

УДК 338.45:621.31(470.22)

МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ РЕГИОНА

Г. А. Борисов, Т. П. Тихомирова

*Институт прикладных математических исследований
Карельского научного центра РАН*

В статье показано, что при параллельной работе одинаковых переделов энергии выравнивание нагрузок позволяет достичь условного минимума суммарных потерь мощности. При неодинаковых переделах условный минимум потерь мощности достигается при выравнивании относительных приростов их потерь. В случаях работы отдельного передела или последовательном соединении их выравнивание графика нагрузки на уровне средней приводит к условному минимуму динамических потерь энергии.

Ключевые слова: технологические переделы энергии, потери мощности, потери энергии, расходная характеристика, неравномерность графика нагрузки, стабилизация нагрузки.

G. A. Borisov, T. P. Tikhomirova. METHODS TO MINIMIZE ENERGY AND POWER LOSSES IN THE REGIONAL FUEL-AND-ENERGY SECTOR

We demonstrate that equalization of the load in identical process stages in parallel operation yields the constrained minimum of combined power losses. The constrained minimum of power losses in non-identical process stages is achieved through equalization of relative rises in power losses from the stages. For process stages operating independently or sequentially stabilization of the demand curve at an average level would result in a constrained minimum of dynamic energy losses.

Key words: process transitions, power losses, energy losses, metering characteristic, irregularity of the load curve, load stabilization.

Целью энергетической политики России является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора [1]. Статья посвящена методам технологического управления нормальными установившимися режимами топливно-энергетического хозяйства региона, минимизирующими потери энергии и мощности. В качестве примера рассматривается электроэнергетическое хозяйство Респу-

блики Карелия: от природных источников энергии до получения ее конечных видов.

Известные методы технологического управления нормальными установившимися режимами энергосистем позволяют достигать не абсолютного, а условного минимума расхода или стоимости топлива в системе, диктуемого требующейся для потребителей суммарной мощностью генерации в системе (P_c). Минимум получается путем наивыгоднейшего

распределения суммарной мощности генерации между параллельно работающими электростанциями. Для оптимизации используются методы проекции градиента, обобщенного метода приведенного градиента. При использовании штрафных функций для учета ограничений в форме неравенств применяется метод безусловной оптимизации [2]. Минимум расхода топлива определяется методом множителей Лагранжа (при любом значении суммарной мощности генерации в системе P_c у m параллельно работающих источников мощности), когда равны численные значения относительных приростов [3]:

$$\frac{\partial B_1(P_1)}{\partial P_1} = \dots = \frac{\partial B_j(P_j)}{\partial P_j} = \dots = \frac{\partial B_m(P_m)}{\partial P_m} = \lambda \quad (1)$$

с учетом

$$\sum_{j=1}^m P_j = P_c, \quad (2)$$

$$0 \leq P_j \leq P_{jH}. \quad (3)$$

Здесь $B_j(P_j)$ – расходная характеристика j -го источника (зависимость расхода топлива от производимой выходной мощности P_j); P_c – суммарная мощность генерации; $\partial B_j(P_j)/\partial P_j$ – характеристика относительных приростов (топлива) у j -го источника; P_{jH} – номинальная мощность j -го источника.

При работе источников на потребителей через электрическую сеть и наличии потерь активной мощности в ней равенства (1) заменяются на следующие [3]:

$$\frac{1}{1 - \sigma_1} \cdot \frac{\partial B_1(P_1)}{\partial P_1} = \dots = \frac{1}{1 - \sigma_j} \cdot \frac{\partial B_j(P_j)}{\partial P_j} = \dots = \frac{1}{1 - \sigma_m} \cdot \frac{\partial B_m(P_m)}{\partial P_m} = \lambda, \quad (4)$$

где σ_j – производные потерь активной мощности в сетях по нагрузкам (мощностям) j -го источника.

Такой метод позволяет за счет наивыгоднейшего распределения мощности между параллельно работающими электростанциями, т. е. на одном технологическом переделе топливно-энергетического хозяйства, получать до 1 % экономии топлива [6]. Однако генерация дает сравнительно небольшую часть потерь энергии топливно-энергетического хозяйства. Так, например, по данным топливно-энергетического баланса Республики Карелия, из общей доли потерь в 75 % от первичной

энергии на ТЭЦ приходится 14,1 % общих потерь энергии на ее пути от первичных до конечных видов [4]. Подавляющая часть потерь энергии приходится на другие технологические переделы и элементы системы, соединяемые не параллельно, как электрические станции, а последовательно по ветвящимся и замкнутым (контурным) схемам, для которых упомянутые методы минимизации потерь активной мощности и энергии при нормальных режимах отсутствуют.

В нашей работе [5] показано, что технологические переделы системы имеют расходные характеристики и характеристики потерь мощности достаточно точно аппроксимируемые полиномами от первой до третьей степени

$$P_{i-1} = f(P_i) = P_i + \Delta P_i(P_i), \quad (5)$$

где P_{i-1} – входная мощность i -го элемента или передела; P_i – его выходная мощность; ΔP_i – потери мощности.

Минимум входной энергии и ее потерь в заданное время T и при заданной величине выходной энергии W_i получается при стабилизации выходной энергии, когда в каждый малый промежуток времени Δt выходная мощность передела равняется ее среднему значению

$$P_i = \frac{W_i}{T} = \frac{\Delta t \sum_{k=1}^n P_{ik}}{T} = P_{i\text{ср}},$$

где P_{ik} – выходная мощность i -го передела в k -й интервал времени; Δt – одинаковые по величине интервалы времени, $\Delta t = T/n$; n – количество интервалов времени.

При отклонении на i -м технологическом переделе его выходной мощности P_i от среднего значения $P_{i\text{ср}}$ за время T на величину ΔP_i появляются дополнительные потери потребляемой энергии ΔW_{i-1} (рис. 1).

Пусть расходная характеристика i -го передела достаточно точно аппроксимирована полиномом:

$$P_{i-1} = a_0 + a_1 P_i + a_2 P_i^2 + a_3 P_i^3.$$

Тогда энергия, потребляемая переделом за период времени T при постоянной выходной мощности $P_{i\text{ср}}$, равна

$$W_{i-1}(P_{i\text{ср}}) = T(a_0 + a_1 P_{i\text{ср}} + a_2 P_{i\text{ср}}^2 + a_3 P_{i\text{ср}}^3). \quad (6)$$

Если в первый полупериод $T/2$ выходная мощность скачкообразно увеличивается до значения $(P_{i\text{ср}} + \Delta P_{i\text{ср}})$, а во второй уменьшается до $(P_{i\text{ср}} - \Delta P_{i\text{ср}})$, то выдаваемая переделом энергия за период остается неизменной, а потребляемая энергия в первый полупериод времени $T/2$ составит

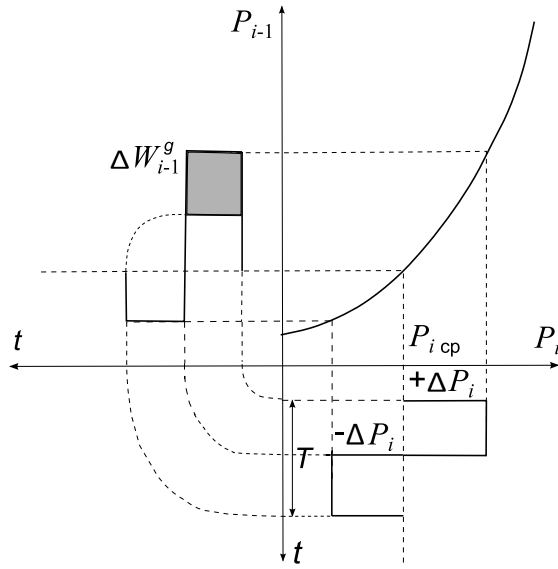


Рис. 1. Потери входной мощности передела при отклонении от средней выходной мощности

$$W_{i-1}(P_{i cp} + \Delta P_{i cp}) = 0.5 T [a_0 + a_1(P_{i cp} + \Delta P_{i cp}) + a_2(P_{i cp} + \Delta P_{i cp})^2 + a_3(P_{i cp} + \Delta P_{i cp})^3], \quad (7)$$

во второй полупериод

$$W_{i-1}(P_{i cp} - \Delta P_{i cp}) = 0.5 T [a_0 + a_1(P_{i cp} - \Delta P_{i cp}) + a_2(P_{i cp} - \Delta P_{i cp})^2 + a_3(P_{i cp} - \Delta P_{i cp})^3]. \quad (8)$$

Перерасход энергии за счет скачкообразной неравномерности графика выходной мощности за период T составит величину

$$\begin{aligned} \Delta W_{i-1}^g &= W_{i-1}(P_{i cp} + \Delta P_{i cp}) + \\ &+ W_{i-1}(P_{i cp} - \Delta P_{i cp}) - W_{i-1}(P_{i cp}) = \\ &= T(a_2 \Delta P_{i cp}^2 + 3a_3 P_{i cp} \cdot \Delta P_{i cp}^2) = \\ &= \frac{T}{2} \Delta P_{i cp}^2 (2a_2 + 6a_3 P_{i cp}) = \\ &= \frac{T}{2} \Delta P_{i cp}^2 \frac{\partial^2 P_{i-1}}{\partial P_{i cp}^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Этот перерасход можно назвать динамическими потерями энергии. В соответствии с полученной формулой (9) $\Delta P_{cp} = 0$ при стабильной выходной мощности, когда $P_{ik} = P_{i cp}$ и динамические потери энергии отсутствуют. Также они будут отсутствовать, если расходная характеристика или характеристика потерь мощности передела линейны и вторые производные их равны нулю, что получается при наличии только потерь холостого хода, независимых от нагрузки или потерь, линейно зависящих от нагрузки, к примеру, в теплопроводах с качественным регулированием отпуска тепла.

Вторая составляющая потерь энергии, независимая от изменений выходной мощности, может быть названа статическими потерями (ΔW_i^c). Она определяется только средним значением выходной мощности ($P_{i cp}$) за период T

$$\begin{aligned} \Delta W_{i-1}^c &= T(P_{i-1}(P_{i cp}) - P_{i cp}) = \\ &= T(a_0 + (a_1 - 1)P_{i cp} + \\ &+ a_2 P_{i cp}^2 + a_3 P_{i cp}^3). \end{aligned} \quad (10)$$

При произвольном графике выходной мощности i -го передела за период времени T потери энергии определяются формулой

$$\begin{aligned} \Delta W_{i-1} &= (P_{i-1}(P_{i cp}) - P_{i cp}) \cdot T + \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^T (P_i(t) - P_{i cp})^2 \frac{\partial^2 P_{i-1}}{\partial P_i^2} dt, \end{aligned} \quad (11)$$

где первая составляющая — статические потери энергии, а вторая — динамические. При последовательном соединении технологических переделов в единичной технологической линии (рис. 2)

$$P_{i-1} = P_l + \sum_{\nu=i}^l \Delta P_{\nu}, \quad (12)$$

т. е. мощность, потребляемая i -м переделом, равняется сумме конечной мощности P_l и потерь мощности на последующих переделах.

Соответственно, при выравнивании или стабилизации нагрузки на единичной технологической линии, состоящей из последовательно соединенных переделов, увеличивается в сравнении с единичным переделом величина динамической составляющей потерь энергии. При этом первые переделы наиболее чувствительны по снижению динамических потерь энергии к выравниванию графика конечной мощности.

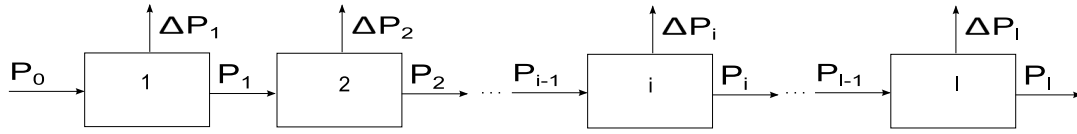


Рис. 2. Схема единичной технологической линии

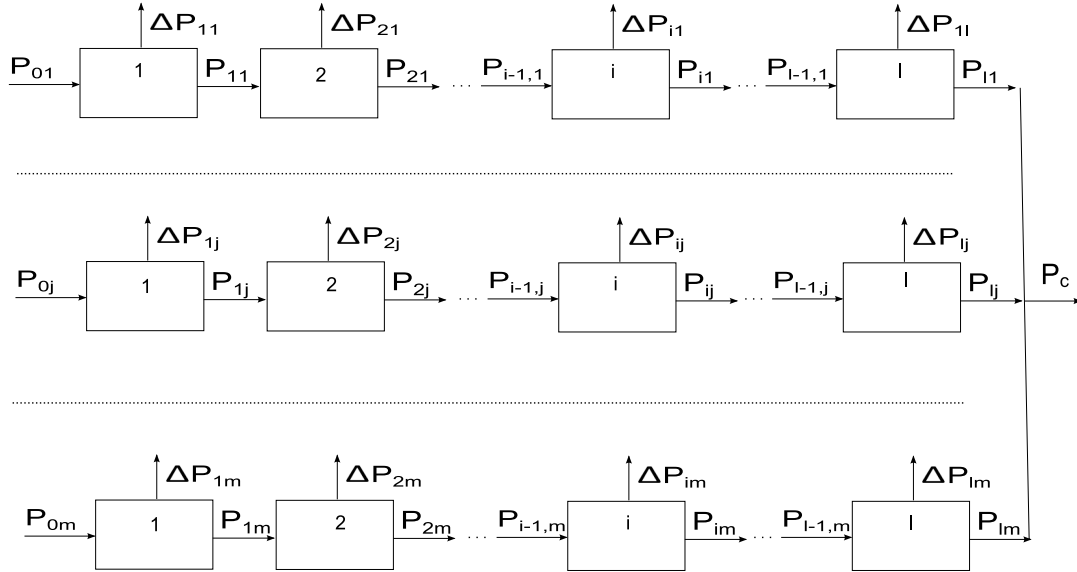


Рис. 3. Параллельная работа технологических линий

Таким образом, выравнивание графика конечной мощности снижает требования к установленной мощности предшествующих переделов и снижает на них динамическую составляющую потерь энергии. Такой способ используется в автономных энергетических установках – на гибридных автомобилях, устройствах непрерывного питания индивидуальных домов, в системах электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии.

В «большой» энергетике метод стабилизации или сглаживания конечных нагрузок в целях энергосбережения не нашел применения. Он находит применение как способ ограничения максимума нагрузки при дефиците располагаемых генерирующих мощностей, при современной тенденции разуплотнения графиков нагрузки энергосистем в условиях дефицита пиковых и полупиковых мощностей [1].

При параллельной работе на общую нагрузку или соединении последовательных цепочек переделов (рис. 3) минимум суммарной первичной мощности будет получаться при заданной суммарной конечной мощности системы $P_c = P_{l1} + P_{l2} + \dots + P_{lm}$ при условии

$$\frac{\partial P_{01}}{\partial P_{l1}} = \dots = \frac{\partial P_{0j}}{\partial P_{lj}} = \dots = \frac{\partial P_{0m}}{\partial P_{lm}} = \lambda, \quad (13)$$

где P_{0j} – первичная мощность j -й технологической линии; P_{lj} – конечная мощность j -й технологической линии.

В соответствии с формулой (12)

$$\frac{\partial P_{0j}}{\partial P_{lj}} = 1 + \frac{\partial \sum_{i=1}^l \Delta P_{ij}}{\partial P_{lj}} \quad (14)$$

и

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sum_{i=1}^l \Delta P_{i1}}{\partial P_{l1}} &= \dots = \frac{\partial \sum_{i=1}^l \Delta P_{ij}}{\partial P_{lj}} = \dots \\ &= \frac{\partial \sum_{i=1}^l \Delta P_{im}}{\partial P_{lm}} = \lambda - 1. \end{aligned} \quad (15)$$

При одинаковых расходных характеристиках параллельно работающих переделов или параллельно работающих единичных технологических линиях, когда

$$f(P_{01}) = f(P_{02}) = \dots = f(P_{0j}) = \dots = f(P_{0m}),$$

условие (1) приводит к равенствам

$$P_{l1} = P_{l2} = \dots = P_{lj} = \dots = P_{lm},$$

$$P_{01} = P_{02} = \dots = P_{0j} = \dots = P_{0m},$$

т. е. к необходимости выравнивания конечных и первичных мощностей параллельно работающих переделов или их технологических линий.

Выводы

1. У технологических переделов с нелинейными расходными характеристиками потери энергии разделяются на статическую и динамическую составляющие.
2. При автономной работе переделов или их группы, соединенных последовательно, условный минимум потерь энергии за период времени T достигается, когда выходная мощность неизменна и динамические потери энергии пренебрежимо малы.
3. При параллельной работе одинаковых переделов или единичных технологических линий условный минимум потерь мощности получается при равенстве их выходных мощностей, при неодинаковых переделах — при равенстве их относительных приростов потерь.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Борисов Георгий Александрович

старший научный сотрудник
Институт прикладных математических исследований
Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: borisov@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 766312

Тихомирова Тамара Петровна

ученый секретарь
Институт прикладных математических исследований
Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910
эл. почта: tihomiro@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 785520

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г.
2. *Баринов В. А., Савалов С. А.* Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. М.: Энергоатомиздат, 1990. 440 с.
3. *Болотов В. В.* Теоретические основы выбора экономического режима электроэнергетической системы. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 278 с.
4. *Борисов Г. А., Тихомирова Т. П.* Структурный анализ потерь энергии в электроэнергетическом хозяйстве Карелии // Учен. зап. Петр ГУ. 2009. № 9 (103). С. 93–97.
5. *Борисов Г. А., Тихомирова Т. П.* Исследование математической модели единичной технологической линии топливно-энергетического хозяйства региона // Труды Карельского научного центра РАН. Сер. Математическое моделирование и информационные технологии. Вып. 2. 2011. № 5. С. 10–17.
6. *Горништейн В. М.* Наивыгоднейшие режимы работы гидростанций в энергетических системах. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. 248 с.

Borisov, George

Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: borisov@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 766312

Tikhomirova, Tamara

Institute of Applied Mathematical Research, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: tihomiro@krc.karelia.ru
tel.: (8142) 785520