

ЭНЕРГЕТИКА

А. С. МАКСУДЯН, Э. А. АЛАПЯН, А. Г. БОЯДЖЯН

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ
ВАЭС

Рост дефицита маневренной мощности в энергосистемах и многообразие условий их функционирования не позволяют считать принятые в настоящее время способы получения пиковой энергии достаточными и универсальными. Возникает необходимость выявления новых экономичных решений.

Одним из таких решений может быть осуществление в газотурбинном цикле принципа аккумулирования энергии, используемого в гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС). Идея сооружения воздухоаккумулирующих электростанций (ВАЭС) существует более четверти века [1]. Высокой стоимостью хранилищ воздуха и менее жесткими условиями покрытия пиковых нагрузок, по-видимому, обусловлено то обстоятельство, что разработкам ВАЭС не было уделено в то время должного внимания. В настоящее время положение изменилось. Крупные достижения в технике создания подземных емкостей для хранения газообразных и жидких продуктов и возросшая острота проблемы покрытия пиковых нагрузок вновь привлекли внимание к ВАЭС. В последние годы проведен ряд исследований и проектных разработок ВАЭС за рубежом. Полученные результаты оказались столь обнадеживающими, что уже приняты решения о размещении первых заказов на строительство ВАЭС в Швеции, ФРГ, Франции и др. странах. Их ввод в коммерческую эксплуатацию намечается в ближайшие годы [2, 3].

Обобщенная тепловая схема ВАЭС изображена на рис. 1. Компрессоры, сжимающие воздух при остановленных газовых турбинах, приводятся от электродвигателей, потребляющих внепиковую энергию. Газовые турбины, включаемые в часы пиковых нагрузок, отдают всю мощность электрогенераторам. При этом компрессоры останавливаются, и мощность электрогенератора, приводимого газовой турбиной, может быть увеличена приблизительно втрое по сравнению с обычной ГТУ при использовании однопоточных газовых турбин. Концевой охладитель воздуха предназначен для сохранения температуры воздуха в хранилище на уровне $T_4 = 323^\circ\text{K}$ во избежание больших потерь на испарение воды. Поддержание постоянства давления воздуха предусмотрено за счет гидростатического давления воды, обусловленного разностью уровней расположения подземного хранилища воздуха и наземного водоема

(естественного или искусственного). Вода, вытесняемая по соединительной шахте в подосм при заряде хранилища воздухом, поступит обратно в хранилище в период его разряда. Возможны иные способы стабилизации давления воздуха, а также работа газовых турбин при переменном, в определенных пределах, давлении воздуха, поступающего из хранилища к камерам сгорания. ВАЭС могут работать в режиме обычной ГТУ, когда воздух, минуя хранилище, поступает непосредственно к камерам сгорания. Строительство ВАЭС предполагает наличие условий для сооружения хранилища сжатого воздуха необходимой емкости. Если поддержание постоянства давления сжатого воздуха предусматривается за счет гидростатического давления воды, требуется также наличие водоема, равного по объему хранилищу воздуха. Потребные объемы емкостей относительно невелики и составляют $0,1-0,2 \text{ м}^3/\text{кВт} \cdot \text{ч}$. Большие значения относятся к случаям, когда в схеме ВАЭС водохранилище не предусматривается.

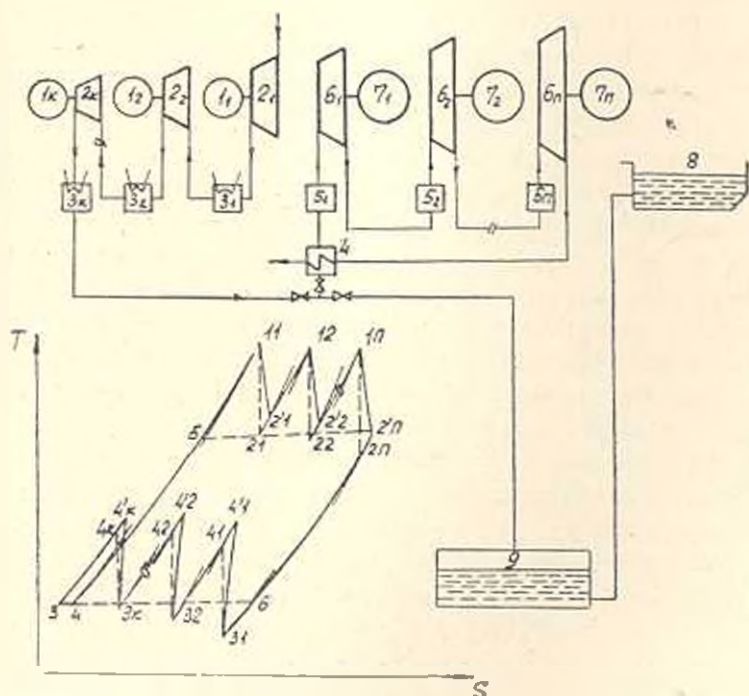


Рис. 1. Обобщенная тепловая схема ВАЭС. $1_1, 1_2, \dots, 1_k$ — электродвигатели; $2_1, 2_2, \dots, 2_k$ — компрессоры; $3_1, 3_2, \dots, 3_k$ — охладители воздуха; 4 — регенератор; $5_1, 5_2, \dots, 5_n$ — камеры сгорания; $6_1, 6_2, \dots, 6_n$ — газовые турбины; $7_1, 7_2, \dots, 7_n$ — электрогенераторы; 8 — водоем; 9 — хранилище воздуха.

В технике хранения природного газа и сжиженных углеводородов в настоящее время широко применяются новые типы емкостей с использованием естественных и искусственно образуемых пустот в земной толще. С этой целью успешно используются заброшенные рудники и шах-

ты, естественные пещеры и скважины истощенных газовых и нефтяных месторождений. Подземные хранилища сооружаются в отложениях каменных солей путем их выщелачивания, меловых слоях, сланцах, водоносных песчаниках и т. д.

Опыт создания подземных хранилищ газового и жидкого топлива, уже накопленный отечественной промышленностью, не оставляет сомнений в возможности практической реализации единственного нового элемента ВАЭС — хранилища сжатого воздуха. Следовательно, при сооружении ВАЭС не следует ожидать непредвиденных технических затруднений, связанных с отработкой новых элементов, т. к. все ее элементы проверены в работе.

ВАЭС отличается высокой приемистостью. Нормальный пуск из холодного состояния до принятия полной нагрузки — 6–8 мин. При ускоренном пуске это время составляет 4 мин и может быть сокращено еще наполовину принятием специальных мер [2].

В целом ВАЭС свойственны положительные качества ГАЭС и обычных ГТУ: большая единичная мощность агрегатов и высокая маневренность, способность работы для покрытия пиков и заполнения провалов нагрузки, сравнительно небольшой уровень капиталовложений и эксплуатационных затрат [1+3].

В процессе разряда ВАЭС потребляет топливо, которое может оказаться дефицитным (природный газ, дистиллят и др.). Это является ее недостатком. Однако суммарное потребление топлива в ВАЭС может оказаться меньше по сравнению с альтернативным вариантом развития заменяемых пиковых источников энергосистемы (ГАЭС и ГТУ).

Понятно, что только топливная эффективность не может служить критерием целесообразности сооружения ВАЭС. Для окончательных выводов по этому вопросу требуется проведение дополнительных расчетов с учетом капитальных затрат.

Отношение разрядной энергии ВАЭС к энергии заряда, именуемое в дальнейшем коэффициентом преобразования ϕ , превосходит к. п. д. гидроаккумулирования η_r . При равенстве зарядной энергии ВАЭС и ГАЭС уравнивание вариантов возможно путем учета дополняющей пиковой мощности ГТУ в альтернативном варианте ввода ГАЭС. При неизменном составе работающего в ночной период оборудования энергосистемы в обоих вариантах будет расходоваться одинаковое количество топлива при заряде. Тогда топливный эффект ВАЭС, по сравнению с альтернативным вариантом ввода ГАЭС и дополняющей ГТУ, можно представить в виде

$$\Delta b = \frac{b_1 (\mathcal{E}_{\text{ин}} - \mathcal{E}_{\text{пр}}) - b_p \mathcal{E}_{\text{пр}}}{\mathcal{E}_{\text{пр}}} = b_1 \left(1 - \frac{\eta_r}{\phi} \right) - b_p \quad (1)$$

где Δb — удельная экономия (или перерасход) топлива; b_1 и b_p — удельный расход топлива дополняющей ГТУ и разряда ВАЭС; $\mathcal{E}_{\text{пр}}$ и $\mathcal{E}_{\text{ин}}$ — энергия разряда ВАЭС и ГАЭС.

Коэффициент преобразования ВАЭС при k -ступенчатом сжатии воздуха и n -ступенчатом расширении продуктов сгорания определится как

$$\varphi = \frac{L_{\tau}}{L_{\kappa}} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i (1 - x_i)}{\sum_{j=1}^n b_j (y_j - 1)}, \quad (2)$$

где L_{τ} и L_{κ} — работа турбин и компрессоров с учетом к. п. д. электромашин; $a_i = \mu_{ti} c_{p ti} T_{ti} \eta_{ti} \eta_{\tau ti}$; $b_j = \mu_{\kappa j} c_{p \kappa j} T_{ij} / \eta_{\kappa j} \eta_{\tau \kappa j}$; $x_i = \varepsilon_{ti}^{-m_{ti}}$, $y_j = \varepsilon_{\kappa j}^{m_{\kappa j}}$; $\mu_{\kappa j} = G_{\kappa j} / G_{\kappa 1}$; $\mu_{ti} = G_{ti} / G_{\kappa 1}$; $m_{ti} = \frac{k_{ti} - 1}{k_{ti}}$; $m_{\kappa j} = \frac{k_{\kappa j} - 1}{k_{\kappa j}}$; G_{ti} , $c_{p ti}$, ε_{ti} , k_{ti} — расход рабочего тела, удельная теплоемкость, степень изменения давления и показатель изознтропы i -ой ступени расширения; $G_{\kappa j}$, $c_{p \kappa j}$, $\varepsilon_{\kappa j}$, $k_{\kappa j}$ — то же для j -ой ступени сжатия; T_{ti} и T_{ij} — температуры рабочего тела в одноименных точках цикла; η_{ti} , $\eta_{\tau ti}$, $\eta_{\kappa j}$, $\eta_{\tau \kappa j}$ — к. п. д. турбины, электрогенератора, компрессора и электродвигателя соответствующей ступени.

Следуя [4] и выразив температуру воздуха после регенеративного подогрева T_5 через коэффициент регенерации η_p , а количество тепла, подведенное в первой и любой $(i+1)$ -ой камере сгорания через расходные и термодинамические параметры цикла, можно получить окончательное выражение для суммарного расхода тепла при разряде ВАЭС в виде

$$Q_{\kappa c} = Q_{\kappa c 1} + \sum_{i=1}^{n-1} Q_{\kappa c(i+1)} = \sum_{i=1}^{n-1} c_i (1 - x_i) + e, \quad (3)$$

где $c_i = \mu_{ti} \eta_{ti} T_{ti} c_{p \kappa c(i+1)} / \eta_{\kappa c(i+1)}$; $c_n = \mu_5 \eta_{in} \eta_p T_5 c_{p \kappa c 1} / \eta_{\kappa c 1}$; $\mu_5 = G_5 / G_{\kappa 1}$;

$$e = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_{p \kappa c(i+1)}}{\eta_{\kappa c(i+1)}} (\mu_{\tau(i+1)} T_{1(i+1)} - \mu_{\tau i} T_{1i}) + \frac{c_{p \kappa c 1}}{\eta_{\kappa c 1}} [\mu_{\tau 1} T_{11} - \mu_5 [T_{11} \eta_p + (1 - \eta_p) T_5]];$$

$c_{p \kappa c(i+1)}$, $\eta_{\kappa c(i+1)}$ — удельная теплоемкость рабочего тела и к. п. д. $(i+1)$ -ой камеры сгорания.

Удельный расход топлива при разряде ВАЭС

$$b_p = 0,123 \frac{Q_{\kappa c}}{L_{\tau}} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i (1 - x_i) + e}{\sum_{i=1}^n a_i (1 - x_i)}. \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) представим (1) в виде

$$\Delta b = b_a \left\{ 1 - \frac{\gamma_r \sum_{j=1}^k b_j (y_j - 1) + \frac{0,123}{b_a} \left[\sum_{i=1}^n c_i (1 - x_i) + e \right]}{\sum_{i=1}^n a_i (1 - x_i)} \right\}. \quad (5)$$

Топливный эффект ВАЭС обусловлен не только общей степенью повышения давления, но и определенным сочетанием степеней изменения давления ступеней сжатия и расширения. Это следует из зависимости Δb от коэффициентов x_i и y_j по (5).

Из условия связи согласно [4]

$$\prod_{i=1}^n x_i^{\alpha} \prod_{j=1}^k y_j^{\beta} - \beta = 0 \quad (6)$$

и для коэффициента степени изменения давления k -ой ступени сжатия имеем

$$y_k = \frac{\beta}{\prod_{i=1}^n x_i^{\alpha} \prod_{j=1}^{k-1} y_j}. \quad (7)$$

где $\beta = x_i^{\alpha} y_k$ — обобщенный коэффициент сопротивления всего газозавоздушного тракта с учетом потерь давления в хранилище воздуха; $\alpha = m_{\text{сж}}/m$ — показатель, определенный по средним значениям m и $m_{\text{сж}}$ для процессов сжатия и расширения; $\gamma_r = (1 - m_r \eta_r)^{-1}$, $\gamma_k = (1 - m_k \eta_k)^{-1}$ — коэффициенты потерь давления, отнесенные к турбинному и компрессорному тракту; η_r — суммарная относительная потеря давления в хранилище воздуха, регенераторе, камерах сгорания и на выходе из турбины; η_k — то же в промежуточных охладителях воздуха.

При заданной общей степени повышения давления задача оптимизации Δb по (5) с учетом (7) сводится к его исследованию на условный экстремум. Исключив y_k из (5) путем подстановки (7) в это выражение, можно свести эту задачу к нахождению абсолютного экстремума вновь полученной функции. Дифференцируя ее по переменным x_i и y_j и приравнявая полученные выражения нулю, будем иметь систему уравнений

$$\begin{aligned} \gamma_r b_i b_k y_k^{\alpha} &= [a_i (b_1 - \Delta b) - 0,123 c_i] x_i, & i = 1, \dots, n \\ b_j y_j &= b_k y_k, & j = 1, \dots, (k-1) \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) и (6) для оптимальных по Δb коэффициентов x_i и y_j получим:

$$x_i = \frac{\prod_{l=1}^n [a_l (b_l - \Delta b) - 0.123c_l]^{-\frac{1}{\alpha_n}} \left(\frac{y}{\sigma_k} \right)^{\frac{1}{\alpha_n}}}{a_i (b_i - \Delta b) - 0.123c_i}; \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$y_j = \frac{\sigma_k^{\frac{m_k}{k}} \prod_{j=1}^k b_j^{\frac{1}{k}}}{b_j}, \quad j = 1, \dots, k \quad (10)$$

где $\alpha_k = \left(\prod_{j=1}^k y_j \right)^{\frac{1}{\sigma_k}}$ — общая степень повышения давления.

Решение возможно методом итераций. При предварительно принятых для заданной α_k приближенных значениях x_i и y_j определяется Δb по (5). Заданное значение α_k и полученные по предварительно принятым x_i и y_j значения Δb и коэффициентов a_i , c_i , b_i подставляются в (9) и (10) и определяются новые значения x_i и y_j . Принимая вновь полученные значения x_i и y_j как заданные, находим по (5) новое значение Δb и сравниваем с его величиной, подсчитанной в предыдущем цикле. Расчет в указанной последовательности продолжается до совпадения значений Δb в двух последующих циклах с заданной точностью. Переменность расхода воздуха, обусловленная возможными утечками в компрессорном тракте и хранилище, учитывается коэффициентами μ_{kj} и μ_2 . Утечки воздуха для каждой компрессорной ступени и хранилища принимались соответственно в размере 0,01 и 0,06 от G_{k1} . Переменность расхода продуктов сгорания обусловлена, в основном, количеством топлива, вводимого в камеры сгорания. Это учитывается коэффициентом μ_1 , определяемым суммированием μ_3 с весовым количеством топлива, введенного в предшествующие камеры сгорания. Весовое количество топлива, коэффициент избытка воздуха и теплоемкость продуктов сгорания определяются из теплового баланса соответствующей камеры сгорания. Теплоемкость воздуха и «чистых продуктов сгорания» вычисляется по аппроксимационным многочленам.

По изложенному алгоритму была составлена программа и проведены расчеты на ЭВМ с изменением α_k для различных схематических разновидностей ВАЭС, имеющих $n=1 \div 3$, $k=2 \div 5$ и $\eta_p=0 \div 0.8$. Основная исходная информация принята следующей: $b_k=0.500 \text{ кг у. т./кВт ч}$; $\eta_c=0.75$; $\beta=1.09$; $T_H=1073^\circ\text{K}$; $T_{a1}=298^\circ\text{K}$, $T_H=268 \text{ K}$.

К. п. и камер сгорания, турбин, компрессоров и электромашин принимались по [4].

Анализ результатов расчетов, частично представленных на рис. 2 и 3 в виде зависимостей Δb , φ и b_p от α_k , показал следующее. Во всех рассмотренных случаях величина Δb становится положительной при

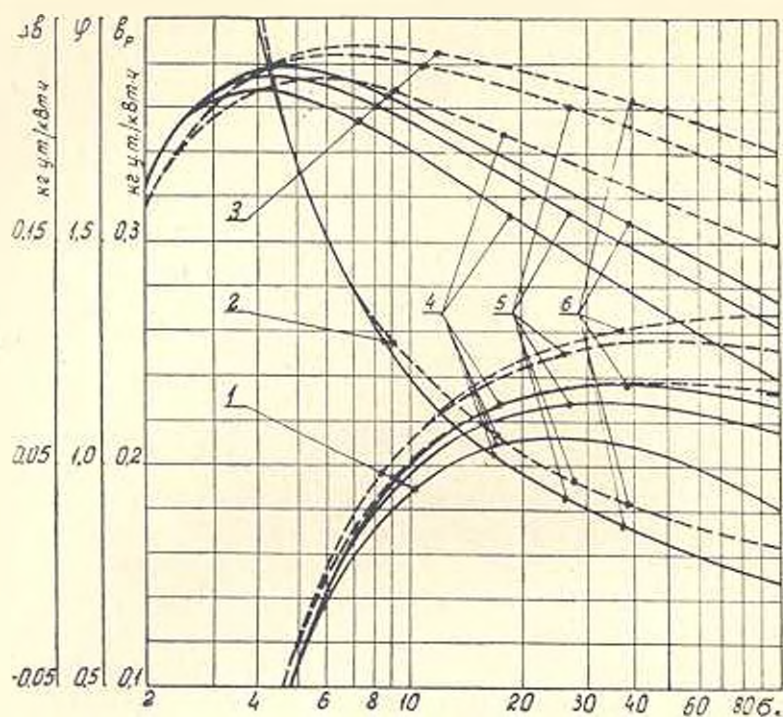


Рис. 2. Зависимость Δb , φ и b_p от σ_k при $\eta_p = 0$: 1 — b_p ; 2 — Δb ; 3 — φ ; 4 — $k=2$; 5 — $k=3$; 6 — $k=1$; — $n=1$; $n=2$.

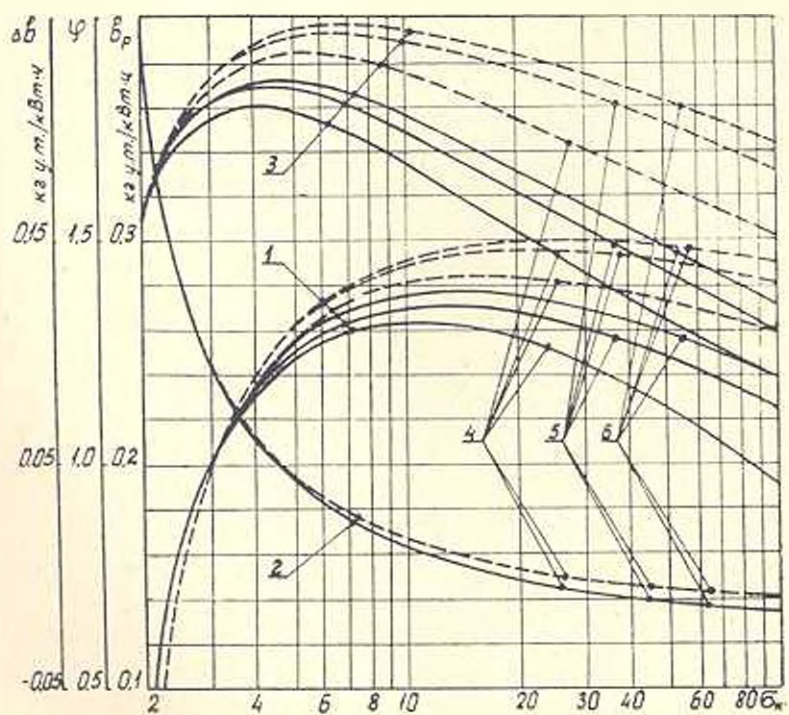


Рис. 3. Зависимость Δb , φ и b_p от σ_k при $\eta_p = 0,7$. (Обозначения те же, что и на рис. 2).

значениях $\varepsilon_k > 2 \div 7$, зависящих от τ_p . Это значит, что ВАЭС может обеспечить определенную экономию топлива в энергосистеме по сравнению с альтернативным вариантом ввода ГАЭС и дополняющей ГТУ. Удельная экономия топлива и интенсивность его изменения на отдельных участках ε_k отличаются для различных схем ВАЭС. Характерным является увеличение возможной величины Δb в зависимости от ε_k до значений $0,06 \div 0,15$ кг у. т./кВт. ч и более с последующим постепенным ее уменьшением. Достаточно высокий уровень Δb , близкий к максимальному, сохраняется в широком диапазоне изменения ε_k . Это особенно заметно в регенеративных схемах ВАЭС. Увеличение φ и уменьшение b_p более резко выражено в области относительно меньших значений ε_k . С введением регенерации, увеличением k и n возрастает Δb . Влияние регенерации оказывается особенно существенным и сопровождается сильным уменьшением b_p . Регенеративный подогрев воздуха, имеющего пониженную температуру из-за наличия конечного охладителя, резко сокращает расход топлива в камере сгорания. Увеличение k приводит к росту φ и Δb . Величина b_p остается неизменной. Возрастание φ и Δb с увеличением n происходит при некотором росте b_p . Это особенно выражено в безрегенеративных схемах ВАЭС, где эффект от увеличения n менее заметен. Увеличение k оказывает на Δb более сильное влияние, чем увеличение n . Рост Δb имеет в обоих случаях затухающий характер. Экономия топлива получается значительной для относительно простых схем ВАЭС.

Дополнительные расчеты при $b_1 = 0,100$ кг у. т./кВт. ч показали, что и в этом случае возможно получение Δb около $0,09$ кг у. т./кВт. ч.

Выводы

1. ВАЭС могут работать для покрытия пиковых нагрузок энергосистем и выравнивания их ночных провалов. Количество пиковой энергии, вырабатываемой ВАЭС, значительно превосходит потребляемую внепиковую энергию.

2. Топливный эффект ВАЭС является положительной величиной при оптимальном распределении степени изменения давления и прочих показателях альтернативного варианта сравнения. Удельная экономия топлива по сравнению с альтернативным вариантом ввода ГАЭС и дополняющей ГТУ составляет $0,06 \div 0,15$ кг у. т./кВт. ч.

Армянское отделение «Энергосетьпроект»-а

Поступило 12 IV 1976

Ա. Ս. ԴԱՐՈՒՅԱՆ, Զ. Ն. ԱՇԽԱՆ, Ա. Դ. ՐԱՅԻՅԱՆ

ՕՐԻ ԿՈՆՏԱԿՏԱՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆ ԳԱՌԵՐՔԱՅԻՆ
ՇԱՆԱԿԵՏՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Վ

Մշակված է կամավոր թվով ճնշման փոփոխման աստիճաններ ունեցող քիմիաներագիտական ինստիտուտի օգի կոնտակտան էլեկտրակայանի

(ՅԿԷԿ) վառելիքային էֆեկտի օպտիմալացման ալգորիթմը: Բերված են էԶԼ-ի վրա կատարված ՅԿԷԿ-ի վառելիքի հնարավոր տնտեսման մի քանի արդյունքներ, համեմատած փոխարինող պիկային էներգաաղբյուրների տարբերակի հետ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. D. Noren. Storing energy underground. Engineering, № 4, 1970.
2. E. K. A. Olsson. Air storage power plant. Mech. Engineering, № 20, 1970.
3. E. Jeffs. Air storage: the alternative peak power source. Energy International, v. 10, № 9, 1963.
4. Дедуценко Ю. М., Ледков Г. В. Оптимизация тепловых схем сложных газотурбинных установок. «Научная думка», Киев, 1972.