

УДК 621.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЗАМКНУТЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМИ  
ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

**OPTIMIZATION BASED ON OPERATING MODES OF CLOSED  
ELECTRIC NETWORKS WITH BOOSTER TRANSFORMERS**

Е.В. Мятлев

Научный руководитель -М.И. Фурсанов, доктор технических наук, профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

[mfursanov@bntu.by](mailto:mfursanov@bntu.by)

M.Myatlev

Supervisor- M. Fursanov, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

***Аннотация:** Первоначальной задачей в электрических сетях является уменьшение потерь мощности и оптимизация режима. Выходом из этой ситуации является применение вольтодобавочных трансформаторов. Рассмотрим пример расчета оптимальной добавочной ЭДС в замкнутой сети. Выполнен анализ суммарных потерь активной мощности в замкнутой сети.*

***Abstract:** The initial task in electrical networks is to reduce power losses and optimize the mode. The way out of this situation is the use of booster transformers. Let us consider an example of calculating the optimal additional EMF in a closed network. The analysis of the total losses of active power in a closed network is carried out.*

***Ключевые слова:** оптимизация, потери мощности, вольтодобавочные трансформаторы, распределение мощностей.*

***Keywords:** optimization, power losses, booster transformers, power distribution.*

**Введение**

В замкнутой электрической сети складывается естественное распределение мощностей, и в общем случае естественное распределение мощностей не будет экономичным, то есть не будет соответствовать минимуму потерь мощности в сети.

**Основная часть**

Предположим, что замкнутый контур в электрической сети образован линиями Л-1 и Л-2 одного напряжения. Провода линий имеют разные сечения. Такая сеть будет неоднородна ( $R_1/X_1 \neq R_2/X_2$ ), и поэтому естественное распределение мощностей не будет экономичным. По линии с меньшим сечением проводов будет протекать по величине мощность больше экономической. Потери мощности и энергии в такой сети больше, чем в однородной [1].

Экономическое распределение мощностей в неоднородной сети можно получить, если на естественное распределение мощностей добавить уравнительную мощность  $S_{ур}$ , равную:

$$S_{ур} = S_1^э + S_1^е, \quad (1)$$

где  $S_1^э$ -мощность по при экономическом распределении мощностей, МВА;

$S_1^e$ -то же при естественном распределении мощностей, МВА;

При наложении уравнивающей мощности  $S_{ур}$  экономическое распределение мощностей установится на всех участках сети. Уравнивающей мощности в замкнутом контуре будет соответствовать уравнивающий ток, который рассчитывается по выражению:

$$I_{ур} = \frac{S_{ур}}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (2)$$

где  $U$ - некоторое среднее напряжение.

Уравнивающий ток в замкнутом контуре можно получить введением дополнительной ЭДС, определяемой как:

$$e_{ур} = I_{ур} \cdot Z_{\Sigma}, \quad (3)$$

где  $e_{ур}$ — дополнительная фазная ЭДС, вызывающая протекание в замкнутом контуре  $I_{ур}$ ;

$Z_{\Sigma}$ - суммарное сопротивление контура.

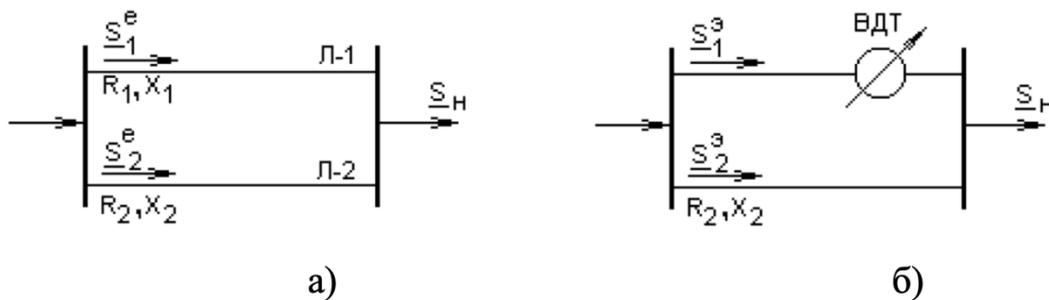


Рисунок 1 -Схема сети

Дополнительная ЭДС будет иметь вещественную и мнимую составляющие:

$$e_{ур} = e'_{ур} + e''_{ур}, \quad (4)$$

Дополнительная ЭДС  $e'_{ур}$  называется продольной ЭДС. Она по фазе совпадает с вектором напряжения сети. Дополнительная ЭДС называется поперечной ЭДС, она повернута относительно вектора напряжения сети на  $90^\circ$ . Продольная ЭДС вводится в контур включением вольтодобавочного трансформатора (ВДТ), осуществляющего продольное регулирование, или с помощью РПН автотрансформаторов связи, если контур образован линиями разного номинального напряжения. Поперечная ЭДС вводится в контур включением ВДТ, имеющего специальное соединение обмоток. Для исследования вопроса, какая из составляющих дополнительной ЭДС больше влияет на перераспределение активных и реактивных мощностей [2].

$$I_{ур} = \frac{e_{ур}}{Z_{\Sigma}} = \frac{e_{ур}}{R_{\Sigma} + j \cdot X_{\Sigma}}, \quad (5)$$

У воздушных линий с большим сечением проводов  $X_{\Sigma} \gg R_{\Sigma}$ , и поэтому приближенно можно записать:

$$I_{ур} \approx \frac{e_{ур}}{j \cdot X_{\Sigma}}, \quad (6)$$

Это уравнение показывает, что, вводя в замкнутый контур, образованный воздушными линиями с большим сечением проводов, продольную ЭДС, перераспределяют, в основном, реактивную мощность, а, вводя поперечную ЭДС - активную мощность.

Рассмотрим пример расчета оптимальной добавочной ЭДС в замкнутой сети, первоначальные данные сведем в таблицу 1.

Таблица 1- Первоначальные данные

$Z_{л1}, \text{Ом}$	$Z_{л2}, \text{Ом}$	$Z_{л3}, \text{Ом}$	$Z_{Т1}, \text{Ом}$	$Z_{Т2}, \text{Ом}$
$6 + j \cdot 21$	$6 + j \cdot 21$	$24 + j \cdot 80$	$2,8 + j \cdot 100$	$1 + j \cdot 50$

Сопротивление линий и трансформаторов приведено к напряжению 220 кВ.

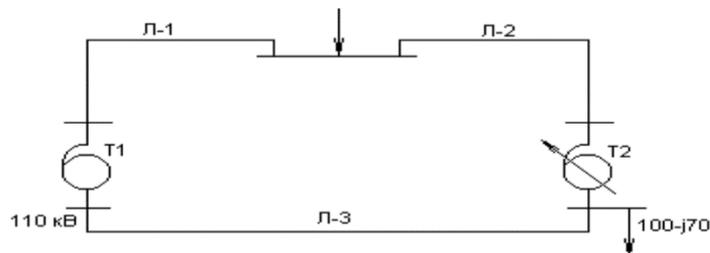


Рисунок 2 -Схема электрической сети

Схема замещения электрической сети будет иметь следующий вид:

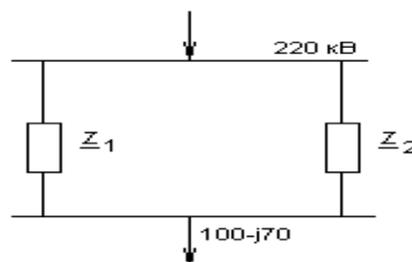


Рисунок 3 -Схема электрической сети

Определим параметры схемы замещения  $Z_1$  и  $Z_2$ :

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{л1} + Z_{Т1} + Z_{л3} = 6 + 2,8 + 24 + j \cdot (21 + 100 + 80) \\ &= 32,8 + j \cdot 201 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$Z_2 = Z_{л2} + Z_{Т2} = 6 + 1 + j \cdot (21 + 50) = 7 + j \cdot 71 \text{ Ом}.$$

Найдем естественное потокораспределение мощности в сети :

$$S_1^e = \frac{S_H \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(100 - j \cdot 70) \cdot (7 + j \cdot 71)}{(32,8 + j \cdot 201) + (7 + j \cdot 71)} = 27 - j \cdot 16,9 \text{ МВА},$$

$$S_2^e = \frac{S_H \cdot Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{(100 - j \cdot 70) \cdot (32,8 + j \cdot 201)}{(32,8 + j \cdot 201) + (7 + j \cdot 71)} = 73 - j \cdot 53,1 \text{ МВА}.$$

Проверим:

$$S_1^e + S_2^e = (27 - j \cdot 16,9) + (73 - j \cdot 53,1) = 100 - j \cdot 70 \text{ МВА}.$$

Найдем экономическое потокораспределение в сети:

$$S_1^э = \frac{S_H \cdot r_2}{r_1 + r_2} = \frac{(100 - j \cdot 70) \cdot 7}{32,8 + 7} = 17,6 - j \cdot 12,3 \text{ МВА},$$

$$S_2^э = \frac{S_H \cdot r_1}{r_1 + r_2} = \frac{(100 - j \cdot 70) \cdot 32,8}{32,8 + 7} = 82,4 - j \cdot 57,7 \text{ МВА}.$$

Проверка:

$$S_1^э + S_2^э = S_H = (17,6 - j \cdot 12,3) + (82,4 - j \cdot 57,7) = 100 - j \cdot 70 \text{ МВА}.$$

Требуемая уравнительная мощность:

$$Z_{ур} = S_1^e - S_1^э = (27 - j \cdot 16,9) - (17,6 - j \cdot 12,3) = 9,4 - j \cdot 4,6 \text{ МВА}.$$

Уравнительный ток в контуре, соответствующий  $S_{ур}$ , определяется:

$$I_{ур} = \frac{S_{ур}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{9,4 - j \cdot 14,6}{\sqrt{3} \cdot 220} \cdot 10^3 = 25 - j \cdot 12,8 \text{ А}.$$

Величина оптимальной ЭДС в контуре определяется:

$$e_{ур} = \frac{S_{ур}}{\sqrt{3} \cdot U_H} \cdot Z_{\Sigma} = (25 - j \cdot 12,8) \cdot (39,8 + j \cdot 272) = 4,341 + j \cdot 6,31 \text{ кВ}.$$

Продольная ЭДС в контуре составит:

$$e'_{ур} = \frac{4,341 \cdot \sqrt{3} \cdot 100}{200} = 3,35 \%,$$

поперечная:

$$e''_{ур} = \frac{6,31 \cdot \sqrt{3} \cdot 100}{200} = 4,9 \%.$$

Как видно из результатов решения, для создания экономического потокораспределения в сети потребуется небольшая ЭДС ВДТ. И вряд ли с экономической точки зрения будет целесообразна установка специального ВДТ с продольно- поперечным регулированием. Поэтому проверим эффективность только продольного регулирования, учитывая то, что продольную дополнительную ЭДС может создать автотрансформатор Т2, имеющий РПН [1].

Уравнительный ток при введении продольной ЭДС, равной 4.34 кВ, определится:

$$I_{ур} = \frac{e'_{ур}}{Z_{\Sigma}} = \frac{4,341}{39,8 + j \cdot 272} = 2,3 - j \cdot 15,6 \text{ А.}$$

Уравнительная мощность:

$$S_{ур} = I_{ур} \cdot \sqrt{3} \cdot U_H = (2,3 - j \cdot 15,6) \cdot \sqrt{3} \cdot 220 = 0,86 - j \cdot 5,8 \text{ МВА.}$$

Тогда

$$S_1^{\partial} = S_1^e - S_{ур} = (27 - j \cdot 16,9) - (0,86 - j \cdot 5,8) = 26,14 - j \cdot 11,1 \text{ МВА,}$$

$$S_2^{\partial} = S_2^e + S_{ур} = (73 - j \cdot 53,1) + (0,86 - j \cdot 5,8) = 73,86 - j \cdot 58,9 \text{ МВА.}$$

Суммарные потери мощностей в сети при естественном потокораспределении составят:

$$\Delta P_{\Sigma}^e = \Delta P_1^e + \Delta P_2^e = \frac{P_1^{2e} + Q_1^{2e}}{U_H^2} \cdot R_1 + \frac{P_2^{2e} + Q_2^{2e}}{U_H^2} \cdot R_2 = \frac{27^2 + 16,9^2}{220^2} \cdot 32,8 + \frac{73^2 + 53,1^2}{220^2} \cdot 7 = 1,87 \text{ МВт,}$$

При введении дополнительной продольной ЭДС:

$$\Delta P_{\Sigma}^{\partial} = \Delta P_1^{\partial} + \Delta P_2^{\partial} = \frac{P_1^{2\partial} + Q_1^{2\partial}}{U_H^2} \cdot R_1 + \frac{P_2^{2\partial} + Q_2^{2\partial}}{U_H^2} \cdot R_2 = \frac{26,14^2 + 11,1^2}{220^2} \cdot 32,8 + \frac{73,86^2 + 58,9^2}{220^2} \cdot 7 = 1,84 \text{ МВт.}$$

### **Заключение**

Исходя из полученных значений можно понять, что при использовании вольтодобавочных трансформаторов снижение потерь мощности в сети составило 0.03 МВт.

### **Литература**

1. Прокопенко В. Г., Фурсанов М. И. Лабораторные работы по курсу “Оптимизация режимов работы энергосистем” для студентов втузов специальности 0302 - “Электрические системы”, Минск 1989.
2. Оптимизация режимов замкнутых сетей [Электронный ресурс]/оптимизация режимов сетей. -Режим доступа: <https://studepedia.org/index.php?vol=3&post=67073/>. – Дата доступа:01.04.2021.