

УДК 621.311.238:681.513.6

**Д.А. Опарин, Б.В. Кавалеров**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**О МОДЕЛИРОВАНИИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ МАЛОЙ  
И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

Рассматриваются математические модели, используемые для совершенствования систем управления газотурбинными установками электростанций малой и средней мощности. Показано, что при моделировании газотурбинной установки и синхронного генератора полезно использовать одну совместную модель. В эту модель входит как модель газотурбинной установки, так и модель синхронного генератора. Эта модель получается с помощью методов теории идентификации и служит для разработки перспективных алгоритмов управления газотурбинными установками.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, моделирование, идентификация, система управления.

**D.A. Oparin, B.V. KavaleroV**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ABOUT MODEL OPERATION OF GAS-TURBINE  
INSTALLATIONS AT MANAGEMENT OF THE LOW  
AND MEAN POWER OF POWER PLANTS**

The article discusses the mathematical models used for the improvement of gas turbine power plant control system of low and medium levels of power. It is shown that it is more efficient to use a joint model that includes both gas turbine plant and a synchronous generator in the simulation. This model is created with the use of the methods of system identification theory and can be used for the development of advanced gas turbine control algorithms.

**Keywords:** gas turbine plant, computer simulation, identification, control system.

**Введение.** Газотурбинные установки (ГТУ) являются двигателями внутреннего сгорания. Они работают на различном топливе. Авиационные ГТУ используют в качестве топлива керосин, наземные ГТУ чаще всего питаются газом. В наземных газотурбинных установках, как правило, используется базовая часть от авиационных прототипов, например

двигателя ПС-90. Имеются свои плюсы и минусы при установке ГТУ для работы на землю. «Плюсы» – это мобильность, маневренность, высокий КПД, «минусы» – необходимость приспособливать ГТУ и системы автоматического управления (САУ) ГТУ для работы в наземных условиях. ГТУ, используемые в электростанциях, приводят во вращение синхронные генераторы, явнополусные и неявнополусные. Чаще, особенно в электростанциях мощностью выше 8 МВт, используются неявнополусные генераторы, так как у них выше механическая прочность и меньше момент инерции. Соединение между турбокомпрессором и генератором не жесткое, так как генератор крепится не непосредственно к турбокомпрессору, а к свободной турбине, а между свободной турбиной и турбокомпрессором присутствует только газодинамическая связь. Конечно, реально использовать и одновальную схему, когда генератор и турбокомпрессор находятся на одном валу, но этот способ, во-первых, хуже использует вырабатываемую мощность, а, во-вторых, все вибрации и механические рывки с генератора будут передаваться непосредственно на ГТУ. Однако такая схема создает определенные сложности при управлении таким объектом. Возрастают инерционность, колебательность. Кроме того, поскольку ГТУ является сложной системой разнородных элементов, для улучшения управления полезно использовать математическое моделирование ГТУ. Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.832.2014/К.

**Независимое управление.** Наземная ГТУ оборудуется устройством управления, без него она неработоспособна. Устройство управления и ГТУ в совокупности составляют САУ. Не вдаваясь в подробности структуры САУ, отметим, что она во многом наследует структуру САУ авиационной ГТУ. Кроме того, изучение структуры существующих САУ показывает, что микропроцессорные САУ наследуют многие принципы организации гидравлических САУ. Здесь используется система селекторов, выбирающих приоритет замыкающих контуров регулирования на дозирующую иглу.

В настоящее время управление ГТУ и управление синхронным генератором осуществляются независимо (рис. 1). Это оправданно, поскольку так проще рассчитывать и настраивать регуляторы. Однако отсутствие учета взаимовлияния САУ ГТУ и САУ синхронного генератора ухудшает поведение газотурбинной электростанции. Результа-

ты практического использования электростанций показывают, что даже могут возникать автоколебания, приводящие к аварийному останову электростанций [3].

Для расчета САУ используют упрощенные модели ГТУ. Такие модели получают с помощью методов идентификации по экспериментальным данным, полученным на реальном объекте. Иногда используются упрощенные модели, полученные с помощью идентификации по сложной поэлементной модели ГТУ.

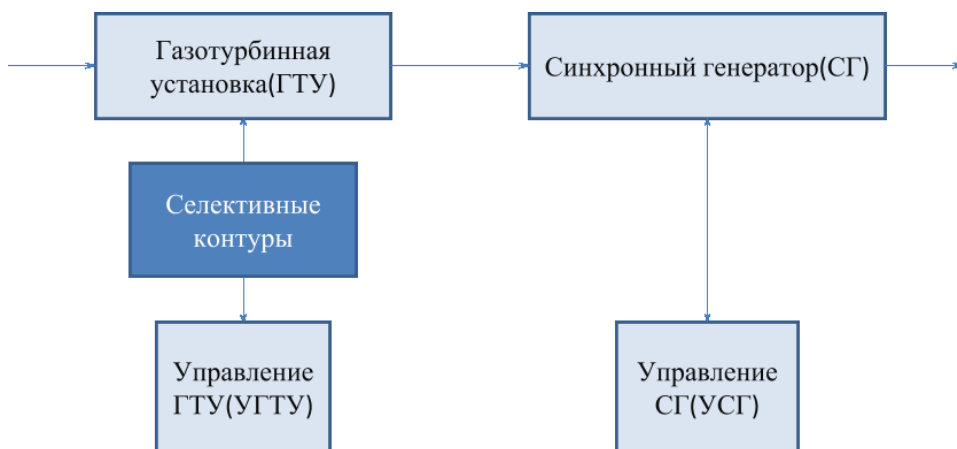


Рис. 1. Независимое управление ГТУ и синхронным генератором

В результате получают упрощенную, как иногда ее называют, – быстрорешаемую модель [1]. Для такой модели выбирается, возможно, более простая структура, состоящая из ряда типовых динамических звеньев и ряда нелинейных зависимостей. Поскольку для ГТУ, используемых в составе электростанций, законом регулирования является поддержание постоянства частоты вращения вала нагрузки, в качестве перспективных моделей следует рассматривать упрощенные модели, учитывающие аккумуляцию энергии во вращающихся массах роторов. Различные факторы, влияющие на протекание процессов в ГТУ, учитываются в виде добавок к основным уравнениям. Входными координатами этих моделей являются расход топлива, частоты вращения роторов, температуры и давления газов в характерных сечениях двигателя. Подобная модель справедлива для приведенных к стандартным атмосферным условиям координат и в основных режимах адекватна объекту с погрешностью 1–3 % [4].

Рассмотрим математическую модель, которая в общепринятых терминах может быть классифицирована как упрощенная идентификационная модель 2-го уровня сложности, учитывающая аккумуляцию энергии только во вращающихся массах роторов.

Динамика роторов рассчитывается по следующим уравнениям:

а) уравнение ротора турбокомпрессора:

$$\dot{n}_{TK} = (n_{TS} - n_{TK}) / T_T; \quad (1)$$

б) уравнение свободной турбины:

$$(3,14 / 30)^2 J_{\Sigma} n_{CT} \dot{n}_{CT} = 1000 (N_E - N_G). \quad (2)$$

В уравнениях приняты обозначения:  $\dot{n}_{TK}$  – производная приведенной частоты вращения ротора, турбокомпрессора по времени;  $n_{CT}$  – частота вращения ротора свободной турбины;  $n_{TS}$  – частота вращения ротора турбокомпрессора, взятая по статической характеристике;  $J_{\Sigma}$  – суммарный приведенный к валу момент инерции свободной турбины момент инерции;  $T_T$  – постоянная времени ротора турбокомпрессора,  $N_E$  – располагаемая мощность свободной турбины;  $N_G$  – потребляемая мощность нагрузки.

Величины  $n_{TS}$ ,  $N_E$  определяются по статическим характеристикам:  $n_{TK} = f(G_T)$  и  $N_E = f(n_{TK})$ , где  $G_T$  – расход топлива.

Статические характеристики ГТУ представляют обычно в виде таблиц. В соответствии с программой управления механизацией компрессора статические характеристики обычно представляют для нескольких состояний механизации. Переход с одной характеристики на другую выполняется в зависимости от частоты вращения тубокомпрессора. В модели (1), (2) присутствует один большой недостаток. Здесь принято, что мощность свободной турбины  $N_E$  и частота вращения турбокомпрессора меняются в одном темпе. На самом деле изменение мощности опережает изменение частоты. Это вызывает, как показывает опыт, наибольшую погрешность в модели (1), (2). Для снижения этой погрешности уравнение (2) переписывают в следующем виде.

Модель свободной турбины:

$$\frac{dn_{CT}}{dt} = \frac{-N_G + (1 + K_1 \frac{dn_{TK}}{dt}) f_1(n_{TK})}{J_{IP} n_{CT} K_{\Gamma}}; \quad (3)$$

где  $K_{\Gamma} = (1/1000)(\pi/30)^2 = \text{const}$  – преобразовательный коэффициент для работы в одной системе единиц;  $f_1(n_{TK})$  – зависимость мощности свободной турбины от оборотов турбокомпрессора;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий, опережающее по времени изменение мощности;  $J_{\text{пр}}$  – приведенный суммарный момент инерции,  $N_G$  – потребляемая мощность нагрузки.

Указанные модели (1), (2), (3) позволяют в быстром темпе произвести расчет поведения ГТУ. Следовательно, они могут найти разнообразное применение, в частности, они потенциально могут использоваться в качестве встроенных моделей для совершенствования САУ ГТУ.

**Совместное управление.** Для исследования совместного управления ГТУ и синхронным генератором к настоящему времени разработан ряд программных продуктов [2, 5]. Здесь моделируются совместно ГТУ и синхронный генератор, причем с помощью полных поэлементных моделей в случае ГТУ и многоэлементных динамических моделей переменной структуры в случае синхронного генератора и электроэнергетической системы [6]. Следовательно, появляется возможность получить с помощью идентификации упрощенные быстрорешаемые модели ГТУ и синхронного генератора как порознь, так и совместную быстрорешаемую модель «ГТУ–синхронный генератор».

Появляется возможность проектировать и настраивать САУ с учетом взаимовлияния ГТУ и синхронного генератора. Кроме того, появляется возможность построения перспективных САУ ГТУ на основе последних достижений теории автоматического управления и последних достижений практики управления наземными ГТУ (рис. 2).

Совместная быстрорешаемая модель ГТУ и синхронного генератора проще всего может быть записана в виде системы линейных дифференциальных уравнений:

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}_1(t), \quad (4)$$

где  $\dot{\mathbf{X}}_1$  – вектор производных переменных модели,  $\mathbf{X}_1$  – вектор переменных модели,  $\mathbf{A}$  – матрица коэффициентов размерностью  $n \times n$ , которую следует идентифицировать. Если наблюдений  $m$  больше, чем  $n$ , применяется метод наименьших квадратов:

$$\mathbf{A} = \dot{\mathbf{X}}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^T (\mathbf{X}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^T)^{-1}, \quad (5)$$

или  $\mathbf{A} = \mathbf{Y}_{\Sigma} \mathbf{X}_{\Sigma}^+$ , где матрица  $\mathbf{X}_{\Sigma}^+$  – псевдообратная матрица, она является наилучшей аппроксимацией по методу наименьших квадратов

соответствующей системы линейных уравнений. Здесь  $X_{\Sigma}$  – матрица наблюдений переменных модели размерностью  $n \times m$  [7].

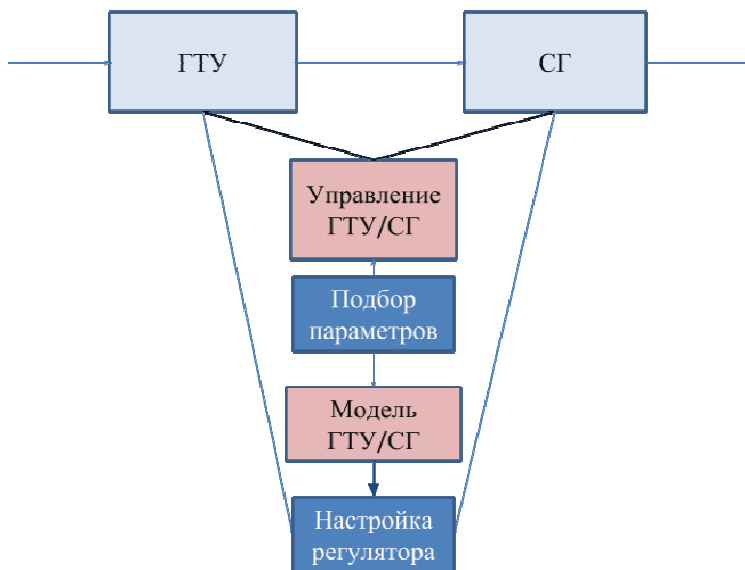


Рис. 2. Структура перспективного связанного управления электростанцией с использованием математического моделирования

В состав вектора  $X_1$ , как правило, входят следующие переменные модели ГТУ:  $G_T$  – расход топлива ГТУ,  $N_E$  – мощность свободной турбины ГТУ,  $N_G$  – мощность нагрузки ГТУ,  $n_1$  – частота вращения турбокомпрессора ГТУ,  $n_2$  – частота вращения свободной турбины ГТУ,  $T_i$  – температура в  $i$ -м сечении ГТУ,  $P_i$  – давление в  $i$ -м сечении ГТУ и следующие переменные модели синхронного генератора:  $U$  – напряжение генератора,  $I$  – действующий ток генератора,  $U_f$  – напряжение возбуждения генератора и др.

Для повышения точности моделирования и расширения области адекватности может быть использована нелинейная модель. Поиск структуры такой нелинейной модели составляет задачу структурной идентификации. Он может быть реализован, например, с помощью генетического алгоритма [8].

**Выводы.** В статье предложено использовать упрощенную модель ГТУ и синхронного генератора для построения перспективных САУ ГТУ наземных электростанций. При построении такой модели используются методы теории идентификации. Наличие такой модели – хорошая возможность совершенствования САУ ГТУ прежде всего в плане

реализации связанного управления и модификации существующих многоселекторных САУ. Кроме того, открываются возможности решения смежных задач: диагностики ГТУ для электростанций, обучения персонала и в ряде других приложений.

В настоящее время работы по созданию совместной модели ГТУ и синхронного генератора, а также ее применению в перспективных САУ ГТУ продолжаются.

### **Библиографический список**

1. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 14–17.

2. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети «КМЭС» / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов, К.А. Один, А.И. Полулях, А.С. Ситников, И.Г. Лисовин, Е.Н. Ширинкина (дата регистрации: 28.02.2011).

3. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7. – № 11.1. – С. 129–132.

4. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр. / В.М. Винокур, Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, М.Л. Сапунков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 299 с.

5. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012660288 РФ. ЭлектроДин // А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, К.А. Один, И.А. Арбузов, Д.В. Щенятский, А.Н. Рязанов (дата регистрации: 14.11.2012).

6. Тарасов В.А., Петроченков А.Б., Кавалеров Б.В. Проблема коммутационных элементов в компьютерном моделировании систем электроснабжения // Электротехника. – 2014. – № 11. – С. 8–10.

7. Кавалеров Б.В., Казанцев В.П. Математическое моделирование электрической системы в задачах испытания и настройки средств управления газотурбинных энергетических установок // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – № 1. – С. 2–8.

8. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014660371 РФ. Генетический идентификатор газотурбинных установок («Генетический идентификатор ГТУ») // Б.В. Кавалеров, К.А. Один, Г.А. Килин (дата регистрации: 07.10.2014).

### References

1. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., KavaleroV B.V., Shigapov A.A. Avtomatizatsiia nastroiKi regulatorov gazoturbinykh mini-elektrostantsii pri komp'iuternykh ispytaniyakh [Automation of setup of regulators of gas-turbine mini-power stations in case of computer tests]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2011, no. 6, pp. 14-17.

2. Petrochenkov A.B., KavaleroV B.V., Shigapov A.A., Odin K.A., Poluliakh A.I., Sitnikov A.S., Lisovin I.G., Shirinkina E.N. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2011611839 RF. Kompleks matematicheskikh modelei elektrogeneratora i elektroseti Kamenskie mezhraionnye elektricheskie seti [Complex of mathematical models of the electric generator and "Kamensk Interdistrict Electrical Networks" power supply network]. 28.02.2011.

3. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., KavaleroV B.V., Shigapov A.A. Issledovanie vzaimovliianiia sistem upravleniia gazoturbinoi ustanovkoi i elektrogeneratorom pri avtomatizirovannoi nastroiKe regulatorov [Research of interference of management systems gas-turbine installation and the electric generator in case of automated setup of regulators]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 11.1, pp. 129-132.

4. Vinokur V.M., KavaleroV B.V., Petrochenkov A.B., Sapunkov M.L. Matematicheskoe modelirovanie gazoturbinykh mini-elektrostantsii i mini-energosisistem [Mathematical simulation of gas-turbine mini-power stations and mini-power supply systems]. *Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet*, 2010. 299 p.

5. Petrochenkov A.B., KavaleroV B.V., Odin K.A., ArbuZov I.A., Shcheniatskii D.V., Riazanov A.N. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM №2012660288 RF. ElektroDin [Certificate on the state registration of the computer program No. 2012660288 of the Russian Federation. ElektroDin]. 14.11.2012.

6. Tarasov V.A., Petrochenkov A.B., KavaleroV B.V. Problema kommutatsionnykh elementov v komp'iuternom modelirovanii sistem



elektrosnabzheniia [Problem of switching elements in computer simulation of systems of electrical power supply]. *Elektrotehnika*, 2014, no. 11, pp. 8-10.

7. KavaleroV B.V., Kazantsev V.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskoi sistemy v zadachakh ispytaniia i nastroiiki sredstv upravleniia gazoturbinnnykh energeticheskikh ustanovok [Mathematical simulation of electrical system in tasks of test and setup of controls of gas-turbine electric power plant]. *Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya*, 2011, no. 1, pp. 2-8.

8. KavaleroV B.V., Odin K.A., Kilin G.A. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2014660371 RF. Geneticheskii identifikator gazoturbinnnykh ustanovok (Geneticheskii identifikator GTU) [Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy No. 2014660371 of the Russian Federation. Genetic identifier of gas-turbine installations (GTU genetic identifier)]. 07.10.2014.

### **Сведения об авторах**

**Опарин Денис Андреевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Dlowarp@gmail.com).

**Кавалеров Борис Владимирович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

### **About the authors**

**Oparin Denis Andreevich** (Perm, Russian Federation) is a Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Dlowarp@gmail.com).

**KavaleroV Boris Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is Doctor of Technical Sciences, Associate Professor the Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено 12.12.2014