

6. ELECTRICAL PLAN REVIEW. Bulletin EPR-1, November 2002. 45 p.
7. Старикин Б.Я., Азарх В.Л., Рабинович З.М. Асинхронный электропривод очистных комбайнов / М., Недра, 1981. – 288 с.
8. Терёхин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В.Б. Терёхин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.
9. F. Corcoles, J. Pedra, M. Salichs, L. Sainz, "Analysis of the induction machine parameter identification" IEEE Trans. Energy Conversion, Vol 17, No 2, June 2002, pp. 183-190.
10. Ещин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в системе электроснабжения // Электротехника. – 2002. -№1. С.40-43.
11. В.Т.Антипов. Комбайн проходческий КСП-32. Руководство по эксплуатации / Ясиноватский машиностроительный завод, 1999. – 120 с.

□ Автор статьи:

Ещин

Евгений Константинович,  
докт. техн. наук, профессор  
каф. прикладных информа-  
ционных технологий КузГТУ.  
Email: eke@kuzstu.ru

**УДК 621.311:621.314**

**Ф.С. Непша, А.А. Шевченко, В.В. Дабаров**

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЙ УСТРОЙСТВ ВСТРЕЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ФИЛИАЛА ОАО «МРСК СИБИРИ» – «КУЗБАССЭНЕРГО – РЭС»**

Режимы электрических систем, содержащих замкнутые электрические сети различных номинальных напряжений<sup>1</sup>, не являются достаточно экономичными из-за проявления электрической неоднородности [1], т.е. отношение (1) для всех ветвей схемы не выполняется.

$$\frac{R}{X} = \text{const} \quad (1)$$

Для улучшения качества напряжения и повышения экономичности работы электрической сети необходимо выбирать оптимальные значения коэффициентов трансформации, которые в общем случае могут быть комплексными.

Как известно, основными средствами регулирования напряжения путем изменения коэффициентов трансформации являются силовые трансформаторы, снабженные РПН – устройством переключения регулировочных ответвлений под нагрузкой. Данное устройство, встроенное в трансформатор, дает наиболее экономичное решение. При этом коэффициент трансформации представляет собой вещественное число.

Блок оптимизации комплексных

коэффициентов трансформации является одной из частных задач комплексной оптимизации установившихся режимов электрических систем. Его реализация производится с учетом решения, полученного на верхних уровнях алгоритма оптимизации режима. Полученные значения коэффициентов трансформации могут быть положены в основу дальнейших расчетов послеоптимизационных режимов.

При решении задачи оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения трансформаторов минимизируемой функцией, в общем случае, являются суммарные по системе потери активной мощности [2].

Математическая формулировка при этом состоит в определении минимума функции суммарных потерь активной мощности сети:

$$F = \Delta P_{\sum}(K_T) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $K_T$  – коэффициент трансформации регулируемых трансформаторов;  $\Delta P_{\sum}$  – суммарные потери активной мощности сети.

При этом данная задача решается в условиях ограничений по уровням напряжений в узлах сети и по диапазонам регулирования трансформаторов:

$$\Delta U_{i \min} \leq U_i \leq \Delta U_{i \max}, \quad (3)$$

$$K_{T \ min} \leq K_T \leq K_{T \ max}, \quad (4)$$

где  $U$  – вектор напряжений в узлах сети.

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг. (соглашение № 14.B37.21.2073



Рис. 1. Алгоритм создания расчётной модели

Для того чтобы осуществить поиск минимума целевой функции (2) необходимо, прежде всего, создать модель исследуемой энергосистемы. Создание модели исследуемой энергосистемы наиболее удобно производить на базе программного комплекса (ПК) RastrWin3 [3]. Алгоритм создания расчетной модели исследуемой энергосистемы в ПК RastrWin3 представлен на рис. 1.

После создания расчетной модели производится расчет двух режимов: среднего максимума и среднего минимума. Режим среднего максимума создается на основе средних значений потребляемой активной и реактивной мощности за 8 часов с наиболее высокой суммарной нагрузкой исследуемой сети, средний минимум, соответственно, за 8 часов с наименьшей нагрузкой исследуемой сети за сутки.

Режим среднего максимума является базисным для определения глобального минимума целевой функции, т.е. таких положений РПН, ПБВ при которых потери в электрической сети минимальны без учета ограничений. Режим среднего минимума является базисным для проверки выполнения ограничения (3), т.к. именно в минимальном режиме напряжение сильнее всего отклоняется от номинальных значений.

После того, как подготовка расчетных режимов завершена можно приступить непосредственно к оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения трансформаторов. Для этого удобно воспользоваться методом покоординатного спуска.

Суть метода покоординатного спуска заключается в следующем.

Пусть  $n_1$  и  $n_2$  переменные (положения РПН трансформаторов Т-1, Т-2 одной подстанции), по которым осуществляется поиск, а  $\Delta P = f(n_1, n_2)$  – целевая функция, подлежащая оптимизации. Функция  $f(n_1, n_2)$  вычисляется каждый раз, когда выбираются следующие значения  $n_1$  и/или  $n_2$ . Прежде всего, задаются начальными значениями (определяются действующими положениями РПН или ПБВ)  $n_1^{(0)}$  и  $n_2^{(0)}$  и вычисляется значение  $\Delta P = f(n_1^{(0)}, n_2^{(0)})$ . Изменим  $n_1$  на величину некоторого шага  $\Delta n_1^{(i)}$ .

Предположим, что мы увеличили  $n_1$ . Получим  $n_1^{(i)} = n_1^{(0)} + \Delta n_1^{(i)}$ . Вычислим  $\Delta P = f(n_1^{(i)}, n_2^{(0)})$ . Если это значение больше, чем  $\Delta P = f(n_1^{(0)}, n_2^{(0)})$ , то этот шаг бракуется и делается шаг в противоположном направлении  $n_1^{(i)} = n_1^{(0)} - \Delta n_1^{(i)}$ .

Снова вычисляется  $\Delta P = f(n_1^{(i)}, n_2^{(0)})$ . Если оно меньше, чем  $\Delta P = f(n_1^{(0)}, n_2^{(0)})$ , то, очевидно, следует продолжать движение в данном направлении, уменьшая  $n_1$  (координату  $n_1$ ). Величина шага может при этом меняться.

Движение по  $n_1$  продолжается до тех пор, пока  $\Delta P = f(n_1^{(i)}, n_2^{(0)})$  не перестанет уменьшаться или  $n_1$  не достигнет своего предельно допустимого значения. Затем  $n_1$  остается неизменным и равным значению, при котором целевая функция достигла наименьшего значения, и начинает меняться  $n_2$  (координата  $n_2$ ) в направлении, соответствующем уменьшению целевой функции.

Когда возможности  $n_2$  будут исчерпаны, вновь

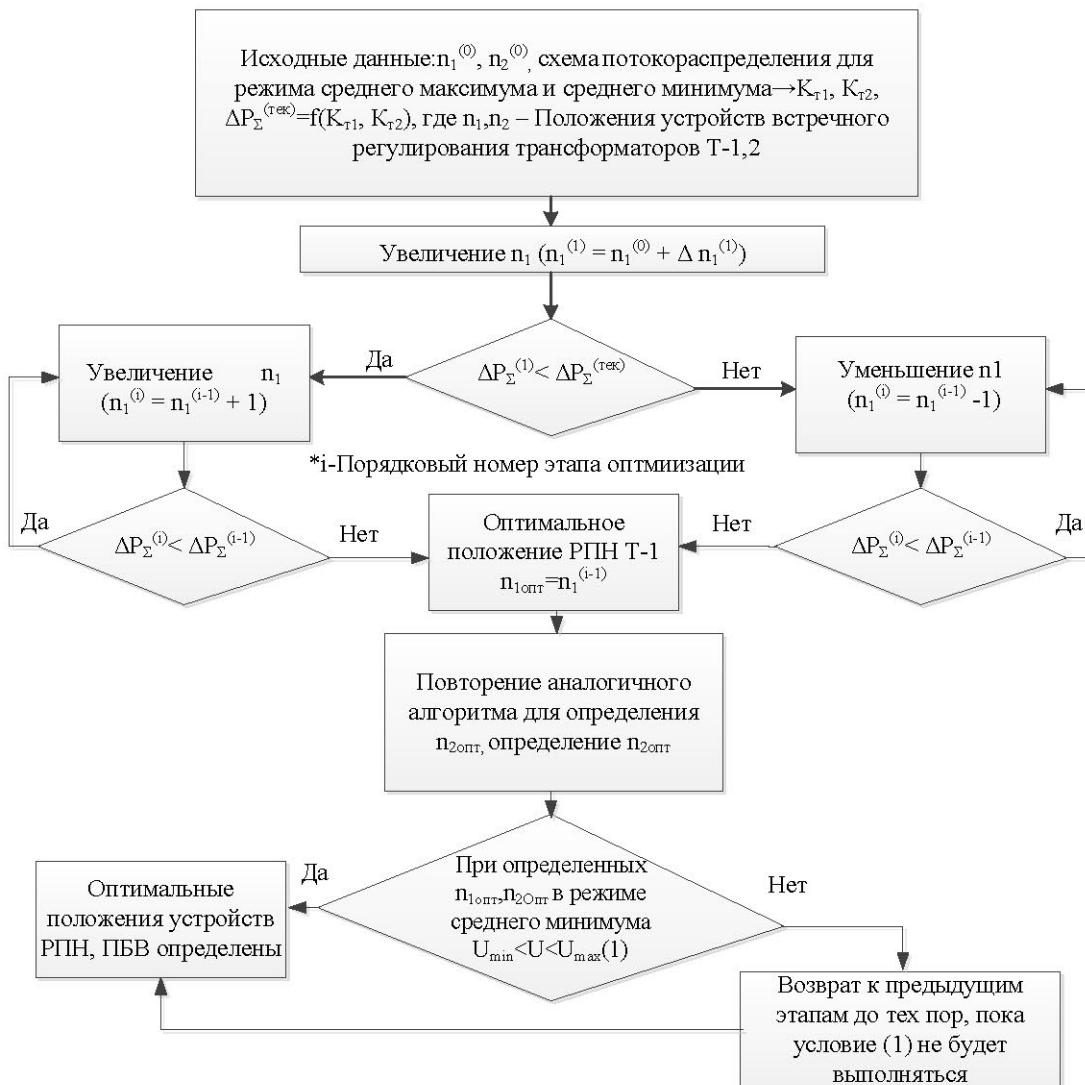


Рис. 2. Метод покоординатного спуска в виде блочного алгоритма для двухтрансформаторной подстанции

переходят к изменению  $n_1$  а потом опять к изменению  $n_2$ . Так поступают, пока целевая функция продолжает уменьшаться. Процесс поиска прекращается, как только  $\Delta P = f(n_1, n_2)$  уже невозможно уменьшить с помощью изменения  $n_1$  и  $n_2$ . После получения глобального минимума в режиме среднего максимума осуществляется проверка ограничения (3) в режиме среднего минимума нагрузок. Если условие не выполняется, то осуществляется возврат к предыдущему шагу.

Также метод покоординатного спуска можно изобразить в виде блочного алгоритма, который представлен на рис. 2.

После определения оптимальных положений устройств встречного регулирования напряжения производится оценка экономического эффекта от снижения потерь активной мощности за различные периоды времени (сутки, месяц, год).

Для оценки эффективности оптимизации положений устройств встречного регулирования на-

прежения, приведенная выше последовательность действий была реализована в рамках распределительной сети 35–110 кВ филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС».

В результате теоретически было показано, что потери активной мощности в распределительной сети 35–110 кВ, путем оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения трансформаторов, можно снизить на 1,45 %. При этом полученное снижение потерь активной мощности в распределительной сети 35–110 кВ достигается в основном за счет сети 35 кВ, где потери активной мощности были снижены на 6,2%.

Для наглядности эффект от оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения представлен на рис. 3, где синим цветом показано распределение потерь активной мощности в течение суток до оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения, а красным – после оптимизации.

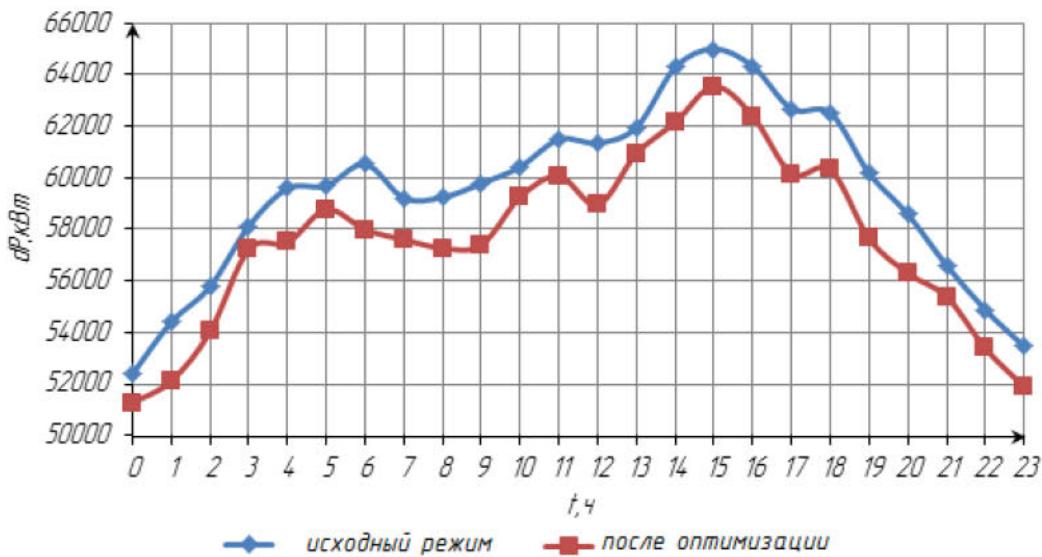


Рис. 3. Активные потери распределительной сети филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС» до и после оптимизации

Возможный экономический эффект от оптимизации текущего режима распределительной сети 35–110 кВ филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС» путем оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения оценивается по формуле:

$$\mathcal{E}_T = (\Delta P_1 - \Delta P_2) \cdot T_a \cdot 8760, \quad (5)$$

где  $\mathcal{E}_T$  – годовая экономия в оплате электроэнергии, кВт;  $\Delta P_1$  – потери активной мощности до оптимизации, кВт;  $\Delta P_2$  – потери активной мощности после оптимизации, кВт;  $T_a$  – тариф на потери активной энергии, руб/кВт·ч, принимается равным 0,99 руб/кВт·ч.

При этом годовая экономия в оплате электроэнергии за счет снижения потерь активной мощности в сетях 35–110 кВ филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС» составила бы

$$\mathcal{E}_T = (59339,99 - 57707,4) \cdot 0,99 \cdot 8760 = 14158 \text{ тыс. руб.}$$

Таким образом, осуществление оптимизации положений устройств встречного регулирования напряжения трансформаторов в рамках распределительных сетей 35–110 кВ филиала ОАО «МРСК Сибири» – «Кузбассэнерго – РЭС» позволило бы снизить потери электрической энергии в сетях на 14,3 млн. кВт·ч в год, что в денежном эквиваленте при средней стоимости потерь активной мощности 0,99 руб/кВт составляет 14158 тыс. руб. за год.

Полученные результаты показывают, что оптимизация положений устройств встречного регулирования трансформаторов является одним из наиболее простых и эффективных методов беззатратной оптимизации электрических режимов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников, В. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В. А. Веников, В. Г. Журавлев, Т. А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
2. Филиппова, Т. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / Т. А. Филиппова, Ю. М. Сидоркин, А. Г. Русина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011 – 401 с.
3. Программный комплекс «RastrWin3». Документация пользователя. – Екатеринбург, 2011 – 236 с.

### □ Авторы статьи:

Непши

Федор Сергеевич,  
– аспирант каф. электроснабжения  
горных и промышленных  
предприятий КузГТУ  
E-mail: nepshafs@gmail.com

Шевченко

Анастасия Александровна  
– ст. преп. каф. электроснабжения  
горных и промышленных  
предприятий КузГТУ, E-mail:  
anastasia-shevchenko@newmail.ru

Дабаров

Владимир Викторович  
– ассистент каф. общей электротех-  
ники КузГТУ  
E-mail: dabarov@gmail.com