

## МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ И СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

В работе исследованы особенности оптимизации режимов электрической сети низкого напряжения для энергоэффективной электропередачи. Основными особенностями данных сетей являются высокие значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности и несоответствие значений напряжений необходимым требованиям. Поэтому в качестве мер улучшения перечисленных параметров сети выбраны симметрирование нагрузок по фазам и компенсация реактивной мощности. Одним из главных факторов эффективного решения данной задачи является определение точек симметрирования нагрузок и компенсации реактивной мощности, а также необходимой мощности используемых устройств. Для решения многокритериальной задачи определения точек подключения устройств проведён анализ существующих целевых функций. В результате предложена целевая функция, включающая в себя приведенные затраты, потери напряжения и коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности. При решении задачи оптимизации с помощью предложенной целевой функции значения напряжения и коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности в точках присоединения потребителей будут находиться в необходимых пределах. Приводятся результаты исследования оптимизационной функции на примере модельной сети. Расчеты проводились в два этапа: поиск сенсорных узлов, затем их исследование на оптимальность. Все расчеты проведены в среде MATLAB с учетом потерь напряжения и мощности. Согласно полученным результатам, в исследуемой сети потери мощности с использованием предложенной целевой функции могут быть уменьшены до 19 % от исходных потерь и получена значительная экономия финансовых средств.

**Ключевые слова:** многокритериальная оптимизация, симметрирование нагрузок, компенсация реактивной мощности, несимметрия напряжений, качество электроэнергии, потери электроэнергии.

**Введение.** При передаче электрической энергии от источника потребителю неизбежно возникают ее потери. В случае неэффективной передачи и потребления эти потери значительно увеличиваются, что приводит к ухудшению качества поставляемой электрической энергии. Требования к качеству электрической энергии в России закреплены в государственном стандарте ГОСТ 32145-2013 [1]. Также существует международный стандарт на качество электроэнергии IEC 61000-3-2. Повышение энергоэффективности и энергосбережения является приоритетной задачей Российской Федерации [2]. Данная работа направлена на улучшение показателей качества электроэнергии и уменьшения потерь, что позволит повысить энергоэффективность и энергосбережение, поэтому является актуальной.

В данной работе исследованы особенности оптимизации режима работы в сетях низкого напряжения. Сети 0,4 кВ имеют несимметричную по фазам нагрузку вследствие наличия однофазных потребителей и непрерывного изменения потребляемой электроэнергии. Такое несимметричное по фазам потребление влечет дополнительные потери электроэнергии, вызывает несимметрию напряжения и отклонение напряжения, несоответствующее нормам качества электроэнергии. Несимметрия напряжения приводит к снижению срока службы электрооборудования. В некоторых случаях может привести к предаварийным режимам или поломке электрооборудования.

Несимметрию напряжения характеризуют такие показатели качества электроэнергии, как коэффи-

циенты несимметрии напряжений по обратной  $K_{2U}$  и нулевой последовательности  $K_{0U}$ . По ГОСТ 32145-2013 данные коэффициенты не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю. Значения напряжения характеризуются таким показателем качества электроэнергии, как отклонение напряжения. В точке присоединения потребителей отклонение напряжения не должно превышать 10 % от номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю [1].

В настоящее время разработано достаточно устройств для уменьшения несимметрии фазных напряжения и нагрузок, например, [3]. Для уменьшения отклонения напряжения, а также симметрирования напряжения эффективно использовать устройства компенсации реактивной мощности, например, [4]. Для ИЭС с ААС (интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью) такими устройствами могут быть так называемые устройства FACTS (гибкие системы передачи переменного тока) [4]. Обеспечение надежности электроснабжения и эффективного использования данных технических средств во многом зависит от правильного их выбора, определения точек подключения и расчета экономической эффективности.

Для определения типа устройств, точек их установки и необходимой мощности требуется решить многокритериальную оптимизационную задачу. В качестве критерия оптимизации обычно считают условие минимума потерь электроэнергии. В целевую функцию включают параметры, которые необходимо оптимизировать [5]. Параметры электрической сети, которые должны находиться в заданных пределах, можно задать в виде ограничений к целевой функции. В работах [6–8] целевые функции включают критерии: минимизацию потерь электроэнергии, отклонения напряжения, издержек и потерь активной мощности, а также максимизацию выгоды. Задачи по симметрированию напряжений и нагрузок в данных работах не решались. В работе [9] рассматривается задача определения мест подключения и мощности устройств компенсации реактивной мощности для симметрирования напряжений в системах электроснабжения с тяговыми подстанциями. В некоторых работах предлагается симметрирование фазных нагрузок группы приемников.

В этой работе предлагается методика определения оптимальных точек подключения устройств симметрирования нагрузок и компенсации реактивной мощности в сети низкого напряжения для уменьшения потерь активной мощности и обеспечения требуемых значений напряжений и коэффициента несимметрии по нулевой последовательности. Также приведены результаты исследования предложенной методики на модельной сети.

**Основная часть.** Будем считать задачей оптимизации уменьшение потерь активной мощности и напряжения и уменьшение значений коэффициента несимметрии по нулевой последовательности. С целью улучшения данных показателей рассмотрим целевую функцию, содержащую затраты, потери напряжения и коэффициент несимметрии по нулевой последовательности:

$$F = \lambda_1 I_{\Delta 3} + \lambda_2 I_{K_{0U}} + \lambda_3 I_{\Delta U} \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\text{при } U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}.$$

Здесь  $\lambda$  — весовые коэффициенты, они должны иметь значения от 0 до 1 и в сумме давать 1,  $U_i$  — узловые напряжения,  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  — минимально и максимально допустимые значения напряжений.  $I_{\Delta 3}$  — индекс затрат, определяемый отношением стоимости приведенных затрат после оптимизации  $Z_A$  к стоимости потерь электроэнергии до оптимизации  $Z_0$ :

$$I_{\Delta 3} = \frac{Z_A}{Z_0}.$$

Затраты на потери электроэнергии до оптимизации равны [10]:

$$Z_0 = c_p \cdot \tau \cdot \Delta P_{\Sigma,0}.$$

Потери активной мощности равны сумме потерь активной мощности на всех участках сети:

$$\Delta P_{\Sigma,0} = \sum_{j=1}^N \Delta P_{ij},$$

$$\Delta P_{ij} = R_{ij} \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}.$$

Здесь  $c_p$  — стоимость электроэнергии, тыс. руб./кВт·ч;  $\tau$  — время максимальных потерь электроэнергии в сети, ч;  $\Delta P_{\Sigma,0}$  — потери активной мощности, кВт.

Стоимость приведенных затрат после оптимизации равна сумме затрат на установку, обслуживание устройств КРМ (компенсации реактивной мощности) и симметрирования нагрузок и потерь электроэнергии:

$$Z_A = Z_{КРМ} + Z_C + Z_{\Delta P}.$$

Здесь  $Z_{КРМ}(Z_C) = Z_{КРМ(C)уем} + Z_{КРМ(C)обсл}$ ,  $Z_{\Delta P}$  — стоимость потерь электроэнергии после оптимизации.

Стоимость установки устройств КРМ и симметрирования нагрузок определялась:

$$Z_{КРМ(C)уем} = E_n \cdot (k_{КРМ(C)} \cdot \sum_j^N Q_j + k_{узл} k_{уем}),$$

$k_{КРМ(C)}$  — удельная стоимость устройства КРМ или симметрирующего;  $Q_j$  — мощность устройства КРМ (в кВАр) или мощность симметрирующего устройства  $P_j$  (в кВт) выбираются из дискретного ряда;  $j$  — узел размещения устройства;  $E_n$  — номинальный коэффициент эффективности капиталовложений для распределительной сети  $E_n = 0,12$  [10];  $k_{узл}$  — количество узлов, в которые устанавливаются дополнительные устройства;  $k_{уем}$  — стоимость установки устройства, тыс. руб. В качестве стоимости устройств использовалась средняя рыночная цена: для устройств КРМ — 4 тыс. руб./кВАр, для устройств симметрирования нагрузок — 7 тыс. руб./кВт.

Стоимость обслуживания установленных устройств вычислялась:

$$Z_{КРМ(C)обсл} = k_{узл} k_{обсл},$$

$k_{обсл}$  — удельная стоимость обслуживания устройства в одном узле в год (тыс. руб./год).

$I_{\Delta U}$  — индекс отклонения напряжения в формуле (1) равен:

$$I_{\Delta U} = \frac{I_{U,A}}{I_{U,0}}$$

где индекс потерь напряжения в исходном состоянии:

$$I_{U,0} = \sum_{i=2}^N \left[ (U_{\max} - U_i^0)^2 + (U_i^0 - U_{\min})^2 \right].$$

$U_i^0$  — напряжение в сети в исходном состоянии,  $N$  — количество узлов. Индекс потерь напряжения после оптимизации определяется:

$$I_{U,A} = \sum_{i=2}^N \left[ (U_{\max} - U_i^A)^2 + (U_i^A - U_{\min})^2 \right],$$

где  $U_i^A$  — напряжение в сети после оптимизации.

$I_{K_{0v}}$  — индекс несимметрии напряжения по нулевой последовательности определяется отношением:

$$I_{K_{0v}} = \frac{K_{0\Sigma}^A}{K_{0\Sigma}^0}.$$

$K_{0\Sigma}^0$  — суммарный коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности до оптимизации равен:

$$K_{0\Sigma}^0 = \sum_{i=1}^N K_{0i}^0,$$

$K_{0i}^0$  — значение коэффициента несимметрии напряжения в узле,  $N$  — количество узлов.

Суммарный коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности после оптимизации определяется аналогично:

$$K_{0\Sigma}^A = \sum_{i=1}^N K_{0i}^A.$$

Предварительно необходимо определить узлы, в которых необходимо установить устройства КРМ, так называемые сенсорные узлы. Согласно [11], такие узлы выбираются с учетом значений коэффициента чувствительности по реактивной мощности и коэффициента чувствительности по напряжению. Для определения потенциальных для симметрирования нагрузок узлов будем использовать коэффициенты чувствительности по активной мощности и по нулевой последовательности.

Коэффициент чувствительности потерь активной мощности определяется как первая производная от потерь активной мощности в линии по активной мощности в каждом узле  $j$ :

$$K_{\Delta P}^P = \frac{d\Delta P}{dP_j} = \frac{2P_j R_{jj}}{U_j^2}.$$

Так как  $\Delta P = R_j \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_j^2}$ . Для целей симметрирования нагрузок по фазам расчет данных коэффициентов необходимо произвести для каждой фазы ( $K_{\Delta P A}^P$ ,  $K_{\Delta P B}^P$ ,  $K_{\Delta P C}^P$ ). Коэффициент чувствительности потерь реактивной мощности равен:

$$K_{\Delta P}^Q = \frac{d\Delta P}{dQ_j} = \frac{2Q_j R_{jj}}{U_j^2}.$$

Расчет также проводился для каждой фазы ( $K_{\Delta P A}^Q$ ,  $K_{\Delta P B}^Q$ ,  $K_{\Delta P C}^Q$ ). Коэффициент чувствительности по несимметрии напряжения нулевой последовательности  $K_{0v}$  определяется как отношение значения коэффициента несимметрии  $K_{0v}^A$  в узлах к предельному нижнему значению (4 %). Коэффициент чувствительности по напряжению  $K_U$  равен отноше-

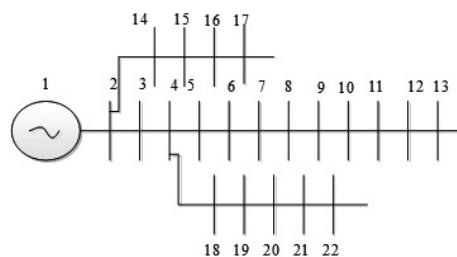


Рис. 1. Схема модельной сети

Таблица 1

Мощности нагрузок в узлах исследуемой сети

$N$ узла	$P_{A'}$ кВт	$P_{B'}$ кВт	$P_{C'}$ кВт	$Q_{A'}$ кВАр	$Q_{B'}$ кВАр	$Q_{C'}$ кВАр
1	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3	0,3
2	1	1	1	0,4	0,4	0,4
3	1,5	1,5	1,5	0,4	0,4	0,2
4	2	2	2	0,9	0,9	0,9
5	3	3	1	1,1	1,1	1,1
6	1,1	1,1	1,1	0,3	0,3	0,3
7	6	6	3	2	2	2
8	1,5	1,5	1,5	0,4	0,4	0,4
9	3	3	3	1	1	1
10	8	8	3	6	6	6
11	3	1	1	0,3	0,3	0,5
12	2	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
13	3	1,3	1,3	0,1	0,1	0,1
14	2,5	0,6	0,6	0,3	0,3	0,3
15	3	1,8	1,8	0,4	0,4	0,4
16	1	3	3	0,1	0,1	0,1
17	2	1	2	0,2	0,2	0,2
18	3	1	1,2	0,4	0,4	0,4
19	2	0,7	0,7	0,5	0,5	0,5
20	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
21	1,7	1,7	1,7	1	1	1
22	2,3	2,3	2,3	0,8	0,8	0,8

нию значения напряжения к предельному нижнему значению  $0,9U_n$ . Он рассчитывался по фазам и затем определялся суммарный для всех трех фаз.

Расчеты проводились для модельной сети, содержащей два ответвления и 22 узла (рис. 1) в среде MATLAB. В табл. 1 приведены мощности нагрузок в узлах исследуемой сети, в табл. 2 приведены активное и реактивные сопротивления участков линии. Полученные в результате расчетов коэффициенты чувствительности по активной, реактивной мощности для фазы А и коэффициента чувствительности по напряжению приведены в табл. 3. Также в табл. 3 приведены значения коэффициента чувствительности по нулевой последовательности.

Потенциальными для КРМ следует выбирать узлы, имеющие наибольшие значения коэффициента чувствительности по реактивной мощности и наименьшие значения коэффициента чувствительности по напряжению. Потенциальными для симметрирования нагрузок должны быть узлы, имеющие наибольшие значения коэффициента

Сопротивления линий исследуемой сети

Линия	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10
$r$ , Ом	0,24	0,24	0,24	0,23	0,4	0,3	0,3	0,34	0,3
$x$ , Ом	0,08	0,1	0,08	0,06	0,15	0,08	0,1	0,1	0,1
Линия	10–11	11–12	12–13	2–14	14–15	15–16	16–17	4–18	18–19
$r$ , Ом	0,35	0,5	0,3	0,4	0,25	0,3	0,3	0,5	0,35
$x$ , Ом	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	0,2
Линия	19–20	20–21	21–22						
$r$ , Ом	0,4	0,25	0,5						
$x$ , Ом	0,1	0,1	0,15						

Таблица 3

Результаты расчетов коэффициентов чувствительности

$N$ узла	$K_{\Delta PA}^P$	$K_{\Delta PA}^Q$	$K_{UA}$	$K_{KO}$
1	0,4267	0,1417	1,2121	0,0000
2	<b>0,4406</b>	<b>0,1460</b>	1,1834	0,1245
3	0,3854	0,1444	1,1537	0,2502
4	0,3721	0,1409	1,1287	0,3605
5	<b>0,5108</b>	<b>0,1986</b>	1,1056	0,4632
6	0,2934	0,1148	1,0733	0,5971
7	0,3640	0,1442	1,0555	0,6746
8	0,2936	0,1217	1,0338	0,7707
9	0,3190	0,1360	1,0165	0,8520
10	0,2457	<b>0,1090</b>	<b>0,9983</b>	0,9408
11	<b>0,1475</b>	0,0203	<b>0,9842</b>	<b>1,0122</b>
12	0,1337	0,0214	<b>0,9767</b>	<b>1,0490</b>
13	0,0488	0,0016	<b>0,9697</b>	<b>1,0815</b>
14	0,1287	0,0151	1,1611	0,1755
15	0,0575	0,0067	1,1539	0,1871
16	0,0347	0,0035	1,1507	0,1883
17	0,0232	0,0023	1,1488	0,1857
18	0,2029	0,0704	1,1099	0,3752
19	0,1003	0,0442	1,1005	0,3948
20	0,0816	0,0425	1,0958	0,4007
21	0,0428	0,0192	1,0921	0,4006
22	0,0494	0,0172	1,0902	0,4005

чувствительности по активной мощности и коэффициента чувствительности по нулевой последовательности. Значение узлов, для которых коэффициенты чувствительности по активной и реактивной мощности имеют наибольшие значения, выделены полужирным шрифтом. Полужирным шрифтом также выделены значения узлов, имеющие значения коэффициента чувствительности по напряжению меньше 1,01, и узлы, имеющие коэффициенты чувствительности по нулевой последовательности больше единицы.

Как следует из табл. 3, узлы, имеющие наименьшие значения коэффициента чувствительности по напряжению и значения коэффициента чувствительности по нулевой последовательности больше единицы, не совпадут с узлами, имеющими наибольшие значения коэффициентов чувствительности по мощностям. Поэтому, также в качестве потенциальных для оптимизации среди узлов, имеющих недопустимые значения напряжения, был выбран узел, имеющий наибольшие значения коэффициентов чувствительности по активной и реактивной мощности, т.е. узел 10. Среди узлов, имеющих недопустимые значения коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности, был выбран узел, также имеющий наибольшие значения коэффициентов чувствительности по активной и реактивной мощности, это узел 11.

Таким образом, для симметрирования нагрузок выберем узлы под номерами 2, 5, 11, 12 и 13. Симметрирование нагрузок обычно осуществляется переключением части нагрузки с более нагруженной фазы на менее нагруженные. При этом в большинстве устройств перераспределяется полная нагрузка, а не только ее активная составляющая. Поэто-

Таблица 4

Уменьшение потерь мощности для исследуемых вариантов

	Симмет. в узлах 2 и 5	Симмет. и КРМ в узлах 2 и 5	Симмет. и КРМ в узлах 10 и 11	КРМ в узлах 2 и 5	Симмет. в узлах 2, 12, 13	КРМ в узлах 2, 5, 10, 11	КРМ в узлах 2, 5, 10, симмет. в узлах 2, 5
Уменьшение потерь, %	6,7	16,3	14,6	11,8	6,1	14,5	19
Экономия, тыс. руб.	93,39	438,32	497,37	428,37	89,57	499,72	499,87
F	0,4507	0,4356	0,5201	0,8021	0,5666	0,8010	0,4339

му при расчетах считалось, что симметрирование нагрузок производилось по активной и реактивной мощности. В качестве потенциальных для КРМ выберем узлы под номерами 2, 5, 10, 11, 12, 13.

Далее для исследуемой модельной линии проведен расчет уменьшения потерь и экономии для режимов КРМ и симметрирования нагрузок для различных вариантов оптимизации. Результаты расчетов приведены в табл. 4. При расчетах учитывались потери в нулевом проводе и взаимные индуктивности линий. Для КРМ в узлах 2, 5, 10, 11, 12 были взяты следующие мощности устройств: 30 кВАр, 25 кВАр, 10 кВАр, 5 кВАр, 2 кВАр соответственно. Узел 13 исключен из потенциальных для КРМ узлов ввиду малого значения реактивной мощности. При симметрировании нагрузок были использованы следующие значения мощностей устройств: в узле 2—30 кВт, 5—30 кВт, 10—10 кВт, 11—6 кВт, 12—4 кВт, 13—3 кВт.

Согласно приведённым в табл. 4 результатам, наибольшие значения уменьшения потерь соответствуют режиму КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 (до 19 %). При симметрировании нагрузок также в узле 11 значения напряжения будут превышать необходимые значения, поэтому для данного варианта оптимизации в нем симметрирование не производилось.

Результаты расчетов для различных режимов приведены в табл. 4. Таким образом, режиму КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования нагрузок в узлах 2, 5 будут соответствовать наибольшее уменьшение потерь и экономия финансовых средств, а также минимум целевой функции. Режим симметрирования в узлах 2 и 5 является невыгодным. Это объясняется достаточно большими затратами на симметрирование при соответствующем значении уменьшения потерь мощности. Полученные в результате расчетов значения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности для более эффективных режимов приведены в виде графиков на рис. 2, значения одного из фазных напряжений приведены на рис. 3. Согласно рис. 2, все режимы, кроме режима КРМ в узлах 2 и 5, обеспечивают необходимые значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности. Из анализа графиков, приведённых на рис. 3, следует, что лишь два режима обеспечивают требуемые значения фазного напряжения — режим КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 и режим КРМ и симметрирования в узлах 10 и 11.

Таким образом, режим КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 является наиболее оптимальным для КРМ и симметрирования нагрузок. По результатам исследования можно сделать вывод о необходимости учета при оптимизации не только коэффициентов чувствительности по активной, по реактивной мощности, по напряжению, но и по коэффициенту чувствительности по несимметрии нулевой последовательности. Включение в целевую функцию коэффициента несимметрии по нулевой последовательности позволяет более эффективно уменьшить потери и улучшить основные показатели качества электроэнергии в сети низкого напряжения.

Таким образом, использование предложенного метода оптимизации размещения компенсирующих и симметрирующих устройств в рассмотренной модельной линии позволит уменьшить потери мощности до 19 % по сравнению с исходным режимом и обеспечить необходимые значения коэффициента

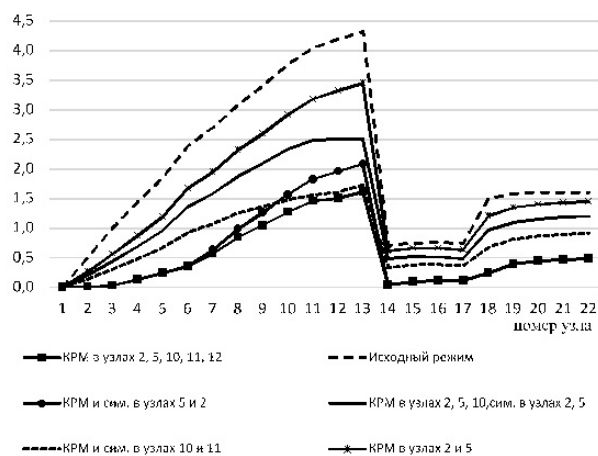


Рис. 2. Значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности ( $K_{0U}$ , %) в узлах

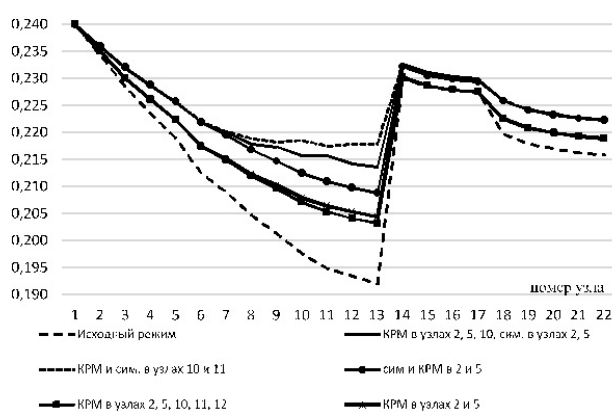


Рис. 3. Значения фазного напряжения в узлах (в кВ)

Таблица 5

Значения весовых коэффициентов и соответствующие им значения целевой функции

Значения $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	$F$
0,1; 0,7; 0,2	0,4691
<b>0,1; 0,8; 0,1</b>	<b>0,4339</b>
0,4; 0,5; 0,1	0,5496
0,8; 0,1; 0,1	0,7632
0,4; 0,1; 0,5	0,8250
0,1; 0,1; 0,8	0,9074

энта несимметрии по нулевой последовательности и значения напряжения в узлах. Окончательный выбор того или иного варианта оптимизации зависит от стоимости необходимых технических средств, включая стоимость их обслуживания, и от требуемых значений показателей качества электроэнергии.

Значения весовых коэффициентов  $\lambda$  и соответствующие им значения целевой функции (1) для режима КРМ в узлах 2, 5, 10 и симметрирования в узлах 2, 5 приведены в табл. 5. При значениях весовых коэффициентов  $\lambda_1 = 0,1$  и  $\lambda_2 = 0,8$ ,

$\lambda_3 = 0,1$  целевая функция будет иметь наименьшее значение.

**Заключение.** В работе предложена целевая функция для эффективной оптимизации электрической сети низкого напряжения. Приведены результаты исследования оптимизации модельной сети низкого напряжения с помощью предложенной целевой функции. Целевая функция содержит индекс затрат, отклонения напряжения и коэффициент несимметрии по нулевой последовательности. Приводятся значения весовых коэффициентов, обеспечивающие минимум данной целевой функции. Ухудшение качества электроэнергии в сетях низкого напряжения в основном связано с несимметрией напряжения и значительными отклонениями напряжения от номинального. Поэтому в качестве мер оптимизации были выбраны КРМ и симметрирование нагрузок. С помощью предложенной методики можно определить точки подключения необходимых устройств и их мощность. При этом будут обеспечены значения напряжения и коэффициента несимметрии по нулевой последовательности во всей сети в необходимых пределах и значительная экономия финансовых средств.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014–07–01. Москва: Стандартинформ, 2014. 16 с.
2. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. URL: [https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uwl0o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document\\_119047.pdf](https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uwl0o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document_119047.pdf) (дата обращения: 14.06.2023).
3. Орлов В. В., Орлова Э. О. Анализ способов симметрирования напряжения в сетях 0,4/0,23 кВ // *Электроэнергия. Передача и распределение*. 2020. № 2 (59). С. 56–63. EDN: HCXTRQ.
4. Кубарьков Ю. П., Кулаев И. С., Алехин Р. А. Оптимизация уровней напряжения в активно-адаптивных сетях с распределённой генерацией // *Вестник Самарского государственного технического университета*. Серия: технические науки. 2018. № 3 (59). С. 154–164. EDN: YPDAIP.
5. Варганова А. В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17, № 3. С. 48–55. DOI: 10.14529/power170309. EDN: ZGQBYH.
6. Толба М. А. Х. Развитие методов оптимизации размещения компенсирующих устройств и возобновляемой распределённой генерации в радиальных электрических сетях: дис. ... канд. тех. наук. Москва, 2018. 171 с.

7. Sidorova V. T. Determining Mains Connection Points Charging Stations on RES for Electric Vehicles // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. 2021. P. 85–89. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446376.

8. Тульский В. Н., Ванин А. С., Толба М. А. Х. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети // *Электричество*. 2017. № 6. С. 16–23. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23. EDN: YQFRCZ.

9. Третьяков Е. А. Совершенствование методов управления передачей и распределением электроэнергии в адаптивных системах электроснабжения стационарных потребителей железных дорог: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2021. 403 с.

10. Лыкин А. В. Электрические системы и сети. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 363 с. ISBN 978-5-7782-3037-8.

11. Abdelaziz A. Y., Ali E. S., Abd-Elazim S. M. Optimal Sizing and Locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index // *Engineering Science and Technology an International Journal*. 2016. Vol. 19, Issue 1. P. 610–618. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.09.002.

**СИДОРОВА Вера Тагировна**, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

SPIN-код: 1146-4586

AuthorID (SCOPUS): 55036200000

ResearcherID: E-3970-2014

Адрес для переписки: [veranig@yandex.ru](mailto:veranig@yandex.ru)

**ВОЛКОВ Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), декан электроэнергетического факультета Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

SPIN-код: 9950-2158

ResearcherID: F-6987-2014

**ОРЛОВ Александр Игоревич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой электромеханики Марийского государственного университета, г. Йошкар-Ола.

SPIN-код: 9991-5367

AuthorID (SCOPUS): 57196714608

ResearcherID: F-5126-2014

#### Для цитирования

Сидорова В. Т., Волков С. В., Орлов А. И. Метод оптимизации размещения компенсирующих и симметрирующих устройств в электрических сетях низкого напряжения // *Омский научный вестник*. 2024. № 2 (190). С. 69–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-69-76.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023 г.

© В. Т. Сидорова, С. В. Волков, А. И. Орлов

# THE METHOD FOR OPTIMIZING THE PLACEMENT OF COMPENSATING AND BALANCING DEVICES IN LOW VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

The paper studies the optimization features of low-voltage electrical network modes for energy-efficient power transmission. The main features of these networks are the high values of the zero-sequence voltage unbalance factor and the mismatch of voltage values with the necessary requirements. Therefore, balancing the loads by phases and reactive power compensation are chosen as measures to improve the listed network parameters. One of the main factors for the effective solution of this problem is the determination of load balancing points and reactive power compensation, as well as the required power of the devices used. To solve the multicriteria problem of determining device connection points, an analysis of existing objective functions is carried out. As a result, a target function is proposed that includes costs, voltage losses, zero-sequence voltage asymmetry coefficient. When solving the optimization problem with the help of the proposed objective function, the voltage values and the voltage asymmetry factor at the consumer connection points will be within the required limits. The results of a study of the optimization function using the example of a model network are presented. The calculations are carried out in two stages: the search for sensor's nodes, then their study for optimality. All calculations are carried out in the MATLAB environment, taking into account voltage losses and power.

**Keywords:** multicriteria optimization, load balancing, reactive power compensation, voltage unbalance, power quality, power losses.

## References

1. GOST 32144-2013. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya [Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, 2014. 16 p. (In Russ.).
2. Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda [Energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035]. URL: [https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uw10o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document\\_119047.pdf](https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/75c/uw10o12ve2rp8gyo3lndsy7jdr8e6q25/document_119047.pdf) (accessed: 14.06.2023). (In Russ.).
3. Orlov V. V., Orlova E. O. Analiz sposobov simmetrirovaniya napryazheniya v setyakh 0.4/0.23 kV [Analysis of voltage symmetry methods in 0.38/0.22 kV networks] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. *Electricity. Transfer and Distribution*. 2020. No. 2 (59). P. 56–63. EDN: HCXTRQ. (In Russ.).
4. Kubar'kov Yu. P., Kulayev I. S., Alekhin R. A. Optimizatsiya urovney napryazheniya v aktivno-adaptivnykh setyakh s raspredelennoy generatsiyey [Optimization of voltage levels in active-adaptive networks with distributed generation] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskkiye nauki. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2018. No. 3 (59). P. 154–164. EDN: YPDAIP. (In Russ.).
5. Varganova A. V. O metodakh optimizatsii rezhimov raboty elektroenergeticheskikh sistem i setey [About optimization methods of power supply system and network modes] // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. *Bulletin of South Ural State University. Series Power Engineering*. 2017. Vol. 17, no. 3. P. 48–55. DOI: 10.14529/power170309. EDN: ZGQBYH. (In Russ.).
6. Tolba M. A. Kh. Razvitiye metodov optimizatsii razmeshcheniya kompensiruyushchikh ustroystv i vozobnovlyayemoy raspredelennoy generatsii v radial'nykh elektricheskikh setyakh [Development of methods for optimizing the placement of compensating devices and renewable distributed generation in radial electric networks]. Moscow, 2018. 171 p. (In Russ.).
7. Sidorova V. T. Determining Mains Connection Points Charging Stations on RES for Electric Vehicles // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia. 2021. P. 85–89. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446376. (In Engl.).
8. Tul'skiy V. N., Vanin A. S., Tolba M. A. Kh. Optimal'noye razmeshcheniye batarey kondensatorov v radial'noy raspredelitel'noy seti [Optimal capacitor allocations and sizing in radial distribution networks using a novel hybrid particle swarm optimization algorithm] // *Elektrichestvo. Elektrichestvo*. 2017. No. 6. P. 16–23. DOI: 10.24160/0013-5380-2017-6-16-23. EDN: YQFRCZ. (In Russ.).

9. Tretyakov E. A. Sovershenstvovaniye metodov upravleniya peredachey i raspredeleniyem elektroenergii v adaptivnykh sistemakh elektrosnabzheniya statsionarnykh potrebiteley zheleznykh dorog [Improving methods for managing the transmission and distribution of electricity in adaptive power supply systems for stationary railway consumers]. Omsk, 2021. 403 p. (In Russ.).

10. Lykin A. V. Elektricheskiye sistemy i seti [Electrical systems and networks]. Novosibirsk, 2017. 363 p. ISBN 978-5-7782-3037-8. (In Russ.).

11. Abdelaziz A. Y., Ali E. S., Abd-Elazim S. M. Optimal Sizing and Locations of capacitors in radial distribution systems via flower pollination optimization algorithm and power loss index // Engineering Science and Technology an International Journal. 2016. Vol. 19, Issue 1. P. 610–618. DOI: 10.1016/j.jestch.2015.09.002. (In Engl.).

---

**SIDOROVA Vera Tagirovna**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Electromechanics Department, Mari State University, Yoshkar-Ola.

SPIN-code: 1146-4586

AuthorID (SCOPUS): 55036200000

ResearcherID: E-3970-2014

Correspondence address: veranig@yandex.ru

**VOLKOV Sergei Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Electrical Power Engineering Faculty, Mari State University, Yoshkar-Ola.

SPIN-code: 9950-2158

ResearcherID: F-6987-2014

**ORLOV Alexander Igorevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Electromechanics Department, Mari State University, Yoshkar-Ola.

SPIN-code: 9991-5367

AuthorID (SCOPUS): 57196714608

ResearcherID: F-5126-2014

#### For citations

Sidorova V. T., Volkov S. V., Orlov A. I. The method for optimizing the placement of compensating and balancing devices in low voltage electrical networks // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 2 (190). P. 69–76. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-190-69-76.

Received June 21, 2023.

© V. T. Sidorova, S. V. Volkov, A. I. Orlov