



## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА КАЛИНИНГРАДА

А.А. Фаустов, студент гр. 18-ЭЭм, faust0v.a@yandex.ru  
М.С. Харитонов, к.т.н., доцент, maksim.haritonov@klgtu.ru  
факультет судостроения и энергетики  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный техниче-  
ский университет»

Представлены результаты анализа текущего состояния системы электроснабжения г. Калининграда с позиции обеспечения надежности. Рассмотрены основные организационные и технические мероприятия по повышению надежности электроснабжения потребителей применительно к городским электрическим сетям. Сформированы предложения по повышению надежности за счет внедрения системы автоматического восстановления электроснабжения.

*система электроснабжения, город, электрическая сеть, кабельная линия, надежность, недоотпуск электроэнергии, автоматическое восстановление электроснабжения*

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития распределительных сетей и систем электроснабжения является повышение качества электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей. В особенности это актуально для систем крупных городов, где в условиях сложной конфигурации электрических сетей и разнообразия нагрузок необходимо обеспечить надежную работу ответственных потребителей и элементов социальной инфраструктуры. В связи с этим одной из задач, стоящих перед электросетевыми компаниями, является повышение надежности работы городских электрических сетей.

Надежность функционирования электрических сетей характеризуют различные показатели: частота отключений, коэффициент готовности, вероятность безотказной работы в течение года и др. Однако одним из наиболее комплексных показателей надежности является величина годового недоотпуска электроэнергии (1).

$$W = \omega \cdot T \cdot \tau \cdot S, \quad (1)$$

где  $\omega$  - параметр потока отказов, ч<sup>-1</sup>;  $T$  - количество часов в году, ч;  $\tau$  - время восстановления электроснабжения, ч;  $S$  – теряемая мощность нагрузки, кВт.

В соответствии с выражением (1) сокращение недоотпуска может быть достигнуто путем уменьшения каждого из сомножителей за счет применения различных нормативных, организационных и технических мероприятий, которые можно разделить на две группы в зависимости от нацеленности на повышение технической или режимной надежности. Проведенный анализ позволил выявить наиболее перспективные мероприятия по повышению надежности с учетом специфики городских электрических сетей.

Сокращение частоты отказов (техническая надежность) достигается благодаря применению самонесущих изолированных проводников и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена; совершенствованию системы диагностики изоляции и сети в целом на основе современных неразрушающих методов контроля; повышению номинального тока отключения и ресурса коммутационных аппаратов. Сокращение времени восстановления и величины теряемой нагрузки (режимная надежность) обеспечивается за счет: автоматических секционирования, повторного включения линий и включения резерва; быстродействующих устройств релейной защиты; установки дистанционных измерителей расстояния до места короткого замыкания; оптимизации точек размыкания воздушных и кабельных линий; оптимизации

процесса восстановления электроснабжения [1]. В свою очередь, мероприятия второй группы являются элементами системы автоматического восстановления электроснабжения (САВС).

К основным задачам САВС относится автоматическое определение поврежденного участка сети электроснабжения 6-10 кВ при междуфазных коротких замыканиях и однофазных замыканиях на землю, локализация поврежденного участка и восстановление электроснабжения потребителей [2]. В основе системы лежит глубокое секционирование сетей, обеспечивающее высокую селективность при локализации места повреждения. С позиции технической надежности увеличение числа пунктов секционирования снижает надежность системы из-за увеличения числа элементов в основном соединении (2). Однако при учете более важного для системы показателя режимной надежности (вероятности бесперебойного электроснабжения) увеличение числа пунктов секционирования позволяет снизить недоотпуск электроэнергии (рисунок 1), что является основным принципом работы САВС [3]:

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt}, \quad (2)$$

где  $P_c(t)$  – вероятность безотказной работы радиального участка сети;  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента;  $\lambda_i(t)$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента.

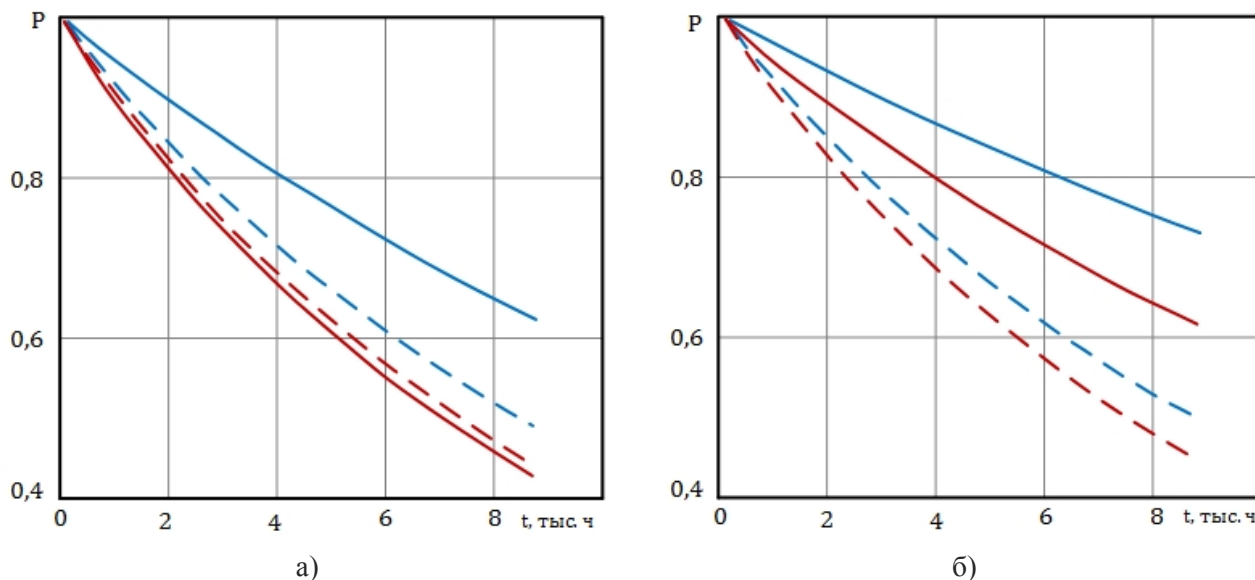


Рисунок 1 – Вероятность безотказной работы (а) и вероятность бесперебойного электроснабжения (б) для радиального участка сети без секционирования (пунктирные) и с секционированием (сплошные линии) для пяти (синий) и десяти (красный) пунктов секционирования

Система электроснабжения г. Калининграда (табл. 1) имеет сложную структуру, обусловленную особенностями исторического развития, и включает электрические сети низкого (0,23 и 0,4 кВ) и среднего (6 и 10 кВ) напряжения, которые получают питание от подстанций распределительной сети 110 кВ (рис. 2).

Таблица 1 – Краткая характеристика системы электроснабжения г. Калининграда

Количество питающих центров 110/10 (6) кВ	9
Количество РП 10 (6) кВ	39
Количество ТП, КТП 10(6)/0,4(0,23) кВ	670
Количество абонентских ТП 10(6) кВ	290
Протяженность кабельных линий 6-10 кВ	812 км
Протяженность кабельных и воздушных линий 0,4-0,23 кВ	967 км
Количество трансформаторов 10(6)/0,4 кВ	1200
Тип заземления нейтрали	Компенсированная
Компенсированный ток однофазного КЗ на землю	$\approx 5$ А
Количество нормальных точек разрыва сети	464

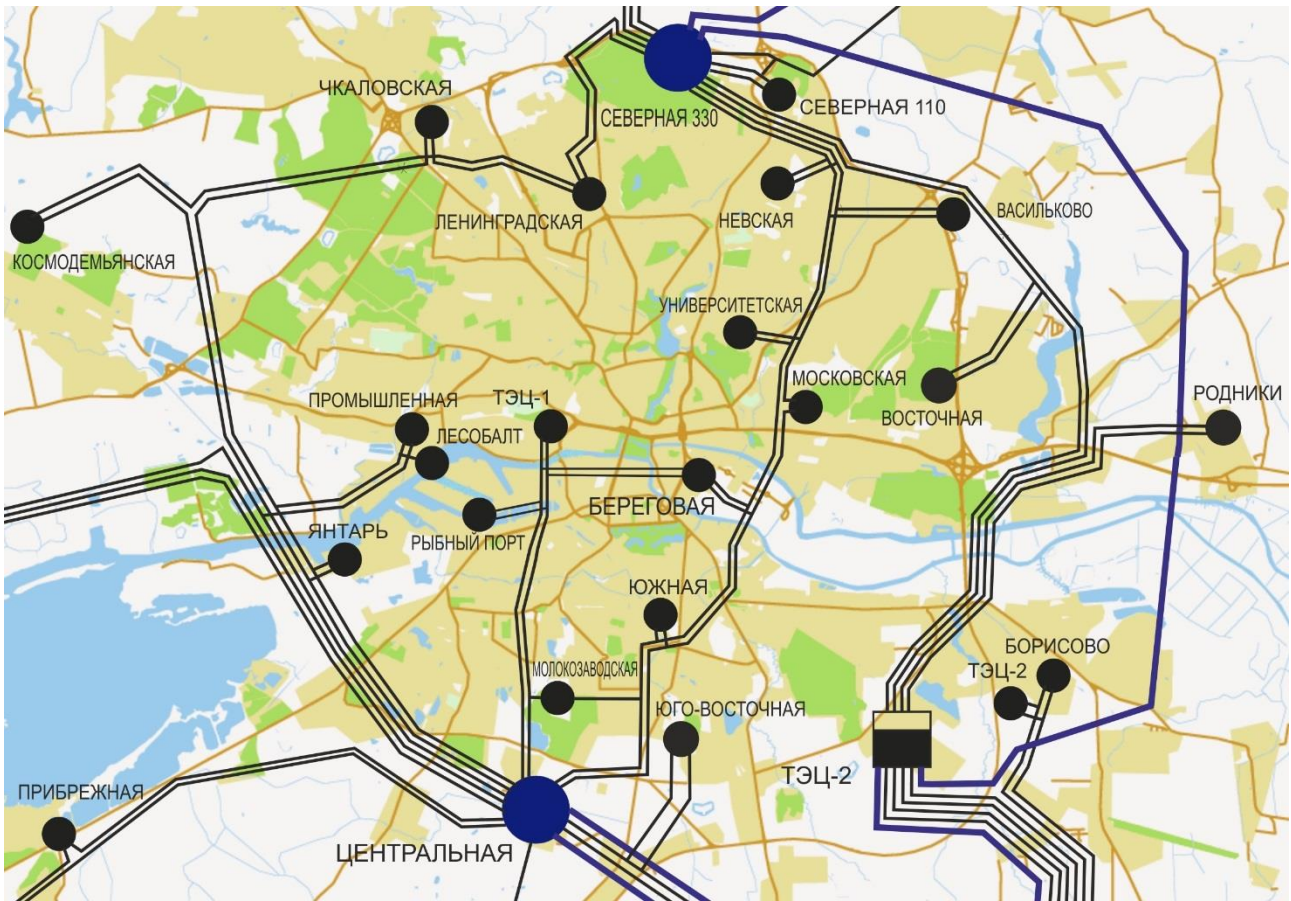


Рисунок 2 – Схема расположения подстанций и линий 110 кВ на территории г. Калининграда

Проведенный анализ технической и отчетной документации показал, что на данный момент большая часть оборудования и кабельных линий системы электроснабжения г. Калининграда изношена, что вызывает снижение надежности электроснабжения потребителей. По результатам обследования АО "Янтарьэнерго" установлен низкий уровень наблюдаемости и автоматизации распределительной сети 0,4-10 кВ, что приводит к длительным срокам ликвидации технологических нарушений. Значительное количество оборудования исчерпало нормативный срок службы (рис. 3), что также снижает надежность электроснабжения потребителей и повышает риски возникновения аварийных ситуаций [4].

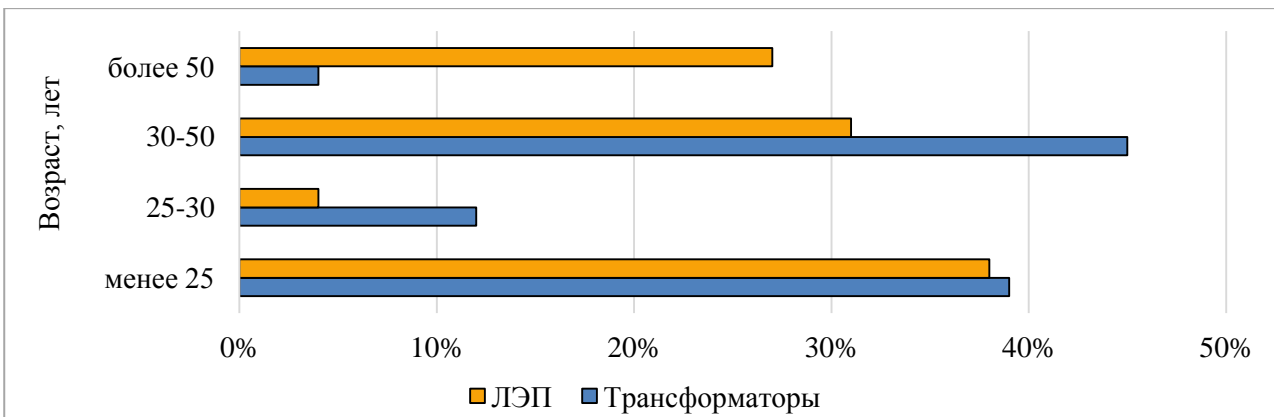


Рисунок 3 – Возрастная структура трансформаторов и ЛЭП напряжением 110 кВ

Характерной особенностью электрической сети 6 кВ является её радиальное строение практически без возможности резервирования питания потребителей, а также связь с сетью 10 кВ через ограниченное количество (5 шт.) автотрансформаторов 10/6 кВ собственного

производства (рис. 4). Географическое покрытие сети 6 кВ – Центральный и частично Московский районы, что занимает примерно 25% от общей площади города. В распределительной сети низкого напряжения наряду с сетями 0,4 кВ используются сети 0,23 кВ довоенной постройки, которые также являются слабым местом с позиции обеспечения надежного электроснабжения потребителей.

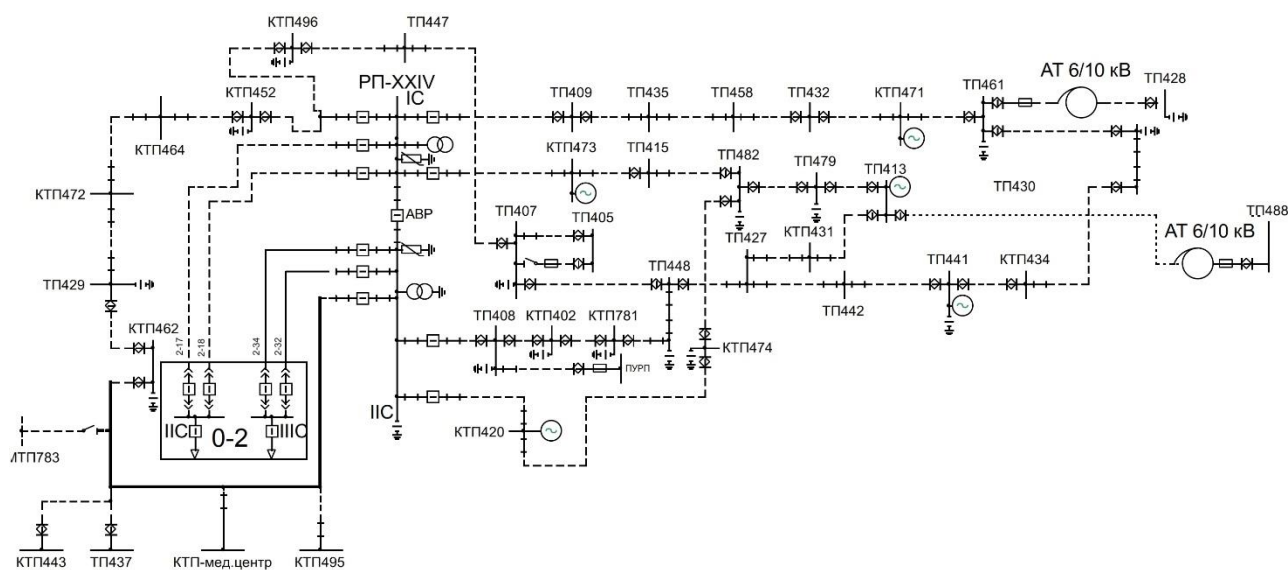


Рисунок 4 – Фрагмент электрической сети 6 кВ системы электроснабжения г. Калининграда

Наряду с электросетевыми объектами, находящимися на балансе и в оперативном управлении АО «Янтарьэнерго», в распределительной сети присутствуют и абонентские подстанции (примерно 30% от общего количества). При этом образуется «лоскутность» сети с объектами, не находящимися в оперативном ведении предприятия городских электрических сетей, что также усложняет процесс оперативно-технологического управления.

На основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод о невозможности эффективного внедрения САВС для повышения надежности системы электроснабжения г. Калининграда без технического перевооружения элементов распределительной сети. В первую очередь проведение технических мероприятий требуется для обеспечения технической надежности. В частности, эксплуатируемые на большинстве подстанций масляные выключатели являются морально устаревшим оборудованием и не отвечают современным требованиям к надежности (табл. 2), а применение изолированных и защищенных проводников воздушных линий вместо неизолированных на напряжениях 0,4-10 кВ позволяет существенно снизить частоту отказов [5]. Вторым определяющим фактором является то, что первичное оборудование сетей и подстанций должно удовлетворять техническим требованиям и поддерживать выполнение соответствующего функционала вторичных систем при внедрении элементов интеллектуальной сети, в частности САВС.

Таблица 2 – Показатели надежности коммутационных аппаратов и проводников 10 кВ

Вид элемента электрической сети	Выключатели		Провода ВЛ	
	Масляный	Вакуумный	Неизолир.	СИП-3
Тип элемента электрической сети				
Параметр потока отказов $\omega$ , 1/год	0,009	0,004	-	-
Удельная частота отказов, $\lambda_0$ , 1/год·км	-	-	0,54	0,034
Среднее время восстановления $T_{\text{в}}$ , ч	20	8	4,3	4,3
Частота плановых ремонтов $\mu_{\text{п}}$ , 1/год	0,14	0,1		
Удельная частота преднамеренных отключений, $\lambda_{\text{п}}$ , 1/год·км	-	-	0,12	0,023
Среднее время обслуживания $\tau_{\text{п}}$ , ч	20	15	5	5



Разумеется, одновременное выполнение модернизации всех электросетевых объектов и информационной инфраструктуры с реализацией полнофункциональной интеллектуальной электрической сети с учетом специфики системы электроснабжения г. Калининграда представляется маловероятным и экономически необоснованным. В этой связи целесообразно рассмотреть возможность поэтапной реализации необходимого комплекса мероприятий. Для создания информационной основы для внедрения САВС на начальном этапе необходимо произвести работы по модернизации систем релейной защиты и телемеханики и оснастить подстанции 6-10 кВ интеллектуальными устройствами индикации токов короткого замыкания с передачей информации в диспетчерские центры.

На промежуточном этапе целесообразно провести мероприятия по частичной модернизации и автоматизации подстанций в точках нормального разрыва, что при соответствующей информационной инфраструктуре уже позволит реализовать САВС на уровне сложнозамкнутых систем электроснабжения. На завершающем этапе выполняется автоматизация промежуточных пунктов секционирования и оставшихся подстанций системы электроснабжения города.

Помимо рационального использования материальных и трудовых ресурсов предложенный подход к поэтапной реализации САВС позволяет к моменту начала интенсивной модернизации подстанций (завершающий этап) уже обзавестись определенным опытом проектных и технических работ по внедрению систем автоматики и контроля с учетом специфики существующей системы электроснабжения г. Калининграда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бандурин, И.И. Математическая модель для городских электрических сетей 6-35кВ, позволяющая создать рациональную систему электроснабжения с заданной надежностью / И.И. Бандурин, О.А. Чернова // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки. – 2013. – №3. – С. 109-123.
2. Дорофеев, И.Н. Применение технологий IEC 61850 на основе алгоритма FLISR // Автоматизация в IT и энергетике. – 2018. – №11. – С. 5-8.
3. Воротников, И.Н. Надежность радиальной схемы распределительной сети с секционированием / И.Н. Воротников, И.В. Данченко // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – №07. – 12 с.
4. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2018 – 2022 годы.
5. Долецкая, Л.И. Оценка эффективности методов повышения надежности распределительных электрических сетей / Л.И. Долецкая, В.П. Кавченко, Р.В. Солопов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – № 6. – 13с.

#### SOME ASPECTS OF URBAN ELECTRIC NETWORKS RELIABILITY IMPROVEMENT ON THE EXAMPLE OF KALININGRAD CITY

A.A. Faustov, Kaliningrad State Technical University, student, faust0v.a@yandex.ru  
M.S. Kharitonov, Kaliningrad State Technical University, PhD in Engineering, associate professor  
engineeringlifestyle@gmail.com

The paper concerns the analysis of the Kaliningrad city power supply system from the reliability standpoint. The authors consider main organizational and technical measures and propose to improve the reliability of consumer power supply in the urban electrical networks through the introduction of the fault location, isolation, and service restoration system

*power supply system, city, electrical network, cable line, reliability, undersupply of electricity, automatic service restoration system*