

**Ю.Г.Качан, д-р техн.наук, В.В.Дьяченко**

*(Украина, Запорожье, Запорожский национальный технический университет)*

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПО УЗЛАМ ВНУТРИЗАВОДСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ФАКТОРА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Для реализации энергосбережения в системах электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий, каждая из которых характеризуется своим сложившимся высоким уровнем потерь, необходимо использование новых подходов при их создании и развитии [1]. Несовершенство СЭС является одной из главных причин ее низкой энергоэффективности. Структура, конструктивное исполнение элементов системы закладываются на стадии проектирования и, естественно, что фактор энергосбережения должен учитываться уже на данной стадии. При этом предельный учет указанного фактора, на наш взгляд, будет обеспечен, если в качестве критерия эффективности при поиске решений задач проектирования, используется суммарная величина потерь электроэнергии в элементах системы (за какой-то заданный расчетный интервал времени, например, год) [2]. Немаловажным при этом является наличие математической модели, адекватно отражающей суть всех аспектов электроснабжения и собственно задач проектирования СЭС.

Одним из основных вопросов проектирования СЭС является формирование схемы, которое включает в себя распределение электрической нагрузки по узлам сети на всех уровнях иерархии. Сложность этой задачи связана с необходимостью определения условий, влияющих на рациональность связей, (например, количества узлов сети, места их расположения), а также собственным влиянием этих связей на питающий уровень системы. Поиск же этих рациональных связей может осуществляться не только при проектировании, но и в условиях эксплуатации системы. Последующее сопоставления полученного решения с исследуемой СЭС даст возможность путем перераспределения электрических нагрузок по источникам их питания снизить потери электрической энергии в целом.

Рассмотрим задачу формирования схемы внутризаводской сети, основными элементами которой, являются: распределительные узлы (так называемые, распределительные подстанции (РП)); узлы ответвления (либо цеховые ТП, либо высоковольтные электроприемники (ВПЭ)), а также линии электропередачи, как правило, кабельные линии. Каждая такая сеть при этом имеет один или несколько источников питания (ИП), представляющих собой либо ГПП, либо ЦРП с заданными значениями номинального напряжения распределительных устройств и токов короткого замыкания на их шинах.

Суть задачи заключается в поиске оптимальных (минимальных) с точки зрения потерь электроэнергии связей между ИП и РП, что отражается схемой питающей сети, а также между РП и ТП (ВПЭ) – схемой распределительной сети. При этом могут быть случаи непосредственного подключения части или

всех ТП(ВПЭ) к ИП, что обусловлено топологическими и энергетическими показателями объекта проектирования. В зависимости от распределения ТП(ВПЭ) по РП будет различное исполнение их распределительных устройств, обусловленное количеством ячеек, как РП так и ИП, что зависит от количества и мест расположения РП, а также требованиями к обеспечению надежности электроснабжения.

Эффективность схемы внутривозвратной сети с точки зрения энергосбережения будет определяться минимумом суммарных потерь активной электроэнергии ( $W_C$ ) на участках распределительной ( $W_P$ ) и в питающей ( $W_{II}$ ) сетях:

$$W_C = W_P + W_{II} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Введем в формулу (1) булеву переменную  $X_{ij}$ , характеризующую связи между  $i$ -ым ТП(ВПЭ) и  $j$ -ым РП, а также булеву переменную  $X_{jk}$ , соответствующую связям  $j$ -ого РП и  $k$ -ого ИП, тогда модель оптимизации по потерям активной электроэнергии в сети примет вид:

$$W_C = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M w_{ij} \cdot X_{ij} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N w_{jk} \cdot X_{jk} \quad (2)$$

$$i = \overline{1, M}; \quad j = \overline{1, N}; \quad k = \overline{1, K},$$

где  $M$  – количество участков распределительной сети, которое при радиальной схеме подключения определяется количеством ТП(ВПЭ), шт.;

$N$  – количество РП, шт.;

$w_{ij}$  – потери активной электроэнергии на  $ij$ -ом участке распределительной сети, кВт·час/год;

$K$  – количество ИП сети, шт.;

$w_{jk}$  – потери активной электроэнергии на  $jk$ -ом участке питающей сети, кВт·час/год.

Потери активной электроэнергии на  $ij$ -ом участке распределительной сети, вычисляются следующим образом:

$$w_{ij} = 3 \cdot I_{ij}^2 \cdot R_{ij} \cdot \tau_{mai} \cdot 10^{-3} = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{номр}} \cdot R_{0ij} \cdot l_{ij} \cdot \tau_{mai} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где  $I_{ij}$  – расчетная токовая нагрузка  $ij$ -ого участка сети, А;

$R_{ij}$  – сопротивление  $ij$ -ого участка сети, Ом;

$\tau_{mai}$  – число максимума потерь активной мощности  $i$ -ого узла, час.

$P_i$ ,  $Q_i$  – расчетные электрические нагрузки по активной и реактивной мощностям  $i$ -ого ТП (с учетом потерь активной мощности в трансформаторах) или номинальные мощности ВПЭ, кВт и кВАр соответственно;

$U_{номр}$  – номинальное напряжение распределительной сети, кВ;

$R_{0ij}$  – удельное сопротивление проводника  $ij$ -ого участка сети, которое определяется сечением ( $S_{ij}$ , мм<sup>2</sup>) и материалом жилы ( $\rho_{ij}$ , Ом·мм<sup>2</sup>/м):  $R_{0ij} = \rho_{ij}/S_{ij}$ , Ом/м;

$l_{ij}$  – длина участков распределительной сети, обусловленная топологией ТП(ВПЭ) и РП, которая в зависимости от трассы прокладки проводников определяется либо по кратчайшему расстоянию, как:

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (4)$$

либо

$$l_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (5)$$

при прокладке трассы проводников по периметрам зданий,

где  $(x_i, y_i)$  – координаты размещения  $i$ -ого ТП(ВПЭ) в плане сети, м;  
 $(x_j, y_j)$  – координаты РП, м.

Аналогично определяются потери в питающих участках сети при номинальном напряжении питающей сети ( $U_{номп}$ ):

$$w_{jk} = 3 \cdot I_{jk}^2 \cdot R_{jk} \cdot \tau_{maj} \cdot 10^{-3} = \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_{номп}^2} \cdot R_{0jk} \cdot l_{jk} \cdot \tau_{maj} \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Здесь указаны параметры, характеризующие энергетические ( $P_j, Q_j$ ), конструктивные ( $\rho_{jk}, S_{jk}$ ) и топологические ( $x_k, y_k$ ) показатели питающей сети, при этом нагрузки ( $P_j, Q_j$ ) могут быть вычислены одним из применяемых аналитических методов в теории электроснабжения, например, методом коэффициента спроса.

Подставляя в формулу (2) вышеописанные переменные получим модель, позволяющую оптимизировать потери электроэнергии во внутриводской сети, которая к тому же учитывает два уровня схемы – питающий и распределительный, что и отражает иерархичную особенность системы:

$$W_C = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{номп}^2} \cdot R_{0ij} \cdot l_{ij} \cdot \tau_{mai} \cdot 10^{-3} \cdot X_{ij} + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \frac{P_j^2 + Q_j^2}{U_{номп}^2} \cdot R_{0jk} \cdot l_{jk} \cdot \tau_{maj} \cdot 10^{-3} \cdot X_{jk}. \quad (7)$$

Таким образом при заданных параметрах, (а именно: координат размещения ИП –  $(x_k, y_k)$ , РП –  $(x_j, y_j)$  и ТП(ВПЭ) –  $(x_i, y_i)$ , конструктивного исполнения сети (материала жилы) –  $(\rho_{ij}, \rho_{jk})$ , номинальных напряжений сетей –  $(U_{номп}, U_{номр})$  электрических нагрузок ТП(ВПЭ) –  $(P_i, Q_i)$ , а также сечений проводников –  $(S_{ij}, S_{jk})$ , соответствующих техническим требованиям (например,

условию выбора сечений по термической стойкости к токам короткого замыкания), оптимизируя функцию (7), можно вычислить оптимальное распределение ТП(ВПЭ) по РП и РП по ИП с точки зрения минимума потерь активной электроэнергии в целом по сети.

Очевидно, что данная задача имеет тесную связь с другими проблемами синтеза СЭС. Например, на ее решение будут оказывать влияние количество РП и их размещение, конструктивное исполнение и номинальные напряжения сети и др. В дальнейшем выделение влияющих параметров позволит комплексно подойти к решению всех задач построения СЭС и синтезировать обобщенную модель, адекватно отражающую техническую суть реализации системы с учетом фактора энергосбережения.

Для задачи формирования схемы внутриводской сети такими параметрами являются:

- количество ТП, номинальная мощность их трансформаторов, координаты размещения ТП и их электрические нагрузки, что обусловлено проблемой распределения электрических нагрузок до 1000В по ТП;

- величины электрических нагрузок по реактивной мощности, которые определяются решением вопроса компенсации реактивной мощности, а именно выбором мощности и способа подключения компенсирующих устройств;

- координаты мест расположения РП, обусловленные задачей расстановки в плане сети ее узлов, решение которой в свою очередь влияет на выбор сечений участков распределительной сети;

- номинальное напряжение сети;

- мощности источников питания, которые влияют на значения токов короткого замыкания на шинах распределительного устройства ИП, и определяют условия выбора сечений питающих участков сети.

Перечисленные параметры имеют определенный диапазон варьирования в зависимости от объекта проектирования и номенклатуры конструктивного исполнения элементов сети. Этот диапазон и будет определять множество решений рассматриваемой задачи. Комплексный подход здесь, на наш взгляд, будет заключаться в дальнейшем поиске алгоритма воздействий всех допустимых с технической точки зрения варьируемых параметров на показатели сети, в том числе и потери электрической энергии.

На наш взгляд, полученная при этом обобщенная модель потерь электроэнергии системы в целом будет иметь алгоритмическую структуру, состоящую из вычислительных блоков, в которую будет входить и блок формирования схемы внутриводской сети, результатом работы, которого является  $X_{ij}$ , и  $X_{jk}$  и соответствующие этим связям технические параметры сети.

Для получения указанных решений, воспользуемся методикой задачи разбиения множества приемников электроэнергии  $G$  промышленного объекта на  $s$  группы по источникам питания [3], где качество группировки любой части множества  $G$  оценивается суммарным показателем разброса нагрузок в группах:

$$F = \sum_j^s \sum_i^{m_j} P_i ((x_i - \xi_j)^2 + (y_i - \eta_j)^2), \quad (8)$$

где  $P_i$  – электрическая нагрузка  $i$ -ого электроприемника с координатами  $(x_i, y_i)$ ;

$(\xi_j, \eta_j)$  – искомые координаты мест расположения источника питания.

Корректно с точки зрения потерь электроэнергии воспользоваться не электрическими нагрузками, а удельными потерями активной электроэнергии ( $w_i$ ), принимая во внимание то, что сечение распределительной сети выше 1000В, а следовательно и сопротивление, обусловлено как правило не нагрузкой, а значениями тока короткого замыкания на шинах источника питания. При получении промежуточных решений по указанному критерию группировки обязательно учитываются изменения и в питающих участках сети, которые оцениваются для последующего выбора группировки. Указанный расчет вычислительного блока реализован на языке С++ и выполнен в виде инженерного приложения Windows RP.bpr.

Результаты анализа фрагмента системы электроснабжения металлургического комбината на предмет рациональности связей между тремя РП-10 кВ и двадцати тремя двухтрансформаторными ТП 10/0,4 кВ с электрическими нагрузками в диапазоне от 240 до 1880 кВА, расположенными в зоне общей площадью до 1,7 кв.км с помощью указанного подхода, показал, что перераспределение этих ТП по РП, позволит снизить потери активной энергии до 18%.

**Вывод.** Предельный учет фактора энергосбережения при формировании схемы внутриводской сети обеспечивается использованием в качестве критерия эффективности – суммарной величины потерь активной электроэнергии в элементах сети. Получена математическая модель, которая позволяет оптимизировать потери электроэнергии во внутриводской сети и учитывает иерархичную структуру системы относительно группы распределительных узлов выше 1000В. Представленная модель также позволяет выявить все влияющие на решение задачи параметры, перечень которых даст возможность в дальнейшем синтезировать обобщенную алгоритмическую модель потерь электроэнергии системы в целом. Разработано программное обеспечение задачи формирования схемы внутриводской сети, которое реализовано на языке С++ и выполнено в виде инженерного приложения Windows RP.bpr. Представленный подход оценки качества распределения нагрузок по узлам сети был апробирован на ряде промышленных предприятий (их системах электроснабжения), который показал, что в рамках данной задачи имеются резервы экономии электроэнергии до 30%.

#### Список литературы:

1. Міжнародна науково-технічна конференція «Енергоефективність – 2002»: Тези доповідей / Редактори В.А. Жовтянський і Б.С. Стогній. – К.: Навчальна книга, 2002. – 192 с.

2. Качан Ю.Г., Дьяченко В.В. Об оценке потенциала энергосбережения в системах электроснабжения промышленных предприятий //Інтегровані технології та енергозбереження // Щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків:Н:НТУ «ХП», 2005. – №2. – С.154-156.
3. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию /Под общ.ред. Федорова А.А. Т2. Электрооборудование. – М.:Энергоатомиздат, 1987. – 592 с.