



УДК 621.3.017.8

ВЛИЯНИЕ ГРАФИКА НАГРУЗКИ НА ПОТЕРИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ¹, С.ПИРОГ²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

² AGH Научно-технический университет, Краков, Польша

В последние годы в публикациях ученых и специалистов в области электроэнергетики часто говорится о необходимости уменьшения потерь при передаче электроэнергии. Среди различных способов достижения этой цели простотой, доступностью и эффективностью выделяется способ выравнивания графика нагрузки предприятия. В статье предложен новый коэффициент для оценки дополнительных потерь мощности в распределительной сети. Известно, что дисперсия графика нагрузки коррелирует с величиной потерь мощности, поэтому величина предлагаемого коэффициента поставлена в зависимость от формы графика нагрузки предприятия. Показано, что с помощью предлагаемого коэффициента можно легко определить необходимость проведения технических мероприятий по выравниванию графика нагрузки предприятия и оценить их эффективность.

Ключевые слова: график нагрузки, передача электроэнергии, регуляторы мощности, коэффициент нагрева проводников.

Как цитировать эту статью: Шклярский Я.Е. Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия / Я.Е.Шклярский, С.Пирог // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С. 859-863. DOI 10.18454/PMI.2016.6.859

Введение. Вопросы энергоэффективного производства, передачи и потребления электрической энергии взаимосвязаны между собой. Большую долю в выработке электроэнергии составляет энергия, полученная из органического топлива: газа, угля, нефтепродуктов и т.д. Кроме этого, все большее значение приобретают альтернативные источники энергии [9, 12, 14].

Одним из основных интегральных показателей энергоэффективности использования поступающей на предприятие энергии является график электрической нагрузки [7, 10, 11, 13, 15, 16].

Неравномерный суточный график потребления электроэнергии снижает энергоэффективность производства, передачи и потребления электроэнергии. На каждом из этих этапов требуется установка дорогостоящего оборудования с завышенными характеристиками, которое работает на своих номинальных значениях лишь незначительный промежуток времени.

Дополнительной проблемой является увеличение потерь электроэнергии в сетях в связи с неравномерностью графика нагрузки. Это значительно влияет на срок службы электрических сетей, особенно кабельных линий.

Регулирование электропотребления существенным образом влияет не только на процессы выработки электроэнергии, но и на процессы ее передачи [5]. Задача повышения энергоэффективности производства является очень важной и продиктована прежде всего соображениями конкурентоспособности. От ее эффективного решения нередко зависит выживание предприятий, а в некоторых случаях и целых отраслей народного хозяйства. Существует множество способов ее повышения, зачастую связанных с внедрением новых технологий и изменением технологического процесса.

Разработка подхода к рациональному использованию накопителей энергии с учетом исходного переменного графика нагрузки позволит существенно снизить не только затраты на потребление электроэнергии предприятием, но и затраты при ее производстве.

Режимы работы потребителей электрической энергии не остаются постоянными, а непрерывно изменяются в течение суток, недель и месяцев года [4, 6, 8, 15]. Соответственно изменяется и нагрузка всех звеньев передачи и распределения электроэнергии и генераторов электрических станций. Изменение нагрузок электроустановок в течение времени принято изображать графически в виде графиков нагрузки. Различают графики активных и реактивных нагрузок. По продолжительности графики нагрузки делятся на сменные, суточные и годовые. В условиях эксплуатации изменения нагрузки по активной и реактивной мощности во времени представляют в виде ступенчатой кривой по показаниям счетчиков активной и реактивной электроэнергии, снятыми через одинаковые определенные интервалы времени (30 или 60 мин).

Большое влияние на энергоэффективность оказывает суточный график нагрузки электротехнического комплекса предприятия. В случае его выравнивания происходит снижение удельного расхода топлива на выработку электроэнергии, снижение требуемой на покрытие пиковых нагрузок установленной мощности электростанций, снижение потерь энергии в электрических сетях [3].

Характерные суточные графики электрических нагрузок предприятий различных отраслей промышленности приведены на рис. 1.

Анализ представленных графиков нагрузки предприятий различных отраслей промышленности показывает, что равномерность потребления электроэнергии в них отличается существенным образом. Характерно, что потребление энергии при нефтепереработке, угледобыче, торфопереработке, цветной металлургии, химической отрасли, черной металлургии, тяжелом машиностроении равномерно в течение суток. Для ремонтно-механических заводов, предприятий станкостроения, автомобилестроения, деревообрабатывающей промышленности, легкой промышленности характерны существенные спады потребления электроэнергии в ночное время. Предприятия тяжелого машиностроения, автомобилестроения, станкостроения, ремонтно-механических заводов, предприятий черной металлургии, торфопереработки имеют существенное отличие в потреблении электроэнергии в выходные дни.

Знание графиков нагрузки позволяет определять величину сечений проводов и жил кабелей, оценивать потери напряжения, выбирать мощности генераторов электростанций, рассчитывать системы электроснабжения проектируемых предприятий, решать вопросы технико-экономического характера и др.

В отдельную группу, характерную для подавляющего большинства предприятий, можно выделить потери энергии при ее передаче. Особого внимания для промышленных предприятий заслуживают потери энергии в электросетях, являющиеся крайне негативным явлением, избежать которого невозможно, но в случае регулирования потребления электроэнергии возможно уменьшение потерь. Основная часть этих потерь приходится на тепловой нагрев проводников, который пропорционален квадрату протекающего в них тока.

Отсутствие простой методики определения снижения потерь электроэнергии при выравнивании графика нагрузки приводит к увеличению трудоемкости расчетов. Поэтому целью исследований, представленных в статье, является выявление зависимостей, позволяющих быстро оценивать изменение потерь энергии в электросетях при различных режимах работы предприятия.

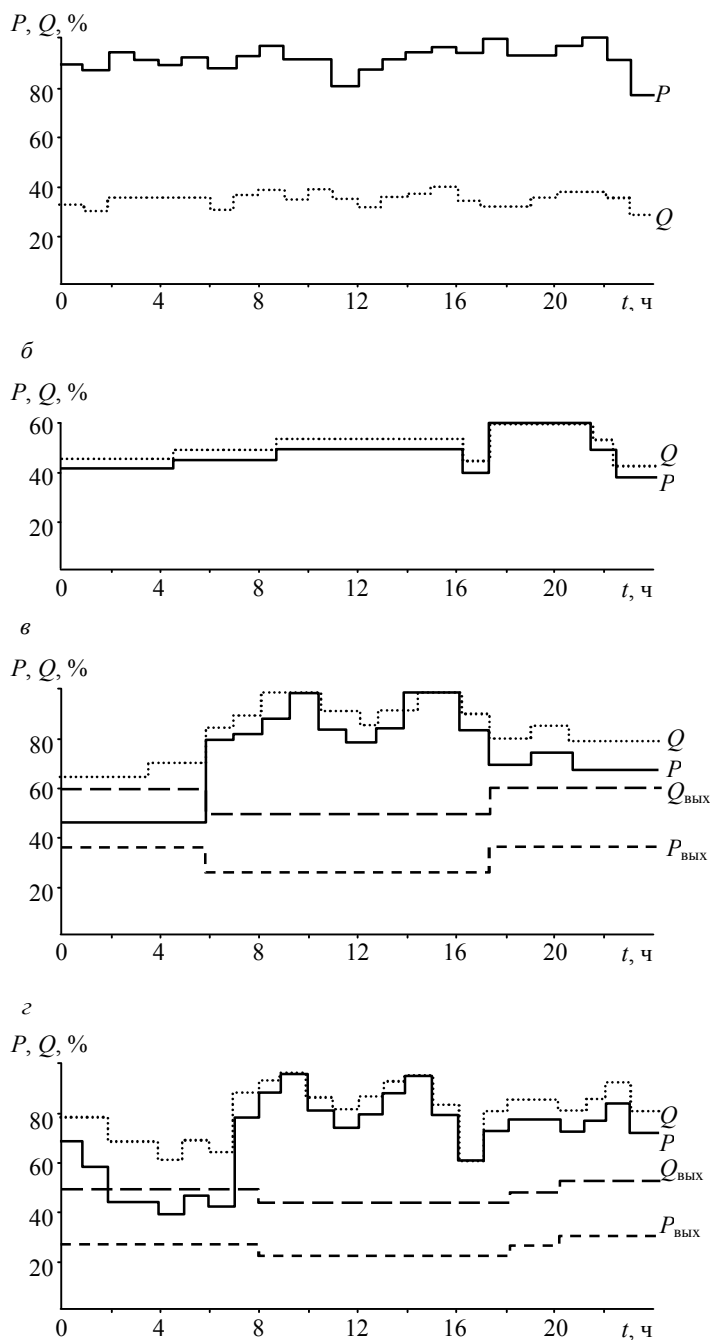


Рис. 1. Характерный суточный график предприятий: нефтеперерабатывающих (а); угледобычи (б); станкостроения (в); автомобилестроения (г)

Методика исследований. Применительно к графикам активной и реактивной мощностей, площади которых определяют расход активной и реактивной энергии, можно написать:

$$P_{сТ} = \frac{\int_0^T P dt}{T} = \frac{W_{аТ}}{T}; \quad Q_{сТ} = \frac{\int_0^T Q dt}{T} = \frac{W_{рТ}}{T}, \quad (1)$$

где $P_{сТ}$ и $Q_{сТ}$ – средние за время T активная и реактивная мощности соответственно; $W_{аТ}$, $W_{рТ}$ – потребленные за время T активная и реактивная энергии соответственно.

Средней мощности за время T соответствует средний ток

$$I_{сТ} = \frac{P_{сТ}}{\sqrt{3}U_{н} \cos \varphi_T}, \quad (2)$$

где $U_{н}$ – номинальное напряжение; $\cos \varphi_T$ – средневзвешенное значение за время T ,

$$\cos \varphi_T = \cos(\arctg \frac{W_{рТ}}{W_{аТ}}). \quad (3)$$

Для сравнения потерь энергии рассмотрим простейший пример, в котором происходит равномерная передача одинакового количества электроэнергии за различное время, при этом к источнику подсоединен узел нагрузки через линию с активным сопротивлением R . Пусть в первом случае через проводник течет ток I_1 , узел нагрузки равномерно потребляет энергию $W_{н}$ за время T_1 . Тогда для этого случая

$$W_1 = I_1^2 R T_1, \quad (4)$$

где W_1 – потери энергии на нагрев проводника.

Во втором случае узел нагрузки равномерно потребляет ту же энергию W_2 , но за большее время T_2 и протекающем в проводнике токе I_2 . Тогда

$$W_2 = I_2^2 R T_2. \quad (5)$$

Примем напряжение на нагрузке неизменным ($U_r = \text{const}$) в обоих случаях, тогда

$$U_r I_1 T_1 = U_r I_2 T_2, \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{I_1 T_1}{T_2}. \quad (7)$$

Отношение потерь энергии можно представить в виде:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\int_0^{T_2} P_2(t) dt}{\int_0^{T_1} P_1(t) dt} = \frac{I_2^2 R T_2}{I_1^2 R T_1} = \frac{I_1^2 (\frac{T_1}{T_2})^2 R T_2}{I_1^2 R T_1} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что в простейшем случае выравнивания нагрузки мощность, потребляемая на нагрев проводников, характеризуется отношением времени питания нагрузки. Очевидно, что для расчета сокращения потерь можно применить выражение, которое определим как коэффициент нагрева проводников $K_{нп}$. Если речь идет о максимальном выравнивании нагрузки до равномерного потребления, добавим индекс «м» – $K_{нпм}$. Коэффициент нагрева проводников в общем виде представлен формулой

$$K_{нп} = 1 - \frac{W_2}{W_1} = 1 - \frac{\int_0^{T_2} P_2(t) dt}{\int_0^{T_1} P_1(t) dt} = 1 - \frac{I_2^2 R T_2}{I_1^2 R T_1} = 1 - \frac{I_1^2 (\frac{T_1}{T_2})^2 R T_2}{I_1^2 R T_1} = 1 - \frac{T_1}{T_2}. \quad (9)$$

Рассмотрим пример. Если при наличии узла нагрузки, в течение 10 ч в сутки равно потребляющего электроэнергию, равномерно распределить потребление на 24 ч, то получим

$$K_{\text{нп}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{10}{24} = 0,58. \quad (10)$$

Иными словами, произойдет сокращение потерь на нагрев проводников на 58 %.

На практике равномерные графики нагрузки встречаются крайне редко, обычно применяют графики нагрузки с интервалом осреднения ($T_{\text{оср}}$ – время осреднения). В таком случае коэффициент примет вид

$$K_{\text{нп}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_{i2} T_{\text{оср}}}{\sum_{i=1}^n P_{i1} T_{\text{оср}}}, \quad (11)$$

где i – ступень графика нагрузки; P_{i1} и P_{i2} – ступени мощности первого и второго графиков нагрузки соответственно.

Для вычисления всех потерь на нагрев, связанных с неравномерностью графика, свяжем $K_{\text{нпм}}$ и коэффициент формы $K_{\text{ф}}$, для этого рассмотрим подробнее следующие выражения.

Среднеквадратичная нагрузка за некоторый интервал времени определяется выражением

$$P_{\text{эТ}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t)]^2 dt}. \quad (12)$$

Аналогичные выражения могут быть получены для полной мощности и тока. Среднеквадратичная нагрузка характеризует эффект нагрева проводника током, поэтому ее часто называют эффективной нагрузкой (отсюда индекс «э» в символе среднеквадратичной нагрузки). Из выражения (12) нетрудно заключить, что при неравномерном графике среднеквадратичная нагрузка $P_{\text{эТ}}$ лежит всегда выше средней $P_{\text{сТ}}$, причем это превышение возрастает с увеличением неравномерности графика, т.е. при его пиковом характере [2].

Определение среднеквадратичной (эффективной) нагрузки при заданном ступенчатом графике сводится к расчету по формуле

$$P_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{n}}, \quad (13)$$

где P_i – активные мощности за период; n – число равных по длительности периодов.

Средняя мощность

$$P_{\text{с}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}. \quad (14)$$

Известно, что соотношение $P_{\text{э}}$ и $P_{\text{с}}$ определяет коэффициент формы:

$$K_{\text{ф}} = \frac{P_{\text{э}}}{P_{\text{с}}} = \sqrt{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{(\sum_{i=1}^n P_i)^2}}. \quad (15)$$

Структура выражения (15) показывает, что величина $K_{\text{ф}}$ возрастает при пиковом характере графика. Поэтому для отдельных электроприемников, работающих в повторно-кратковременных режимах, эта величина больше, чем для группы таких электроприемников [1].

Коэффициент формы характеризует потери на нагрев проводников при неравномерном потреблении относительно равномерной нагрузки. Для того, чтобы связать величину $K_{\text{ф}}$ и потери в сетях, была получена зависимость

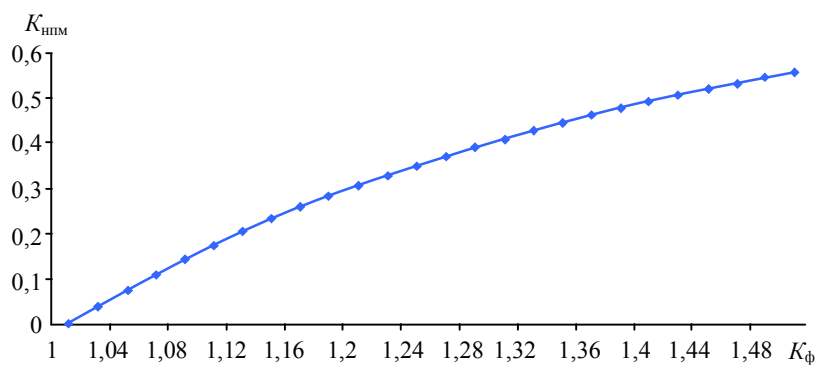


Рис.2. Зависимость $K_{нпм}$ от K_{ϕ}

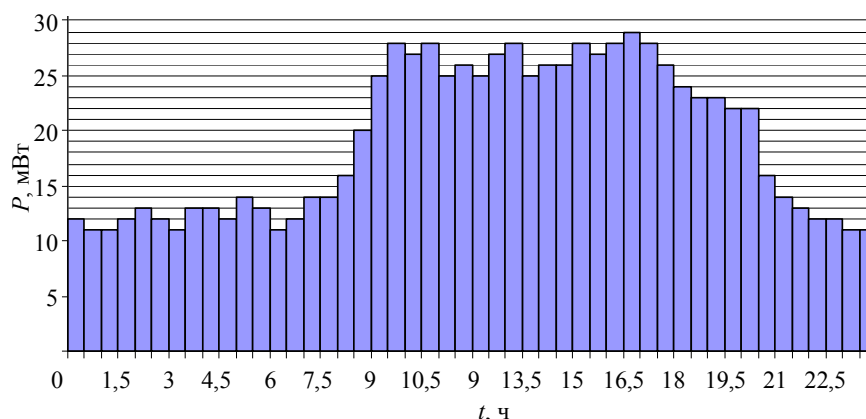


Рис.3. Суточный график нагрузки промышленного предприятия

Рассмотрим пример суточного графика нагрузки промышленного предприятия (рис.3).

Эффективное значение мощности

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{19813}{48}} = 20,316 \text{ мВт}.$$

Среднее значение мощности

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} = \frac{919}{48} = 19,145 \text{ мВт}.$$

Коэффициент формы

$$K_{\phi} = \frac{P_3}{P_c} = \frac{20,316}{19,145} = 1,061.$$

Коэффициент нагрева проводников (максимальный)

$$K_{нпм} = 1 - \frac{1}{K_{\phi}^2} = 1 - \frac{1}{1,061^2} = 0,111.$$

Анализ результатов. Анализ полученных данных показал, что 11,1 % от потерь на нагрев в подводящих к данному предприятию сетях можно избежать выравниванием графика нагрузки. С большой долей вероятности можно сказать, что аналогичные потери во внутренних сетях предприятия превышают 11,1 %.

Полученная зависимость $K_{нпм}$ от K_{ϕ} позволяет быстро оценивать изменение потерь в электросетях при выравнивании потребления электроэнергии. Для этого достаточно оценить график нагрузки предприятия, причем схемы электроснабжения необязательны. Из этого следует, что

$$K_{нпм} = 1 - \frac{1}{K_{\phi}^2}. \quad (16)$$

Иными словами, получена зависимость изменения потерь, связанных с неравномерностью графика, в подводящих к узлу нагрузки сетях от коэффициента формы.

Научные и практические результаты. На рис.2 для примера приведена зависимость $K_{нпм}$ от K_{ϕ} .

Следует отметить, что снижение потерь внутри узла нагрузки будет, вероятно, больше, чем в подводящих сетях. Объясняется это тем, что узел нагрузки в общем случае состоит из более мелких узлов нагрузки, а те в свою очередь из отдельных потребителей, чьи графики нагрузки более неравномерны и имеют больший коэффициент формы.



потери в электросетях можно значительно сократить путем выравнивания графика нагрузки, что может привести к существенному уменьшению потерь электроэнергии и увеличению энергоэффективности предприятия.

Выводы. Предложенный подход решает задачу уменьшения потерь электроэнергии за счет выравнивания графика нагрузки предприятия. Введенный в качестве критерия для оценки эффективности выравнивания графика нагрузки предприятия коэффициент изменения потерь $K_{\text{нпм}}$ достоверно отражает результативность вносимых изменений. Также коэффициент является критерием оценки необходимости проведения технических мероприятий по регулированию нагрузки на промышленных предприятиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоруссов Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры / Н.И.Белоруссов, А.Е.Саакян, А.И.Яковлева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 536 с.
2. Волобринский С.Д. Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий. Л.: Энергия, 1976. 128 с.
3. Гуртовцев А.Л. Электрическая нагрузка энергосистемы. Выравнивание графика / А.Л.Гуртовцев, Е.П.Забелло // Новости электротехники. 2008. № 5. С. 108-114.
4. Кабышев А.В. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию / А.В.Кабышев, С.Г.Обухов. Томск: Томский политехнический университет, 2005. 177 с.
5. Шклярский Я.Е. Снижение потерь энергии в электрических сетях предприятий / Я.Э.Шклярский, А.А.Брагин // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 1. С. 99-103.
6. Abu-Mouti F.S. An enhanced power flow solution algorithm for radial distribution feeder systems / F.S.Abu-Mouti, M.E.El-Hawary // Electrical and Computer Engineering 23rd Canadian Conference. Vancouver, 2010. P. 1-6.
7. Elsied M. Optimal economic and environment operation of micro-grid powersystems / M.Elsied, A.Oukaour, H.Gualous, O.A.Lo Brutto // Energy Conversion and Management. 2016. № 122. P. 182-194.
8. Figueiredo V. An electric energy consumer characterization framework based on data mining techniques / V.Figueiredo, F.Rodrigues, Z.Vale, J.B.Gouveia // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. № 2. Vol. 20. P. 596-602.
9. Greening L.A. Demand response resources: Who is responsible for implementation in a deregulated market? / Energy. 2010. № 4. Vol. 35. P. 1518-1525.
10. Kok K. Short-term economics of virtual power plants // In Electricity Distribution-Part 1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on IET. Prague, 2009. P. 1-4.
11. Kraning M. Message passing for dynamic network energy management / M.Kraning, E.Chu, J.Lavaei, S.Boyd // Foundations and Trends in Optimization. 2013. № 2. Vol. 1. P. 70-122.
12. Nehrir M.H. A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: configurations, control and applications / M.H.Nehrir, C.Wang, K.Strunz, H.Aki, R.Ramakumar, J.Bing, Z.Miao, Z.Salameh // IEEE Transactions Sustainable Energy. 2011. № 2. Vol. 4. P. 392-403.
13. Newsham G.R. The effect of utility timevarying pricing and load control strategies on residential summer peak electricity use / G.R.Newsham, B.G.Bowker // A review Energy Policy. 2010. № 7. Vol. 38. P. 3289-3296.
14. Torriti J. Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation / J.Torriti, M.G.Hassan, M.Leach // Energy. 2010. № 4. Vol. 35. P. 1575-1583.
15. Yigzaw G. Real-life energy use in the UK: How occupancy and dwelling characteristics affect domestic electricity use / G.Yigzaw, Yohanis, D.Jayanta Mondol, Alan Wright, Brian Norton // Energy and Building. 2008. № 40. P. 1053-1059.
16. Zhou K.-I. A review of electrical load classification in smart grid environment / K.-I.Zhou, S.-I.Yang, C.Shen // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2013. Vol. 24. P. 103-110.

Авторы: Шклярский Я.Э., д-р техн. наук, профессор, js-10@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Пирог С., д-р техн. наук, профессор, pirog@agh.edu.pl (AGH Научно-технический университет, Краков, Польша).

Статья принята к публикации 22.09.2016.