

Выбор очередности реконструкции устройств релейной защиты подстанций по статистическим критериям теории игр

ВУКОЛОВ В.Ю.

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

КОЛЕСНИКОВ А.А.

ООО «Энергосетьпроект-Т», Тула, Россия

ОБАЛИН М.Д.

Филиал АО «СО ЕЭС» Нижегородское РДУ, Нижний Новгород, Россия

ПАПКОВ Б.В.

НГИЭУ, Княгинино, Россия

Большинство случаев некорректной работы релейной защиты связано с физическим и моральным износом значительной части эксплуатируемых устройств. Однако провести комплексную замену устаревших защит на современные не представляется возможным из-за отсутствия достаточного финансирования и высокой стоимости устройств. Решением проблемы является введение очередности реконструкции устройств релейной защиты, что в условиях частичной неопределенности исходной информации достаточно сложно. Рассмотрен подход с применением теории игр, позволяющий спланировать поэтапную реконструкцию релейной защиты при ограниченном бюджете с минимальными рисками. Анализируется ситуация выбора одного из двух вариантов реконструкции релейной защиты на объекте в условиях неопределенности и недостатка информации. При обосновании выбранного решения целесообразно использовать критерии Ходжа–Лемана, Вальда и Байеса. Показано, что сочетание и выбор оптимальной стратегии с учетом минимизации ущерба при действиях релейной защиты позволит совместить показатели надежности и экономичности при выборе варианта реконструкции. Полученные на конкретном примере результаты свидетельствуют о перспективности метода для повышения надежности и правильного распределения бюджета при реконструкции подстанций.

Ключевые слова: надёжность релейной защиты, теория игр, игра с природой, критерий Байеса, критерий Вальда, критерий Ходжа–Лемана

Введение и постановка задачи. Одним из важнейших свойств релейной защиты (РЗ) является надежность, так как отказ её функционирования может сопровождаться тяжелыми технико-экономическими последствиями как для системы электроснабжения, так и для потребителей электроэнергии [1]. Согласно опубликованной на официальном сайте АО «СО ЕЭС» отчетной информации за 2020 г. большинство случаев некорректной работы РЗ связано с тем, что значительная часть эксплуатируемых устройств физически и морально устарела и требует замены.

Модернизация, реконструкция и замена устройств РЗ выполняется в соответствии с требованиями, изложенными в соответствующих стандартах [2]. Учитывая современные тенденции развития электроэнергетики и исходя из принципов цифровизации, при реконструкции РЗ необходимо ориентироваться на применение интеллектуальных микропроцессорных устройств с

использованием стандарта МЭК 61850 [3, 4]. Однако из-за отсутствия необходимого финансирования и высокой стоимости современных устройств РЗ наряду с внедрением микропроцессорных терминалов применяется замена вышедших из строя электромеханических реле на однотипные, что существенно тормозит переход к цифровой энергетике.

В условиях недостаточного финансирования одним из решений является введение очередности реконструкции устройств РЗ. При этом замена устаревших реле на современные выполняется поэтапно, с учетом минимизации всех рисков. Часто встает вопрос: какие из устройств РЗ необходимо заменить в первую очередь, оптимально улучшив при этом надежность системы РЗ? На практике выбор решения часто принимается на интуитивном уровне без каких-либо расчетов. Однако необходимо иметь на вооружении обоснованные соответствующими расче-

тами подходы, позволяющие качественно улучшить надежность РЗ.

Одним из средств, позволяющих выбрать рациональную и эффективную стратегию, является теория игр [5]. Она представляет собой набор инструментов, применяемых для анализа конфликтных ситуаций, в которых лучшая стратегия одного субъекта зависит от действий другого, в том числе ожидаемых. Теория игр широко используется для выбора эффективных стратегий в бизнесе, страховании, политике, компьютерной безопасности и для рационального управления финансами. Перспективно приложение теории игр и для электроэнергетики [6, 7].

В случае выбора очередности замены РЗ имеется лишь один осознанно действующий «игрок» – руководитель соответствующей службы, а противником является вероятность аварийной ситуации (коротких замыканий (КЗ) на элементах подстанции). Данный случай можно смоделировать в виде так называемых «игр с природой» – раздела теории игр, в котором, в отличие от наиболее частого случая с участием двух игроков, осознанно действует только один из них – лицо, принимающее решение (ЛПР), а противник (природа) действует случайно. Взаимосвязь между ЛПР и природой определяется специальной матрицей, строки которой – стратегии ЛПР, столбцы – состояния природы P_j , элементы $a_{i,j}$ – ожидаемые выигрыши.

В качестве контролируемого показателя надежности (или с позиции теории игр выигрыша) целесообразно рассматривать вероятность безотказной работы (ВБР) системы РЗ подстанции в режиме повреждений на защищаемом объекте. Она представляет собой

вероятность того, что в пределах заданной наработки или на заданном интервале времени отказ РЗ в срабатывании защит не возникает. Данный подход можно также применить и для групп отказов ложных и излишних срабатываний [8–10].

Вероятность безотказной работы при экспоненциальном законе распределения определяется выражением:

$$R(t) = \exp[-(\lambda t)], \quad (1)$$

где λ – интенсивность отказов (условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник); t – заданный интервал времени. Для принимаемых условий целесообразно принять интервал $t = 3$ год, соответствующий характерному периоду полных профилактических проверок РЗ.

Реализация предлагаемого подхода. Для иллюстрации применения теории игр рассмотрим выбор решения при реконструкции РЗ подстанции в условиях ограниченного бюджета. Предлагается выбрать один из двух вариантов реконструкции (рис. 1): 1) замена комплекта дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ); 2) установка дифференциальной защиты шин (ДЗШ) 10 кВ.

Для проведения расчётов ВБР системы РЗ требуется информация об интенсивности отказов существующих и устанавливаемых защит. Однако достоверная статистическая информация по существующим и тем более вновь устанавливаемым защитам, особенно в сетях напряжением 10 кВ, в настоящее время практически отсутствует. Воспользуемся ретроспективными

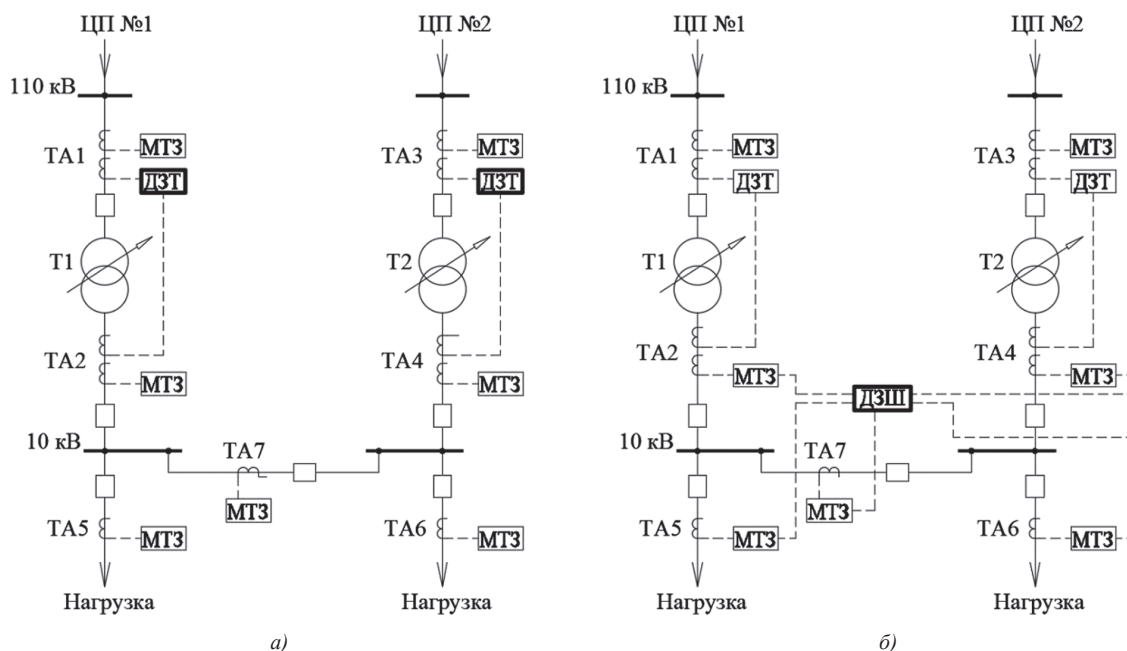


Рис. 1. Схема реконструкции РЗ подстанции: а) вариант с заменой ДЗТ; б) вариант с установкой ДЗШ

Fig. 1. Scheme of substation relay protection reconstruction: a) option with differential transformer protection; b) option with differential bus protection

данными, опубликованными на с. 121 в [1], которые представлены в табл. 1. Значения указаны с учётом показателей надежности реле защиты и вторичных цепей при установке в каждой фазе трансформаторов тока и реле. Вновь устанавливаемые устройства РЗ – микропроцессорные, значения показателей надежности которых получены на основе требований нормативных документов [11] (п. 3.6.5) с учетом надежности вторичных цепей [1].

Существующая аппаратура выполнена на электро-механической элементной базе. Как известно, с увеличением времени эксплуатации вероятность отказа устройств защиты возрастает [1]. В рамках работы данная зависимость не исследуется и для имеющихся в эксплуатации защит принят поправочный коэффициент на старение, равный 0,5. При проектировании для получения точных результатов необходимо выполнить соответствующие уточняющие расчеты.

Проведем расчет ВБР системы РЗ на основе экспоненциального распределения отказов при КЗ для различных случаев.

КЗ на шинах 10 кВ при отсутствии установки ДЗШ (работа МТЗ):

$$\begin{aligned} R_1(t) &= \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}}t)]; \\ R_1(t) &= \exp[-(0,006 \cdot 3)] = 0,9822; \end{aligned} \quad (2)$$

КЗ на шинах 10 кВ при установке ДЗШ (работа ДЗШ или МТЗ):

$$\begin{aligned} R_2(t) &= \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}}t)] + \exp[-(\lambda_{\text{ДЗШ2}}t)] - \\ &- \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}} + \lambda_{\text{ДЗШ2}})t], \\ R_2(t) &= \exp[-(0,006 \cdot 3)] + \exp[-(0,006 \cdot 3)] - \\ &- \exp[-(0,006 + 0,006) \cdot 3] = 0,9997; \end{aligned} \quad (3)$$

КЗ в трансформаторе при замене ДЗТ (работа устанавливаемой ДЗТ или МТЗ):

$$\begin{aligned} R_3(t) &= \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}}t)] + \exp[-(\lambda_{\text{ДЗТ2}}t)] - \\ &- \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}} + \lambda_{\text{ДЗТ2}})t], \\ R_3(t) &= \exp[-(0,006 \cdot 3)] + \exp[-(0,02 \cdot 3)] - \\ &- \exp[-(0,006 + 0,02) \cdot 3] = 0,9999; \end{aligned} \quad (4)$$

КЗ в трансформаторе при отсутствии замены ДЗТ (работа существующей ДЗТ или МТЗ):

$$\begin{aligned} R_4(t) &= \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}}t)] + \exp[-(\lambda_{\text{ДЗТ1}}t)] - \\ &- \exp[-(\lambda_{\text{МТЗ}} + \lambda_{\text{ДЗТ1}})t], \\ R_4(t) &= \exp[-(0,006 \cdot 3)] + \exp[-(0,01 \cdot 3)] - \\ &- \exp[-(0,006 + 0,01) \cdot 3] = 0,9995. \end{aligned} \quad (5)$$

В случае отсутствия повреждений

$$R_0(t) = 1.$$

В зависимости от наличия информации о вероятности коротких замыканий в соответствии с концепцией «игры с природой» различают два типа задач: 1) вероятность появления КЗ неизвестна – принятие решений в условиях неопределенности; 2) вероятность появления КЗ известна – принятие решений в условиях риска.

Принятие решений в условиях неопределенности.

При выборе оптимальной стратегии в теории игр применяются различные критерии в частности представленные в табл. 2.

При выборе критерия следует учесть характерные особенности РЗ:

необходимо ориентироваться на наиболее худший результат;

вероятность КЗ мала;

сумма всех вероятностей возникновения состояний природы равна единице;

при отсутствии КЗ выигрыш будет максимальным при любой стратегии.

В соответствии с данными особенностями для случая принятия решений в условиях неопределенности наиболее целесообразно применение критерия Вальда [12], согласно которому для каждой стратегии выбирается самая худшая ситуация и среди них отбирается гарантированный максимальный эффект, минимизируя риск. ЛПР не может получить худший результат, чем тот, на который он ориентируется.

Проведем расчет наиболее эффективной стратегии при различных вариантах реконструкции с применением критерия Вальда (табл. 3).

Согласно проведенным расчетам (табл. 3) по критерию Вальда оптимальным решением является установка ДЗШ.

Таблица 1

Исходные данные для расчета показателей надежности

Initial data for calculating reliability indicators

Параметр	Обозначение	Значение	Значение с учетом поправочного коэффициента на старение
Интенсивность отказов в срабатывании существующей максимальной токовой защиты (МТЗ) (1/год)	$\lambda_{\text{МТЗ}}$	0,003	0,006
Интенсивность отказов в срабатывании существующей ДЗТ (1/год)	$\lambda_{\text{ДЗТ1}}$	0,005	0,01
Интенсивность отказов в срабатывании устанавливаемой ДЗТ (1/год)	$\lambda_{\text{ДЗТ2}}$	0,002	–
Интенсивность отказов в срабатывании устанавливаемой ДЗШ (1/год)	$\lambda_{\text{ДЗШ}}$	0,006	–

Таблица 2

Критерии принятия решений в условиях неопределенности
Criteria for decision-making under conditions of uncertainty

Критерий	Формула	Примечание
Вальда (максиминный критерий)	$W = \max_i \min_j a_{i,j}$	Критерий гарантированного результата, $a_{i,j}$ – ожидаемые выигрыши
Оптимизма (максимакса)	$M = \max_i \max_j a_{i,j}$	Выбирается решение с максимальным выигрышем
Пессимизма (миниминный)	$P = \min_i \min_j a_{i,j}$	Выбирается решение с минимальным выигрышем
Сэвиджа	$S = \min_i \max_j r_{i,j}$	Выбирается решение, не допускающее чрезмерно высоких потерь, r – матрица рисков
Гурвица	$G = \max_i \left\{ \lambda \max_j a_{i,j} + (1 - \lambda) \min_j a_{i,j} \right\}$	λ – коэффициент оптимизма

Таблица 3

Выбор наиболее эффективной стратегии по критерию Вальда
Choosing the most effective strategy according to the Wald criterion

Вариант реконструкции	ВБР системы РЗ			Минимум по строке	Максимум
	КЗ на шинах 10 кВ	КЗ в трансформаторе	Отсутствие повреждения		
Замена ДЗТ	0,9822	0,9999	1	0,9822	–
Установка ДЗШ	0,9997	0,9995	1	0,9995	0,9995

Принятие решений в условиях риска. Рассмотрим случай, когда известна вероятность КЗ. Основные критерии принятия решений в условиях риска представлены в табл. 4.

Значения вероятности коротких замыканий в проведенных расчетах приняты на основании ретроспективной статистики повреждений оборудования сетевой организации и справочных данных [13, 14]:

КЗ на шинах 10 кВ – $q_1 = 0,05 \text{ год}^{-1}$;

КЗ в трансформаторе – $q_2 = 0,03 \text{ год}^{-1}$.

На основании формулы полной вероятности вероятность отсутствия повреждения:

$$q_3 = 1 - q_1 - q_2 = 0,92 \text{ год}^{-1}. \quad (6)$$

Учитывая приведенные выше характерные особенности РЗ, наиболее целесообразно принять критерий Байеса. Проведем расчет наиболее эффективной стратегии при различных вариантах реконструкции с применением критерия Байеса (табл. 5).

Согласно проведенным расчетам по критерию Байеса (табл. 5) наиболее оптимальным решением является установка ДЗШ.

Информация о вероятности возникновения КЗ может быть недостаточно достоверна (например, получена для электроустановок с другими характеристиками на основании устаревших или грубо усредненных данных [15]). В этом случае нельзя в полной мере доверять имеющимся данным и необходимо ввести некоторую меру достоверности.

Целесообразно использовать критерий Ходжа–Лемана [16, 17]. Для него степень доверия задается с помощью параметра достоверности γ , значение которого находится в интервале $[0, 1]$. При $\gamma = 1$ критерий Ходжа–Лемана переходит в критерий Байеса, при $\gamma = 0$ принимает вид критерия Вальда.

Проведем расчет наиболее эффективной стратегии в условиях недостаточно достоверных данных (табл. 6). Параметр достоверности примем $\gamma = 0,5$.

Согласно проведенным расчетам по критерию Ходжа–Лемана (табл. 6) оптимальным решением является установка ДЗШ.

Полученные результаты показывают, что установка ДЗШ является наиболее приемлемой стратегией вне зависимости от наличия информации о вероятности появления КЗ и степени ее достоверности.

Выводы и рекомендации. 1. При реконструкции системы РЗ подстанций для выбора оптимального решения предложена теория игр, в частности математическая модель «игр с природой». Предложенный подход позволяет выполнять поэтапную реконструкцию РЗ при ограниченном бюджете с минимальными рисками.

2. При обосновании вариантов реконструкции РЗ наиболее целесообразным является применение критерия Ходжа–Лемана, опирающегося на критерии Вальда и Байеса с использованием специального параметра достоверности. Данный критерий позволяет выбрать необходимую стратегию в зависимости от наличия или отсутствия информации о вероятности КЗ на подстанции и степени достоверности данной информации.

Таблица 4

Критерии принятия решений в условиях риска относительно выигрышей
Criteria for making decisions in terms of risk regarding winnings

Критерий	Формула	Примечание
Байеса	$B = \max_i \left\{ \sum_{j=1}^n q_j a_{i,j} \right\}$	Выбор максимального из ожидаемых элементов матрицы; q_j – вероятность наступления состояний природы; $a_{i,j}$ – ожидаемые выигрыши
Лапласа	$L = \max \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{i,j} \right\}, i = 1, 2, \dots, m$	Применение при равных вероятностях состояния природы
Ходжа–Лемана	$HL = \max(\gamma B(q) + (1 - \gamma)W_i)$	Опирается на критерий Вальда и Байеса; γ – параметр достоверности

Таблица 5

Выбор наиболее эффективной стратегии по критерию Байеса
Choosing the most effective strategy based on the Bayes criterion

Вариант реконструкции	Произведения ВБР системы РЗ на вероятности наступления состояний природы			Сумма по строке
	КЗ на шинах 10 кВ	КЗ в трансформаторе	Отсутствие повреждения	
Замена ДЗТ	0,0491	0,02999	0,92	0,99909
Установка ДЗШ	0,0499	0,02998	0,92	0,99988

Таблица 6

Выбор наиболее эффективной стратегии по критерию Ходжа–Лемана
Choosing the most effective strategy according to the Hodge-Lehman criterion

Вариант реконструкции	ВБР системы РЗ			$\gamma B_i(q)$	$(1 - \gamma)W_i$	HL
	КЗ на шинах 10 кВ	КЗ в трансформаторе	Отсутствие повреждения			
Замена ДЗТ	0,9822	0,9999	1	0,4995	0,4911	0,9906
Установка ДЗШ	0,9997	0,9995	1	0,4999	0,4997	0,9996

3. Для рассмотренного примера целесообразно принятие решения по установке ДЗШ. Эффективность подтверждается расчетами по всем рассмотренным критериям.

4. Сочетание и выбор оптимальной стратегии с учетом, например, минимизации ущерба при действиях РЗ позволит совместить показатели надежности и экономичности при выборе варианта реконструкции системы РЗ подстанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалин А.И. Надежность и диагностика релейной защиты энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002, 549 с.
2. СТО 34.01-4.1-011-2020. Рекомендации по модернизации, реконструкции и замене длительно эксплуатирующихся устройств релейной защиты и автоматики энергосистем. М.: ПАО «Россети», 2020, 48 с.
3. Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса. Приложение №1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22.06.2015 № 356пр. М., 2015.
4. Шарыгин М.В., Вуколов В.Ю., Петров А.А. Разработка алгоритма автоматической адаптации параметров срабатывания многомерной интеллектуальной релейной защиты к конфигурации распределительных электрических сетей. – Вестник НГИЭИ, 2020, № 11, с. 65–78.
5. Яроцкая Е.В. Основы теории игр (для бакалавров экономики): учебное пос. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013, 123 с.

6. Папков Б.В. Оценка управленческих решений в электроэнергетике при неопределенности исходных условий. – Материалы 48-го заседания Международного научного семинара «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Мурманск, 1996, с. 40–45.

7. Малафеев А.В., Юлдашева А.И. Количественная оценка производственных рисков при принятии решений по управлению и реконструкции системы электроснабжения крупного промышленного предприятия. – Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2016, № 3, с. 55–62.

8. Куликов А.Л., Соснина Е.Н., Колесников А.А., Крюков Е.В. Дифференциальная защита системы тиристорного регулятора напряжения с применением метода двойной записи. – Промышленная энергетика, 2019, №1, с. 39–44.

9. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А. Централизованная дифференциальная защита цифровой подстанции с применением метода двойной записи. – Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2018, № 2, с. 31–40.

10. Ganggang H., Huanxin G., Dongxue Q., Wei D. Reliability Analysis of Relay Protection Based on the Fuzzy-Markov Model. – International Journal of Hybrid Information Technology, 2013, vol. 8, pp. 115–128, doi:10.14257/ijhit.2015.8.10.11.

11. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. М.: ПАО ЕЭС России, 1998, 19 с.

12. Wald A. Statistical decision functions. N.Y.: Wiley; L., Chapman & Hall, 1950.

13. Гук Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике. Л.: Энергоатомиздат, 1990, 208 с.

14. Файбисович Д.Л. Справочник по проектированию электрических сетей. 4-е изд. М.: ЭНАС, 2012, 376 с.

15. **Виноградов А.В., Перьков Р.А.** Анализ повреждаемости электрооборудования электрических сетей и обоснование мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей. – Вестник НГИЭИ, 2015, № 12, с. 12–21.

16. **Hodges J.L. JR., Lehmann E.L.** Estimates of Location Based on Rank Tests. – Annals of Mathematical Statistics, 1963, 34, pp. 598–611.

17. **Ch'ng C.K., Quah S.H., Low H.C.** The Use of Hodges-Lehmann Estimator in Multiple Response Optimization with Replication. Matematika. – Malaysian Journal of Industrial and Applied Mathematics, 2004, vol. 20, pp. 101–110.

[17.12.2020]

Авторы: **Вуколов Владимир Юрьевич** – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.



Колесников Антон Александрович – кандидат техн. наук, главный специалист отдела проектирования вторичных систем ООО «Энергосетьпроект-Т».



Обалин Михаил Дмитриевич – кандидат техн. наук, главный специалист службы электрических режимов Филиала АО «СО ЕЭС» Нижегородское РДУ.



Папков Борис Васильевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электрификация и автоматизация» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета.

Elektrichestvo, 2021, No. 5, pp. 26–32

DOI:10.24160/0013-5380-2021-5-26-32

Choosing the Order of Renovation of Relay Protection Devices by Using Statistical Criteria of Game Theory

VUKOLOV Vladimir Yu. (Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (NNSTU), Nizhny Novgorod, Russia) – Docent of the Power Engineering, Electricity Supply and Power Electronics Dept., Cand. Sci. (Eng.).

KOLESNIKOV Anton A. (LLC “Energosetproekt-T”, Tula, Russia) – Chief Specialist of the Secondary Systems Design Dept., Cand. Sci. (Eng.).

OBALIN Mikhail D. (Branch office «SO UPS», JSC Nizhegorodskoe RDU, Nizhny Novgorod, Russia) – Chief Specialist, Cand. Sci. (Eng.).

PAPKOV Boris V. (Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Nizhny Novgorod region Knyaginino, Russia) – Professor of the Electrification and Automation Dept., Dr. Sci. (Eng.).

There are many cases of incorrect work of relay protection due to the fact that most of the using devices are outdated. However, it is difficult to make a comprehensive replacement of all protections with modern ones due to the lack of funding and the high cost of modern devices. Therefore, an important task is to develop ways to solve this issue in the conditions of partial uncertainty of the initial information.

An approach using game theory is considered that allows planning a reconstruction of relay protection with a limited budget and minimal risk. The choice of one of two variants for the reconstruction of the relay protection under conditions of uncertainty and lack of information is analyzed. When proving the options of reconstruction of relay protection, the most appropriate criteria were found to be the Hodges–Lehmann, Wald, and Bayes criteria.

It is shown that the choice of the optimal strategy, taking into account the minimization of damage during the actions of relay protection, will allow to combine the indicators of reliability and efficiency when choosing the variant of reconstruction. The obtained results illustrate that this approach is promising for improving the reliability and correct distribution of budget funds during the reconstruction of substations.

Key words: reliability of relay protection, game theory, game with nature, Bayes criterion, Wald criterion, Hodges–Lehmann criterion

REFERENCES

1. **Shalin A.I.** Nadezhnost' i diagnostika releynoy zashchity energosistem (Reliability and diagnostics of relay protection of power systems). Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002, 549 p.

2. **STO 34.01-4.1-011-2020.** Rekomendatsii po modernizatsii, rekonstruktsii i zamene dlitel'no ekspluatiruyushchihya ustroystv reley-

noy zashchity i avtomatiki energosistem (Recommendations for the modernization, reconstruction and replacement of long-term relay protection and automation devices of power systems). M.: PAO «Rosseti», 2020, 48 p.

3. **Kontseptsiya razvitiya releynoy zashchity i avtomatiki elektrosetevogo kompleksa.** Prilozhenie №1 k protokolu Pravleniya OAO «Rosseti» ot 22.06.2015 № 356pr (The concept of development of

relay protection and automation of the electric grid complex. Appendix No. 1 to the Minutes of the Management Board of JSC «Rosseti» dated 22.06.2015 No. 356pr). M., 2015.

4. **Sharygin M.V., Vukolov V.Yu., Petrov A.A.** *Vestnik NGIEI – in Russ. (Bulletin NGIEI)*, 2020, No. 11, pp. 65–78.

5. **Yarotskaya E.V.** *Osnovy teorii igr (dlya bakalavrov ekonomiki): uchebnoe pos. (Fundamentals of Game Theory (for Bachelor of Economics): textbook)*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2013, 123 p.

6. **Papkov B.V.** *Materialy 48-go zasedaniya Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara – in Russ. (Materials of 48th meeting of the International Scientific Seminar)*. Murmansk, 1996, pp. 40–45.

7. **Malafeev A.V., Yuldasheva A.I.** *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – in Russ. (Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University)*, 2016, No. 3, pp. 55–62.

8. **Kulikov A.L., Sosnina E.N., Kolesnikov A.A., Kryukov E.V.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Energy)*, 2019, No. 1, pp. 39–44.

9. **Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Kolesnikov A.A.** *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta – in Russ. (Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University)*, 2018, No. 2, pp. 31–40.

10. **Ganggang H., Huanxin G., Dongxue Q., Wei D.** Reliability Analysis of Relay Protection Based on the Fuzzy-Markov Model. –

International Journal of Hybrid Information Technology, 2013, vol. 8, pp. 115–128, doi:10.14257/ijhit.2015.8.10.11.

11. **RD 34.35.310-97.** *Obshchie tekhnicheskie trebovaniya k mikroprotssornym ustroystvam zashchity i avtomatiki energosistem (General technical requirements for microprocessor protection and automation devices of power systems)*. M.: RAO EES Rossii, 1998, 19 p.

12. **Wald A.** *Statistical decision functions*. N.Y.: Wiley; L., Chapman & Hall, 1950.

13. **Guk Yu.B.** *Teoriya nadezhnosti v elektroenergetike (Reliability theory in the electric power industry)*. L.: Energoatomizdat, 1990, 208 p.

14. **Faibisovich D.L.** *Spravochnik po proektirovaniyu elektricheskikh setey. 4-e izd. (Handbook of electrical network design. 4th ed.)*. M.: ENAS, 2012, 376 p.

15. **Vinogradov A.V., Perkov R.A.** *Vestnik NGIEI – in Russ. (Bulletin NGIEI)*, 2015, No. 12, pp. 12–21.

16. **Hodges J.L. JR., Lehmann E.L.** Estimates of Location Based on Rank Tests. – *Annals of Mathematical Statistics*, 1963, 34, pp. 598–611.

17. **Ch'ng C.K., Quah S.H., Low H.C.** The Use of Hodges-Lehmann Estimator in Multiple Response Optimization with Replication. *Matematika. – Malaysian Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 2004, vol. 20, pp. 101–110.

[17.12.2020]