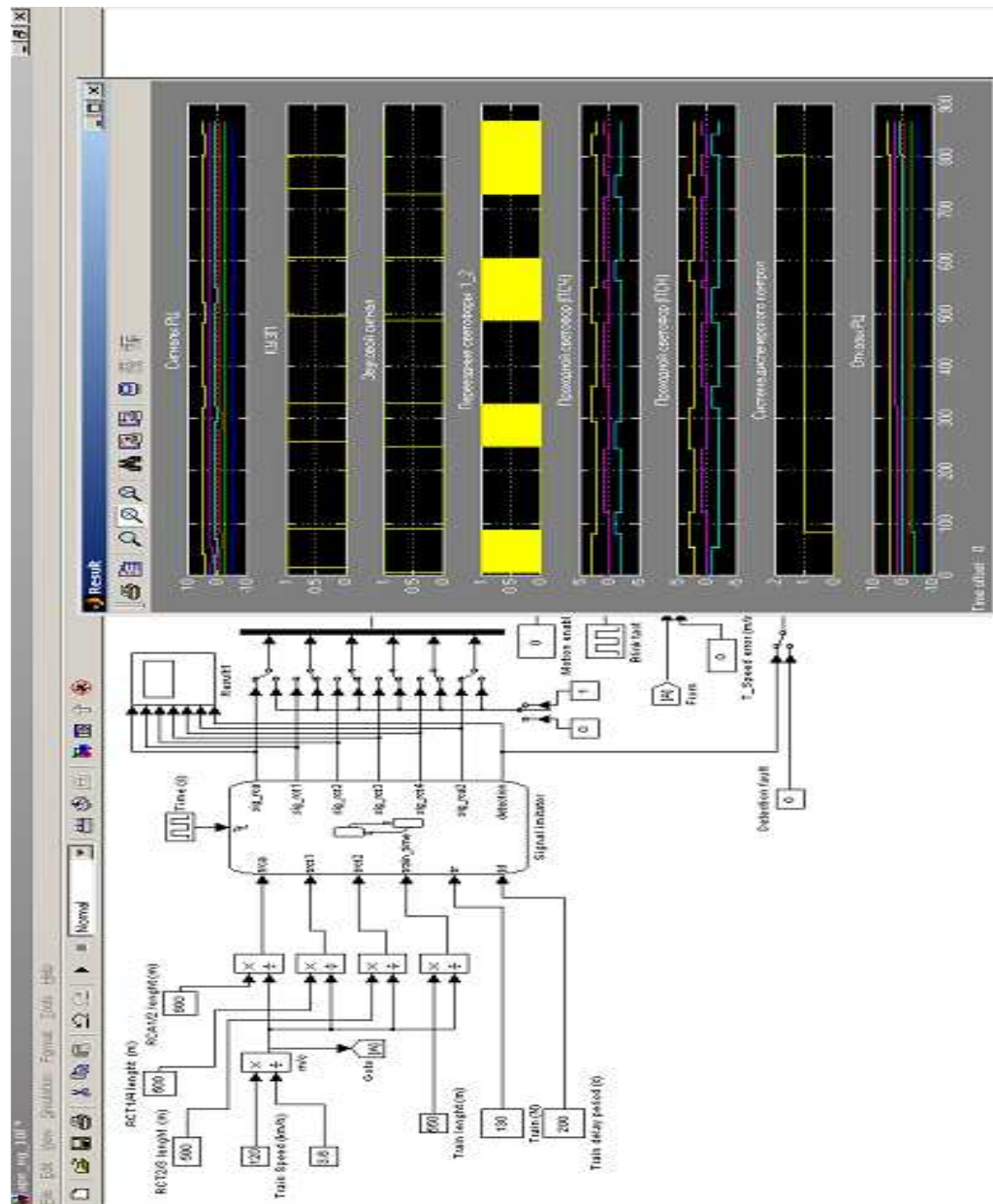


Рис. 6. Пример результата моделирования поведения системы при скорости ПЕ 120 км/ч и отказах рельсовых цепей РЦТ4, РЦТ1, РЦТ3, РЦА2

### Исключение конфликтных ситуаций

Благодаря моделированию в среде Matlab Simulink + Stateflow удалось составить алгоритм работы системы АПС-ЭГ, в котором исключены :

- конфликты состояний системы;
- конфликты переходов системы;
- выдержаны уровни сигналов и значения переменных;
- исключено заикливание (зависание) системы.

Пример результата моделирования поведения системы при скорости ПЕ 120 км/ч и отказах рельсовых цепей РЦТ4, РЦТ1, РЦТ3, РЦА2 показан в графическом виде (рис. 6). Из указанного примера следует, что при отказе РЦТ4 подается сигнал о наличии отказа в системе на СДК, фиксируются последующие отказы РЦТ1 и РЦТ3, после возникновения которых в СДК подается сигнал об отказе всей системы. При этом КУЗП, ПСЧ, ПСН обрабатывают заданные функции.



### 3. Выводы

По результатам моделирования отлажен работоспособный алгоритм функционирования АПС-ЭГ путем проведения большого количества тестирований и запусков системы (порядка 8000 запусков). В алгоритме реализовано:

- выявление отказавших элементов системы;
- маскирование сигналов отказавших элементов системы с целью дальнейшего недопущения искажения информации в системе;
- безопасное отключение системы после критического отказа;
- информирование обслуживающего персонала об отказах элементов системы.

В дальнейшем полученный алгоритм может быть использован для программирования ПЛИС, совместимых со средой Matlab [5].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федухин А.В. К вопросу об аппаратной реализации избыточных структур: резервированная двухканальная система с реконфигурацией / А.В. Федухин, Ар.А. Муха // Математичні машини і системи. – 2010. – № 4. – С. 156 – 159.
- 2.[http://www.mathworks.com/products/stateflow/examples.html?file=/products/demos/stateflow/sldemo\\_fuelsys/sldemo\\_fuelsys.html](http://www.mathworks.com/products/stateflow/examples.html?file=/products/demos/stateflow/sldemo_fuelsys/sldemo_fuelsys.html).
3. Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України «Про затвердження Інструкції з улаштування та експлуатації залізничних переїздів» від 26.01.2007. – № 54.
4. Поздняков В.А. Безопасность на железнодорожных переездах [Электронный ресурс] / В.А. Поздняков. – Режим доступа: <http://www.css-rzd.ru/zdm/03-2000/00039.htm>.
5. Строгонов А. Проектирование учебного процессора для реализации в базе ПЛИС с использованием системы MATLAB/Simulink / А. Строгонов, А. Буслов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 114 – 118.

*Стаття надійшла до редакції 16.10.2013*