



ВЫБОР ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ И КРИТЕРИЕВ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А.В. Малафеев, А.И. Юлдашева

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1471-9764>, malapheev_av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1403-4434>, alinayuldasheva1@gmail.com

Резюме: в статье предлагается методика выбора вариантов реконструкции системы электроснабжения на основе критериев теории принятия решений. Процесс реконструкции рассматривается в виде последовательной игры с участием двух игроков: активного и пассивного. Вероятность возможных состояний системы определяется на основе теории нечетких множеств. Основным критерием выбора варианта реконструкции принято значение ущерба от нарушения электроснабжения. Рассмотрено применение предложенной методики на примере крупного металлургического предприятия.

Ключевые слова: система электроснабжения, теория нечетких множеств, теория принятия решений, граф игры, критерий Байеса, вероятный ущерб.

SELECTION OF OPTIONS FOR THE RECONSTRUCTION OF THE POWER SUPPLY SYSTEM BASED ON THE FUZZY SETS THEORY AND THE CRITERIA OF DECISION-MAKING THEORY

A.V. Malafeev, A.I. Iuldasheva

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1471-9764>, malapheev_av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1403-4434>, alinayuldasheva1@gmail.com

Abstract: The article proposes a method for selecting options for the reconstruction of the power supply system based on the criteria of decision-making theory. The reconstruction process is considered as a sequential game with two players: active and passive. The probability of possible states of the system is determined on the basis of the fuzzy sets theory. The main criterion for the choice of the reconstruction option is the value of damage from the power supply interruption. The application of the proposed method is considered on the example of a large metallurgical enterprise.

Keywords: power supply system, fuzzy sets theory, decision-making theory, game flow chart, Bayes criterion, probable damage.

For citation: Malafeev A.V., Iuldasheva A.I. Selection of options for the reconstruction of the power supply system based on the fuzzy sets theory and the criteria of decision-making theory. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21 (3-4):59-67. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-59-67.

Введение

Усложнение технологии и укрупнение производства привело к необходимости применять различные математические расчеты при решении вопросов управления. Одним из вопросов, требующих применения достаточно сложного математического аппарата, является планирование развития и реконструкции энергосистем в целом, сетей магистральных и территориальных сетевых компаний, систем электроснабжения крупных промышленных предприятий. Для последних характерно коренное изменение схемы с полной заменой оборудования какого-либо участка электрических сетей при замене крупного энергоемкого технологического оборудования или при внедрении нового технологического процесса (в частности, для металлургических предприятий – это выплавка и доводка стали в электродуговых печах, сооружение новых энергоемких установок по очистке дымовых газов и др.). При этом в процессе сооружения и ввода в эксплуатацию новых объектов могут измениться условия финансирования, фактически приобретаемое оборудование может не соответствовать запланированному, могут иметь место схемные изменения, фактическая нагрузка будет отличаться от проектной. Это говорит о неопределенности ряда факторов; какая-либо статистическая информация при этом отсутствует, в особенности при внедрении новых технологий. Наиболее удобным подходом к учету такой неопределенности является применение теории нечетких множеств, которая является достаточно мощным стратегическим инструментом управления сложными системами. Как отмечено [1], на практике постоянно приходится принимать решения в условиях неполной информации, и, поскольку математический аппарат теории нечетких множеств позволяет моделировать рассуждения человека, то технологии и алгоритмы, разработанные в рамках этой теории, являются универсальными по применимости. Теория нечетких множеств нашла применение для решения различных задач и в области энергетики: для принятия решений при управлении реконструкцией энергообъектов; при определении стратегии восстановления электроснабжения после аварии; при диагностировании повреждений в сетях и др. [2]. В работе [2] делается вывод о том, что использование нечетких множеств при выборе вариантов реконструкции схем выдачи мощности электростанций дает возможность формализовать эту операцию при неопределенности информации и при противоречивости правил и критериев. В статье [3] на примере выбора оптимального варианта повышения эффективности воздушных линий электропередач, работающих в экстремальных условиях окружающей среды, представлен алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией. Делается вывод о том, что при принятии решений необходим комплексный подход к формулированию и применению принципов оценки эффективности инвестиций в проекты реконструкции (таких, как принцип доминирования, Парето-оптимальные альтернативы, формирование комплексных показателей, выделение главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений, отбор недоминирующих альтернатив, аддитивной свертки). В работе [4] продемонстрировано применение теории нечетких множеств для оценки производственных рисков для промышленной системы электроснабжения. В [5] разработан алгоритм выбора оптимальных параметров систем электроснабжения, позволяющий решать задачи планирования в многокритериальной постановке с учётом нескольких неопределённых факторов. В качестве критериев эффективности и надёжности приняты дисконтированный недоотпуск электроэнергии потребителям из-за вероятных отключений и чистый дисконтированный доход. Кроме того, в работе обоснован рациональный набор неопределённых факторов и способ получения дополнительной информации, что повышает эффективность учёта неопределённости исходной информации в оптимизационных задачах СЭС и решать их с помощью статистических методов, в частности критерия Байеса. Представленная в статье [6] методика многокритериального анализа моделей развития систем электроснабжения в условиях неопределенности позволяет исключить субъективизм, связанный с выбором

наиболее вероятного значения электропотребления и рассмотреть множество вариантов из прогнозного диапазона. Разработана система критериев оценки моделей развития, отражающая экономический, технический и архитектурно-градостроительный аспекты (суммарные дисконтированные затраты, технические потери электроэнергии, недоотпуск электроэнергии, протяженность линий электропередачи) и разработаны их математические модели с учетом неопределенности информации. Для оценки эффективности инвестиционных программ по реконструкции в работе [7] предлагается использование моделей надежности на основе однородных цепей Маркова, требующее, однако, детальной информации о результатах реконструкции. Оценке рисков режимного характера при планировании развития распределенной генерации с учетом неопределенности нагрузки, генерации, цен на энергоносители посвящена работа [8]. В [9] предложена методика оценки такого риска при каскадном развитии аварии в условиях широкого применения в распределительных сетях блочно-модульных подстанций и другого современного оборудования на основе теории D-S-доказательств. Применение метода последовательного эквивалентирования для оценки надежности рассмотрено в работе [10].

При сравнении вариантов реконструкции заводской электрической сети в случае расширения производства с учетом ущерба от нарушения электроснабжения к неопределенным (или частично неопределенным) величинам можно отнести:

- 1) отклонение фактического увеличения нагрузки от проектного значения;
- 2) характер аварийной ситуации;
- 3) время отключения с учетом отыскания места повреждения.

Далее в работе рассмотрен учет первого из названных факторов.

Методика выбора вариантов реконструкции системы электроснабжения

Масштабная реконструкция сопровождается, как правило, поэтапным вводом в строй производственных объектов и отдельных участков системы электроснабжения. При этом в процессе ввода в эксплуатацию новых и реконструированных объектов может потребоваться корректировка решений по реализации очередного этапа. В связи с этим необходимо рассматривать задачу планирования в таких условиях как динамическую. Представим этот процесс как последовательную игру [11] с участием двух игроков: организации, осуществляющей комплекс работ по реконструкции (активный игрок А), и «природы» (пассивный игрок П). Действие «природы» определяется отклонением фактической нагрузки объекта от проектной, изменением цен на электроэнергию в сравнении с прогнозными, возможностью возникновения аварийных ситуаций различного вида и различным временем их ликвидации. В зависимости от текущей ситуации возможно принятие различных решений по дальнейшей реконструкции, в связи с чем целесообразно рассматривать процесс реконструкции как игру в смешанных стратегиях, число ходов в которой $2N$ (N – количество этапов). Вероятность того или иного состояния «природы» (хода игрока П) будем определять на основе теории нечетких множеств, считая фактическую нагрузку в результате реконструкции системы электроснабжения односторонним нечетким числом. Будем в этом качестве использовать числа с функцией принадлежности, заданной кривой Коши, параметризованной по уровню 0,5 [12]. В данном случае она будет иметь следующий вид:

$$\mu(P) = \frac{1}{1 + \left(\frac{P - P_{гр}}{P_{сп} - P_{гр}} \right)^2}, \quad (1)$$

где P – фактическая нагрузка в результате реконструкции; $P_{гр}$ – граничное значение нагрузки, соответствующее правой границе ядра нечеткого интервала; в качестве

граничного значения будем принимать проектное значение расчетной нагрузки; P_{cp} – нагрузка, соответствующая десятипроцентному превышению фактической нагрузки над проектным значением (погрешность в 10 % соответствует определению расчетных нагрузок методом расчетных коэффициентов, применяемым сейчас в проектной практике (см., например, [12]); $P_{cp} = 1,1 P_{гр}$.

Необходимо минимизировать проигрыш игрока А, в качестве которого примем ущерб от нарушения надежности электроснабжения при реализации какого-либо варианта. Тогда роль платежной функции будет выполнять проигрыш игрока А после выполнения очередного хода.

Структура графа игры для двух этапов реконструкции показана на рис. 1.

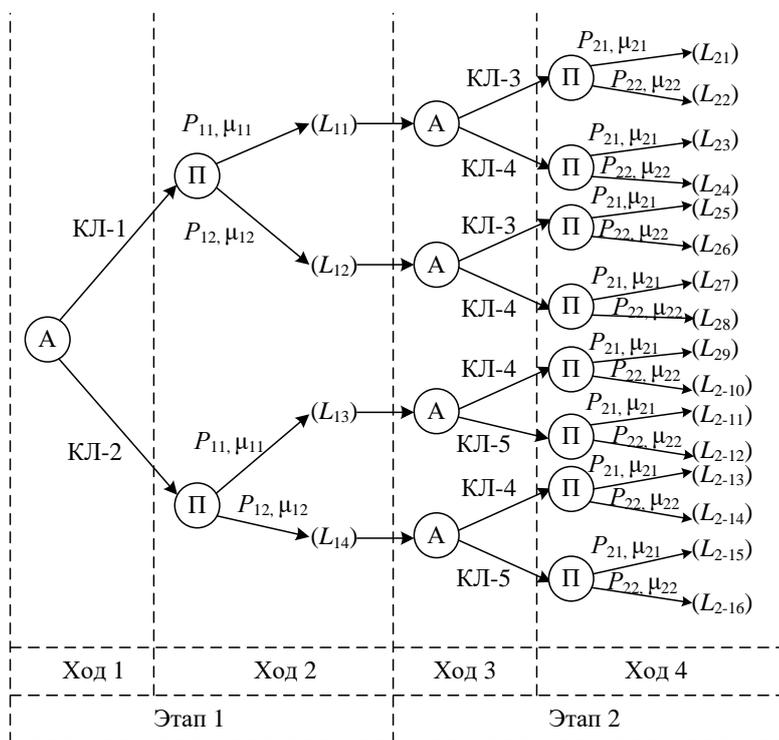


Рис. 1. Общий вид графа игры, соответствующего реконструкции системы электроснабжения в два этапа

Здесь КЛ-1 ... КЛ-5 – элементы реализуемой стратегии – вводимые участки системы электроснабжения; P_{11} , P_{12} и P_{21} , P_{22} – возможные значения нагрузки реконструированного участка на первом и втором этапах, соответственно, с вероятностями p_{11} , p_{12} , p_{21} , p_{22} . D_{11} ... D_{14} – значения проигрыша, соответствующие реализации двух вариантов (сооружение КЛ-1 или КЛ-2) первого этапа, при величинах нагрузки P_{11} или P_{12} ; значения D_{21} ... D_{2-16} – аналогичные значения при последующем сооружении КЛ-3 или КЛ-4 и нагрузке P_{21} (P_{22}). В качестве проигрыша D будем использовать приведенные затраты с учетом ущерба.

В качестве критерия принятия решений возьмем критерий Байеса, позволяющий оперировать субъективными вероятностями состояний природы. В качестве вероятностей будем использовать значения функции принадлежности (ФП) по выражению (1). В этом случае проигрыш на i -м этапе реконструкции будем определять следующим образом:

$$L_{is}(i) = \sum_{i=1}^N \mu_{ia(i)} D_{is(i)a(i)}, \quad (2)$$

где $s(i)$ – номер выбранной стратегии; $a(i)$ – состояние природы на i -м этапе; $\mu_{ia(i)}$ – значение ФП для состояния $a(i)$; $D_{is(i)a(i)}$ – проигрыш, включающий капиталовложения, приведенные к одному году, и ущерб от нарушения электроснабжения при реализации стратегии $s(i)$ и состоянии природы $a(i)$.

При учете степени доверия игрока А к принятому распределению может быть использован критерий Ходжа-Лемана, являющийся комбинацией критериев Байеса и Вальда. Выражение для проигрыша в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$L_{is}(i) = \lambda \sum_{i=1}^N \mu_{ia(i)} D_{is(i)a(i)} + (1-\lambda) \max_{1 \leq i \leq N} (D_{is(i)a(i)}), \quad (3)$$

где $\lambda \in [0;1]$ – степень доверия.

При отсутствии каких-либо предпочтений (при $\lambda=0$) получаем критерий Вальда:

$$L_{is}(i) = \max_{1 \leq i \leq N} (D_{is(i)a(i)}). \quad (4)$$

При использовании любого из указанных критериев окончательный вариант реконструкции будет выбираться по критерию минимального проигрыша $\min L_{Ns}(N)$ на последнем этапе.

Практическое применение

В качестве примера рассмотрена реконструкция крупного металлургического предприятия. Планируется сооружение установок аспирации, для питания которых предусмотрено строительство новой ПС-11 110/10 кВ. Нагрузка ПС составит $S_1=80$ МВА. Планируется осуществлять внешнее электроснабжение ПС-11 110кВ от ПС-60 и ЦЭС; для обеспечения более надежного электроснабжения предусмотрено строительство дополнительных линий от ПС – 30, 62, 85.

Варианты схем подключения ПС-11 показаны на рис. 2.

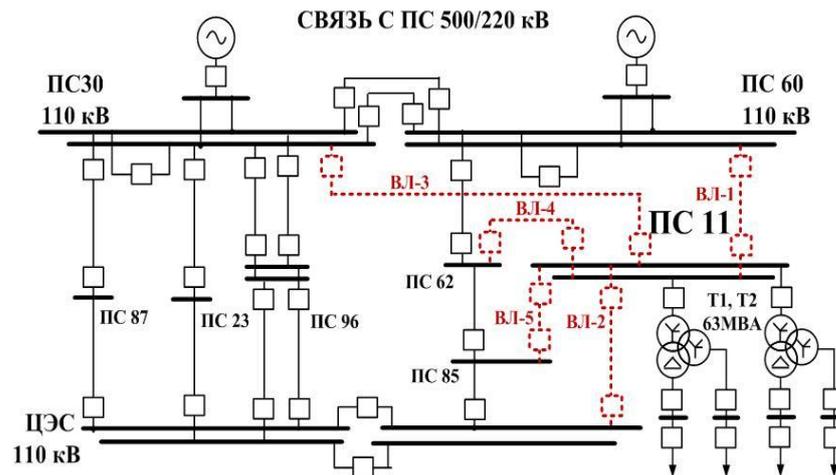


Рис. 2. Возможные схемы подключения ПС-11

Для предложенных схемных решений построен граф игры (рис. 3).

Как было отмечено выше, выбор окончательного варианта реконструкции осуществляется исходя из критерия минимального суммарного проигрыша по принятому

критерию (Байеса, Ходжа-Лемана, Вальда) $\min L_{iS}$ на последнем этапе. При этом ущерб, как составляющая проигрыша, определяется следующим образом:

$$Y_{is} = y_0 T_R \Delta P_{iS}, \quad (5)$$

где y_0 – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителя, определяемый временем перерыва и характером производства, руб./кВт·ч (для предприятий черной металлургии $y_0=18,3$ руб/кВт·ч [14]); T_R – время восстановления; ΔP_{iS} – мощность, недоотпущенная потребителю вследствие нарушения электроснабжения с учетом значения ФП μ_{ij} при работе с данным значением P_{iS} ($\Delta P_{iS} = |P_1 - P_{iS}| p_{iS}$, где $P_1=64$ МВт – нагрузка, предусмотренная проектом).

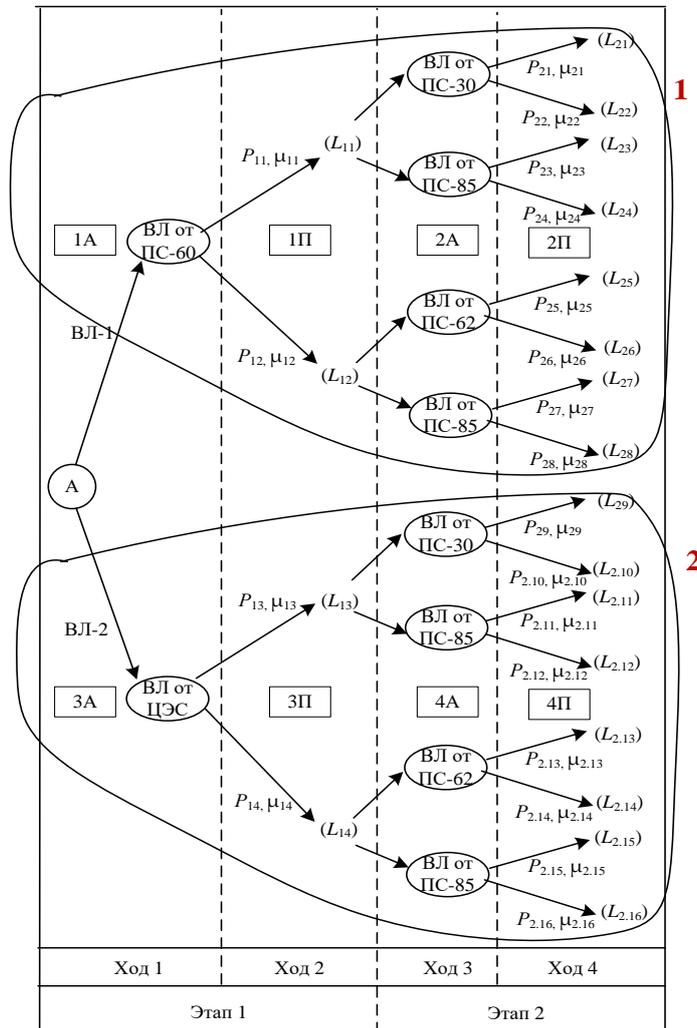


Рис. 3. Граф игры, соответствующий строительству ПС-11

Для предложенных вариантов схем произведена оценка капиталовложений K , и с помощью ПК КАТРАН [15, 16] рассчитаны показатели надежности (параметр потока отказов ω и время восстановления T_R). Полученные результаты представлены в табл. 1. Во всех рассмотренных вариантах принято строительство линий электропередачи 110 кВ на

металлических опорах с использованием проводов марки АСУ-400, сооружение 1 км которых составит 0,55 млн руб/км [17], параметр потока отказов $\omega=0,0128$ 1/год на 1 км [17].

Для корректного сравнения полученных значений учитывались значения капитальных вложений (значения приведены в табл. 1) в каждый из проектов реконструкции. Таким образом, проигрыш, представляющий собой приведенные затраты с учетом ущерба V_{is} , будет определяться следующим образом:

$$D_{is} = V_{is} + K_{is} E_H \quad (6)$$

где E_H – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ($E_H = 0,12$).

Таблица 1

Варианты подключения ПС-11 и соответствующие им капиталовложения и показатели надежности

| Стратегия | Сооружаемые линии | Суммарная длина, км | Суммарные капиталовложения, млн руб. | ω , 1/год | T_R , год |
|-----------|------------------------------|---------------------|--------------------------------------|------------------|-------------|
| 1 | ПС-60 – ПС-11 | 5,2 | 2,86 | 0,000010 | 0,003948 |
| | ПС-60 – ПС-11; ПС-30 – ПС-11 | 11,5 | 6,33 | 0,080650 | 0,000801 |
| | ПС-60 – ПС-11; ПС-85 – ПС-11 | 12,3 | 5,45 | 0,060170 | 0,000801 |
| | ПС-60 – ПС-11; ПС-62 – ПС-11 | 9,9 | 6,77 | 0,090890 | 0,000801 |
| 2 | ЦЭС – ПС-11 | 2,8 | 1,54 | 0,000005 | 0,003256 |
| | ЦЭС – ПС-11; ПС-30 – ПС-11 | 9,1 | 5,01 | 0,080645 | 0,000768 |
| | ЦЭС – ПС-11; ПС-85 – ПС-11 | 9,9 | 4,13 | 0,060165 | 0,000768 |
| | ЦЭС – ПС-11; ПС-62 – ПС-11 | 7,5 | 5,45 | 0,090885 | 0,000768 |

Результаты расчета проигрыша приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета суммарных проигрышей по графу игры

| Стратегия | Описание хода | Значение нагрузки P_{ia} | Величина ФП μ_{is} | Проигрыш D_{is} млн руб. | Суммарный проигрыш при P_{i1} | Суммарный проигрыш при P_{i2} | |
|-----------|---|----------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------|
| 1 | 1А: Сооружение ВЛ-1 (от ПС-60) 1П: Рост нагрузок | $P_{11}=1,2P_1$ | 0,2 | 10,064 | 10,064 | 34,364 | |
| | | $P_{12}=1,05P_1$ | 0,8 | 34,364 | | | |
| | 2А: Сооружение ВЛ-3, 4, 5 (от ПС-30, 62, 85) 2П: Рост нагрузок | От ПС-30 | $P_{21}=1,15P_1$ | 0,31 | 3,667 | 13,731 | 38,031 |
| | | | $P_{22}=1,3P_1$ | 0,1 | 1,828 | 11,892 | 36,192 |
| | | От ПС-85 | $P_{23}=1,1P_1$ | 0,5 | 5,173 | 15,237 | 39,537 |
| | | | $P_{24}=0,85P_1$ | – | – | – | – |
| | | От ПС-62 | $P_{25}=1P_1$ | – | – | – | – |
| | | | $P_{26}=0,9P_2$ | – | – | – | – |
| 2 | 3А: Сооружение ВЛ-2 (от ЦЭС) 3П: Рост нагрузок | $P_{13}=1,2P_1$ | 0,2 | 8,201 | 8,201 | 4,527 | |
| | | $P_{14}=1,3P_1$ | 0,1 | 4,527 | | | |

Продолжение таблицы 2

| | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|-------|--------|--------|--------------|
| 4А: Сооружение ВЛ-3, 4, 5(от ПС-30, 62, 85) 4П: Рост нагрузок | От ПС-30 | $P_{2,9}=1,1P_1$ | 0,5 | 4,933 | 13,134 | 9,46 |
| | | $P_{2,10}=1P_1$ | – | – | – | – |
| | От ПС-85 | $P_{2,11}=0,8P_1$ | – | – | – | – |
| | | $P_{2,12}=1,15P_1$ | 0,31 | 3,283 | 11,484 | 7,81 |
| | От ПС-62 | $P_{2,13}=1P_1$ | – | – | – | – |
| | | $P_{2,14}=1,3P_1$ | 0,1 | 1,678 | 9,879 | 6,205 |
| От ПС-85 | $P_{2,15}=1,1P_1$ | 0,2 | 2,492 | 10,693 | 7,019 | |
| | $P_{2,16}=0,95P_1$ | – | – | – | – | |

Как следует из табл. 2, наилучшая стратегия, характеризующаяся наименьшим проигрышем, – сооружение ВЛ от ЦЭС, затем вторым этапом – от ПС-62.

Заключение

В статье разработана усовершенствованная методика выбора вариантов многоэтапной реконструкции системы электроснабжения на основе подходов теории игр, отличающаяся от существующих методик возможностью учета вероятностей возможных состояний объекта в результате реализации каждого этапа.

Вероятность возможных состояний объекта предложено определять на основе теории нечетких множеств, используя числа с функцией принадлежности, заданной кривой Коши. Процесс реконструкции представляется в виде последовательной игры с участием активного игрока (службы, ответственной за планирование работ по реконструкции) и пассивного игрока («природы»), что позволяет учесть все возможные изменения внешних факторов и сочетания принимаемых решений на каждом этапе. В качестве основного критерия выбора варианта реконструкции принято значение затрат с учетом ущерба от нарушения надежности электроснабжения; выбирать предлагается исходя из критерия минимального проигрыша на последнем этапе. Методика допускает коррекцию принятой стратегии по результатам реализации любого из этапов.

В качестве примера рассмотрено два этапа реконструкции системы электроснабжения крупного металлургического предприятия при сооружении нового энергоемкого потребителя. В результате расчетов на основе графа игры выбран вариант, характеризующийся наименьшим значением проигрыша.

Литература

1. Коньшева Л.К., Назаров Д.М. Основы теории нечетких множеств. СПб : Питер, 2011. 192 с.
2. Коваленко И.В., Тремясов В.А. Применение теории нечетких множеств при выборе варианта реконструкции главных схем выдачи мощности электростанций // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 5/6. С. 26–32.
3. Шевченко Н.Ю., Лебедева Ю.В., Хавроничев С.В. Алгоритм выбора оптимального варианта реконструкции воздушных линий электропередачи напряжением 110–220 кВ // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 10.
4. Малафеев А.В., Юлдашева А.И. Использование теории нечетких множеств для оценки производственных рисков при управлении режимами промышленной системы электроснабжения // Электроэнергетика глазами молодежи: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф., 9–13 ноября 2015 г., г. Иваново. В 2 т. Т. 2. Иваново, 2015. С. 294–297.
5. Метельков А.А. Разработка методики планирования систем электроснабжения районов с малой плотностью нагрузок с учетом неопределенности исходной информации : дис. ... канд. технич. наук: 05.14.02 . М., 2004. 208 с.

6. Семенова Л.А. Многокритериальный анализ моделей развития систем электроснабжения в условиях неопределенности // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 4. С. 39–46.
7. Абдуллазянов Э.Ю., Васильев Ю.А., Галиев И.Ф. Модели надежности схем электроснабжения предприятий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №5-6. С. 67–74.
8. Abapour S., Zare K., Mohammadi-ivatloo B. Evaluation of technical risks in distribution network along with distributed generation based on active management // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8. Iss. 4. P. 609-618. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0666.
9. Cunbin L., Gefu Q., Tingting Y. Operational Risk Assessment of Distribution Network Equipment Based on Rough Set and D-S Evidence Theory // Journal of Applied Mathematics. 2013. Article ID 263905. 7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/263905>.
10. Юлдашева А.И., Малафеев А.В. Учет показателей надежности при планировании режима промышленной системы электроснабжения с собственными электростанциями // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С. 36–40.
11. Дулякин В. М. Теория игр. Самара: Изд-во Самар. аэрокосм. ун-та, 2011. 191 с.
12. Коротеев М.В. Лингвистические переменные экономических показателей // Аудит и финансовый анализ. 2012. № 2. 5 с.
13. Кудрин Б.И., Жилин Б.В., Ошурков М.Г. Электроснабжение. Ростов-на-Дону: Феникс, 2018. 382 с.
14. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения. – М: МЭИ , 2010. 187 с.
15. Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Панова Е.А., Варганова А.В., Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Зиновьев В. В., Савельева К.С., Юлдашева А. И., Крубцова А.А., Курилова Н.А., Свидетельство 2015662725 РФ. Программа «Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 9.0», Оф. бюл. «Программы для ЭВМ, базы данных, ТИМС», 2015.
16. Малафеев А.В. Алгоритм расчета структурной надежности систем электроснабжения крупных промышленных предприятий на основе метода последовательного эквивалентирования // Известия РАН. Энергетика. 2016. №4. С. 62–72.
17. RUCABEL.RU [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.rucabel.ru/asu/cabel_asu_400_93.html, свободный (дата обращения: 20.10.2018).
18. РД 34.20.574. Указания по применению показателей надежности элементов энергосистем и работы энергоблоков с паротурбинными установками [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.xjob.ru/РД_34.20.574, свободный (дата обращения: 20.10.2018).

Авторы публикации

Малафеев Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Юлдашева Алина Илдаровна – аспирант Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

References

1. Konysheva L.K., Nazarov D.M. Fundamentals of the theory of fuzzy sets. - SPb.: Peter, 2011. 192 p.
2. Kovalenko I.V., Tremyasov V.A. Application of the theory of fuzzy sets in the problem of reconstruction options selection for the main power distribution schemes of power plants // Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems. 2004. No. 5-6. P. 26–32.
3. Shevchenko N.Yu., Lebedeva Yu.V., Havronichev S.V. The algorithm for selection of optimal variant for the reconstruction of overhead transmission lines of 110–220 kV// Modern problems of

science and education. 2013. No. 5. P. 10.

4. Malafeev A.V., Yuldasheva A.I. Application of the fuzzy sets theory for assessment of production risks in the task of modes control for the industrial power supply system // Electrical energy industry through the eyes of young people: proceedings of VI Intern. scientific and technical conference, November 9–13, 2015, Ivanovo. T. 2. Ivanovo, 2015. P. 294–297.

5. Metelkov A. A. Development of planning methodology for power supply systems of areas with low density loads, taking into account the uncertainty of the initial information: dis. ... cand. tech. sciences: 05.14.02. M., 2004. 208 p.

6. Semenova L.A. Multi-criteria analysis of the development models of power supply systems in uncertainty conditions// Cherepovets State University Bulletin. 2016. No. 4. P. 39–46.

7. Abdullazyanov E.Y., Vasiliev Y.A., Galiev I.F. Enterprises power supplying schemes reliability models for investments efficiency // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki. 2009. No. 5-6. P. 67–74.

8. Abapour S., Zare K., Mohammadi-ivatloo B. Evaluation of technical risks in distribution network along with distributed generation based on active management // IET Generation, Transmission & Distribution. 2014. Vol. 8. Iss. 4. P. 609–618. doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0666.

9. Cunbin L., Gefu Q., Tingting Y. Operational Risk Assessment of Distribution Network Equipment Based on Rough Set and D-S Evidence Theory // Journal of Applied Mathematics. 2013. Article ID 263905. 7 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/263905>.

10. Yuldasheva A.I., Malafeev A.V. Accounting the reliability index at planning the mode of industrial power supply system with own electric power stations // Electrotechnical Systems and Complexes. 2015. No. 3(28). P. 36–40.

11. Duplyakin V.M. Games theory. Samara: Publishing House of Samara Aerospace University, 2011. 191 p.

12. Koroteev M.V. Linguistic variables of economic indicators // Audit and financial analysis. - 2012. No. 2. 5 p.

13. Kudrin B.I., Zhilin B.V., Oshurkov M.G. Electric power supply. Rostov-on-Don: Phoenix, 2018. 382 p.

14. Nepomnyashchy V.A. Economic losses from a electric power supply failure. M: MPEI, 2010. 187 p.

15. Igumenshev V.A., Malafeev A.V., Panova E.A., Varganova A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Zinoviev V.V., Savelieva K.S., Iuldasheva A.I., Krubtsova A.A., Kurilova N.A., Testimony 2015662725, Russia, Program “Complex of automated mode analysis KATRAN 9.0”. “Computer Program, Database, TIMS,” 2015.

16. Malafeev A.V. Algorithm of structural reliability calculation of large industrial works electric power supply systems based on sequential reduction method // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering. 2016. No. 4. P. 62–72.

17. RUCABEL.RU [Electronic resource]. Access mode: http://www.rucabel.ru/asu/cabel_asu_400_93.html, free (access date: 10/20/2018).

18. RD 34.20.574. Guidelines for the application of indicators of reliability of elements of power systems and operation of power units with steam-turbine installations [Electronic resource]. Access mode: http://www.xjob.ru/ПД_34.20.574, free (access date: 10/20/2018).

Authors of the publication

Aleksei V. Malafeev – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Alina I. Iuldasheva – Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Поступила в редакцию

29 декабря 2018 г.