

Действительно, если при отсутствии изодромного элемента система обрабатывала входной сигнал со скоростью ошибкой (кривая 1), то при его подключении постоянная составляющая скорости ошибки устраняется (кривая 2). Кроме того, в несколько раз увеличивается частота автоколебаний и уменьшается их амплитуда, что также улучшает качество работы системы.

ВЫВОД

Показано, что в автоколебательных следящих системах с нелинейными изодромными регуляторами удается исключить среднюю составляющую вынужденной ошибки слежения за счет отключения выходной координаты интегратора от прямого тракта системы на тех интервалах, когда знаки скоростей входной оси и двигателя не совпадают. Точность исследования таких систем методом гармонической линеаризации вполне достаточна для инженерных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М а р к и н а, Л. И. Итерационный синтез автоматических систем с разрывными законами управления / Л. И. Маркина, А. С. Михалев // Выбранные научные работы Белорусского государственного университета. – Т. 4: Фізика. – Минск: БДУ, 2001. – С. 586–605.
2. В а с и л ь е в, А. И. Структурно-параметрическое асимметрирование регуляторов в системах с разрывными законами управления / А. И. Васильев, Л. И. Маркина, А. С. Михалев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 1. – С. 31–42.

Представлена кафедрой
электрических станций БНТУ

Поступила 12.10.2010

УДК 658.26:621.311

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЯВЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ, УЧАСТВУЮЩЕЙ В МАКСИМУМЕ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Канд. техн. наук, доц. РАДКЕВИЧ В. Н., инж. ТРИФОНОВА О. А.

Белорусский национальный технический университет

Режимная и экономическая сущность задачи определения заявляемой мощности. Для промышленных потребителей электроэнергии с присоединенной мощностью $S_{пр} \geq 250$ кВ·А, независимо от их форм собственности и ведомственной принадлежности, в соответствии с [1] энергоснабжающая организация устанавливает предельно допустимые значения потребляемой активной мощности в период максимальных нагрузок энер-

госистемы. Если $S_{пр} \geq 750 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, то промышленные предприятия осуществляют плату за электропотребление по двухставочному тарифу, который состоит из основной и дополнительных ставок. Основная ставка включает в себя плату за заявленную мощность, а при применении тарифов, дифференцированных по зонам суток, – за потребленную активную мощность, участвующую в максимуме нагрузки энергосистемы, а дополнительная – за израсходованную электроэнергию в течение расчетного периода. Значение максимальной потребляемой активной получасовой мощности (при интервале осреднения $\Delta t = 0,5 \text{ ч}$), количество, качество и сроки отпуска электроэнергии фиксируются в договоре на снабжение электроэнергией, который заключается между субъектами хозяйствования, выступающими в роли потребителей, и энергоснабжающей организацией.

Применение двухставочных тарифов призвано усилить экономическую заинтересованность промышленных предприятий в выравнивании и уплотнении суточных графиков активной нагрузки энергосистемы. Это достигается путем снижения потребляемой мощности и электроэнергии в период максимальной нагрузки и увеличения электропотребления в часы минимальных нагрузок (ночного провала нагрузок) энергосистемы.

Договорная мощность, участвующая в максимуме электрической нагрузки энергосистемы, периодически контролируется энергоснабжающей организацией по фактической средневзвешенной получасовой активной нагрузке потребителя, определяемой по показаниям приборов расчетного учета. При превышении договорных значений мощности (электроэнергии) потребитель уплачивает энергоснабжающей организации стоимость электрической мощности (энергии), потребляемой сверх договорной величины, по повышенной ставке тарифа [1]. Таким образом, прогнозирование потребления активной мощности с высокой точностью имеет режимное и экономическое содержание как для энергосистемы, так и для потребителей электроэнергии. Режимное содержание данной задачи обусловлено необходимостью планирования режимов и обеспечения в энергосистеме баланса активной и реактивной мощностей. Надежная и экономичная работа энергосистемы, обеспечивающей комплексное электроснабжение промышленных, транспортных, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных потребителей, существенно зависит от нагрузки ее генераторов, трансформаторов и линий электропередачи разных напряжений. Поэтому весьма важно не превышать предельно допустимые нагрузки и поддерживать экономически целесообразные режимы работы основных элементов энергосистемы, что является необходимым условием ее безаварийной и экономичной работы.

Сказанное относится и к системам электроснабжения промышленных предприятий, которые следует рассматривать как подсистемы электроэнергетических систем. На промышленных предприятиях достоверная оценка получасовой мощности, заявляемой в договоре на электроснабжение, имеет еще один экономический аспект: эта мощность непосредственно связана с платой за электропотребление.

Плата за электропотребление. При использовании двухставочного тарифа на электроэнергию плата за электропотребление является функцией таких параметров, как максимальная получасовая мощность предприятия

в часы максимальных нагрузок энергосистемы P_{\max} и потребленной активной электроэнергии W_t за расчетный период t :

$$\Pi_t = f(P_{\max}, W_t). \quad (1)$$

В общем случае плата за потребленную электроэнергию за расчетный период определяется по формуле

$$\Pi_t = \Pi_{pt} + \Pi_{wt}, \quad (2)$$

где Π_{pt} , Π_{wt} – соответственно плата за получасовой максимум активной мощности и потребленную активную электроэнергию за расчетный период продолжительностью t (месяц, квартал, год).

Плата за потребляемую активную мощность в часы максимума энергосистемы может быть представлена следующей формулой:

$$\Pi_{pt} = aP_{\max 3} + k_p a(P_{\max} - P_{\max 3})f_1, \quad (3)$$

где a – основная ставка двухставочного тарифа на электроэнергию, руб./кВт; $P_{\max 3}$ – значение заявленной активной мощности, потребляемой в период максимальной нагрузки энергосистемы, кВт; k_p – коэффициент увеличения основной ставки тарифа при превышении заявленного максимума активной мощности в период наибольших нагрузок энергосистемы (в Республике Беларусь $k_p = 10$ [1]); f_1 – характеристическая функция,

$$f_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } (P_{\max} - P_{\max 3}) > 0; \\ 0, & \text{если } (P_{\max} - P_{\max 3}) \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично может быть выражена плата за потребленную активную электроэнергию за расчетный период

$$\Pi_{wt} = bW_{t3} + k_b b(W_t - W_{t3})f_2, \quad (5)$$

где b – дополнительная ставка тарифа на электроэнергию, руб./(кВт·ч); W_{t3} – договорная величина потребляемой электроэнергии в расчетном периоде, кВт·ч; k_b – коэффициент увеличения дополнительной ставки тарифа при превышении договорной величины потребляемой электроэнергии за расчетный период ($k_b = 10$ [1]); f_2 – характеристическая функция,

$$f_2 = \begin{cases} 1, & \text{если } (W_t - W_{t3}) > 0; \\ 0, & \text{если } (W_t - W_{t3}) \leq 0. \end{cases} \quad (6)$$

С учетом штрафных санкций энергоснабжающей организации за превышение установленных лимитов основных параметров электропотребления выражение (2) может быть представлено следующим образом:

$$\Pi_t = aP_{\max 3} + k_p a(P_{\max} - P_{\max 3})f_1 + bW_{t3} + k_b b(W_t - W_{t3})f_2. \quad (7)$$

Нахождение минимума функции (1) представляет собой достаточно сложную задачу оптимизации даже при соблюдении условий $P_{\max} \leq P_{\max 3}$ и $W_t \leq W_{t3}$ [2]. Это в первую очередь обусловлено наличием зависимости $W_t = f(P_{\max})$. В то же время можно оценить влияние каждого параметра на величину Π_t .

Определение заявляемой потребителем активной мощности, участвующей в максимуме нагрузки энергосистемы. Прогнозирование заявляемой получасовой максимальной нагрузки на расчетный период (месяц, квартал) представляет собой актуальную задачу эксплуатации систем электроснабжения промышленных и приравненных к ним предприятий. Ее решение осуществляется разными методами: регрессионным, удельных расходов электроэнергии, вероятностно-статистическим, математического моделирования с применением многофакторных корреляционных моделей и др. [3]. Анализ указанных методов показывает, что большинство из них характеризуется сложностью практической реализации и достаточно большим объемом вычислений, что ограничивает их применение в условиях эксплуатации систем электроснабжения производственных объектов. Как отмечено в [3], сложность прогнозирования заявляемой мощности заключается в том, что в изменениях нагрузки потребителя всегда имеется соответствующая неопределенность, которую практически невозможно учесть заранее в полном объеме. К сожалению, энергетики промышленных предприятий, как правило, не имеют необходимых методических материалов, позволяющих просто и достаточно точно прогнозировать электрическую нагрузку на заданный расчетный период. В результате прогнозирование ведется персоналом энергетических служб предприятий на основе опыта, инженерной интуиции, практики предыдущих прогнозов, оценки разнообразной производственной информации.

При определении заявляемой максимальной нагрузки потребителя электроэнергии необходимо использовать достоверную исходную информацию об электропотреблении, применяемом на предприятии оборудовании, выпускаемой продукции и т. д. В данной статье рассматривается метод расчета заявляемой получасовой активной мощности в часы максимума энергосистемы на основе конкретных исходных данных производственного объекта с использованием средних нагрузок за рабочие сутки и коэффициента максимума с учетом вероятностного характера электрических нагрузок.

В соответствии с [4] максимальную активную мощность потребителя можно представить следующим образом:

$$P_{\max} = K_{\max} P_{\text{сп}}, \quad (8)$$

где K_{\max} – ожидаемый коэффициент максимума активной нагрузки; $P_{\text{сп}}$ – среднее значение прогнозируемой активной мощности нагрузки потребителя за некоторый период, кВт.

Если максимум активной получасовой мощности промышленного объекта имеет место в часы наибольших нагрузок энергосистемы, то его значение принимается в качестве максимальной заявляемой мощности $P_{\max 3}$, т. е. $P_{\max 3} = P_{\max}$. В противном случае

$$P_{\max 3} = K_{\text{н}} P_{\max}, \quad (9)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий несовпадение во времени максимумов потребляемой мощности производственного объекта и энергосистемы.

Чтобы узнать, в какие часы суток расчетного периода предприятие имеет максимальную потребляемую мощность, необходимо располагать ти-

пичным суточным графиком нагрузки потребителя за рабочий день аналогичного периода предыдущего года. При наличии графика нагрузки значение коэффициента K_n вычисляется по формуле

$$K_n = \frac{P_{\max \varepsilon}}{P_{\max n}}, \quad (10)$$

где $P_{\max \varepsilon}$, $P_{\max n}$ – соответственно максимальная получасовая нагрузка предприятия в часы максимума энергосистемы и в течение суток.

Таким образом, для оценки ожидаемого максимума активной мощности потребителя в часы наибольших нагрузок энергосистемы необходимо определить два показателя: среднюю нагрузку и коэффициент максимума за некоторый период.

Определение средней нагрузки предприятия. При прогнозировании заявляемого максимума потребляемой мощности следует использовать среднюю нагрузку за рабочие сутки, в течение которых предполагается наибольшее электропотребление предприятия. Для производственного объекта эту нагрузку можно вычислить по следующей формуле:

$$P_{\text{сп}} = \frac{\sum_{i=1}^n w_{Ti} \Pi_i + W_B + W_{\text{п}} + \Delta W}{24}, \quad (11)$$

где w_{Ti} – технологическая норма расхода электроэнергии на выпуск i -го вида продукции, кВт·ч/(единица продукции); Π_i – планируемый суточный объем выпуска i -го вида продукции; n – количество нормируемых видов продукции, производимой на предприятии; W_B – суточные затраты электроэнергии на обеспечение вспомогательных нужд предприятия (освещение, вентиляция и т. п.), кВт·ч; $W_{\text{п}}$ – суточный расход электроэнергии прочими электроприемниками, не участвующими непосредственно в технологическом процессе предприятия (расход электроэнергии столовой, медпункта, ремонтными бригадами и т. п.), кВт·ч; ΔW – суммарные потери электроэнергии в системе электроснабжения (в линиях электропередачи и токопроводах напряжением 6–10 кВ, силовых трансформаторах, электрических сетях напряжением до 1 кВ) в течение суток, кВт·ч.

Суточный расход электроэнергии вспомогательными электроприемниками предприятия определяется по формуле

$$W_B = W_c + W_o, \quad (12)$$

где W_c , W_o – соответственно суммарный расход электроэнергии силовыми и осветительными электроприемниками, кВт·ч.

Расход электроэнергии за сутки силовыми электроприемниками вычисляется по выражению

$$W_c = \sum_{i=1}^{N_c} K_{ui} P_{\text{ном}i} T_{pi}, \quad (13)$$

где K_{ui} – среднесуточное значение коэффициента использования электроприемников одного режим работы i -й группы; $P_{\text{ном}i}$ – установленная мощ-

ность электроприемников i -й группы, кВт; T_{pi} – среднее число часов работы силовых электроприемников i -й группы в течение суток в расчетном периоде (месяце, квартале); N_c – число групп электроприемников, участвующих во вспомогательных производственных процессах.

Средний за сутки расход электроэнергии на искусственное освещение рассчитывается по формуле

$$W_o = \sum_{i=1}^{N_o} K_{coi} K_{пра i} P_{ном i} T_{oi}, \quad (14)$$

где K_{coi} – коэффициент спроса i -й осветительной установки; $K_{пра i}$ – то же, учитывающий потери в пускорегулирующих аппаратах световых приборов i -й установки; $P_{ном i}$ – суммарная номинальная мощность электрических источников света i -й установки, кВт; T_{oi} – среднее число часов горения электрических ламп i -й установки в течение суток в рассматриваемом периоде, ч; N_o – количество осветительных установок на предприятии.

Аналогично производится расчет среднесуточных затрат электроэнергии на прочие производственные нужды.

Потери электроэнергии в течение рабочих суток определяются общепринятыми методами [5]. Для производственных объектов разрабатываются общепроизводственные (общезаводские) нормы расхода электроэнергии на каждый i -й вид продукции w_{yi} на каждый квартал и год в целом с учетом расхода W_v и ΔW . При определении средней нагрузки за рабочие сутки для какого-либо квартала можно воспользоваться квартальными общезаводскими нормами. В этом случае выражение (11) имеет вид

$$P_{сп} = \frac{\sum_{i=1}^n w_{yi} \Pi_i + W_{п}}{24}. \quad (15)$$

При расчете значения $P_{сп}$ по (15) следует иметь в виду, что промышленному предприятию могут устанавливаться так называемые прогрессивные нормы расхода электроэнергии на производство основных видов продукции. Эти нормы могут быть достигнуты лишь при условии выполнения на предприятии комплекса запланированных мероприятий по энергосбережению. В связи с этим, если технологический регламент и состав оборудования на предприятии не претерпели существенных изменений, расчет $P_{сп}$ по формуле (15) целесообразно производить с использованием фактических удельных расходов электроэнергии за аналогичный квартал предыдущего года.

Определение коэффициента максимума активной мощности. С учетом вероятностного характера электрических нагрузок максимальная полчасовая активная мощность может быть определена по формуле [4]

$$P_{max} = P_{сп} + \beta \sigma(P), \quad (16)$$

где β – принятая кратность меры рассеяния; $\sigma(P)$ – среднее квадратическое отклонение случайной величины электрической нагрузки от ее математического ожидания (среднего значения), кВт.

Уравнение (16) принято при нормальном законе случайной величины, который можно считать применимым к электрическим нагрузкам промышленных предприятий при установившемся технологическом режиме.

Величину β можно рассматривать как коэффициент надежности расчета, определяющий вероятность, с которой случайные значения электрической нагрузки окажутся меньше P_{\max} . Например, вероятность того, что активная нагрузка не превысит расчетной величины максимальной нагрузки при значении коэффициента $\beta = 1$ равна 0,683, при $\beta = 2$ составляет 0,954, а при $\beta = 3$ – 0,997. При расчетах электрических нагрузок обычно принимается $\beta = 2-3$.

Формулу (16) можно представить в следующем виде:

$$P_{\max} = P_{\text{сп}}(1 + \beta\sigma(P)/P_{\text{сп}}). \quad (17)$$

Тогда с учетом выражения (8) имеем

$$K_{\max} = 1 + \beta\sigma(P)/P_{\text{сп}}. \quad (18)$$

Согласно [4] среднее квадратическое отклонение

$$\sigma(P) = \sqrt{P_{\text{скп}}^2 - P_{\text{сп}}^2}, \quad (19)$$

где $P_{\text{скп}}$ – среднеквадратическое значение прогнозируемой активной нагрузки за сутки, кВт.

Выражение (19) путем несложных преобразований приводится к виду

$$\sigma(P) = P_{\text{сп}} \sqrt{\frac{P_{\text{скп}}^2}{P_{\text{сп}}^2} - 1}. \quad (20)$$

Среднеквадратическая мощность при наличии графика активной нагрузки вычисляется по формуле

$$P_{\text{скп}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m P_i^2}{m}}, \quad (21)$$

где P_i – среднее значение активной нагрузки на i -й ступени графика, кВт; m – число ступеней суточного графика нагрузки (при интервале осреднения нагрузки $\Delta t = 0,5$ ч $m = 48$).

Так как коэффициент формы графика нагрузки

$$K_{\phi} = \frac{P_{\text{скп}}}{P_{\text{сп}}}, \quad (22)$$

формулу (20) можно представить в таком виде

$$\sigma(P) = P_{\text{сп}} \sqrt{K_{\phi}^2 - 1}. \quad (23)$$

Подставив выражение (23) в формулу (18) и сократив $P_{\text{сп}}$, получим

$$K_{\max} = 1 + \beta \sqrt{K_{\phi}^2 - 1}. \quad (24)$$

Коэффициент формы определяется для суточного графика нагрузки, характерного для рабочего дня предприятия при нормальном режиме производственного процесса в аналогичном квартале предыдущего года. Если известны расходы электроэнергии за каждые 0,5 ч рабочих суток предприятия (нагрузка представлена в виде временного ряда), то коэффициент формы графика нагрузки можно определить по формуле [4]

$$K_{\Phi} = \sqrt{m} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m W_i^2}}{W_{\Sigma}}, \quad (25)$$

где m – количество последовательных измерений расходов электроэнергии в течение суток, $m = 48$; W_i – расход активной электроэнергии за i -й интервал измерения, кВт·ч; W_{Σ} – суммарный расход электроэнергии предприятия за сутки, кВт·ч.

С учетом формулы (24) величину ожидаемой максимальной нагрузки потребителя электроэнергии можно найти по формуле

$$P_{\max} = P_{\text{сп}}(1 + \beta \sqrt{K_{\Phi}^2 - 1}). \quad (26)$$

Формула (26) позволяет оценивать максимальную получасовую мощность электрической нагрузки промышленного предприятия с учетом вероятности ее появления, что обеспечивается выбором соответствующего значения коэффициента β .

Если предприятие имеет собственные источники электроэнергии, позволяющие регулировать нагрузку в часы максимума энергосистемы, то максимальная мощность потребителя вычисляется по формуле

$$P_{\max} = P_{\text{сп}}(1 + \beta \sqrt{K_{\Phi}^2 - 1}) - P_{\Gamma}, \quad (27)$$

где P_{Γ} – активная мощность, генерируемая источниками энергии предприятия.

ВЫВОДЫ

1. Для повышения точности определения заявляемой максимальной мощности необходимо производить расчеты с использованием конкретной информации об электропотреблении и объемах производимой продукции промышленного предприятия. С этой целью на предприятиях следует создавать соответствующие информационные базы данных на основе компьютерных технологий.

2. Рассмотренный метод определения заявляемой получасовой максимальной мощности потребителя электроэнергии, базирующийся на основе расчета среднесуточной активной нагрузки и коэффициента максимума с учетом вероятности появления расчетного значения наибольшей нагрузки, не требует применения сложного математического аппарата и может быть практически реализован на предприятиях, рассчитывающихся за электропотребление по двухставочному тарифу. Это будет способствовать снижению затрат на энергообеспечение предприятия и, следовательно, уменьшению энергетической составляющей себестоимости выпускаемой продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. П р а в и л а пользования электрической и тепловой энергией. – Минск: Тыздзень, 1996. – 176 с.
2. Г о р д е е в, В. И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В. И. Гордеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
3. Г о л о в к и н, П. И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
4. Ф е д о р о в, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров. – М.: Энергия, 1972. – 416 с.
5. Ф у р с а н о в, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 207 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 10.11.2010

УДК 621.315.2

ВЛИЯНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ИЗОЛЯЦИЮ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СТАНЦИЙ

**Кандидаты техн. наук, доценты ЗАЛИЗНЫЙ Д. И., ШИРОКОВ О. Г.,
КУХАРЕНКО С. Н., инж. УСТИМЕНКО Е. Ю.**

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
НГДУ «Речицанефть»*

Частотно-регулируемый электропривод имеет значительные функциональные возможности, что обеспечивает его самые различные области применения, в том числе и для погружных установок центробежных насосов нефтедобывающих станций. Однако в процессе эксплуатации сказываются негативные факторы, обусловленные влиянием высокочастотных составляющих напряжения, формируемого преобразователем частоты, на элементы привода: кабели, двигатели, трансформаторы и т. д. Это снижает надежность работы установки и соответственно ведет к возникновению аварийных ситуаций. Минимизация воздействия подобных факторов – одна из самых актуальных проблем в современной электротехнике.

В литературе анализируются различные причины отказов силовых кабелей для погружных электросистем [1] без применения частотно-регулируемого электропривода в силу накопленного значительного опыта эксплуатации. По теме применения преобразователей частоты такого опыта нет, публикации практически отсутствуют. Имеются лишь отчеты представителей нефтедобывающих предприятий, опубликованные в сети Интернет [2].