

УДК 621.311.1

## Количественная оценка производственных рисков при принятии решений по управлению и реконструкции системы электроснабжения крупного промышленного предприятия<sup>1</sup>

А.В. Малафеев, А.И. Юлдашева  
ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Российская Федерация  
E-mail: malapheev\_av@mail.ru, alinayuldasheva1@gmail.com

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Существенное снижение надежности электроснабжения цехов крупных энергоемких промышленных предприятий наблюдается при длительном проведении ремонтных работ на отдельных цепях двухцепных воздушных линий 110–220 кВ, а также при не вполне обоснованном выводе оборудования этого класса напряжения в резерв в целях снижения потерь холостого хода без каких-либо дополнительных схемных решений, что сейчас нередко наблюдается при разработке и реализации программ по энергосбережению. Для металлургического производства ущерб от нарушения электроснабжения значителен, однако длительные отключения происходят редко, в связи с чем сложно определить вероятностные характеристики ущерба. В первую очередь это касается сетей 110–220 кВ. Из теории рисков известно, что производственные риски качественно схожи с операционными, для которых характерно незначительное снижение вероятности с увеличением ущерба. Это говорит о необходимости оценки ущербов, соответствующих малым вероятностям и в условиях частичной неопределенности исходной информации. Проблема принятия решений в условиях неопределенности занимает важное место в общей проблеме принятия решений. Следовательно, актуальной является разработка методики оценки мероприятий по управлению режимами и развитию системы электроснабжения с учетом наибольших рисков в условиях частичной неопределенности исходной информации, обеспечивающих высокую обоснованность и адекватность принимаемых решений при низких затратах.

**Материалы и методы:** Предлагаемая методика оценки рисков основана на теории нечетких множеств. В качестве исходной информации использована схема и данные об отключениях для условий системы электроснабжения крупного металлургического предприятия с полным технологическим циклом.

**Результаты:** Разработана методика оценки мероприятий по реконструкции и управлению режимами на основе наибольших значений ущерба. Область значений ущерба представляется в виде нечеткого числа с границей в виде кривой Коши. Уровень значимости принят на основе экспертных оценок. Для выбора наиболее целесообразных мероприятий по реконструкции и управлению режимами использован критерий Ходжа-Лемана.

**Выводы:** Разработанная методика может быть использована для планирования мероприятий по реконструкции, а также нормальных и ремонтных эксплуатационных схем систем электроснабжения крупных предприятий при отсутствии достаточной информации об отключениях в сетях различных классов напряжения.

**Ключевые слова:** нарушение электроснабжения, производственный риск, экономический ущерб, нечеткое число, функция принадлежности, критерий Ходжа-Лемана, критерий Вальда, критерий Байеса.

## Quantitative assessment of operational risks in making decisions for management and reconstruction of power supply systems of large industrial enterprises

A.V. Malafeyev, A.I. Yuldasheva  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation  
E-mail: malapheev\_av@mail.ru, alinayuldasheva1@gmail.com

### Abstract

**Background:** A significant decrease in power supply reliability of the large energy intensive industries is often caused by long-term repair works on separate circuits of 110–220 kV dual circuit electrical transmission lines and by development and implementation of energy saving programs. The latter may include not quite justified solutions to switch equipment to standby mode with the goal to reduce the no-load losses without any additional circuit design changes. For metallurgical production, the damage caused by a power failure is significant. However, since long shutdowns are rare, it is difficult to determine the probability damage characteristics. In particular, this applies to 110–220 kV networks. As is known from the risk theory, production risks are qualitatively similar to operating ones which are characterized by a slight probability decrease with a damage increase. This suggests the need to evaluate the damages corresponding to small probabilities and in conditions of partial uncertainty of initial information. The problem of decision-making under conditions of uncertainty occupies an important place in the general decision-making problem. Consequently, it is now quite urgent to develop a methodology for assessing measures of power supply system mode control and of power supply system development. Such methodology should take account of the greatest risks in conditions of partial uncertainty of initial information and provide high validity and adequacy of the decisions taken at a low cost.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №14-07-00200-а

**Materials and Methods:** The proposed risk assessment methodology is based on the theory of fuzzy sets. The scheme and outage conditions data for the power supply system of a large metallurgical enterprise with a complete production cycle are used as the initial information.

**Results:** A method has been developed to assess management actions aimed at modernization and mode planning. The method is based on the highest value of damage. The range of damage values is presented as a fuzzy interval bounded by a Cauchy curve. The significance level is taken on the basis of expert estimations. The Hodge-Lehmann estimate was used to select the most appropriate measures for the reconstruction and mode control.

**Conclusion:** The developed method can be used to plan reconstruction measures as well as normal repair and maintenance schemes of large enterprises' power supply systems when there is not enough information about outages in the networks of different voltage classes.

**Key words:** power supply interruption, production risk, economic damage, fuzzy number, membership function, Hodge-Lehmann estimate, Wald criterion, Bayesian criterion.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2016.3.055-062

**Введение.** Функционирование систем электроснабжения крупных промышленных предприятий, имеющих в своем составе собственные источники электроэнергии и сложно-замкнутые распределительные сети напряжением 110–220 кВ, сопровождается производственными рисками, обусловленными факторами различного характера:

- 1) техническим состоянием электросетевого и станционного оборудования;
- 2) работой релейной защиты и автоматики;
- 3) решениями по управлению режимами сетей и станций и выводу оборудования в ремонт или резерв;
- 4) реализацией инвестиционных проектов;
- 5) реализацией проектов по энергосбережению.

К таким объектам, в частности, можно отнести предприятия черной металлургии. Системы электроснабжения крупных предприятий черной металлургии имеют ряд особенностей, к которым следует отнести:

- 1) высокую степень резервирования, заложенную на стадии проектирования;
- 2) сочетание явного и неявного резервирования на всех ступенях напряжения;
- 3) значительную трансформаторную мощность, учитывающую развитие производства;
- 4) существенную долю потерь холостого хода в общей структуре потерь активной мощности;
- 5) преобладание в сетях 35–220 кВ двухцепных воздушных линий;
- 6) недостаточный объем статистической информации по отключениям отдельных элементов сетей 35–220 кВ.

Если риски, связанные с отказами оборудования, успешно оцениваются методами теории надежности, то риски, связанные с принятием решений оперативным и административно-техническим персоналом, должны оцениваться с учетом определенных психологических аспектов. В частности, в течение нескольких последних лет кризисные явления в экономике на металлургических предприятиях при-

вели к чрезвычайному ужесточению энергосберегающей политики, в связи с чем решения по энергосбережению часто принимаются без учета надежности электроснабжения цехов. Основанием при этом зачастую является относительно малая частота аварийных отключений какого-либо конкретного электросетевого объекта.

Так, ошибочно принятые решения по снижению потерь электроэнергии за счет вывода в резерв оборудования с повышенной долей потерь холостого хода приводят к повышению риска возникновения ущерба от нарушения электроснабжения структурных подразделений предприятия. Объем статистической информации по аварийным отключениям в таких режимах крайне недостаточен для определения вероятности отключения и, как следствие, возникновения ущерба. Следовательно, для количественной оценки риска необходимо использовать подходы, позволяющие учесть фактор неопределенности.

Кроме того, риск нарушения электроснабжения потребителей возникает при проведении ремонтных работ на одной из цепей двухцепной воздушной линии электропередачи, питающей двухтрансформаторную подстанцию. В этом случае достаточно велика вероятность повреждения второй цепи, в особенности, если работы на отключенной цепи проводятся в целях ликвидации аварии и сопровождаются длительным отысканием места повреждения [1]. В таких ситуациях объект, как правило, полностью теряет питание, за исключением подстанций, на которых предусмотрен резервный ввод (как правило, только один) для питания электроприемников первой категории.

**Используемые переменные и функции принадлежности.** Для учета неопределенности предлагается использовать аппарат теории нечетких множеств [2]. Производственные риски, как указано в [3], качественно схожи с операционными. Следовательно, для них характерно незначительное снижение вероятности ущерба с увеличением его значения. Наибольший ущерб будет при этом наблюдаться у цехов доменного, сталеплавильного и прокатного переделов, он достаточно велик,

несмотря на различную вероятность нарушения электроснабжения этих объектов (для питания наиболее ответственных потребителей могут использоваться шины собственных электростанций). При большом объеме статистической информации для учета этого явления используются распределения с так называемым «тяжелым хвостом» [4]. Достаточно часто для этой цели используются обобщенное распределение Парето (generalized Pareto distribution, GPD) и обобщенное распределение экстремальных значений (generalized extreme value distribution, GEV). Однако эти распределения характеризуются достаточно большим количеством параметров (в большей степени – GEV), определение которых представляет существенную сложность [5] (пороговое значение, масштабный коэффициент, коэффициент формы и т.д.), в особенности при малой выборке.

В таких условиях более простым и удобным решением является представление ущерба односторонним нечетким числом. Функция принадлежности при этом должна обладать свойствами, характерными для названных выше распределений. Ниже предлагается в этом качестве использовать функцию распределения в виде кривой Коши, параметризованной по уровню 0,5 [6]:

$$\mu(Y) = \frac{1}{1 + \left(\frac{y - y_{гр}}{c - y_{гр}}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $Y$  – ущерб;  $y_{гр}$  – правая граница ядра нечеткого интервала, в качестве которого выступает граничное значение ущерба;  $c$  – параметр, соответствующий уровню значимости 0,5.

Значение  $c$  примем равным значению ущерба, соответствующего среднему времени отключения по имеющимся наблюдениям  $Y_{ср}$ . Выбор граничного ущерба представляет определенные трудности, в связи с чем желательна его оценка экспертным путем. С этой целью он также представляется в виде нечеткого множества. Удобнее всего в данном случае использовать множество с конечным носителем,

т.е.  $\tilde{Y}_{гр} = \sum_{k=1}^K \mu_{Y_{гр}}(Y_{гр.k}) / Y_{гр.k}$ . Значения  $Y_{гр.k}$  могут соответствовать, например, различным условиям отыскания места повреждения и последующего проведения ремонтных работ (наличие или отсутствие фиксирующих приборов, удаленность объекта от производственной базы, погодные условия и др.).

При наличии достаточной статистической информации об отключениях в сетях заданного класса напряжения для конкретного предприятия (или какой-либо его промышленной площадки) средний ущерб может определяться на основе расчетных значений параметра потока отказов:

$$Y_{ср} = y_0 \omega T_B P_{огр} T, \quad (2)$$

где  $y_0$  – удельный ущерб для данного вида производства, руб/кВт·ч;  $\omega$  – параметр потока отказов, 1/год;  $T_B$  – среднее время восстановления, ч;  $P_{огр}$  – глубина ограничения нагрузки потребителя (вплоть до его полного отключения  $P_{огр} = P_{потр}$ ), кВт;  $T$  – период, за который оценивается ущерб, ч.

Граничный ущерб в этом случае может быть определен приближенно на основании среднеквадратичного отклонения времени отключения  $\sigma_T$ , полученного в результате обработки информации об аварийных событиях в системе электроснабжения:

$$Y_{гр} = Y_{ср} (1 - u_{0,95} \sigma_T), \quad (3)$$

где  $u_{0,95}$  – квантиль нормального распределения, соответствующий доверительной вероятности 0,95 ( $u_{0,95} = 1,67$ ).

Выразив из (1) величину ущерба  $Y$  для уровня  $\mu$ , получим

$$Y = Y_{гр} + (Y_{ср} - Y_{гр}) \sqrt{\frac{1}{\mu} - 1}. \quad (4)$$

Для оценки наиболее тяжелых последствий отключений следует воспользоваться методом VaR (Value at Risk) [7], приняв значение функции принадлежности (доверительный уровень) равным  $\mu = 0,005$ . Такой подход аналогичен широко распространенному дельта-нормальному методу определения квантилей нормального закона распределения и волатильности изменения риск-фактора, в качестве которого выступает его среднеквадратическое отклонение [8].

Предположим, что имеется множество  $C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$  объектов, для которых рассматривается риск от внедрения определенных мероприятий. Выделим из него два подмножества:  $A \subseteq C$  объектов, для которых проводятся схемно-режимные мероприятия; и  $B \subset C$  объектов, связанных с ними технологически.

Тогда ущерб будет задаваться нечеткой переменной  $\tilde{Y}$  и, соответственно, термножеством

$$\tilde{Y}(\text{"ущерб"}) = \text{"наибольший"} \cup \text{"большой"} \cup \text{"средний"} \cup \text{"малый"} \cup \text{"наименьший"}. \quad (5)$$

Для указанных термов примем интервалы значений функции принадлежности, приведенные в табл. 1.

В связи с тем, что функция принадлежности в виде зависимости (1) является неограниченной, наименьший уровень значимости в табл. 1 принят равным 0,005.

Таблица 1. Соответствие лингвистических значений и значений функции принадлежности

Лингвистическое значение	Значение функции принадлежности
«наибольший»	0,001...0,2
«большой»	0,2...0,4
«средний»	0,4...0,6
«малый»	0,6...0,8
«наименьший»	0,8...1,0

Для учета мнения экспертов о риске возникновения ущерба для того или иного производственного объекта введем лингвистическую переменную «Риск», соответствующую нечеткой переменной  $\tilde{R}$ . Этой переменной ставится в соответствие терм-множество

$$\tilde{R}(\text{«риск»}) = \text{«наибольший»} \cup \text{«большой»} \cup \text{«средний»} \cup \text{«малый»} \cup \text{«наименьший»} \quad (6)$$

с границами термов, аналогичными указанным в табл. 1. Четкое значение риска примем равным  $R = 1 - \mu$  (1) в связи с тем, что при оценке последствий аварийных ситуаций величина возможного ущерба имеет большее значение, чем вероятность его возникновения.

Для каждого из рассматриваемых производственных объектов необходимо по (2) определить значения ущерба, соответствующие границам термов в табл. 1.

Таким образом, каждый комплекс мероприятий характеризуется двумя нечеткими бинарными соответствиями [9]:  $\Gamma$  на декартовых произведениях множеств  $C \times Y_{гр}$  ( $\Gamma \subseteq C \times Y_{гр}$ ) и  $\Delta \subseteq C \times R$ . Бинарное соответствие  $\Gamma$  имеет характеристическое свойство  $C_i \gamma Y_{гр,i}$  «для объекта  $C_i$  ожидается граничный ущерб  $Y_{гр,i}$ », соответствие  $\Delta$  определяется характеристическим свойством  $C_i \delta R_i$  «объекту  $A_i$  соответствует риск  $R_i$ ».

**Правила нечеткого вывода.** В целях определения совокупного риска при реализации решений, затрагивающих несколько объектов, следует сформулировать правило нечеткого вывода. Как указано, например, в [10], нечеткий вывод включает в себя фаззификацию (выбор лингвистического значения для четкого значения переменной), нечеткую импликацию, агрегацию и дефаззификацию.

При рассмотрении объектов, не имеющих технологической взаимосвязи, основной операцией будет агрегация, которая будет заключаться в суммировании ущербов по нескольким объектам множества  $A$  и определении минимального значения функции принадлежности, соответствующего максимальному ущербу (наибольшему риску):

$$\mu_Y(\tilde{Y}) = \min_{n=1, N} \{ \mu_Y(\tilde{Y}_1), \mu_Y(\tilde{Y}_2), \dots, \mu_Y(\tilde{Y}_N) \}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество объектов множества  $A$ ;  $n$  – номер объекта;  $\tilde{Y}$  – ущерб для  $N$  объектов.

Технологическая взаимосвязь рассматриваемых объектов и наличие технологического резерва учитывается при помощи нечеткой импликации. Допустим, что при отключении некоторого объекта  $A_i$  вынужденно простаивает объект  $B_j$ , по отношению к которому никаких схемно-режимных мероприятий не производится. В этом случае импликация  $\tilde{Y}_i \rightarrow \tilde{Y}_j$  будет соответствовать логическому «И» и моделироваться минимумом из двух функций принадлежности:

$$\mu_Y(\tilde{Y}_i^*) = \min \{ \mu_Y(\tilde{Y}_i), \mu_Y(\tilde{Y}_j) \}, \quad (8)$$

где  $\mu_Y^*$  – значение функции принадлежности для множества  $\tilde{Y}_i^*$  с учетом ущерба  $\tilde{Y}_j$ .

Если же в такой ситуации на объекте  $B_j$  задействуется технологический резерв любого вида, то импликация соответствует логическому «ИЛИ» и моделируется одной из  $S$ -конорм – алгебраической суммой:

$$\mu_Y^*(\tilde{Y}_i^*) = 1 - (1 - \mu_Y(\tilde{Y}_i))(1 - \mu_Y(\tilde{Y}_j)). \quad (9)$$

Если технологический резерв может быть задействован на объекте  $A_i$ , то этот факт должен быть учтен при предварительной экспертной оценке ущерба в лингвистических переменных  $\tilde{R}$  и  $\tilde{Y}$ .

Дефаззификация может выполняться по методу наибольшей высоты [10] в целях предотвращения занижения ущербов.

**Выбор наиболее целесообразного решения при неопределенности информации о нагрузке потребителя.** Такая задача чаще всего имеет место при развитии производства и росте установленной мощности потребителей. Для выбора наиболее целесообразных мероприятий воспользуемся критерием Ходжа-Лемана [11], используемом при принятии решений в условиях «игр с природой». Этот критерий опирается одновременно на критерий Вальда и критерий Байеса. С помощью параметра  $v$  выражается степень доверия к используемому распределению вероятностей, а коэффициент  $(1-v)$  характеризует количество степени пессимизма игрока  $A$ . Чем больше доверия игрока  $A$  данному распределению вероятностей состояний природы, тем меньше пессимизма, и наоборот. В задаче снижения проигрыша (ущерба) стратегия с минимальным показателем эффективности является оптимальной.

По критерию Байеса за оптимальную принимается та стратегия, при которой максимизируется средний выигрыш или минимизируется средний риск. По критерию Вальда за оптимальную принимается стратегия, которая в наихудших условиях гарантирует минимальный проигрыш, т.е. этот критерий выражает пессимистическую оценку ситуации.

Примем, что нагрузка потребителя изменяется в пределах  $[P_{\min}; P_{\max}]$ , и заменим этот

диапазон множеством значений  $\{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$ , где  $P_1 = P_{\min}$ ,  $P_n = P_{\max}$ . Воспользуемся экспертной оценкой времени отключения (ограничения) потребителя  $T_B$  и соответствующего значения функции принадлежности  $\mu$ . Для сопоставляемых схемных мероприятий на бинарном соответствии  $V \times P$  ( $V$  – множество вариантов мероприятий;  $P$  – множество значений нагрузки потребителей множества  $A$ ) должна быть составлена платежная матрица (табл. 2).

Таблица 2. Платежная матрица схемных мероприятий

Вариант схемы	Возможная нагрузка потребителя						
	$P_1$	$P_2$	...	$P_i$	...	$P_{n-1}$	$P_n$
Вариант 1	$Y_{11}$	$Y_{12}$	...	$Y_{1i}$	...	$Y_{1,n-1}$	$Y_{1n}$
Вариант 2	$Y_{21}$	$Y_{22}$	...	$Y_{2i}$	...	$Y_{2,n-1}$	$Y_{2n}$
...	...	...	...	...	...	...	...
Вариант $j$	$Y_{j1}$	$Y_{j2}$	...	$Y_{ji}$	...	$Y_{j,n-1}$	$Y_{jn}$
...	...	...	...	...	...	...	...
Вариант $n-1$	$Y_{n-1,1}$	$Y_{n-1,2}$	...	$Y_{n-1,i}$	...	$Y_{n-1,n-1}$	$Y_{n-1,n}$
Вариант $n$	$Y_{n,1}$	$Y_{n,2}$	...	$Y_{n,i}$	...	$Y_{n,n-1}$	$Y_{nn}$

В клетках табл. 2 указаны величины ущербов; здесь  $Y_{ji}$  – вероятный ущерб, который может возникнуть при реализации варианта схемных мероприятий  $V_j$  в случае, если нагрузка рассматриваемого потребителя составляет  $P_i$ . Значения  $Y_{ji}$  рассчитываются по (2) для эквивалентного значения параметра потока отказов соответствующего варианта  $\omega_j$ . Затем для каждой строки платежной матрицы рассчитывается функция полезности.

Функция полезности, как указывалось выше, определяется в соответствии с критерием Ходжа-Лемана:

$$Y_j = vY_W + (1-v)Y_B, \quad (10)$$

где  $Y_W$  – значение ущерба по критерию Вальда:  $Y_W = Y_{j\min}$ ;  $Y_B$  – вероятностное значение ущерба с учетом критерия Байеса:

$Y_B = \sum_{i=1}^n (Y_{ji} p_i)$ ;  $Y_{j\min}$  – наибольшее и наименьшее значения ущерба, соответствующие варианту  $V_j$  при изменении нагрузки от  $P_1$  до  $P_n$ ;  $p_i$  – вероятность работы при нагрузке  $P_i$ .

Наиболее рациональный вариант схемных мероприятий выявляется из условия

$$Y_j^{H,P} = \min Y_j. \quad (11)$$

При возможности следует рассмотреть мероприятия организационного характера, позволяющие уменьшить время  $T_B$ . В этом случае определение  $Y_j^{H,P}$  и выбор наиболее рационального варианта должны быть повторены.

**Методика количественной оценки риска.** Мерой риска является размер ожидаемого ущерба от аварийного перерыва электропитания за фиксированный промежуток времени. Таким образом, методика количественной оценки риска включает в себя следующие шаги:

1) выявление множества объектов  $A$ , которые непосредственно затрагивают внедряемые схемно-режимные мероприятия;

2) выявление множества объектов  $B$ , имеющих технологическую взаимосвязь с объектами  $A$ ;

3) экспертная оценка или расчет на основе статистических данных граничных значений ущерба и соответствующих значений функции принадлежности для всех объектов множеств  $A$  и  $B$ ;

4) экспертная оценка риска возникновения ущерба в виде лингвистических значений для объектов множества  $A$ ;

5) определение лингвистических значений ущерба  $U$  для каждого объекта по принятым лингвистическим значениям риска;

6) импликация по правилам (8) и (9) для учета технологических взаимосвязей между объектами;

7) агрегация результатов, полученных для множества объектов  $A$ , по правилу (7);

8) дефаззификация полученного результата на основе выражения (4) и метода наибольшей высоты (наименьшего значения функции принадлежности) – определение четкого значения ущерба, являющегося количественной оценкой риска.

Выбор мероприятий с наименьшим риском на основе критерия Ходжа-Лемана будет включать в себя следующие шаги:

1) определение диапазона возможного изменения нагрузки потребителя, которого затрагивают разрабатываемые мероприятия;

2) экспертная оценка времени отключения потребителя;

3) задание степени пессимизма;

4) расчет вероятных значений ущербов и составление платежной матрицы, включающей все рассматриваемые варианты мероприятий;

5) вычисление цены стратегии для каждого из вариантов с учетом принятой степени доверия;

6) выявление варианта с наименьшей ценой стратегии – с наименьшим риском.

**Пример использования методики.** В качестве примера рассмотрим количественную оценку риска, связанного с отключением линии 110 кВ, питающей один из цехов холодной прокатки крупного металлургического предприятия, при выводе в резерв одного из трансформаторов 63 МВА подстанции №10 110/10 кВ (коэффициент загрузки каждого из них при работе по нормальной схеме равен около 0,3, так как несколько крупных объектов, запитанных ранее от подстанции, на настоящий момент демонтированы). Ущерб будем оценивать по значениям, приведенным в [12]. Среднее время отключения составляет 10,5 ч. Ущерб, соответствующий этому значению, – 8,33 млн руб. Экспертным путем определено нечеткое множество граничных значений ущерба:

$$\tilde{Y}_{гр} = 0,1/1,7 + 0,3/2,4 + 0,5/5,8 + 0,9/6,35 + 0,6/8,3 + 0,3/10,5 + 0,1/11,2. \quad (12)$$

Оценивать будем превышение порога, соответствующего рабочей смене (6,35 млн руб.), который эксперты оценили наибольшим значением функции принадлежности.

Также экспертным путем определено, что для этого цеха следует при расчете принимать значение ущерба «большой». В этом случае в соответствии с табл. 1 должен быть принят уровень значимости в пределах  $\mu = [0,2; 0,4]$ .

Цех холодной прокатки является поставщиком продукции для линии лужения цеха покрытий. В связи с тем, что часть холоднокатаного листа может быть поставлена с других цехов предприятия, должна быть выполнена импликация по правилу (8). Лингвистическое значение ущерба для линии лужения – «средний» ( $\mu = [0,4; 0,6]$ ), так как в цехе имеются определенные складские запасы. Среднее время отключения принимается также 10,5 ч, среднее и граничные значения ущерба для этого объекта – 7,5 и 5,8 млн руб. соответственно. Тогда алгебраическая сумма, соответствующая наименьшим значениям функций принадлежности для значений «средний» и «большой» составляет  $\mu^* = 1 - (1 - 0,2)(1 - 0,4) = 0,52$ . Согласно (4), соответствующее значение ущерба для обоих объектов составляет 14,05 млн руб. При отсутствии возможности поставки листового проката из других цехов эта величина составит (при  $\mu = 0,2$ ) 16,11 млн руб.

Рассмотрим схемные мероприятия по повышению надежности потребителей подстанции №10 при расширении производства в цехе холодной прокатки, заключающиеся в использовании резервных кабельных вводов с подстанций №11 (вариант 1 – 2 трансформатора по 31,5 МВА, удаленность 800 м), №12 (вариант 2 – 2×40 МВА, удаленность 5,1 км) и №13 (вариант 3 – 2×25 МВА; 1,5 км). Нагрузку цеха после реконструкции зададим диапазоном {38; 39; 40; 41; 42} МВА. При коэффициенте загрузки 0,5 располагаемая трансформаторная мощность составит соответственно 31,5; 40 и 25 МВА. В послеаварийном режиме какая-либо из этих подстанций должна взять на себя нагрузку до 42 МВА. В таком случае ограничение по мощности потребителей будет достигать 10,5 МВА в первом, 2 МВА во втором

и 17 МВА в третьем случае. Коэффициент мощности нагрузки для всех режимов принят одинаковым. Составим для этих случаев платежную матрицу (табл. 3).

Таблица 3. Платежная матрица для рассматриваемого примера

Резервные вводы		Возможная нагрузка потребителя, МВА				
		38	39	40	41	42
от п/ст №11	$S_{огр}$ , МВА	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5
	$Y_{гр}$ , млн руб.	2,08	2,33	2,72	3,04	3,36
	$Y_{ср}$ , млн руб.	2,42	2,79	3,16	3,53	3,9
	У для $\mu = 0,2$ , млн руб.	2,76	3,25	3,6	4,02	4,44
от п/ст №12	$S_{огр}$ , МВА	2	3	4	5	6
	$Y_{гр}$ , млн руб.	0,89	1,21	1,54	1,87	2,19
	$Y_{ср}$ , млн руб.	1,03	1,41	1,79	2,17	2,55
	У для $\mu = 0,2$ , млн руб.	2,413	3,249	4,066	4,883	5,719
от п/ст №13	$S_{огр}$ , МВА	13	14	15	16	17
	$Y_{гр}$ , млн руб.	4,16	4,48	4,8	5,12	5,44
	$Y_{ср}$ , млн руб.	4,83	5,21	5,58	5,95	6,32
	У для $\mu = 0,2$ , млн руб.	5,5	5,94	6,36	6,78	7,2

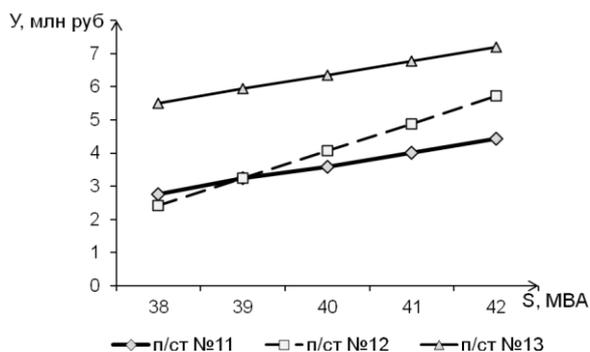
При составлении табл. 3 учтено, что при питании от подстанции №12, имеющей наибольшую трансформаторную мощность, тем не менее имеет место снижение надежности электроснабжения из-за значительной удаленности; кроме того, трасса кабельной линии будет проходить вблизи действующего гранитного карьера. Вероятность отключения принята равной 0,0203 (для прокладки кабелей в траншее). При вычислении цены стратегии степень пессимизма принята равной 0,3 и среднее время отключения для подстанции №10 – 10,5 ч. Граничный ущерб принят соответствующим рабочей смене, как и в предшествующих расчетах.

Таблица 4. Исходные данные для определения критерия Байеса

Нагрузка потребителя, S, МВА	38	39	40	41	42	
Вероятность нагрузки, p	0,05	0,15	0,6	0,15	0,05	
Ущерб для рассматриваемой нагрузки, $U_{\times p}$ , млн руб.	п/ст №11	0,14	0,49	2,16	0,60	0,22
	п/ст №12	0,12	0,49	2,44	0,73	0,29
	п/ст №13	0,28	0,89	3,82	1,02	0,36

Таблица 5. Цена стратегии по критерию Ходжа-Лемана

№ п/ст	Критерий Вальда	Критерий Байеса	Критерий Ходжа-Лемана при степени пессимизма, равной:								
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
п/ст №11	2,76	3,611	3,525	3,440	3,355	3,270	3,185	3,100	3,015	2,930	2,845
п/ст №12	2,413	4,066	3,901	3,735	3,570	3,405	3,240	3,074	2,909	2,744	2,578
п/ст №13	5,5	6,359	6,273	6,187	6,101	6,015	5,930	5,844	5,758	5,672	5,586



К выбору оптимальной схемы

На основе анализа табл. 5 можно сделать вывод, что при увеличении степени пессимизма (более 0,5) выгодной становится стратегия с наименьшим критерием Вальда – для рассматриваемого случая это питание от п/ст 12; при значении степени пессимизма менее 0,5 – оптимальна стратегия с минимальным критерием Байеса, т.е. питание от п/ст 11. Для рассмотренного примера в соответствии с заданной степенью пессимизма (0,3) цена стратегии для варианта 1 (п/ст №11) составляет 3,355 млн руб., для варианта 2 (п/ст №12) – 3,570 млн руб., для варианта 3 (п/ст №13) – 6,101 млн руб. Таким образом, наименьшая функция полезности соответствует варианту резервного питания от п/ст 11, так как при питании от подстанции, имеющей наибольшую располагаемую трансформаторную мощность, существенно возрастает риск отключения резервного ввода.

### Заключение

Для оценки производственных рисков от внедрения схемно-режимных мероприятий в системе электроснабжения при малом объеме статистической информации об отключениях и их последствиях разработана методика, основанная на теории нечетких множеств.

Разработанный подход к количественной оценке рисков позволяет учесть экспертные оценки риска возникновения ущербов и их граничных значений.

Принятый вид функции принадлежности для нечеткого множества величин ущербов позволяет учесть незначительное снижение вероятности возникновения ущербов в области их больших значений, характерное для производственных рисков.

В настоящей работе рассматривался только риск, сопряженный с причинением ущерба потребителям, хотя аналогичным образом могут быть оценены риски, обусловленные, например, возможными затратами на ремонт, замену и техническое обслуживание элементов системы электроснабжения.

### Список литературы

1. Панова Е.А., Савельева К.С., Патшин Н.Т. Математическое моделирование линий электропередачи в задаче определения мест повреждений при однофазных коротких замыканиях в сетях 110–220 кВ систем промышленного электроснабжения // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. – Томск: НИ ТПУ, 2014. – С. 594–598.
2. 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.
3. Вишняков А.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 368 с.
4. Журавлев И.Б. «Как взвесить тяжелый хвост». Теория экстремальных значений как инструмент оценки операционного риска // Риск-менеджмент. – 2008. – № 7–8. – С. 200–205.
5. Губарева Т.С., Гарцман Б.И. Оценка параметров распределений экстремальных гидрометеорологических величин методом L-моментов // Водные ресурсы. – 2010. – Т. 37. – № 4. – С. 1–10.
6. Коротеев М.В. Лингвистические переменные экономических показателей // Аудит и финансовый анализ. – 2012. – № 2. – 5 с.
7. Агаев И.А., Куперин Ю.А. Развитие методов VaR для оценки рисков на финансовых рынках // Региональная экономика и управление: электронный научный журнал. – 2006, №4 (8). Номер статьи: 801. Режим доступа: <http://eee-region.ru/article/801/>.
8. Jorion Ph. Value at risk: the new benchmark for managing financial risk. – 3rd edition. – New York: McGraw-Hill, 2007. – 603 p.
9. Коньшева Л.К., Назаров Д.М. Основы теории нечетких множеств. – СПб.: Питер, 2011. – 192 с.
10. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
11. Лабскер Л.Г., Яновская Е.В. Общая методика конструирования критериев оптимальности решений в условиях риска и неопределенности // Финансовый менеджмент. – 2002. – № 5.
12. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушений электроснабжения потребителей. – М.: Изд. дом МЭИ, 2010. – 188 с.

### References

1. Panova, E.A., Savelyeva, K.S., Patshin, N.T. Mathematical modeling of power lines in the problem of finding fault locations in 110–220 kV single-phase short circuits industrial power supply systems. *Nauchnye trudy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi»* [Collected scientific works of the Vth international scientific and technical conference «Power Industry: Viewpoint of the Youth»]. Tomsk, NI TPU, 2014, pp. 594–598.
2. Malafeyev, A.V., Yuldasheva, A.I. Ispol'zovanie teorii nechetkikh mnozhestv dlya otsenki proizvodstvennykh riskov pri upravlenii rezhimami promyshlennoy sistemy elektrosnabzheniya [Using the fuzzy sets theory for production risk assessment in mode control of industrial power supply systems]. *Trudy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodezhi» v 2 t., t. 2* [Collected works of the VIth international scientific and technical conference «Power Industry: Viewpoint of the Youth» in 2 vol., vol. 2]. Ivanovo, 2015, pp. 294–297.
3. Vishnyakov, A.D., Radaev, N.N. *Obshchaya teoriya riskov* [General risk theory]. Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiyaya», 2008. 368 p.
4. Zhuravlev, I.B. «Kak vzvesit' tyazhelyy khvost». *Teoriya ekstremal'nykh znacheniy kak instrument otsenki operatsionnogo riska* [«How to weigh heavy tail». Extreme value

theory as a tool for assessing the operational risk]. *Risk-menedzhment*, 2008, issue 7–8, pp. 200–205.

5. Gubareva, T.S., Gartsman, B.I. Otsenka parametrov raspredeleniy ekstremal'nykh gidrometeorologicheskikh velichin metodom L-momentov [Parameter estimation of distributions of extreme meteorological variables by L-moments]. *Vodnye resursy*, 2010, vol. 37, no. 4, pp. 1–10.

6. Koroteev, M.V. Lingvisticheskie peremennye ekonomicheskikh pokazateley [Linguistic variable of economic indicators]. *Audit i finansovyy analiz*, 2012, no. 2. 5 p.

7. Agaev, I.A., Kuperin, Yu.A. Razvitie metodov VaR dlya otsenki riskov na finansovykh rynkakh [Development of the VaR methodology to assess the risks on financial markets]. *Regional'naya ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 4 (8). Paper No 801. Available at: <http://eee-region.ru/article/801/>.

8. Jorion, Ph. Value at Risk: The New Benchmark for Managing Financial Risk. 3rd edition. New York, McGraw-Hill, 2007. 603 p.

*Малафеев Алексей Вячеславович,*

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,  
e-mail: malapheev\_av@mail.ru

*Юлдашева Алина Илдаровна,*

ФГБОУВПО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»,  
аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий,  
e-mail: alinayuldasheva1@gmail.com

9. Konysheva, L.K., Nazarov, D.M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of fuzzy sets theory]. Saint-Petersburg, Piter, 2011. 192 p.

10. Yarushkina, N.G. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh sistem* [Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems]. Moscow, Finansy i statistika, 2004. 320 p.

11. Labsker, L.G., Yanovskaya, E.V. Obshchaya metodika konstruirovaniya kriteriev optimal'nosti resheniy v usloviyakh riska i neopredelennosti [General method of developing optimal decision criteria in conditions of risk and uncertainty]. *Finansovyy menedzhment*, 2002, no. 5.

12. Nepomnyashchy, V.A. *Ekonomicheskie poteri ot narusheniy elektrosnabzheniya potrebiteley* [Economic losses caused by consumer power supply interruption]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2010. 188 p.