ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
Տեխնիկական գիտութ. սերիա XXVI, №6, 1973 Серия технических наук

ЭНЕРГЕТИКА

А. С. МАКСУДЯН, А. Г. БОЯДЖЯН

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С АККУМУЛИРОВАНИЕМ ВОЗДУХА

Развитие энергосистем сопровождается увеличением неравномерности режима электропотребления и несоответствием ему маневренной способности основного генерирующего энергооборудования. Поэтому выявление энергоустановок, приспособленных для покрытия пиковых нагрузок и прохождения их ночных провалов, приобретает особый интерес.

Основными источниками пиковой энергии предполагаются гидроаккумулирующие (ГАЭС) и обычные газотурбинные (ГТУ) электростанции. Обычные ГТУ удовлетворяют требованиям достаточной маневренности при сравнительно небольших капиталовложениях. К числу же их недостатков следует отнести не только существенно более низкий, чем у паротурбинных, к. п. д., но и ограничения по предельной мощности.

ГАЭС характеризуются высокой маневренностью и большей единичной мощностью агрегатов. Кроме того, заряжаясь в часы спада нагрузки, ГАЭС отдают энергию в часы пик, когда в системе имеет место дефицит мощности. Таким образом, энергетической особенностью ГАЭС по сравнению с другими типами электростанций, в том числе и обычными ГТУ, является способность работать не только для покрытия пиков, но и для заполнения провалов суточных графиков нагрузки энергосистем.

Принцип аккумулирования энергии, используемый в ГАЭС, может быть успешно осуществлен и в газотурбинном цикле, предполагающем аккумулирование сжатого воздуха в хранилище в периоды спада нагрузок с последующим его использованием в часы пик. Предварительные исследования энергетической эффективности электростанции, работающей по такому циклу, проведены в Арм. НИИЭ.

Тепловая схема газотурбинной воздушно-аккумулирующей электростанции (ВАЭС) с изображением цикла в $T-S$ координатах приведена на рис. 1. Компрессора, сжимающие воздух при остановленных газовых турбинах, приводятся от электродвигателей, потребляющих внепиковую энергию. Сжатый воздух аккумулируется в хранилище, специально созданном для этой цели. Газовые турбины включаются в часы пик и отдают всю мощность электрическим генераторам. Под-

держание постоянства давления воздуха в хранилище предусматривается за счет гидростатического давления воды, поступающей из водоема (естественного или искусственного) в период его опорожнения. Разностью уровней расположения водоема и воздухохранилища

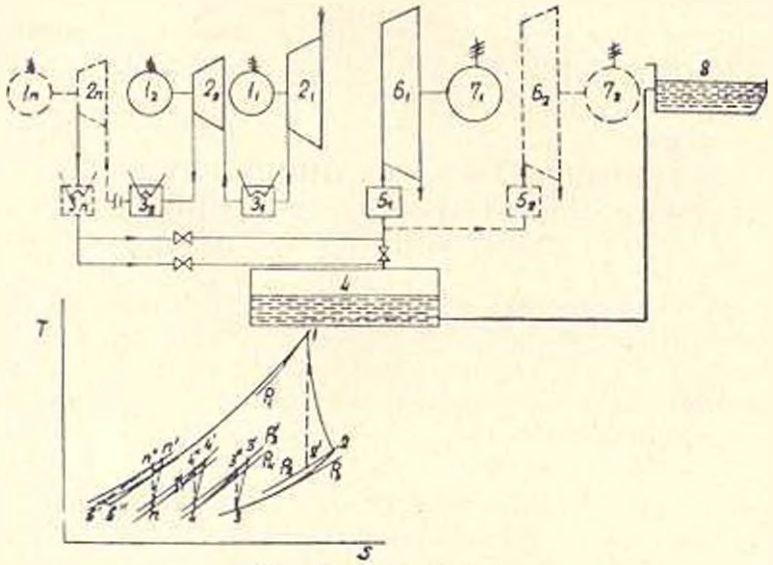

Рис. 1. Схема и цикл ВАЭС.

1_1, 1_2...—электродвигатели; 2_1, 2_2...—компрессоры; 3_1, 3_2...—охладители воздуха; 4—хранилище воздуха; 5_1, 5_2...—камеры сгорания; 6_1, 6_2...—газовые турбины; 7_1, 7_2...—электрогенераторы; 8—водоем

определяется давление в последнем (10 *м* = 1 *бар*). Основным отличием ВАЭС от обычной ГТУ является автономная работа компрессора, мощность которого в этом случае может быть значительно меньше, так как длительность периода спада нагрузки, как правило, превышает продолжительность часов пик. В то же время мощность электрического генератора, приводимого газовой турбиной, может быть значительно увеличена—приблизительно в 3 раза по сравнению с обычной ГТУ так как длительность периода спаад нагрузки, как правило, превышает при использовании однотипных газовых турбин. Столь резкое увеличение единичной мощности газотурбинных агрегатов устраняет имеющийся разрыв по сравнению с ГАЭС.

Новым элементом в ВАЭС является хранилище воздуха. В технике хранения природного газа в настоящее время успешно применяются новые типы емкостей, использующие естественные и искусственно образуемые пустоты в земной толще: заброшенные рудники и шахты, пещеры и скважины истощенных месторождений нефти или газа. Подземные хранилища сооружаются в отложениях каменных солей, путем их выщелачивания (такое газохранилище сооружено близ Еревана), в меловых слоях, сланцах, водоносных песчаниках и т. д. Таким образом, при сооружении ВАЭС не следует ожидать непредвиденных затруднений, связанных с отработкой новых элементов, так как все ее элементы проверены в эксплуатации.

Термодинамический цикл ВАЭС, изображенный в координатах T—S на рис. 1, состоит из процесса многоступенчатого сжатия воздуха 33', 44', . . . , nn', его охлаждения в концевом охладителе n'b', подогрева в камере сгорания b'1 и расширения в газовой турбине 12. Параметрам рабочего тела будем приписывать индексы, соответствующие нумерации точек цикла. Термодинамические соотношения выразим через наивысшую температуру цикла и наибольшее давление с помощью температурного коэффициента $\tau = T_3/T_1$ и общей степени повышения давления $\varepsilon_k = p_n/p_3$. Удельные теплоемкости рабочего тела c_p будем считать постоянными и соответствующими средней температуре цикла. Для упрощения выводов можно принять, что в камеру сгорания воздух поступает из воздухохранилища будучи уже охлажденным до температуры окружающей среды ($T_b' = T_1$). С этой же целью температуру воздуха в конце охлаждения в промежуточных охладителях будем принимать одинаковой и равной температуре окружающего воздуха ($T_3 = T_4 = \ldots = T_n$). Тогда оптимальные степени повышения давления во всех ступенях, соответствующие минимальной работе n-ступенчатого изоэнтропийного сжатия, одинаковы и равны $\varepsilon_i = \sqrt[n]{\varepsilon_k}$ [1]. Потери давления в промежуточных охладителях $\Delta p_3 = p_3 - p_4$ . . . $\Delta p_n = p_n - p_b$ и на выходе из газовой турбины целесообразно учитывать через к. п. д. компрессора η_{ik} и турбины η_i вместе с внутренними потерями в проточной части. Отдельно учтем дополнительные потери давления $\Delta p_b = p_b - p_1$, возникающие при хранении воздуха и его поступлении в камеру сгорания. Назовем относительной потерей давления величину $\sigma = (p_b - p_1)/p_b$ и коэффициентом потерь давления $\nu = 1 - \sigma = p_1/p_b$. Можно принять: $\nu \approx \varepsilon_i/\varepsilon_k$; $\nu^m \approx 1/(m\sigma + 1)$, где ε_i — степень расширения газов в турбине. С учетом приведенных соображений удельную работу изоэнтропийного сжатия l_k, расширения l_t и удельный расход тепла q можно представить в виде:

$$l_k = c_p[(T_2' - T_3) + \ldots + (T_n' - T_n)] = c_p T_3 n(\varepsilon_i^{m\,n} - 1) \quad кдж/кг,$$

$$l_t = c_p(T_3 - T_2') = c_p T_1(\varepsilon_i^m - m\sigma - 1)\varepsilon_i^{-m} \quad кдж/кг;$$

$$q = c_p(T_1 - T_b') = c_p T_1(1 - \tau) \quad кдж/кг, \qquad (1)$$

где $m = \dfrac{k-1}{k}$; k — показатель изоэнтропы.

Основной энергетической характеристикой цикла любой установки является ее к. п. д. В газотурбинном цикле с аккумулированием воздуха природа составных частей подводимой к рабочему телу энергии (электроэнергия, затрачиваемая на привод компрессоров, и тепло топлива, подаваемого в камеру сгорания) неодинакова. Здесь однозначная формулировка к. п. д. связана с определенными затруднениями. Поэтому для рассматриваемой установки представляется

целесообразным ввести понятия к. п. д. аккумулирования и к. п. д. тепловой экономичности.

К. п. д. аккумулирования η_a ВАЭС будем определять как отношение действительной работы расширения к действительной работе сжатия, суммированной с работой, которая может быть получена на КЭС энергосистемы при использовании того же количества топлива, что и затрачиваемого в камере сгорания ВАЭС. Тогда, с учетом (1), получим:

$$\eta_a = \frac{\mu\eta_г\,\eta_{эд} l_т}{l_к/\eta_{к}\,\eta_{эл}\eta_{эс} + 3{,}6\cdot 10^3\cdot q/\eta_{кс}Q_р^н b} =$$

$$= \frac{\mu\eta_{кс}\eta_{эл}\eta_{к}\,\eta_{эс}\eta_{г}\,\eta_{эд}\,b\,(\varepsilon_k^m - m\tau - 1)}{\varepsilon_k^m[\tau m(\varepsilon_k^{m/\sigma}-1)b\eta_{кс} + 0{,}123(1-\tau)\eta_{к}\,\eta_{эл}\,\eta_{эс}]}, \qquad (2)$$

где μ — коэффициент расхода, учитывающий изменение количества рабочего тела из-за его утечек и с подачей топлива; $\eta_{эг}$, $\eta_т$, $\eta_{кс}$, $\eta_к$, $\eta_{эд}$, $\eta_{эс}$ — к. п. д. электрогенератора, турбины, камеры сгорания, компрессора, электродвигателя и электрических сетей передачи электроэнергии для привода компрессоров; $Q_р^н$ и b — теплотворная способность и удельный расход условного топлива на КЭС.

К. п. д. тепловой экономичности η_e, в отличие от η_a, будем определять как отношение количества тепла, эквивалентного действительной работе расширения, к количеству тепла, затраченному на КЭС энергосистемы для производства приводной энергии компрессоров, суммированному с количеством тепла, затрачиваемого в камере сгорания ВАЭС. Учитывая (1) и (2), получим

$$\eta_e = \frac{\mu\eta_г\,\eta_{эд} l_т}{l_к Q_р^н b/\eta_к\,\eta_{эл}\eta_{эс} + q\,\eta_{кс}} = 0{,}123\,\frac{\eta_a}{b}. \qquad (3)$$

Кроме того, представляет интерес рассмотрение отношения энергии разряда ВАЭС, возвращаемой в энергосистему в период его активной работы, к энергии заряда, потребляемой для сжатия воздуха, т. е.

$$\varphi = \frac{Э_р}{Э_з} = \frac{\mu\eta_г\,\eta_{эд} l_т}{l_к/\eta_к\,\eta_{эл}\eta_{эс}} = \mu\,\eta_г\,\eta_{эд}\eta_к\,\eta_{эл}\eta_{эс}\,\frac{\varepsilon_k^m - m\tau - 1}{\tau m\varepsilon_k^m(\varepsilon_k^{m/\sigma}-1)}. \qquad (4)$$

Назовем φ коэффициентом активной энергии.

Дифференцируя (2) и (4) по ε_k и приравняв числитель дроби нулю, получим после преобразований выражения для оптимальной по η_a и φ степени повышения давления $\varepsilon_{к\eta}$ и $\varepsilon_{к\varphi}$ в виде трансцендентных уравнений:

$$\varepsilon_{к\eta_a}^{m\frac{n+1}{n}} - \left[\varepsilon_{к\eta_a}^{m/n}(n+1) + \frac{0{,}123(1-\tau)\eta_к\,\eta_{эл}\,\eta_{эс}}{\tau b\,\eta_{кс}} - n\right](m\tau+1)=0;$$

$$\varepsilon_{к\varphi}^{m\frac{n-1}{n}} - [\varepsilon_{к\varphi}^{m/n}(n+1) - n](m\tau+1) = 0. \qquad (5)$$

Расчеты по (2), (3), (4) и решение уравнений (5) методом деления отрезка пополам [2], проводились на ЭЦВМ при исходной информации: $\mu=0{,}94$; $\eta_{эс}=0{,}92$ или 1,0 (без учета потерь в электрических сетях); $\eta_{эд}=\eta_{кс}=\eta_{рг}=0{,}98$; $\eta_к=0{,}85$; $\eta_т=0{,}87$; $m=0{,}27$; $\tau=0{,}262$ ($T_1=750°C$); $n=3$, $b=0{,}32$ *кг у. т./квтч*. Некоторые результаты расчетов изображены на рис. 2 и 3. К. п. д. $\eta_{эа}$, характеризующий совершенство самой ВАЭС без учета процесса производства потребля-

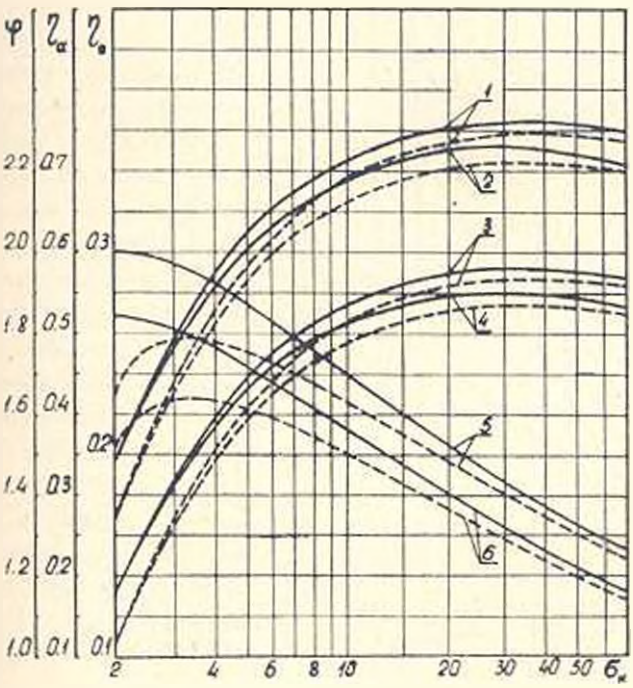

Рис. 2. Зависимость $\eta_{эа}$, $\eta_е$ и φ от $\beta_н$:
1, 3, 5—при $\eta_{эс}=1{,}0$; *2, 4, 6* при $\eta_{эс}=0{,}92$.
———— $\tau=0{,}11$ – – – – $\tau=0{,}22$

емой для сжатия воздуха электроэнергии, представляется по физическому смыслу удобным для сравнения с к. п. д. ГАЭС. По тем же соображениям к. п. д. $\eta_е$ пригоден для сравнения с к. п. д. обычных ГТУ или других теплоэнергетических установок.

К. п. д. ГАЭС равен 0,70 : 0,75 без учета потерь в электрических сетях. Из рис. 2 очевидно, что $\eta_{эа}$ ВАЭС может превосходить эту величину даже при принятых равными 8 % потерях в электрических сетях и завышенной до 22% относительной потере давления. Что касается $\eta_е$, то его величина превосходит или находится на уровне к. п. д. лучших современных пиковых ГТУ обычного типа. Отметим, что сооружение ВАЭС, как и ГАЭС, в зависимости от месторасположения может привести в целом по энергосистеме не только к увеличению, но и к уменьшению потерь в электрических сетях, спо-

собствуя их равномерной работе без перегрузки в течение суток.

Кривые к. п. д. ВАЭС имеют сходный характер: в широком диапазоне изменения ε_κ (приблизительно от 15 до 60) происходит весьма небольшое изменение к. п. д., сохраняющегося почти на максимальном уровне. Следовательно, вынужденное отклонение от оптимальной степени повышения давления не окажет заметного воздействия на энергетическую эффективность ВАЭС. Это свойство, желательное для любой газотурбинной установки, приобретает особую ценность для ВАЭС, где ε_κ обусловлена глубиной расположения подземной емкости, существенно меняющейся в зависимости от природно-географических условий. Значения ε_{κ_1} значительно превосходят ε_{κ_2} и возрастают с увеличением ζ и η_κ. Величина коэффициента φ достигает 1,3÷1,5 при ε_{κ_1} и близлежащей области, соответствующей уровню максимальных к. п. д. Это значит, что ВАЭС возвращает в энергосистему в 1,3÷1,5 раза больше энергии, чем потребляет для заряда в периоды спада нагрузок. Понятно, что в ВАЭС дополнительно расходуется топливо.

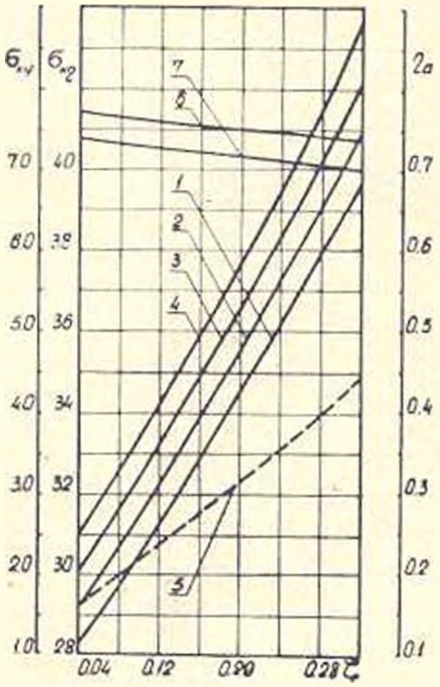

Рис. 3. Зависимость ε_{κ_1}, ε_{κ_2} и φ_a от ζ и η_κ: 1, 2, 3, 4 — ε_{κ_1} при η_κ = 0,82; 0,84; 0,86; 0,88; 5 — ε_{κ_2}; 6, 7 — φ_a при $\eta_{\kappa r}$ = 1,0 и $\eta_{\kappa r}$ = 0,92

Достоинством ВАЭС является также способность работы, при необходимости, без дополнительного потребления электроэнергии из энергосистемы — на режиме обычной ГТУ или для самозаряда. При этом воздух полностью, минуя хранилище, или частично поступает непосредственно к камерам сгорания. В первом случае ВАЭС вырабатывает электроэнергию как обычная ГТУ, а во втором — часть воздуха поступает в хранилище и используется для производства электроэнергии в пиковое время.

Потребные объемы хранилищ ВАЭС получаются в десятки раз меньше, чем объемы водохранилищ ГАЭС одинаковой мощности. Из уравнения состояния сжатого воздуха и (1) можно для удельного полезного объема хранилища v $м^3$, приходящегося на 1 *квтч* генерируемой электроэнергии, получить выражение:

$$v = \frac{9{,}6\tau\, \varepsilon_\kappa^m}{\eta_{\kappa r}\eta_t (1-\zeta)\varepsilon_\kappa (\varepsilon_\kappa^m - m\zeta - 1)} \qquad (6)$$

Расчеты показали, что величина v сильно уменьшается с увеличением ε, и не превосходит 0,1 *м³/кгч* в области, соответствующей максимальным к. п. д. Это снижает капиталовложения в ВАЭС, уровень которых получается значительно ниже, чем в обычных ГТУ и, тем более, в ГАЭС [3]. Следовательно, по экономическим показателям ВАЭС может оказаться вполне конкурентоспособной с известными видами пиковых энергоустановок.

АрмНИИЭ Поступило 14.VII.1973.

Ս. Ա. ԻԱՓՈՒՉՅԱՆ, Ա. Գ. ՊՈՅԱՋՅԱՆ

ՕԴԻ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ ԳԱԶԱՏՈՒՐԲԻՆԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆԻ ՑԻԿԼԻ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա մ փ ո փ ո ւ մ

Հոդվածում դիտվում են օդի կուտակումով աշխատող գազատուրբինային էլեկտրակայանի աշխատանքի սկզբունքը և ցիկլի էներգետիկ առանձնահատկություններ։ Ստացված են էներգետիկ արդյունավետության հիմնական ցուցանիշների արտահայտությունները և հետազոտված է սեղմման աստիճանի աղդեցությունը։ Բացահայտված է, որ էներգետիկ արդյունավետություն օպտիմալ սեղմման աստիճանի դեպքում չի զիջում այլ տիպի հայտնի պիկային էներգատեղակայանքների արդյունավետությանը։

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андрющенко А. И.* Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. М., «Высшая школа», 1968.
2. *Демидович Б. П. и Марон И. А.* Основы вычислительной математики. М., «Наука», 1966.
3. *E. K. A. Otsson.* Air storage power plant. "Mechanical Engineering", Nov., 1970.