

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.8>**О ПОВЫШЕНИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ С ПУСКОМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПРИ ПОМОЩИ БЛОКА КОРРЕКЦИИ ТОКОВОЙ УСТАВКИ**

Научная статья

**Ахмедова О.О.<sup>1,\*</sup>, Елфимова О.И.<sup>2</sup>, Копейкина Т.В.<sup>3</sup>, Атрашенко О.С.<sup>4</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-1272-5933;<sup>1, 2, 3, 4</sup>Волгоградский государственный технический университет, Камышин, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (ahmedova[at]kti.ru)

**Аннотация**

Проблемы, связанные с устройствами релейной защиты, являются одной из основных причин серьезных аварий, которые периодически происходят в энергосистемах по всему миру. По данным Североамериканского совета по надежности электроэнергетики, в 74% случаев причиной серьезных аварий энергосистемы является неправильное действие релейной защиты при развитии аварии. Поэтому надежность всей энергосистемы во многом зависит от релейной защиты. В качестве резервной защиты в электрических сетях применяется максимальная токовая защита (МТЗ), осуществляющая ближнее и дальнее резервирование. Недостатками МТЗ является низкий коэффициент чувствительности в слишком длинных и нагруженных сетях, т.к ток срабатывания максимальной токовой защиты численно примерно равен рабочему току линии и, следовательно, защита не может распознать повреждение для отключения участка сети. В данной работе рассмотрена задача повышения чувствительности токовой ступенчатой защиты за счет применения управляющей системы адаптивных уставок срабатывания. При контроле рабочего тока проходящего по линии в реальном режиме можно корректировать автоматически уставку срабатывания и тем самым сделать максимальную токовую защиту более гибкой и чувствительной. Ложное срабатывание МТЗ при перегрузках предлагается устранить при помощи установки дополнительной блокировки по напряжению.

**Ключевые слова:** адаптивная уставка, релейная защита, резервная защита.**ON INCREASING THE SENSITIVITY OF OVERCURRENT PROTECTION WITH VOLTAGE START BY CURRENT SETPOINT CORRECTION UNIT**

Research article

**Akhmedova O.O.<sup>1,\*</sup>, Elfimova O.I.<sup>2</sup>, Kopeykina T.V.<sup>3</sup>, Atrashenko O.S.<sup>4</sup>**<sup>1</sup>ORCID : 0000-0003-1272-5933;<sup>1, 2, 3, 4</sup>Volgograd State Technical University, Kamyshin, Russian Federation

\* Corresponding author (ahmedova[at]kti.ru)

**Abstract**

Problems associated with relay protection devices are one of the major causes of major accidents that periodically occur in power systems around the world. According to the North American Electric Reliability Council, in 74% of cases, the cause of serious power system failures is the incorrect operation of relay protection during the development of the failure. Therefore, the reliability of the entire power system depends to a large extent on relay protection. Maximum current protection (MCP) is used as backup protection in power grids, which provides near and far redundancy. The disadvantages of the overcurrent protection are low sensitivity coefficient in too long and loaded networks, because the operating current of the overcurrent protection is numerically approximately equal to the operating current of the line and, therefore, the protection cannot recognize a fault to disconnect the network section. In this work, the problem of increasing the sensitivity of current step protection by using a control system of adaptive setpoints of operation is examined. By monitoring the operating current flowing through the line in real time, it is possible to correct automatically the tripping set point and thus make the overcurrent stage protection more flexible and sensitive. False tripping of the MCP can be eliminated by means of additional voltage blocking.

**Keywords:** adaptive setpoint, relay protection, backup protection.**Введение**

Современная цифровая аппаратура релейной защиты и автоматики (РЗА) объединяет функции релейной защиты, автоматики, измерения, регулирования и управления в единый информационный комплекс. Такими устройствами в составе АСУ ТП энергетических установок являются терминальные устройства сбора информации.

Современные микропроцессорные терминалы помимо основного назначения еще обладают рядом функций, таких как, запись осциллограмм, поиск места повреждения, фиксация параметров сети при обнаружении повреждения и т.д. Скорость функционирования терминалов, наличие памяти для хранения данных и возможность удаленного управления терминалом, позволяет искать пути по усовершенствованию алгоритмов функционирования микропроцессорных устройств релейной защиты [1], [2], [3].

При проектировании и эксплуатации электроэнергетической системы необходимо учитывать вероятность возникновения ненормального режима работы либо повреждения. Самыми вероятными и опасными для электрооборудования видами повреждений являются короткие замыкания. Перегрузка оборудования относится к ненормальному режиму работы, при котором по нему протекают токи, превосходящие значение длительно

допустимого тока, вызывающие повышение температуры токоведущих частей с последующей их деформацией и ускоренную деградацию изоляции.

Устройства релейной защиты и автоматики являются неотъемлемой частью электроэнергетических систем. Они выполняют роль раннего обнаружения и локализации неисправностей, таких как короткие замыкания, перегрузки или другие аварийные ситуации, и предпринимают соответствующие действия для предотвращения распространения этих событий с минимизацией их влияния.

Исходя из требований нормативной документации и Правил устройства электроустановок система релейной защиты должна выполнять функции ближнего и дальнего резервирования. В силу распределенности электроэнергетических объектов дальнейшее резервирование показывает лучшую надежность и эффективность в экстремальных условиях [4]. Проблема отстройки защит дальнего резервирования, напрямую связана с нахождением уставок согласно требованию селективности на всех ступенях резервных защит. При возникновении короткого замыкания в зоне защиты определенной ступени, если требование селективности соблюдается, РЗ производит отключение, при невыполнении этого условия повреждение перемещается в зону срабатывания следующей ступени релейной защиты. При такой отстройке невозможно организовать срабатывания защиты смежных элементов и как следствие дальнейшее резервирование. Математическое моделирование электроэнергетической сети, позволило провести анализ эффективности действия защит дальнего резервирования [4]:

- в 60% случаев дальнейшее резервирование не обеспечивается при междуфазных замыканиях в сетях 330-500 кВ при кз на воздушной линии электропередачи или за силовыми трансформаторами (автотрансформаторами);
- в 20% при тех же параметрах дальнейшее резервирование не эффективно при однофазных замыканиях на землю.

Традиционные методики отстройки и согласования уставок релейной защиты, использующие способ абсолютного согласования, обеспечивая селективность, чувствительность и максимальное быстродействие резервных защит в режимах нормального функционирования системы ближнего резервирования, часто не позволяет удовлетворить требования дальнего резервирования, необходимого в экстремальных условиях [4], [5].

Цель работы заключается в пересмотре методов выбора уставок срабатывания, принципов согласования и необходимости определения вторичных факторов, влияющих на уставку срабатывания для проектирования защит дальнего резервирования способных надежно и эффективно обрабатывать в экстремальных условиях [4].

### Основные результаты

Важно правильно выбрать основные параметры устройств релейной защиты и автоматики по срабатыванию, такие как уставки тока, напряжения, временные характеристики и другие, чтобы обеспечить надежное и корректное функционирование всей системы релейной защиты. Неправильно выбранные параметры могут привести к ложным срабатываниям или недостаточной защите, что может привести к простоям, повреждениям оборудования или другим серьезным последствиям.

Традиционно в качестве резервных защит применяют максимальную токовую защиту (МТЗ), которая при включении на полные токи фаз не всегда обеспечивает достаточную чувствительность на длинных и загруженных воздушных линиях электропередачи. Одним из способов повышения коэффициента чувствительности защиты, которая выполняет функции ближнего и дальнего резервирования, является дополнение ее измерительным органом напряжения, основная задача которого, разрешать срабатывание защиты только при коротком замыкании (рис. 1) [5], [6].

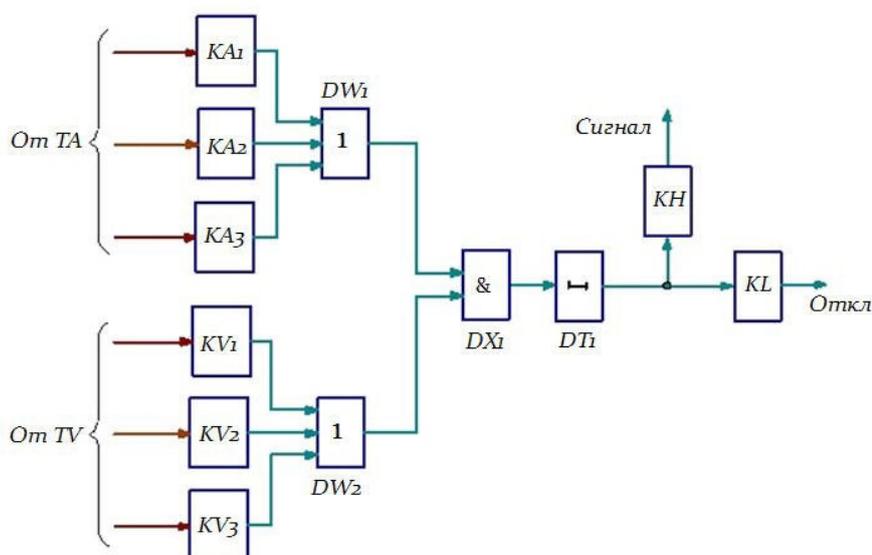


Рисунок 1 - Алгоритм функционирования МТЗ с блокировкой по напряжению

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.8.1>

При недостаточном коэффициенте чувствительности защит дальнего резервирования приходится увеличивать затраты на реализацию системы релейной защиты путем увеличения ступеней защит ближнего резервирования.

Задачей работы является анализ возможности увеличения коэффициента чувствительности резервных защит путем введения дополнительного контролируемого параметра - рабочего тока линии и адаптации уставки срабатывания при изменении его.

ОАО «ФСК ЕЭС» разработало методические указания для выбора уставок трехступенчатой токовой защиты (токовая отсечка без выдержки времени) микропроцессорных терминалов применяемых на ВЛ и КЛ электропередачи с напряжением питания от 110 до 330 кВ [7]. При расчете уставок токовых уставок срабатывания необходимо учитывать:

1. Уставка по току срабатывание первой ступени должна быть больше максимального рабочего тока проходящего по линии электропередачи.

2. Необходимо производить отстройку уставки срабатывания не только от трехфазного тока короткого замыкания, но и от однофазного тока кз рассчитанного в конце защищаемой линии.

3. При наличии силовых трансформаторов, установленных на защищаемой линии либо на ее ответвлениях, следует отстраиваться от трехфазных токов КЗ и от токов замыкания на землю на низком и среднем напряжении трансформатора.

4. Ток уставки должен быть выше тока броска намагничивания, при подключении силового трансформатора к защищаемой линии электропередачи.

Согласно условиям отстройки устройств релейной защиты и автоматики, корректность срабатывания устройств релейной защиты напрямую зависит от тока проходящего по линии электропередачи. Его определяют на этапе проектирования сети и в дальнейшем никак не адаптируют уставку срабатывания микропроцессорного терминала под годовые и суточные колебания тока [8], [9], [10].

Произведем анализ рабочего тока, проходящего по линии электропередачи и тока срабатывания максимальной токовой защиты для воздушной линии электропередачи «Ильмень – Елань 1» Камышинских электрических сетей. На рисунке 2 представлено колебание значений рабочего тока в течение лета и зимы, измерение этого параметра проводилось ежечасно в режимные дни (без ремонтных работ и переключений). Изменение силы рабочего тока, протекающего в линиях, с учетом максимального и минимального значений, измеренных в течение суток изменялось 9 раз в летнее время и 22 раза в зимний период [1].

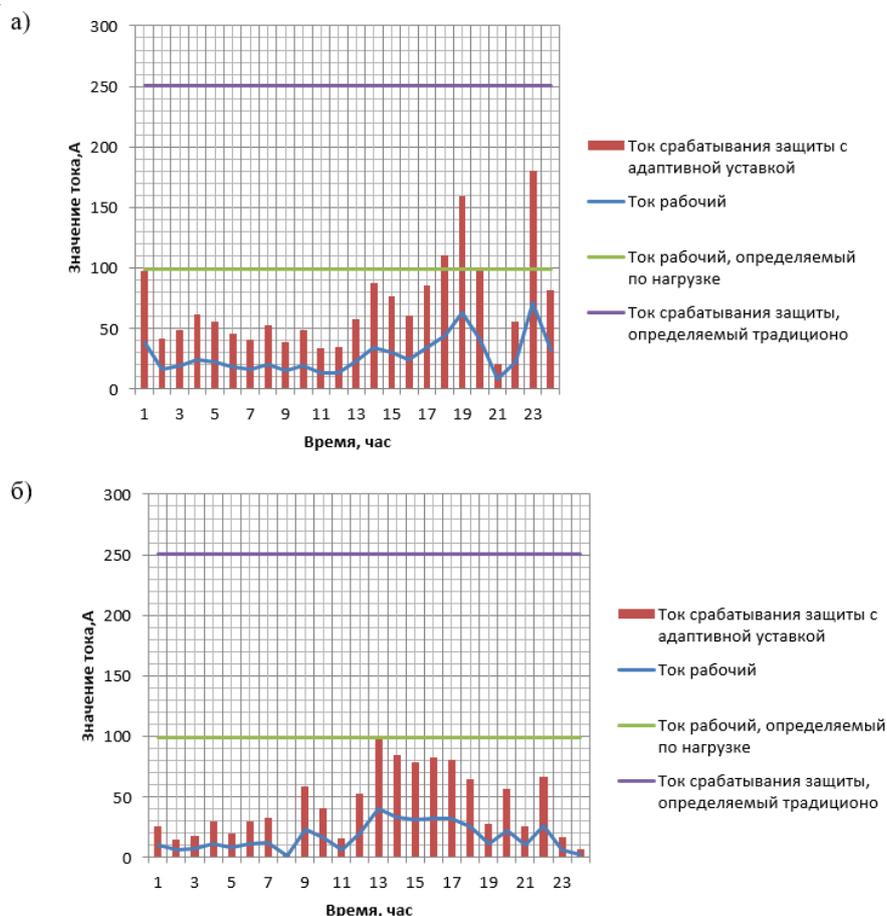


Рисунок 2 - График изменения величины рабочего тока

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.8.2>

Примечание: а) в летний период; б) в зимний период

Если для расчета уставки срабатывания по току, брать рабочий максимальный ток, определяемый по номинальной мощности оборудования, подключенного к линии, то токовая уставка срабатывания заведомо получается завышенная и не учитывающая суточные колебания тока, следовательно, в некоторых случаях не удовлетворяющая требованию чувствительности [11].

Для повышения чувствительности третьей ступени токовых защит предлагается интеллектуальная управляющая система адаптации уставки срабатывания в зависимости от реальной величины тока проходящего по воздушной линии электропередачи (рис. 3).

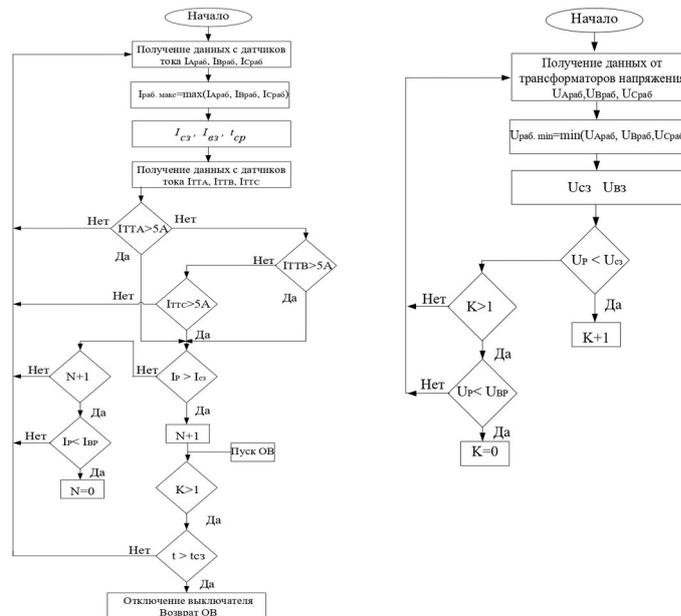


Рисунок 3 - Алгоритм адаптивной максимальной токовой защиты с пуском по напряжению  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.8.3>

Датчики тока устанавливаются на воздушных линиях электропередачи для передачи данных резервной защиты в начале линии на каждой фазе. Устройство защиты сравнивает параметры, полученные от каждой фазы, выбирает наибольший и сохраняет его. В соответствии с сохраненным максимальным рабочим током рассчитывается максимальное значение настройки защиты по току. Затем анализируются данные, полученные от установленных трансформаторов тока на фазах, если хотя бы один вторичный ток превышает номинальное значение (5 А), происходит его сравнение с расчетным током отключения и определяется тип повреждения. Если значение максимального рабочего тока не уменьшится, то есть будет выполнено условие  $I_p > I_{сз}$ , то устройство релейной защиты подаст сигнал на выключение. Выключатель отключается после приема сигнала от электромагнита отключения при истечении уставки по времени на реле. Контролируя вторичный ток трансформаторов тока можно установить какой вид короткого замыкания произошел сети, а применение дополнительно блокировки по напряжению позволит точно определить произошло ли увеличение тока вследствие короткого замыкания или пуска электродвигателя [1], [12], [13].

Применение неадаптивной уставки по току срабатывания повысит вероятность не корректной работы устройств релейной защиты и понизит надежность электроснабжения потребителей. Исходя из графиков нагрузки каждое промышленное предприятие имеет время минимальной потребляемой мощности и соответственно минимального рабочего тока проходящего по линии электропередачи, тогда этот ток окажется меньше расчетного тока срабатывания максимальной токовой защиты и как следствие устройство релейной защиты может отказать в действии.

Основным требованием, предъявляемым к устройствам релейной защиты, является селективность. В связи с этим все микропроцессорные реле отстраиваются по ступенчатому принципу срабатывания. Не верное функционирование одного участка может привести к снижению надежности и устойчивости всей энергосистемы. Поэтому для избежания не селективных отключений смежных участков из-за отказа основной защиты и не реагирования на пониженный рабочий ток резервной защиты необходимо использовать адаптивную уставку срабатывания, изменяющуюся при колебаниях потребляемой мощности на промышленных предприятиях.

### Заключение

1. Рекомендуется использовать истинное значение тока, протекающего по линии электропередачи, полученное от датчика тока, при определении уставки резервной защиты. Это поможет точнее определить необходимую уставку фазной МТЗ.

2. Также необходимо устанавливать токовую защиту с блокировкой по напряжению. Это означает, что защитное устройство будет активироваться только в том случае, если обнаружено превышение допустимого тока и

одновременно имеется напряжение на линии, указывающее на наличие фазного короткого замыкания. Такая комбинированная защита поможет исключить ложные срабатывания защиты в случаях, когда превышение тока вызвано другими факторами, такими как временные перегрузки или переходные процессы.

3. Отстройка уставки срабатывания защит с учетом реального рабочего тока линии, полученного от датчиков тока, позволит уменьшить количество ступеней защит ближнего резервирования и повысить эффективность срабатывания защит дальнего резервирования при междофазных коротких замыканиях.

Таким образом, использование истинного значения тока и установка токовой защиты с блокировкой по напряжению позволят достичь более надежной и чувствительной защиты линии электропередачи.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Ахмедова О.О. Алгоритм и математическая модель многопараметрической управляющей системы релейной защиты, контролирующей параметры воздушной линии электропередачи / О.О. Ахмедова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2018. — 11. — с. 9-14.
2. Басс Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем / Э.И. Басс, В.Г. Дорогунцев. — М.: Издательство МЭИ, 2002. — 296 с.
3. Лачугин В.Ф. Принципы построения интеллектуальной релейной защиты электрических сетей / В.Ф. Лачугин, А.Л. Куликов // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2015. — 4. — с. 28-37.
4. Нагай В.И. Дальнее резервирование в релейной защите. Проблемы осуществления / В.И. Нагай // Новости Электротехники. — 2008. — 2.
5. Колесов Л.М. Реализация дистанционной защиты дальнего резервирования, использующей токи питающих сторон, для линии с несколькими ответвлениями / Л.М. Колесов // Вестник ИГЭУ. — 2019. — 6.
6. Павлов А.О. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи / А.О. Павлов, Д.С. Васильев // Энергетик. — 2008. — 12. — с. 5-7.
7. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.305-2020 Методические указания для выбора параметров настройки и срабатывания МП устройств РЗА оборудования 6-35 кВ объектов ЕНЭС
8. Лямец Ю.Я. Многомерная релейная защита. Ч.1. Теоретические предпосылки / Ю.Я. Лямец // Электричество. — 2009. — 10. — с. 17-25.
9. Лямец Ю.Я. Многомерная релейная защита. Ч.2. Анализ распознающей способности реле / Ю.Я. Лямец // Электричество. — 2009. — 11. — с. 9-15.
10. Лямец Ю.Я. Многомерная релейная защита. Ч.3. Эквивалентирование моделей / Ю.Я. Лямец // Электричество. — 2010. — 1. — с. 9-15.
11. Nagay I.V. Providing Remote Backup Functions of Relay Protection of Transformers in the Direct and Quadrature Axis Dissymmetry / I.V. Nagay // Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. — 2011. — 6.
12. Vasiliev D.S. Development of High-sensitivity Distance Protection / D.S. Vasiliev, D.G. Eremeev, A.O. Pavlov // Russian Electrical Engineering. — 2011. — 3. — p. 149-155.
13. Obaid Z.A.. Power System Oscillations and Control: Classifications and PSSs' Design Methods / Z.A. Obaid, L.M. Cipcigan, M.T. Muhssin; — Amsterdam: Elsevier, 2017. — p. 839-849.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Ahmedova O.O. Algorithm i matematicheskaja model' mnogoparametricheskoj upravljajuschej sistemy relejnoj zaschity, kontrolirujuschej parametry vozdušnoj linii elektroperedachi [Algorithm and Mathematical Model of a Multiparametric Relay Protection Control System that Controls the Parameters of an Overhead Power Transmission Line] / O.O. Ahmedova // International Journal of Applied and Fundamental Research. — 2018. — 11. — p. 9-14. [in Russian]
2. Bass E.I. Relejnaja zaschita elektroenergeticheskix sistem [Relay Protection of Electric Power Systems] / E.I. Bass, V.G. Doroguntsev. — M.: Publishing House MEI, 2002. — 296 p. [in Russian]
3. Lachugin V.F. Printsipy postroenija intellektual'noj relejnoj zaschity elektricheskix setej [Principles of Construction of Intelligent Relay Protection of Electrical Networks] / V.F. Lachugin, A.L. Kulikov // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy. — 2015. — 4. — p. 28-37. [in Russian]
4. Nagaj V.I. Dal'nee rezervirovanie v relejnoj zaschite. Problemy osuschestvlenija [Long-range Redundancy in Relay Protection. Implementation Problems] / V.I. Nagaj // Electrical Engineering News. — 2008. — 2. [in Russian]
5. Kolesov L.M. Realizatsija distantsionnoj zaschity dal'nego rezervirovanija, ispol'zujuschej toki pitajuschihih storon, dlja linii s neskol'kimi otvetvlenijami [Implementation of Remote Protection of Long-range Redundancy, Using the Currents of the Supply Sides, for a Line with Several Branches] / L.M. Kolesov // IGEU Bulletin. — 2019. — 6. [in Russian]

6. Pavlov A.O. Vysokochuvstvitel'naja zaschita dal'nego rezervirovaniya linij elektroperedachi [Highly Sensitive Protection of Long-range Redundancy of Power Transmission Lines] / A.O. Pavlov, D.S. Vasil'ev // Power Engineer. — 2008. — 12. — p. 5-7. [in Russian]
7. Standart organizacii PAO «FSK EES» STO 56947007-29.120.70.305-2020 Metodicheskie ukazaniya dlya vybora parametrov nastrojki i srbatyvaniya MP ustrojstv RZA oborudovaniya 6-35 kV ob"ektov ENES [The standard of the organization of PJSC FGC UES STO 56947007-29.120.70.305-2020 Guidelines for the selection of settings and operation of MP devices of RPA equipment 6-35 kV of ENES facilities] [in Russian]
8. Ljamets Ju.Ja. Mnogomernaja relejnaja zaschita. Ch.1. Teoreticheskie predposylki [Multidimensional Relay Protection. Part 1. Theoretical Background] / Ju.Ja. Ljamets // Electricity. — 2009. — 10. — p. 17-25. [in Russian]
9. Ljamets Ju.Ja. Mnogomernaja relejnaja zaschita. Ch.2. Analiz raspoznajuschej sposobnosti rele [Multidimensional Relay Protection. Part 2. Analysis of the Recognition Ability of the Relay] / Ju.Ja. Ljamets // Electricity. — 2009. — 11. — p. 9-15. [in Russian]
10. Ljamets Ju.Ja. Mnogomernaja relejnaja zaschita. Ch.3. Ekvivalentirovanie modelej [Multidimensional Relay Protection. Part 3. Model Equivalence] / Ju.Ja. Ljamets // Electricity. — 2010. — 1. — p. 9-15. [in Russian]
11. Nagay I.V. Providing Remote Backup Functions of Relay Protection of Transformers in the Direct and Quadrature Axis Dissymmetry / I.V. Nagay // Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering. — 2011. — 6.
12. Vasiliev D.S. Development of High-sensitivity Distance Protection / D.S. Vasiliev, D.G. Eremeev, A.O. Pavlov // Russian Electrical Engineering. — 2011. — 3. — p. 149-155.
13. Obaid Z.A.. Power System Oscillations and Control: Classifications and PSSs' Design Methods / Z.A. Obaid, L.M. Cipcigan, M.T. Muhssin; — Amsterdam: Elsevier, 2017. — p. 839-849.