

ОТКЛЮЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 0,4 КВ: КОЛИЧЕСТВО, ПРИЧИНЫ И КОНТРМЕРЫ**Виноградов А.В., Большев В.Е., Виноградова А.В.**

Реферат. Исследования проводили с целью анализа отключений в электрических сетях 0,4...10 кВ и определения основных контрмер по снижению их количества. В качестве показателя надёжности проанализирована частота отказов основных элементов сети. В общем количестве рассмотренных отключений входили потребительские отключения, отключения из-за повреждения воздушных линий электропередачи (ЛЭП) 0,4 кВ и оборудования трансформаторных подстанций (ТП). Исследования выполняли на основе данных Мценского, Орловского и Покровского районов электрических сетей Филиала ПАО «МРСК Центра» – «Орёлэнерго» и АО «Орёлблэнерго» в период с 2015 по 2017 гг. Большинство причин повреждений оборудования ЛЭП 0,4 и ТП 10/0,4 кВ можно предотвратить путем повышения уровня его обслуживания и проведения своевременной диагностики. Определение количественных показателей эффективности контрмер по сокращению числа отключений затруднено из-за отсутствия в электрических сетях систем мониторинга технического состояния. Основные меры, направленные на решение этой проблемы в сетях 0,4 кВ – переход на ЛЭП с изолированными проводами; совершенствование конструкции коммутационных аппаратов, переключателей и выводов трансформаторов; применение средств диагностики; разукрупнение ЛЭП. Замена оборудования электрических сетей на новые типы обеспечивает экономический эффект от снижения частоты отказов, а также экономии за счёт сокращения затрат на обслуживание. В частности, замена трансформаторов на герметичные, позволяет сократить недоотпуск электроэнергии на 43,6 %, а проводов на изолированные – на 95,3 %.

Ключевые слова: надёжность электроснабжения, отключения электроснабжения, электрическая сеть, линия электропередачи, ЛЭП, трансформаторная подстанция, эффективность контрмер по сокращению отключений.

Введение. Отключения в электрических сетях 0,4 кВ приводят к недоотпуску электроэнергии потребителям и ущербу для электросетевых организаций. Последний связан со снижением оплаты за электроэнергию, неоправданным ростом затрат на обслуживание и ремонт оборудования электрических сетей. В документах, регламентирующих техническую политику ПАО «Россети» [1, 2], отмечено, что наименьшей надёжностью обладают электрические сети 0,4...10 кВ, и подчеркнута актуальность разработки и внедрения мероприятий, направленных на её повышение. Для конкретизации таких мер необходим анализ причин отключений, а также понимание результативности разработанных мероприятий. Это позволит прогнозировать экономические эффекты, которые возможны при их реализации.

Получение данных для анализа причин отключений и результативности контрмер по их сокращению возможно путем статистических исследований, проводимых по результатам эксплуатации электрических сетей. Такой подход используют как отечественные авторы [3], так и зарубежные исследователи, изучавшие надёжность систем электроснабжения [4, 5, 6], факторы, влияющие на их эффективность [7] и методы сокращения времени восстановления [8].

Сравнение показателей надёжности электроснабжения потребителей по районам Орловской области показало, что основные причины отключений – неустойчивые повреждения линий электропередачи (ЛЭП), повреждения коммутационного и трансформаторного

оборудования трансформаторных подстанций (ТП), повреждения ЛЭП, связанные с несвоевременной вырубкой деревьев вдоль трасс [9]. Однако необходим более подробный анализ причин отключений для выработки рекомендаций по сокращению их количества.

Цель исследования – анализ отключений в электрических сетях 0,38...10 кВ и определение основных контрмер для снижения их количества.

Условия, материалы и методы исследований. Основным методом исследования – статистическое наблюдение отказов основного оборудования сети, приведших к отключениям потребителей и причин этих отказов. В качестве показателя надёжности проанализирована частота отказов основных элементов сети. В общем количестве рассмотренных отключений входили отключения из-за повреждения воздушных линий (ВЛ/ВЛИ) и оборудования ТП. На основе анализа выявляли наиболее частые причины повреждений, приводящие к отключениям в сетях 0,4 кВ, и вырабатывали главные направления работы по сокращению количества отключений и соответственно повышению надёжности электроснабжения сельских потребителей. Исследования выполняли на основе данных Мценского, Орловского и Покровского районов электрических сетей Филиала ПАО «МРСК Центра» – «Орёлэнерго» и АО «Орёлблэнерго» в период с 2015 по 2017 гг.

Совместно с сетевыми компаниями выработана методика подготовки и реализации программ повышения надёжности электроснабжения потребителей, в которых основное

Таблица 1 – Показатели надёжности электрических сетей, рассматриваемых РЭС

Частота отказов	Мценский РЭС	Покровский РЭС	Орловский РЭС	АО «Орёлблэнерго»
ЛЭП 0,4 кВ, год ⁻¹ /100 км	10,8	34,0	25,0	23,0
Силовых трансформаторов ТМ, год ⁻¹ /100 шт.	1,90	1,80	1,92	Нет данных

место занимает замена оборудования на более современное и эффективное, и разработаны рекомендации по повышению надёжности электроснабжения потребителей Покровского РЭС, Мценского РЭС, Орловского РЭС, а также АО «Орёлблэнерго».

При выполнении этих работ определяли показатели надёжности элементов электрических сетей до и после реализации рекомендованных мероприятий, проводили оценку эффективности замены оборудования на новое с точки зрения повышения надёжности электроснабжения потребителей, а также экономии средств на эксплуатацию и монтаж. Анализ данных по частоте отказов оборудования нового типа позволил рассчитать удельные эффекты от его применения.

Анализ и обсуждение результатов исследований. Анализ надёжности линий электропередачи (ЛЭП) 0,4 кВ и силовых трансформаторов, эксплуатируемых рассматриваемыми электросетевыми организациями, показал, что частота их отказов варьирует соответственно от 10,8 до 34,0 год⁻¹/100 км и от 1,80 до 1,92 год⁻¹/100 шт (табл. 1).

Поскольку соотношение причин отключения по различным РЭС совпадает с точностью до 5 %, более подробно рассмотрим их на примере Мценского РЭС (табл. 2). В этом РЭС заметное сокращение количества отключений, наблюдаемое с 2016 г., в значительной степени обусловлено уменьшением числа случаев

схлестывания проводов, что вызвано активной заменой неизолированных проводов на самонесущие изолированные провода (СИП), в первую очередь, на тех ЛЭП, где отключения были наиболее частыми. По этой же причине произошло снижение числа случаев отключения автоматических выключателей в начале линии. Это позволяет выделить замену голого провода на изолированный как эффективную меру по сокращению отключений в электрических сетях. В то же время отключение автоматических выключателей (АВ) или перегорания предохранителей в ЛЭП – самая частая причина сбоев, отключение из-за которой суммарно больше, чем от всех остальных. При этом выяснить почему срабатывает АВ зачастую не представляется возможным, так как после повторного ручного включения линия, чаще всего, работает в нормальном режиме. Причиной отключения АВ может быть перегрузка в ЛЭП, не выявленные схлестывания проводов, неустойчивые короткие замыкания и др. В отсутствие секционирования ЛЭП в любом из перечисленных случаев, произошедшем на любом участке, происходит отключение всей линии, что значительно снижает надёжность электроснабжения и необоснованно повышает количество и продолжительность перерывов в электроснабжении потребителей, подключённых к неповрежденным участкам ЛЭП. Очистка трасс ЛЭП позволила сильно сократить отключения от падения деревьев. В то же вре-

Таблица 2 – Анализ причин повреждений воздушных линий напряжением 0,4кВ на примере Мценского РЭС (2015–2017 гг.)

Причины повреждения	Количество повреждений, шт.			Отношение к общему числу повреждений, %		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Обрыв провода	4	6	9	2,4	6,8	11,8
Схлестывание проводов	26	11	3	16	12,6	3,9
Падение деревьев	12	4	1	7,4	4,5	1,3
Отключение автоматического выключателя в начале ЛЭП / перегорание предохранителя	110	60	60	67	68,9	78,9
Иные причины	10	6	3	6,1	6,8	3,9
Итого:	162	87	76	100	100	100

Таблица 3 – Причины повреждений ТП напряжением 10/0,4 кВ (2015–2017 гг.)

Причины поврежде- ния	Количество повреждений, шт.			Отношение к общему числу повреждений, %		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017
Перекрытие рубиль- ника	10	12	11	50	48	47,8
Повреждение кон- тактных соединений на шпильках транс- форматора	6	5	5	30	20	21,7
Другие причины	4	8	7	20	32	30,5
Итого:	20	25	23	100	100	100

мя невозможно объективно количественно определить эффективность замены провода и вырубки трасс, поскольку такой учёт в РЭС не ведётся, а линии не оснащены средствами объективного наблюдения, например, видеокаме-рами. Повысить качество мониторинга причин отключений и эффективности принятых мер может использование беспилотных летатель-ных аппаратов (БПЛА), что позволяет значи-тельно сократить время обследования линий электропередачи. Так, в Мценском РЭС оно уменьшилось с 3 часов до 5...15 минут на 1 км [10].

На долю отказов электрооборудования ТП приходится порядка 8,25 % от общего количе-ства, но они приводят к большим материаль-ным затратам и наносят значительный эконо-

мический ущерб из-за нарушения электро-снабжения большого числа потребителей. В целом их число по Мценскому РЭС за годы исследований оставалось на одном уровне (табл. 3). Один из самых дорогостоящих эле-ментов электрооборудования ТП – силовой трансформатор. Большинство отказов в их работе связано с повреждениями контактных соединений, возникающими из-за нарушения целостности и плотности контакта, что приво-дит к перегоранию шины, наконечника кабеля, шпильки трансформатора. Анализ поврежде-ний оборудования ТП позволяет сделать выво-ды о необходимости совершенствования ком-мутационного оборудования, а также разра-ботки средств контроля и диагностики кон-тактных соединений, совершенствования экс-

Таблица 4 – Эффекты применения новых типов оборудования для электрических сетей 0,4кВ (среднее)*

Показатель	Оборудование	
	1-го типа	2-го типа
Трансформаторные подстанции (1-й тип оборудования – трансформаторы ТМ, 2-й тип оборудования – ТМГ)		
Частота аварийных отключений, год ⁻¹ /100 шт.	1,91	1,47
Недоотпуск электроэнергии в аварийном режиме, %	100	66,4
Текущий ремонт одного силового трансформатора, чел. час	6,98	-
Капитальный ремонт одного силового трансформатора, чел. час	40,6	38,3
Испытание трансформаторного масла, чел. час	0,5	-
Замена силикагеля, чел. час	5,81	-
Текущий ремонт одного силового трансформатора (стоимость)	100 %	-
Капитальный ремонт одного силового трансформатора (стоимость), %	100	94,3
Испытание трансформаторного масла (стоимость), %	100	-
Замена силикагеля (стоимость), %	100	-
ВЛ (ВЛИ) 0,4 кВ (1-й тип оборудования – провод неизолированный, 2-й тип оборудования – изолированный)		
Частота аварийных отключений, год ⁻¹ /на 100 км	22	2,7
Недоотпуск электроэнергии в аварийном режиме, %	100	4,7
Прокладка 1 км провода, чел. час	21	18
Подвеска 1 км провода, чел. час	42,25	22,71
Прокладка 1 км провода (стоимость), %	100	96,7
Подвеска 1 км провода (стоимость), %	100	53,2

*стоимостные показатели приведены в процентах от их величины для оборудования 1-го типа

платации трансформаторов.

Анализ данных по эффективности оборудования нового типа показал, что замена провода на самонесущий изолированный уменьшает частоту аварийных отключений на 19,3 шт./на 100 км в год, недоотпуск электроэнергии в аварийном режиме – на 95,3 %, замена трансформаторов ТМ на ТМГ снижает величины этих показателей соответственно – на 0,44 год⁻¹/100 шт. и 43,6 % (табл. 4). Одновременно значительно снижаются затраты труда и средств по другим статьям расходов на монтаж и эксплуатацию.

Выводы. Наиболее частые причины отключения ЛЭП 0,4 кВ – отключение защитного аппарата в начале линии, обрывы и склеивания проводов, что связано с их техническим состоянием, зарастание трасс ЛЭП. Основные отказы оборудования ТП 10/0,4 кВ – перекрытия рубильников, коммутирующих вводы низкого напряжения и отходящие ЛЭП, повреждения контактных соединений на шпильках трансформатора, обусловленные несовершенством их конструкции.

Большинство причин повреждения оборудо-

ования ЛЭП 0,4 кВ и ТП 10/0,4 кВ можно предотвратить путем повышения уровня его обслуживания и проведения своевременной диагностики.

Основные направления снижения количества отключений в сетях 0,4 кВ переход на использование в ЛЭП изолированных проводов; совершенствование конструкции коммутационных аппаратов, переключателей и выводов трансформаторов; применение современных средств диагностики; разукрупнение ЛЭП.

Применение предлагаемых мероприятий, в частности замена оборудования электрических сетей на новые типы позволяет получать эффект как от снижения частоты отказов, так и от сокращения затрат на обслуживание. В частности, замена трансформаторов на герметичные, позволяет сократить недоотпуск электроэнергии на 43,6 %, а проводов на изолированные – на 95,3 %.

Полученные данные могут использоваться при оценке эффективности применения нового оборудования в электрических сетях с целью принятия решения о модернизации того

Литература

1. Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе. М.: ОАО «Россети», 2013. 196 с.
2. Положение ПАО «Россети» «О единой технической политике в электросетевом комплексе» Утверждено Советом Директоров ПАО «Россети» (протокол от 22.02.2017 № 252). [Электронный ресурс]. URL: https://www.mrsk-ural.ru/public/upload/content/files/2019/tech_policy2019.pdf (дата обращения 14.05.2020)/
3. Анищенко В. А., Колосова И.В. Основы надежности систем электроснабжения: пособие для студентов по специальности «Электроснабжение». Мн.: БНТУ, 2008. 151 с.
4. Trojanowska M. Bezpieczeństwo Elektroenergetyczne Terenów Wiejskich // Агротехника и энергообеспечение. 2014. №1(1). С. 468-475.
5. Kornatka M. Analiza statystyczna zawadności krajowych linii niskiego napięcia // Wiadomości Elektrotechniczne. 2009. №6(77). Р. 3-6.
6. Paska J. O. Potrzebie wykonywania analiznie zawadności system elektroenergetycznego // Napędisterowanie. 2011. № 9. Р. 155-158.
7. Oricha J. Y. Analysis of interrelated factors affecting efficiency and stability of power supply in developing countries // AFRCON. 2009. 5308171. [электронный ресурс]. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5308171> (дата обращения 14.05.2020).
8. Jianfang L, Xiaohui S., Yuting W. Service Restoration for Distribution Network Considering the Uncertainty of Restoration Time // 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). 2016. [электронный ресурс]. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Service-Restoration-for-Distribution-Network-the-of-Li-Song/0c70e231e5582976bc856f25e28c17dc592d96d2> (дата обращения 14.05.2020).
9. Сравнительный анализ надежности электроснабжения по районам электрических сетей / А. В. Виноградов, А. В. Виноградова, И. Д. Скитёва и др. // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. №3 (28). С. 39-46.
10. Протокол №1 испытания беспилотного летательного аппарата (БПЛА ОСЛЭП Орел ГАУ) для осмотра ВЛ на базе Мценского РЭС ОАО «МРСК Центра» - «Орелэнерго» от 26.11.2014.

Сведения об авторах:

Виноградов Александр Владимирович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией электроснабжения и теплообеспечения, e-mail: winaleksandr@gmail.com

Большев Вадим Евгеньевич – научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, e-mail: vadimbolshev@gmail.com

Виноградова Алина Васильевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электроснабжения и теплообеспечения, e-mail: alinawin@rambler.ru
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Россия

DISCONNECTIONS IN 0.4 KV ELECTRIC NETWORKS: QUANTITY, REASONS AND COUNTER MEASURES

Vinogradov A.V., Bolshev V.E., Vinogradova A.V.

Abstract. Studies were carried out with the aim of analyzing blackouts in electric networks of 0.4 ... 10 kV and determining the main countermeasures to reduce their number. As an indicator of reliability, the failure rate of the main network elements is analyzed. The total number of outages considered included consumer outages, outages due to damage to 0.4 kV overhead power lines (transmission lines) and transformer substation (TS) equipment. The studies were carried

out on the basis of the data of Mtsenskiy, Orloyskiy and Pokrovskiy districts of electric networks of “Oreloenergo” – a branch of PJSC “MRSK Center” and JSC “Oreoblenergo” in the period from 2015 to 2017. Most of the causes of damage to power line equipment of 0.4 and transformer substations of 10/0.4 kV can be prevented by increasing the level of its maintenance and conducting timely diagnostics. The determination of quantitative indicators of the effectiveness of countermeasures to reduce the number of outages is difficult due to the lack of technical condition monitoring systems in electric networks. The main measures aimed at solving this problem in 0.4 kV networks are the transition to power lines with insulated wires; improving the design of switching devices, switches and transformer leads; the use of diagnostic tools; disaggregation of power lines. Replacing the equipment of electric grids with new types provides the economic effect of reducing the frequency of failures, as well as saving due to a reduction in maintenance costs. In particular, replacing transformers with hermetic ones allows reducing electricity shortfalls by 43.6%, and insulated wires by 95.3%.

Key words: reliability of power supply, power outages, electric network, power line, power lines, transformer substation, the effectiveness of countermeasures to reduce outages.

References

1. *Polozhenie OAO “Rosseti” o edinoy tekhnicheskoy politike v elektrosetevom komplekse*. [Regulation of JSC “Rosseti” on a unified technical policy in the electric grid complex]. M.: OAO “Rosseti”, 2013. 196 p.
2. *Polozhenie PAO “Rosseti” “O edinoy tekhnicheskoy politike v elektrosetevom komplekse”*. *Utverzhdeno Sovetom Direktorov PAO “Rosseti” (protokol ot 22.02.2017 № 252)*. [Regulation of PJSC “Rosseti” “On a unified technical policy in the electric grid complex”]. Approved by the Board of Directors of PJSC “Rosseti” (Protocol No. 252 of 02.22.2017). Available at: https://www.mrsk-ural.ru/public/upload/content/files/2019/tech_policy2019.pdf (date of access 14.05.2020)/
3. Anischenko V.A., Kolosova I.V. *Osnovy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya: posobie dlya studentov spetsialnosti “Elektrosnabzhenie”*. [The basics of reliability of power supply systems: a manual for students of the specialty “Power supply”]. Mn.: BNTU, 2008. 151 p.
4. Trojanowska M. *Bezpieczeństwo Elektroenergetyczne Terenów Wiejskich // Agrotechnika i energoobespechenie. - Agricultural technology and energy supply*. 2014. №1(1). P. 468-475.
5. Komatka M. *Analiza statystyczna zawadności krajowych linii niskiego napięcia // Wiadomości Elektrotechniczne*. 2009. №6 (77). P. 3-6.
6. Paska J. O. *Potrzebie wykonywania analiznie zawadności system elektroenergetycznego // Napędsterowanie*. 2011. № 9. P. 155-158.
7. Oricha J.Y. *Analysis of interrelated factors affecting efficiency and stability of power supply in developing countries // AFRCON*. 2009. 5308171. [электронный ресурс]. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5308171> (date of access 14.05.2020).
8. Jianfang L, Xiaohui S., Yuting W. *Service Restoration for Distribution Network Considering the Uncertainty of Restoration Time // 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*. 2016. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Service-Restoration-for-Distribution-Network-the-of-Li-Song/0c70e231e5582976bc856f25e28c17dc592d96d2> (date of access 14.05.2020).
9. *A comparative analysis of the reliability of power supply in the areas of electric networks. [Sravnitelnyy analiz nadezhnosti elektrosnabzheniya po rayonam elektricheskikh setey]. / A.V. Vinogradov, A.V. Vinogradova, I.D. Skitova and others // Innovatsii v selskom khozyaystve. - Innovations in agriculture*. 2018. №3 (28). P. 39-46.
10. *Protokol №1 ispytaniya bespilotnogo letatel'nogo apparata (BPLA OSLEP Orel GAU) dlya osmotra VL na baze Mtsenskogo RES OAO “MRSK Tsentra”*. (Protocol No. 1 for testing an unmanned aerial vehicle (UAV OSLEP of Orel GAU) for inspection of overhead lines on the basis of Mtsensky Distribution Zone of IDGC of Center, JSC – “Oreloenergo” of 26.11.2014).

Authors:

Vinogradov Aleksandr Vladimirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Head of Power and heat supply Laboratory, e-mail: winaleksandr@gmail.com

Bolshev Vadim Evgenevich - Researcher, Power and heat supply Laboratory, e-mail: vadimbolshev@gmail.com

Vinogradova Alina Vasilevna – Ph.D. of Technical Sciences, Senior Researcher of Power and heat supply Laboratory, e-mail: alinawin@rambler.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia