

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЦИФРОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Романов Л.Р., Погодина С.А., Крюков О.В.

ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород

Аннотация

Представлен комплексный анализ данных технического учета функционирования электротехнических комплексов релейной защиты в единой национальной электроэнергетической сети России, благодаря чему установлены основные типы, причины и закономерности неправильной и аварийной работы всего спектра защит. Предложен подход к потенциальному переходу на обслуживание промышленных объектов электроэнергетики на базе использования всей совокупности функциональных возможностей релейной защиты для решения проблем автоматизации процедур обслуживания на новой аппаратной и методологической базе. Сформулированы оптимальные критерии оценки работоспособности электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики цифровых трансформаторных подстанций, позволяющие дополнительно учесть влияние полноты и достоверности электротехнической информации о состоянии защищаемого электрооборудования, влияющей на качество работы защит. Показано, что организация технического обслуживания электрооборудования средствами релейной защиты и автоматики по фактическому состоянию на энергетическом объекте с развитой системой автоматизированного сбора и обработки информации является закономерным шагом преобразований в электроэнергетике. Анализ актуальности действующей технологии технического обслуживания и ремонта электрооборудования показал существенное снижение воздействий на функциональные группы измерения, информационной среды и приемных модулей электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики цифровых подстанций.

Ключевые слова: цифровая подстанция, распределительное устройство, релейная защита и автоматика, диагностирующее устройство, поток отказов, техническое обслуживание, электротехнический комплекс.

FUNCTIONAL CAPABILITIES OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION SYSTEMS OF DIGITAL SUBSTATIONS

Leonid Romanov, Svetlana Pogodina, Oleg Kryukov

TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod

Abstract

A comprehensive analysis of the data on the technical accounting of the functioning of electrical relay protection complexes in the unified national electric power grid of Russia is presented, thanks to which the main types, causes and patterns of incorrect and emergency operation of the entire range of protections are established. An approach to the potential transition to servicing industrial electric power facilities based on the use of the entire set of relay protection functionality to solve the problems of automating maintenance procedures on a new hardware and methodological basis is proposed. Optimal criteria for evaluating the operability of electrical relay protection complexes and automation of digital transformer substations are formulated, which additionally take into account the influence of completeness and reliability of electrical information on the condition of protected electrical equipment affecting the quality of protection. It is shown that the organization of maintenance of electrical equipment by means of relay protection and automation according to the actual condition at an energy facility with a developed system of automated information collection



and processing is a natural step of transformation in the electric power industry. The analysis of the relevance of the current technology of maintenance and repair of electrical equipment showed a significant reduction in the impact on the functional groups of measurement, information environment and receiving modules of electrical relay protection complexes and automation of digital substations.

Keywords: digital substation, switchgear, relay protection and automation, diagnostic device, failure rate, maintenance, electrical complex.

Введение

В настоящее время основным типом технического обслуживания (ТО) комплексов релейной защиты и автоматики (РЗА) электротехнических комплексов (ЭТК) остается традиционное планово-предупредительное ТО, при котором все типы РЗА и вторичное оборудование с заранее установленной нормативной периодичностью подвергаются стандартным процедурам осмотра и ремонта [1, 2]. В то же время, согласно данным [3, 4], основное влияние на работоспособность и качество функционирования ЭТК РЗА оказывает непосредственно человеческий фактор. Именно поэтому сегодня продолжают научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию универсальных автоматизированных процедур ТО по фактическому состоянию оборудования ЭТК РЗА, минимизирующие участие персонала [5, 6]. В этой связи актуальной задачей является оценка потенциала функциональных возможностей ЭТК РЗА для решения проблем автоматизации процедур ТО на новой аппаратной и методологической базе.

Материалы и методы

С 2020 года в Правила организации ТО и ремонта объектов электроэнергетики внесены изменения в части организации ТО ЭТК РЗА, одним из принципиальных концептов в которых стало закрепление ТО по состоянию [7, 8]. Согласно правилам [7], ТО по состоянию может применяться как для новых, так и для введенных в работу ЭТК РЗА, удовлетворяющих ряду условий. В частности, ЭТК РЗА должны быть размещены в помещениях с нормальными эксплуатационными условиями и срок их службы не должен быть превышен. Кроме эксплуатационных условий, для новых ЭТК РЗА должно быть выполнено ТО вида «Н» и «К1» («К» или «В» для комплексов, уже находящихся в эксплуатации). Одним из ключевых условий организации ТО по состоянию является сбор и анализ электротехнической информации с ЭТК РЗА [9-11]. Автоматизированный сбор информации осуществляется с отдельного АРМ РЗА (рис. 1) через подключение ЭТК РЗА к системе объекта электроэнергетики, позволяющей получить полный объем измерений и передачу информации [12, 13].

При организации ТО по состоянию для каждого ЭТК РЗА обязателен регулярный мониторинг функционирования, обеспечивающий оценку работоспособности [14, 15]. Для элементов и цепей ЭТК РЗА, не охватываемых самодиагностикой и мониторингом функционирования, предусматривается периодическое ТО. Независимо от выполнения мониторинга функционирования ЭТК РЗА, функционально связанное с ними вторичное оборудование, также должно обслуживаться.

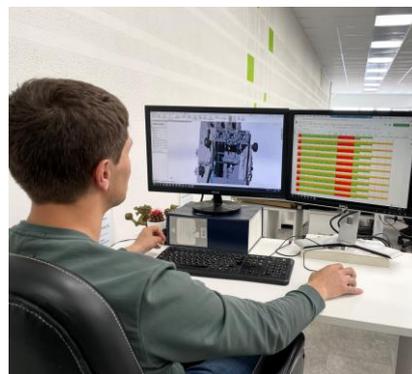


Рис. 1. Сбор и передача информации с отдельного удаленного АРМ РЗА

Таким образом, основой для перехода на ТО по состоянию является развитая система сбора и передачи информации, которую можно считать одним из компонентов диагностирующего устройства (ДУ). На основе математической модели надежности определим изменение вероятности безотказной работы ЭТК РЗА при изменении коэффициента эффективности диагностики ЭТК РЗА $\eta_{ДУ}$ в диапазоне от 0 (диагностирование отсутствует) до 1 (диагностируются любые возникающие неисправности). Разницу между исправными состояниями ЭТК РЗА для классической $P_{К1}$ и цифровой $P_{Ц1}$ подстанциями обозначим как $\Delta P_{И} = |P_{К1} - P_{Ц1}|$.

Результаты расчетов представлены в таблице 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Исправность комплексов РЗА при разной эффективности ДУ

$\eta_{ДУ}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$P_{К1}$	0,938	0,944	0,949	0,955	0,961	0,967	0,974	0,980	0,986	0,993	0,999
$P_{Ц1}$	0,951	0,956	0,960	0,965	0,970	0,975	0,979	0,984	0,989	0,994	0,999
$\Delta P_{И}$	0,013	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,005	0,004	0,003	0,001	0

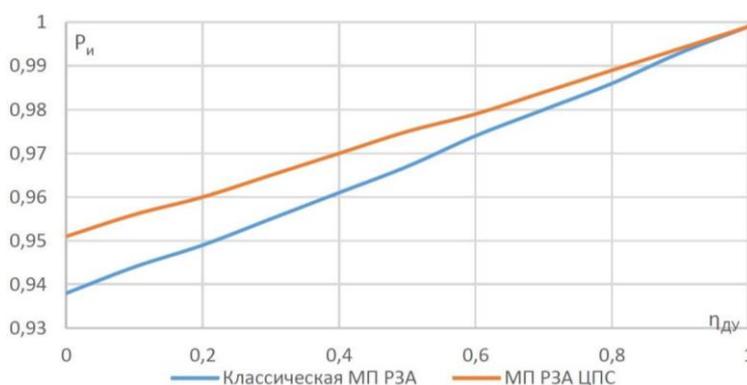


Рис. 2. Влияние эффективности ДУ на исправность комплексов РЗА

Результаты

Результаты расчета показали, что влияние эффективности ДУ на вероятность исправного состояния ЭТК РЗА имеет практически линейную зависимость. При повышении эффективности ДУ различие исправного состояния РЗА цифровых подстанций (ЦПС) и классической (МП) РЗА $\Delta P_{И}$ уменьшается и стремится к 0 при $\eta_{ДУ} = 1$.

Переход на ТО по состоянию приведет к снижению интенсивности восстановлений на величину $1/T_{пер}$, где $T_{пер}$ – период между проверками исправности защиты. Необходимо оценить, удастся ли компенсировать снижение интенсивности восстановлений при исключении плановых проверок за счет повышения эффективности ДУ. На основе математической модели рассчитано влияние изменения $T_{пер}$ в диапазоне от $t \rightarrow 0$ до $t = T_{пред}$, где $T_{пред}$ – предполагаемый срок службы ЭТК РЗА. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Обсуждение

По результатам расчетов видно, что при $\eta_{ДУ} = 0,5$ функция вероятности исправного состояния ЭТК РЗА принимает установившееся значение при $T_{пер} = 4$. При увеличении $\eta_{ДУ}$ до 0,7 и 0,9 данная функция принимает установившиеся значения при межремонтном интервале 2 и 0,5 года соответственно. Таким образом, при переходе на ТО по состоянию исправность ЭТК РЗА может быть обеспечена повышением эффективности ДУ, эквивалентным снижению интенсивности плановых восстановлений.



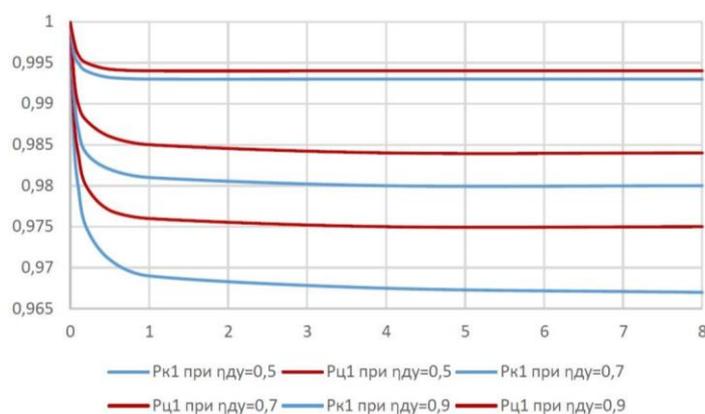


Рис. 3. Влияние межремонтного интервала на исправность защит

Организация ТО ЭТК РЗА по состоянию на энергетическом объекте с развитой системой автоматизированного сбора и обработки информации является закономерным шагом преобразований в электроэнергетике. Для современного ЭТК РЗА, размещенного в нормальных эксплуатационных условиях, регулярно отправляющего сведения о своем состоянии и прошедшего ТО вида «Н» и «К1» маловероятно возникновение неисправности, которая не обнаруживается встроенным ДУ и способна привести к неправильной работе. Возможность возникновения такого события существенно меньше вероятности ошибки персонала при выполнении планового ТО.

Анализ актуальности действующей технологии ТО показал, существенное снижение воздействий на функциональные группы измерения, информационной среды и приемных модулей электротехнических комплексов РЗА ЦПС. Воздействия на группы аппаратной, программной части и системы телеметрии остались на сопоставимом уровне.

Выводы

1. Определена возможность обеспечения за счет повышения эффективности ДУ высоких значений работоспособности и качества функционирования ЭТК РЗА ЦПС при снижении интенсивности восстановлений в результате отказа от планового ТО и перехода на ТО по состоянию.

2. Выполнен анализ актуальности утвержденных объемов ТО для обеспечения работоспособности и качества функционирования ЭТК РЗА ЦПС, а также определен способ учета влияния полноты ТО на качество функционирования РЗА ЦПС и сформирован перечень параметров, учет которых необходим при организации ТО по фактическому состоянию комплексов РЗА ЦПС.

Библиографический список

1. Структуры и направления развития электротехнических комплексов релейной защиты и автоматики / В.А. Ипполитов, С.А. Погодина, Л.Р. Романов и др. // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 7(167). – С. 38-46. EDN: [CZWVQA](#)
2. Крюков О.В. Особенности релейной защиты и автоматики вдольтрассовых линий электропередачи // Электричество. – 2018. – № 11. – С. 4-9. DOI: [10.24160/0013-5380-2018-11-4-9](#). EDN: [YMHWEH](#)
3. Крупин С.Н., Крюков О.В., Рубцова И.Е. Принципы организации релейной защиты и автоматики вдольтрассовых ЛЭП магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2013. – №12. – С. 70-74. EDN: [RSDMCR](#)
4. Воронков В.И., Рубцова И.Е. Электроснабжение и электрооборудование линейных потребителей магистральных газопроводов // Газовая промышленность. – 2010. – № 3(643). – С. 32-37. EDN: [LABTYJ](#)



5. Мещеряков В.Н., Крюков О.В., Туганов Р.Б. Применение методов искусственного интеллекта для управления и мониторинга электромеханических систем и электроприводов // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 3(128). – С. 10-16. EDN: [IQYKDV](#)
6. Многоуровневый подход к анализу отказоустойчивости средствами резервирования, релейной защиты и автоматики электроснабжения / А.В. Саушев, М.И. Еразумов, Л.Р. Романов, О.В. Крюков // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 4(165). – С. 34-43. EDN: [GFDQRP](#)
7. Пужайло А.Ф., Рубцова И.Е. Энергосбережение в агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2. – С. 98-106. EDN: [QABTPD](#)
8. Степанов С.Е. Организация диспетчерского управления подстанциями компрессорных цехов с экспертной оценкой проектных решений // Промышленная энергетика. – 2021. – № 1. – С. 27-34. DOI: [10.34831/EP.2020.78.93.004](#). EDN: [ZKWIFW](#)
9. Крюков О.В., Степанов С.Е., Серебряков А.В. Современный подход к организации ремонта по данным прогноза технического состояния и ресурса электрооборудования // Газовая промышленность. – 2017. – № 8(756). – С. 84-89. EDN: [ZEMTXL](#)
10. Васенин А.Б., Крюков О.В. Вопросы электропитания вдольтрассовых объектов Единой системы газоснабжения России // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2020. – № 2(44). – С. 181-192. EDN: [YDYUSG](#)
11. Мониторинг и новые функциональные возможности распределительных устройств трансформаторных подстанций с НКУ «КАСКАД» / В.А. Ипполитов, А.Б. Кононенко, А.А. Косоротов, Крюков О.В // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 5(275). – С. 32-39. DOI: [10.14489/td.2021.05.pp.032-039](#). EDN: [BVMVLG](#)
12. Разработка прикладного программного обеспечения для системы геотехнического мониторинга газопроводов / И.В. Гуляев, С.Е. Степанов, А.Б. Васенин и др. // Контроль. Диагностика. – 2022. – Т. 25, № 6 (288). – С. 48-59. DOI: [10.14489/td.2022.06.pp.048-059](#). EDN: [IKSIGQ](#)
13. Обеспечение устойчивости электроэнергетических систем автоматическим регулированием / А.Б. Васенин, С.Е. Степанов, А.А. Иванов и др. // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2023. – № 5(166). – С. 16-25. EDN: [IITOUS](#)
14. Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП «Каскад» // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2020. – № 12(137). – С. 18-23. EDN: [CGFCTV](#)
15. Шарыгин М.В., Романов Л.Р., Крюков О.В. Совершенствование токовых защит реклоузеров в распределительных сетях 6-35 кВ // В сб.: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново: ИГЭУ, 2023. – С. 336-339. EDN: [BANHNR](#)

References

1. Ippolitov, V. A., Gorokhova N. B., Gruzdev, V. V., Pogodina, S. A., Romanov, L. R., & Kryukov O. V. (2023). Structures and directions development of electrical relay protection complexes and automatics. *Avtomatizaciya i IT v energetike*, (167), 38-46. [In Russian]
2. Kryukov, O. V. (2018). Specific features of relay protection and automatic controls of a power line laid along the pipeline route. *E'lektrichestvo*, 11, 4-9. <https://doi.org/10.24160/0013-5380-2018-11-4-9> [In Russian]
3. Krupin, S. N., Kryukov, O. V., & Rubtsova, I. E (2013). Principy` organizacii relejnoj zashhity` i avtomatiki vdol`trassovy`x LE`P magistral`ny`x gazoprovodov [Principles of the organization of relay protection and automation of long-distance transmission lines of main gas pipelines]. *Gazovaya promy`shlennost`*, 12, 70-74. [In Russian]
4. Voronkov, V. I., & Rubtsova, I. E. (2010). E`lektrosnabzhenie i e`lektrrooborudovanie linejny`x potrebitelej magistral`ny`x gazoprovodov [Power supply and electrical equipment of linear consumers of main gas pipelines]. *Gazovaya promy`shlennost`*, 3(643), 32-37. [In Russian]



5. Meshcheryakov, V. N., Kryukov, O. V., & Tuganov, R. B. (2020). Application of artificial methods intelligence for management and monitoring electromechanical systems and electric drives. *Avtomatizatsiya i IT v e`nergetike*, 3(128), 10-16. [In Russian]
6. Saushev, A. V., Erazumov, M. I., Romanov, L. R., & Kryukov O. V. (2023). Multilevel approach to analysis fault safety by means reservation, relay protection and power supply automation. *Avtomatizatsiya i IT v e`nergetike*, 4 (165), 34-43. [In Russian]
7. Puzhailo, A. F., & Rubtsova, I. E. (2012). E`nergoberezhenie v agregatax kompressorny`x stancij sredstvami chastotno-reguliruemogo e`lektroprivoda [Energy saving in compressor station units by means of a frequency-controlled electric drive]. *Nauka i tekhnika v gazovoj promy`shlennosti*, 2, 98-106. [In Russian]
8. Stepanov, S. E. (2021). Organizatsiya dispetcherskogo upravleniya podstanciyami kompressorny`x cexov s e`kspertnoj ocenкой proektny`x reshenij [Organization of dispatching control of substations of compressor shops with expert assessment of design solutions]. *Promy`shlennaya e`nergetika*, 1, 27-34. <https://doi.org/10.34831/EP.2020.78.93.004> [In Russian]
9. Kryukov, O. V., Stepanov, S. E., & Serebryakov, A. V. (2017). Modern approach to the organization of repair according to the technical condition forecast and the resource of electrical equipment. *Gazovaya promy`shlennost*, 8(756), 84-89. [In Russian]
10. Vasenin, A. B., & Kryukov O. V. (2020). Issues of electricity supply for route facilities of the unified gas supply system of Russia. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Vesti gazovoj nauk*, 2(44), 181-192. [In Russian]
11. Ippolitov, V. A., Kononenko, A. B., Kosorotov, A. A., & Kryukov O. V. (2021). Monitoring and new functionality of switchgears of transformer substations with LCD "Cascade". *Kontrol'. Diagnostika*, 24(5), pp. 32-39. <https://doi.org/10.14489/td.2021.05.pp.032-039> [In Russian]
12. Gulyaev, I. V., Stepanov, S. E., Vasenin, A. B., Kosorotov, A. A., & Kryukov O. V. (2022). Application software development for the geotechnical monitoring system of gas pipelines. *Kontrol'. Diagnostika*, 25(6), 48-59. <https://doi.org/10.14489/td.2022.06.pp.048-059> [In Russian]
13. Vasenin, A. B., Stepanov, S. E., Ivanov, A. A., Podshivalov, E. S., & Kryukov O. V. (2023). Ensuring stability of electric power systems by automatic regulation excitations. *Avtomatizatsiya i IT v e`nergetike*, 5(166), 16-25. [In Russian]
14. Kononenko, A. B., Kosorotov A. A., & Kryukov O. V. (2020). Expansion of functional automation opportunities and monitoring of distribution devices KTP "Kaskad". *Avtomatizatsiya i IT v e`nergetike*, 12, 26-31. [In Russian]
15. Sharygin, M. V., Romanov, L. R. & Kryukov O. V. (2023). Sovershenstvovanie tokovy`x zashhit reklouzerov v raspredelitel`ny`x setyax 6-35 kV [Improvement of current protection of reclosers in 6-35 kV distribution networks]. In *Porc of. Sostoyanie i perspektivy` razvitiya e`lektr- i teplotexnologii (XXII Benardosovskie chteniya)* (pp. 336-339). ISEU. [In Russian]

Сведения об авторах

Романов Леонид Романович, аспирант, технико-коммерческий отдел, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

Погодина Светлана Александровна, главный инженер проектов Инженерного центра, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

Крюков Олег Викторович, д-р техн. наук, доцент, заместитель директора по науке, ООО «ТСН-электро», г. Нижний Новгород.

Authors about

Leonid Romanov, graduate student, Technical and Commercial Department of TSN-Electro LLC, Nizhny Novgorod.

Svetlana Pogodina, Chief Engineer of the Engineering Center projects of TSN-electro LLC, Nizhny Novgorod.

Oleg Kryukov, Dr. of Tech. Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Science of TSN-Electro LLC, Nizhny Novgorod.

