

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPUTER ENGINEERING
AND CONTROL

УДК 004.82

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94

Имитационная модель управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании*

А.Р. КИНЖАЛИЕВА^а, А.А. ХАНОВА^б

414056, РФ, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Астраханский государственный технический университет

^а satobalova@mail.ru ^б akhanova@mail.ru

Отсутствие необходимого объема инвестиций в электросетевой комплекс за последние 20 лет привело к значительному физическому и технологическому устареванию электрических сетей. В связи с этим задача обеспечения надежности оказания услуг электросетевыми компаниями при минимальном уровне затрат является актуальной. Реализация указанной задачи во многом зависит от сокращения продолжительности перерыва электроснабжения потребителей, что может быть достигнуто путем совершенствования процесса управления дежурным персоналом оперативно-выездных бригад при возникновении аварий и технологических нарушений. При этом современные электросетевые компании ориентированы на минимальные экономически обоснованные затраты и нацелены на повышение эффективности финансово-хозяйственной деятельности за счет рационального использования ресурсов. Предложена структура имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевой компании на среднем уровне абстракции системы. Имитационная модель включает агентную модель, модель системной динамики, компонент геоинформационной системы и модули с экспериментами. Формализовано описание имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений, выделена входная и выходная информация по компонентам модели, структурирована информация, описывающая агентную модель, построена схема модели системной динамики. Проведена проверка адекватности имитационной модели на примере статистических данных компании ПАО «Ленэнерго». Разработаны схемы экспериментов для имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений с целью определения наилучших показателей надежности и затрат.

Разработанный подход может применяться для создания многоподходных имитационных моделей управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений для различных электросетевых компаний путем подбора параметров

* Статья получена 26 декабря 2019 г.

моделей по данным статистической отчетности электросетевых компаний и подключения соответствующих модулей ГИС.

Ключевые слова: имитационное моделирование, агентная модель, системная динамика, надежность, электросетевая компания, управление, оперативно-выездные бригады, затраты

ВВЕДЕНИЕ

Производственные активы электросетевых компаний России обновляются всего на 5...10 % от необходимого по причине недостатка инвестиций в электросетевую комплекс страны, при этом 69 % активов выработали ресурс, а более 80 % нуждается в перевооружении [1]. Такая ситуация приводит к снижению надежности электроснабжения потребителей: перерывы составляют до 70 ч в год на один фидер, среднее число повреждений – 30 на 100 км [1]. В связи с этим обеспечение надежного энергоснабжения потребителей является одним из ключевых стратегических приоритетов электросетевых компаний России, ее достижение оценивается уровнем надежности оказываемых услуг [2] (рис. 1, I). На показатель надежности производственных активов электросетевых компаний непосредственно влияет средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей [3]. В связи с этим актуальной является задача поиска путей снижения средней продолжительности перерывов передачи электроэнергии [4].

Решать эту задачу, с одной стороны, можно предотвращением перерывов электроснабжения потребителей путем вложения средств в элементную надежность электрических сетей за счет использования новых технических решений и устройств [5–8], внедрения современных методов управления [9–11], привлечения квалифицированного персонала [12, 13] (рис. 1, II). В настоящее время реализация инвестиционных программ электросетевых компаний направлена главным образом как раз на замену устаревшего аварийного оборудования.

С другой стороны, вложение средств можно осуществить в интеллектуализацию электрической сети и тем самым повысить эффективность работы оперативно-выездных бригад (ОВД) при возникновении аварий и технологических нарушений, определить необходимое и достаточное количество ресурсов (в том числе трудовых) и сократить зону распространения повреждений [14, 15] (рис. 1, II). В работах российских и зарубежных авторов описано применение методов искусственного интеллекта для оптимизации ремонтных работ и управления ими [16, 17], определения места повреждения линий электропередачи, диагностики систем и прогнозирования надежности на основе нейронных сетей [18–20], теории нечетких множеств для оценки рисков [21, 22]. Онтологический инжиниринг систем ситуационного управления, поддержки принятия решений в области электроэнергетики рассмотрен в работах [23, 24]. Значительное число работ посвящено анализу надежности систем электроснабжения на основе имитационного моделирования [25–27]. Это обусловлено тем, что процесс управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений является сложным, с огромным, практически необозримым числом возможных ситуаций и состояний, в которых при реализации задачи снижения продолжительности перерывов передачи электроэнергии происходит процесс обслуживания потока заявок на ремонт,

распределения материальных ресурсов и формирования оперативно-выездных бригад [27]. При этом стохастический характер возникновения аварийных ситуаций, на который влияют особенности работы оперативно-выездных бригад, и распределения материально-технических ресурсов подразумевает целесообразность выбора метода многоподходного имитационного моделирования в качестве инструмента исследования [28].

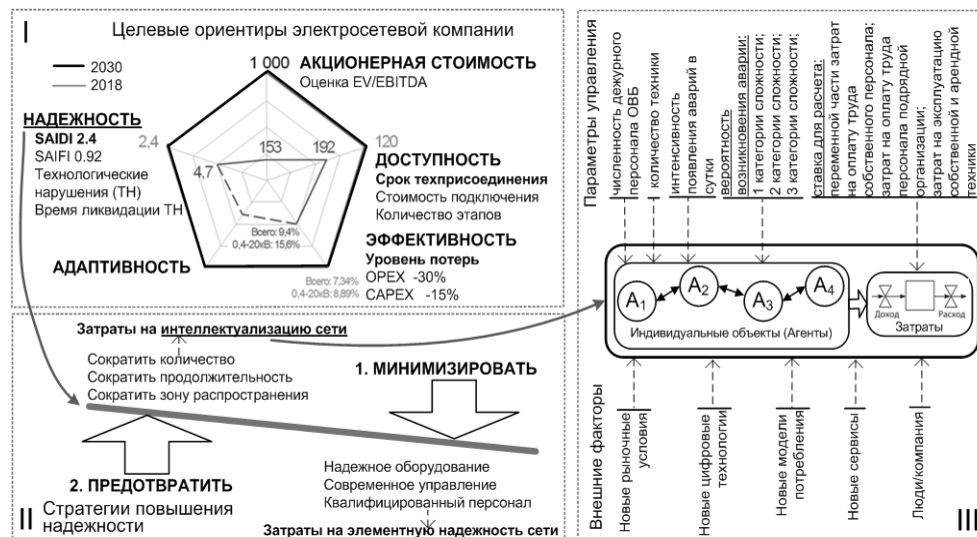


Рис. 1. Соотношение целевых ориентиров, стратегий повышения надежности и системы управления ОБВ при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевой компании

Fig. 1. Correlation of targets, strategies for increasing the reliability and the AES management system in the event of accidents and technological disturbances in the power grid company

Основной задачей работы является разработка имитационной модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений, позволяющей моделировать ситуации достижения желаемого уровня надежности оказываемых услуг электросетевых компаний.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процесс управления оперативно-выездными бригадами выполняется в соответствии с регламентом выполнения действий при возникновении аварий и технологических нарушений, в котором закреплён следующий порядок. В случае получения оповещения о возникновении аварии специалист Центра управления сетями (ЦУС) определяет категорию сложности аварии, затем определяет достаточность численности дежурного персонала на базе расположения ОБВ. Исходя из этого специалист ЦУС формирует бригаду и обеспечивает ее техникой. Численный состав бригады зависит от категории сложности аварии и предполагаемого времени ее устранения, количество техники зависит от численного состава бригады (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Численный состав ОВБ и количество техники, комплектуемые при возникновении аварий**The team size of ATS and the number of technological units completed in the event of accidents**

Категория сложности аварии	Состав бригады, чел.	Количество техники, ед.	Время устранения аварии, ч
1	25	5	$3,3 \pm 0,2$
	21	5	$3,8 \pm 0,2$
	17	4	$4,3 \pm 0,2$
2	15	3	$2,6 \pm 0,2$
	13	3	$2,9 \pm 0,2$
	10	2	$3,2 \pm 0,2$
3	7	2	$1,4 \pm 0,2$
	5	1	$1,7 \pm 0,2$
	3	1	$2,0 \pm 0,2$

В случае недостаточности численности собственного дежурного персонала на место возникновения аварии направляется весь имеющийся на базе расположения ОВБ резерв, а также привлекается подрядная организация для доукомплектования ОВБ до минимального состава. При необходимости (когда весь собственный персонал задействован на аварийно-восстановительных работах) привлекается подрядная организация, в таких случаях задействуется минимальный состав бригады подрядной организации. Учитывая то, что труд рабочих подрядной организации для предприятия может обходиться значительно дороже, затраты на содержание штатного персонала соизмеряются с затратами на оплату труда привлеченного персонала.

Для определения повышения уровня надежности электроснабжения, в том числе за счет снижения продолжительности отключений электроэнергии, используются международный показатель SAIDI (System Average Interruption Duration Index) [13] – эквивалентная продолжительность перерывов в электроснабжении на одного потребителя, показывает среднее время отключения одного потребителя в системе электроснабжения и рассчитывается по формуле

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i N_i}{N_t}, \quad (1)$$

где N_i – количество потребителей в системе, в которой произошел i -й перерыв в электроснабжении, $i = \overline{1, n}$; r_i – время i -го перерыва в часах, $i = \overline{1, n}$;

N_t – общее количество потребителей в системе. В концепции «Цифровая трансформация 2030» [2] компанией Россети задано снижение целевого значения показателя SAIDI с 4,7 до 2,4 к 2030 году (см. рис. 1, I).

Предлагается построить имитационную модель процесса управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевых компаниях, которая будет учитывать показатель r_i , непосредственно влияющий на показатель SAIDI, и которая предназначена для определения:

1) минимального значения «Средняя продолжительность перерыва электроснабжения» \bar{F} ;

2) достаточной численности дежурного персонала A' ОББ и количества техники B' , задействованных при устранении аварий и технологических нарушений;

3) минимального значения суммы затрат Z , связанных с оплатой труда как собственного, так и привлеченного персонала, а также затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники, задействованных при устранении аварий и технологических нарушений.

Рассматриваемый процесс предполагает множество индивидуальных объектов (ОББ, ЦУС, трансформаторные подстанции (ТС)) и их взаимосвязь, поэтому основная часть имитационной модели будет построена на основе агентного подхода (см. рис. 1, III). При использовании агентного метода выбран средний уровень абстракции: в обработку включаются только значимые факторы (порядок формирования ОББ и комплектования техникой, время устранения аварии и т. д.), а такие факторы, как материалы, используемые при аварийно-восстановительных работах, время следования к месту возникновения аварии и т. п., не включаются. Учитывая сложность рассматриваемого процесса, для построения отдельных частей системы будет использован системно-динамический подход [28].

Рассмотрим структуру многоподходной имитационной модели процесса управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий в электросетевых компаниях.

2. СТРУКТУРА И ЛОГИКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Разрабатываемая модель должна имитировать процесс управления ОББ при возникновении аварий. Имитационная модель включает в себя модуль системной динамики расчета затрат, агентную модель управления ОББ при возникновении аварий, модуль анимации в виде ГИС-карты, на которой ГИС-точками отмечены энергообъекты, а также модуль с экспериментами (рис. 2). В качестве среды разработки выбран пакет имитационного моделирования Anylogic.

Для моделирования процесса возникновения аварий выбран пуассоновский закон распределения вероятностей с интенсивностью N аварий в сутки. С вероятностью P_1 моделируется возникновение аварий первой категории сложности, с вероятностью P_2 – аварий второй категории сложности, с вероятностью P_3 – аварий третьей категории сложности.

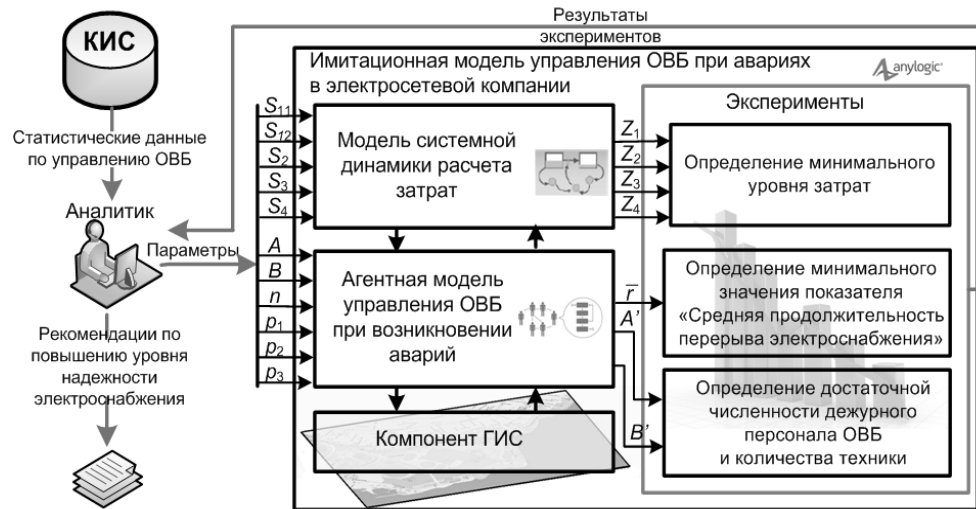


Рис. 2. Структура имитационной модели управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании

Fig. 2. The structure of the simulation model of ATS management in the event of accidents in the power grid company

Исходя из того, что ежедневно дежурят оперативно-выездные бригады (ОВБ) общей численностью A человек и B единиц техники, процесс их формирования, комплектации техникой осуществляется в соответствии с зависимостью от категории сложности аварий и времени устранения аварии (табл. 1).

В случае недостаточности численности собственного персонала в системе должен быть реализован механизм временной задержки D на докомплектацию ОВБ привлеченным персоналом, равной трем минутам на каждого человека привлеченного персонала.

В модели отражена упрощенная схема начисления затрат на оплату труда персонала и затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники:

- затраты на оплату труда собственного Z_1 персонала рассчитываются исходя из постоянной части, равной S_{11} рублей в сутки и переменной части; переменная часть начисляется только тому персоналу, который был задействован при устранении аварий и ликвидации их последствий, и рассчитывается в зависимости от времени устранения аварии T и ставки, равной S_{12} рублей за одного человека в час;
- затраты на оплату труда персонала подрядной организации Z_2 зависят от времени устранения аварии T и рассчитываются по ставке S_2 рублей за одного человека в час выполненной работы;
- затраты, связанные с эксплуатацией техники Z_3 , зависят от времени эксплуатации и рассчитываются по ставке S_3 рублей за один машиночас работы техники;
- затраты, связанные с арендой техники Z_4 , зависят от времени эксплуатации в аренде и рассчитываются по ставке S_4 рублей за один машиночас работы техники.

Аналитик (см. рис. 2) может выполнять следующие функции: запустить модель, задать значения параметров, управлять выполнением модели, просматривать и копировать результаты моделирования, экспортировать модель в AnyLogic Private Cloud, просматривать модель в AnyLogic Private Cloud.

3. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Определим агентную модель управления ОБВ при возникновении аварий в электросетевой компании как

$$A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}, \quad (2)$$

где A_1 – агент, моделирующий ТС и аналогичные энергообъекты и их реакцию на возникновение аварий первой, второй или третьей категории сложности; A_2 – агент, моделирующий ЦУС и его действия при поступлении сигнала о возникновении аварии; A_3 – агент, моделирующий ОБВ; A_4 – агент, предназначенный для описания высокоуровневого объекта, где взаимодействуют агенты A_1, A_2, A_3 .

Агент A_1 определим как

$$A_1 = \{Fn_1, Sch\}, \quad (3)$$

где Fn_1 – функция агента (написанная языке Java), предназначенная для определения категории аварии; Sch – диаграмма состояний агента (стейт-чарт), предназначенная для описания поведения агента в процедуре возникновения и устранения аварии.

Диаграмму состояний агента (стейтчарт) Sch определим как

$$Sch = \{Bgn, Bc, St, Trn, Var_1\}, \quad (4)$$

где Bgn – начало диаграммы состояний; Bc – указатель начального состояния; St – множество состояний; Trn – множество переходов; Var_1 – множество переменных.

Множество переменных Var_1 определим как

$$Var_1 = \{Ctg, Br, Str_1, Str_2\}, \quad (5)$$

где Ctg – категория аварии; Br – бригада; Str_1 – начало движения бригады к месту аварии; Str_2 – начало простоя на базе расположения ОБВ.

Агент A_2 определим как

$$A_2 = \{Fn_2, Fn_3, Evt\}, \quad (6)$$

где Fn_2 – функция агента (написанная языке Java), предназначенная для определения ближайшего от места возникновения аварии пункта формирования бригады; Fn_3 – функция агента (написанная на языке Java), описывающая алгоритм формирования бригады; Evt – событие (специальный элемент

AnyLogic), предназначенное для задания условий, при выполнении которых запускается действие – распределение по бригадам.

Агент A_3 определим как

$$A_3 = \{Var_2, Pr_1\}, \quad (7)$$

где Var_2 – множество переменных агента A_3 ; Pr_1 – множество параметров агента A_3 .

Множество переменных Var_2 определим как

$$Var_2 = \{S, P, F\}, \quad (8)$$

где S – станция; P – пункт формирования бригады; F – статус «свободна».

Множество параметров Pr_1 определим как

$$Pr_1 = \{SP, ST, PP, PT\}, \quad (9)$$

где SP – собственный персонал; ST – собственная техника; PP – привлеченный персонал; PT – привлеченная техника.

Агент A_4 определим как

$$A_4 = \{Pop_1, Pop_2, A_2, Pr_2, M\}, \quad (10)$$

где Pop_1 – популяция агентов A_1 ; Pop_2 – популяция агентов A_3 ; Pr_2 – множество параметров агента A_4 ; M – модель системной динамики.

Модель системной динамики M предназначена для аккумулярования суммы затрат на оплату труда собственного персонала и персонала подрядной организации, а также суммы затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники. Схема модели системной динамики представлена на рис. 3.



Рис. 3. Схема модели системной динамики

Fig. 3. Scheme of the system dynamics model

Множество параметров Pr_2 определим как

$$Pr_2 = \{A, B, D, N, P_1, P_2, P_3, S_{11}, S_{12}, S_2, S_3, S_4\}, \quad (11)$$

где A – численность дежурного персонала ОВБ; B – количество техники; D – время задержки на докомплектацию ОВБ привлеченным персоналом; N – интенсивность появления аварий в сутки; P_1 – вероятность возникновения аварии первой категории сложности; P_2 – вероятность возникновения аварии второй категории сложности; P_3 – вероятность возникновения аварии третьей категории сложности; S_{11} – постоянная часть затрат на оплату труда собственного персонала; S_{12} – ставка для расчета переменной части затрат на оплату труда собственного персонала; S_2 – ставка для расчета затрат на оплату труда персонала подрядной организации; S_3 – ставка для расчета затрат, связанных с эксплуатацией техники; S_4 – ставка для расчета затрат, связанных с арендой техники.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для оценки степени уверенности в достаточной корректности выводов о реальной системе, полученных в результате обращений к модели, проведено сравнение значений выходных данных информационной системы со значениями аналогичных показателей реальной системы. Рассмотрим реализацию модели на основании данных годовой отчетности ПАО «Ленэнерго» за период с 2015 по 2019 г. Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей по данным отчетности ПАО «Ленэнерго» составляет 2,38 ч (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Расчет среднего значения показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей» по данным годовой отчетности

Calculation of the average value of the indicator "An average duration of power supply interruption to consumers" according to the annual report

Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей, ч					
в 2015 г.	в 2016 г.	в 2017 г.	в 2018 г.	в 2019 г.	Среднее значение
3,8	2,9	2,0	1,7	1,5	2,38

Для оценки адекватности информационной системы по показателю «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей» проведено сравнение результатов простого эксперимента со средним значением показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей», рассчитанного на основании данных годовой отчетности (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Сравнительный анализ значений показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей»

A comparative analysis of the values of the indicator "An average duration of power supply interruption to consumers"

Номер эксперимента	Средняя длительность перерыва электроснабжения за год модельного времени, ч	Относительное отклонение от среднего значения показателя, рассчитанного на основании данных годовой отчетности, %
1	2,286	–3,95
2	2,279	–4,24
3	2,283	–4,08
...
100	2,287	–3,91
Среднее значение	2,286	–3,95

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что отклонение показателя «Средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей», полученного по результатам экспериментов, от среднего значения данного показателя, рассчитанного на основании данных годовой отчетности, является допустимым как в целом по всем экспериментам, так и отдельно по каждому эксперименту.

Анимационная схема модели содержит следующие элементы (рис. 4):

- ГИС-карта «map» предназначена для задания ГИС-пространства, в котором «обитают» агенты. Тип карты – тайловая, загружена с сайта поставщика ПО AnyLogic (сервер OpenStreetMap);
- коллекции используются для задания объекта данных, объединяющего несколько однотипных элементов (ГИС-точек). Коллекция «места расположения» объединяет точечные объекты (ГИС-точки), обозначающие трансформаторные подстанции и другие энергообъекты, а коллекция «точки сбора» – пункты сбора ОВБ. ГИС-точки, размещенные на карте, имеют свои координаты широты и долготы, заданные в градусах;
- анимационная схема модели системной динамики;
- временные графики предназначены для отображения временного тренда затрат на оплату труда собственного персонала Z_1 ; затрат на оплату труда персонала подрядной организации Z_2 ; затрат, связанных с арендой техники Z_3 ; затрат, связанных с эксплуатацией собственной техники Z_4 ;
- график «Продолжительность перерыва электроснабжения потребителей», отображающий среднюю длительность перерыва электроснабжения потребителей за всё время;

• гистограмма «Продолжительность перерыва электроснабжения потребителей», отображающая данные о распределении продолжительностей перерыва электроснабжения потребителей по заданным интервалам. Гистограмма разбивает временную шкалу на 10 интервалов. Тот интервал, в который попадает большее число продолжительностей, становится выше, что означает большую плотность попаданий в данный интервал.

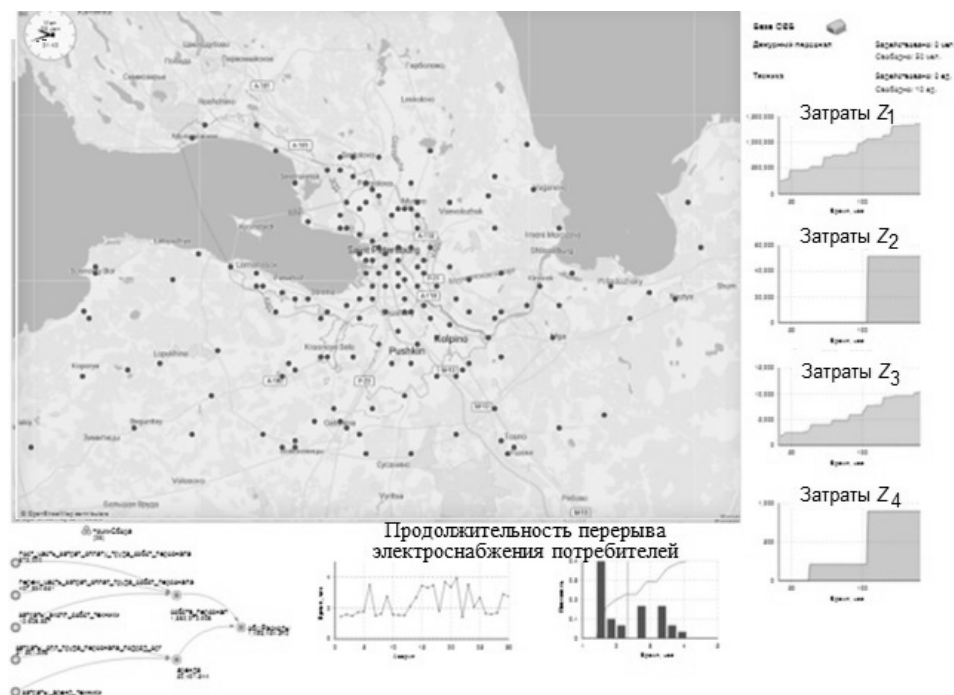


Рис. 4. Анимационная схема модели управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании

Fig. 4. An animation diagram of the ATS management model in case of accidents in the power grid company

В зависимости от того, какую задачу требуется решить с помощью имитационной модели и какую информацию необходимо получить о системе, проведена серия экспериментов, при этом учтены ограничения на ресурсы.

Для определения оптимальной численности дежурного персонала и оптимального количества техники с целью минимизации затрат заданы следующие ограничения на ресурсы (рис. 5).

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
числоСтанций	фиксированный	153			
A	набор значений	75	87	1	
B	набор значений	20	38	1	

Рис. 5. Ограничения ресурсов для оптимизационного эксперимента № 1

Fig. 5. Resource constraints for optimization experiment No. 1

В результате проведенного эксперимента получен наилучший результат (лучшее допустимое значение целевой функции) – $Z = 224\,609\,199,40$ рубля, который достигается при значениях параметра $A' = 75$ и параметра $B' = 37$ (рис. 6). По оси X откладываются номера итераций, а по оси Y – значение целевого функционала (Z).

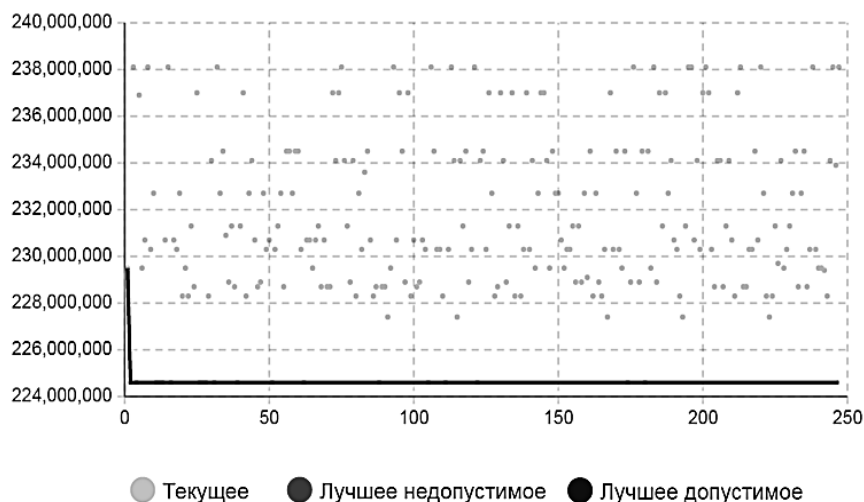


Рис. 6. Результат оптимизационного эксперимента № 1

Fig. 6. Result of optimization experiment No. 1

Для определения оптимальной численности дежурного персонала и оптимального количества техники с целью сокращения продолжительности перерыва электроснабжения заданы следующие ограничения на ресурсы (рис. 7).

Параметр	Тип	Значение			
		Мин.	Макс.	Шаг	Начальное
числоСтанций	фиксированный	153			
A	набор значений	87	200	1	0
B	набор значений	38	80	1	

Рис. 7. Ограничения ресурсов для оптимизационного эксперимента № 2

Fig. 7. Resource constraints for optimization experiment No. 2

В результате проведения экспериментов найдено лучшее допустимое значение целевой функции $\bar{F} = 2,238$ ч, которое достигается при значениях параметра $A' = 111$ и параметра $B' = 50$ (рис. 8). По оси X откладываются номера итераций, а по оси Y – значение целевого функционала (\bar{F}).

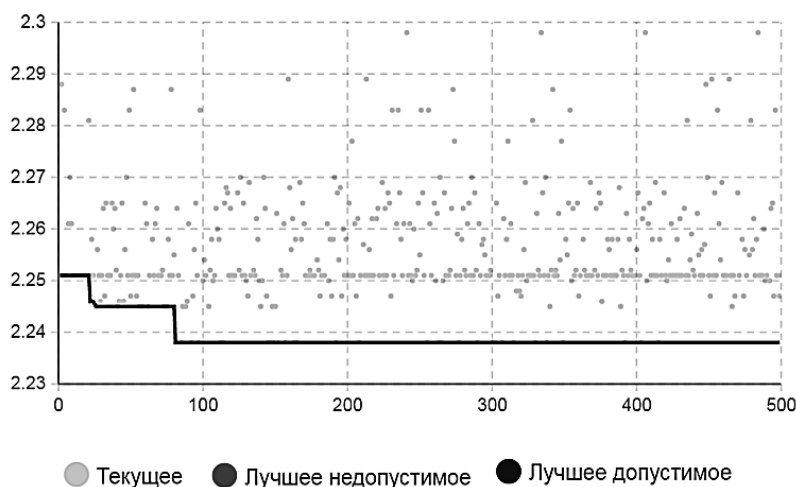


Рис. 8. Результат оптимизационного эксперимента № 2

Fig. 8. Result of optimization experiment No. 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная в данной работе структура имитационной модели управления ОВБ при возникновении аварий в электросетевой компании позволяет создавать многоподходные модели управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений.

Положительный эффект от внедрения моделей управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений заключается в следующем:

- повышении удовлетворенности конечных потребителей за счет снижения средней продолжительности перерыва электроснабжения;
- повышении эффективности при принятии тактических решений в области оптимизации ресурсов, задействованных при устранении аварий (технологических нарушений).

Совокупность указанных эффектов позволит обеспечить качественное выполнение социальной функции электросетевых компаний в существующих экономических условиях и модели рынка.

Разработанная имитационная модель предполагает возможность добавления и (или) изменения значимых факторов, влияющих на уровень абстракции, изменения алгоритмов формирования оперативно-выездными бригадами, пополнения коллекции мест расположения энергообъектов на ГИС-карте и изменения других настроек, что позволит адаптировать систему к меняющимся условиям деятельности электросетевой компании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Как радикально повысить надежность электроснабжения, вложив минимум средств? – URL: https://www.startbase.ru/download.html?file=file%2F13154216&title=Rec15_A1_5_General_Idea.pdf (дата обращения: 14.10.2020).

2. Концепция «Цифровая трансформация 2030». – М.: ПАО «Россети», 2018. – URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 14.10.2020).
3. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике : монография / отв. ред.: Н.И. Воропай, Г.Ф. Ковалёв. – М.: Энергия, 2013. – 212 с.
4. Strategic decision support in the process of manufacturing systems management / O. Protalinskiy, A. Andryushin, I. Shcherbatov, A. Khanova, N. Urazaliev // Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018. – Moscow, 2018. – P. 8551760.
5. Орлов П.С., Морозов В.В., Кочкин С.П. Технические мероприятия повышения надежности электроснабжения в АПК // Вестник АПК Верхневолжья. – 2017. – № 3 (39). – С. 94–100.
6. Вертугин А.А. Повышение надежности электроснабжения промышленных предприятий за счет применения быстродействующего резервного источника питания // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2017. – № 2. – С. 196–202.
7. Борисов А.Л. Внедрение реклоузеров в целях повышения надежности электроснабжения // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2017. – № 9. – С. 108–110.
8. Зацаринная Ю.Н., Маргулис С.М., Федотов Е.А. Применение динамических компенсаторов искажений напряжения для повышения надежности системы электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – Т. 10, № 1 (37). – С. 55–63.
9. Таранов М.А., Корчагин П.Т. Системный анализ надежности и перспективы ее повышения для систем электроснабжения потребителей // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3 (50). – С. 55.
10. Шарыгин М.В. Принципы организации банка мероприятий по управлению надежностью электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2014. – № 9. – С. 6–9.
11. Автоматизированная система управления мобильными бригадами ПАО «МОЭСК»: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019614776. – Заявка № 2019613198; заявл. 25.03.2019; зарег. 11.04.2019.
12. Купоносова В.С., Андрюшин А.В., Щербатов И.А. Управление производственными активами на основе стоимостных и надежностных характеристик // Энергосбережение и эффективность в технических системах: материалы V Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – М., 2018. – С. 253–254.
13. Мусаев Т.А., Шагеев С.Р. Повышение эффективности формирования целевых значений показателей надежности электроснабжения SAIFI, SAIDI для предприятий электрических сетей // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции: в 3 т. – Казань, 2018. – С. 164–167.
14. Елтышев Д.К. Интеллектуальные модели комплексной оценки технического состояния высоковольтных выключателей // Информационно-управляющие системы. – 2016. – № 5 (84). – С. 45–53.
15. Овсянников А.А. Методика управления затратами на повышение надежности функционирования межрегиональных распределительных электросетевых компаний // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2012. – № 1 (29). – С. 49–54.
16. Оптимизация ремонтных программ энергетического оборудования с использованием методов искусственного интеллекта / В.А. Бородин, А.В. Андрюшин, О.М. Проталинский, А.А. Ханова // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019: материалы двенадцатой международной конференции / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – М., 2019. – С. 576–579.
17. Проталинский О.М., Проталинский И.О., Кладов О.Н. Система оптимального управления производственными активами энергетических предприятий // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2017. – № 4 (93). – С. 5–8.
18. Применение нейронных сетей в целях определения места повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи / И.Н. Горбунов, С.Г. Захаренко, С.А. Захаров, Т.Ф. Маляхова // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – № 4 (144). – С. 48–55.
19. Application of Kohonen's self-organizing network to the diagnosis system for rotating machinery / M. Tanaka, M. Sakawa, I. Shiromaru, T. Matsumoto // 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century. – Vancouver, BC, Canada, 1995. – Vol. 5. – P. 4039–4044.

20. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики / О.М. Проталинский, И.А. Щербатов, А.А. Ханова, И.О. Проталинский // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1 (59). – С. 93–105.
21. Малафеев А.В., Юлдашева А.И. Использование теории нечетких множеств для оценки производственных рисков при управлении режимами промышленной системы электро-снабжения // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI международной научно-технической конференции. – Иваново, 2015. – С. 294–297.
22. Бобырь М.В., Милостная Н.А. Анализ методов повышения надежности нечетких систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2017. – № 7 (157). – С. 22–30.
23. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 1 (23). – С. 66–76.
24. Онтологический инжиниринг ситуационного управления в энергетике / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.Н. Макагонова // Знания – Онтологии – Теории (ЗОНТ-2015): материалы Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск, 2015. – Т. 2. – С. 36–43.
25. Степанов В.М., Базыль И.М. Имитационное и физическое моделирование систем электроснабжения для повышения надежности их работы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 12-2. – С. 139–142.
26. Дробов А.В., Галушко В.Н. Имитационная модель надежности системы электроснабжения // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов. – Уфа, 2016. – С. 228–231.
27. Уразалиев Н.С., Ханова А.А., Тумпуров В.С. Концептуальная структура имитационной модели логистических процессов управления ремонтами предприятия электрических сетей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 2. – С. 91–100.
28. Борщев А. Как строить простые, красивые и полезные модели сложных систем // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД 2013). – Казань, 2013. – Т. 1. – С. 21–34.

Кинжалыева Алия Рахметовна, студентка кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление исследований – имитационное моделирование электросетевых компаний. Имеет 2 публикации. E-mail: satobalova@mail.ru

Ханова Анна Алексеевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная информатика» Астраханского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – стратегическое управление сложными системами на основе имитационного моделирования. Имеет более 170 публикаций, в том числе две монографии. E-mail: akhanova@mail.ru

Kinzhaliyeva Aliya R., student at the department of applied informatics, Astrakhan State Technical University. The main area of her research is simulation modeling of power grid companies. She has 2 publications. E-mail: satobalova@mail.ru

Hanova Anna A., D.Sc. (Eng.), professor at the department of applied informatics, Astrakhan State Technical University. The main area of her research is strategic management of complex systems based on simulation. She is the author of over 170 publications, including two monographs. E-mail: akhanova@mail.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94

A simulation model for managing field service teams of a power grid company*

A.R. KINZHALIEVA^a, A.A. KHANOVA^b

Astrakhan State Technical University, 16, Tatischeva Street, Astrakhan, 414056, Russian Federation

^a *satobalova@mail.ru* ^b *akhanova@mail.ru*

Abstract

The lack of the necessary investment in the electric grid complex over the past 20 years has led to a significant physical and technological obsolescence of electrical networks. In this regard, the task of ensuring the reliability of the provision of services by electric grid companies with a minimum level of costs is urgent. The implementation of this task in many respects depends on the reduction of the duration of the interruption of power supply to consumers, which can be achieved by improving the process of management of duty personnel of field service teams in case of accidents and technological disturbances. At the same time, modern grid companies were focused on minimum economically sound costs and aimed at improving the efficiency of financial and economic activities through the rational use of resources. The structure of a simulation model of field service team management in the event of accidents and technological disturbances in an electric grid company at the middle level of system abstraction is proposed. The simulation model includes an agent model, a system dynamics model, a component of the geo information system and experiments modules. The description of the simulation model of field service team management in the event of accidents and technological disturbances is formalized, input and output information on the components of the model is selected, the information describing the agent model is structured, and a diagram of the system dynamics model is built. The adequacy of the simulation model was checked based on the statistics of Lenenergo PJSC. Experimental schemes have been developed for a simulation model of operational team management in the event of accidents and technological disturbances in order to determine the best reliability and cost indicators.

The developed approach can be used to create multi-approach simulation models for the management of operational teams in the event of accidents and technological disturbances for various electric grid companies by selecting modes according to the statistical reports of the electric grid company and connecting the corresponding GIS modules.

Keywords: simulation, agent model, system dynamics, reliability, power grid company, management, field service teams, costs

REFERENCES

1. *Kak radikal'no povysit' nadezhnost' elektrosnabzheniya, vlozhiv minimum sredstv?* [How to radically increase the reliability of electricity supply by investing a minimum of funds?]. Available at: https://www.startbase.ru/download.html?file=file%2F13154216&title=Rec15_AI_5_General_Idea.pdf (accessed 14.10.2020).
2. *Kontseptsiya "Tsifrovaya transformatsiya 2030"* [Concept "Digital Transformation 2030"]. Moscow, Rosseti Publ., 2018. Available at: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (accessed 14.10.2020).
3. Voropai N.I., Kovalev G.F., eds. *Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike* [The concept of ensuring reliability in the electric power industry]. Moscow, Energiya Publ., 2013. 212 p.
4. Protalinskiy O., Andryushin A., Shcherbatov I., Khanova A., Urazaliev N. Strategic decision support in the process of manufacturing systems management. *Proceedings of 2018 11th International Conference "Management of Large-Scale System Development", MLSD 2018*, Moscow, 2018, p. 8551760.
5. Orlov P.S., Morozov V.V., Kochkin S.P. *Tekhnicheskie meropriyatiya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya v APK* [Technical measures to improve the reliability of power supply in the agro-

* Received 26 December 2019.

industrial complex]. *Vestnik APK Verhnevolzh'ya = Agroindustrial Complex of Upper Volga Region Herald*, 2017, no. 3 (39), pp. 94–100.

6. Vertugin A.A. Povyshenie nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy za schet primeneniya bystrodeistviyushchego rezervnogo istochnika pitaniya [Improving the reliability of power supply to industrial enterprises due to the use of a fast-acting backup power source]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta = Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*, 2017, no. 2, pp. 196–202.

7. Borisov A.L. Vnedrenie reklouzerov v tselyakh povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya [Introduction of advertisers in order to improve the reliability of electricity supply]. *Nauchno-obrazovatel'nyi potentsial molodezhi v reshenii aktual'nykh problem XXI veka = The scientific and educational potential of youth in solving the actual problems of the XXI century*, 2017, no. 9, pp. 108–110.

8. Zatsarinnaya Yu.N., Margulis S.M., Fedotov E.A. Primenenie dinamicheskikh kompensatorov iskazhenii napryazheniya dlya povysheniya nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Using dynamic voltage distortion compensators to increase the reliability of the power supply system]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Kazan state power engineering university bulletin*, 2018, Vol. 10, no. 1 (37), pp. 55–63.

9. Taranov M.A., Korchagin P.T. Sistemnyi analiz nadezhnosti i perspektivy ee povysheniya dlya sistem elektrosnabzheniya potrebiteli [System analysis of reliability and prospects for its improvement for consumer power supply systems]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2018, no. 3 (50), p. 55.

10. Sharygin M.V. Printsipy organizatsii banka meropriyatiy po upravleniyu nadezhnost'yu elektrosnabzheniya [Principles of organization of the bank of measures for power supply reliability management]. *Promyshlennaya energetika = Industrial power engineering*, 2014, no. 9, pp. 6–9.

11. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya mobil'nyimi brigadami PAO "MOESK" [Automated system for managing mobile teams of PAO "MOESK"]. The Certificate on official registration of the computer program. No. 2019614776, 2019.

12. Kuponosova V.S., Andryushin A.V., Shcherbatov I.A. [Management of production assets on the basis of cost and reliability characteristics]. *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh: materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, molodykh uchennykh i spetsialistov* [Energy saving and efficiency in technical systems: materials of the V International scientific and technical conference of students, young scientists and specialists], Moscow, 2018, pp. 253–254. (In Russian).

13. Musaev T.A., Shageev S.R. [Improving the efficiency of generating target values of reliability indicators of power supply SAIFI, SAIDI for electric grid enterprises]. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: materialy IX Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Electric power industry through the eyes of youth - 2018: materials of the IX International Youth Scientific and Technical Conference], Kazan, 2018, pp. 164–167. (In Russian).

14. Eltyshchev D.K. Intellektual'nye modeli kompleksnoi otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya vysokovol'tnykh vyklyuchatelei [Intelligent models of integrated assessment of technical condition of high-voltage switches]. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*, 2016, no. 5 (84), pp. 45–53.

15. Ovsyannikov A.A. Metodika upravleniya zatratami na povyshenie nadezhnosti funktsionirovaniya mezhregional'nykh raspredelitel'nykh elektrosetevykh kompanii [The method of reliability functioning costs management for switch power network companies]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie = Modern High Technologies. Regional Application*, 2012, no. 1 (29), pp. 49–54.

16. Borodin V.A., Andryushin A.V., Protalinskii O.M., Khanova A.A. [Optimization of re-installation programs of energy equipment using artificial intelligence methods]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLSD'2019: materialy dvenadtsatoi mezhdunarodnoi konferentsii* [Management of large-scale system development MLSD'2019], Moscow, 2019, pp. 576–579. (In Russian).

17. Protalinskii O.M., Protalinskii I.O., Kladov O.N. Sistema optimal'nogo upravleniya proizvodstvennymi aktivami energeticheskikh predpriyatiy [System of optimal management of production assets of energy enterprises]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*, 2017, no. 4 (93), pp. 5–8. (In Russian).

18. Gorbunov I.N., Zakharenko S.G., Zakharov S.A., Malakhova T.F. Primenenie neironnykh setei v tselyakh opredeleniya mesta povrezhdeniya vozdukhnykh i kabel'nykh linii elektroperedachi [Application of neural networks for determining the location of damage to air and cable electrical transmission lines]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*, 2019, no. 4 (144), pp. 48–55.

19. Tanaka M., Sakawa M., Shiromaru I., Matsumoto T. Application of Kohonen 's self-organizing network to the diagnosis system for rotating machinery. 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, Vancouver, BC, Canada, 1995, vol. 5, pp. 4039–4044.
20. Protalinskii O.M., Shcherbatov I.A., Khanova A.A., Protalinskii I.O. Adaptivnaya sistema prognozirovaniya nadezhnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya ob"ektov energetiki [Adaptive system for predicting the reliability of technological equipment of energy facilities]. *Informatika i sistemy upravleniya = Information Science and Control Systems*, 2019, no. 1 (59), pp. 93–105.
21. Malafeev A.V., Yuldasheva A.I. [Using the theory of fuzzy sets to assess production risks in managing the regimes of the industrial electric power supply system]. *Elektroenergetika glazami molodezhi: trudy VI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Electric power industry through the eyes of youth: proceedings of the VI International Youth Scientific and Technical Conference], Ivanovo, 2015, pp. 294–297. (In Russian).
22. Bobyr' M.V., Milostnaya N.A. Analiz metodov povysheniya nadezhnosti nechetkikh sistem [Analysis of methods for improving the reliability of fuzzy systems]. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii = Herald of computer and information technologies*, 2017, no. 7 (157), pp. 22–30.
23. Massel' L.V., Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskii inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskikh reshenii v energetike [Ontological engineering to support strategic decision-making in power engineering]. *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of Designing*, 2017, Vol. 7, no. 1 (23), pp. 66–76.
24. Massel' L.V., Massel' A.G., Vorozhova T.N., Makagonova N.N. [Ontological engineering of situational management in the energy sector]. *Znaniya – Ontologii – Teorii (ZONT-2015): materialy Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [The All-Russian Conference “Knowledge – Ontology – Theory” (KONT-13)], Novosibirsk, 2015, pp. 36–43. (In Russian).
25. Stepanov V.M., Bazyl' I.M. Imitatsionnoe i fizicheskoe modelirovanie sistem elektrosnabzheniya dlya povysheniya nadezhnosti ikh raboty [Simulation and physical modeling of power supply systems to increase the reliability of their work]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2015, no. 12-2, pp. 139–142.
26. Drobov A.V., Galushko V.N. Imitatsionnaya model' nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Simulation model of reliability of the electrical supply system]. *Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov* [Improving the reliability and energy efficiency of electrical systems and complexes]. Ufa, 2016, pp. 228–231.
27. Urazaliev N.S., Khanova A.A., Tumpurov V.S. Kontseptual'naya struktura imitatsionnoi modeli logicheskikh protsessov upravleniya remontami predpriyatiya elektricheskikh setei [Conceptual structure of the imitation model of logistic processes for managing repairs of the electric grid enterprise]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2018, no. 2, pp. 91–100.
28. Borshchev A. [How to build simple, beautiful and useful models of complex systems]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD 2013)* [Simulation modeling. Theory and Practice "IMMOD-2013"], Kazan, 2013, vol. 1, pp. 21–34. (In Russian).

Для цитирования:

Кинжалieva А.Р., Ханова А.А. Имитационная модель управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 77–94. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94.

For citation:

Kinzhaliyeva A.R., Khanova A.A. Imitatsionnaya model' upravleniya operativno-vyezdnyimi brigadami elektrosетеvoi kompanii [A simulation model for managing field service teams of a power grid company]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 77–94. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-77-94.