

УДК 620.424.1  
ГРНТИ 44.29.31

## **ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО СЕКЦИОНИРОВАНИЯ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ВОЗДУШНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6(10) кВ**

**Иванов Дмитрий Михайлович**

старший преподаватель

кафедры электрооборудования сельскохозяйственных предприятий  
Белорусский государственный аграрный технический университет  
Республика Беларусь, г. Минск

**Аннотация:** в статье рассмотрен вопрос повышения надежности электроснабжения потребителей воздушной распределительной сети 6(10) кВ посредством применения автоматического секционирования. Приведены показатели надежности электроснабжения, которые используются в мировой практике энергоснабжающими организациями. Более подробно рассмотрены показатели надежности электроснабжения Республики Беларусь, выполнено их сравнение и для наглядности построены графические зависимости. В основной части рассмотрен вопрос повышения надежности электроснабжения за счет применения пунктов секционирования, проведено обоснование замены ручного секционирования на автоматическое (децентрализованное). Рассмотрена конструкция вакуумных реклоузеров. Проанализированы их параметры и представлена классификация, на основании которой выполнена структурная схема. Указаны преимущества применения SCADA-систем. Представлена однолинейная схема полевого уровня децентрализованного принципа секционирования на базе современных аппаратных решений для наблюдаемости и управляемости воздушной распределительной сети 6(10) кВ. Представлены возможные алгоритмы функционирования реклоузеров, которые используются для реализации децентрализованного управления аварийными режимами работы распределительных сетей. Для обеспечения наиболее эффективной работы автоматического секционирования представлены основные критерии оптимизации на основании, которых определяется оптимальное место установки реклоузеров в распределительную сеть 6(10) кВ.

**Ключевые слова:** надежность, электроснабжение, потребитель, реконструкция, автоматическое секционирование, воздушная распределительная сеть, пункт секционирования, реклоузер, однолинейная схема, радиальная линия, комплектное распределительное устройство, релейная защита, выключатель нагрузки, автоматический разъединитель, автоматическое включение резерва, автоматическое повторное включение, модуль коммутации.

## **APPLICATION OF AUTOMATIC SECTIONING TO INCREASE RELIABILITY OF POWER SUPPLY TO CONSUMERS OF 6(10) kV OVERHEAD DISTRIBUTION NETWORK**

**Ivanov Dmitry Mikhailovich**

Senior Lecturer at the Department of Electrical Equipment of Agricultural Enterprises  
Belarusian State Agrarian Technical University  
Belarus, Minsk

**Abstract:** the article considers the issue of increasing the reliability of power supply to consumers of the 6(10) kV overhead distribution network through the use of automatic sectioning. The indicators of power supply reliability, which are used in world practice by power supply organizations, are given. The reliability indicators of power supply of the Republic of Belarus are

considered in more detail, their comparison is made and graphic dependences are constructed for clarity. In the main part, the issue of increasing the reliability of power supply through the use of sectioning points is considered, a rationale is given for replacing manual sectioning with automatic (decentralized) sectioning. The design of vacuum reclosers is considered. Their parameters are analyzed and a classification is presented, on the basis of which a block diagram is made. The advantages of using SCADA systems are indicated. A single-line diagram of the field level of a decentralized sectioning principle based on modern hardware solutions for the observability and controllability of a 6(10) kV overhead distribution network is presented. Possible algorithms for the functioning of reclosers are presented, which are used to implement decentralized control of emergency modes of operation of distribution networks. To ensure the most efficient operation of automatic sectioning, the main optimization criteria are presented on the basis of which the optimal location for installing reclosers in a 6 (10) kV distribution network is determined.

**Keywords:** reliability, power supply, consumer, reconstruction, automatic sectioning, overhead distribution network, sectioning point, recloser, single-line diagram, radial line, complete switchgear, relay protection, load switch, automatic disconnecter, automatic switching of the reserve, automatic reclosing, switching module.

В системе электроснабжения наиболее уязвимым участком являются воздушные распределительные сети (ВРС) 6(10) кВ. Общая протяженность данной распределительной сети на территории Республики Беларусь составляет около 200 тыс. км, а это практически 80% от протяженности электрических сетей всей системы электроснабжения.

ВРС среднего напряжения 6(10) кВ является заключительным этапом на пути электрической энергии к потребителю. Данные распределительные сети передают и распределяют электроэнергию по всем сельскохозяйственным и производственным объектам. Все потребители заинтересованы в надёжности и качестве электроснабжения, но статистика показывает, что 70 % от всех нарушений электроснабжения приходится именно на сети среднего напряжения 6(10) кВ, при этом повреждение любого участка данной ВРС влечет за собой проблемы с надёжностью электроснабжения всех потребителей. Даже незначительный перерыв в электроснабжении может нанести невосполнимый ущерб сельскохозяйственным и производственным объектам.

Основной задачей при эксплуатации распределительной электрической сети является обеспечение надёжного и качественного электроснабжения потребителей при наименьших материальных, трудовых и денежных затратах [1].

На сегодняшний день во всем мире организации, которые отвечают за распределение электрической энергии, стараются прилагать максимальные усилия для повышения надёжности электроснабжения потребителей, а для этого решаются проблемы перебоев в работе электрической сети. В качестве показателей надёжности электроснабжения все энергоснабжающие организации измеряют индексы надёжности IEEE (Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике). Этими индексами являются:

SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) — это индекс, характеризующий среднюю частоту отключений в энергосистеме. По результатам данного показателя можно сделать заключение насколько часто потребители испытывают перерыв в электроснабжении за определенный период времени.

Для расчета индекса используется следующее выражение:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{\Sigma N_t}, \quad (1)$$

где:  $i$  — число перерывов, от 1 до  $n$ ;

$N_i$  — число потребителей в системе, где был перерыв в электроснабжении ( $i$ );

$N_t$  — общее количество потребителей в системе.

SAIFI измеряется в количестве отключений на потребителя. Данные предоставляются электrorаспределительными организациями и национальными регулирующими органами за календарный год. При расчетах значений SAIFI должны учитываться плановые и внеплановые отключения, а также отключения для сброса пиковых нагрузок. Страна не может получить баллы по данному индексу, если перебои и отключения являются слишком частыми либо чересчур продолжительными, чтобы считать такое электроснабжение надежным.

SAIDI (System Average Interruption Duration Index) – это индекс, который показывает среднюю величину продолжительности перерывов электроснабжения на одного потребителя в год или является отношением общей продолжительности длительных ежегодных перерывов в электроснабжении к общему количеству потребителей.

Для расчета индекса используется следующее уравнение:

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \cdot N_i}{N_t}, \quad (2)$$

где:  $U_i$  - годовое время перерыва в электроснабжении в часах;

$N_i$  - количество потребителей в системе;

$N_t$  — общее количество потребителей в системе.

CAIDI (индекс средней продолжительности отключения одного потребителя) – определяется отношением общей продолжительности длительных внеплановых нарушений электроснабжения потребителей к количеству потребителей, отключенных хотя бы от одного такого нарушения за рассматриваемый отчетный период времени.

$$CAIDI = \frac{\sum U_i \cdot N_i}{\lambda_i \cdot N_i}, \quad (3)$$

где:  $U_i$  - годовое время перерыва в электроснабжении в часах;

$N_i$  - количество потребителей в системе;

$\lambda_i$  - частота отказов.

В свою очередь методика оценки эффективности реконструкции ВРС выражается в показателях RNRE (Relative Network Reconstruction Efficiency) (относительная эффективность реконструкции сети):

$$RNRE = 1 - \frac{SAIFI}{SAIFI(0)}, \quad (4)$$

где:  $SAIFI$  – индекс до реконструкции;

$SAIFI(0)$  - индекс после реконструкции.

Показатель  $RNRE$  характеризует, насколько улучшился  $SAIFI$  после реконструкции (в долях от начального значения  $SAIFI$ )

ARIE (Average Reconstruction Investment Efficiency) (средняя эффективность инвестиций на реконструкцию):

$$ARIE = \frac{INV}{RNRE}, \quad (5)$$

Выражение (5) характеризует, сколько требуется вложить инвестиций в реконструкцию для увеличения  $RNRE$  на 1-ну о.е.

В энергосистеме Республики Беларусь надёжность электроснабжения так же оценивается по общемировой практике, отталкиваясь от данных показателей надёжности электроснабжения. Особенно внимание этим показателям начали уделять с введением 1 сентября 2017 года в действие технического кодекса установившейся практики ТКП 609-2017 «Автоматизация распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ» [2].

На основе введенного в действие ТКП 609-2017 была внедрена единая классификация перерывов в электроснабжении, а так же налажен учет показателей непрерывности электроснабжения SAIFI, SAIDI, CAIDI. По предоставленным данным С в 2018 году по Минску индексы составили: SAIFI – 0,478; SAIDI – 0,507 часа; CAIDI – 1,06 часа. Эти же показатели по Беларуси составили: SAIFI – 0,876; SAIDI – 1 час; CAIDI – 1,14 часа. Показатели по РУП-облэнерго за февраль 2022 г представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Индексы надежности электроснабжения по РУП-облэнерго за февраль 2022г

Индексы надежности электроснабжения по РУП-облэнерго за февраль 2022г	SAIFI	SAIDI,ч	CAIDI,ч
Брестэнерго	0,052	0,048	0,92
Витебскэнерго	0,0377	0,0392	1,04
Гомельэнерго	0,0761	0,0575	0,76
Гродноэнерго	0,0568	0,1079	1,8
Минскэнерго	0,0563	0,0656	1,16
Могилевэнерго	0,0178	0,0147	0,82
ГПО Белэнерго	0,0519	0,0578	1,11

Для наглядности изобразим индексы надежности электроснабжения по РУП-облэнерго за февраль 2022г в виде графических зависимостей (рисунок 1-3):

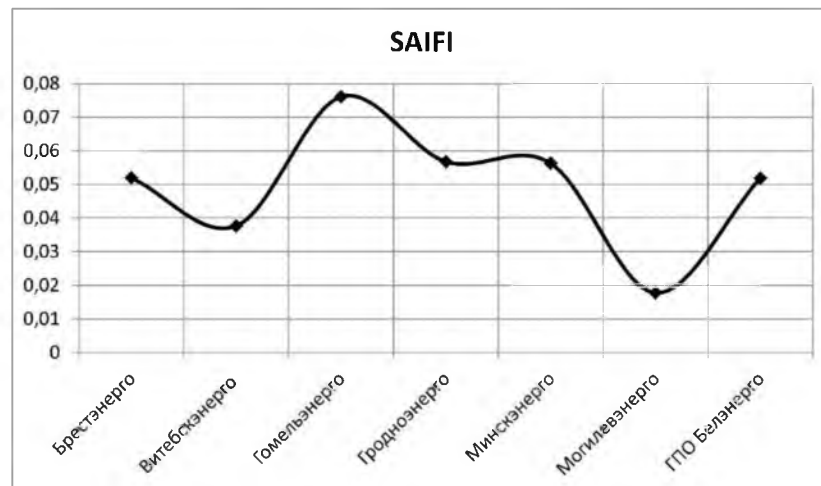


Рисунок 1 - Индекс частоты возникновения перебоев в системе (SAIFI)

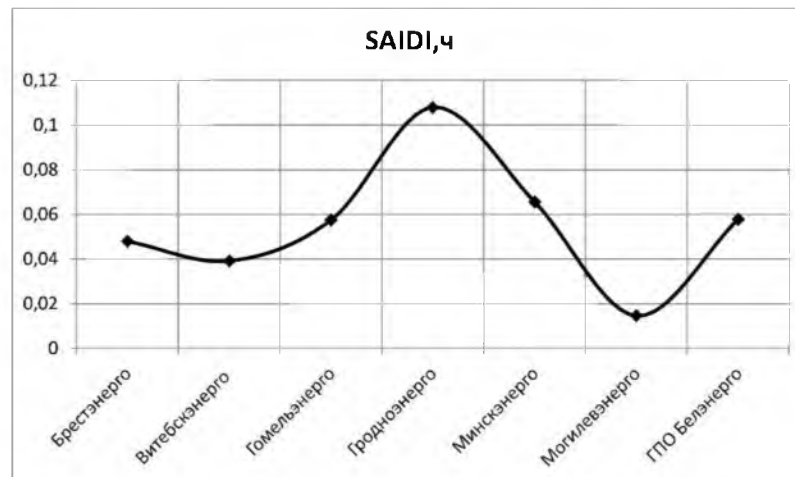


Рисунок 2 - Индекс средней продолжительности перебоев в системе (SAIDI)

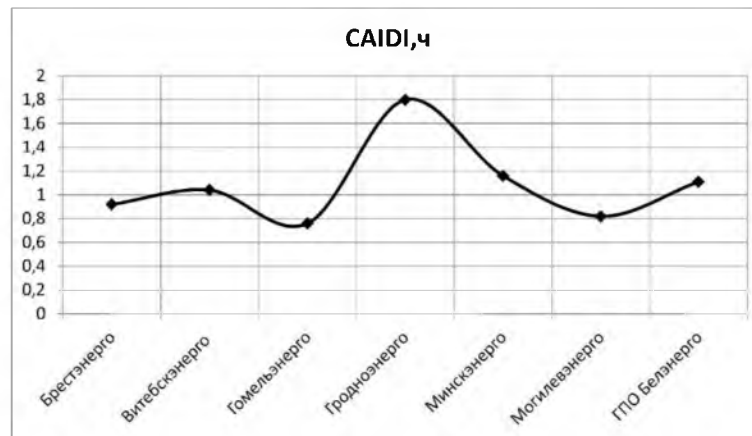


Рисунок 3 - Индекс средней продолжительности отключения потребителей (CAIDI)

Следует отметить, что чем меньше значения SAIFI, SAIDI, CAIDI, тем выше уровень надежности электроснабжения.

Для повышения надежности электроснабжения на современном этапе целесообразно использовать пункты секционирования. При помощи секционирования возможно реализовать разделение воздушной линии (ВЛ) на отдельные участки, что позволяет обеспечить возможность выделения аварийного места. Для реализации секционирования ВЛ на магистрали устанавливаются линейные разъединители или пункты секционирования на базе ячеек КРУН. В такой схеме есть серьёзные недостатки, проявляющиеся в том, что сетевой резерв выполняется вручную. При возникновении повреждения на любом участке происходит отключение защитного аппарата на отходящей ВЛ и все потребители на длительное время теряют электроснабжение. Для поиска места повреждения задействуется оперативная бригада и путем переездов, переключений разъединителей вручную происходит выделение аварийного участка и восстановление электроснабжения потребителей. При реализации такого вида секционирования задействуется большое количество техники и персонала. Следует отметить, что уровень надёжности электроснабжения в данном случае не позволяет достичь высокого результата [3,4].

Многokратно ускорить этап поиска повреждений на ВРС и значительно увеличить надёжность электроснабжения позволяет замена ручного секционирования на автоматическое. Данную систему секционирования называют децентрализованной. Сегодня наиболее перспективными средствами автоматического секционирования ВЛ 6(10) кВ являются вакуумные коммутационные аппараты, оснащенные устройствами релейной защиты, автоматики и телемеханики — реклоузеры. Данные коммутационные аппараты под управлением специализированного микропроцессора представляют собой новое поколение коммутационного оборудования, объединившее в себе передовые технологии микропроцессорной релейной защиты и автоматики (РЗА), а так же коммутационной техники. В данных коммутационных аппаратах кроме защитных и противоаварийных функций защиты ВЛ имеются дополнительные функции мониторинга и учета характеристик, а так же параметров электросетей [5,6].

Конструкция вакуумного реклоузера представляет собой следующие основные элементы: модуль коммутации, шкаф управления с микропроцессорной РЗА. Шкаф управления связан с модулем коммутации соединительным кабелем. Параметрирование шкафа управления и просмотра необходимой информации накопленной реклоузером, а так же ввод уставок РЗА осуществляется при помощи специального программного обеспечения [7,8].

Классификация автоматических пунктов секционирования (реклоузеров) представлена на (рисунке 4).

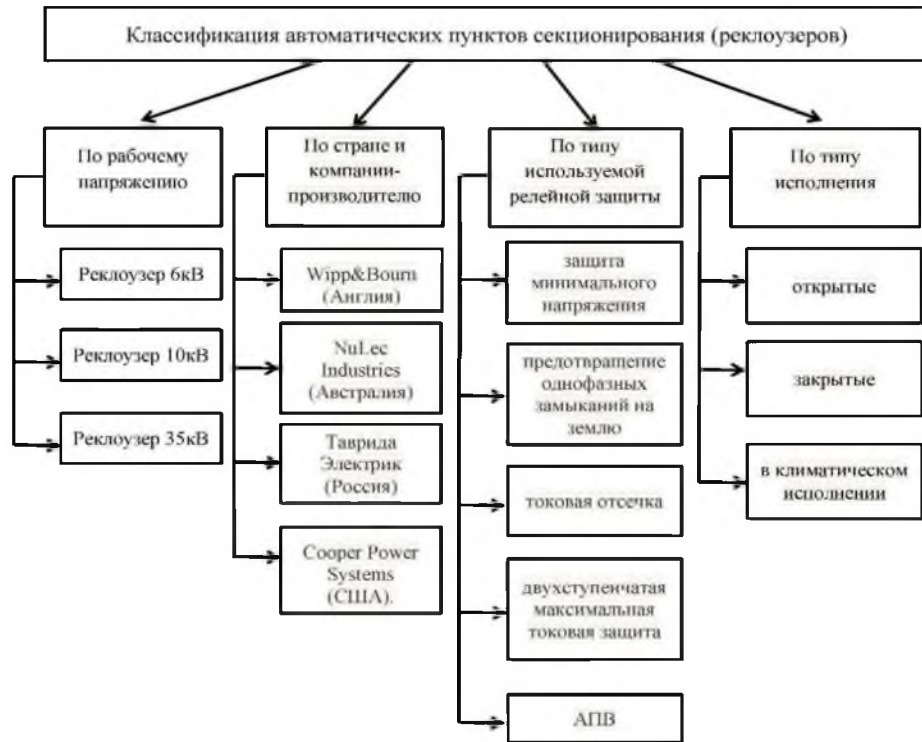


Рисунок – 4 Классификация автоматических пунктов секционирования (реклоузеров)

Принцип работы децентрализованного метода секционирования (рисунок 5) заключается в следующем: при помощи реклоузеров ВЛ делятся на отдельные участки, на каждом из которых устанавливается интеллектуальное устройство, которое в реальном времени анализирует параметры работы сети и при необходимости выполняет её реконфигурацию, т.е. локализацию поврежденного участка и автоматическое восстановление электроснабжения потребителей на неповреждённых участках согласно установленным программным алгоритмам. В отличие от ручного управления сетевым резервом, в данном случае исключается необходимость дистанционного поиска повреждения — всё это выполняется по месту работы реклоузера посредством микропроцессорного контроля. Благодаря наличию реклоузера электрическая сеть может быть полностью в автономном режиме, реагируя на внешние воздействия. При возникновении аварийной ситуации, повреждения какого-либо участка сети, реклоузер отключает его и распределяет нагрузку по другим линиям, тем самым сохраняя энергоснабжение других потребителей.

Самым перспективным и наиболее совершенным способом дистанционного управления реклоузером является применение его в различных SCADA –системах. Данные системы представляют собой системы телемеханики, позволяющие визуализировать объекты энергосистемы на едином диспетчерском центре. С данного центра осуществляется управление и параметрирование этими объектами. Наличие этих систем для выполнения базовых функций не требуется, поскольку на базе реклоузера реализуется децентрализованное автоматическое секционирование линий.

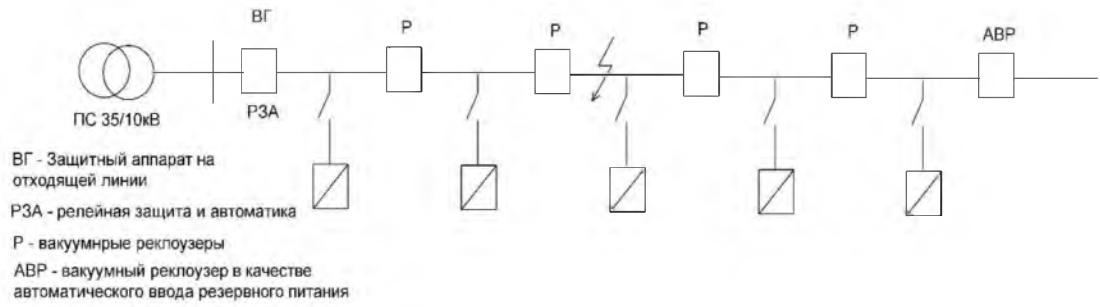


Рисунок 5- Децентрализованный принцип секционирования линий

Однолинейная схема полевого уровня децентрализованного принципа секционирования на базе современных аппаратных решений для наблюдаемости и управляемости ВРС 6(10) кВ представлена на рисунке 6.

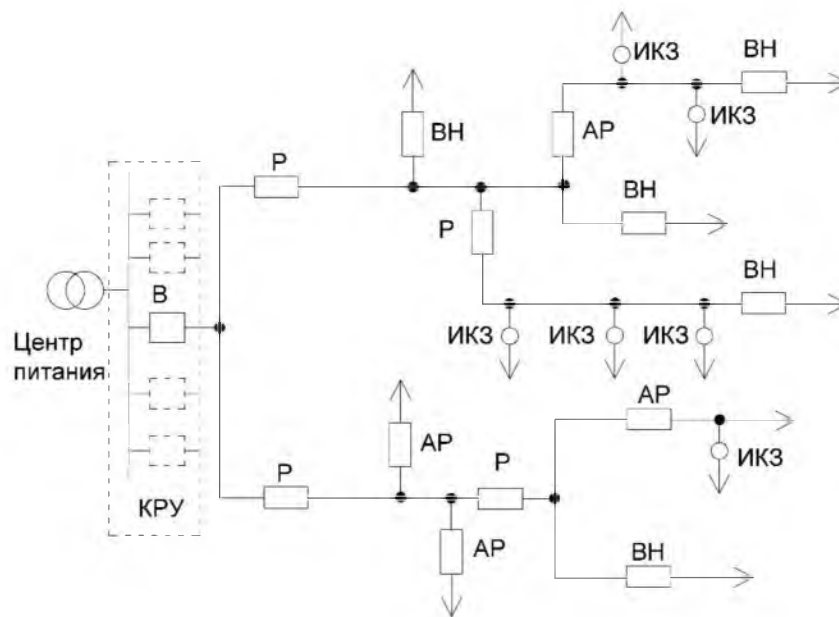


Рисунок 6- Полевой уровень аппаратных решений для наблюдаемости и управляемости ВРС 6(10) кВ

Кроме реклоузеров (Р) в схеме присутствует комплектное распределительное устройство (КРУ) функциональные возможности которого позволяют не только принимать и распределять электрическую энергию, но и обнаруживать, а так же устранять режимы короткого замыкания (КЗ). Выключатель нагрузки (ВН) осуществляет защиту и автоматизацию работы сети: секционирование сети, выделение аварийного участка максимально близко к месту аварии. Автоматический разъединитель (АВР) создает видимый разрыв в цепи. Индикатор короткого замыкания (ИКЗ) осуществляет индикацию аварии на участке сети, что ускорят поиск поврежденного участка.

Возможны различные алгоритмы функционирования реклоузеров для организации децентрализованного управления аварийными режимами работы распределительных сетей.

При выполнении секционирования радиальной ВЛ с односторонним питанием (рисунок 7) реклоузеры устанавливаются на магистральном участке [9]. Сетевой резерв при этом не реализуется, а при возникновении повреждения отключается ближайший к месту повреждения реклоузер и обесточивает нижестоящий участок сети.

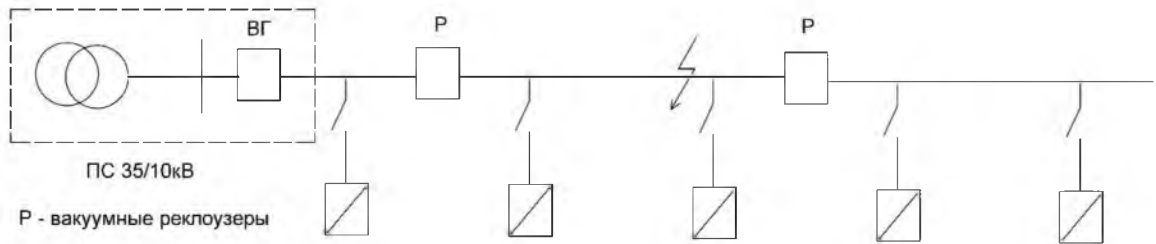


Рисунок 7- Алгоритм секционирования радиальной линии с односторонним питанием

При выполнении секционирования радиальной линии с двухсторонним питанием (рисунок 8) дополнительно к реклоузеру на магистрали устанавливается еще один в качестве пункта автоматического включения резерва (АВР). При возникновении на одном из участков повреждения автоматически будет отключен ближайший коммутационный аппарат. В случае исчезновения напряжения автоматически включится реклоузер, работающий как пункт АВР.

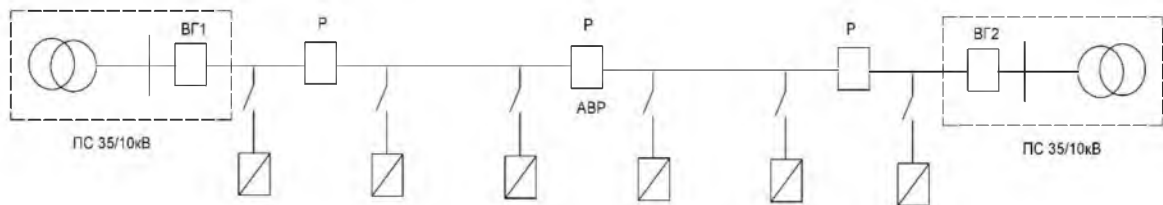


Рисунок 8- Алгоритм секционирования радиальной линии с двухсторонним питанием

Эффективность секционирования радиальной линии обусловлена тем, что при этом появляется возможность автоматической локализации повреждения в пределах одного локального участка и автоматической подачи резервного питания остальным потребителям. Следует отметить, что рассматриваемый вариант реализации децентрализованного принципа секционирования позволяет выполнить оптимальное резервирование потребителей. В данных схемах секционирования АВР позволяет обеспечить восстановление питания потребителей всего фидера при отключении центра питания.

Кроме вышесказанного следует отметить, что немаловажным вопросом является определение оптимального места установки реклоузеров в линии. Для наиболее эффективной работы автоматического секционирования необходимо определить критерии оптимизации. Целью оптимизации является минимизация показателя сети в целом после установки реклоузеров. Рассмотрим эти показатели более подробно [10].

Суммарный годовой недоотпуск электрической энергии ( $\Delta W_{HO}$ ):

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot T \cdot L \cdot S_{НОМ} \cdot \cos \varphi \cdot K_3, \quad (6)$$

- где  $\Delta W_{HO}$  – годовой недоотпуск электроэнергии (кВтч/год);
- $\omega_0$  – удельная частота повреждений ВРС 6(10) кВ (1/на 100км в год);
- T - среднее время восстановления одного устойчивого повреждения (ч);
- L – длина участка линии (км);
- $S_{НОМ}$  - номинальная мощность трансформатора потребительской подстанции (кВА);
- $\cos \varphi$  – коэффициент мощности;
- $k_3$  – коэффициент загрузки.



Вторым показателем будет являться количество и длительность отключений потребителя ( $\omega_n, T_n$ )

При этом учитывается, если необходимо повысить надежность электроснабжения потребителей адресно, то под целевой функцией будет выступать минимизация показателей только в отношении одного потребителя или же группы потребителей. Показатели будут рассчитываться отдельно для потребителей в пределах одного участка по следующим выражениям:

$$\omega_n = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot L, \quad (7)$$

где  $\omega_n$  – количество отключений потребителя в год(1/год);  
 $\omega_0$  – удельная частота повреждений ВЛ 10(6) кВ (1/на 100км в год);  
 $L$  – длина участка линии (км).

$$T_n = \omega_n \cdot T \quad (8)$$

где  $T_n$  – длительность отключений потребителя в год (ч/год);  
 $\omega_n$  – количество отключений потребителя в год(1/год);  
 $T$  – среднее время восстановления одного устойчивого повреждения (ч).

При наличии автоматического повторного включения (АПВ) сети в расчетные формулы показателей надежности вводится коэффициент  $k_{ny}$ .

При этом выражения, используемые для расчета показателей надежности, примут вид:

$$\Delta W_{HO} = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{ny}) \cdot T \cdot L \cdot S_{НОМ} \cdot \cos \varphi \cdot K_3, \quad (9)$$

$$\omega_n = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{ny}) \cdot L, \quad (10)$$

где  $k_{ny}$  – коэффициент, который учитывает влияние децентрализованной системы секционирования на количество аварийных отключений в ВРС 6(10) кВ.

При расчетах коэффициент  $k_{ny}$  может принимать разные значения в зависимости от следующих условий:

- если в сети, где устанавливается реклоузер, уже имеется АПВ или циклы АПВ на реклоузерах равны циклам АПВ на головном выключателе, тогда  $k_{ny}=0$ ;
- если на реклоузере реализовано двухкратное АПВ, а головное устройство имеет однократное, тогда  $k_{ny}=0,2$ ;
- при реализации на реклоузере трехкратного АПВ, тогда  $k_{ny}=0,25$ .

По статистке в зависимости от выбранного способа автоматического секционирования ВРС суммарный годовой недоотпуск электрической энергии уменьшается на 70-90%. Это означает, что надежность электроснабжения в сравнении с ручным секционированием значительно повышается.

Подводя итог, хотелось бы отметить, что применение децентрализованного автоматического секционирования линий позволяет значительно повысить надежность электроснабжения как по сети в целом, так и индивидуальных потребителей. Так же немаловажным является внедрение адресного повышения надежности отдельных потребителей, тем самым повышая их эффективность.

#### Список литературы:

1. Иванов, Д. М. Повышение надежности электроснабжения потребителей посредством применения современных технических решений на основе микропроцессорных терминалов с делительной автоматикой на стороне 10 кВ / Д. М. Иванов // Эпоха науки. – 2022. – № 29. – С. 40-45. – EDN OJLNQW.

2. Автоматизация распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ. ТКП 609-2017 (33240) – Введ. 01.09.2017. – Минск: Утверждено Постановлением Министерства энергетики Республики Беларусь от 22.06.2017 № 20
3. Немировский, А. Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А. Е. Немировский, И. Ю. Сергиевская, Л. Ю. Крепышева. — 4-е изд., доп. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. — 174 с. — ISBN 978-5-9729-0404-4.
4. Волков Н.Г. Надежность электроснабжения: учебное пособие / Н.Г. Волков, А.А. Сивков, А.С. Сайгаш. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 160 с.
5. Лещинская Т.Б. Электроснабжение сельского хозяйства/ Лещинская Т.Б., Козлов А.В. — М.: Колос, 2007. — 538 с.
6. Бузин С.А. Современная релейная защита и автоматика для целей автоматизации воздушных электрических сетей 6-10 кВ / С.А. Бузин, В.В. Воротницкий // СПб: ООО «РК Таврида Электрик», 2010, 4 с.
7. Захаров, О. Г. Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки / О.Г. Захаров. - М.: Инфра-Инженерия, 2014. - 294 с.
8. Шнеерсон Э. М. «Цифровая релейная защита» — М.: Энергоатомиздат, 2007. — 549с.: ил.
9. Булычев, А. В. Релейная защита электроэнергетических систем: учебное пособие / А. В. Булычев, В. К. Ванин, А. А. Наволочный, М. Г. Попов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 211 с.
10. Б.К. Максимов, В.В. Воротницкий «Оценка эффективности автоматического секционирования воздушных распределительных сетей 6(10) кВ с применением реклоузеров с целью повышения надежности электроснабжения потребителей» // Электротехника.- 2005.- N 10.

