

УДК 631.311

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПОЛУЧАСОВОГО МАКСИМУМА НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Докт. техн. наук, проф. АНИЩЕНКО В. А., инж. БЕЛЬКО В. В.

*Белорусский национальный технический университет,
РУП «Управление военного проектирования»*

Максимум получасовой средней электрической нагрузки промышленного предприятия может быть рассчитан статистическим методом по формуле [1, 2]

$$P_{\max} = P_{\text{cp}} + \beta\sigma, \quad (1)$$

где P_{cp} – среднее значение получасовой нагрузки предприятия в часы максимумов нагрузки энергосистемы; β – статистический коэффициент, представляющий собой квантиль, определяющую ширину коридора неопределенности значений получасового максимума; σ – среднеквадратичное отклонение получасовых нагрузок от среднего значения.

Этот метод считается удовлетворительным для прогнозирования заявленной (договорной) мощности предприятия $P_3 = P_{\max}$, если она обладает свойствами стационарности. Значения P_{cp} и σ определяются в результате статистической обработки фактических графиков нагрузки и вполне однозначны. Однако выбор квантили β носит субъективный характер, что при большом значении среднеквадратичного отклонения σ приводит к значительной интервальной неопределенности получасового максимума. В подобного рода технических задачах часто принимают значение $\beta = 3$ (правило «трех сигм») исходя из того, что вероятность превышения уровня P_{\max} при этом пренебрежимо мала. Это может привести к необоснованным технико-экономическим решениям. Интервальная неопределенность значения получасового максимума нагрузки влечет за собой неопределенность в расчетах за потребленную электроэнергию и сильно затрудняет решение вопроса о целесообразности принудительного оперативного ограничения нагрузки предприятия при прохождении максимумов нагрузки энергосистемы. С уменьшением квантили β возрастает время участия потребителей-регуляторов в ограничении электропотребления. Так, при нормальном законе распределения вероятность превышения получасовой средней

нагрузки P максимума P_{\max} составляет $\rho(P > P_{\max}) = 0,0014$ при $\beta = 3$, а при $\beta = 1$ имеем $\rho(P > P_{\max}) = 0,6587$.

Представляется очевидным, что обоснованный вывод квантили β из глубоко метрологических соображений невозможен и следует его производить исходя из технологической сущности конкретной решаемой задачи с учетом тех последствий, к которым может привести этот выбор. Ниже рассматривается влияние заявленного получасового максимума нагрузки на финансовые взаимоотношения поставщика и потребителя электроэнергии с учетом ущерба предприятия от возможного принудительного ограничения получасового максимума. В общем случае при двухставочном тарифе выбор параметров β и P_{\max} осуществляется по критерию минимума изменения суммарных затрат предприятия за сутки в среднем

$$\Delta Z = \Delta\Pi_{\Sigma} + C = \Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2 + \Delta\Pi_3 + C = \min, \quad (2)$$

где $\Delta\Pi_{\Sigma}$ – среднесуточное суммарное изменение платы предприятия при вариации β , в том числе $\Delta\Pi_1$ – изменение платы за заявленную договорную мощность $P_3 = P_{\max}$; $\Delta\Pi_2$ – изменение платы (штрафа) за превышение этой мощности; $\Delta\Pi_3$ – изменение платы за потребленную электроэнергию; C – стоимость продукции, недоотпущенной предприятием из-за оперативного принудительного ограничения получасового максимума нагрузки предприятия в часы пиков нагрузки энергосистемы.

Вначале рассмотрим случай, когда предприятие не использует потребители-регуляторы и соглашается с возможными штрафными санкциями за превышение получасового максимума. Тогда стоимость недоотпущенной продукции $C = 0$, плата за потребленную электроэнергию не зависит от заявленной мощности ($\Delta\Pi_3 = 0$) и критерий (2) принимает вид

$$\Delta Z_1 = \Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2 = \min. \quad (3)$$

Величина $\Delta\Pi_1$ определяется по формуле

$$\Delta\Pi_1 = \frac{a}{n}(P_{\max} - P_{\text{cp}}), \quad (4)$$

где a – основная (годовая) ставка двухставочного тарифа за заявленный киловатт мощности в часы максимумов нагрузки энергосистемы; n – число дней в году.

Величина $\Delta\Pi_2$ находится с учетом штрафного коэффициента $k_{\text{ш}}$ за превышение заявленной мощности

$$\Delta\Pi_2 = 2k_{\text{ш}} \frac{a}{n} \rho(P > P_{\max}) [P_{\text{cp}}^{\text{yc}} - P_{\max}], \quad (5)$$

где $P_{\text{cp}}^{\text{yc}}$ – среднее значение усеченной совокупности получасовых значений нагрузки, превышающих получасовой максимум.

Здесь и дальше предполагается, что получасовая нагрузка может выйти за пределы заявленного максимума два раза в сутки: в часы утреннего и вечернего максимумов нагрузки энергосистемы.

При нормальном законе распределения нагрузки согласно [3] имеем

$$\rho(P > P_{\max}) = \frac{1}{2} - \Phi(u), \quad (6)$$

где $\Phi(u)$ – интеграл вероятности;

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{1}{2}t^2} dt; \quad u = \frac{P_{\max} - P_{\text{cp}}}{\sigma}. \quad (7)$$

Величина $P_{\text{cp}}^{\text{yc}}$ рассчитывается по формуле

$$P_{\text{cp}}^{\text{yc}} = P_{\text{cp}} + \sigma^2 \varphi(u), \quad (8)$$

где $\varphi(u)$ – плотность одностороннего усеченного распределения,

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sigma(1-\tau)} \varphi_{\text{н}}(u), \quad (9)$$

$\varphi_{\text{н}}(u)$ – стандартизованная плотность нормального распределения, имеющая вид

$$\varphi_{\text{н}}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}u^2}, \quad (10)$$

τ – степень усечения, т. е. часть исходного распределения нагрузки, отброшенная при усечении:

$$\tau = \frac{1}{2} + \Phi(u). \quad (11)$$

С учетом (4)–(6), (8) минимизируемый функционал (3) принимает вид

$$\Delta Z_1 = \frac{a}{n} \left(P_{\max} - P_{\text{cp}} + 2k_{\text{ш}} \left[\frac{1}{2} - \Phi(u) \right] \left[P_{\text{cp}} - P_{\max} + \sigma^2 \varphi(u) \right] \right) = \min. \quad (12)$$

Постановку задачи поясняет рис. 1. Заштрихованная область представляет собой вероятность превышения получасовой нагрузки предприятия заявленного получасового максимума.

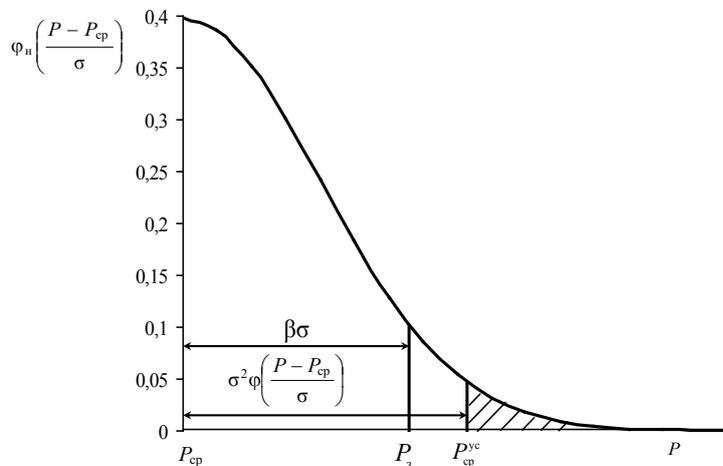


Рис. 1. Стандартизованная плотность нормального распределения

На рис. 2 представлены зависимости изменения суммарных затрат и их составляющих от квантили β при основной ставке: $a = 244000$ руб./кВт; $n = 365$ дней; $\sigma = 200$ кВт и разных значениях штрафного коэффициента. Расчеты произведены в белорусских рублях.

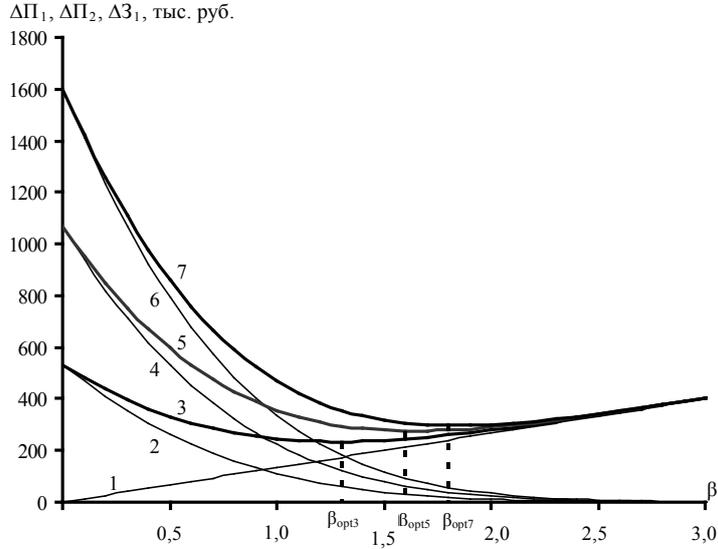


Рис. 2. Изменение суммарных затрат предприятия при отсутствии ограничения нагрузки:
 1 – ΔP_1 ; 2 – ΔP_2 , $k_{ш} = 5$; 3 – ΔZ_1 , $k_{ш} = 5$; 4 – ΔP_2 , $k_{ш} = 10$; 5 – ΔZ_1 , $k_{ш} = 10$; 6 – ΔP_2 , $k_{ш} = 15$;
 7 – ΔZ_1 , $k_{ш} = 15$

При слишком больших штрафных санкциях за превышение заявленного максимума и наличии достаточно мощных потребителей-регуляторов может оказаться более выгодным для предприятия принудительно оперативно ограничивать свое электропотребление при прохождении пиков нагрузки. В [4, 5] обобщены результаты исследований, которые выявили факторы, влияющие на экономическую эффективность ограничения электропотребления. Положительной составляющей экономического эффекта является снижение платы за электроэнергию. Отрицательная составляющая – ущерб в стоимостном выражении от недоотпуска продукции из-за снижения производительности предприятия. Для обоснованного выбора квантили и соответственно заявляемого получасового максимума необходимо раскрыть в явной форме функциональную зависимость экономического эффекта от влияющих факторов, в частности учесть вероятностные характеристики получасовой нагрузки. Критерий оптимизации (2) в данном случае принимает вид ($\Delta P_3 = 0$)

$$\Delta Z_2 = \Delta P_1 + \Delta P_3 + C = \min, \quad (13)$$

где ΔP_3 – суточное изменение платы за потребленную электроэнергию;

$$\Delta P_3 = b\rho(P > P_{\max})\Delta W_{\Sigma}, \quad (14)$$

где b – дополнительная ставка двухставочного тарифа за потребленный киловатт-час электроэнергии; ΔW_{Σ} – суммарное суточное изменение электропотребления,

$$\Delta W_{\Sigma} = -\Delta W_1 + \Delta W_2 + \Delta W_3. \quad (15)$$

Составляющие суммарного суточного изменения электропотребления представляют собой:

1) суточное среднее снижение электропотребления ΔW_1 за время ограничения максимумов получасовой нагрузки, равное средней площади, ограниченной реализацией случайной функции $P(t)$ выше заданного уровня P_{\max} в течение двух выбросов [6]:

$$\Delta W_1 = \frac{2\sigma}{\sigma_v} \sqrt{2\pi} \left(\sigma + 2\pi(1-\tau)\varphi_n(u) \left[P_{\text{cp}} - P_{\max} \right] \right), \quad (16)$$

где σ_v – среднеквадратичное значение производной получасовой нагрузки dP/dt . Полагая получасовую нагрузку дифференцируемой случайной функцией с корреляционной функцией вида

$$K(v) = \sigma^2 e^{-\alpha|v|} (1 + \alpha|v|), \quad (17)$$

где α – коэффициент затухания корреляционной связи; v – интервал корреляции, получаем среднеквадратичное значение производной

$$\sigma_v = \sqrt{-\frac{d^2 K(v)}{dv^2} \Big|_{v=0}} = \sigma\alpha; \quad (18)$$

2) дополнительные суточные средние затраты электроэнергии на восстановление технологического процесса после окончания ограничений получасового максимума

$$\Delta W_2 = d\Delta W_1, \quad (19)$$

при этом не исключено, что коэффициент d может быть больше 1;

3) суточное среднее повышение электропотребления в часы провалов нагрузки, компенсирующее его снижение в часы пиков нагрузки с соответствующим восполнением недоотпущенной в результате ограничений продукции:

$$\Delta W_3 = k\Delta W_1, \quad (20)$$

где коэффициент k меньше или равен 1.

Стоимость недоотпущенной за сутки из-за ограничения нагрузки продукции определяется следующим образом:

$$C = (1-k)yr(P > P_{\max})\Delta W_1, \quad (21)$$

где y – удельный ущерб, т. е. стоимость недоотпущенной предприятием продукции при снижении электропотребления на 1 кВт·ч.

Окончательно с учетом (4), (6), (9), (14)–(21) критерий оптимизации изменения среднесуточных затрат (13) принимает вид

$$\begin{aligned} \Delta Z_2 = & \frac{a}{n} [P_{\max} - P_{\text{cp}}] + \frac{2\sigma}{\alpha} \sqrt{2\pi} \left[\frac{1}{2} - \Phi(u) \right] \left[b(k+d-1) + (1-k)y \right] \times \\ & \times \left(1 + 2\pi(1-\tau)^2 \varphi(u) \left[P_{\text{cp}} - P_{\max} \right] \right) = \min. \end{aligned} \quad (22)$$

На рис. 3 представлены результаты расчетов затрат ΔZ_2 при значениях основной ставки $a = 244000$ руб./кВт, дополнительной ставки: $b = 188$ руб./кВт·ч; $n = 365$ дней; $\sigma = 200$ кВт; $k_{ш} = 10$; $d = 0$; $k = 0$; $\alpha = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ в зависимости от удельного ущерба.

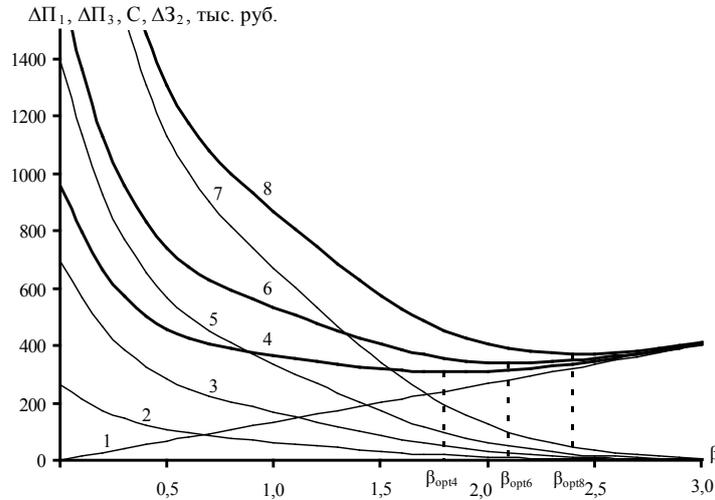


Рис. 3. Изменение суммарных затрат предприятия при ограничении нагрузки: 1 – $\Delta\Pi_1$; 2 – $\Delta\Pi_3$; 3 – C , $y = 500$ руб./кВт·ч; 4 – ΔZ_2 , $y = 500$ руб./кВт·ч; 5 – C , $y = 1000$ руб./кВт·ч; 6 – ΔZ_2 , $y = 1000$ руб./кВт·ч; 7 – C , $y = 2000$ руб./кВт·ч; 8 – ΔZ_2 , $y = 2000$ руб./кВт·ч

Для определения общей экономической эффективности мероприятий по организации и ограничению электропотребления на основе использования потребителей-регуляторов следует также учесть возможные дополнительные капиталовложения, необходимые для обеспечения этих мероприятий [7]. Суммарные дополнительные затраты рассчитываются по формуле

$$\Delta Z_2^d = E_n \Delta K^d + \Delta И_a + \Delta И_z + \Delta И_m, \quad (23)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; ΔK^d – капиталовложения на установку дополнительного оборудования, расширение емкостей и др.; $\Delta И_a$ – амортизационные отчисления, соответствующие дополнительным капиталовложениям; $\Delta И_z$ – перерасход заработной платы производственного персонала, эксплуатирующего дополнительные мощности с учетом надбавок к заработной плате за работу в ночные часы; $\Delta И_m$ – дополнительные издержки на сырье, материалы и энергию, необходимые для организации работы электрооборудования в прерывном режиме.

Общий критерий оптимизации затрат ΔZ_2^* при ограничении нагрузки учитывает в отличие от критерия оптимизации затрат ΔZ_1 без ограничения нагрузки (3) две составляющие. Первая из них ΔZ_2 характеризует изменение электропотребления и ущерб от недоотпущенной продукции при вариации заявленного максимума нагрузки. Вторая составляющая ΔZ_2^d относительно слабо коррелирует с величиной заявленного максимума; во всяком случае, получить аналитическую зависимость затрат ΔZ_2^* от P_{max} , единую и

пригодную для разных предприятий, практически невозможно. Поэтому полагаем дополнительные затраты ΔZ_2^d величиной постоянной, не зависящей от P_{\max} . Общий критерий оптимизации квантили β при ограничении нагрузки

$$\Delta Z_2^* = \Delta Z_2 + \Delta Z_2^d. \quad (24)$$

Условие целесообразности оперативного ограничения нагрузки с помощью потребителей-регуляторов имеет вид

$$\Delta Z_2^* < \Delta Z_1. \quad (25)$$

Погрешности оценок затрат ΔZ_1 и ΔZ_2^* могут существенно отличаться. Это объясняется в первую очередь тем, что к одинаковым погрешностям, характеризующим плату за потребленную электроэнергию в обоих рассматриваемых случаях, при определении ΔZ_2^* добавляется погрешность, характеризующая ущерб от недоотпуска продукции. Последняя может изменяться в широких пределах из-за неопределенности удельного ущерба от недоотпуска продукции даже для одного предприятия. Поэтому, как это принято при попарном сравнении вариантов технических решений, следует ввести зону неразличимости затрат при определении целесообразности оперативного ограничения нагрузки из условия (25). При попадании в эту зону выбор альтернативы может быть произведен методом экспертных оценок.

При оснащении промышленных предприятий системами АСКУЭ с широкими возможностями, позволяющими автоматизировать учет и контроль электроэнергии и обеспечить расчеты между потребителями и поставщиками электроэнергии по двухставочно-дифференцируемому по зонам суток тарифу, можно отказаться от штрафа за превышение заявляемого договорного получасового договорного максимума нагрузки. В этом случае изменение затрат ΔZ_1 состоит только из платы за заявляемый максимум нагрузки.

ВЫВОДЫ

1. Предложена и разработана методика выбора получасового максимума нагрузки промышленного предприятия по критерию, учитывающему плату за заявленную договорную мощность в часы пиков энергосистемы, потребленную электроэнергию и ущерб от недоотпуска продукции при оперативном ограничении нагрузки.

2. Получены функциональные зависимости затрат промышленного предприятия от получасового максимума при оперативном ограничении нагрузки и без ограничения при двухставочном тарифе, что позволяет определить целесообразность использования потребителей-регуляторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С. Д. Волобринский [и др.]. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.