

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Н.В. Радоман, О.И. Александров,
Д.Н. Свирский

УДК 677.11.044.4

РЕФЕРАТ

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, СКОЛЬЖЕНИЕ, СОВМЕЩЕННЫЙ МАКСИМУМ НАГРУЗКИ, СТАТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАГРУЗКИ, ЭНЕРГОЕМКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ, ЭНЕРГОСИСТЕМА

В статье рассмотрена проблема снижения электропотребления на энергоёмком машиностроительном предприятии. Комплексное рациональное использование топливно-энергетических ресурсов предполагает оптимальные режимы работы всех звеньев энергетического хозяйства. В статье сформулирован критерий минимума электропотребления в часы максимума и ограничивающие условия. Приведены различные оценки по распределению оптимальной величины суммарной мощности между субъектами технологического процесса. Снижение величины электропотребления особенно востребовано при прохождении максимальной нагрузки энергосистемы, так как превышение первоначально заявленных величин ведет к штрафным санкциям, а недобор – к возможному ущербу промышленного предприятия. Решение этой задачи подразумевает комплексный подход к компонентам технологического процесса, включающий рассмотрение характеристик всех звеньев производства, в том числе и таких, как оптимальное регулирование возбуждения синхронных двигателей, настройка систем защиты и режимное взаимодействие энергоёмкого предприятия с диспетчерским управлением энергосистемы. В этом случае можно получить наиболее рациональные значения регулирующих параметров в стоимостных величинах, что позволит выполнять эксплуатацию оборудования производства в оптимальном режиме. Таким образом, полное решение всей проблемы возможно при переходе от отдельных режимно-экономических и орга-

ABSTRACT

AUTOMATIC CONTROL OF EXCITATION, ASYNCHRONOUS MOTOR, SYNCHRONOUS MOTOR, SLIP, COMBINED MAXIMUM OF LOAD, STATIC LOAD CHARACTERISTIC, ENERGY-INTENSIVE INDUSTRIES, ENERGY SYSTEM

The paper considers the problem of reduction of power consumption for power-intensive machine-building enterprise. The criterion of minimum of a power consumption in peak hours and limiting conditions are formulated. Various estimates of the distribution of the optimal value of the total power between subjects of the technological process are given.

Integrated management of fuel and energy resources assumes optimum operating modes of all parts of the energy sector. The reduction of the power consumption is actual at the maximum load of a power supply system, because excess of initially declared quantity leads to penalties, and a shortage – to the possible detriment of the industrial enterprise. The solution of this problem involves an integrated approach to components of technological process. It includes consideration of characteristics of all production phases, including such as the optimal regulation of excitation of synchronous motors, the control of protection systems and the regime interaction power-intensive enterprise with dispatching management of a power supply system. In this case, the most rational values of regulating parameters in cost sizes can be received. It will allow to carry out operation of the production equipment in an optimum mode. Thus, a complete solution of this problem is possible at the transition from separate mode-economic, organizational and technical measures to their system interaction on the basis of dynamic information model creation. Currently, this task is not fully resolved due to the need to develop a set of interrelated tasks. It includes the creation of a monitoring system of flow characteristics of industrial enterprises: definition of

низационно-технических мероприятий к их системному взаимодействию на основе создания динамической информационной модели. Поставленная задача в полном объеме пока не решена в связи с необходимостью разработки комплекса взаимосвязанных задач, включающего создание системы мониторинга расходных характеристик промышленных предприятий, в том числе и определение их резервов регулирования с учетом дифференцированных по зонам суток тарифов, создание базы данных расходных характеристик удельного электропотребления и выработку механизма контроля за его соблюдением.

reserves of regulation taking into account differentiated tariffs for time zones, the creation of a database of flow characteristics of a power consumption and development of the mechanism of control of its observance.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов энергосбережения, то есть снижения максимума нагрузки на промышленном предприятии (ПП) может быть оптимизация режимов напряжения в заводской распределительной сети. Результат достигается путем использования регулирующего эффекта нагрузки, который определяется ее статическими и динамическими характеристиками по напряжению и частоте, найденными экспериментально или аналитически (при отсутствии опытных данных). В проектной практике обычно пользуются альбомами типовых характеристик, которые составляются и периодически обновляются. Поскольку само ПП не может целенаправленно воздействовать на частоту сети, статические и динамические характеристики по частоте могут применяться только энергосистемой для регулирования собственной суммарной нагрузки. Что касается использования для регулирования нагрузки динамических характеристик по напряжению, то они жестко связаны с режимно-технологическим процессом и требуют проведения углубленных исследований на конкретном ПП в рамках его взаимодействия с энергосистемой. Поэтому наибольший практический интерес представляет взаимосвязь режимов напряжения и нагрузки, которая определяется статическими характеристиками нагрузок (СХН). СХН обычно получают путем активного или пассивного эксперимента с использованием соответствующих измерительных устройств.

По результатам ряда экспериментов можно сделать вывод, что при снижении напряжения в узле нагрузки на стороне 6 кВ на 1 – 3 % от номинального уменьшается потребляемая ак-

тивная мощность асинхронных двигателей на 2 – 5 %. На отдельных ПП эта величина может изменяться от – 0,3 до + 2,0 % (в зависимости от состава нагрузки). Кроме того, с уменьшением коэффициента загрузки двигателя регулирующей эффект активной мощности по напряжению возрастает, причем он может быть как положительным, так и отрицательным. По-видимому, это можно объяснить нелинейностью соотношения потерь в стали двигателей и трансформаторов с нагрузочными потерями. Потому для получения реального экономического эффекта необходимо экспериментально определить оптимальное значение напряжения в распределительной сети ПП в различных режимах загрузки основного оборудования. Особенно это востребовано при прохождении максимума нагрузки энергосистемы, так как превышение заявленных величин ведет к большим штрафам, а недобор к возможному ущербу ПП. Решение этой задачи подразумевает комплексный подход к компонентам технологического процесса, включающий рассмотрение характеристик всех звеньев производства, в том числе и таких, как оптимальное регулирование возбуждения синхронных двигателей, настройка систем защиты и режимное взаимодействие ПП с диспетчерским управлением энергосистемы. В этом случае можно получить наиболее рациональные значения регулирующих параметров в стоимостных величинах, что позволит выполнять эксплуатацию оборудования ПП в оптимальном режиме [1].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Выбор необходимой величины изменения напряжения зависит от многих факторов, опре-

деляемых СХН и степенью надежности работающего оборудования. В детерминированной постановке эффект снижения электропотребления от изменения напряжения можно выразить следующим соотношением, у.е.:

$$C = \sum_{i=1}^T [1/k_U \Delta P_i(\Delta U) + \xi k_H Y_i(\Delta U)] J, \quad (1)$$

где τ – плата за заявленный максимум, у.е.; k_U – регулирующий эффект активной нагрузки по напряжению, выраженный в относительных единицах; $\Delta P_i(\Delta U)$ – фактическое снижение нагрузки, вызванное изменением напряжения на величину ΔU в распределительной сети ПП, кВт; ξ – коэффициент приведения стоимости к текущему значению рублевого эквивалента; k_H – коэффициент, определяющий надежность работы электрооборудования, в том числе и устойчивость крупных синхронных машин; $Y_i(\Delta U)$ – величина ущерба, вызванного отклонением уровня надежности от оптимального значения при изменении напряжения ΔU , у.е.; t – время работы основного оборудования, для которого определяется ущерб, час; T – полный расчетный период времени, год.

Условие оптимизации режима напряжений получит вид: найти минимум функционала (1) при ограничениях

$$U_{min} \leq U \leq U_{max},$$

где границы напряжений, кВт, соответствуют крайним значениям, регламентированными «Инструкцией по проектированию силового и осветительного оборудования промышленных предприятий», которая ограничивает возможный диапазон кратковременных понижений напряжения при управлении электропотреблением десятью процентами.

Сформулированная задача вписывается в математическую модель нелинейного программирования. В результате ее решения находится оптимальный вектор ΔU , который в соответствии с СХН дает максимальный эффект снижения активной мощности ПП. Наибольшая сложность при решении – определение вполне правдоподобных значений k_H и $Y_i(\Delta U)$, которые можно найти при достаточно богатом статистическом материале. Решение выполняется по одному из

стандартных алгоритмов теории нелинейного и динамического программирования [2].

При рассмотрении данной задачи в динамической постановке формируются уравнения состояния для переходных процессов и решаются системы дифференциальных уравнений. В качестве критерия оптимальности обычно принимается минимум суммы квадратов отклонений напряжений с учетом ограничений на мощность управления. При учете нестационарного характера значений напряжений в узловых точках распределительной сети завода могут быть реализованы методы стохастического программирования с использованием алгоритмов, составленных на основе известной методики игровых или квазиградиентных методов. Поскольку на предприятиях химической промышленности основная нагрузка – асинхронные двигатели (АД), изменение режима напряжений влияет, прежде всего, на скольжение двигателей. При снижении подводимого напряжения с U_1 до U_2 , кВт, увеличивается скольжение АД от s_1 до s_2 , %. Величина нового значения скольжения s_2 с достаточной для практики точностью определяется исходя из соотношений:

$$U_1^2 s_1 \cong U_2^2 s_2; s_2/s_1 = (U_1/U_2)^2; s_2 \cong s_1 (U_1/U_2)^2.$$

При условии $M = M_H$ оптимальное значение напряжения соответствует оптимальному скольжению:

$$U_{opt} = U_H \sqrt{s_H/s_{opt}},$$

где U_H, s_H – номинальные значения напряжения и скольжения соответственно; M, M_H – текущее и номинальное значение моментов АД, Н·м. Это напряжение изменяется в зависимости от момента в соответствии с соотношением

$$U_1^2 / U_{opt(M=M_H)}^2 = M/M_H.$$

Поскольку потребляемая активная мощность явным образом зависит от скольжения, а реактивная – от скольжения и напряжения, описанные процессы в реальных электротехнических установках аккумулируются в СХН для асинхронной двигательной нагрузки и легко могут быть проиллюстрированы совместным рассмотрением известных зависимостей $P(s), Q(s)$ и

$Q(U)$. Потому эти характеристики могут быть использованы в расчетах при снижении потребляемой активной нагрузки ПП в часы прохождения максимума за счет оперативного регулирования величины напряжения в распределительной сети завода.

Что касается активной мощности синхронных двигателей (СД), то принципиально она не зависит от изменений напряжения за счет постоянства частоты вращения, то есть крутизна СХН для синхронной двигательной нагрузки $k_{PU}^{СД} = 0$. При отсутствии автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и питания обмоток ротора двигателя от машинного возбудителя ток возбуждения СД не зависит от напряжения сети. Однако у СД с возбуждением от выпрямительных установок, питающихся от выводов статора при отсутствии трансформаторов тока, создающих дополнительную ЭДС, пропорциональную току статора, а также при отсутствии АРВ ток в обмотке возбуждения СД примерно пропорционален напряжению сети, то есть при снижении напряжения уменьшается.

При наличии АРВ зависимость тока возбуждения определяется законом регулирования, обеспечивающим увеличение тока возбуждения при снижении напряжения на выводах статора. Результирующий магнитный поток в воздушном зазоре и потери в стали статора СД при изменении напряжения сети определяются так же, как и у АД, то есть при снижении напряжения уменьшаются. Потери мощности в обмотках статора определяются полным током, нагрузочная составляющая которого с уменьшением напряжения возрастает, а составляющая тока возбуждения снижается.

При снижении напряжения первичной обмотки трансформатора магнитный поток уменьшается, что приводит к снижению потерь в стали. При работе цеховых трансформаторов на осветительную нагрузку уменьшается ток нагрузки, что приводит, в свою очередь, к снижению потерь в меди трансформатора. При работе трансформатора на двигательную нагрузку характер изменения потребляемой мощности трансформатора определяется величиной статического момента. Для осветительной нагрузки снижение напряжения в сети завода всегда уменьшает потери мощности.

Как показали теоретические и эксперимен-

тальные исследования, выполненные авторами, оперативное регулирование напряжения в распределительной сети предприятий машиностроительного производства позволяет получить снижение суммарной нагрузки ПП на 1 – 1,5 %, что заметно повысит эффективность производства.

Получение оптимального значения суммарной мощности машиностроительного комплекса требует дальнейшей детализации совмещенного максимума нагрузки между субъектами технологического процесса. Далее приведено описание нескольких вариантов воздействия на первоначальный график нагрузки отдельных групп электроприемников всего ПП.

СПОСОБ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РАЗБИЕНИЯ ФИКСИРОВАННОГО ЗНАЧЕНИЯ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОУЗЛА

Решение задачи этим способом сводится к пропорциональному распределению ограниченной мощности, рассчитанной на предыдущем этапе, между всеми потребителями, подключенными к данному энергоузлу. Долевое участие каждого потребителя в совмещенном графике нагрузки определяется исходя из величины регулировочного диапазона этого потребителя. Для нахождения этой доли вначале вычисляется суммарный регулировочный диапазон по мощности для всех предприятий данного энергоузла:

$$P_{\Sigma J}^{p0} = \sum_{\alpha=1}^{AJ} P_{\alpha}^{p0} = \sum_{\alpha=1}^{AJ} (P_{\alpha}^{max} - P_{\alpha}^{m0}), \alpha \in \{AJ\}, \quad (2)$$

где $P_{\Sigma J}^{p0}$ – суммарная мощность регулировочных диапазонов всех приемников, подключенных к j -му энергоузлу, кВт; P_{α}^{p0} – располагаемая мощность регулировочного диапазона α -го приемника, кВт; P_{α}^{max} – максимальная нагрузка α -го предприятия в вечерний (утренний) максимум наиболее нагруженного зимнего (летнего) дня, кВт; P_{α}^{m0} – величина минимально допустимой мощности α -го предприятия, при которой сохраняется устойчивость технологического процесса (технологическая броня), кВт; AJ – общее число приемников j -го энергоузла, между которыми распределяется величина P_j^{st} ; P_j^{st} – суммарная единовременная мощность без учета потерь в распределительной сети j -го энергоузла, зада-

ваемая энергосистемой для t -го режима.

Долевое участие каждого предприятия, пропорциональное его регулировочному диапазону, характеризуется коэффициентом λ_α , который вычисляется следующим образом:

$$\lambda_\alpha = P_\alpha^{p0} / P_{\Sigma J}^{p0}, \quad \alpha \in \{AJ\}.$$

При этом участие каждого приемника в совмещенном графике нагрузки j -го энергоузла определяется тривиально для t -го режима:

$$P_\alpha^t = P_j^{st} \lambda_\alpha, \quad \alpha \in \{AJ\};$$

$$P_j^{st} = \sum_{\alpha=1}^{AJ} P_\alpha^t; \quad \alpha \in \{AJ\}$$

где P_α^t – действительная активная мощность, кВт, α -го предприятия (группы потребителей) в режиме t .

Расчитанные этим способом мощности электроприемников пропорциональны регулировочным диапазонам потребителей или (с некоторым приближением) максимальным нагрузкам. При расчете спектра мощностей для осенне-зимнего периода используется величина P_α^{max} для наиболее загруженного зимнего (декабрь) дня. При составлении графика для весенне-летнего периода более целесообразным является использование P_α^{max} для летнего режимного дня.

Для отдельных временных интервалов в аварийных условиях величина P_α^{m6} в формуле (2) может быть заменена на P_α^{a6} , что позволит увеличить диапазон регулирования мощности потребителей и соответственно их резервы. Тогда (2) приобретает вид

$$\sum_{\alpha=1}^{AJ} P_\alpha^{p0} = \sum_{\alpha=1}^{AJ} (P_\alpha^{max} - P_\alpha^{a6}) = P_j^{st},$$

где P_α^{a6} – аварийная бронь α -го потребителя, кВт.

СПОСОБ РАЗБИЕНИЯ ЗАДАННОЙ МОЩНОСТИ ЭНЕРГОУЗЛА ПО МИНИМУМУ УЩЕРБА

В этом случае решение задачи сводится к оптимальному распределению мощности между предприятиями промышленного комплекса по условиям минимального суммарного ущерба. Оптимально распределяемая мощность опреде-

ляется регулировочным диапазоном, величина которого составляет

$$P_{\Sigma J}^{p0} = P_{\Sigma J}^{st} - \sum_{\alpha=1}^{AJ} P_\alpha^{m6}.$$

Общий ущерб промышленного энергоузла от вероятного снижения мощности будет равен:

$$Y_{\Sigma J}^t(\Delta P_\alpha) = \sum_{\alpha=1}^{AJ} y_\alpha(\Delta P_\alpha) P_\alpha, \quad \alpha \in \{AJ\},$$

где $\Delta P_\alpha = (P_\alpha^H - P_\alpha)$ – величина снижения мощности α -го потребителя относительно номинальной; $y_\alpha(\Delta P_\alpha)$ – удельный ущерб α -го промышленного предприятия при отклонении его режима работы от номинального, руб/(кВт·ч).

Функции ущербов

$$y_\alpha = f(\Delta P_\alpha), \quad (3)$$

считаются известными или, по крайней мере, определяемыми. Математическая модель формулируется как общая оптимизационная задача нелинейного программирования с целевой функцией

$$\sum_{\alpha=1}^{AJ} y_\alpha(\Delta P_\alpha) P_\alpha \rightarrow \min, \quad \alpha \in \{AJ\}$$

и соответствующей системой ограничений-равенств и неравенств

$$\begin{cases} \sum_{\alpha=1}^{AJ} P_{j\alpha} = P_{\Sigma J}^{st}, & \alpha \in \{AJ\}; \\ P_\alpha^{m6} \leq P_\alpha \leq P_\alpha^H, & \alpha \in \{AJ\}. \end{cases} \quad (4)$$

В первом приближении элементарным ранжированием кривых ущерба можно получить тривиальное решение, в соответствии с которым потребители с меньшим ущербом ограничиваются на большую мощность согласно крутизне кривой (3).

В общем случае функции ущербов в зависимости от ограничений (4) являют собой нелинейные кривые, которые могут быть представлены аналитически в виде полинома второй степени

(квадратичного трехчлена):

$$y_a(\Delta P_a) = x' + x''\Delta P_a + x'''\Delta P_a^2, \quad (5)$$

где x' , x'' , x''' – коэффициенты, характеризующие кривую (3).

Суммарный же ущерб всего энергоузла определяется не только составом потребителей, но и способом ограничения. Однако при наличии некоторой свободы выбора состава потребителей можно встретиться с неопределенностью величины ущерба. В этом случае, очевидно, необходимо предусмотреть систему приоритетов на ограничение (отключение) потребителей с регулировочным диапазоном за пределами действия системной автоматики.

Оптимальное ранжирование потребителей со сходными характеристиками ущербов определяется стоимостью системы управления, их мощностью, формой, объемом и скоростью передачи управляющей информации, а также величинами дискретных ступеней мощности, частотой отключений и возможностью резервной компенсации в аварийных условиях. В общем случае коэффициенты x' – x''' выбираются для каждого конкретного потребителя в соответствии с режимно-технологическим циклом его работы и интегральным показателем уровня надежности электроснабжения последнего, причем коэффициенты x' и x'' характеризуют точку отсчета и линейный отрезок кривой (наклон), а x''' – крутизну и количественную оценку степени компенсации от аварийных отключений.

Переходя к матричным обозначениям, получим формулу (5) в виде

$$Y_{\Sigma J}^t(\Delta P_a) = I^*X' + X''*\Delta P_a + \Delta P_a^*diag[X''']\Delta P_a, \quad (6)$$

где $Y_{\Sigma J}^t$ – суммарный ущерб промышленного энергоузла от снижения его мощности на величину ΔP_j , руб (т. у. т.); X' X'' – столбцовые матрицы, компоненты которых составлены из соответствующих коэффициентов x' и x'' ; $diag X'''$ – диагональная матрица, составленная из коэффициентов x''' ; I – столбцовая единичная матрица размером $A \times 1$.

Система ограничений теперь примет вид

$$E^* \Delta P_a \leq G, \Delta P_a \geq 0, \quad (7)$$

где $E = [1/1^*]$ – прямоугольная матрица размером $(A+1) \times A$, составленная из коэффициентов ограничивающих уравнений; $G = [P_a^{m6}/P_{\Sigma J}]$ – столбцовая матрица ограничивающих констант размером $(A+1) \times 1$; P_a^{m6} – вектор-столбец, составленный из величин технологической брони.

Минимизация целевой функции (6) при условиях (7) вписывается в классическую задачу выпуклого квадратичного программирования, которая решается за конечное число шагов известными методами. В результате решения этой задачи находим вектор-столбец оптимальных величин снижения мощности каждого потребителя, дающий в целом минимальный ущерб энергоузла в течение соответствующего временного диапазона. Получение спектра значений ограничиваемой (отключаемой) мощности для отдельных производств на нижней ступени производственной иерархии в ряде случаев с достаточной степенью точности может быть определено с использованием элементарного способа пропорционального разбиения, рассмотренного выше. Описанный метод позволяет применять функции (3) любого вида, в том числе и разрывные.

СПОСОБ РАЦИОНАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ СУТОЧНОГО ГРАФИКА НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННОГО УЗЛА

В данной постановке активное воздействие на прогнозируемый график нагрузки энергоузла подразумевает управление электропотреблением не как следствие дефицита мощности в часы максимума ЭЭС, а как способ проведения энергосберегающей политики. Метод предполагает оптимальное взаимодействие поставщиков и потребителей электрической энергии, причем в определении рациональной структуры графика нагрузки приоритет, несомненно, принадлежит энергосистеме, а не потребителю, как это фактически имеет место в настоящее время. В целях выравнивания совмещенного графика нагрузки иногда полезно деформировать график потребителя в сторону его ухудшения, что справедливо было замечено около 80 лет назад [3]. В этом случае управление электропотреблением подразумевает построение принудительно-

го графика нагрузки потребителя оптимальной формы и плотности, который соответствовал бы критерию минимального суммарного удельного расхода энергоресурсов. Это предопределяет поворот от директивно устанавливаемых ограничений в часы максимума нагрузки к дискретно-непрерывному регулированию мощности потребителя по фиксированным значениям соответствующего договора с энергосистемой, смысл которого заключается в добровольном учете каждым потребителем режимных факторов, то есть в стремлении его к уплотнению собственных графиков активной нагрузки и, соответственно, совмещенного графика нагрузки энергосистемы. В этом случае целевая функция характеризуется следующими показателями: коэффициентом участия потребителя в максимуме нагрузки энергосистемы; коэффициентом неравномерности (колебательности) графика нагрузки потребителя, коэффициентом отклонения плотности этого графика от оптимального значения, коэффициентом, учитывающим степень рационального резервирования потребителя в аварийных условиях, коэффициентом формы графика. Таким образом, критерий оптимизации является многокритериальной аддитивной функцией как минимум пяти типов переменных величин:

$$F = f(h^{max}, h^{откл}, h^{отм}, h^{рез}, h^{\phi}),$$

где h^{max} – коэффициент попадания в максимум нагрузки; $h^{откл}$ – то же, отклонения нагрузки от своего среднего значения, учитывающий неравномерность графика активной нагрузки потребителя электроэнергии; $h^{отм}$ – то же, отклонения плотности графика активной нагрузки от оптимального значения; $h^{рез}$ – то же, учитывающий степень резервирования потребителя и качество системы управления его мощностью; h^{ϕ} – коэффициент формы графика нагрузки электроприемника.

Каждый из коэффициентов определяется с помощью проведения обследования структуры электропотребления для конкретного производства. В общем случае совместное использование всех указанных выше величин учитывает режимные, экономические и надежные показатели, которые необходимо нормировать:

$$h_{AJ} = \frac{\prod_{\xi} v_{\xi} h_{\alpha}}{\sum_{\alpha=1}^{AJ} \prod_{\xi} v_{\xi} h_{\alpha}}, \quad \alpha \in \{AJ\}, \quad \xi = \overline{1,4},$$

где v_{ξ} – показатели важности целей (весовые коэффициенты), причем $0 \leq h_{AJ} \leq 1$, а величина оптимизируемой мощности α -го потребителя определяется тривиально:

$$\Delta P_{\alpha}^{opt} = h_{AJ} \Delta P_{\Sigma J}^{opt}, \quad \alpha \in \{AJ\}$$

где $P_{\Sigma J}^{opt}$ – величина оптимальной мощности j -го энергоузла, полученная как результат решения задачи минимизации (6).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александров О. И. Снижение электропотребления с помощью регулирования напряжения в заводской сети / О.И. Александров, Н.В. Радоман, Ю.А. Литвак // Актуальные вопросы модернизации химической и нефтехимической промышленности в современных условиях: проблемы и пути решения. – Гродно, «Гродно Азот». – 2012. – С. 134 – 138.
2. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы / М. Мину. – Москва: Наука. – 1990. – С. 487.
3. Дарманчев А. К. Основы оперативного управления энергосистемами. – Москва – Ленинград: Госэнергоиздат. – 1960. – С. 396.

REFERENCES

1. Aleksandrov, O.I., Radoman, N.V., Litvak, Y.A. (2012), "The reduction of power consumption by voltage regulation in the plant network" [Snizhenie jelektropotreblenija s pomoshh'ju regulirovanija naprjazhenija v zavodskoj seti], Aktual'nye voprosy modernizacii himicheskoj i neftehimicheskoj promyshlennosti v sovremennyh uslovijah: problemy i puti reshenija – Topical issues of modernization of the chemical and petrochemical industries in modern conditions: problems and solutions, Grodno, pp. 134 – 138.
2. Minu, M. (1990), Mathematical Programming. Theory and Algorithms [Matematicheskoe programmirovanie. Teorija i algoritmy], Nauka – Science, Moscow, 487 pp.
3. Darmanchev, A.K. (1960), Bases of operational management of power supply systems [Osnovy operativnogo upravlenija energosistemami], Gosenergoizdat, 396 pp.

Статья поступила в редакцию 12.09.2013 г.