

### 3. ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

#### 3.1. АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ЗАТРАТ НА ОПЛАТУ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Кумаритов А.М., д.т.н, профессор кафедры «Информационные системы в экономике», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет);  
Хомяков А.В., ассистент кафедры внутризаводского электрооборудования и автоматики, Армавирский механико-технологический институт (филиала Кубанского государственного технологического университета)

В статье предложена новая методика определения затрат на оплату потребления реактивной мощности промышленным предприятием, алгоритм работы автоматической системы управления режимом реактивной мощности на промышленном предприятии и решение задачи оптимизации режимов реактивной мощности для промышленных систем электроснабжения. Результаты проведенных исследований подтверждают эффективность применения установок компенсации реактивной мощности в узле нагрузки и показывают, что их применение даже в условиях действующих тарифов позволяет существенно снизить плату за потребленную электроэнергию и ее потери в системе электроснабжения.

Потери электрической энергии в системе электроснабжения ведут к дополнительным экономическим затратам и отрицательно сказываются на качестве электрической энергии.

Компенсация реактивной мощности – вот путь к уменьшению потерь в системе электроснабжения больших и малых промышленных предприятий. Значительное количество реактивной мощности в настоящее время генерируется источниками освещения (люминесцентными лампами), нелинейной нагрузкой, системами приточно-вытяжной вентиляции и кондиционирования. Кроме того, качество электрической энергии на предприятиях и в офисных зданиях, как правило, не соответствует требованиям ГОСТ. Все это: и повышенная потребляемая из сети реактивная мощность, и снижение качества напряжения, влечет за собой дополнительные расходы на оплату электроэнергии и ремонт выходящего из строя технологического оборудования.

Для минимизации потерь с целью улучшения использования электрической энергии в условиях ограничений на максимальную потребляемую мощность большая роль отводится новым техническим средствам и системам управления, позволяющим улучшить энергетические характеристики: повысить  $\cos(\varphi)$  до заданных значений, уменьшить содержание гармоник в питающем напряжении, а также упрощающим проведение мониторинга сети.

Компенсацию реактивной мощности в полной мере можно отнести к энергосберегающим технологиям. Повышение  $\cos(\varphi)$  позволяет уменьшить потребление из сети активной и реактивной энергии и увеличить за счет разгрузки по мощности срок службы оборудования.

Задача компенсации реактивной мощности заключается в оптимизации управления режимами реактивной мощности в узле нагрузки. Поэтому обоснованный учет и управление потреблением и распределением реактивной мощности в электрических сетях является весьма важным.

В результате тщательного изучения процесса компенсации реактивной мощности установлено, что наилучший эффект компенсации имеется при автоматическом регулировании мощности конденсаторных установок.

Главной целью любой системы автоматического регулирования мощностью конденсаторной установки является устранение недостатков ручного управления, вследствие чего автоматическое управление обладает рядом преимуществ, основные из которых: отсутствие обслуживающего персонала, отслеживание потребления реактивной мощности предприятием и регулирование мощности комплектной конденсаторной установкой (ККУ), достаточно плавное регулирование (по сравнению с ручным режимом). Однако все блоки автоматики имеют свои достоинства и недостатки.

Методология компенсации реактивной мощности нагрузки потребителей в целом и отдельных электроприемников в частности рассматривалась, начиная с 1930-х гг. [1], и на всех этапах ее развития предусматривалось взаимодействие потребителей электроэнергии с энергоснабжающими организациями. Однако наиболее полно и последовательно задача компенсации реактивной мощности рассматривалась, исходя из интересов энергосистем для снижения потерь мощности в сетях и управления режимами их работы [2, 5, 6]. При этом экономическое стимулирование установок компенсирующих устройств в системах электроснабжения промышленных предприятий осуществлялось с помощью скидок и надбавок к тарифам на активную электроэнергию.

Основной режимного взаимодействия потребителей с энергосистемами в части реактивной мощности явились «экономические» значения реактивной мощности и энергии в узлах нагрузки, которые определяются расчетом [3] и указываются в договорах на пользование электроэнергией.

Однако, начиная с 1990-х гг., в Российской Федерации, Белоруссии и других странах Содружества Независимых Государств в связи со спадом производства произошло значительное снижение потребления активной и реактивной мощности и энергии, которое привело к снижению нагрузки основных сетей (330-750 кВ) энергосистем и повышению напряжения в этих сетях. Повышения напряжения происходит из-за избытка реактивной мощности в энергосистемах, так как воздушные линии 330-750 кВ являются мощными источниками реактивной мощности. Из-за недостаточного оснащения линий электропередач реакторами стали искать пути увеличения потребления реактивной мощности потребителями. Для этого в ряде энергосистем РФ были отключены все компенсирующие устройства, что по ряду узлов нагрузки 6-10 кВ привело к увеличению потребления реактивной мощности и энергии почти в два раза. Передача столь больших потоков реактивной мощности и энергии по сетям приводит к значительным потерям активной энергии. В таких условиях ком-

пенсация реактивной мощности нагрузки становится взаимовыгодным средством снижения потерь электроэнергии [3].

Для оценки влияния режимов реактивной мощности на эффективность работы систем электроснабжения предприятий необходимо учесть их индивидуальные способности: напряжение внешнего электроснабжения, графики нагрузки, тарифную систему при оплате электроэнергии. Рассмотрим влияние этих факторов на примере промышленного предприятия ШАТЛ (г. Армавир).

Внешнее электроснабжение предприятия «ОАО» ШАТЛ осуществляется по кабельной линии напряжением 6 кВ. На территории предприятия находится понижающий трансформатор мощностью 1000 кВА. Предприятие относится ко второй категории потребителей, поэтому для обеспечения требуемой надежности электроснабжения предусмотрено резервирование по высокой и по низкой стороне. Внутреннее электроснабжение предприятия выполнено по радиальной схеме (рис. 1).

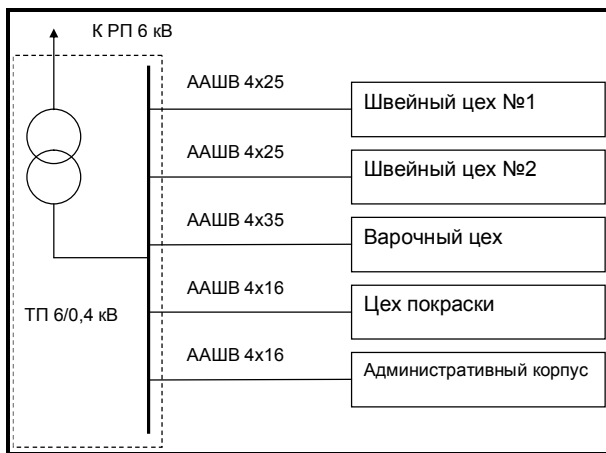


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения предприятия ШАТЛ

Основными потребителями электрической энергии на предприятии являются асинхронные трехфазные и однофазные двигатели, однофазная осветительная нагрузка общего и местного назначения, трехфазные и однофазные нагревательные элементы.

Затраты предприятия на оплату потребления реактивной мощности можно представить как сумму трех составляющих:

$$Z(Q) = Z_c(Q) + Z_n(Q) + Z_{и}(Q) \quad (1)$$

где

$Z_c(Q)$  – стоимость реактивной мощности, потребленной из энергосистемы, руб.;

$Z_n(Q)$  – стоимость потерь активной мощности в распределительной сети предприятия от протекания по ней реактивной мощности, руб.;

$Z_{и}(Q)$  – стоимость потерь активной мощности в источнике реактивной мощности, руб.

Схема электроснабжения предприятия «ШАТЛ» представлена на рис. 2.

Стоимость потребления реактивной энергии из энергосистемы за единицу времени (1 ч) определяется величиной реактивной мощности от энергосистемы  $Q_c$  и тарифом на реактивную энергию  $C_p$ :

$$Z_c = Q_c * C_p \quad (2)$$

Стоимость потерь активной мощности в системе электроснабжения предприятия можно представить в следующем виде:

$$Z_n = \left( \frac{R_{кл1}}{U_c^2} * Q_c^2 + \frac{R_T + R_{кл2}}{U_c^2} * Q_T^2 \right) * 10^{-3} * C_A, \quad (3)$$

где

$R_{кл1}, R_{кл2}$  – активное сопротивление линии от распределительного устройства до шин распределительного пункта, Ом;

$R_T$  – активное сопротивление трансформатора, Ом;

$Q_c$  – реактивная мощность, потребляемая из сети, кВар;

$Q_T$  – мощность, протекающая через трансформатор, кВар;

$U_c$  – номинальное напряжение распределительной сети, кВ;

$C_A$  – тариф на активную энергию, руб.

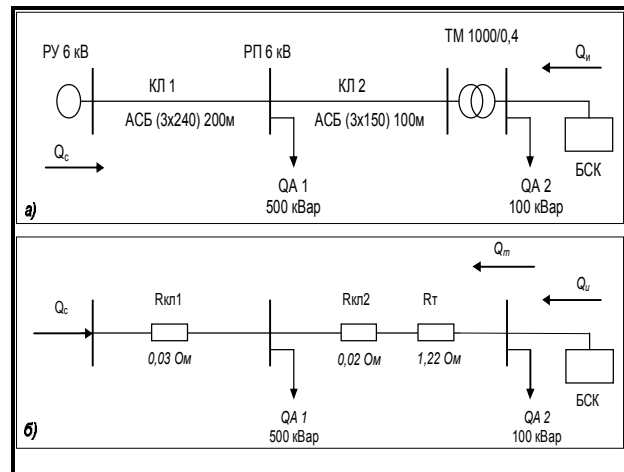


Рис. 2. Схема электроснабжения предприятия ШАТЛ (а) и схема замещения (б)

Стоимость потерь активной мощности в самом источнике реактивной мощности:

$$Z_{и} = (A_{и} * Q_{и}^2 + B_{и} * Q_{и}) * C_A, \quad (4)$$

где

$Q_{и}$  – реактивная мощность источника, кВар;

$A_{и}$  – удельные квадратичные потери в источнике реактивной мощности, кВт/кВар<sup>2</sup>;

$B_{и}$  – удельные потери активной мощности в источнике реактивной мощности, кВт/кВар;

$C_A$  – тариф на активную энергию, р.

Обозначим:

$$A_c = \frac{R_{кл1}}{U_c^2} * 10^{-3}; \quad (5)$$

$$A_T = \frac{R_{кл2} + R_T}{U_c^2} * 10^{-3}.$$

где  $A_c, A_T$  – удельные квадратичные потери в линии и трансформаторе, соответственно, кВт/кВар<sup>2</sup>.

Тогда общие затраты можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} Z &= C_p * Q_c + C_A * A_c * Q_c^2 + C_A * A_T * Q_T^2 + \\ &+ C_A * A_{и} * Q_{и}^2 + C_A * B_{и} * Q_{и} = \\ &= \frac{1}{C_A} \left( B_{эс} * Q_c + A_c * Q_c^2 + \right. \\ &\left. + A_T * Q_T^2 + A_{и} * Q_{и}^2 + B_{и} * Q_{и} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $B_{эс}$  – удельные потери активной мощности в системе электроснабжения, кВт/кВар.

Из условия баланса мощностей имеем:

$$\begin{cases} Q_c = Q_{A1} + Q_{A2} - Q_{и} = Q_A - Q_{и}; \\ Q_T = Q_{A2} - Q_{и}. \end{cases} \quad (7)$$

Тогда перепишем выражение для суммарных затрат как функцию реактивной мощности источника  $Q_{и}$ :

$$Z(Q_{и}) = \frac{1}{C_A} * \left( B_{эс} (Q_A - Q_{и}) + A_c (Q_A - Q_{и})^2 + \right. \\ \left. + A_T (Q_{и} - Q_{A2})^2 + A_{и} Q_{и}^2 + B_{и} Q_{и} \right) \quad (8)$$

или

$$Z(Q_{и}) = A * Q_{и}^2 + B * Q_{и} + Z_0, \quad (9)$$

где

$A$  – удельные квадратичные затраты, обусловленные потерями активной мощности в элементах системы электроснабжения при перетекании реактивной мощности от источника, руб./кВар<sup>2</sup>:

$$A = \frac{A_c + A_T + A_{и}}{C_A};$$

$B$  – удельные затраты на генерацию реактивной мощности руб./кВар:

$$B = \frac{B_{и} - C_P - 2 * A_c * Q_A - 2 * A_T * Q_{A2}}{C_A};$$

$Z_0$  – затраты, которые будет нести предприятие при отсутствии источника реактивной мощности, руб.:

$$Z_0 = \frac{C_P * Q_A + A_c * Q_A^2 + A_T * Q_{A2}^2}{C_A}. \quad (10)$$

Знак коэффициента  $B$  определяет выгоден или нет источник реактивной мощности и зависит от:

- удельных потерь активной мощности в источнике реактивной мощности и системе электроснабжения;
- удельных квадратичных потерь в элементах системы электроснабжения предприятия;
- величины суммарной реактивной нагрузки предприятия и реактивной нагрузки в его узлах, также их потокораспределения в элементах системы электроснабжения.

На рис. 3 показана графическая зависимость затрат и их составляющих (в относительных единицах при  $Z_0 = 1$ ) от величины реактивной мощности батарей статических конденсаторов, построенная в результате расчетов для промышленного предприятия «ШАТЛ».

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что уменьшение затрат предприятия при компенсации реактивной мощности нагрузки по сравнению с ее отсутствием имеет место до определенного значения  $Q_{пр}$ , при котором стоимость скомпенсированной реактивной мощности равна стоимости потерь активной мощности в элементах системы электроснабжения. Применение источников реактивной энергии большей мощности, чем  $Q_{пр}$ , приводит к убыткам от компенсации реактивной мощности для предприятия.

Функция затрат имеет минимум при значении мощности источника питания  $Q_{и, опт}$ , которое определяется при дифференцировании  $dZ(Q_{и}) / d(Q_{и})$ :

$$Q_{и, опт} = \frac{dZ(Q_{и})}{d(Q_{и})} = -\frac{B}{2 * A}. \quad (11)$$

Несмотря на то, что расчеты проведены для конкретного предприятия, зависимости, представленные на рис. 3, носят обобщенный характер и отражают влияние различных факторов на эффективность компенсации

реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий. Но надо учесть, что в течение суток реактивная нагрузка предприятий и его узлов меняется. В связи с этим поддержание оптимального режима реактивной мощности в системе электроснабжения предприятия может обеспечить только автоматизированная система, управляющая работой источников реактивной мощности.

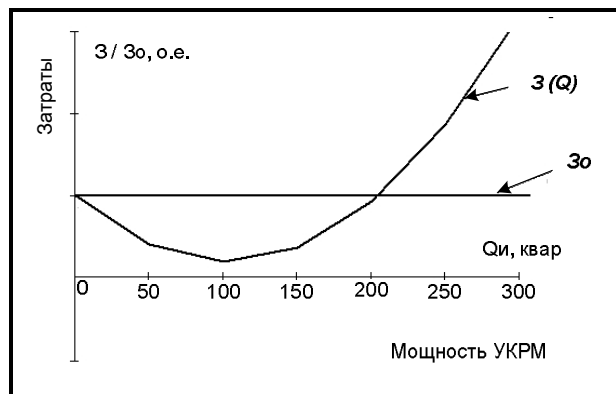


Рис. 3 Зависимость затрат от степени компенсации реактивной мощности

Ниже приведен график потребления реактивной мощности на промышленном предприятии ШАТЛ построенный по данным выборки с 16 ноября 2009 г. по 17 ноября 2009 г. (рис. 4).

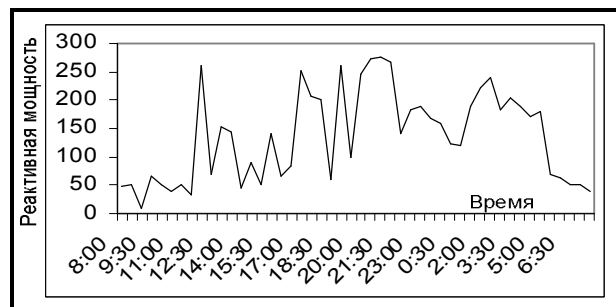


Рис. 4. График потребления реактивной мощности на предприятии ШАТЛ с 16 ноября 2009 г. по 17 ноября 2009 г.

Управление мощностью источников реактивной энергии на промышленных предприятиях, как было описано выше, осуществляется либо дежурным персоналом, либо устройствами автоматического управления, контролирующими реактивный или полный ток узла нагрузки, к которому они подключены. Такой режим работы источников реактивной мощности не является оптимальным.

Задача оптимизации режимов реактивной мощности для промышленных систем электроснабжения усложняется тем, что распределительные сети предприятий имеют многоуровневую систему электроснабжения [4] с общими участками транзита электроэнергии. Это видно из схемы электроснабжения промышленного предприятия «ШАТЛ».

Это значит, что задача оптимизации режимов работы источников реактивной мощности в системах промышленных предприятий усложняется и требует комплексного подхода к своему решению. При расчете оптимальных режимов нагрузок кроме факторов, указанных

выше, необходимо учитывать конфигурацию электрической сети и отличия характеристик источников реактивной мощности.

При внедрении на предприятиях автоматизированных систем управления источниками реактивной мощности, охватывающих всю систему электроснабжения предприятий, встает вопрос о разработке универсальных алгоритмов управления источниками реактивной мощности, которые могут быть легко адаптированы для различных схем электроснабжения.

Пусть имеем многоуровневую систему электроснабжения, содержащую  $M$  ветвей и  $N$  узлов. В узлах сети имеются  $L$  реактивных нагрузок  $Q_A$  и  $K$  источников реактивной мощности  $Q_{И}$  (рис. 5). Каждый источник реактивной мощности характеризуется стоимостью генерируемой им мощности  $C_P$ . Стоимость активной энергии, потребляемой из энергосистемы, равна  $C_A$ .

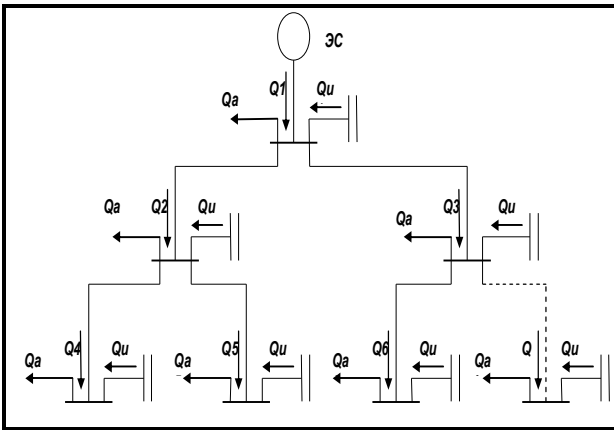


Рис. 5. Схема многоуровневой распределительной сети

Найдем значения реактивных мощностей источников реактивной энергии, при которых будет иметь место минимум затрат на оплату реактивной мощности и потерь активной мощности в сети.

Суммарные затраты определяются как сумма стоимостей потерь в линиях, потерь в источниках реактивной мощности и стоимости потребляемой мощности от каждого источника реактивной энергии, что математически можно записать в виде функции:

$$Z(Q_1...Q_M, Q_{И1}...Q_{ИK}) = \sum_{i=1}^M C_A * A_i * Q_i^2 + \sum_{j=1}^K C_A * A_{Иj} * Q_{Иj}^2 + \sum_{j=1}^K C_A * B_{Иj} * Q_{Иj} + \sum_{j=1}^K C_P * Q_{Иj}, \quad (12)$$

где

$A_i$  – удельные квадратичные потери активной мощности в линии, кВт/кВар<sup>2</sup>;

$Q_i$  – реактивная мощность в  $i$ -ветви, кВар;

$Q_{Иj}$  – реактивная мощность  $j$ -го источника, кВар;

$A_{Иj}$  – удельные квадратичные потери активной мощности в  $j$ -м источнике, кВт/кВар<sup>2</sup>;

$B_{Иj}$  – удельные потери активной мощности в  $j$ -м источнике, кВт/кВар.

Уравнения, связывающие между собой переменные  $Q_{Иj}$  и  $Q_i$ , определяются первым законом Кирхгофа и имеют вид:

$$\sum_{n=1}^N (Q_{Иn} - Q_{An}) = 0, \quad (13)$$

где

$Q_{Иn}$  – реактивная мощность источников реактивной энергии в узле нагрузки, кВар;

$Q_{An}$  – потребляемая реактивная мощность узла нагрузки, кВар.

Для поиска минимума функции суммарных затрат используем метод множителей Лагранжа. Вспомогательная функция (функция Лагранжа) имеет вид:

$$Z(Q_1...Q_M, Q_{И1}...Q_{ИK}, \lambda_1... \lambda_L) = \sum_{i=1}^M C_A * A_i * Q_i^2 + \sum_{j=1}^K C_A * A_{Иj} * Q_{Иj}^2 + \sum_{j=1}^K C_A * B_{Иj} * Q_{Иj} + \sum_{j=1}^K C_P * Q_{Иj} + \lambda * \sum_{n=1}^N (Q_{Иn} - Q_{An}). \quad (14)$$

Взяв частные производные  $dZ / dQ_i$ ,  $dZ / dQ_{Иj}$  и граничные условия, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} dZ/dQ_i = \sum 2 * C_A * A_i * Q_i + \sum \lambda_i; \\ dZ/dQ_{Иj} = \sum 2 * C_A * A_{Иj} * Q_{Иj} + \sum (C_A * B_{Иj} + C_P) + \sum \lambda_i; \\ \sum (Q_{Иj} - Q_{An}) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

В матричном виде система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} 2 * C_A * [A_B] & 0 & 1 \\ 0 & 2 * C_A * [A_{И}] & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Q_B \\ Q_{И} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -B_{И} * C_A - C_P \\ Q_A \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Матрица коэффициентов системы уравнений имеет явно выраженную блочную структуру и состоит из следующих блоков:

$2 * C_A * [A_B]$  – диагональная матрица удельных приростов издержек на потери в электрической сети размерности  $M \times M$ ;

$2 * C_A * [A_{И}]$  – диагональная матрица удельных приростов потерь в синхронных двигателях на компенсацию реактивных мощностей в узле электрической сети размерности  $K \times K$  (для конденсаторов значения равны нулю).

Столбец неизвестных системы уравнений имеет следующую структуру:

$Q_B$  – столбец реактивных мощностей в ветвях сети  $Q_i$ ;

$Q_{И}$  – столбец реактивных мощностей источников реактивной энергии  $Q_{Иj}$ ;

$\lambda$  – столбец неопределенных множителей Лагранжа.

Столбец свободных членов системы уравнений имеет следующую структуру:

$B_{И}$  – столбец коэффициентов потерь в источнике реактивной мощности прямо пропорциональных генерируемой реактивной мощности;

$Q_A$  – столбец реактивных нагрузок в узлах электрической сети.

Решение системы линейных уравнений позволяет определить значения реактивных мощностей для каждого из источников, включая и энергосистему, при которых издержки на компенсацию реактивной мощности

в распределительной сети и ее элементах будут минимальны.

При реализации систем управления источниками реактивной мощности на предприятии их работа должна осуществляться по алгоритму.

1. Ввод массива располагаемых источников реактивной мощности  $Q_{ij}$ .
2. Ввод массива параметров схемы замещения  $A_{ij}$ .
3. Ввод значений реактивных мощностей в линиях электропередач  $Q_i$ .
4. Определение текущей тарифной зоны и выбор соответствующих тарифов на активную  $C_A$  и реактивную  $C_P$  мощность.
5. Расчет вектора оптимальных значений реактивной мощности источников по функции суммарных затрат  $Q_{i(опт)}$ .
6. Выдача управляющих сигналов на источники реактивной мощности.
7. Сравнение напряжения сети с допустимым отклонением. Если  $U_c < U_{доп}$ , то продолжать расчет. Если  $U_c > U_{доп}$ , то выдать сигналы управления напряжением в узле нагрузки.

Регулирование напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий имеет свои особенности. Распределительные сети 6-10 кВ предприятий и цеховые электрические сети 0,4 кВ имеют небольшую протяженность и в связи с этим тесную связь между напряжением на зажимах электроприемников и в отдельных точках сети с регулированием напряжения в центре питания (центральная распределительная подстанция, главная понизительная подстанция).

Ниже приведена блок-схема алгоритма автоматического управления режимом реактивной мощности на промышленном предприятии (рис. 6).

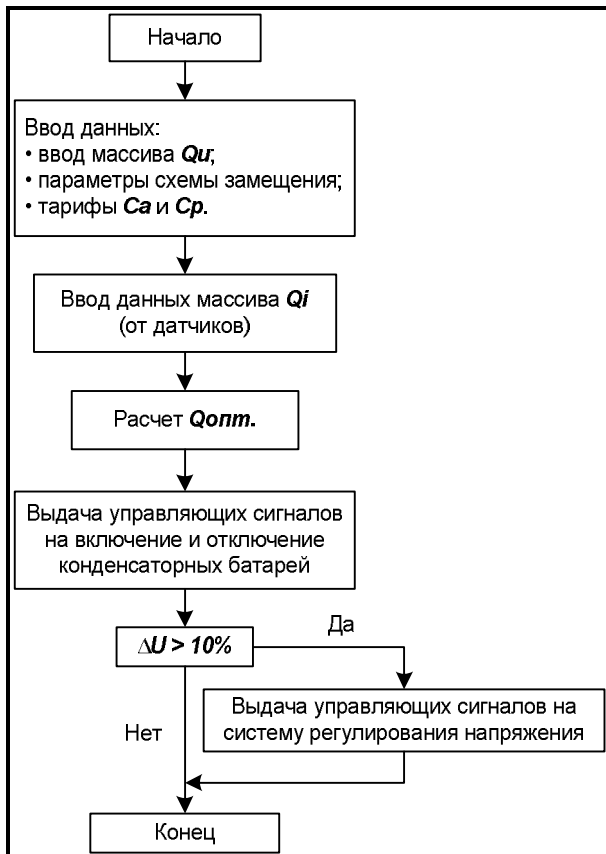


Рис. 6. Алгоритм работы автоматической системы управления режимом реактивной мощности на промышленном предприятии

Для реализации алгоритма оптимального управления источниками реактивной мощности автоматизированная система должна располагать следующим нижеперечисленным информационным обеспечением по системе электроснабжения управляемого объекта.

1. По системе электроснабжения управляемого объекта:
  - параметры схемы замещения электрической сети;
  - точки подключения источников реактивной мощности в распределительной сети;
  - номинальное напряжение сети.
2. По системе электропотребления:
  - тарифы на активную  $C_A$  и реактивную электроэнергию  $C_P$ ;
  - временные интервалы тарифных зон суток и соответствующие им коэффициенты изменения стоимости электроэнергии.
3. По источникам реактивной мощности:
  - технические характеристики: мощность батарей статических конденсаторов, количество ступеней и их значение, номинальные параметры  $Q_H$  и  $\cos\phi_H$  для синхронных двигателей;
  - экономические показатели: коэффициенты потерь в двигателях  $A$  и  $B$ , удельные потери активной мощности в батареях статических конденсаторов.

Реализация предложенного алгоритма требует достаточно высоко вычислительных ресурсов для управляющей машины. Измерение параметров режима электрической сети и потоков мощностей может быть осуществлено на базе систем технического учета электроэнергии при подключении необходимых приборов учета в соответствующих точках схемы электроснабжения (счетчиков активной и реактивной энергии, трансформаторов тока и напряжения).

Покажем работу системы управления мощностью компенсирующих устройств на примере предприятия ШАТЛ. Предприятие имеет многоуровневую систему электроснабжения. Схема электроснабжения предприятия ШАТЛ показана на рис. 7.

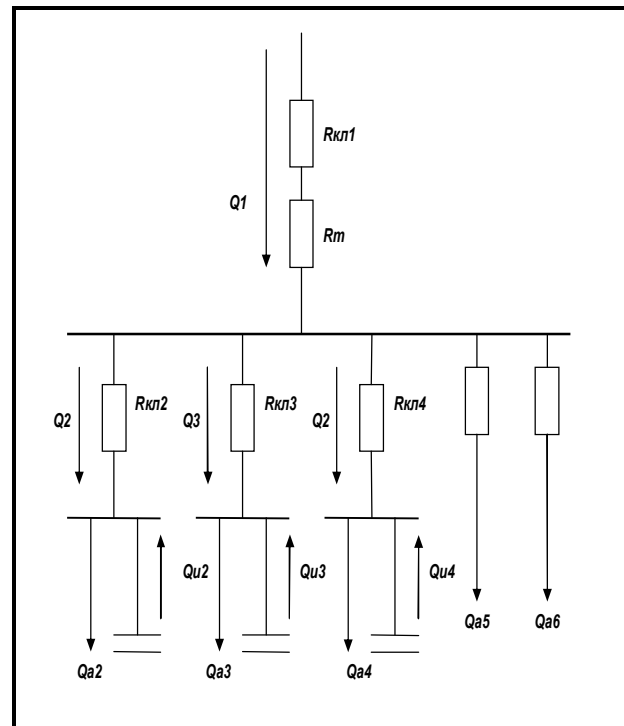


Рис. 7. Электроснабжение предприятия ШАТЛ

Составляем уравнение функции затрат для первого узла схемы и уравнение Кирхгофа:

$$Z_1 = C_A * A_1 * Q_1^2 + C_A * A_{И1} * Q_{И1}^2 + C_A * B_{И1} * Q_{И1} + C_P * Q_{И1};$$

$$Q_{И1} + Q_1 - Q_2 - Q_{A1} = 0.$$

Выполняем то же самое для второго узла:

$$Z_2 = C_A * A_2 * Q_2^2 + C_A * A_{И2} * Q_{И2}^2 + C_A * B_{И2} * Q_{И2} + C_P * Q_{И2};$$

$$Q_{И2} + Q_2 - Q_{A2} = 0.$$

Для поиска минимума функции суммарных затрат по методу множителей Лагранжа составим вспомогательные функции (функции Лагранжа), которые имеют вид:

$$Z_1 = C_A * A_1 * Q_1^2 + C_A * A_{И1} * Q_{И1}^2 + C_A * B_{И1} * Q_{И1} + C_P * Q_{И1} + \lambda_1 (Q_{И1} + Q_1 - Q_2 - Q_{A1});$$

$$Z_2 = C_A * A_2 * Q_2^2 + C_A * A_{И2} * Q_{И2}^2 + C_A * B_{И2} * Q_{И2} + C_P * Q_{И2} + \lambda_2 (Q_{И2} + Q_2 - Q_{A2}).$$

Взяв частные производные  $dZ/dQ_i$ ,  $dZ/dQ_{Иj}$  и граничные условия, получим систему линейных уравнений, имеющую шесть неизвестных:

$$\begin{cases} 2 * C_A * A_1 * Q_1 + \lambda_1 = 0; \\ 2 * C_A * A_{И1} * Q_{И1} + \lambda_1 - (C_A * B_{И1} + C_P); \\ Q_1 + Q_{И1} - Q_2 = Q_{A1}; \\ 2 * C_A * A_2 * Q_2 + \lambda_2 = 0; \\ 2 * C_A * A_{И2} * Q_{И2} + \lambda_2 - (C_A * B_{И2} + C_P); \\ Q_2 + Q_{И2} = Q_{A2}. \end{cases}$$

Для решения полученной системы уравнений представим ее в матричном виде.

Матрица коэффициентов имеет вид:

$$KOF = \begin{bmatrix} 2 * C_A * A_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 * C_A * A_{И1} & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 * C_A * A_2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 * C_A * A_{И2} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Вектор неизвестных и вектор правых частей имеют вид:

$$X = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_{И1} \\ Q_2 \\ Q_{И2} \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix}; PR = \begin{bmatrix} 0 \\ -(C_A * B_{И1} + C_P) \\ Q_{A1} \\ 0 \\ -(C_A * B_{И2} + C_P) \\ Q_{A2} \end{bmatrix}.$$

Решение системы имеет вид:

$$KOF^{-1} * PR = X.$$

Для схемы (см. рис. 7).

Удельные квадратичные потери активной мощности в линиях приходящиеся на 1 кВар реактивной мощности передаваемой по этим участкам, кВт/кВар<sup>2</sup>:

$$A_1 = \left( \frac{(R_T + R_{КЛ1})_{НН}}{U^2} \right) * 10^{-3} \left( \frac{279}{0.4^2} \right) * 10^{-3} = 1.744;$$

$$A_2 = \left( \frac{R_{КЛ2}}{U^2} \right) * 10^{-3} \left( \frac{0.133 * 10^3}{0.4^2} \right) * 10^{-3} = 0.833.$$

Удельные квадратичные потери активной мощности в источниках, приходящиеся на 1 кВар<sup>2</sup> реактивной мощности, кВт/кВар<sup>2</sup> (для конденсаторов):

$$A_{И1} = A_{И2} = 0,001.$$

Удельные потери активной мощности в источниках, приходящиеся на 1 кВар реактивной мощности, кВт/кВар (для конденсаторов):

$$B_{И1} = B_{И2} = 0,004.$$

После подстановки численных значений получим решение для первого и второго узла схемы электропитания предприятия ШАТЛ, при реактивной нагрузке в первом узле 460 кВар, во втором – 124 кВар:

$$X = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_{И1} \\ Q_2 \\ Q_{И2} \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.243 \\ 459.863 \\ 0.106 \\ 123.894 \\ -1.697 \\ -0.354 \end{bmatrix}.$$

Анализируя полученные значения, можно сделать вывод, что для данного момента времени минимум затрат предприятия на реактивную мощность будет при мощности конденсаторных установок, равных в первом узле 459,896 кВар, а во втором – 123,894 кВар. Небольшая погрешность вычисления является следствием применения метода Лагранжа, который сам по себе является приближенным (рис. 8).

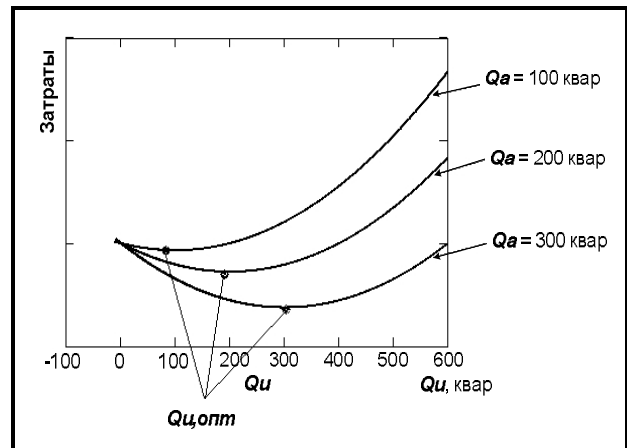


Рис. 8. Зависимость затрат предприятия на реактивную мощность от мощности конденсаторных установок ( $Q_a$  – значения реактивных мощностей в узле нагрузки,  $Q_{u, опт}$  – оптимальное значение мощности компенсирующих установок)

Таким образом, проведенные исследования подтверждают эффективность применения установок компенсации реактивной мощности в узле нагрузки и показывают, что их применение даже в условиях действующих тарифов позволяет существенно снизить плату за потребленную электроэнергию и ее потери в системе электропитания.

## Литература

1. Железко Ю.С. и др. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст] : руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
2. Конохова Е.А. Режимы напряжений и компенсация реактивной мощности цеховых электрических сетях [Текст] / Е.А. Конохова. – М. : НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2000. – 55 с.
3. Мельников Н.А. Принципы автоматического регулирования напряжения и реактивной мощности в питающих электрических сетях [Текст] / Н.А. Мельников // Электричество. – 1971. – №8. – С. 14-19.
4. Прокопчик В.В. Оптимизация режима реактивной мощности узла нагрузки с помощью синхронных двигателей [Текст] / В.В. Прокопчик, А.В. Сычев // Электрификация металлургических предприятий Сибири. – Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 2001. – Вып. 10. – С. 111-121.
5. Прокопчик В.В. Проблема определения электрических нагрузок промышленных предприятий [Текст] / В.В. Прокопчик, Б.И. Кудрин // Научные и прикладные проблемы энергетики. – М. : Высшая школа, 1983. – Вып. 10. – С. 35-39.
6. Прокопчик В.В. Системный подход к управлению электрическим хозяйством и режимами работы электрооборудования промышленных предприятий [Текст] / В.В. Прокопчик // Электрификация металлургических предприятий Сибири. – Томск : Изд-во Томского гос. ун-та, 1989. – Вып. 6. – С. 74-86.

## Ключевые слова

Алгоритм; минимизация затрат; реактивная мощность; система электроснабжения; потери электрической энергии; управление.

*Кумаритов Алан Мелитонович*

*Хомяков Александр Владимирович*

## РЕЦЕНЗИЯ

Автоматизация управления энергопотреблением для снижения затрат на энергоресурсы является сегодня актуальной задачей, стоящей как перед государством, так и перед промышленными предприятиями. В настоящее время, благодаря развитию вычислительных сетей и телекоммуникационных технологий, автоматизированные системы контроля и учета энергоресурсов получили возможность выйти на новый качественный уровень. Для минимизации потерь и с целью улучшения использования электрической энергии в условиях ограничений на максимальную потребляемую мощность на промышленных предприятиях большая роль отводится также новым техническим средствам и системам управления, позволяющим улучшить энергетические характеристики: повысить  $\cos(\varphi)$  до заданных значений, уменьшить содержание гармоник в питающем напряжении, а также упрощающим проведение мониторинга сети.

Автором в работе выполнен анализ влияния от внедрения предложенного метода компенсации реактивной мощности на потери электрической энергии и разработан алгоритм системы автоматического управления режимом реактивной мощности промышленного предприятия.

Разработанные автором методы и алгоритмы в условиях действующих тарифов позволяют существенно снизить плату за потребленную электроэнергию и ее потери в системе электроснабжения промышленного предприятия.

Разработанные и используемые на промышленном предприятии ОАО «ШАТЛ» (г. Армавир) комплекс программ, реализующий разработанные методы и алгоритмы подтверждает практическую значимость проделанной работы.

Статью можно рекомендовать к публикации в научном издании.

*Хузмиев И.К., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Организация производства и экономика промышленности» Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета), г. Владикавказ*

## 3.1. ALGORITHM OF OPTIMIZATION OF EXPENSES FOR PAYMENT OF CONSUMPTION OF JET CAPACITY AT MANAGEMENT OF ELECTROSUPPLY OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES

A.M. Kumaritov, Dr. Sci. Tech. Professor of the North Caucasian Institute of Mountain Metallurgy (the State Technological University);

A.V. Khomyakov, Assistant of Department «Intrafactory Electric installation and Automatic (IEA)» the Armavir Mechanical Technological Institute (AMTI) (Branch) the Kuban State Technology University (KUBSTU)

In article the new technique of definition of expenses for payment of consumption of jet capacity by the industrial enterprise, algorithm of work of an automatic control system by a mode of jet capacity at the industrial enterprise and the decision of a task of optimization of modes of jet capacity for industrial systems of electrosupply is offered. Results of the lead researches confirm efficiency of application of installations of indemnification of jet capacity in unit of loading and show, that their application even in conditions of working tariffs allows to lower essentially a payment for the consumed electric power and its losses in system of electrosupply.

## Literature

1. J.S. Zhelezko, A.V. Artemjev, O.V. Savchenko. Calculation, the analysis and normalization of losses of the electric power in electric networks: the Manual for practical calculations. – M.: Publishing house NTS ENAS, 2004.
2. V.V. Prokopchik. System the approach to management of an electric facilities and operating modes of an electric equipment of the industrial enterprises // Electrification of the metallurgical enterprises of Siberia. – Tomsk: Publishing house Tomsk, 1989. – P 74-86.
3. V.V. Prokopchik, B.I. Kudrin. Problem of definition of electric loadings of the industrial enterprises // Scientific and applied problems of power. – M.: The higher school, 1983. – P. 35-39.
4. E.A. Konuhova Mode of voltage and indemnification of jet capacity shop electric networks. – M.: NTF «Power progres», «The engineer», 2000. – 55 p.
5. N.A. Melnikov. Principle's millers of automatic control of a voltage and jet capacity in having electric networks / N.A. Millers // the Electricity. 1971. № 8. P 14-19.
6. V.V. Prokopchik, A.V. Sychev. Optimization of a mode of jet capacity of unit of loading with the help of synchronous engines // Electrification of the metallurgical enterprises of Siberia. – Tomsk: Publishing house the Tomsk state university, 2001. – Release 10. – P 111-121.

## Keywords

Algorithm; minimization of expenses; jet capacity; system of electrosupply; loss of electric energy; management.