

## ЭКОНОМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ УРОВЕНЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

М. И. Фурсанов, Д. А. Секацкий

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель М. И. Фурсанов

В Республике Беларусь установлена персональная ответственность руководителей энергоснабжающих организаций и их структурных подразделений за обоснованность, качество исполнения и своевременное предоставление нормативов технологического расхода (потерь) электроэнергии на всех уровнях электрических сетей [1].

Конечное предназначение расчета и анализа электрических сетей и систем заключается в проведении оценки технической допустимости и экономической целесообразности решений, определяющих пропускную способность электрической сети.

При определенном сочетании параметров электрических сетей (типы и номинальные мощности трансформаторов, марки и сечения проводов, длины ЛЭП и т. д.) и электрических нагрузок существует некоторый, теоретически возможный минимум технологического расхода электрической энергии. Он соответствует исключительно идеальным условиям эксплуатации электрических сетей, когда имеется совершенно полная и достоверная отчетная топологическая и режимная информация, выбор управляющих воздействий (оптимизация режимов вместе с разработкой мероприятий по снижению потерь) осуществляется математически точной оптимизацией решений, а реализация управления электрическими сетями также не содержит каких-либо искажений.

Общеизвестно, что потери активной мощности в звене сети от протекания тока нагрузки определяются по выражению

$$\Delta P = \frac{P^2 R}{U^2 \cos^2 \varphi},$$

или в процентах:

$$\Delta P \% = \frac{PR}{U^2 \cos^2 \varphi} 100 \%,$$

откуда наибольшая передаваемая мощность  $P_{нб}$ :

$$P_{нб} = \frac{\Delta P_g \% U^2 \cos^2 \varphi}{R 10^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_g \%$  – допустимые потери мощности по условиям допустимого нагревания проводников.

Рассуждая подобным образом, запишем значение передаваемой мощности в функции допустимых потерь энергии  $\Delta W_g$ :

$$P_{\max} = \frac{\Delta W_g \% U^2 \cos^2 \varphi T_{\max}}{R 10^2 \tau}. \quad (2)$$

Из формул (1), (2) следует, что на пропускную способность элемента сети наибольшее влияние оказывают номинальное напряжение, уровень напряжения и характер нагрузки. Несколько меньше влияют сечение провода, конфигурация графика нагрузки ( $T_{\text{ма}}$ ) и другие параметры.

Показатели, входящие в выражения (1), (2), определяют пропускную способность сети, являются ее режимными параметрами. Покажем, что для каждого из этих режимных параметров можно найти соответствующее ему экономическое значение.

Стоимость передачи электроэнергии  $C_{\text{п}}$  в общем виде состоит из двух составляющих:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{пс}} + C_{\text{пл}},$$

где  $C_{\text{пс}}$  и  $C_{\text{пл}}$  – соответственно, подстанционная и линейная составляющие стоимости.

Для изложения принципа нахождения экономических значений режимных параметров исследуем их. На основе исследований Г. Е. Поспелова и М. И. Фурсанова [2]–[4], можно записать, что:

$$C_{\text{пл}} = \frac{p_{\text{л}} K_{\text{л}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta W_{\text{кор}} \beta_{\text{кор}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta W_{\text{н}} \beta_{\text{н}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} = \frac{p_{\text{л}} K_{\text{л}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta P_{\text{кор}} T \beta_{\text{кор}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta P_{\text{н}} \tau \beta_{\text{н}}}{U^2 \cos^2 \varphi T_{\text{ма}}} = \frac{p_{\text{л}} K_{\text{л}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta P_{\text{кор}} T \beta_{\text{кор}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{P_{\text{макс}} r_{\text{л}} \tau \beta_{\text{н}}}{U^2 \cos^2 \varphi T_{\text{ма}}}, \quad (3)$$

а  $C_{\text{пс}}$  по аналогии с (3) подстанционная составляющая будет равна:

$$C_{\text{пс}} = \frac{p_{\text{т}} K_{\text{т}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta W_0 \beta_0}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta W_{\text{нт}} \beta_{\text{т}}}{P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}}, \quad (4)$$

где  $p_{\text{л}}$  – суммарный коэффициент отчислений от стоимости линии  $K_{\text{л}}$ ;  $\Delta W_{\text{кор}}$  – потери электроэнергии на корону;  $\beta_{\text{кор}}$  – стоимость 1 кВт · ч  $\Delta W_{\text{кор}}$ ;  $\Delta W_{\text{н}}$  – нагрузочные потери электроэнергии;  $\beta_{\text{н}}$  – стоимость 1 кВт · ч  $\Delta W_{\text{н}}$ ;  $\Delta P_{\text{кор}}$  – потери мощности на корону;  $p_{\text{т}}$  – суммарный коэффициент отчислений от стоимости трансформаторов  $K_{\text{т}}$ ;  $\Delta W_0$  – потери электроэнергии холостого хода;  $\beta_0$  – стоимость 1 кВт · ч  $\Delta W_0$ ;  $\Delta W_{\text{нт}}$  – нагрузочные потери электроэнергии в трансформаторах;  $\beta_{\text{т}}$  – стоимость 1 кВт · ч  $\Delta W_{\text{нт}}$ ;  $\Delta P_0$  – потери мощности холостого хода.

Имея в виду, что:

$$\Delta P_{\text{н}} = \frac{P_{\text{макс}}^2 r_{\text{л}}}{U^2 \cos^2 \varphi}; \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{н}} \% = \frac{P_{\text{макс}} r_{\text{л}} 10^2}{U^2 \cos^2 \varphi}; \quad (6)$$

$$P_{\text{макс}} = \frac{\Delta P_{\text{н}} \% U^2 \cos^2 \varphi}{r_{\text{л}} 10^2}; \quad (7)$$

$$W = P_{\text{макс}} T_{\text{ма}}; \quad (8)$$

$$\Delta W_{\text{н}} = \frac{P_{\text{макс}}^2 r_{\text{л}} \tau}{U^2 \cos^2 \varphi}; \quad (9)$$

$$\Delta W_{\text{н}} \% = \frac{P_{\text{макс}} r_{\text{л}} 10^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \cdot \frac{\tau}{T_{\text{ма}}}, \quad (10)$$

для линейной составляющей  $C_{\text{пл}}$  получим выражение

$$C_{\text{пл}} = \frac{p_{\text{л}} K_{\text{л}} + \Delta P_{\text{кор}} T \beta_{\text{кор}}}{\Delta P_{\text{н}} \% \frac{U^2 \cos^2 \varphi}{r_{\text{л}} 10^2} T_{\text{ма}}} + \frac{\Delta P_{\text{н}} \% \tau \beta_{\text{н}}}{T_{\text{ма}} 10^2} = \frac{(p_{\text{л}} K_0 l + \Delta P_{\text{кор}} T \beta_{\text{кор}}) r_0 l 10^2}{\Delta P_{\text{н}} \% U^2 \cos^2 \varphi T_{\text{ма}}} +$$

$$+ \frac{\Delta P_{\text{н}} \% \tau \beta_{\text{н}}}{T_{\text{ма}} 10^2} = \frac{\tau \beta_{\text{н}}}{T_{\text{ма}} 10^2} \left[ \frac{(p_{\text{л}} K_0 l + \Delta P_{\text{кор}} T \beta_{\text{кор}}) r_0 l 10^4}{\tau \beta_{\text{н}} \Delta P_{\text{н}} \% U^2 \cos^2 \varphi} + \Delta P_{\text{н}} \% \right], \quad (11)$$

для подстанционной составляющей  $C_{\text{пс}}$ , соответственно:

$$C_{\text{пс}} = \frac{\tau_{\text{т}} \beta_{\text{т}}}{T_{\text{ма}} 10^2} \left[ \frac{(p_{\text{т}} K_{\text{т}} + \Delta P_0 T \beta_0) r_{\text{т}} 10^4}{\tau_{\text{т}} \beta_{\text{т}} \Delta P_{\text{нт}} \% U_{\text{т}}^2 \cos_{\text{т}}^2 \varphi} + \Delta P_{\text{нт}} \% \right], \quad (12)$$

где  $K_0$  – стоимость одного километра линии длиной  $l$ ;  $r_0$  – удельное сопротивление провода;  $K_{\text{т}}$  – стоимость одного трансформатора;  $r_{\text{т}}$  – активное сопротивление трансформатора.

Зависимости (11) и (12) имеют минимум. Поэтому из условий  $\frac{\partial C_{\text{пл}}}{\partial \Delta P_{\text{н}} \%} = 0$  и  $\frac{\partial C_{\text{пс}}}{\partial \Delta P_{\text{нт}} \%} = 0$  найдем экономические потери мощности в линии и трансформаторе в максимальном режиме, соответствующие минимуму стоимости передачи электроэнергии.

Для линии можно записать:

$$\frac{\partial C_{\text{пл}}}{\partial \Delta P_{\text{н}} \%} = \frac{\tau \beta_{\text{н}}}{T_{\text{ма}} 10^2} \left[ - \frac{(p_{\text{л}} K_0 l + \Delta P_{\text{кор}} T \beta_{\text{кор}}) r_0 l 10^4}{\tau \beta_{\text{н}} \Delta P_{\text{н}} \%^2 U^2 \cos^2 \varphi} + 1 \right] = 0. \quad (13)$$

Из (13) видно, что

$$\tau\beta_n\Delta P_n \%^2 U^2 \cos^2 \varphi = (p_l K_0 l + \Delta P_{\text{кор}} T\beta_{\text{кор}}) r_0 l 10^4,$$

откуда искомое значение  $\Delta P_{\text{кор}} \%$  (с учетом потерь на корону  $\Delta P_{\text{кор}}$ ) будет равно:

$$\Delta P_{\text{эл}} \% = \frac{10^2}{U \cos \varphi} \sqrt{\frac{(p_l K_0 l + \Delta P_{\text{кор}} T\beta_{\text{кор}}) r_0 l}{\tau\beta}}. \quad (14)$$

Для трансформатора значение  $\Delta P_{\text{эт}} \%$  будет равно:

$$\Delta P_{\text{эт}} \% = \frac{10^2}{U_T \cos \varphi_T} \sqrt{\frac{(p_T K_T + \Delta P_0 T\beta_0) r_T}{\tau_T \beta_T}}, \quad (15)$$

или без учета потерь холостого хода  $\Delta P_0$ :

$$\Delta P_{\text{эт}} \% = \frac{10^2}{U_T \cos \varphi_T} \sqrt{\frac{p_T K_T r_T}{\tau_T \beta_T}}. \quad (16)$$

Получены аналитические соотношения по расчету экономически обоснованных уровней потерь электроэнергии в сетях энергосистем, которые требуют уточнения и дальнейшей проверки с учетом инструментальных погрешностей, а также в связи с влиянием на расчет атмосферной составляющей.

#### Л и т е р а т у р а

1. Положение по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов на предприятиях, в учреждениях и организациях государственного производственного объединения ГПО «Белэнерго» Инструкции по расчету и обоснованию нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям : постановление от 16.12.13 г. № 48 (в ред. постановления от 05.07.17 г. № 23).
2. Поспелов, Г. Е. Элементы технико-экономических расчетов систем электропередач / Г. Е. Поспелов. – Высш. шк., 1967. – 311 с.
3. Фурсанов, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск : УВИЦ при УП «Белэнерго» 2005. – 208 с.
4. Фурсанов, М. И. Методология и практика расчетов потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск : Технология, 2001. – 247 с.