

- processes for data science solutions. *Communications in Computer and Information Science*, 2017, pp. 21–34.
9. Wan, S. Asset Performance Management for Power Grids. *Energy Procedia*, 2017, pp. 611–616.
 10. *About The Lens*. Available at: <https://about.lens.org/> (accessed 30.01.2022).
 11. Sinha, A. et al. An Overview of Microsoft Academic Service (MAS) and Applications. *Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web*. New York, NY, USA, ACM, 2015, pp. 243–246.
 12. Wang, K. et al. A Review of Microsoft Academic Services for Science of Science Studies. *Frontiers in Big Data*, 2019, vol. 2.
 13. Nguyen, T. V., Kravets, A. G., Duong, Q. H. T. Analiz i prognoz tendentsiy ispolzovaniya terminov v kompyuternykh naukakh na osnove neyrosetevykh modeley [Analysis and trend prediction of using terms in computer science based on neural network models]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2021, vol. 18, no. 2, pp. 24–38.
 14. Nguyen, T. V., Kravets, A. G. Otsenka i prognozirovanie tendentsiy razvitiya nauchnykh issledovaniy na osnove bibliometricheskogo analiza publikatsiy [Assessment and forecasting of scientific research development trends based on bibliometric analysis of publications]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technology], 2021, vol. 27, no. 4, pp. 195–201.
 15. *Ordinary least squares Linear Regression*. Available at: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LinearRegression.html (accessed 30.01.2022).
 16. *Statsmodels.tsa.seasonal.seasonal_decompose*. Available at: https://www.statsmodels.org/stable/generated/statsmodels.tsa.seasonal.seasonal_decompose.html (accessed 30.01.2022).
 17. Wei, F. et al. Decreasing the noise of scientific citations in patents to measure knowledge flow. *17th International Conference on Scientometrics and Informetrics, ISSI 2019 – Proceedings*, 2019, pp. 1662–1669.
 18. Du, J. et al. Paper-patent citation linkages as early signs for predicting delayed recognized knowledge: Macro and micro evidence. *Journal of Informetrics*, 2020, vol. 14, no. 2.
 19. van Raan, A. F. J. Sleeping beauties cited in patents: Is there also a dormitory of inventions? *Scientometrics*, 2017, vol. 110, no. 3, pp. 1123–1156.
 20. Suominen, A., Ranaei, S., Dedehayir, O. Exploration of Science and Technology Interaction: A Case Study on Taxol. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2021, vol. 68, no. 6, pp. 1786–1801.
 21. Kravets, A.G., Legenchenko, M., S. Formalnye metriki dlya avtomatizirovannoy otsenki izobreteniy [Formal Metrics for Automated Evaluation of Inventions]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2017, no. 3 (39), pp. 8–19.
 22. Kravets, A. G., Salnikova, N. A. Predskazatelnoye modelirovanie trendov tekhnologicheskogo razvitiya [Predictive modeling of technological development trends]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], 2020, vol. 55, no. 81, pp. 103–108.

DOI 10.54398/2074-1707_2022_1_53

УДК 004.001

СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТРАТ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАТИВНО-ВЫЕЗДНЫМИ БРИГАДАМИ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ КОМПАНИИ

Статья поступила в редакцию 06.01.2022, в окончательном варианте – 29.01.2022.

Кинжалиева Алия Рахметовна, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, аспирант, ORCID: 0000-0002-6243-5750, e-mail: satobalova@mail.ru

Ханова Анна Алексеевна, Астраханский государственный технический университет, 414056, Российская Федерация, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, доктор технических наук, доцент, ORCID: 0000-0003-2693-8876, e-mail: akhanova@mail.ru

Реализация задачи обеспечения надежности оказания услуг электросетевыми компаниями при минимальном уровне затрат во многом зависит от сокращения продолжительности перерыва электроснабжения потребителей, что может быть достигнуто путем совершенствования процесса управления дежурным персоналом оперативно-выездных бригад. В связи с этим задача повышения эффективности процесса управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевых компаниях является актуальной. Построены временные графики, рассмотрена структура и динамика затрат процесса управления оперативно-выездными бригадами. Представлено формальное описание процесса формирования затрат на эксплуатацию собственных и привлеченных ресурсов при возникновении аварийных ситуаций в электросетевом комплексе. Описаны уравнения, определяющие темпы потоков и уровни затрат, формируемых при эксплуатации ресурсов. Разработана и предложена прикладная базовая модель системной динамики на основе диаграммы потоков Форрестера для создания имитационных моделей распределительных электросетевых компаний. Представлена имитационная модель системной динамики, разработанная в программном продукте AnyLogic. Разработана схема проведения эксперимента с имитационной моделью в нотации ЕРС. Детально описаны результаты экспериментов с моделью, выявлены оптимальные характеристики в разрезе численности персонала и общего количества задействованной техники.

Ключевые слова: системная динамика, имитационное моделирование, затраты, электросетевая компания, оперативно-выездные бригады, авария, управление, персонал, ресурсы

SYSTEM MODELING OF THE COST DYNAMICS OF THE MANAGEMENT PROCESS OF OPERATIONAL-FIELD TEAMS OF AN ELECTRIC GRID COMPANY

The article was received by the editorial board on 06.01.2022, in the final version – 29.01.2022.

Kinzhalieva Aliya R., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russia Federation,

post-graduate student, ORCID: 0000-0002-6243-5750, e-mail: satobalova@mail.ru

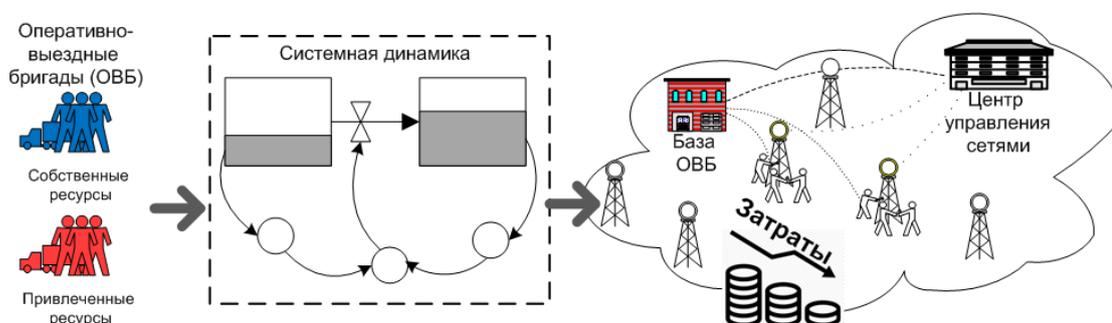
Khanova Anna A., Astrakhan State Technical University, 16 Tatishchev St., Astrakhan, 414056, Russia Federation,

Doct. Sci. (Engineering), Associate Professor, ORCID: 0000-0003-2693-8876, e-mail: akhano-va@mail.ru

The implementation of the task of ensuring the reliability of the provision of services by electric grid companies at a minimum level of costs largely depends on reducing the duration of the interruption of power supply to consumers, which can be achieved by improving the management process of the on-duty personnel of operational field teams. In this regard, the task of improving the efficiency of the management process of operational field teams in the event of accidents and technological violations in electric grid companies is urgent. Time schedules are constructed, the structure and cost dynamics of the management process of operational and field teams are considered. A formal description of the process of forming costs for the operation of own and attracted resources in the event of emergency situations in the power grid complex is presented. The equations determining the rates of flows and the levels of costs generated during the exploitation of resources are described. An applied basic model of system dynamics based on the Forrester flow diagram has been developed and proposed to create simulation models of distribution grid companies. A simulation model of system dynamics developed in the Anylogic software product is presented. A scheme for conducting an experiment with a simulation model in EPC notation has been developed. The results of experiments with the model are described in detail, optimal characteristics are identified in terms of the number of personnel and the total number of equipment involved.

Keywords: system dynamics, simulation modeling, costs, electric grid company, field teams, accident, management, personnel, resources

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Введение. Современное общество все больше зависит от надежного электроснабжения для обеспечения уровня функциональности и степени удовлетворенности основных потребностей. Как следствие, бесперебойное электроснабжение имеет решающее значение для общества, а электросетевые компании становятся одной из важнейших инфраструктур общества [1], определяемых как физические и логические системы, необходимые для социального обеспечения [2]. Достижение данной задачи оценивается уровнем надежности оказываемых услуг [3]. На указанный показатель непосредственно влияет средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей [4]. В связи с этим возникает необходимость поиска путей снижения продолжительности прекращений передачи электроэнергии [5]. Особое внимание следует уделить вопросу организации процесса управления бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений, от качества которой зависят сроки выполнения работы по устранению аварий и технологических нарушений, что, в конечном счете, влияет на общую удовлетворенность потребителей [6]. С другой стороны, рациональное использование ресурсов позволяет оптимизировать затраты, связанные с их использованием [7].

Процесс управления оперативно-выездными бригадами при возникновении аварий и технологических нарушений в электросетевых компаниях является сложным, с большим числом возможных ситуаций и состояний. В работах российских и зарубежных авторов для управления и оптимизации процессов выполнения ремонтных работ описано применение методов искусственного интеллекта [8–9], включая нейронные сети [10–11], теорию нечетких множеств [12–13],

и имитационного моделирования [14–16]. При этом стохастический характер возникновения аварийных ситуаций, на который влияют особенности работы оперативно-выездных бригад, распределения материально-технических ресурсов и возникновения затрат подразумевает целесообразность выбора метода имитационного моделирования в качестве инструмента исследования [17]. Среди известных методов построения имитационных моделей (дискретно-событийный, агентный или системно-динамический) необходимо выбрать подход к моделированию, конечным итогом которого должно стать не предсказание или предугадывание будущих экономических ситуаций, но понимание сути динамики исследуемой системы [18–19]. Именно имитационные модели системной динамики позволяют обойти ряд ограничений в исследовании процесса управления оперативно-выездными бригадами, вызванных невозможностью на практике получить информацию о данном процессе в различных ситуациях, когда параметры системы и среды меняются во времени и ряд процессов управления можно описать только приближенно [20–21].

Целью работы является повышение эффективности процесса управления оперативно-выездными бригадами (ОВБ) электросетевых компаний посредством системного моделирования динамики затрат.

Материалы и методы решения задачи управления затратами на основе модели системной динамики. Известно, что в изучаемой системе на объектах электросетевой компании в некоторые моменты времени t_n ($n = \overline{1, M}$) по пуассоновскому закону с заданной интенсивностью возникает поток из M аварий h_n длительностью T_n (рис. 1а). В случае получения оповещения о возникновении аварии центром управления сетями (ЦУС) устанавливается категория сложности аварии, а затем определяется наличие (достаточность) на пунктах расположения ОВБ собственных ресурсов (СР), а именно численность дежурного персонала и количество техники. Пусть общая численность дежурного персонала – A чел., общее количество техники, которое может быть задействовано, – B ед. В зависимости от категории сложности аварии и, соответственно, регламентированного времени на ее устранение центром управления сетями формируется ОВБ из a чел. ($a \in A$) и укомплектовывается необходимой техникой из b ед. ($b \in B$). В случае нехватки собственных ресурсов на место возникновения аварии направляется весь имеющийся резерв ОВБ, а также задействуются привлеченные ресурсы (ПР) – персонал и техника подрядной организации. При этом ОВБ формируется из СР и ПР. В случае когда все собственные ресурсы задействованы на аварийно-восстановительных работах, привлекается минимально необходимый состав бригады подрядной организации.

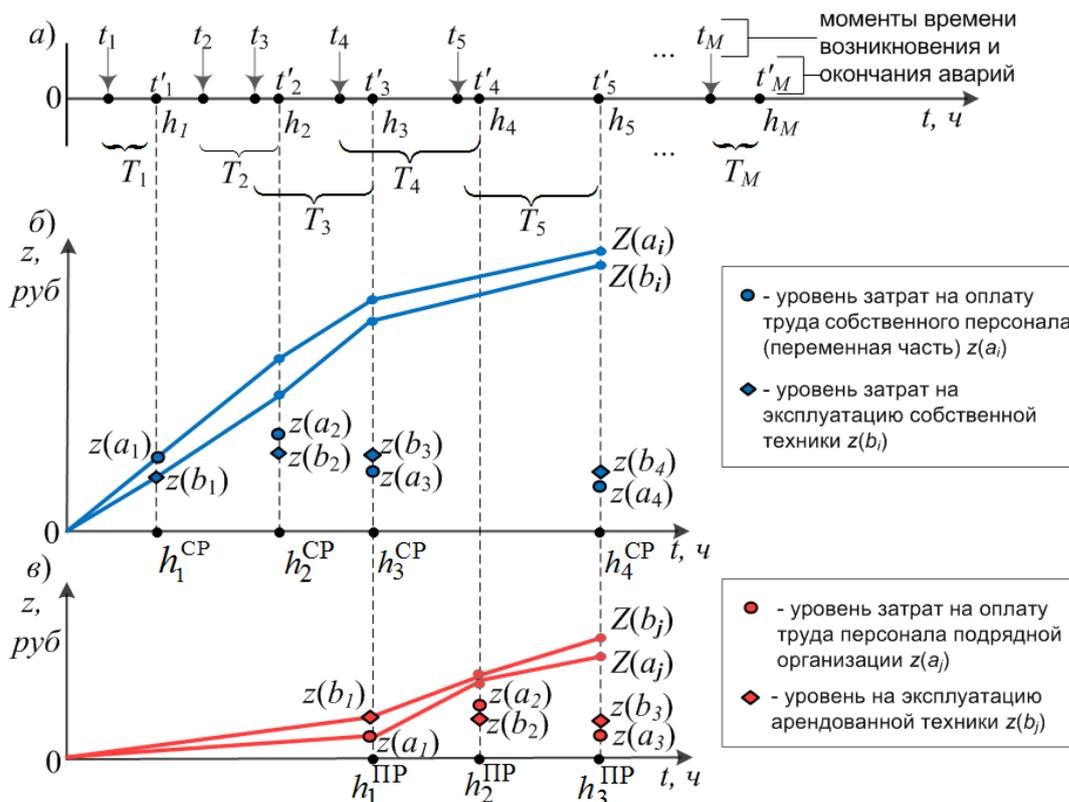


Рисунок 1 – Временные графики процесса управления затратами при возникновении аварий

Для аварий $h^{CP} \subset h$, на устранение которых задействуются собственные ресурсы, будем использовать счетчик $i = \overline{1, K}, K \leq M$, а для аварий $h^{PP} \subset h$, на устранение которых задействуются привлеченные ресурсы, – счетчик $j = \overline{1, L}, L \leq M$. Рассмотрим ситуацию (рис. 2а), когда поочередно возникают аварии h_1 и h_2 ($n = \overline{1, M}$), на устранение которых задействованы только собственные ресурсы. Соответственно, $h_1 = h_1^{CP}$ и $h_2 = h_2^{CP}$. Допустим, в тот момент, когда основная часть дежурного персонала и техники еще задействованы при устранении аварий h_1 и h_2 , возникает авария h_3 . На ее устранение ввиду недостаточности собственных ресурсов требуется дополнительно задействовать привлеченные ресурсы $h_3 = h_3^{CP} \cup h_1^{PP}$. При возникновении аварии h_4 весь имеющийся резерв собственных ресурсов уже задействован на аварийно-восстановительных работах, поэтому для устранения этой аварии задействуются только привлеченные ресурсы $h_4 = h_2^{PP}$. Далее часть собственных ресурсов высвобождается, возникает авария $h_5 = h_4^{CP} \cup h_3^{PP}$, для устранения которой задействуются как собственные, так и привлеченные ресурсы. Рассмотрим на данном примере, как отражаются и накапливаются затраты, связанные с использованием ресурсов. На рисунке 2б дано графическое представление динамики постоянной части затрат на оплату труда $z(A)$, которая определяется исходя из дневной тарифной ставки, устанавливаемой дежурному персоналу, независимо от того, привлекался персонал к аварийно-восстановительным работам или нет, а также общей величины постоянной части затрат на оплату труда $Z(A)$.

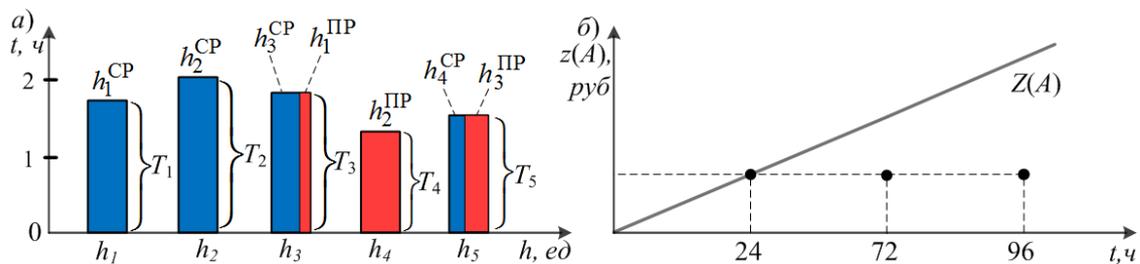


Рисунок 2 – Структура, продолжительность и динамика затрат при возникновении аварий

На рисунке 1б представлено, как в каждый момент времени $t_n' = t_n + T_n$ по окончании устранения аварий за счет собственных ресурсов h_i^{CP} ($i = 1, \dots, 4$) зафиксированы трудовые затраты $z(a_i)$ и затраты на использование техники $z(b_i)$, при этом кривые $Z(a_i)$ и $Z(b_i)$ отображают их общую величину. Аналогично на рисунке 1в представлено, как в каждый момент времени t_n' по окончании устранения аварий за счет привлеченных ресурсов h_j^{PP} ($j = 1, \dots, 3$) зафиксированы трудовые затраты $z(a_j)$ и затраты на аренду техники $z(b_j)$, при этом кривые $Z(a_j)$ и $Z(b_j)$ отображают их общую величину. Далее перейдем к концептуальному описанию системы формирования затрат.

Построение системно-динамической модели начнем с создания концептуального описания системы в виде диаграммы потоков Форрестера [22]. Рисунок 3 содержит следующие основные элементы: уровни, изображенные в виде блоков 1–9; потоки, изображенные в виде стрелок и отображающие направления движения от одного уровня к другому; функции решений, изображенные в виде вентилей I–V, используемые для обозначения темпов потоков.

На диаграмме (рис. 3) представлены два основных потока затрат, образующихся за счет эксплуатации СР и ПР. Данные потоки аналогичны друг другу и разбиваются на потоки затрат, связанные с оплатой труда и эксплуатацией техники. По принципу сообщающихся сосудов затраты, накопленные на предыдущих уровнях, влияют на величину затрат на последующих уровнях. Величина затрат на начальном уровне каждого потока зависит от темпа потока затрат (на схеме темпы представлены в виде вентилей I–V). На темпы потоков затрат непосредственно влияют: количество задействованных ресурсов (персонал и техника) (A, a_i, a_j, b_i, b_j), тарифные ставки (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5). При этом переменная A представлена в виде константы, поскольку общая численность дежурного персонала является неизменной. В представленной модели отражена упрощенная схема расчета затрат на оплату труда собственного и привлеченного персонала и затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники.

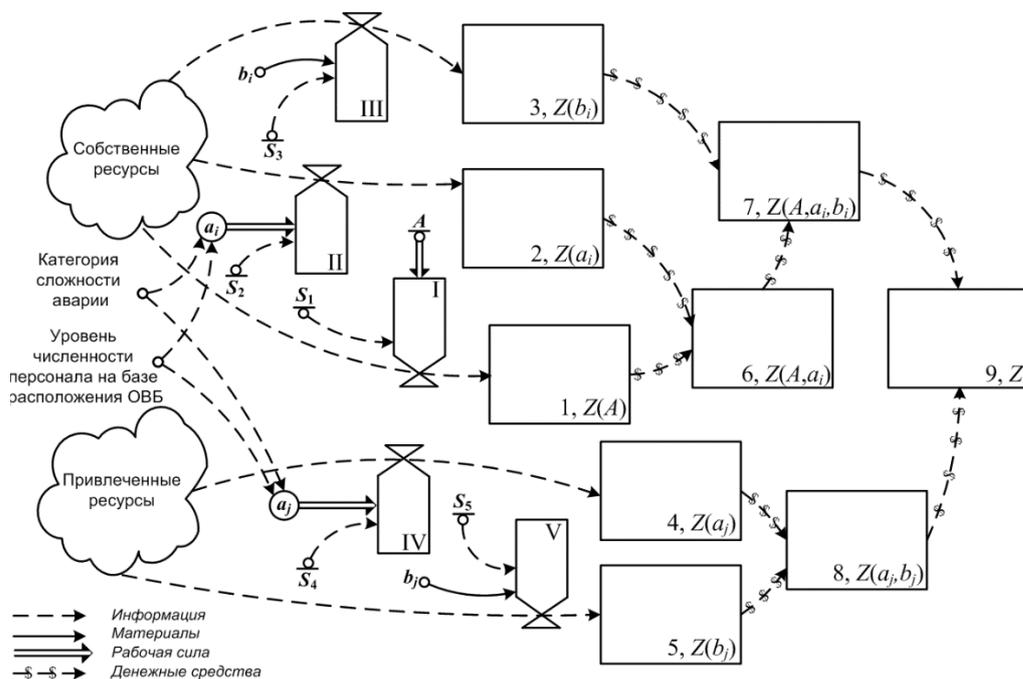


Рисунок 3 – Диаграмма потоков затрат, связанных с устранением аварий

Величина затрат на оплату труда собственного персонала (постоянная часть) $z(A)$ определяется за каждые полные сутки модельного времени t ($t \in Y$, где $Y \leq 365$) и рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, вентиль I):

$$z(A) = A \times S_1, \tag{1}$$

где S_1 – размер постоянной части (тарифной ставки) заработной платы собственного персонала, руб.

Общая величина затрат на оплату труда собственного персонала (постоянная часть) $Z(A)$ определяется как сумма затрат на оплату труда собственного персонала (постоянная часть) $z(A)$ и рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 1):

$$Z(A) = \sum_{m=1}^Y z(A), \tag{2}$$

Величина затрат на оплату труда собственного персонала (переменной части) $z(a_i)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, вентиль II):

$$z(a_i) = T_i \times a_i \times S_2, \tag{3}$$

где S_2 – размер ставки, начисляемой собственному персоналу a_i , задействованного на время T_i для устранения i -й аварии, руб.

Общая величина затрат на оплату труда собственного персонала (переменной части) $Z(a_i)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 2):

$$Z(a_i) = \sum_{i=1}^k z(a_i), \tag{4}$$

где k – количество аварий, возникших за t суток модельного времени, устраняемых собственными силами, $i = 1, k$.

Величина затрат на эксплуатацию собственной техники $z(b_i)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, вентиль III):

$$z(b_i) = T_i \times b_i \times S_3, \tag{5}$$

где S_3 – размер ставки за 1 маш.*час (модельного времени) работы собственной техники b_i , задействованной на время T_i для устранения i -й аварии, руб.

Общая величина затрат на эксплуатацию собственной техники $Z(b_i)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 3):

$$Z(b_i) = \sum_{i=1}^k z(b_i). \tag{6}$$

Величина затрат на оплату труда персонала подрядной организации $z(a_j)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, вентиль IV):

$$z(a_j) = T_j \times a_j \times S_4, \tag{7}$$

где S_4 – размер ставки, начисляемой персоналу подрядной организации a_j , задействованному на время T_j для устранения j -й аварии, руб.

Общая величина затрат на оплату труда персонала подрядной организации $Z(a_j)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 4):

$$Z(a_j) = \sum_{j=1}^l z(a_j), \quad (8)$$

где l – количество аварий, возникших за m суток модельного времени, для устранения которых привлекается подрядная организация, $j = \overline{1, l}$.

Величина затрат на эксплуатацию арендованной техники $z(b_j)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, вентиль V):

$$z(b_j) = T_j \times b_j \times S_5, \quad (9)$$

где S_5 – размер ставки за 1 маш.*час (модельного времени) работы арендованной техники b_j , задействованной на время T_j для устранения j -й аварии, руб.

Общая величина затрат на эксплуатацию арендованной техники $Z(b_j)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 5):

$$Z(b_j) = \sum_{j=1}^l z(b_j) \quad (10)$$

Совокупная величина затрат на оплату труда собственного персонала $Z(A, a_i)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 6):

$$Z(A, a_i) = Z(A) + Z(a_i). \quad (11)$$

Совокупная величина затрат на оплату труда собственного персонала и на эксплуатацию собственной техники $Z(A, a_i, b_i)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 7):

$$Z(A, a_i, b_i) = Z(A, a_i) + Z(b_i). \quad (12)$$

Совокупная величина затрат на оплату труда подрядной организации и на эксплуатацию арендованной техники $Z(a_j, b_j)$ рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 8):

$$Z(a_j, b_j) = Z(a_j) + Z(b_j). \quad (13)$$

Общая величина затрат Z рассчитывается по следующей формуле (рис. 3, уровень 9):

$$Z = Z(A, a_i, b_i) + Z(a_j, b_j). \quad (14)$$

Уравнения (1–14) определяют темпы потоков и уровни затрат, формируемых при эксплуатации ресурсов.

Результаты экспериментов имитационной модели системной динамики. Диаграмма потоков затрат (рис. 3) предназначена для структурирования затрат на оплату труда собственного персонала и персонала подрядной организации, а также суммы затрат, связанных с эксплуатацией и арендой техники, и реализована в пакете имитационного моделирования Anylogic (рис. 4).

Анимационная схема модели представлена в виде ГИС-карты, на которой ГИС-точками зеленого цвета отмечены энергообъекты. Их цвет меняется в зависимости от категории аварии: на красный цвет, если возникает авария 1 категории сложности; на оранжевый цвет, если возникает авария 2 категории сложности; на желтый цвет, если возникает авария 3 категории сложности. В течение всего времени устранения аварии возле ГИС-точки отображается текстовая информация о количестве задействованного собственного персонала и техники и отдельно о количестве привлеченного персонала и арендованной техники. По окончании времени устранения аварии ГИС-точка меняет цвет на зеленый, а текстовая информация исчезает (рис. 5).



Рисунок 4 – Схема модели системной динамики в Anylogic

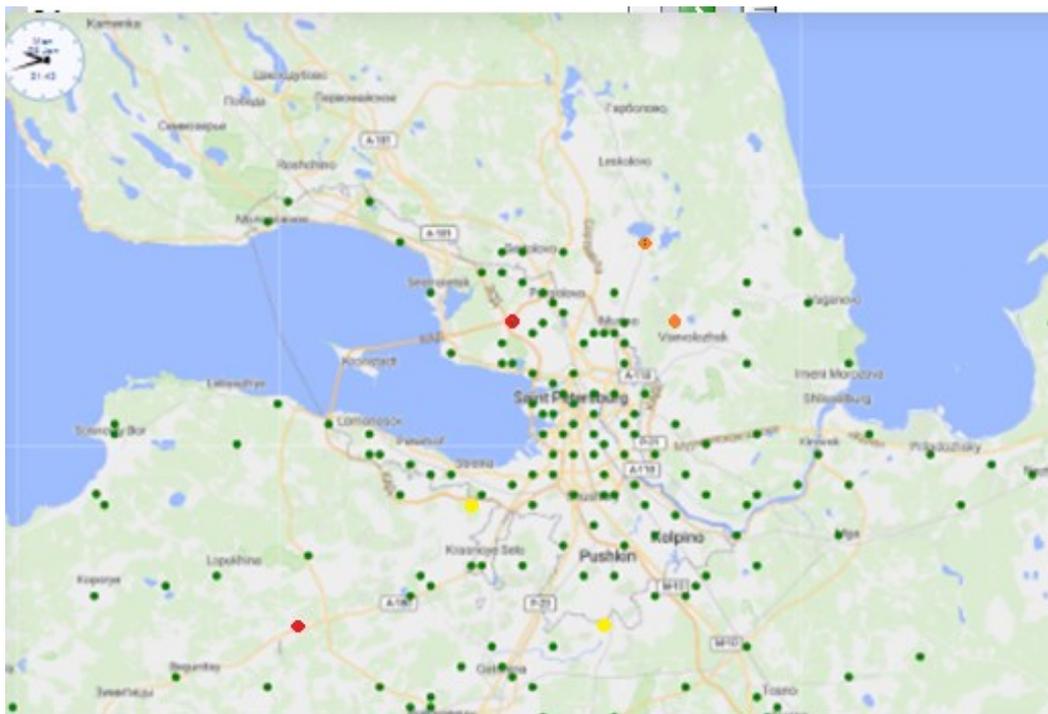


Рисунок 5 – ГИС-карта модели системной динамики в Anylogic

В зависимости от того, какую информацию необходимо получить о системе и какую задачу требуется решить с помощью имитационной модели, проводится планирование эксперимента, при этом должны быть учтены ограничения на ресурсы. Планирование машинных экспериментов, в сущности, представляет собой план получения необходимого объема информации, стоимость которого может варьироваться в зависимости от метода сбора и обработки данных. Эксперименты по компьютерному моделированию являются дорогостоящими с точки зрения времени и труда экспериментатора, а также затрат машинного времени. Чем больше усилий экспериментатор затрачивает на одно исследование, тем меньше времени он может потратить на другое, поэтому важно, чтобы он планировал экспериментирование с тем, чтобы получить как можно больше информации из каждого эксперимента. Таким образом, основной целью планирования экспериментов является определение наиболее важных факторов с тем, чтобы провести наименьшее количество прогонов в процессе экспериментирования с моделью.

Декомпозиция процесса планирования эксперимента с имитационной моделью анализа затрат процесса управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании представлена в нотации EPC (рис. 6). Предполагается, что работа с имитационной моделью будет выполняться Центром аналитических компетенций (ЦАК) – группой пользователей с ролью «Специалист ЦАК». Имитационная модель дает возможность пользователю «Специалист ЦАК» изменять значения параметров, установленных по умолчанию, перед запуском модели. Предполагается, что AnyLogic Private Cloud устанавливается внутри корпоративной сети электросетевой компании и пользователи ПК, подключенные к корпоративной сети (без ограничений по количеству пользователей), смогут просматривать модель, загруженную в AnyLogic Private Cloud пользователем «Специалист ЦАК».

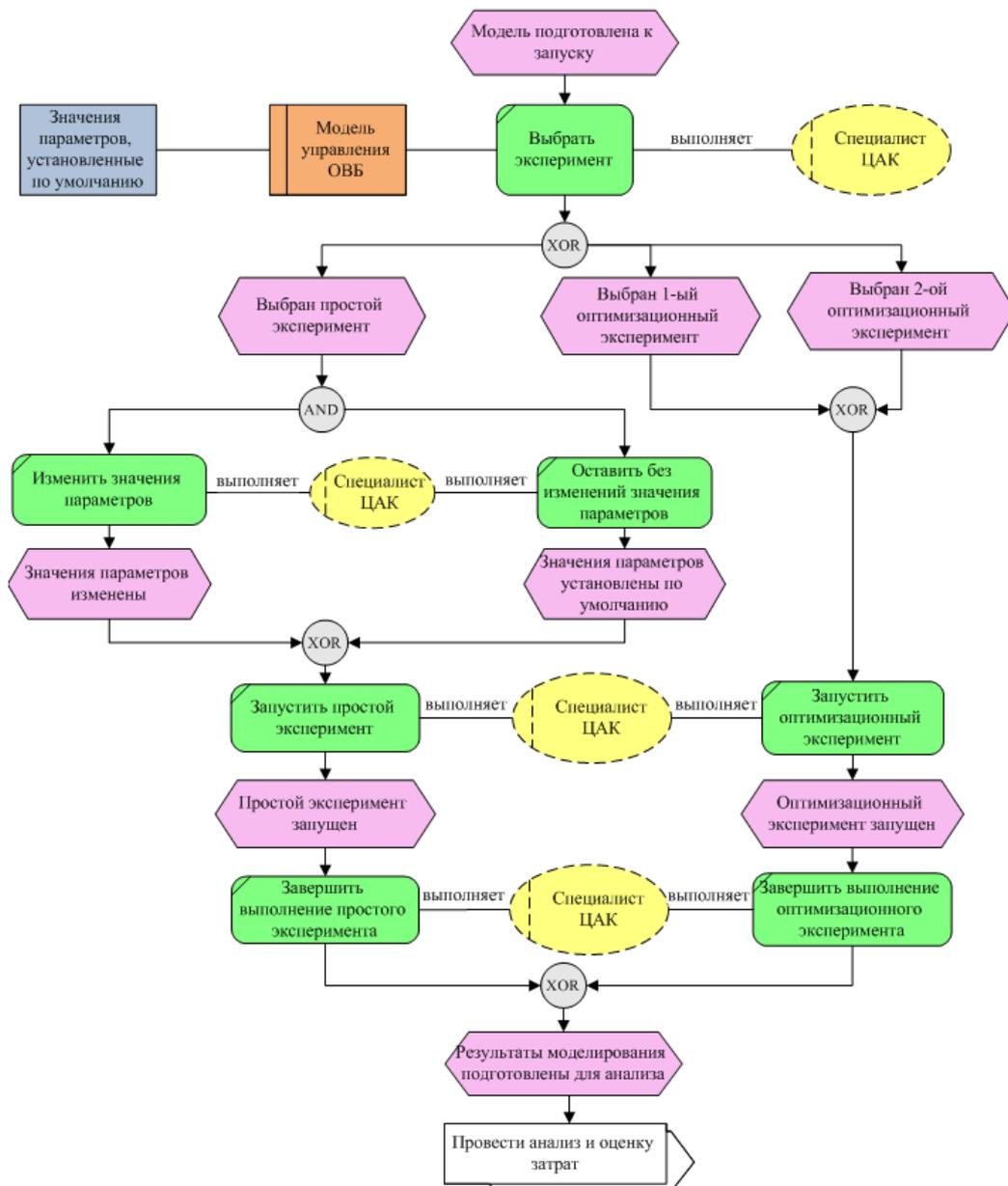
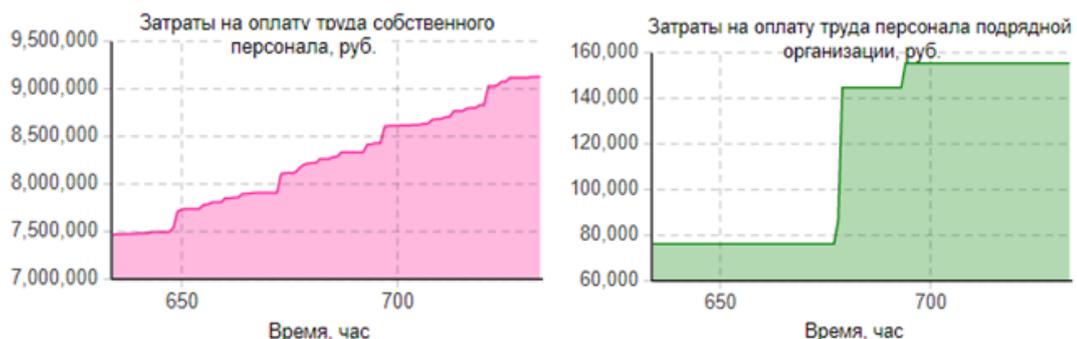


Рисунок 6 – Этапы проведения эксперимента с моделью в нотации EPC

В окне запущенной модели на протяжении всего простого эксперимента наглядным образом аккумулируются затраты, связанные с использованием ресурсов для устранения аварий. Графики (рис. 7) предназначены для отображения временного тренда величины затрат на: оплату труда собственного персонала $Z(A, a_i)$; эксплуатацию собственной техники $Z(b_i)$; оплату труда подрядной организации $Z(a_j)$; эксплуатацию арендованной техники $Z(b_j)$.



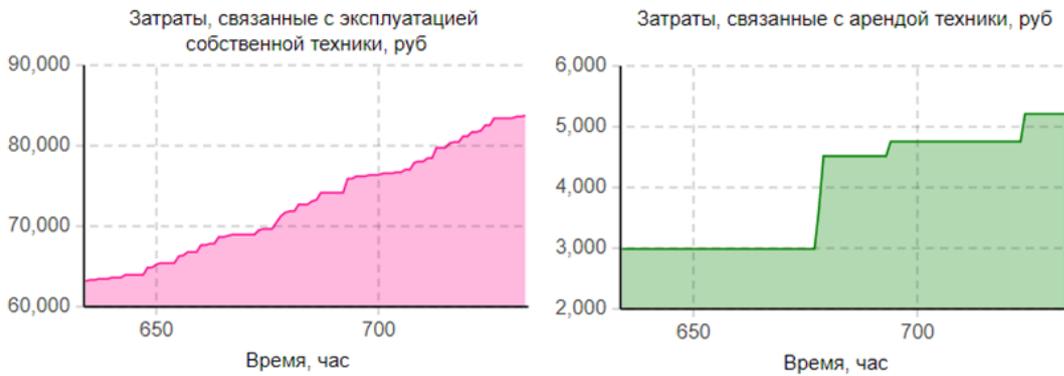


Рисунок 7 – Временные тренды величин затрат (фрагмент анимации)

График «Продолжительность перерыва электроснабжения потребителей» (рис. 8а) предназначен для отображения временного тренда средней продолжительности перерыва электроснабжения потребителей. Гистограмма «Продолжительность перерыва электроснабжения» (рис. 8б) предназначена для отображения данных о продолжительности перерыва электроснабжения потребителей: 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.

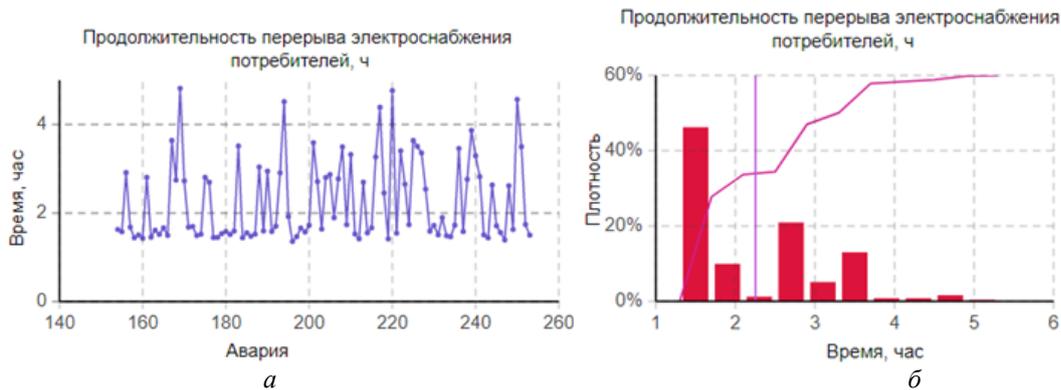


Рисунок 8 – Временные тренды продолжительности перерыва электроснабжения (фрагмент анимации)

При определении оптимальной численности дежурного персонала и оптимального количества техники с целью минимизации затрат (оптимизационный эксперимент 1) найден наилучший результат $Z = 224\,609\,199,40$ рублей, который достигается при $A = 75$ и $B = 37$ (рис. 9а). При определении оптимальной численности дежурного персонала и оптимального количества техники с целью сокращения продолжительности перерыва электроснабжения (оптимизационный эксперимент 2) найден наилучший результат (продолжительность прекращения электропередачи, равная 2,238 ч), который достигается при значениях $A = 111$ и $B = 50$ (рис. 9б).

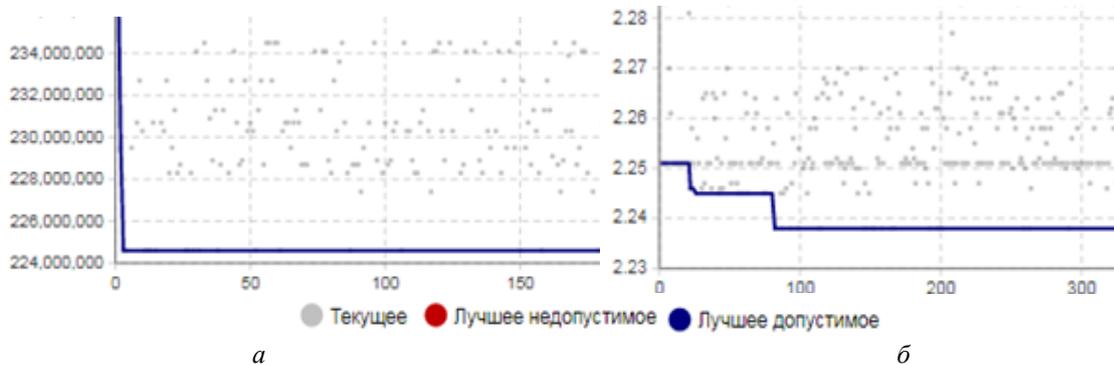


Рисунок 9 – Эксперименты с моделью

Имитационная модель системной динамики была разработана для ПАО «Ленэнерго» и является базовой моделью для создания моделей аналогичных распределительных электросетевых компаний. Для адаптации системы к условиям деятельности других электросетевых компаний имеется возможность добавления и (или) изменения значимых факторов, влияющих на уровень абстракции, настройки алгоритма формирования оперативно-выездными бригадами, задания мест расположения энергообъектов на ГИС-карте и др.

Заключение. Проведена формализация задачи системного моделирования динамики затрат процесса управления оперативно-выездными бригадами электросетевой компании. Рассмотрен детальный пример формирования затрат для поочередно возникающих 5 аварий и технологических нарушений в электросетевой компании. Показана динамика изменения структуры затрат в виде гистограммы соотношения затрат на собственные и привлеченные ресурсы. Построены детальные временные графики процесса управления затратами при возникновении аварий. Формализованы уравнения, определяющие темпы потоков и уровни затрат, формируемых при эксплуатации собственных и привлеченных ресурсов. Разработана концептуальная структура модели системной динамики на основе диаграммы потоков Форрестера. Реализована имитационная модель с элементами системной динамики, наложенная на ГИС-карту, для определения оптимального количества ресурсов, задействованных при устранении аварий, при которых средняя длительность перерыва электроснабжения потребителей является минимальной, а также для оптимизации затрат, связанных с оплатой труда персонала и с эксплуатацией и арендой техники, задействованных при устранении аварий. Составлен план экспериментов для системной модели динамики затрат при устранении аварий в электросетевом комплексе, проведены серии экспериментов, выявлены оптимальные характеристики по показателям численности персонала и общего количества задействованной техники.

Библиографический список

1. Zio, E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures / E. Zio // *Reliab. Eng. Syst. Saf.* – 2016. – Vol. 152. – P. 137–150. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.009>.
2. Kröger, W., Zio, E. *Vulnerable systems* / W. Kröger, E. Zio. – London : Springer; 2011.
3. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике : моногр. / Н. И. Воропай и др. – Москва : Энергия, 2013. – 212 с.
4. Концепция «Цифровая трансформация 2030». – Москва : ПАО «Россети», 2018. – Режим доступа: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус. (дата обращения: 06.05.2021).
5. Орлов, П. С. Технические мероприятия повышения надежности электроснабжения в АПК / П. С. Орлов, В. В. Морозов, С. П. Кочкин // *Вестник АПК Верхневолжья*. – 2017. – № 3 (39). – С. 94–100.
6. Проталинский, О. М. Система оптимального управления производственными активами энергетических предприятий / О. М. Проталинский, И. О. Проталинский, О. Н. Кладов // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. – 2017. – № 4 (93). – С. 5–8.
7. Ханова, А. А. Управление затратами грузового порта на основе функционально-стоимостного анализа / А. А. Ханова, А. С. Пономарева // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. – 2011. – № 3 (161). – С. 116–119.
8. Проталинский, О. М. 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.
9. Бородин, В. А. Оптимизация ремонтных программ энергетического оборудования с использованием методов искусственного интеллекта / В. А. Бородин, А. В. Андрушин, 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*. – Москва : ИПУ РАН, 2019. – С. 576–579.
10. Горбунов, И. Н. Применение нейронных сетей в целях определения места повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи / И. Н. Горбунов, С. Г. Захаренко, С. А. Захаров, Т. Ф. Малахова // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2019. – № 4 (144). – С. 48–55.
11. Tanaka, M. Application of Kohonen's self-organizing network to the diagnosis system for rotating machinery / M. Tanaka, M. Sakawa, I. Shiromaru, T. Matsumoto // *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*. – 1995. – Vol. 5. – P. 4039–4044.
12. Малафеев, А. В. Использование теории нечетких множеств для оценки производственных рисков при управлении режимами промышленной системы электроснабжения / А. В. Малафеев, А. И. Юлдашева // *Электроэнергетика глазами молодежи : труды VI Международной научно-технической конференции*. – 2015. – С. 294–297.
13. Бобырь, М. В. Анализ методов повышения надежности нечетких систем / М. В. Бобырь, Н. А. Милостная // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. – 2017. – № 7 (157). – С. 22–30.
14. Степанов, В. М. Имитационное и физическое моделирование систем электроснабжения для повышения надежности их работы / В. М. Степанов, И. М. Базыль // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2015. – № 12–2. – С. 139–142.

15. Дробов, А. В. Имитационная модель надежности системы электроснабжения / А. В. Дробов, В. Н. Галушко // Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов : межвузовский сборник научных трудов (с международным участием). – 2016. – С. 228–231.
16. Уразалиев, Н. С. Концептуальная структура имитационной модели логистических процессов управления ремонтами предприятия электрических сетей / Н. С. Уразалиев, А. А. Ханова, В. С. Тумпуров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 2. – С. 91–100.
17. Борщев, А. Как строить простые, красивые и полезные модели сложных систем / А. Борщев // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД : материалы конференции. – Казань : Фэн АН РТ, 2013. – Т. 1. – С. 21–34.
18. Лычкина, Н. Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики: анализ динамики развития / Н. Н. Лычкина // Бизнес-информатика. – 2009. – № 3 (9). – С. 55–67.
19. Маслобоев, А. В. Имитационное моделирование развития инновационных процессов на основе метода системной динамики и агентных технологий / А. В. Маслобоев // Качество. Инновации. Образование. – 2009. – № 3 (46). – С. 34–43.
20. Дворянчиков, А. Я., Редько, С. Г. Применение системной динамики для анализа поведения системы управления обучением / А. Я. Дворянчиков, С. Г. Редько // Инновации. – 2017. – № 3 (221). – С. 95–101.
21. Калажиков, Х. Х. Системное моделирование динамики сложных систем и процессов применительно к динамике развития региона / Х. Х. Калажиков, Ф. Х. Увижева // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2017. – № 4 (78). – С. 5–10.
22. Форрестер, Джей. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика) / Форрестер Джей. – Москва : Прогресс, 1971. – 340 с.

References

1. Zio, E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 2016, vol. 152, pp. 137–50.
2. Kröger, W., Zio, E. *Vulnerable systems*. London, Springer, 2011.
3. Kontseptsiya obespecheniya nadezhnosti v elektroenergetike [The concept of ensuring reliability in the electric power industry]. *Energiya [Energy]*, 2013. 212 p.
4. *Kontseptsiya «Tsifrovaya transformatsiya 2030»* [Concept “Digital Transformation 2030”]. Moscow, “Rosseti” PJSC, 2018. Available at: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (accessed 06.05.2021).
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-industrial complex]. *Vestnik APK Verhnevolzhya [Bulletin of the Agro-Industrial Complex of the Upper Volga Region]*, 2017, no. 3 (39), pp. 94–100.
6. Protalinskiy, O. M., Protalinskiy, I. O., Kladov, O. N. Sistema optimalnogo upravleniya proizvodstvennymi aktivami energeticheskikh predpriyatiy [System of optimal management of production assets of energy enterprises]. *Avtomatizatsiya i IT v energetike [Automation and IT in Energy]*, 2017, no. 4 (93), pp. 5–8.
7. Khanova, A. A., Ponomareva, A. S. Upravlenie zatratami gruzovogo porta na osnove funktsionalno-stoimostnogo analiza [Management of freight port costs on the basis of functional-tax-value analysis]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical Sciences]*, 2011, no. 3 (161), pp. 116–119.
8. Protalinskiy O. M., Shcherbatov I. A., Khanova A. A., Protalinskiy I. O. Adaptivnaya sistema prognozirovaniya nadezhnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya obektov energetiki [Adaptive system for predicting the reliability of technological equipment of energy facilities]. *Informatika i sistemy upravleniya [Informatics and Control Systems]*, 2019, no. 1 (59), pp. 93–105.
9. Borodin, V. A., Andryushin, A. V., Protalinsky, O. M., Khanova, A. A. Optimizatsiya remontnykh programm energeticheskogo oborudovaniya s ispolzovaniem metodov iskusstvennogo intellekta [Optimization of repair programs of energy equipment using artificial intelligence methods]. *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem MLSD'2019 : materialy Dvenadtsatoy mezhdunarodnoy konferentsii [Management of the development of large-scale systems MLSD'2019 : proceedings of the Twelfth International Conference]*, 2019, pp. 576–579.
10. Gorbunov, I. N., Zakharenko, S. G., Zaharov, S. A., Malakhova, T. F. Primenenie neyronnykh setey v tselyakh opredeleniya mesta povrezhdeniya vozduzhnykh i kabelnykh liniy elektroperedachi [Use of neural networks to determine the location of damage to overhead and cable power lines]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika [Mining Equipment and Electromechanics]*, 2019, no. 4 (144), pp. 48–55.
11. Tanaka, M., Sakawa, M., Shiromaru, I., Matsumoto, T. Application of Kohonen's self-organizing network to the diagnosis system for rotating machinery. *Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, 1995, vol. 5, pp. 4039–4044.
12. Malafeyev, A. V., Yuldasheva, A. I. Ispolzovanie teorii nechetkikh mnozhestv dlya otsenki proizvodstvennykh riskov pri upravlenii rezhimami promyshlennoy sistemy elektrosnabzheniya [Using the theory of fuzzy sets to assess production risks in managing the modes of an industrial power supply system]. *Elektroenergetika glazami molodezhi : trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Electricity industry through the eyes of young people : proceedings of the VI International Scientific and Technical Conference]*, 2015, pp. 294–297.

13. Bobyr, M. V., Milostnaya, N. A. Analiz metodov povysheniya nadezhnosti nechetkikh sistem [Analysis of methods for improving the reliability of fuzzy systems]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of Computer and Information Technologies], 2017, no. 7 (157), pp. 22–30.

14. Stepanov, V. M., Bazyl, I. M. Imitatsionnoe i fizicheskoe modelirovanie sistem elektro-snabzheniya dlya povysheniya nadezhnosti ikh raboty [Simulation and physical modeling of electrical supply systems to increase the reliability of their work] *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestia of the Tula State University. Technical Sciences], 2015, no. 12–2, pp. 139–142.

15. Drobov, A. V., Galushko, V. N. Imitatsionnaya model nadezhnosti sistemy elektrosnabzheniya [Simulation model of reliability of the power supply system]. *Povyshenie nadezhnosti i energoeffektivnosti elektrotekhnicheskikh sistem i kompleksov : mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov* [Improving the reliability and energy efficiency of electrical systems and systems : inter-university collection of scientific works], 2016, pp. 228–231.

16. Urazaliev, N. S., Khanova, A. A., Tumpurov, V. S. Konceptualnaya struktura imitatsionnoy modeli logisticheskikh protsessov upravleniya remontami predpriyatiya elektricheskikh setey [Conceptual structure of the imitation ministry of logistics processes for managing repairs of the electric grid enterprise]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computing and Computer Science], 2018, no. 2, pp. 91–100.

17. Borshchev, A. Kak stroit prostye, krasivye i poleznye modeli slozhnykh sistem [How to build simple, beautiful and useful models of complex systems]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i Praktika. IMMOD : materialy konferentsii* [Simulation Simulation. Theory and Practice. IMMOD : materials of conference]. Kazan, Fen AN RT Publ., 2013, vol. 1, pp. 21–34.

18. Lychkina, N. N. Retrospektiva i perspektiva sistemnoy dinamiki: analiz dinamiki razvitiya [Retrospective and perspective of system dynamics. Development Dynamics Analysis]. *Biznes-informatika* [Business Informatics], 2009, no. 3 (9), pp. 55–67.

19. Masloboev, A. V. Imitatsionnoe modelirovanie razvitiya innovatsionnykh protsessov na osnove metoda sistemnoy dinamiki i agentnykh tekhnologiy [Simulation modeling of the development of innovative processes based on the method of system dynamics and agent technologies]. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie* [Quality. Innovation. Education], 2009, no. 3 (46), pp. 34–43.

20. Dvoryanchikov, A. Ya., Redko, S. G. Primenenie sistemnoy dinamiki dlya analiza povedeniya sistemy upravleniya obucheniem [Application of system dynamics for analysis of behavior of the training management system]. *Innovatsii* [Innovations], 2017, no. 3 (221), pp. 95–101.

21. Kalazhokov, H. H., Uvizheva, F. H. Sistemnoe modelirovanie dinamiki slozhnykh sistem i protsessov primenitelno k dinamike razvitiya regiona [Systematic simulation of the dynamics of complex systems and processes in relation to the dynamics of the development of the region]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, no. 4 (78), pp. 5–10.

22. Forrester, Dzhey. *Osnovy kibernetiki predpriyatiya (Industrialnaya dinamika)* [Bases of enterprise cybernetics (Industrial dynamics)]. Moscow, Progress Publ., 1971. 340 p.