



Трусов Р. Е., Горькавый М. А., Соловьев, В. А.
R. Ye. Trusov, M. A. Gorkaviy, V. A. Solovyov

**РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**DEVELOPMENT OF THE INTELLIGENT SUBSYSTEM OF PLANNING
AND OPTIMIZATION OF ELECTRIC NETWORK EQUIPMENT REPAIRING**

Роман Евгеньевич Трусов – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kreezzz@mail.ru.

Mr. Roman Ye. Trusov – Master's Degree Student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kreezzz@mail.ru.

Михаил Александрович Горькавый – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой управления инновационными процессами и проектами Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: uipp@knastu.ru.

Mr. Mikhail A. Gorkaviy – PhD in Engineering, associate Professor, Head of the Management of innovative processes and projects Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: uipp@knastu.ru.

Вячеслав Алексеевич Соловьев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

Mr. Vyacheslav A. Solovyev – Dr. hab., Professor, Head of the Electric drive and automation of industrial installations Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

Аннотация. В целях оптимизации затрат на ремонтно-восстановительные работы электросетевого оборудования в условиях недопущения аварий в сетях, сбоев в поставке энергии потребителю и других негативных факторов предлагаются инструменты автоматизированной оценки предпосылок и планирования оптимальных комплексов мероприятий технического обслуживания и ремонта оборудования электросетевых компаний. Автоматизированное прогнозирование и планирование достигается за счёт организации интеллектуального вывода на основе данных имитационного моделирования частей и процессов производственной системы. Модель строится в ходе идентификации производственных процессов и ограничений внешней среды в конструкторе, реализованном в программной среде с использованием виртуальных блоков, отражающих характеристики типовых объектов производственной системы электросетевой компании. Для удобства работы и наглядности представления результатов прогноза подсистемы предлагается геймифицированный интерфейс и задаваемая пользователем система критериев эффективности функционирования.

Summary. To optimize the costs of repair and restoration works of the power grid equipment in the context of preventing accidents in networks, failures in the energy supply to consumers and other negative factors, tools for automated assessment of the prerequisites and planning of optimal sets of measures for technical maintenance and repair of equipment for electric grid companies are offered. Automated forecasting and planning are achieved through the organization of intelligent output based on simulation modelling of parts and processes of the production system. The model is built during the identification of production processes and environmental constraints in the designer, implemented in a software environment using virtual blocks that reflect the characteristics of typical objects of the production system of the electric grid company. For the convenience of work and visibility of the presentation of the forecast results of the subsystem, a gaming interface and a user-defined system of performance criteria are proposed.

Ключевые слова: энергетика, автоматизация, интеллектуальные системы, имитационная модель, нечёткая логика.

Key words: power engineering, automation, intelligent system, simulation model, fuzzy logic.

УДК 004.891.2

Введение

В условиях развития промышленной инфраструктуры региона возрастает роль электросетевых компаний и повышаются требования, предъявляемые к их работе. Специфические особенности территорий Дальнего Востока, в частности, таких как большая протяжённость, суровые климатические условия, труднодоступность линий, неравномерность нагрузки и др., определяют высокую долю затрат в общем бюджете компаний, приходящуюся на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) электросетевого оборудования. Таким образом, разработка системы поддержки принятия решений (СППР) для электросетевых компаний является одним из эффективных решений по сокращению финансовых и временных потерь при ТОиР и предоставлению качественной, бесперебойной электроэнергии потребителю. В настоящее время процесс принятия решения о ремонте или обслуживании электротехнического оборудования осуществляется в четыре этапа (см. рис. 1).

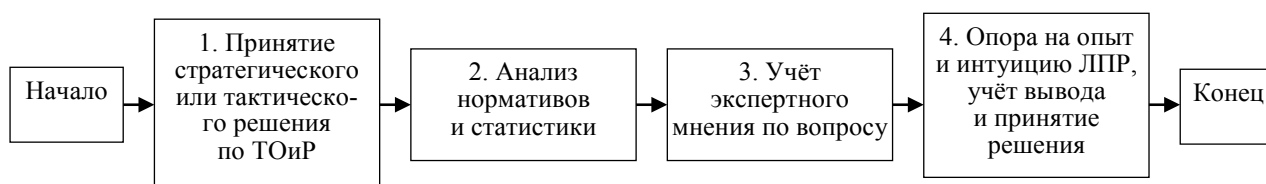


Рис. 1. Типовой алгоритм принятия решения о техническом обслуживании и ремонте

Предлагается повысить эффективность процесса разработки и принятия решения путём добавления в цепочку действий параллельной ветви операций, выполняемых в автоматическом режиме (см. рис. 2). При этом маршрут операций в полном объёме (1–3) необходим до тех пор, пока СППР не покажет достаточный уровень адекватности на практике, тогда весь путь «*» можно будет исключить либо значительно сократить временные затраты на выполнение операций.

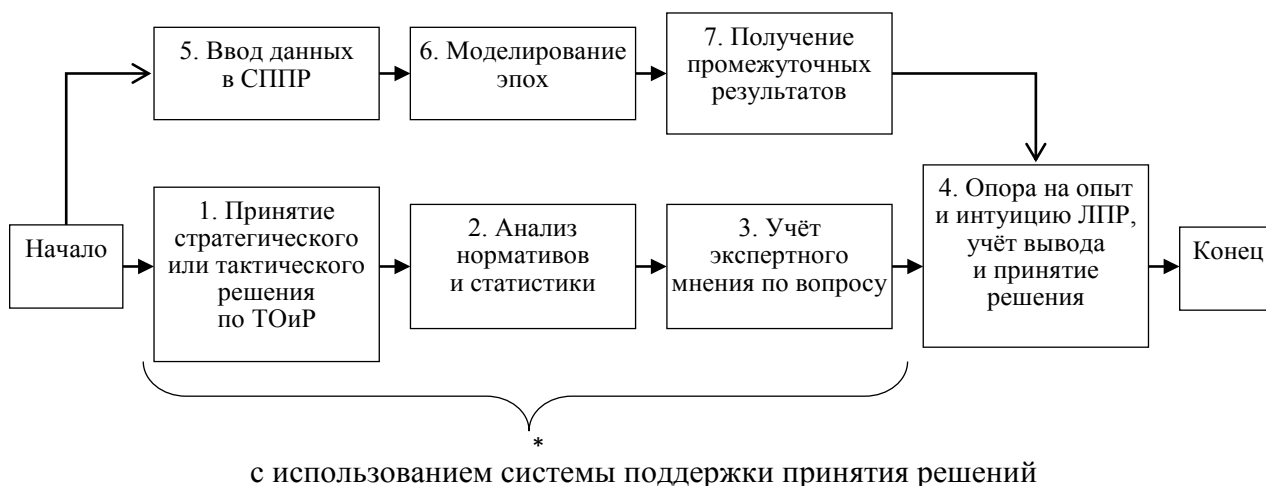


Рис. 2. Схематичное изображение процесса принятия решения с использованием системы поддержки принятия решений

Следует отметить, что задачи, на решение которых направлена СППР, носят оттенок значительной степени статичности во времени (тактические и стратегические), то есть система не предназначена для решения оперативных проблем, а направлена на повышение эффективности долгосрочных периодических мероприятий (планов, графиков и т.д.) за счёт качественного прогноза

(несмотря на это решение некоторых оперативных проблем является возможным). Благодаря машинному быстрдействию, длительность моделирования эпохи значительно меньше времени протекания реального процесса, что позволяет принимать взвешенные решения при отсутствии статистических данных с опорой на прогноз. Применение разработанного в работе [6] подхода при организации интеллектуального вывода позволяет повысить объективность предлагаемого системой решения. На основе декомпозиции части производственного оборудования типовой электросетевой компании определён массив классов виртуальных блоков производственной части системы и приоритет моделирования.

В настоящей работе решаются задачи интеграции алгоритмического, программного и интеллектуального обеспечения внутри одного класса виртуального блока, характеризующего производственную подсистему нижнего уровня иерархии, внутренний интерфейс блока, логическую структуру интеграции классов виртуальных блоков внутри имитационной модели [1; 5] и внешний интерфейс модели.

Фрагмент структуры классов имитационной модели [5] в контексте объектно-ориентированного проектирования представлен на рис. 3. Атрибуты виртуальных блоков при конструировании модели в программной среде определяются исходя из представленных на рисунке цепочек наследования.

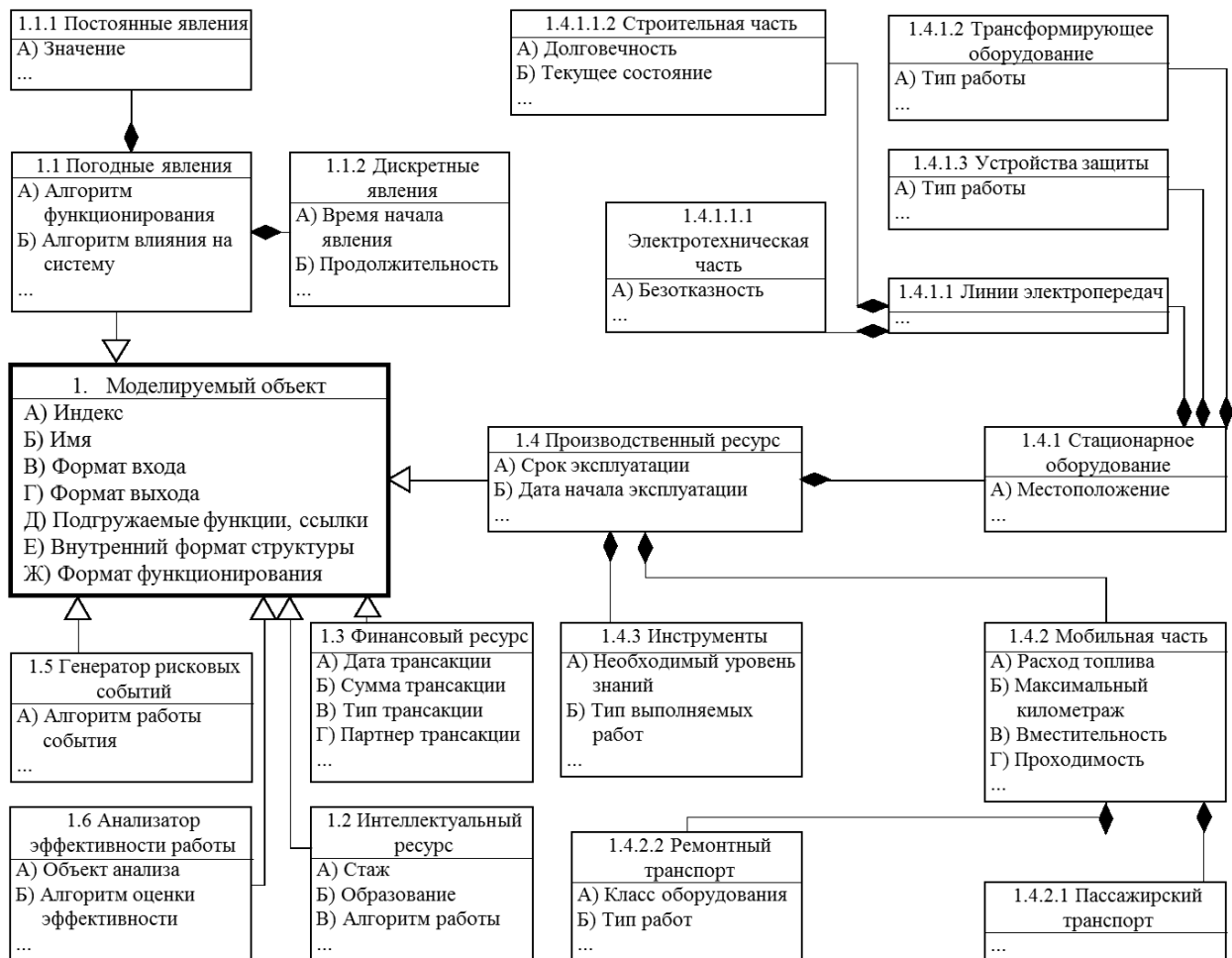


Рис. 3. Фрагмент структуры классов имитационной модели

Общая схема функционирования модели представлена на рис. 4.

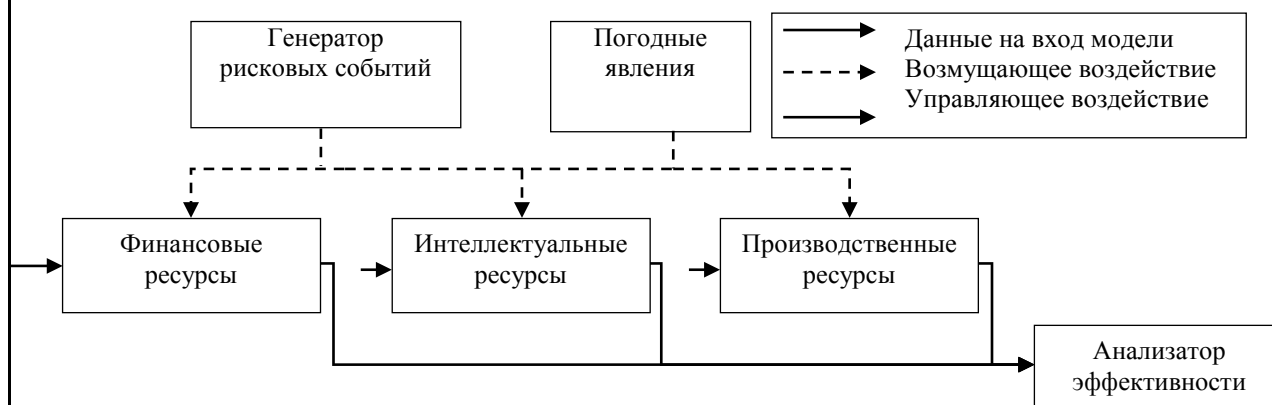


Рис. 4. Общая схема функционирования модели

Для обеспечения эффективности взаимодействия пользователя и СППР предлагается разработать интерфейс с использованием принципов геймификации (см. рис. 5). Целью пользователя в виртуальном пространстве является обеспечение и поддержание на требуемом уровне интегральных показателей качества процесса ТОиР.

Ближайшим аналогом интерфейса разрабатываемой СППР являются компьютерные игры жанра градостроительного симулятора. Пользователю необходимо воссоздать модель реального участка электросети (задать начальные значения внешней среды, расположить объекты моделирования на выбранной моделируемой территории, задать ограничения в виде величины бюджета на ТОиР и т.д.).

В ходе моделирования в соответствии с определёнными правилами изменяются значения переменных виртуальных блоков, характеризующих реальные объекты, а ускоренный ход модельного времени позволяет прогнозировать состояние оборудования с большим временным лагом. По окончании процесса моделирования пользователь получает лог-файл с ключевой информацией по всем виртуальным блокам, а также рекомендации к составлению плана по ТОиР на указанный пользователем временной срок, что обеспечивает реализацию процесса выявления узких мест, приводящих к авариям и серьёзным проблемам.

Верхняя панель (см. рис. 5) позволяет управлять настройками и ходом моделирования. Панель слева содержит в себе виртуальные блоки (объекты моделирования), которые можно располагать на центральном поле методом drag&drop, и дополнительные настройки. Центральное поле модели состоит из прямоугольных сегментов-территорий, содержащих в себе информацию о погодных условиях, основанных на глобальной информации в моделируемой области. В центральном поле пользователь размещает виртуальные блоки (объекты моделирования: линии, опоры, трансформаторные подстанции и т.д.). Каждый элемент имеет цветовую палитру, отражающую общее состояние объекта («зелёный» – удовлетворительно, «жёлтый» – имеются незначительные проблемы, «красный» – имеются серьёзные проблемы, «чёрный» – вышел из строя, «белый» – отключён).

Для демонстрации разработанных механизмов функционирования виртуальных блоков разработаны структура, алгоритм вывода и локальный интерфейс виртуального блока – «промежуточная опора».

Программная реализация структуры виртуального блока (см. рис. 6) выполнена в среде MatLab, атрибуты определены исходя из выполненной декомпозиции электросетевого оборудования. Моделируемые погодные условия и случайные факторы оказывают негативное влияние на значения атрибутов виртуального блока, а имитация реализации ремонтных работ обеспечивает доведение значений атрибутов блоков до эталонных. Если значение одного из атрибутов превы-

шает критическую отметку, происходит имитация выхода из строя виртуального блока, и моделирование завершается.

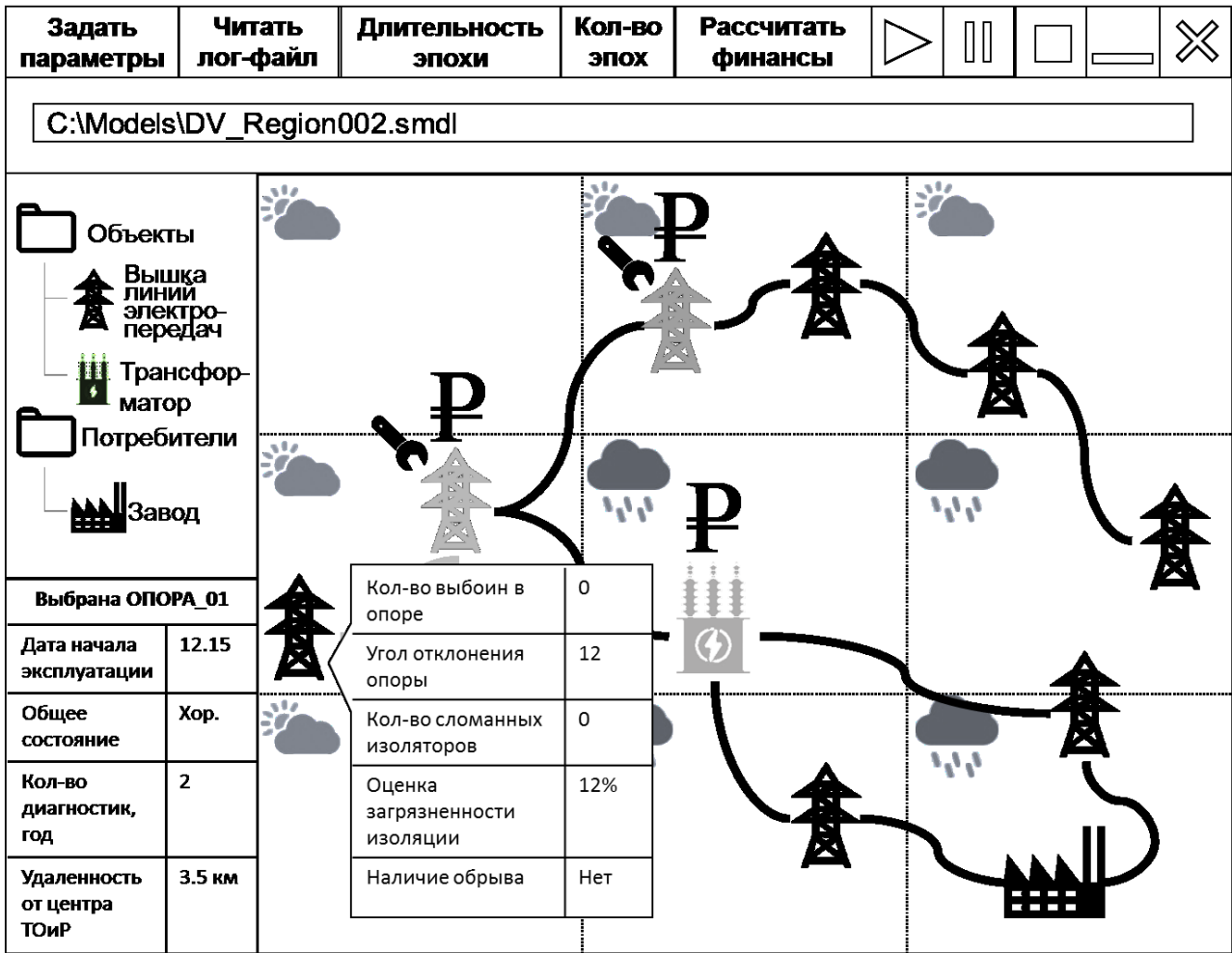


Рис. 5. Концепт интерфейса системы поддержки принятия решений



Рис. 6. Структура виртуального блока

Весь процесс моделирования заносится в лог-файл, в котором можно отследить динамику изменения значений атрибутов и выявить оптимальную комбинацию ремонтных работ при определённых условиях внешней среды. Интерфейс виртуального блока представлен на рис. 7.

Для одновременного моделирования нескольких виртуальных блоков и интеграции их внутри одной системы было принято решение использовать программную среду Simulink, обладающую мощным встроенным графическим интерфейсом, значительно облегчающим вопросы интеграции блоков на этапе проектирования модели.

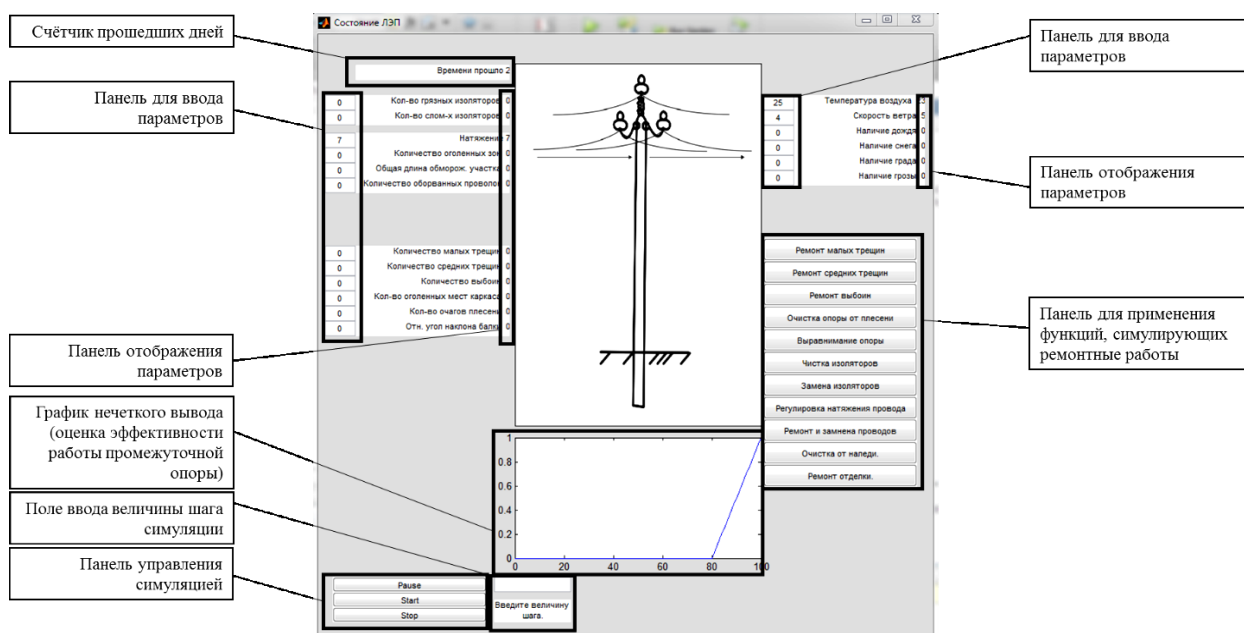


Рис. 7. Интерфейс виртуального блока «Промежуточная опора»

Структура группы виртуальных блоков (фрагмента имитационной модели) представлена на рис. 8.



Рис. 8. Структура фрагмента имитационной модели



На верхнем уровне фрагмента имитационной модели находятся виртуальные блоки, отвечающие за подсчёт модельного времени, выполнение имитации погодных условий (пользователь задаёт среднемесячные температуры на необходимый срок моделирования, а информация об осадках и других погодных явлениях предоставляется согласно статистике по моделируемой территории) и имитацию работы опор линий передач, а также блоки, реализующие интерфейс вывода.

Структурные и параметрические атрибуты модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Структурные и параметрические атрибуты модели

Блок	Имя атрибута	Единица измерения	Описание	Способ генерации	Тип	Границы
А	Step	Дни	Шаг моделирования	Ручной ввод	int	1 – ...
	Start	Дни	Номер начального дня моделирования	Ручной ввод	int	0 – ...
	Counter	Дни	Счётчик прошедшего времени	Увеличение на Step	int	0 – ...
	Koef, Koef1	–	Регуляторы модельного времени	Задан заранее	int	1
	First-1, First-0	–	Регуляторы блока switch верного отсчёта пройденных дней	Задан заранее	int	1,0
	Time 1	Дни	Порядковый номер дня	Расчёт в блоке Clock	int	0 – ...
	Step 1	Дни	Выходная переменная шага (для лог-файла)	Не изменяется после ввода	int	1 – ...
	Counter 1	Дни	Выходная переменная прошедших дней	Расчёт в блоке Clock	int	1 – ...
В	First	Дни	Время начала действия погодных условий	Ручной ввод	int	1 – ...
	SkorVetra, Sk,	м/с	Скорость ветра	Ручной ввод	int	0 – 15
	Plotn Osadkov, Ra	мм	Плотность осадков	Ручной ввод	int	0 – 10
	Temp	°С	Температура воздуха	Ручной ввод	int	-35...+35
	Plotn Grada	Шт./м ² ·мин	Плотность града	Ручной ввод	int	0 – 1000
	Ocenka Plotnosity Grozy	Балл	Плотность грозы	Ручной ввод	int	0 – 10
	Weather	–	Массив с данными о погоде	Расчёт в блоке Weather	Array	–
С	Display 3	Дни	Отображение текущего дня	Расчёт в группе блоков А	int	0 – ...
	Display 5	Дни	Отображение шага моделирования	Ручной ввод	int	0 – ...
	Display 4	Дни	Отображение прошедших дней	Расчёт в группе блоков А	int	0 – ...

Продолжение таблицы 1

Блок	Имя атрибута	Единица измерения	Описание	Способ генерации	Тип	Границы
C	Display 6	Степени принадлежности	Массив, хранящий функцию принадлежности нечёткого выхода	Расчёт в блоке Subsystem	Array	0 – 1
	Scope	–	Графики изменения погодных условий	Расчёт в блоке Weather	Array	–
	Scope 1	–	График изменения плотности осадков	Расчёт в блоке Weather	int	–
	Scope 2	–	График изменения скорости ветра	Расчёт в блоке Weather	int	–
D	Fuz	–	Функция принадлежности, характеризующая эффективность работы объекта	Расчёт в блоке Subsystem	Array	0 – 1
	TimeIn	Дни	Значение текущего модельного времени	Расчёт в блоке Clock	int	0 – ...
	SkorVetra	м/с	Значение текущей скорости ветра	Расчёт в блоке Weather	int	0 – 15
	Plotnost Osadkov	мм	Значение текущей плотности осадков	Расчёт в блоке Weather	int	0 – 10
	Weather In	–	Массив с текущими параметрами погодных условий	Расчёт в блоке Weather	array	–
D1	–	–	Блок, содержащий алгоритмы ремонтных работ над объектом	Создаётся разработчиком	–	–
D2	–	–	Моделирование объекта	Создаётся разработчиком	–	–
D3	–	–	Ручной ввод начальных параметров	Создаётся разработчиком	–	–
D4	–	–	Автоматический ввод начальных параметров	Создаётся разработчиком	–	–
D5	–	–	Соблюдение всех значений их установленным пределам	Создаётся разработчиком	–	–
D6	–	–	Интеграция информации на протяжении всего процесса моделирования	Создаётся разработчиком	–	–
D7	–	–	Трансформация характеристик объекта исходя из моделируемых погодных условий	Создаётся разработчиком	–	–
D8	–	–	Переключатель режимов работ: задание параметров экспертом или автоматическое генерирование параметров	Создаётся разработчиком	–	–

Блок	Имя атрибута	Единица измерения	Описание	Способ генерации	Тип	Границы
D9	-	-	Группа блоков, вызывающая остановку моделирования при определённых условиях	Создаётся разработчиком	-	-

На рис. 9 отображён верхний уровень фрагмента имитационной модели. Блок В, имеющий один вход и три выхода, отвечает за симуляцию погодных условий. Выходы Sk (скорость ветра), Ra (плотность дождя) отделены от основного массива погодных условий, потому что влияние этих явлений заложено в алгоритм расчёта эффективности работы объекта, а не в алгоритм обработки влияния погодных условий.

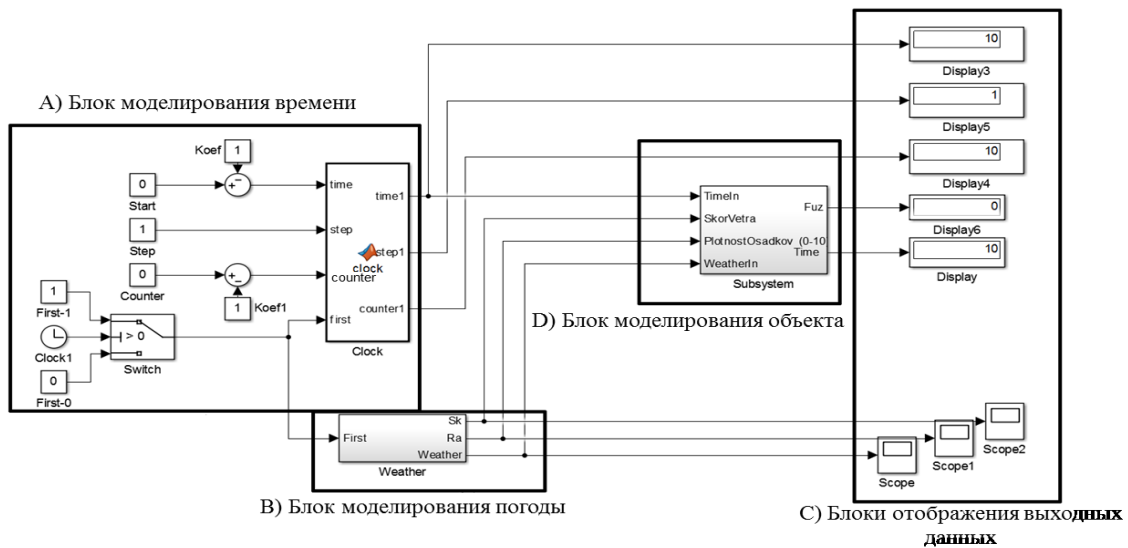


Рис. 9. Верхний уровень прототипа имитационной модели

Внутри блока В (см. рис. 10) содержатся пять констант, отражающих величины погодных условий и объединяющихся в шине для последующего перехода в функцию WeatherChange, которая моделирует динамику погодных условий.

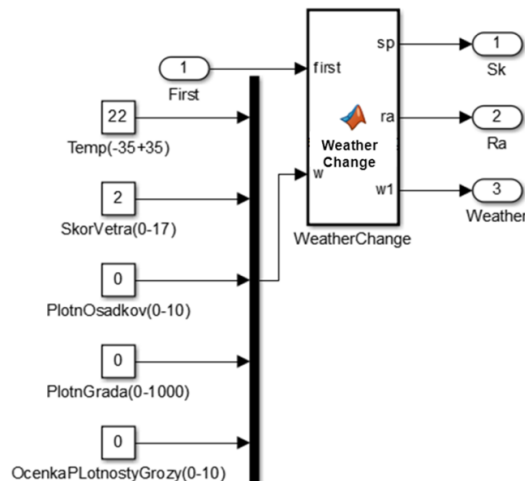


Рис. 10. Декомпозиция блока В

Декомпозиция виртуального блока «Промежуточная опора» (блок D) представлена на рис. 11. Приведено также и описание компонентов виртуального блока «Промежуточная опора» (блок D) (см. табл. 1).

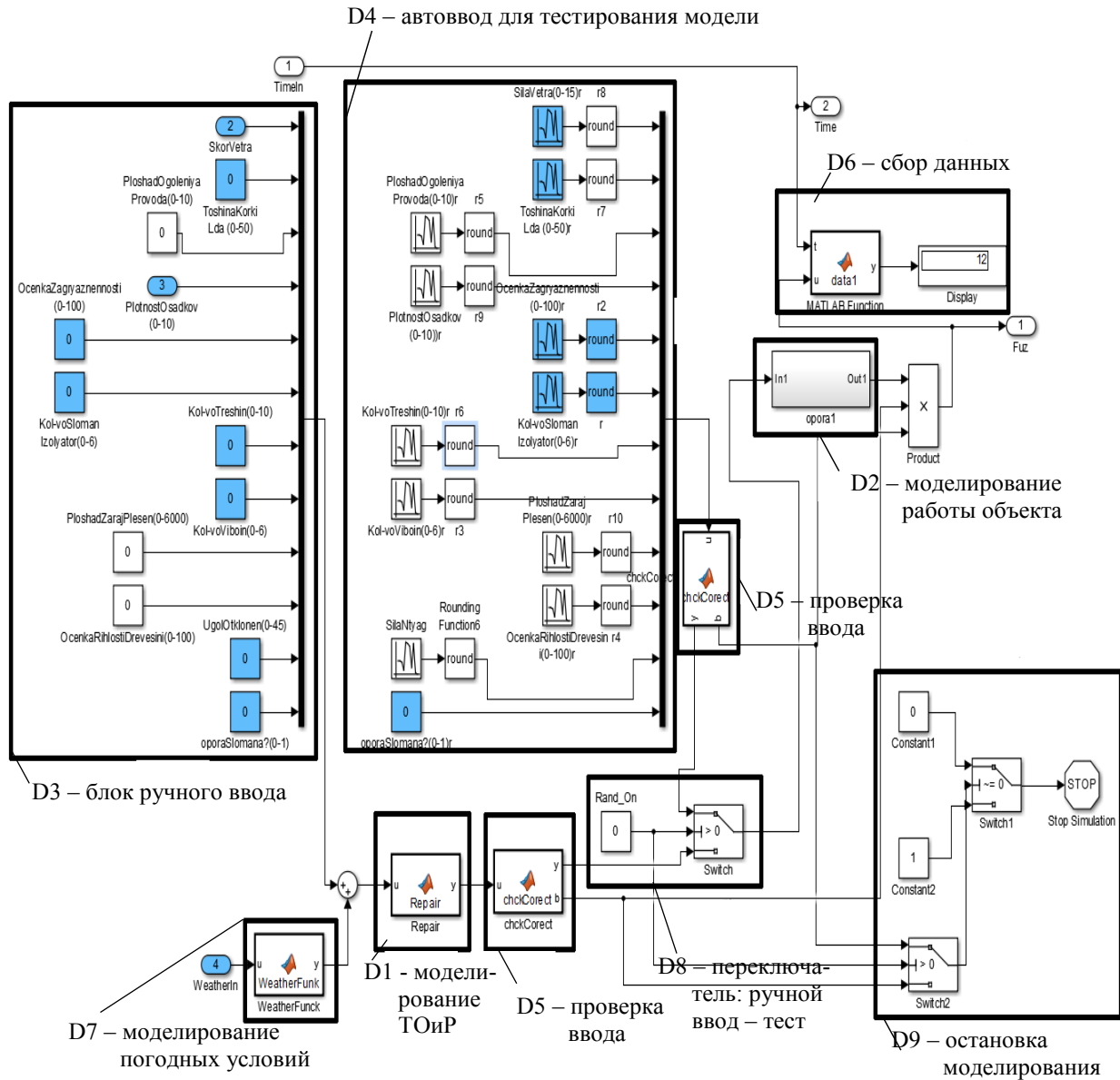


Рис. 11. Декомпозиция блока D «Промежуточная опора»

Нечёткая иерархическая система расчёта эффективности работы виртуального блока «Промежуточная опора» представлена на рис. 12. На вход подаётся массив с параметрами объекта, которые формируют согласно установленным правилам нечёткие выводы, переходящие по каскадам иерархии без потери семантики [6].

Интегральным показателем, определяющим необходимость имитации ремонтных работ и автоматического планирования графиков обслуживания в виртуальном блоке, является эффективность работы блока. Показатель «эффективность» реализован в формате лингвистической переменной с универсальным множеством от 0 до 100 с шагом 1, терм-множеством, состоящим из трёх термов (см. рис. 12), функции принадлежности которых формируются исходя из конкретных особенностей имитируемого объекта.

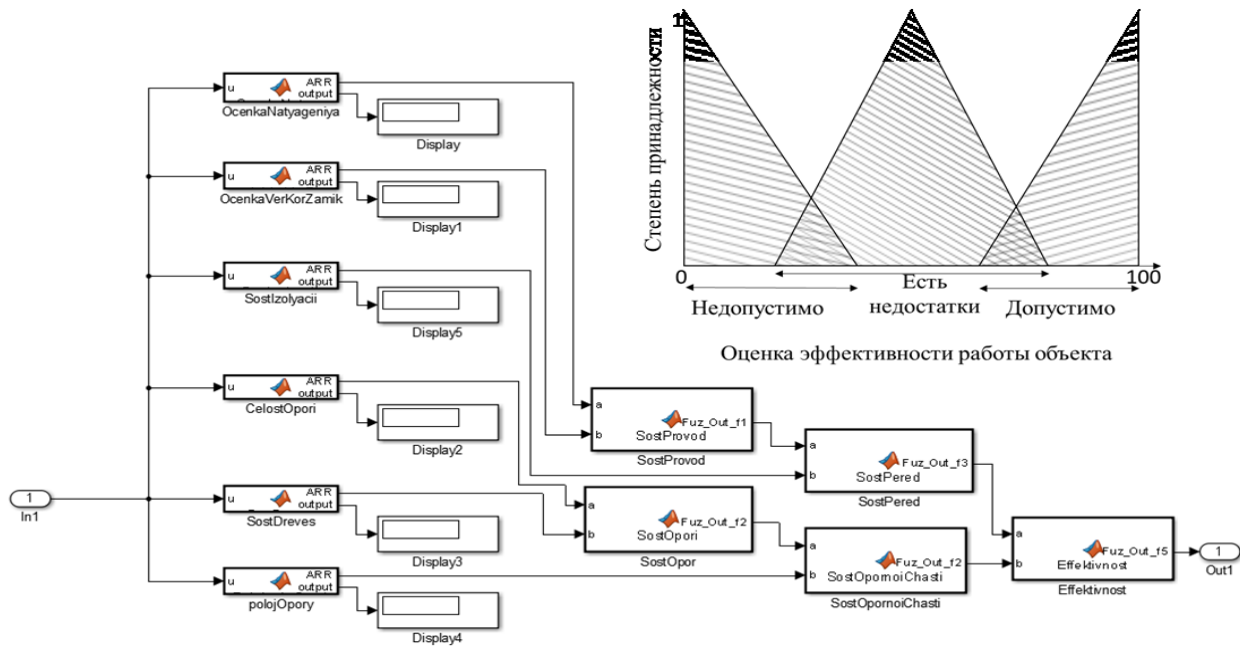


Рис. 12. Нечёткая иерархическая система в среде Simulink

В результате моделирования пользователь видит изменение ключевых параметров виртуального блока в течение моделируемого времени в виде графиков (см. рис. 13).

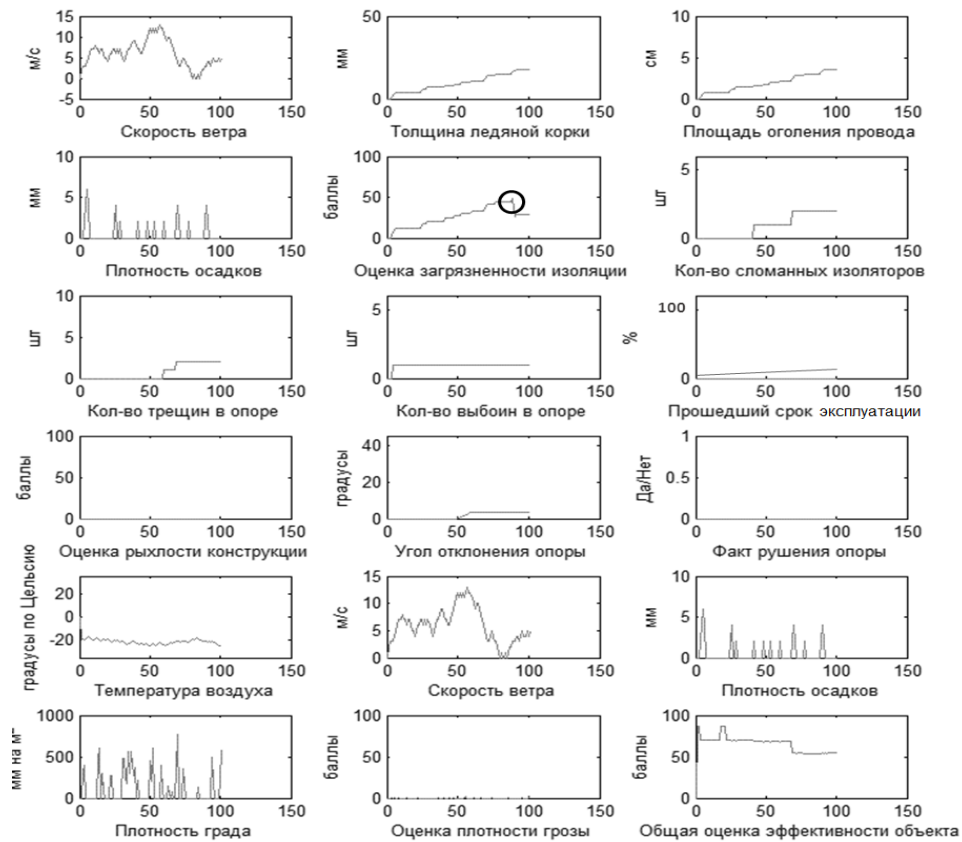


Рис. 13. Выходные данные моделирования (на оси абсцисс указано количество моделируемых дней)

Например, на графике оценки загрязнённости изоляции видно, как был имитирован процесс очистки изоляции, сокративший негативный эффект от её загрязнения.

При анализе результатов имитационного моделирования по всей системе информация, полученная по каждому виртуальному блоку, интегрируется, претерпевает интеллектуальную обработку (по заранее определённым критериям) и агрегируется в сводный отчёт, отражающий оптимальный график ремонтно-восстановительных работ (см. табл. 2). Необходимо отметить, что помимо виртуальных блоков, отражающих производственную часть электросетевого оборудования, определяющую роль в системе критериев оптимизации графика играют виртуальные блоки классов «процедура ремонта», «финансовый ресурс» и т.п. (см. рис. 3).

Таблица 2

Сводный отчёт с оптимальным графиком ремонтно-восстановительных работ
 (моделирование начинается с 01.11.2017)

Критерий	Запланированная работа	Дата ближайшей работы	Планирование работ
Толщина ледяной корки	Выезд бригады для избавления от обледенения	20.02.18	Каждые 40 дней в зимнее время
Площадь оголения провода	Выезд бригады для замены непригодных участков кабеля	20.01.18	Каждые 90 дней
Оценка загрязнённости изоляции	Выезд бригады для очистки и замены изоляции	15.02.18	Каждые 80 дней
Количество сломанных изоляторов	Выезд бригады для очистки и замены изоляции	15.02.18	Каждые 80 дней
Количество трещин в опоре	–	–	–
Количество выбоин в опоре	Выезд бригады для установления опорной балки	01.05.18	Каждые 150 дней
Прошедший срок эксплуатации	Замена опоры	01.11.21	Каждые 4 года
Оценка рыхлости конструкции	–	–	–
Угол отклонения опоры	Выезд бригады для выпрямления опоры	01.05.18	Каждые 150 дней
Факт рушения опоры	–	–	–

Разработка алгоритмического и программного обеспечения, интерфейса и логики вывода всех классов виртуальных блоков позволит завершить процедуру формирования интеллектуальной системы планирования ремонтов электросетевого оборудования.

Заключение

Разработанный инструментальный комплекс интеллектуального вывода (интеллектуальная подсистема) для процесса поддержки принятия решения о ремонте и работе по техническому обслуживанию производственного оборудования электросетевой компании, рассмотренный на примере виртуального блока «Промежуточная опора», задаёт вектор дальнейшего проектирования интеллектуальной системы по всей производственной части компании. Технология разработки одного класса виртуальных блоков обобщена и может быть использована для остальных классов виртуальных объектов, участвующих в процессах ТОиР. Представленные возможности получения результатов всех характеристик виртуальных блоков и интеграции их в единую базу данных создают предпосылки для создания человеко-машинной (с участием экспертов) системы формиро-



вания рекомендаций по ремонту и обслуживанию оборудования [2]. Возможность интеграции экспертной информации в интеллектуальную систему с сохранением полной смысловой нагрузки обеспечивается за счёт использования разработанных в [3; 6; 7] подходов к осуществлению логического вывода в иерархических системах. Для удобства работы и наглядности представления результатов прогноза подсистемы предлагается геймифицированный интерфейс и задаваемая пользователем система критериев эффективности функционирования виртуальных блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болдырев, В. В. Имитационная модель функционирования распределённой интеллектуальной системы энергосбережения с ограниченным количеством трудовых ресурсов / В. В. Болдырев, М. А. Горькавый // Сб. научн. тр. XIX Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. – 2015. – С. 235-241.
2. Горькавый, М. А. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки производственных процессов предприятия металлургической отрасли: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Горькавый Михаил Александрович. – Комсомольск-на-Амуре, 2010. – 24 с.
3. Горькавый, М. А. Нечёткий подход к оценке компетентности технического персонала промышленного предприятия / В. А. Соловьев, М. А. Горькавый // Вестник Тихоокеанского гос. ун-та. – 2010. – № 3 – С. 63-72.
4. Трусов, Р. Е. К вопросу разработки имитационной модели комплекса электросетевого оборудования передающей энергосистемы / Р. Е. Трусов, М. А. Горькавый // Объектные системы. – Ростов-на-Дону. – 2015. – С. 61-64.
5. Трусов, Р. Е. Классификация электросетевого оборудования для разработки имитационной модели передающей энергосистемы / Р. Е. Трусов, М. А. Горькавый // Научно-практическое творчество аспирантов и студентов. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – С. 600-602.
6. Трусов, Р. Е. Разработка принципа нечёткого иерархического вывода автоматизированных модулей управления производственными процессами электросетевых компаний / Р. Е. Трусов, М. А. Горькавый, В. А. Соловьев // Информатика и системы управления. – Благовещенск. – 2017. – С. 96-108.
7. Штовба, С. Д. Проектирование нечётких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. – М.: Телеком, 2007. – 288 с.