

УДК 621.311.13

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ НАХОЖДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТОЧЕК РАЗМЫКАНИЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ 10 КВ

Гославский П.С

Научный руководитель – к.т.н, доц. Петруша Ю.С.

Величина потерь в электрических сетях (ЭС) позволяет оценить эффективность работы сети, проанализировать структуру потерь, выявить причины и разработать организационно-технические мероприятия по их снижению. В данной статье под потерями в ЭС следует понимать технологический расход электроэнергии на ее транспортировку (ТРЭТ) по электрическим сетям. Понятие и определение потерь приведены в ТКП [4] и инструкциях по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Условно ТРЭТ можно разделить на:

1) Отчетные потери – это разность между количеством поступившей эклектической энергии (ЭЭ) в сеть и количеством отпущенной из сети, определяемая по данным приборов учета электрической энергии [5 с. 63].

2) Технологические потери включают в себя:

а) технические потери ЭЭ, обусловленные физическими процессами в проводниках и электрооборудовании при передаче ЭЭ;

б) потери, образуемые допустимыми погрешностями систем учета ЭЭ;

в) расход ЭЭ на собственные нужды подстанций.

3) Коммерческие потери, обусловленные хищениями электроэнергии, несоответствием показаний счетчиков оплате за электроэнергию бытовыми потребителями и другими причинами в сфере организации контроля за потреблением энергии. Их значение определяют, как разницу между отчетными потерями и суммой технологических потерь:

Далее будем рассматривать лишь технологические потери ЭЭ и способы их снижения для повышения энергоэффективности ЭЭС. Их можно представить следующими структурными составляющими:

1) Нагрузочные потери в оборудовании подстанций. К ним относятся потери в линиях и силовых трансформаторах, а также потери в измерительных трансформаторах тока, высокочастотных заградителях ВЧ-связи и токоограничивающих реакторах. Все эти элементы включаются в "рассечку" линии, т.е. последовательно, поэтому потери в них зависят от протекающей через них мощности.

2) Потери холостого хода, включающие потери в электроэнергии в силовых трансформаторах, компенсирующих устройствах (КУ), трансформаторах напряжения, счетчиках и устройствах присоединения ВЧ-связи, а также потери в изоляции кабельных линий.

3) Климатические потери, включающие в себя два вида потерь: потери на корону и потери из-за токов утечки по изоляторам ВЛ и подстанций. Оба вида зависят от погодных условий.

Процесс снижения потерь – это оптимизация режима электрической сети. Их оптимизируют при эксплуатации и при проектировании сети. В условиях эксплуатации мероприятия по снижению потерь называются организационными (они не связаны с дополнительными капитальными вложениями), а при проектировании - в основном технические мероприятия, которые требуют дополнительных капитальных вложений.

### **Организационные мероприятия по снижению потерь в электрических сетях**

Для снижения технологических потерь используются следующие методы:

1. Выравнивание суточного графика нагрузки. Проводится путем стимулирования потребителя снижать использование ЭЭ в часы пиков нагрузки и использовать энергию в периоды минимумов нагрузки.

2. Повышение уровня рабочего напряжения. Ведет к снижению потерь активной мощности, но ограничивается допустимым уровнем напряжения изоляции. В сетях 220 кВ и выше также рассматривается целесообразность повышения напряжения, так как при повышении напряжения возрастают потери на корону.

3. Оптимизация режимов трансформаторов на подстанциях. При различных сезонных нагрузках трансформаторы на ПС могут быть отключены, тем самым снижаются потери на холостой ход трансформаторов  $\Delta P_{xx}$ , а нагрузочные потери возрастают незначительно.

4. Разработка обоснованных норм потребления на выработку единицы продукции. Основная задача нормирования потребления ЭЭ – обеспечение применения в производстве и при планировании технически- и экономически обоснованных прогрессивных норм расхода ЭЭ для рационального распределения энергоресурсов и наиболее эффективного их использования.

5. Быстрый и надежный ремонт сети. Снижает время до наступления оптимального режима сети до аварии.

6. Определение оптимальных мест размыкания электрической сети. В сетях 220 кВ и выше оптимизируют режимы по напряжению  $U$ , реактивной мощности  $Q$  и коэффициенту трансформации  $n$ . Так как эти сети выполняются замкнутыми и работают в замкнутом режиме по ним протекают уравнивающие мощности  $S_{ур}$ , и путем выбора оптимального коэффициента трансформации в силовых трансформаторах с РПН достигается компенсация  $S_{ур}$  в контуре.

Электрические сети 6 – 10 кВ (городские) и сети 35 – 110 кВ часто выполняются замкнутыми, но работают в нормально разомкнутом режиме. Они на своих участках имеют разное сечение проводов и являются неоднородными. В замкнутой неоднородной сети протекают уравнивающие мощности и естественное потокораспределение отклоняется от экономического, соответствующего минимуму потерь. В этих условиях, по критерию минимума потерь, часто отыскивают места размыкания сети [6].

### **Технические мероприятия по снижению потерь в электрических сетях**

1. Компенсация реактивной мощности  $Q$  в линии путем установки компенсирующих устройств (КУ). Таким образом, при снижении передачи

реактивной мощности  $Q$  линия разгружается, увеличивается  $\cos\varphi$  и снижается потеря мощности  $\Delta P$ .

3. Настройка сети. Заключается в установке КУ для уменьшения неоднородности в замкнутых сетях.

2. Повышение номинального напряжения за счет глубоких вводов.

4. Замена проводов на головных участках сети. По мере повышения нагрузок на головных участках сети протекают токи, превышающие экономические токи для данных сечений.

5. Замена недогруженных/перегруженных трансформаторов.

6. Установка вольтодобавочных трансформаторов в замкнутых контурах электрической сети. Приводит к уменьшению  $S_{ур}$

7. Замена трансформаторов без РПН на трансформаторы с РПН. Приводит к лучшей оптимизации по потерям мощности и напряжения в сети с изменяющимся графиком нагрузки в течение суток.

8. Применение провода СИП в сетях 0,38 кВ. Снижается процент воровства электроэнергии за счет несанкционированного подключения.

9. Применение фазосимметрирующих трансформаторов в сетях 10/0.38 кВ. За счет снижения несимметрии фазных напряжений, снижается ток, протекающий в нулевом проводе, что в свою очередь ведет к снижению потерь активной мощности [6].

Все технические мероприятия по снижению потерь должны быть технико-экономически обоснованы в соответствии с действующими ТКП [2].

Далее в научной работе рассмотрим замкнутую кабельную линию и на ее примере произведем внедрение некоторых мер по повышению энергоэффективности, описанных выше.

Распределительные линии напряжением 6, 10, 35 кВ строятся в основном замкнутыми, но работают в разомкнутом режиме из-за их неоднородности, отсутствия по концам каждого участка линии силовых выключателей и устройств релейной защиты от междуфазных повреждений. Это обстоятельство приводит к необходимости определения мест размыкания распределительной сети. На практике часто используется определения мест размыкания по условию минимума потерь электрической энергии. Однако недостаточная техническая оснащенность электрической сети и уровень ее информативности не позволяют в полной мере использовать отмеченный принцип [1, с. 14-15].

Если при установлении нормальных разрывов в сети не обеспечивается допустимый уровень емкостных токов замыкания на землю, то это может служить причиной аварии, сопровождающейся выходом из строя оборудования одной или нескольких ячеек, отходящих от шин центра питания (ЦП) линий. Это связано с появлением на неповрежденных фазах значительных перенапряжений, превышающих фазное напряжение в 3,6 раза и более, из-за возникновения перемежающейся дуги.

Как видно из изложенного, в условиях ограничения задачи не находит отражение значения емкостного тока замыкания на землю, протекающего через дугогасящий реактор при однофазных замыканиях на землю в сети 6-10 кВ и

определяемого протяженностью подключенных к данной секции шин кабельной линии [1, с. 24].

На рисунке 1 представлена замкнутая кабельная линия (КЛ) электропередачи напряжением 10 кВ:

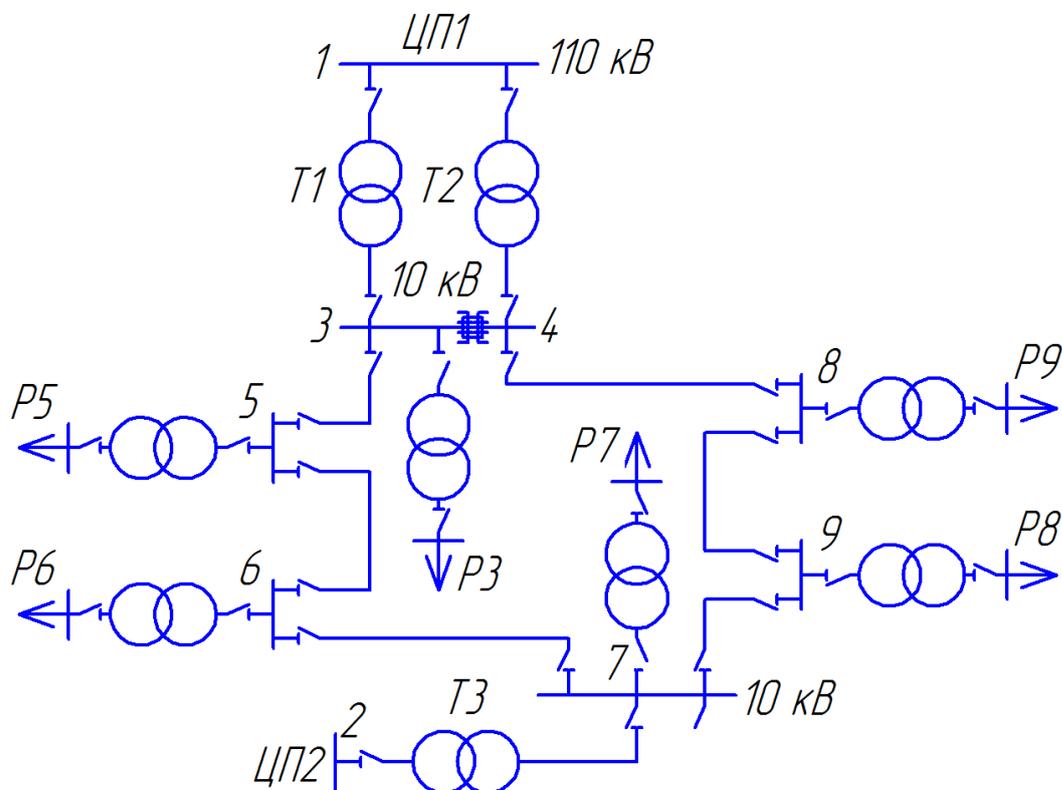


Рисунок 1 – Замкнутая городская КЛ напряжением 10 кВ

Следовательно, задача отыскания мест размыкания городской электрической сети может быть сформулирована следующим образом: необходимо определить места размыкания сети, обеспечивающие минимум потерь активной мощности, при недопущении перегрузки головных участков распределительных кабельных линий 6 – 10 кВ и силовых трансформаторов в ЦП и при соблюдении допустимого напряжения в узлах и уровня токов замыкания на землю на каждой секции шин центра питания [1, с. 25].

Примем  $\cos\phi$  для всех узлов нагрузки равным 0,86 для режима наибольших нагрузок.

Данные по схеме представлены в таблицах 1 – 4:

Таблица 1 – Исходные данные по кабельным линиям с бумажной изоляцией

№ ветви	Марка	$U_{ном}$ , кВ	l, км	$r_0$ , Ом / км	$x_0$ , Ом / км	$I_{3y}$ , А / км	$I_{доп}$ , А
3-5	ААБл3х120	10	0,25	0,258	0,081	1,1	218
4-8	ААБ 3х150		0,40	0,206	0,079	1,3	246
5-6	АСБ 3х95		0,25	0,326	0,083	1,0	192
6-7	АСБлх3х120		0,10	0,258	0,081	1,1	218
7-9	ААБ 3х150		0,40	0,206	0,079	1,3	246
8-9	АСБ 3х95		0,20	0,326	0,083	1,0	192

Таблица 2 – Расчетные данные по кабельным линиям с бумажной изоляцией

№ ветви	Марка	г, Ом	х, Ом	I <sub>3</sub> , А	P <sub>доп</sub> , кВт
3-5	ААБл3х120	0,0645	0,0203	0,275	3247,2
4-8	ААБ 3х150	0,0824	0,0316	0,52	3664,3
5-6	АСБ 3х95	0,0815	0,0208	0,25	2860,0
6-7	АСБлх3х120	0,0258	0,0081	0,11	3247,2
7-9	ААБ 3х150	0,0824	0,0316	0,52	3664,3
8-9	АСБ 3х95	0,0652	0,0166	0,2	2860,0

Таблица 3 – Исходные данные по узлам нагрузки

Узел	3	5	6	7	8	9
I, А	180	70	80	170	40	180

Таблица 4 – Исходные данные по трансформаторам на ЦП 110/10

№ ЦП	S <sub>НОМ</sub> , кВ·А	г, Ом	х, Ом	I <sub>доп</sub> , А
1	25	0,021	0,462	1374,6
2	16	0,036	0,793	839,8

Найдем точки размыкания с помощью алгоритма «циклов и штрафов». Этапы данного цикла приведены ниже:

Этап 1. Создается произвольное дерево схемы, соединяющее все узлы сети. Выполнение технических условий не проверяется. Это и есть вступительное приближение в процессе оптимизации (рисунок 2а). Из каждого контура удаляется произвольно один из отрезков так, чтобы дерево схемы имело бы разомкнутый вид (рисунок 2б). Отрезки, не вошедшие в дерево, составляют массив исключенных отрезков. Далее рассматривается каждый из разомкнутых контуров отдельно. Во всем контуре рассчитывается сумма потерь мощности. К перегруженным участкам применяется «штраф». Функция штрафа для разомкнутого контура:

$$K_y = \sum_{i=1}^K \Delta P_i + \sum_{j=1}^L \Delta P_j \cdot \psi_j \quad (1)$$

где K – число неперегруженных отрезков в контуре;

L – число перегруженных отрезков;

$\psi_j$  – коэффициент функции штрафа.

Коэффициент функции штрафа находится экспериментальным путем [3].

Для данной схемы примем  $\psi_j = 2$ .

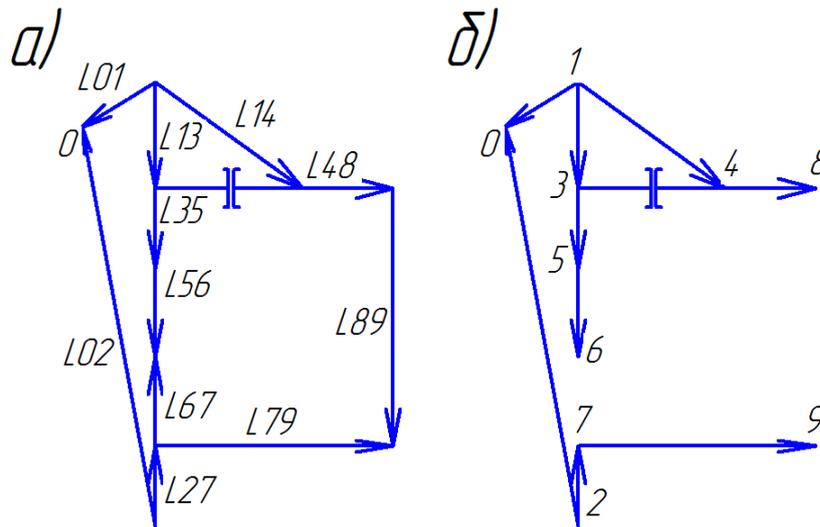


Рисунок 2 – а) Полное дерево схемы; б) Разомкнутый вид дерева схемы

Этап 2. Производятся расчеты методом очередных приближений. В каждом приближении рассматривается один из разомкнутых контуров. Для контура рассчитываются потери мощности на каждом участке по формуле:

$$\Delta P = 3I_i^2 r_i \quad (2)$$

где  $I$  – ток, протекающий по участку  $i$ , А  
 $r$  – сопротивление участка, Ом

Передвижение разрывов по отрезкам цикла закончится, если в процессе уменьшения величины целевой функции наступит ее рост. Окончательно из цикла исключается отрезок, при котором целевая функция  $K_y = \min$ . Этот отрезок переносится к массиву исключенных отрезков вместо выбранного изначально. Контуров схемы, подготовленные к оптимизации сети методом очередных приближений, показаны на рисунке 3:

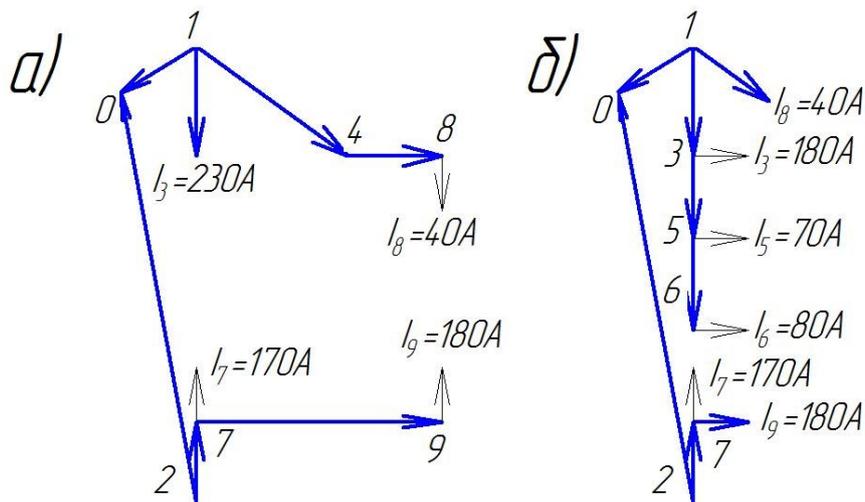


Рисунок 3 – Разомкнутые контура семы на начальном этапе оптимизации: а) первый контур; б) второй контур.

Все этапы оптимизации занесем в таблицы 5 и 6:

Таблица 5 – Оптимизация первого контура

Шаг	№ участка	$r_i$ , Ом	$I_i$ , А	$I_{доп}$ , А	Штраф	$\Delta P$ , кВт	$K_y$
1	8-9	0,0652	-	-	-	-	26,2
	4-8	0,0824	40	246	-	0,4	
	7-9	0,0824	180	246	-	8	
	1-4	0,021	270	1374,6	-	4,6	
	2-7	0,036	350	839,8	-	13,2	
2	8-9	0,0652	180	192	-	6,3	31,4
	4-8	0,0824	220	246	-	11,9	
	7-9	0,0824	-	-	-	-	
	1-4	0,021	450	1374,6	-	12,8	
	2-7	0,036	170	839,8	-	3,1	
1	8-9	0,0652	40	192-	-	0,3	84
	4-8	0,0824	-	-	-	-	
	7-9	0,0824	360	246	+	32	
	1-4	0,021	230	1374,6	-	3,3	
	2-7	0,036	390	839,8	-	16,4	

Таблица 6 – Оптимизация второго контура

Шаг	№ участка	$r_i$ , Ом	$I_i$ , А	$I_{доп}$ , А	Штраф	$\Delta P$ , кВт	$K_y$
1	6-7	0,0258	-	-	-	-	21,3
	5-6	0,0815	80	192	-	1,6	
	3-5	0,0645	150	218	-	4,3	
	1-3	0,021	370	1374,6	-	8,6	
	2-7	0,036	250	839,8	-	6,8	
2	6-7	0,0258	80	218	-	0,5	26,7
	5-6	0,0815	-	-	-	-	
	3-5	0,0645	70	218	-	0,9	
	1-3	0,021	290	1374,6	-	5,3	
	2-7	0,036	430	839,8	-	20	
3	6-7	0,0258	150	218	-	1,7	31,9
	5-6	0,0815	70	192	-	1,2	
	3-5	0,0645	-	-	-	-	
	1-3	0,021	220	1374,6	-	2	
	2-7	0,036	500	839,8	-	27	

После оптимизации схемы получили точки размыкания сети 8-9 со стороны 9 точки и 6-7. со стороны 6 точки. Так как намеченные до оптимизации оказались такими же, как и после первого шага, для данной схемы они и являются оптимальными.

Далее проверим схему по допустимым напряжениям в узлах и уровню токов замыкания на землю на каждой секции шин ЦП. Расчет падений напряжений на каждом из участков произведем по формуле:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \sum_{i=1}^n I_i \cdot z_i \leq U_{\text{д}} \quad (3)$$

где  $I_i$  – ток по участку цепи  $i$ , А;

$Z_i$  – полное сопротивление участка сети, Ом.

$U_{\text{д}}$  – допустимое значение падения напряжения. Для сети 10 кВ  $U_{\text{д}}=1500$  В

[1].

Допустимый ток замыкания на землю определяется из условия:

$$I_3 \leq I_{\text{д}} \quad (4)$$

где  $I_{\text{д}} = 20$  А – Допустимый ток замыкания на землю в сети 10 кВ [2].

Результаты расчетов для каждого ЦП представим в виде таблицы 7:

Таблица 7 – Падение напряжения в ветвях схемы и токи замыкания на землю

№ ЦП	Ветвь	Участки	$z_i$ , Ом	$I_i$ , А	$\Delta U$ , В	$I_3$ , А
1	4-9	4-8	0,088	40	6,1	1,245
		8-9	-	-	-	
	3-6	3-5	0,068	150	29,3	
		5-6	0,084	80		
2	7-9	7-9	0,088	180	27,4	0,63
	7-6	7-6	-	-	-	

### Выводы:

Проблема нахождения оптимальных точек размыкания сети является составной частью оптимизации режима распределительной сети. Основной составляющей эффекта при проведении оптимизационных расчетов и реализации выбранных мероприятий является снижение потери активной мощности

Сложность метода «циклов и штрафов» заключается в трудности выбора функции штрафа  $\Psi_j$  [3]. Следовательно, если поиск начинается из точки, близкой к оптимуму, то минимум функции потерь будет достигаться быстрее, т.к. при первых итерациях вычислительного процесса текущая точка окажется близко к допустимой области, и поиск оптимума пройдет быстрее.

Проведение исследования разомкнутой городской кабельной сети 10 кВ показали:

1. Напряжения в узлах схемы лежат в допустимых пределах;
2. Токи замыкания на землю не превышают допустимых для данного класса напряжения;
3. Потери активной мощности в сети после оптимизации стали минимально возможными при заданных параметрах и конфигурации сети.

### Литература

1. Короткевич, М.А, Основные направления совершенствования эксплуатации электрических сетей/ М.А. Короткевич, - Минск: ЗАО «Техноперспектива», 2003. – 373 с.
2. ТКП 339-2011 Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии передачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний. «Минскэнерго», 2011 – 593 с.
3. Шмелев, В.В, Точные штрафные функции в линейном и целочисленном линейном программировании. «Автоматика и телемеханика», 1992 №5 с. 106-115.
4. ТКП 460-2017 «Порядок расчета величины технологического расхода электрической энергии на ее передачу по электрическим сетям, учитываемой при финансовых расчетах за электроэнергию между энергоснабжающей организацией и потребителем (абонентом)».
5. Федин В.Т. Основы проектирования энергосистем/ В.Т. Федин, М.И. Фурсанов. – Минск: БНТУ, 2010. Ч. 1. – 322с.
6. [https://studbooks.net/2083430/matematika\\_himiya\\_fizika/struktura\\_poten\\_elektoenergi\\_elektricheskikh\\_setyah\\_tekhnicheskije\\_poteri\\_elektoenergii](https://studbooks.net/2083430/matematika_himiya_fizika/struktura_poten_elektoenergi_elektricheskikh_setyah_tekhnicheskije_poteri_elektoenergii)