



ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Оценка эффективности применения устройств распределенной генерации с учетом динамики цен на энергоносители

Обоскалов В. П., доктор техн. наук

ФГАОУ ВПО “Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина”, Екатеринбург

Померанец Д. И., инж.

ОАО “Екатеринбургская электросетевая компания”

Предложена математическая модель оценки экономической эффективности применения устройств распределенной генерации (РГ), функционирующих в качестве источников электро- и теплоснабжения потребителей, с учетом темпов роста цен на энергоносители в условиях переменных графиков цены и нагрузки. За основу принят критерий максимального чистого дисконтированного дохода (ЧДД). Показано, что фактор роста цен существенно влияет на принимаемое решение. В условиях, когда цены на топливо растут быстрее, чем на электро- и теплоэнергию, эффективность РГ снижается. Конфигурация графиков цены и нагрузки определяет оптимальную стратегию загрузки РГ и ее эффективность.

Ключевые слова: распределенная генерация, экономическая эффективность, графики нагрузки, темпы роста тарифов на энергоносители.

В России в настоящее время сложилась ситуация, благоприятствующая установке автономных источников питания (АИП) для электро- и теплоснабжения потребителей, к которым относятся газотурбинные (ГТУ) и газопоршневые (ГПУ) установки, дизель-генераторы, ветрогенераторы и др. Этому способствуют более низкая по сравнению с централизованным энергоснабжением себестоимость производства тепло- и электроэнергии, достаточно высокий КПД и приемлемая стоимость АИП [1]. Включенные в систему энергоснабжения АИП идентифицируются как распределенная генерация [1, 2]. Преимущественное применение ГТУ и ГПУ получили на крупных предприятиях. Это вызвано прежде всего ростом тарифов на тепло- и электроэнергию, в том числе за счет перекрестного субсидирования [3].

Отсутствие конкуренции в сфере производства электроэнергии приводит к неоправданному росту тарифов, которые регулируются государством и ежегодно повышаются. Неравномерный и непропорциональный рост цен на энергоносители и топливо — значимый фактор при оценке эффективности применения устройств РГ. В ближайшее время не

предвидится каких-либо существенных сдвигов в направлении снижения стоимости централизованного энергоснабжения. Дополнительным аргументом в пользу применения устройств РГ является сопоставимая с их стоимостью плата за подключение потребителей энергии к централизованным электро- и теплосетям [4]. Таким образом, предприятия, ориентирующиеся на РГ, могут не только получить существенный экономический эффект, но и повысить надежность системы энергообеспечения производства.

Развитие РГ в значительной степени зависит от соотношения цен на энергоносители. Сегодня практически отсутствуют ограничения на потребление природного газа для производства электроэнергии. При достаточно высокой его экологической эффективности это позволяет максимально приблизить РГ к центрам энергопотребления. Относительно низкая себестоимость производства электроэнергии определяет режим работы всех видов РГ с потреблением газа. Это, как правило, работа в базовом цикле с полной загрузкой агрегатов. При повышении цены на газ, возможно, более выгодным станет использование РГ в качестве резервных или

пиковых источников питания [5]. В любом случае стратегия загрузки РГ в течение суток является значимым фактором при технико-экономическом обосновании их применения.

За основной критерий экономической целесообразности инвестиций принят максимум ЧДД [6]. Применительно к РГ ЧДД определяется из выражения

$$J = -K_0 + \sum_{t=1}^T (D_t - K_t - I_t)(1+\alpha)^{-t}, \quad (1)$$

где K_0 — начальные ($t=0$) капиталовложения на сооружение установки; D_t — доход от РГ; K_t и I_t — капиталовложения и издержки в текущем году t ; α — ставка дисконтирования; T — расчетный период.

При оценке экономической эффективности применения РГ выполняется сопоставление с вариантом централизованного энергообеспечения. Поэтому представленные в выражении (1) текущие составляющие необходимо выразить в виде разностей величин, отнесенных к вариантам с РГ и без РГ [6]:

$$J = -\Delta K_0 + \sum_{t=1}^T (\Delta D_t - \Delta K_t - \Delta I_t)(1+\alpha)^{-t}.$$

В варианте с РГ электрическая $P_t^{\text{ЭЭ},\Gamma}$ и тепловая $P_t^{\text{ТЭ},\Gamma}$ мощности генерации, собственного потребления $P_t^{\text{ЭЭ},\Pi}$ и $P_t^{\text{ТЭ},\Pi}$, потребления из централизованной сети $P_t^{\text{ЭЭ},s}$ и $P_t^{\text{ТЭ},s}$ и отпуска энергии в централизованную сеть $P_t^{\text{ЭЭ},\text{от}}$ и $P_t^{\text{ТЭ},\text{от}}$ связаны балансовым соотношением

$$P_t^{e,\Gamma} = P_t^{e,\text{от}} + P_t^{e,\Pi} - P_t^{e,s}, \quad e \in \{\text{ЭЭ}, \text{ТЭ}\}. \quad (2)$$

Данное соотношение подразумевает обеспечение надлежащего резерва — при отказе одного или нескольких агрегатов РГ потребитель получает энергию от централизованной сети согласно договорным условиям, и, наоборот, при отказе системы централизованного энергообеспечения резервную функцию выполняет РГ.

Вариант 1 — без РГ (централизованное энергообеспечение). Здесь $P_t^{e,\Gamma} = P_t^{e,\text{от}} = 0$; $P_t^{e,\Pi} = P_t^{e,s}$. Доход предприятия от продажи тепловой и электрической энергии $D_t = 0$. Ежегодные издержки определяются стоимостью купленного у

централизованного поставщика энергоносителя. При этом чистый дисконтированный доход

$$J_1 = -K_{\text{ЭЭ}}^{\text{пр}} - K_{\text{ТЭ}}^{\text{пр}} - \sum_{t=1}^T (P_t^{\text{ЭЭ}} + P_t^{\text{ТЭ}})(1+\alpha)^{-t},$$

где $K_{\text{ЭЭ}}^{\text{пр}}$ и $K_{\text{ТЭ}}^{\text{пр}}$ — стоимости присоединения к электрической и тепловой сетям, включающие затраты на их реконструкцию [4]; $P_t^e = u_t^{e,s} W_t^{e,\Pi}$ — ежегодные платежи за потребленную (от внешнего поставщика) энергию; $W_t^{e,\Pi} = P_{\text{max},t}^e T_{\text{max},t}^e$ — планируемый объем потребляемой в период t электро- и теплоэнергии; $P_{\text{max},t}^e$ и $T_{\text{max},t}^e$ — максимальная мощность и число часов использования максимальной мощности потребителем электро- и теплоэнергии; $u_t^{e,s}$ — одноставочный тариф на электро- и теплоэнергию (иные виды тарифа, например двухставочный, могут быть преобразованы к одноставочному из условия равенства платежей).

В общем случае собственник РГ может покупать и продавать энергию на оптовом рынке [7], где значимыми являются суточные колебания ее цены, выраженные в ценовых графиках (ЦГ). Режим РГ должен быть адаптирован к ЦГ. Прибыль становится зависимой от стратегии загрузки РГ. Здесь возможны различные сценарии работы РГ: в пиковой зоне ЦГ, в базе с непрерывной генерацией тепло- и электроэнергии, в качестве резервного источника питания и др.

Учитывая специфику производства (одно-, двух- или трехсменная работа предприятия), суточный период желательно разбить по крайней мере на два полупериода — день и ночь, а характерные графики цены и нагрузки стандартно дифференцировать по критерию сезонности и дня недели. С учетом этого годовые платежи за электро- и теплоэнергию в год t

$$P_t^e = \sum_{k=1}^{N_\Gamma} n_k \sum_{v=1}^{N_{vk}} u_{vkt}^{e,s} P_{vkt}^{e,\Pi} \Delta t_{vk}, \quad e \in \{\text{ЭЭ}, \text{ТЭ}\}, \quad (3)$$

где N_Γ — число характерных ЦГ (зима, лето, день, ночь и др.); n_k — годовое число графиков k -го типа; N_{vk} — число интервалов постоянства цены и мощности длительностью Δt_{vk} в графике k .

Рассматривая величину $\Delta t_{vk} / \sum_{v=1}^{N_{vk}} \Delta t_v$ как вероятность случайной реализации u_{vkt}^e , P_{vkt}^e при равномерном распределении в интервале

определения графика k , платежи за энергию можно выразить через математическое ожидание $E(u_{vkt}^{e,s} P_{vkt}^{e,\pi})$ и корреляционный момент (Covariance) цены и мощности $\text{Cov}(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi})$:

$$\begin{aligned} \Pi_t^e &= \sum_{k=1}^{N_\Gamma} T_k E(u_{vkt}^{e,s} P_{vkt}^{e,\pi}) = \\ &= \sum_{k=1}^{N_\Gamma} T_k [\bar{u}_{kt}^{e,s} \bar{P}_{kt}^{e,\pi} + \text{Cov}(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi})] \end{aligned} \quad (4)$$

или через коэффициент корреляции $k(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi})$:

$$\begin{aligned} \Pi_t^e &= \sum_{k=1}^{N_\Gamma} T_k [\bar{u}_{kt}^{e,s} \bar{P}_{kt}^{e,\pi} + \sigma(u_{kt}^{e,s}) \sigma(P_{kt}^{e,\pi}) k(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi})] = \\ &= \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \vartheta_{kt}^{e,s,\pi} \bar{u}_{kt}^{e,s} \bar{P}_{kt}^{e,\pi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $T_k = n_k \sum_{v=1}^{N_{vk}} \Delta t_v$ — суммарная длительность графика k ; $\bar{W}_{kt}^{e,\pi} = \bar{P}_{kt}^{e,\pi} T_k$ — среднее количество энергии, потребляемое в течение года по графику k .

Коэффициент согласованности графиков цены и нагрузки в выражении (5) определяется по формуле

$$\vartheta_{kt}^{e,s,\pi} = 1 + k(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi}) / [v(u_{kt}^{e,s}) v(P_{kt}^{e,\pi})], \quad (6)$$

где $v(u_{kt}^{e,s})$ и $v(P_{kt}^{e,\pi})$ — коэффициенты вариации рыночной цены и мощности нагрузки.

В случае полной независимости графиков цены и нагрузки (статистическая независимость цены и мощности) коэффициент корреляции $k(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi}) = 0$. При этом коэффициент согласованности $\vartheta_{kt}^{e,s,\pi} = 1$, и платежи за энергию принимают упрощенный вид:

$$\Pi_t^e = \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \bar{u}_{kt}^{e,s} \bar{W}_{kt}^{e,\pi}.$$

Вариант 2 — с РГ. При наличии РГ часть избыточной энергии (как электрической, так и тепловой) может быть отпущена в сеть централизованного энергоснабжения по цене $u_t^{e,\text{от}}$, которая в общем случае может отличаться от рыночной. Это формирует доход предприятия. Основную долю ежегодных издержек составляют затраты на топливо. Платежи за энергию могут быть представлены выражением (5) с учетом корреляции графи-

ков нагрузки и цены на рынке. Принимая во внимание, что капиталовложения в РГ носят, как правило, одноразовый характер (в год сооружения РГ), ЧДД в варианте с РГ определяется из выражения

$$\begin{aligned} J_2 &= -K_{\text{АИП}} - K_{\text{АИП}}^{\text{пр}} - \\ &- \sum_{t=1}^T [I_{\text{T},t} + I_{\text{a},\text{o},t} - \sum_{e=\{\text{э},\text{т}\}} (\Pi_t^{e,\text{от}} - \Pi_t^{e,s})] (1+\alpha)^{-t}, \end{aligned}$$

где $K_{\text{АИП}}$ — капиталовложения на приобретение, установку, монтаж, наладку и пуск в эксплуатацию РГ; $K_{\text{АИП}}^{\text{пр}}$ — стоимость присоединения к электрической и тепловой централизованным сетям, включая затраты на их реконструкцию, при наличии РГ; $I_{\text{T},t} = u_{\text{T},t} \beta_{\text{T}} W_t^\Gamma$ — стоимость ежегодно потребляемого топлива; $I_{\text{a},\text{o},t} = p_{\text{a},\text{o},t} K_{\text{АИП}}$ — издержки на амортизацию и обслуживание РГ; $\Pi_t^{e,\text{от}}$ и $\Pi_t^{e,s}$ — выручка от продажи и платежи за энергию, получаемую потребителем от сети централизованного энергоснабжения; $u_{\text{T},t}$ — цена на топливо в год t ; β_{T} — удельный расход топлива на единицу произведенной суммарной электро- и теплоэнергии; $W_t^\Gamma = P_y T_y$ — годовое производство энергии; P_y — установленная мощность РГ; T_y — число часов использования установленной мощности.

Расчетный ЧДД определяется превышением ЧДД второго (с РГ) над ЧДД первого (без РГ) варианта:

$$\begin{aligned} J &= J_2 - J_1 = K_{\text{пр}} - K_{\text{АИП}} - \sum_{t=1}^T [I_{\text{a},\text{o},t} + I_{\text{T},t} - \\ &- \sum_{e=\{\text{э},\text{т}\}} (\Pi_t^{e,\text{от}} + \Pi_t^{e,\pi} - \Pi_t^{e,s})] (1+\alpha)^{-t}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $K_{\text{пр}} = K_{\text{э},\text{э}}^{\text{пр}} + K_{\text{т},\text{т}}^{\text{пр}} - K_{\text{АИП}}^{\text{пр}}$ — расчетные (с учетом РГ) затраты на присоединение к централизованной сети.

Издержки на амортизацию и эксплуатацию. При обосновании размера инвестиций, как правило, принимается, что издержки на амортизацию и обслуживание пропорциональны капиталовложениям: $I_{\text{a},\text{o},t} = p_{\text{a},\text{o}} K_{\text{АИП}}$. Отсюда

$$K_{\text{АИП}} + p_{\text{a},\text{o}} K_{\text{АИП}} \sum_{t=1}^T (1+\alpha)^{-t} = \gamma K_{\text{АИП}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{a},\text{o}}$ — коэффициент отчислений на амортизацию и обслуживание; множитель γ выражается через сумму геометрической прогрессии

$$\gamma = 1 + p_{a,o} \sum_{t=1}^T (1+\alpha)^{-t} = 1 + p_{a,o} [1 - (1+\alpha)^{-T}] / \alpha.$$

Топливные издержки. Пренебрегая изменением КПД при оперативном изменении режима работы РГ, можно считать, что затраты на топливо пропорциональны генерации энергии и определяются через удельный расход топлива:

$$I_{T,t} = u_{T,t} \beta_T W_t^\Gamma = u_{T,t} \beta_T P_y T_y.$$

Величины β_T и W_t^Γ можно считать условно неизменными в процессе эксплуатации РГ, поэтому в дальнейшем индекс t не указывается. Цена на топливо изменяется во времени примерно с постоянным темпом роста α_T . Тогда

$$I_{T,t} = u_{T,0} \beta_T W^\Gamma (1 + \alpha_T)^t,$$

где $u_{T,0}$ — цена на топливо в момент пуска РГ. Топливная составляющая расчетного ЧДД

$$I_T = u_{T,0} \beta_T W^\Gamma \sum_{t=1}^T (1 + \alpha_T)^t (1 + \alpha)^{-t}. \quad (9)$$

Поскольку

$$\frac{1 + \alpha}{1 + \alpha_T} = 1 + \alpha_T^* = 1 + \frac{\alpha - \alpha_T}{1 + \alpha_T}, \quad (10)$$

выражение (9) может быть представлено через сумму геометрической прогрессии:

$$I_T = u_{T,0} \beta_T W^\Gamma \sum_{t=1}^T (1 + \alpha_T^*)^{-t} = \tau_T u_{T,0} \beta_T W_t^\Gamma, \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_T^* &= (\alpha - \alpha_T) / (1 + \alpha_T); \\ \tau_T &= \sum_{t=1}^T (1 + \alpha_T^*)^{-t} = \\ &= \begin{cases} [1 - (1 + \alpha_T^*)^{-T}] / \alpha_T^*, & \alpha \neq \alpha_T; \\ T, & \alpha = \alpha_T. \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

Анализируя выражение (12), можно отметить, что τ_T определяет некоторый расчетный (по топливной составляющей) срок эксплуатации РГ. При $\alpha_T < \alpha_{T^*} < T$ (меньший вклад топливной составляющей в ЧДД), а при $\alpha_T > \alpha_{T^*} > T$ (большой вклад топливной составляющей в ЧДД).

Платежи за энергию. Учитывая соотношения (3) – (6), связанные с платежами за энергию, составляющая ЧДД

$$P_t^{e,\xi} = \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \vartheta_k^{e,\xi,\xi} \bar{u}_{kt}^{e,\xi} \bar{W}_k^{e,\xi}, \quad \xi = \{\text{от, п, s}\}.$$

Здесь коэффициент $\vartheta_k^{e,\xi,\xi}$ согласует графики цены и мощности (отпускная цена и отпускная мощность, рыночная цена и мощность собственного энергопотребления, рыночная цена и импортируемая мощность нагрузки). Следует отметить, что для части РГ, отводимой на собственное энергопотребление предприятия, цена энергоносителя равна цене энергии на рынке. Отсюда $\vartheta_k^{e,\text{п,п}} = \vartheta_k^{e,s,\text{п}}$. Суммарные платежи за энергию

$$P = \sum_{t=1}^T \sum_{e=\{\text{ээ,тэ}\}} (P_t^{e,\text{от}} + P_t^{e,\text{п}} - P_t^{e,s}) (1 + \alpha)^{-t} \quad (13)$$

преобразуются к виду

$$\begin{aligned} P &= \sum_{e=\{\text{ээ,тэ}\}} \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \sum_{t=1}^T (\vartheta_{kt}^{e,\text{от,от}} \bar{u}_{kt}^{e,\text{от}} \bar{W}_{kt}^{e,\text{от}} + \\ &+ \vartheta_{kt}^{e,s,\text{п}} \bar{u}_{kt}^{e,s} \bar{W}_{kt}^{e,\text{п}} - \vartheta_{kt}^{e,s,s} \bar{u}_{kt}^{e,s} \bar{W}_{kt}^{e,s}) (1 + \alpha)^{-t}. \end{aligned} \quad (14)$$

С целью упрощения математической записи выражения (14) цены и объемы энергии целесообразно представить в относительных единицах, где за базу приняты среднегодовые рыночная цена $\bar{u}_t^{e,s}$ и генерируемая энергия $\bar{W}_t^{e,\Gamma}$:

$$\begin{aligned} u_{*kt}^{e,\xi} &= u_{kt}^{e,\xi} / \bar{u}_t^{e,s}; \quad W_{*kt}^{e,\xi} = W_{kt}^{e,\xi} / \bar{W}_{kt}^{e,\Gamma}, \\ \xi &= \{\text{от, п, s}\}. \end{aligned}$$

Относительные величины в большей степени определяются спецификой производства, и без большой погрешности их можно считать неизменными во всем расчетном периоде. В условиях линейной пропорциональности отпускной цены и цены на рынке $\bar{u}_{kt}^{e,\text{от}} = c_{\text{от}} \bar{u}_{kt}^{e,s}$, а также объема отпускаемой в централизованную сеть и потребляемой предприятием энергии $W_k^{e,\text{от}} = d_{\text{от}} W_k^{e,\text{п}}$ определяемые через коэффициенты корреляции коэффициенты связности цены и мощности $\vartheta_k^{e,\xi,\xi}$ одинаковы для всех ξ :

$$\vartheta_{kt}^{e,\text{от,от}} = \vartheta_{kt}^{e,s,s} = \vartheta_{kt}^{e,s,\text{п}} = \vartheta_{kt}^e.$$

Принимая во внимание соотношение баланса энергии $W_{e,t}^\Gamma = W_{e,t}^\Pi + W_{e,t}^{\text{OT}} - W_{e,t}^S$, выражение (14) можно преобразовать к виду:

$$\Pi = \sum_{e=\{\text{ЭЭ,ТЭ}\}} \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \vartheta_k^e \theta_k^{e,\text{OT}} \bar{u}_{*k}^{e,s} \bar{W}_k^{e,\Gamma} \sum_{t=1}^T \bar{u}_t^{e,s} (1+\alpha)^{-t}, \quad (15)$$

где коэффициент отпуска энергии во внешнюю сеть

$$\theta_k^{e,\text{OT}} = 1 - \bar{W}_{*k}^{e,\text{OT}} (1 - \bar{u}_{kt}^{e,\text{OT}} / \bar{u}_{kt}^{e,s}). \quad (16)$$

При равенстве отпускной и рыночной цен или при отсутствии отпуска энергии во внешнюю сеть ($\bar{W}_{*k}^{e,\text{OT}} = 0$) коэффициент отпуска энергии во внешнюю сеть $\theta_k^{e,\text{OT}} = 1$.

Зависящий от статистических параметров графиков нагрузки коэффициент согласованности $\vartheta_k^{e,s,\Pi}$ стабильно функционирующего предприятия (без существенного изменения структуры производства и энергопотребления) также можно считать условно постоянным во времени, поскольку конфигурация графиков нагрузки мало изменяется во времени. Аналогичный вывод о неизменности во времени можно сделать относительно энергии $W_{kt}^{e,\zeta}$. Именно поэтому в выражении (15) в упомянутых величинах опущен индекс t .

Цена на энергоноситель, как и на топливо, имеет тенденцию к росту с темпом $\alpha_{\text{ц}}^e$. Отсюда по аналогии с формулой (12) выражение (15) может быть представлено через сумму геометрической прогрессии, выраженной коэффициентом τ_e :

$$\Pi = \sum_{e=\{\text{ЭЭ,ТЭ}\}} \tau_e \bar{u}_0^e \bar{W}^{e,\Gamma} \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \vartheta_k^e \theta_k^{e,\text{OT}} \bar{u}_{*k}^{e,s} \bar{W}_{*k}^{e,\Gamma}, \quad (17)$$

где

$$\tau_e = \sum_{t=1}^T (1+\alpha_e^*)^{-t} = \begin{cases} [1 - (1+\alpha_e^*)^{-T}] / \alpha_e^*, & \alpha_e \neq \alpha_e^*; \\ T, & \alpha_e = \alpha_e^*; \end{cases} \quad (18)$$

$$\alpha_e^* = (\alpha - \alpha_e) / (1 + \alpha_e); \quad \bar{W}_{*k}^{e,\Gamma} = \bar{W}_k^{e,\Gamma} / \bar{W}^{e,\Gamma}.$$

При работе РГ в базовом режиме ($P_{kt}^{e,\Gamma} = \text{const}$)

$$\Pi = \sum_{e=\{\text{ЭЭ,ТЭ}\}} \tau_e \bar{u}_0^e \bar{W}^{e,\Gamma} \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \vartheta_k^e \theta_k^{e,\text{OT}} \bar{u}_{*k}^{e,s} t_{*k},$$

где $t_{*k} = t_k / 8760$ — относительная длительность графика k .

В результате расчетный ЧДД

$$J = K_{\text{пр}} - \gamma K_{\text{АИП}} - \tau_T u_{T,0} \beta_T W^\Gamma + \sum_{e=\{\text{ЭЭ,ТЭ}\}} \tau_e \psi_k^e \bar{u}_0^e \bar{W}^{e,\Gamma}, \quad (19)$$

где

$$\psi_k^e = \sum_{k=1}^{N_\Gamma} \vartheta_k^e \theta_k^{e,\text{OT}} \bar{u}_{*k}^{e,s} t_{*k}^{e,\Gamma}. \quad (20)$$

Для анализа эффективности РГ по видам энергоносителей отдельно выражение (19) целесообразно представить в виде аддитивной функции. С этой целью $K_{\text{АИП}}$ можно разбить на две составляющие пропорционально генерациям энергоносителей:

$$K_{\text{АИП}}^{\text{ЭЭ}} = K_{\text{АИП}} \bar{W}^{\text{ЭЭ}} / (\bar{W}^{\text{ЭЭ}} + \bar{W}^{\text{ТЭ}});$$

$$K_{\text{АИП}}^{\text{ТЭ}} = K_{\text{АИП}} \bar{W}^{\text{ТЭ}} / (\bar{W}^{\text{ЭЭ}} + \bar{W}^{\text{ТЭ}}).$$

Как правило, РГ характеризуется своим электрическим КПД η_Σ при работе в чисто электрическом режиме или суммарным КПД η_Σ при работе в когенерационном режиме. При этом часовой расход топлива может быть выражен через КПД: $\beta_T W^{\text{ЭЭ}} = c_T W^{\text{ЭЭ}} / \eta_\Sigma$, где c_T — коэффициент перевода энергии (кВт·ч) в единицы количества топлива. Для натурального газа $c_T = 0,089 \text{ м}^3 / (\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Отсюда $\beta_T = c_T / \eta_\Sigma$. При работе в когенерационном цикле $W^\Gamma = W^{\text{ЭЭ}} + W^{\text{ТЭ}}$. Расчетный ЧДД

$$J = J_{\text{ЭЭ}} + J_{\text{ТЭ}} = \sum_{e=\{\text{ЭЭ,ТЭ}\}} [K_{\text{пр}}^e - \gamma K_{\text{АИП}}^e + (\tau_e \bar{u}_0^e \psi^{e,\Gamma} - \tau_T \beta_T u_{T,0}) \bar{W}^{e,\Gamma}]. \quad (21)$$

В результате критерий эффективности применения РГ приобретает удобный для выполнения расчетов вид без суммирования за расчетный период накопленной прибыли. Здесь все цены относятся к моменту сооружения РГ.

Если принять допущения:

темпы роста цен на топливо, электро- и теплоэнергию равны коэффициенту дисконтирования α ;

отпускная цена на энергию равна рыночной цене;

годовой период работы представляется одним графиком нагрузки;

графики нагрузки совершенно независимы по конфигурации от графика цены —

$k(u_{kt}^{e,s}, P_{kt}^{e,\pi})=0$, то согласно выражению (18) $\alpha_e^* = \alpha_T^* = 0$, $\tau_e = \tau_T = T$, согласно формуле (6) $\vartheta_{kt}^{e,s,\pi} = 1$, согласно выражению (15) $\theta_k^{e,OT} = 1$, согласно формуле (20) $\psi^e = 1$. При этом ЧДД

$$J = K_{\text{пр}} - \gamma K_{\text{АИП}} + T \sum_{e=\{\text{ээ,тэ}\}} (\bar{u}_0^e - \beta_T u_{T,0}) \bar{W}^{e,\Gamma}, \quad (22)$$

а срок окупаемости ($J=0$) принимает обычно используемый вид:

$$T_{\text{ок}} = \frac{\gamma K_{\text{АИП}} - K_{\text{пр}}}{\bar{u}_0^{\text{ээ}} \bar{W}^{\text{ээ,}\Gamma} + \bar{u}_0^{\text{тэ}} \bar{W}^{\text{тэ,}\Gamma} - \beta_T u_{T,0} (\bar{W}^{\text{ээ,}\Gamma} + \bar{W}^{\text{тэ,}\Gamma})}. \quad (23)$$

Выводы

1. При технико-экономическом обосновании применения устройств РГ необходимо учитывать темпы роста цен на электроэнергию и топливо. В условиях, когда цены на топливо растут быстрее, чем цены на электро- и теплоэнергию, эффективность РГ снижается, что может привести к отказу от сооружения РГ. При неизменных темпах роста цен на топливо и энергоносители формула ЧДД может быть приведена к виду, где все параметры отнесены к году ввода РГ в эксплуатацию.

2. На эффективность РГ существенное воздействие оказывают конфигурации графиков нагрузки и графиков рыночной цены на энергоносители.

Список литературы

1. **Воропай Н. И.** Распределенная генерация в электроэнергетических системах. — Материалы междунар. научно-практич. конф. “Малая энергетика — 2005”. — М.: ИСЭМ, 2005.
2. **Ackermann Th., Andersson G., Soder L.** Distributed Generation: A Definition. — Electric Power System Research, 2001, vol. 57, № 4.
3. **Богданов А. Б.** Перекрестное субсидирование в энергетике России (http://exergy.narod.ru/stok_prez_ru.htm).
4. **Приказ** Федеральной службы по тарифам (ФСТ России) от 11 сентября 2012 г. № 209-э/1 (<http://www.rg.ru/2012/11/30/elektro-dok.html>).
5. **Обоскалов В. П., Померанец Д. И., Силин А. А.** Учет темпов роста тарифов на энергоносители при оценке эффективности сооружения РГ. — В кн.: Электроэнергетика глазами молодежи: Тр. III науч.-техн. конференции, в 2-х т. — Екатеринбург: УрФУ, 2012, т. 1.
6. **Методические** рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / Утв. Минэкономики РФ, Минфином РФ и Госстроем РФ от 21 июня 1999 г. № ВК 477.
7. **Федеральный** закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ “Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации”. — Российская газета, 2009, 5 мая.

Vpo@daes.ustu.ru