

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В.А. Овсейчук, глав. эксперт ООО ПФК «СКАФ», д-р экон. наук, проф., засл. энергетик СНГ, академик РАЕН, г. Москва

В статье сформулированы понятия технического и экономического оптимумов загрузки электрической сети при передаче по ней электроэнергии. На примере показателей одной электросетевой организации АО «Энерго» разработаны энергетические и экономико-математические модели передачи электроэнергии, позволяющие определять технический и экономический оптимум загрузки электрической сети. Разработанные математические модели работы электрической сети позволяют определить технико-экономическую эффективность передачи электроэнергии по сети и могут использоваться при проектировании развития электрической сети и в условиях ее эксплуатации электросетевым менеджментом.

Ключевые слова: Электрическая сеть, математические модели, критерии оптимальной загрузки, проектирование, эксплуатация.

TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY PERFORMANCE OF ELECTRIC NETWORKS

V.A. Ovseichuk, Chief Expert Ltd. PFC «SCAF», Ph.D. of Economics, Professor, Honored Power Engineer of the CIS, Member of the Academy of Natural Sciences, Moscow

The article defines the concept of technical and economic optimum load transmission mains power on it. For example, indicators of a grid organization of «Energy» developed energy and economic-mathematical models of the transmission of electricity, allowing to determine the technical and economic optimum load power supply. The developed mathematical models of the electrical network allow us to determine the technical and economic efficiency of power transmission over the network and can be used in the design of the electrical network and the conditions of its operation electric grid management.

Keywords: The electrical network, mathematical models, criteria for optimum loading, design, operation.

Технический оптимум загрузки электрической сети – загрузка электрической сети, при которой достигается максимальный коэффициент полезного действия (к.п.д) передачи электроэнергии по электрической сети. Технический оптимум загрузки электрической сети (максимальный к.п.д) достигается при минимальных технических потерях электроэнергии при ее передаче в электрической сети, которые возможны при условии равенства постоянных и переменных (нагрузочных) потерь электроэнергии.

Экономический оптимум загрузки электрической сети – загрузка электрической сети, при которой достигается наибольшая экономическая эффективность передачи электроэнергии в электрической сети, характеризующаяся минимумом расходов (затрат) на единицу передаваемой электроэнергии по сети (при условии обеспечения технических требований к надежности, качеству и безопасности передачи электроэнергии).

В энергосервисной компании ООО ПФК «СКАФ» разработаны и апробированы энерго-экономические модели по обоснованию технико-экономической эффективности работы электрических сетей, которые позволяют:

– оценить техническую загрузку электрических сетей по уровням напряжения и в целом по организации (оценить пропускную способность электросети, возможность и необходимость технической дозагрузки электросети);

– определить экономическую эффективность передачи электроэнергии по электрическим сетям организации с целью ее повышения (определение стоимости передачи электроэнергии, ее прогнозирование при изменении отпуска электроэнергии в сеть);

– определить техническую и экономическую эффективность передачи электроэнергии при проектировании, реконструкции или техперевооружении, эксплуатации электрических сетей (техничко-экономическое обоснование).

Рассмотрим расчеты и их результаты на примере некоторой «АО-энерго».

Технический оптимум загрузки электрической сети

Зависимость суммарных технических потерь электроэнергии ΔW_T , млн кВтч, от отпуска электроэнергии в сеть W_{oc} , млн кВтч, и числа часов работы оборудования T , час/год [1]:

$$\Delta W_T = \Delta W_{уп} + \Delta W_{нп} = A_0 \times T + A_1 \times \frac{W_{oc}^2}{T}, \quad (1)$$

где коэффициенты A_0 и A_1 , равны: $\Delta W_T = \frac{\Delta W_{уп}}{T}$; $A_1 = \frac{\Delta W_{нп} \times T}{W_{oc}^2}$ $\Delta W_{уп}$ – условно-постоянные потери электроэнергии, млн кВтч; $\Delta W_{нп}$ – нагрузочные потери электроэнергии, млн кВтч; ΔW_{oc} – отпуск электроэнергии в сеть, млн кВтч.

Для одной «АО-энерго» на основе результатов расчета технических потерь электроэнергии за базовый год получены коэффициенты A_0 и A_1 :

$$A_0 = \frac{\Delta W_{уп}}{T} = \frac{15,505137}{8760} = 0,001770 \text{ млн кВтч};$$

$$A_1 = \frac{\Delta W_{нп} \times T}{W_{oc}^2} = \frac{30,603649 \times 8760}{570^2} = \frac{268088}{570^2} = 0,82514 \text{ ч/млн кВтч},$$

где $\Delta W_{уп} = 15,505137$ млн кВтч; $\Delta W_{нп} = 30,603649$ млн кВтч; $\Delta W_T = 46,108786$ млн кВтч – из расчета технических потерь электроэнергии за базовый период; $\Delta W_{oc} = 570$ млн кВтч.

После подстановки в (1) расчетных показателей постоянных и нагрузочных потерь за базовый год по «АО-энерго», получили при $T = 8760$ час/год, математическую модель зависимости технических потерь электроэнергии от отпуска электроэнергии в электрическую сеть:

$$\Delta W_T = 15,505137 + 94,194 \times 10^{-6} W_{oc}^2. \quad (2)$$

По (2) построена зависимость технических потерь электроэнергии от отпуска электроэнергии в сеть «АО-энерго» (рис. 1), откуда видно, что для данного отпуска электроэнергии в сеть *минимум относительных технических потерь*, соответствующий равенству условно-постоянных и переменных потерь в электрической сети «АО-энерго» пройден.

В дальнейшем, при допущении о неизменности состава оборудования, режимов работы электрических сетей и росте отпуска электроэнергии в сеть будет наблюдаться только плавный рост абсолютных и относительных технических потерь электроэнергии.

Значение технического оптимума (минимума) потерь электрической энергии для данного состояния сети «АО-энерго» может быть определено аналитически по полученной зависимости (2).

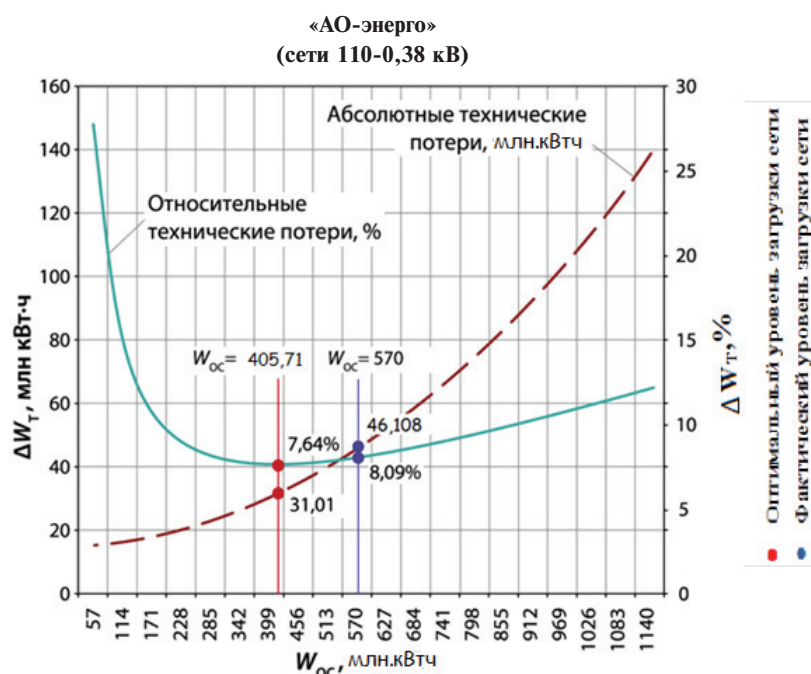


Рис. 1. Зависимость годовых технических потерь электроэнергии ΔW_T «АО-энерго» от отпуска электроэнергии ΔW_{oc} в сеть

Разделив левую и правую часть уравнения (2) на W_{oc} и, соответственно, умножив на 100 %, получим выражение нормативной характеристики технических потерь электроэнергии в сети «АО-энерго» ($a_T\%$) в зависимости от отпуска электроэнергии в сеть, W_{oc} , млн кВт·ч:

$$a_T \% = 1550,5137 \times W_{oc}^{-1} + 9419,4 \times 10^{-6} W_{oc}. \quad (3)$$

Из условия равенства первой производной нулю ($a_T^1 = 0$) находим, что оптимальное значение нормативной величины технических потерь (технический оптимум загрузки сети) достигается при $W_{oc} = 405,71$ млн кВт·ч и соответствует значению $a_T \approx 7,64\%$ (при равенстве постоянных и нагрузочных потерь по 3,82 %):

$$a_T^1 = -1550,5137 \times W_{oc}^{-2} + 9419,4 \times 10^{-6} = 0;$$

$$W_{oc} = \sqrt{\frac{1550,5137}{9419,4 \times 10^{-6}}} = 405,71 \text{ млн кВт·ч.}$$

Из (3): $a_T \% = 1550,5137 \times 405,71^{-1} + 9419,4 \times 10^{-6} \times 405,71 = 3,82\% + 3,82\% = 7,64\%$, т.е. максимальный к.п.д. передачи электроэнергии для данной сети составляет $\eta_{\text{макс}} = (100 - 7,64) = 92,36\%$ и соответствует отпуску электроэнергии в сеть в размере 405,71 млн кВт·ч.

Поскольку вторая производная $a_T > 0$, то это значение соответствует минимуму функции (3), после чего значение относительных потерь возрастает при росте отпуска электроэнергии в сеть (рис. 1).

По уравнению (3) можно определить, путем подстановки в уравнение значения отпуска электроэнергии в сеть в базовом периоде W_{oc}^0 , величину условно-постоянных ($\alpha_{уп}\%$) и нагрузочных потерь ($\alpha_{нп}\%$) в базовом периоде регулирования для «АО-энерго».

Из рис. 1 видно, что $W_{oc}^6 = 570$ млн кВтч, тогда по (3):

$$\alpha_T \% = 1550,5137 \times 570^{-1} + 9419,4 \times 10^{-6} \times 570 = 2,72 \% + 5,37 \% = 8,09 \%$$

Следовательно, при отпуске электроэнергии в сеть в размере 570 млн кВтч в базовом периоде регулирования для данного состояния электрических сетей всех классов напряжения «АО-энерго» нормативная величина технических потерь составляет 8,09%, в т.ч. условно-постоянные потери – 2,72%, нагрузочные потери – 5,37% от отпуска электроэнергии в сеть, а к.п.д. передачи электроэнергии составит $(100 - 8,09) \approx 91,9\%$. Из расчетов технической эффективности передачи электроэнергии следует, что в целом для рассматриваемой сети «АО-энерго» технический оптимум загрузки сети пройден при отпуске электроэнергии в сеть в размере 405,71 млн кВтч ($\eta_{\max} = 92,36\%$). На современном уровне при расчетном отпуске в сеть 570 млн кВтч относительная величина технических потерь электроэнергии и «АО-энерго» составляет 8,09% и при дальнейшем росте отпуска электроэнергии в сеть будет возрастать.

Методика определения технического оптимума загрузки электрической сети более подробно изложена в [1].

Экономический оптимум загрузки сети

Работа электрических сетей должна соответствовать требованиям наибольшей экономичности. Это относится и к проектированию и к условиям эксплуатации электрической сети.

На практике обычно за исходные требования режимов работы электрических сетей принимаются технические требования по надежности электроснабжения и качеству передаваемой электроэнергии, а принимаемые технические решения в дальнейшем корректируются по условиям экономичности.

Поэтому, в условиях эксплуатации электрических сетей, должен проводиться анализ повышения экономичности работы электрических сетей, который характеризуется минимумом расходов (затрат) на единицу передаваемой электроэнергии по сети.

Для данного «АО-энерго» по материалам тарифного дела:

– условно-постоянные расходы на содержание сетей составили $ННВ_{\text{сод}} = 659,4$ млн руб./год при отпуске электроэнергии в сеть – $W_{oc} = 570$ млн кВтч/год;

– технологические (технические) потери электроэнергии в год с округлением – $\Delta W_T = 46,108$ млн кВтч ($\Delta W_{\text{уп}} = 15,505$ млн кВтч, $\Delta W_{\text{нп}} = 30,603$ млн кВтч);

– тариф на электроэнергию в целях компенсации потерь электроэнергии в сетях – $T_{\text{пот}} = 1,742$ руб./кВтч.

Составим экономико-математическую модель (ЭММ) стоимости передачи электроэнергии.

Левую и правую часть уравнения (2) умножив на тариф компенсации потерь, $T_{\text{пот}}$, получим уравнение стоимости потерь:

$$\Delta W_T \times T_{\text{пот}} = 15,505 \times T_{\text{пот}} + 94,194 \times 10^{-6} \times T_{\text{пот}}. \quad (4)$$

Уравнение (4) представляет собой выражение стоимости годовых потерь электроэнергии ($Z_{\text{пот}}$), состоящую из стоимости условно-постоянных потерь ($Z_{\text{пот.уп.}}$), независимых от отпуска электроэнергии в сеть и стоимости переменных потерь ($Z_{\text{пот.пер.}}$), зависящих от квадрата отпуска электроэнергии в сеть:

$$Z_{\text{пот}} = Z_{\text{пот.уп.}} + Z_{\text{пот.пер.}} = 15,505 \times 1,742 + 94,194 \times 10^{-6} \times 1,742 \times W_{oc}^2. \quad (5)$$

Произведя необходимые вычисления, получим:

$$Z_{\text{пот}} (НВВ_{\text{пот}}) = 27 + 164,086 \times 10^{-6} \times W_{oc}^2, \quad (6)$$

где $Z_{\text{пот}}$ – в млн руб. ($НВВ_{\text{пот}}$ – необходимая валовая выручка на компенсацию технологических потерь); W_{oc} – млн кВтч.

Запишем уравнение необходимой валовой выручки компании на передачу электроэнергии по электрическим сетям ($HBB_{\text{перед}}$), состоящую из выручки на содержание сетей ($HBB_{\text{сод}}$) и выручки ($HBB_{\text{пот}}$) на компенсацию нормативных технологических (технических) потерь электроэнергии (7).

В данных расчетах при построении ЭММ выручка на компенсацию потерь принималась по величине компенсации стоимости технических потерь, что практически не сказывается на конечных результатах.

$$HBB_{\text{перед}} = HBB_{\text{сод}} + HBB_{\text{пот}}. \quad (7)$$

После подстановки в (7) численных значений ($HBB_{\text{сод}} = 659,4$ млн руб.), и $HBB_{\text{пот}}$ по (6), получим экономико-математическую модель передачи электроэнергии в зависимости от отпуска электроэнергии в сеть:

$$HBB_{\text{перед}} = 686,4 + 164,086 \times 10^{-6} \times W_{\text{ос}}^2, \quad (8)$$

где $HBB_{\text{перед}}$ – млн руб.; $W_{\text{ос}}$ – млн кВтч; 686,4 млн руб. – постоянная часть $HBB_{\text{перед}}$, не зависящая от отпуска электроэнергии в сеть; $164,086 \times W_{\text{ос}}^2$ – переменная часть выручки на передачу электроэнергии, зависящая от отпуска электроэнергии в сеть.

Разделив левую и правую часть уравнения (8) на $W_{\text{ос}}$, получим выражение (ЭММ) стоимости передачи электроэнергии ($S_{\text{перед}}$):

$$S_{\text{перед}} = 686,4 \times W_{\text{ос}}^{-1} + 164,086 \times 10^{-6} \times W_{\text{ос}}. \quad (9)$$

Взяв первую производную выражения (9) по переменной $W_{\text{ос}}$ и приравняв это выражение к нулю, получим:

$$\frac{dS_{\text{перед}}}{dW_{\text{ос}}} = S'_{\text{перед}} = -686,4 \times W_{\text{ос}}^{-2} + 164,086 \times 10^{-6} = 0, \quad (10)$$

откуда найдем значение переменной $W_{\text{ос}}$, которое соответствует оптимальному значению функции $S_{\text{перед}}$:

$$W_{\text{ос.опт.}} = \sqrt{\frac{686,4 \times 10^6}{164,086}} \approx 2045 \text{ млн кВтч}. \quad (11)$$

Поскольку вторая производная $S''_{\text{перед}} > 0$, ($S''_{\text{перед}} = \frac{(-686,4) \times (-2)}{W_{\text{ос}}^3} = \frac{1373}{W_{\text{ос}}^3} > 0$), то значению $W_{\text{ос}} = 2045$ млн кВтч соответствует минимальное значение функции $S_{\text{перед. min}}$, которую можно определить по (9):

$$S_{\text{перед.опт. (min)}} = 686,4 \times 2045^{-1} + 164,086 \times 10^{-6} \times 2045 = 0,336 + 0,336 = 0,6712 \text{ руб./кВтч}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что минимальную стоимость передачи электроэнергии при существующем состоянии электрических сетей «АО-энерго» следует ожидать при отпуске электроэнергии в сеть $W_{\text{ос}} = 2045$ млн кВтч, что в 3,6 раза выше отпуска в сеть в базовом году (570 млн кВтч).

Очевидно, достичь этого отпуска в сеть, даже в отдаленной перспективе, без существенной реконструкции и технического перевооружения сети, требующих больших вложений, невозможно. Однако сделанные расчеты показывают, что достижение экономической эффективности передачи электроэнергии в сети «АО-энерго» требует максимальной ее загрузки (в часы максимума) вплоть до пределов технической возможности, исходя из нагрузоч-

ной способности элементов сети (ЛЭП, трансформаторов 10(6–3)/0,4 кВ) и обеспечения надежности электроснабжения и качества передаваемой электроэнергии.

На основании ЭММ стоимости передачи электроэнергии (9) сделана оценка для существующей электрической сети стоимости передачи электроэнергии для различных уровней отпуска электроэнергии в сеть (рис. 2):

- $W_{oc} = 15,505$ млн кВтч – холостой ход сети (включение сети);
- $W_{oc} = 570$ млн кВтч – существующая загрузка сети;
- $W_{oc} = 405,71$ млн кВтч – технический оптимум сети (ранее пройденный (рис. 1));
- $W_{oc} = 800$ млн кВтч – технический предельный уровень загрузки существующей сети 110–0,38 кВ (по экспертной оценке).

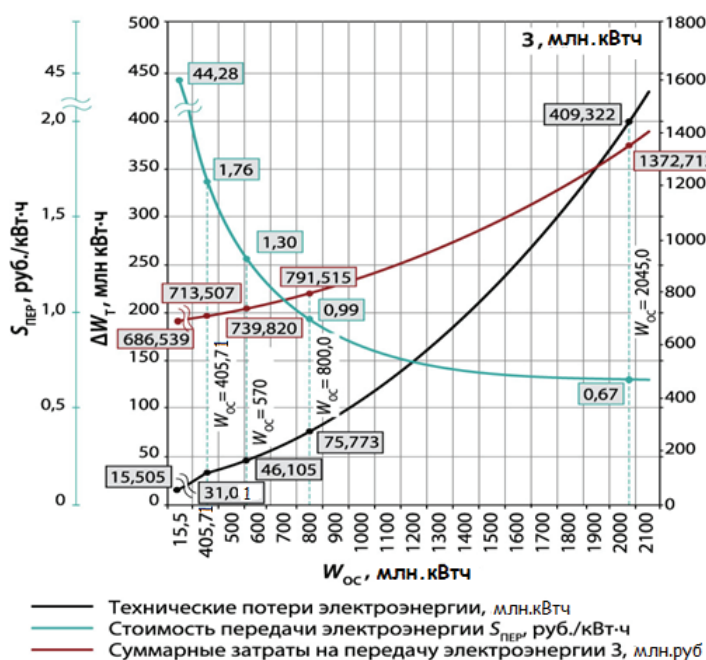


Рис. 2. Зависимость технико-экономических показателей передачи электроэнергии в сети «АО-энерго» от отпуска электроэнергии в сеть

Результаты расчетов (по 9) стоимости передачи электроэнергии по сети «АО-энерго» приведены в таблице.

Стоимость передачи электроэнергии по сети 110–0,38 кВ «АО-энерго» при различной ее загрузке (W_{oc})

W_{oc} , млн кВтч	15,505 (вкл. сети)	405,71 (тех. опт.)	570 (сущ.)	800 (тех. возм.)	2045 (экон. опт.)
$S_{перед.}$, руб/кВтч	44,3	1,76	1,3	0,99	0,67

Из приведенных расчетов экономической эффективности загрузки сети «АО-энерго» от существующего уровня 570 млн кВтч до технически возможного уровня 800 млн кВтч следует, что предельная технически возможная загрузка сети «АО-энерго» позволит получить экономию за весь период догрузки сети с 570 до 800 млн кВтч около: $(1,3 \text{ руб./кВтч} - 0,99 \text{ руб./кВтч} \times 800) \text{ млн кВтч} = 248 \text{ млн руб.}$

Выводы

Предложенная экономико-математическая модель для определения технико-экономической эффективности работы ЭС (электрической сети) позволяет:

- оценить техническую загрузку ЭС, включая максимальный КПД передачи, по уровням напряжения и в целом по сетевой компании (пропускную способность электросети, возможность и целесообразность дозагрузки ЭС);
- определить экономическую эффективность передачи электроэнергии по ЭС сетевой компании с целью ее повышения (определение стоимости передачи электроэнергии, ее прогнозирование при изменении отпуска электроэнергии в сеть);
- определить техническую и экономическую эффективность передачи электроэнергии при проектировании, реконструкции или техперевооружения, эксплуатации электрических сетей.

В условиях эксплуатации определение оптимальной технической и экономической загрузки ЭС позволяет предоставить эксплуатационному персоналу и менеджменту компании рекомендации по реализации экономически и технически достижимого потенциала снижения стоимости передачи электроэнергии и получения дополнительной прибыли.

Экспертная оценка по базе баланса электроэнергии за 2012 г. ОАО «Холдинг МРСК» показала, что дозагрузка сетей 10(6) кВ на 10% обеспечит снижение себестоимости передачи электроэнергии и рост прибыли на 400 млн руб.

Список литературы

Овсейчук В.А., Дворников Н.И., Калинин М.А. Методика учета расхода электроэнергии на ее передачу (потерь) в электрических сетях при тарифном регулировании: Учебно-методическое пособие / Под общей ред. Г.П. Кутового. М.: ИПК Госслужбы. 2006.

References

Ovseychuk V.A., Dvornikov N.I., Kalinkina M.A. (2006) *Metodika ucheta raskhoda elektroenergii na ee peredachu (poter') v elektricheskikh setyakh pri tarifnom regulirovanii: Uchebno-metodicheskoe posobie. Pod obshchey red. G.P. Kutovogo* [The treatment of electricity consumption for its transfer (loss) in electrical networks in the tariff regulation: Study guide. Under the general editorship. GP Kutovoy]. *IPK Gossluzhby* [COE Civil service].