

УДК 621.438

Г.А. Баласанян, д-р техн. наук, проф., Одес. нац. политехн. ун-т

## СОГЛАСОВАНИЕ ГРАФИКОВ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК СИСТЕМ КОГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

*Г.А. Баласанян. Узгодження графіків теплового і електричного навантаження систем когенерації на базі газотурбінної установки.* Запропоновано методику узгодження графіків електричного і теплового навантаження системи енергопостачання на базі когенераційної газотурбінної установки (ГТУ). Вирішено задачу узгодження та оптимізації добових графіків електричного і теплового навантажень ГТУ при роботі за тепловим та електричним графіками навантажень. Виконано порівняльну економічну оцінку запропонованої системи енергопостачання і системи з роздільною генерацією.

*Г.А. Баласанян. Согласование графиков тепловой и электрической нагрузок систем когенерации на базе газотурбинной установки.* Предложена методика согласования графиков электрической и тепловой нагрузок системы энергоснабжения на базе когенерационной газотурбинной установки (ГТУ). Решена задача согласования и оптимизации суточных графиков электрической и тепловой нагрузок ГТУ при работе по тепловому и электрическому графикам нагрузок. Выполнена сравнительная экономическая оценка предложенной системы энергоснабжения и системы с отдельной генерацией.

*Г.А. Balasanyan. Matching the charts of thermal and electrical loads of the GTU-base of co-generation systems.* The method for matching the charts of thermal and electric loading of the energy supply system on the basis of a co-generation gas-turbine unit is offered. The task of matching and optimization of the daily charts of the GTU electric and thermal loadings is solved. The comparative economic evaluation of the offered system of energy supply and of the system with the separate generation is carried out.

Повышение эффективности производства тепла и электроэнергии за счет широкого внедрения современных когенерационных технологий является одним из перспективных направлений энергосбережения.

Получили распространение системы когенерации на базе газопоршневых двигателей и газотурбинных установок (ГТУ) для комплексного энергоснабжения автономных потребителей. Одним из основных условий обеспечения высокой эффективности эксплуатации указанных систем является согласование суточных графиков тепловой и электрической нагрузок когенерационной установки и соответствующих графиков потребителя.

Для систем когенерации на базе газопоршневых двигателей решение этой задачи возможно за счет использования аккумулирования тепла [1] либо интегрирования в систему альтернативных источников энергии [2]. Применение этих решений для систем когенерации на базе ГТУ, номинальная мощность которых на порядок выше, требует значительных капитальных затрат и технически трудно реализуемо.

Анализ систем когенерации на базе ГТУ, находящихся в эксплуатации, показывает, что основными направлениями их использования являются [3, 4]:

— мини-ТЭЦ промышленных предприятий для обеспечения заданной электрической и тепловой нагрузок технологического процесса;

— мини-ТЭЦ в системе районного теплоснабжения для обеспечения требуемой тепловой мощности, при этом выработка электроэнергии является побочным продуктом, продажа которого идет в доход мини-ТЭЦ.

Во втором случае ГТУ используются в качестве надстройки районных котельных, т.к. сезонное изменение тепловой нагрузки для коммунальных потребителей имеет значительный

диапазон (в 5...10 раз) и ее полное покрытие возможно при совместной работе ГТУ и водогрейных котлов. При этом чаще всего используются различные сбросные схемы, обеспечивающие повышение энергетической эффективности системы в целом [5].

Для мини-ТЭЦ промышленных предприятий либо коммунальных потребителей в летний период соотношение тепловой и электрической нагрузок изменяется в относительно узком диапазоне (в 2...3 раза), что предполагает решение задачи согласования суточных графиков нагрузок на основе методики режимной оптимизации, обеспечивающей максимальную энергетическую эффективность системы [6].

Поэтому регулирование соотношения электрической и утилизированной тепловой мощности ГТУ предлагается выполнить изменением рабочих параметров газа ( $p, t$ ) перед турбиной по аналогии с методом “скользящих параметров”, применяемым для регулирования нагрузки паровых турбин. Так как эффективность когенерационных установок принято оценивать по коэффициенту использования топлива  $\eta_{\text{КИТ}}$ , то возможное снижение эффективного к.п.д. ГТУ  $\eta_{\text{эф}}$  компенсируется соответствующим увеличением доли утилизованного тепла и незначительно влияет на этот показатель ( $\eta_{\text{КИТ}}$ ).

Объектом исследования в данном случае являлась когенерационная установка на базе газотурбинного двигателя ГТУ-16У производства НПКГ “Заря”–“Машпроект”.

При этом преследовалась цель определения допустимых пределов соотношения тепловой  $Q_T$  и электрической  $N_{\text{эл}}$  нагрузок ГТУ в переменном режиме как при автономной работе установки, так и при ее синхронизации с энергосистемой.

Регулирование  $Q_T/N_{\text{эл}}$  изменением  $t$  ограничено технологически допустимыми температурами газа перед турбиной от 700 до 1300 °С и осуществляется изменением коэффициента избытка воздуха в камере сгорания. Регулирование  $Q_T/N_{\text{эл}}$  изменением  $p$  от 0,6 до 2,4 МПа может осуществляться изменением скорости вращения компрессора при соответствующей конструкции ГТУ и позволяет менять это соотношение в более широких пределах.

Таким образом, для заданного суточного графика электрической и тепловой нагрузок объекта, характеризующегося определенным коэффициентом заполнения  $K_{\text{зан}}$  и соотношением нагрузок  $Q_T/N_{\text{эл}}$ , необходимо определить оптимальные текущие значения  $p$  и  $t$ , обеспечивающие максимальную энергетическую эффективность ГТУ (минимальный расход топлива).

Решение поставленной задачи выполнено на основе математического моделирования ГТУ с котлом-утилизатором при изменении различных параметров системы и внешних условий.

При автономной работе ГТУ (по электрическому графику нагрузок) математическая формулировка задачи оптимизации представляет собой поиск условного экстремума функции многих переменных (по 24 переменные — соответствующие среднечасовые значения  $p_i, t_i$ ) и с учетом ограничений и граничных условий, налагаемых на систему и оптимизируемые переменные [7], в общем виде может быть записана как

$$\sum_{i=0}^{23} B_i(t_i, p_i) \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} B_0 = f(t_0, p_0); \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ B_{23} = f(t_{23}, p_{23}); \\ Q_i^{\text{потр}} = Q_i^T; \\ N_i^{\text{потр}} = N_i^{\text{ген}}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_{i\min} \leq t_i \leq t_{i\max}; \\ p_{i\min} \leq p_i \leq p_{i\max}; \\ i = 0, 23, \end{cases}$$

где первая составляющая — целевая функция;

вторая — система ограничений (почасовых);

третья — система граничных условий;

$i$  — номер часа суток;

$B_i$  — среднечасовой расход топлива;

$Q_i^{\text{потр}}, N_i^{\text{потр}}$  — соответственно среднечасовая тепловая и электрическая нагрузки потребителя.

В качестве инструмента для решения задачи использовался пакет MS Excel, что позволило компактно запрограммировать методику расчета и выполнить многомерную оптимизацию с учетом ограничений и граничных условий в системе.

Исходные данные для оптимизации режимов нагрузки ГТУ:

— номинальная электрическая мощность когенерационной установки  $N_{\text{ном}} = 16$  МВт;

— тепловая нагрузка потребителя  $Q_T = 16 \dots 24$  МВт.

Результатом оптимизации являются суточные графики электрической нагрузки газотурбинной установки  $N_i^{\text{ген}}$ , утилизованного тепла  $Q_i^T$  (рис. 1), обеспечивающие минимальный расход топлива за сутки  $\sum_{i=0}^{23} B_i$ .

При работе ГТУ по тепловому графику нагрузок (при синхронизации генератора с энергосистемой) имеется возможность продажи части генерируемой электроэнергии в энергосистему, вследствие чего математическая формулировка задачи оптимизации примет вид

$$\sum_{i=0}^{23} C_i(N_i^{\text{ген}}, Q_i^T, t_i, p_i) \rightarrow \min,$$

$$\begin{cases} C_0 = f(N_0^{\text{ген}}, Q_0^T, t_0, p_0); \\ \dots \\ C_{23} = f(N_{23}^{\text{ген}}, Q_{23}^T, t_{23}, p_{23}); \\ Q_i^{\text{потр}} = Q_i^T, \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_{i\min} \leq N_i^{\text{ген}} \leq N_{i\max}; \\ t_{i\min} \leq t_i \leq t_{i\max}; \\ p_{i\min} \leq p_i \leq p_{i\max}; \\ i = 0, 23, \end{cases}$$

где целевая функция определяется выражением

$$\sum_{i=0}^{23} C_i(N_i^{\text{ген}}, Q_i^T, t_i, p_i) = \sum_{i=0}^{23} (N_i^{\text{ген}} C_i^{\text{эл}} - \Delta N_i^{\text{прод}} \Pi_{\text{прод}}^{\text{эл}} + Q_i^T C_i^T),$$

$C_i^{\text{эл}}, C_i^T$  — соответственно среднечасовая себестоимость электроэнергии и тепла когенерационной установки, грн/кВтч;

$\Pi_{\text{прод}}^{\text{эл}}$  — цена на продаваемую электроэнергию, грн/кВтч;

$N_{i\min}, N_{i\max}$  — соответственно минимально и максимально допустимые значения среднечасовых электрических нагрузок.

Результатом оптимизации являются суточные графики электрической нагрузки газотурбинной установки  $N_i^{\text{ген}}$ , утилизированного тепла  $Q_i^T$  и продажи избыточной электроэнергии в систему  $\Delta N_i^{\text{прод}}$  (рис. 1), обеспечивающие минимальные затраты на производство соответствующих видов энергетической продукции за сутки  $\sum_{i=0}^{23} C_i$ .

Результаты оптимизации режимов работы системы когенерации в зависимости от коэффициента заполнения графика электрической нагрузки потребителя (рис. 2), свидетельствуют, что согласование суточных графиков нагрузок при автономной работе ГТУ возможно в узком диапазоне соотношений  $Q_T : N_{\text{эл}}$  — от 1,3:1,0 до 2,1:1,0. При этом коэффициент заполнения графика тепловой нагрузки потребителя  $K_{\text{зап}}$  был принят равным 0,75 (полупиковый режим). При синхронизации генератора ГТУ с энергосистемой (тепловой график нагрузок) диапазон допустимых соотношений  $Q_T : N_{\text{эл}}$  расширяется от 1,3:1,0 до 2,6:1,0 за счет продажи части генерируемой электроэнергии стороннему потребителю.

Поскольку работа системы когенерации по тепловому графику нагрузок предусматривает продажу значительной части генерируемой электроэнергии в энергосистему (рис. 3), то ее экономическая эффективность во многом определяется тарифом на продаваемую электроэнергию, который в рассматриваемом примере принят на уровне  $\Pi_{\text{прод}}^{\text{эл}} = 0,35$  грн/кВтч.

Как видно, доля продаваемой в сеть электроэнергии существенно уменьшается при переходе к базовому графику нагрузки когенерационной установки, что объясняется увеличением доли потребляемой электроэнергии. При таком режиме максимальная тепловая мощность системы увеличивается на 33 % по сравнению с режимом автономной работы и достигает 30 МВт, а утилизированная тепловая мощность в системе за сутки также возрастает на 30 %.

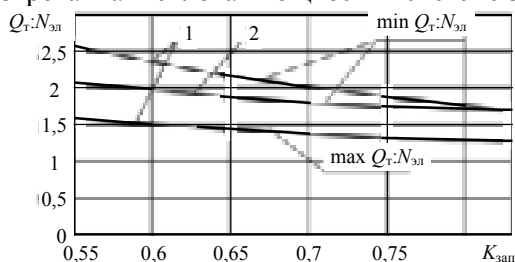


Рис. 2. Допустимые пределы соотношения тепловой (1) и электрической (2) нагрузок ГТУ-16

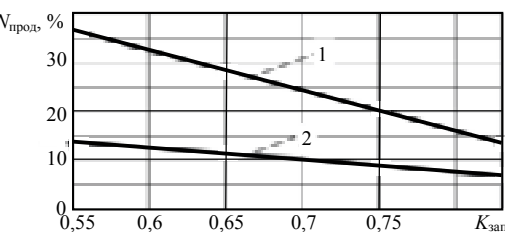


Рис. 3. Доля продаваемой в сеть электроэнергии при работе ГТУ по тепловому графику нагрузок: 1 —  $\max Q_T : N_{\text{эл}}$ ; 2 —  $\min Q_T : N_{\text{эл}}$

Зависимость показателей эффективности когенерационной ГТУ ( $\eta_{\text{эф}}$ ,  $\eta_{\text{КИТ}}$ ) для допустимых соотношений тепловой и электрической нагрузок системы (рис. 4) свидетельствует о значительном снижении эффективного КПД ГТУ  $\eta_{\text{эф}}$  при пиковых режимах электрической нагрузки потребителя ( $K_{\text{зап}} = 0,55$ ), особенно при автономной работе ГТУ. При работе по тепловому графику нагрузок  $\eta_{\text{эф}}$  возрастает на 3...5 %. Значение коэффициента использования теп-

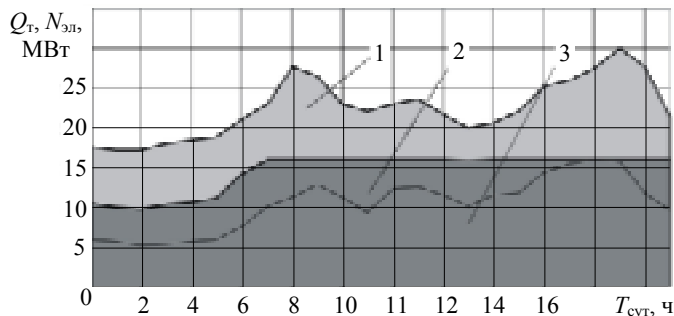


Рис. 1. Суточные графики тепловой (1) и электрической (2,3) нагрузок потребителя при работе по тепловому графику:

2 — продаваемая в сеть нагрузка; 3 — потребляемая нагрузка

лоты топлива  $\eta_{\text{КИТ}}$ , наоборот, изменяется в незначительных пределах (0,72...0,75) и не зависит от режима синхронизации ГТУ с энергосистемой, что подтверждает высокую эффективность использования систем когенерации на основе ГТУ при переменных нагрузках.

Экономическая эффективность оптимизации режимов когенерационной ГТУ оценивалась по относительному значению целевой функции, описываемой как

$$B_{\text{отн}} = \frac{B_{\text{опт}}}{\sum B_{\text{пр}}},$$

где  $B_{\text{опт}}$  — оптимальное значение целевой функции (расхода топлива), кг/сут;

$\sum B_{\text{пр}}$  — суммарный расход топлива на производство соответствующих видов энергетической продукции в системе при раздельной генерации, кг/сут.

Результаты оценки экономической эффективности оптимизации суточных графиков нагрузки когенерационной ГТУ (рис. 5) свидетельствуют, что в целом суммарный расход топлива на производство соответствующих видов энергетической продукции в системе при работе по электрическому графику нагрузок составляет 61...70 % от расхода топлива на производство таких же видов продукции при раздельной генерации. При работе по тепловому графику нагрузок этот показатель лежит в пределах 61...65 %, что свидетельствует о более высокой эффективности этого режима, особенно при пиковом характере нагрузки.

При росте коэффициента заполнения графика электрической нагрузки потребителя  $K_{\text{зап}}$  от 0,55 до 0,83 экономическая эффективность оптимизации графиков нагрузки ГТУ повышается. Это связано с повышением КПД и эксплуатационных показателей системы за счет “выравнивания” суточного графика электрических нагрузок.

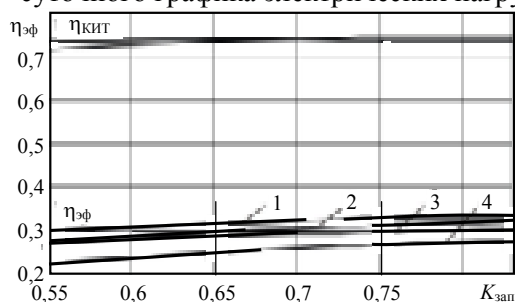


Рис. 4. Зависимость показателей эффективности ГТУ-16 от коэффициента заполнения графика нагрузки потребителя  $K_{\text{зап}}$ : 1 —  $\min Q_{\text{T}} : N_{\text{эл}}$  (тепловой график нагрузок); 2 —  $\min Q_{\text{T}} : N_{\text{эл}}$  (электрический график нагрузок); 3 —  $\max Q_{\text{T}} : N_{\text{эл}}$  (тепловой график нагрузок); 4 —  $\max Q_{\text{T}} : N_{\text{эл}}$  (электрический график нагрузок)

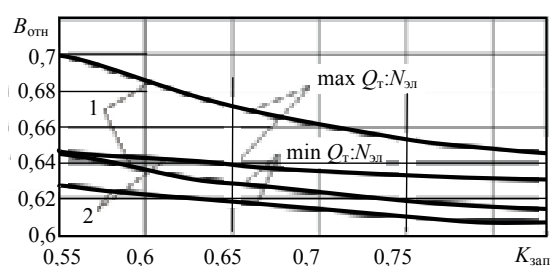


Рис. 5. Эффективность оптимизации режимов нагрузки ГТУ-16 по расходу топлива на производство при сравнении с раздельной генерацией: 1 — электрический график нагрузок; 2 — тепловой график нагрузок

Таким образом, предложена методика согласования графиков электрической и тепловой нагрузки системы энергоснабжения на базе когенерационной газотурбинной установки в переменных режимах.

В результате решения задачи согласования и оптимизации суточных графиков электрической и тепловой нагрузок, обеспечивающих минимальный расход топлива на производство всех видов энергетической продукции, определены допустимые пределы соотношений тепловых и электрических нагрузок в зависимости от коэффициента заполнения графика электрической и тепловой нагрузок потребителя.

Выполнена сравнительная экономическая оценка предложенной системы энергоснабжения и системы с раздельной генерацией, определены параметры, влияющие на экономическую эффективность режимов нагрузок.

Результаты математического моделирования показали, что наиболее эффективным является режим работы когенерационной ГТУ по тепловому графику нагрузок.

### Литература

1. Баласанян, Г.А. Согласование графиков тепловой и электрической нагрузок для систем когенерации малой мощности / Г.А. Баласанян, А.С. Мазуренко // Пром. теплотехника. — 2005. — № 3. — С. 32 — 39.
2. Баласанян, Г.А. Согласование электрических и тепловых нагрузок интегрированных систем энергоснабжения на базе установок когенерации и альтернативных источников тепла/ А.Г. Баласанян // Холодильна техніка і технологія. — Одеса, 2007. — Вип. 2. — С. 43 — 47.
3. Энергетические характеристики когенерационной установки на частичных тепловых нагрузках / [В.Н. Клименко, П.П. Садайчук, Ю.Г. Клименко и др.] // Пром. теплотехника. — 1997. — № 2. — С. 51 — 56.
4. Газотурбинные двигатели для энергетики и газотурбинные электростанции. — Николаев: НПКГ “Заря”-“Машпроект”, 2004. — 20 с.
5. Rohrer A. Comparison of combined heat and power generationplants // ABB Rev. — 1996. — № 3. — P. 24 — 32.
6. Мазуренко, А.С. Эффективность регулирования отпуска теплоты когенерационной газотурбинной установкой / А.С. Мазуренко, Г.А. Баласанян, Е.А. Сычова // Вест. нац. техн. ун-та “ХПИ”. — Харьков, 2005. — Вып. 6. — С. 108 — 112.
7. Реклейтис, Т. Оптимизация в технике / Т. Реклейтис. — М.: Мир, 1985. — Т. 1. — 279 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одесского национального политехнического университета Денисова А.Е.

Поступила в редакцию 8 сентября 2008 г.

---