



# Система автоматического управления и регулирования корабельного газотурбогенератора ГТГ-100К

*Павел Морозов, Анатолий Скрипниченко, Ирина Иванова, Валерий Лисоконь, Александр Орехов, Владимир Ободан*

Описывается успешный опыт разработки системы автоматического управления и регулирования (САУР) корабельного 100-киловаттного газотурбогенератора ГТГ-100К на базе модулей формата MicroPC. Рассмотрены требования к системе, этапы разработки, пути достижения необходимой надёжности и долговечности, минимизации временных и финансовых затрат. Разработанная в самые жёсткие сроки САУР ГТГ-100К обеспечила выполнение военных требований к качеству изделия и позволила отработать технические решения, общие для любых газовых турбин.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Специальная и военная техника, разработанная и изготавливавшаяся советским военно-промышленным комплексом, создавалась с привлечением обширных научных ресурсов и зачастую опережала время. Благодаря этому многое ранее созданное не потеряло актуальность и по сей день, обеспечивая функциональность, надёжность, долговечность, неприхотливость и простоту в обслуживании — качества, которые всегда будут ценить в вооруженных силах любой страны. В полной мере это утверждение относится к 100-киловаттному газотурбогенератору ГТГ-100К, изготавливаемому инжинирингово-производственным предприятием «Энергия» (г. Кривой Рог) и предназначенному для питания трёхфазной бортовой сети 220 В/400 Гц кораблей на воздушной подушке (рис. 1). Являясь компонентом корабельного электрооборудования, он, в свою очередь, представляет собой сложный комплекс, состоящий из тысяч деталей и узлов, производством которых в свое время занимались заводы, разбросанные по территории СССР от Казахстана до Башкирии, от Ленинграда до Севастополя.

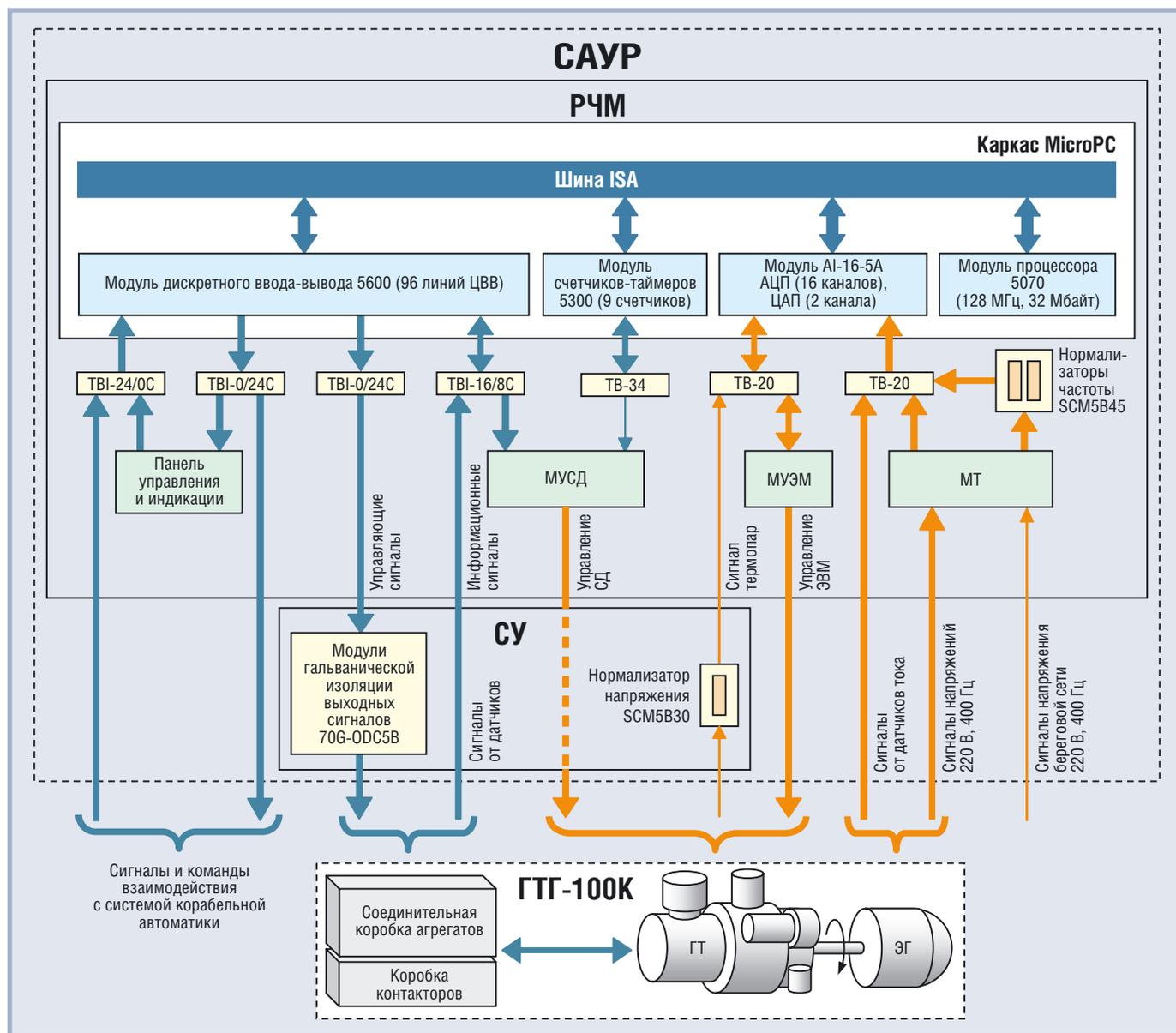
Получив заказ на изготовление партии газотурбогенераторов, ИПП «Энергия» попало в сложное положение — предприятия-поставщики системы автоматического управления и регулирования (САУР) оказались не готовы поставить свою продукцию в требуемые сроки, более того, выяснилось, что некоторые предприятия или остановлены, или вообще ликвидированы, поэтому

разработку САУР нужно было начинать с нуля, и за разработку взялся НИИАЧермет (г. Днепропетровск).

Практика проектирования подобных систем (с учётом специфики применения и повышенных требований к качеству и надёжности) подразумевает длительный этап разработки с последующим многократным повторением цикла макетирование — испытания — до-



Рис. 1. Многоцелевой десантный корабль на воздушной подушке «Мурена»



Условные обозначения:

РЧМ — регулятор частоты и мощности; СУ — станция управления; МУСД — модуль управления серводвигателем; МУЭМ — модуль управления электромагнитом; МТ — модуль трансформаторов; ГТ — газовая турбина; ЭГ — трёхфазный электрогенератор 100 кВт, 220 В/400 Гц).

Рис. 2. Структурная схема микроконтроллерной системы автоматического управления и регулирования (САУР) ГТГ-100К

работки по результатам испытаний, что при аналоговом исполнении электрических схем растягивает процесс проектирования на годы. Учитывая, что времени на доводку техники в рамках договора практически не отводилось, подобный подход нельзя было считать приемлемым. Оптимальным решением в описываемой ситуации стало создание САУР ГТГ-100К на базе программируемых контроллеров, такие свойства которых, как адаптируемость к широкому кругу задач, масштабируемость, простота настройки, надёжность и отказоустойчивость, многократно подтверждены эксплуатацией в самых тяжёлых условиях.

### ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ

Выбор типа оборудования и фирмы-производителя диктовался техническими характеристиками электрооборудования ГТГ, заменить которое была призвана разрабатываемая САУР:

- САУР должна обеспечивать управление режимами работы ГТГ-100К (запуск, останов, холодная прокрутка, ложный пуск, аварийная остановка, контроль работы агрегатов на неработающем двигателе), регулирования частоты и мощности газотурбогенератора, термоконтроль, термоограничение и термозащиту, а также подстройку под параметры конкретного экземпляра ГТГ-100К;

- САУР должна иметь 12 каналов аналогового ввода, 2 канала аналогового вывода, 45 каналов дискретного ввода и 34 канала дискретного вывода;
- САУР должна поддерживать частоту 400 Гц генерируемого тока в пределах  $\pm 0,3\%$  на установившихся режимах, а также обеспечивать возврат в указанные пределы при сбросах и набросах 100% нагрузки не более чем за 3 секунды;
- САУР должна поддерживать параллельную работу двух ГТГ-100К в синхронном режиме с обеспечением равномерного распределения нагрузок (параллельная работа двух САУР);
- разрабатываемая САУР функционально должна заменить собой три ранее применявшихся отдельных блока (станцию управления, регулятор частоты и мощности и усилитель-регулятор температуры отходящих из турбины газов);

- конструктивно САУР должна быть выполнена в виде двух блоков в брызгозащищённом исполнении, размеры блоков и их вес не должны превышать размеры и вес аналогов, расстояние между блоками по кабелю — до 10 м;

- САУР должна обеспечивать взаимодействие с системой корабельной автоматики.

Учитывая условия эксплуатации, САУР должна сохранять работоспособность при следующих условиях:

- вибрационные нагрузки в диапазоне частот до 60 Гц с ускорением 2g;
- ударные нагрузки многократного действия с ускорением 15g;
- температура от  $-10$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  в рабочем состоянии, от  $-50$  до  $+65^{\circ}\text{C}$  в нерабочем состоянии;
- относительная влажность 95-98% при  $+40^{\circ}\text{C}$ , морской туман.

### АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Наиболее полно указанным требованиям отвечают модули производства компаний Octagon Systems и Fastwel в формате MicroPC. Эти изделия характеризуются высокой надёжностью, большим временем наработки на отказ, широким диапазоном рабочих температур, влажностей, вибраций и прочих параметров окружающей среды. Полная совместимость контроллеров формата MicroPC с платформой IBM PC предполагает использование накопленного разработчиками опыта и простоту модификации программного кода, позволяя реализовать самые сложные системы в крайне жёсткие сроки.

Для решения поставленной задачи был выбран модуль центрального процессора 5070, а также модуль дискретного ввода-вывода 5600 (96 дискретных каналов ввода-вывода), модуль счётчиков-таймеров 5300 (9 счётчиков-таймеров) производства Octagon Systems и модуль аналогового ввода-вывода с гальванической развязкой AI 16-5A (16 каналов 14-разрядного аналогового ввода, 2 канала аналогового вывода) производства Fastwel (рис. 2).

Для согласования дискретных сигналов с модулем дискретного ввода-вывода были выбраны платы с гальванической развязкой фирмы Fastwel (ТВИ-24/0С, ТВИ-0/24С, ТВИ-16/8С), а также электронные реле фирмы Grayhill (70G-ODC5B) и твердотельные реле фирмы Omron (G3NA-D210B524DC для коммутации больших токов 3-10 А). Для нормализации вход-



Рис. 3. Модуль управления электромагнитом (МУЭМ): а — внешний вид, б — вид со снятым кожухом и извлечённой электрической платой

ных аналоговых сигналов остановились на модулях Dataforth (нормализатор напряжения SCM5B30 50 мВ/5 В и нормализатор частоты SCM5B45 500 Гц/5 В), устанавливаемых на платах SCMPB03 и SCMPB04 фирмы Dataforth.

Система имеет трёхкратное резервирование по питанию от линий основного питания 27 В, резервного питания 24 В и модуля питания (на рис. 2 не показан), собранного на конверторах фирмы Traco Power AC/DC TRM 40112C (220/12 В, 40 Вт), который включается в работу после запуска ГТГ-100К, вырабатывающего 220 В/400 Гц. На рис. 2 не показаны также конверторы фирмы Traco Power DC/DC TEN 5-2411 (24/5 В, 5 Вт, используются для управления модулями Grayhill), DC/DC TEN 5-2422 (24/±12 В, 6 Вт, используется для включения реле времени пуска ГТГ-100К), а также DC/DC-конвертор фирмы Nemic-Lambda PH50S-24-5 (24/5 В, 50 Вт, используется для питания MicroPC). В модуле управления электромагнитом установлены два конвертора AC/DC TML 15124L (220/24 В, 15 Вт). Конверторы выбирались с запасом по мощности с учётом температурной деградации.

Модули управления электромагнитом (МУЭМ) и серводвигателем (МУСД), решающие специфические задачи управления исполнительными

органами системы, а также два вспомогательных модуля — модуль питания (МП) и модуль трансформаторов (МТ) — были разработаны и изготовлены собственными силами. Внешний вид МУЭМ приведён на рис. 3.

Оборудование САУР расположили в двух навесных корпусах (условно названных блоками РЧМ и СУ), соединённых дискретными и аналоговыми линиями связи и установленных в помещении главного электрического распределительного щита (РЧМ) и помещении газотурбогенератора (СУ). При этом РЧМ содержит все основные элементы системы: микроконтроллер с платами ввода-вывода, модули нормализации сигналов, цепи питания, органы управления и индикации, гальваническую развязку внешних цепей, в том числе и с блоком СУ. С внутренней стороны двери РЧМ находится панель управления и индикации, обеспечивающая настройку контуров регулятора частоты и мощности, а также контроль состояния САУР и ГТГ. СУ в основном содержит коммутирующее оборудование: цепи основного и резервного питания САУР (27 и 24 В постоянного тока) с автоматическим переключением, контрольный разъём, модули гальванической развязки, индикацию режимов питания и аварийных состояний, тумблер перевода ГТГ в особый режим запуска, а также нормализатор напряжения термоэДС термопары.



Рис. 4. САУР ГТГ-100К: а — РЧМ (вверху слева направо модули МУСД, МП, МУЭМ, МТ), б — СУ

По прошествии 4 месяцев от момента начала работ были разработаны и изготовлены нестандартные модули, создан работающий макет САУР (рис. 4).

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Параллельно с разработкой и конструированием электрических схем шла работа по созданию программного обеспечения, которое должно решать четыре независимые группы задач:

- управление режимами работы газотурбогенератора и переходами между ними;
- термоконтроль отходящих газов с целью предотвращения выхода турбины из строя из-за перегрева лопаток;
- поддержание частоты вырабатываемого газотурбогенератором тока в пределах допуска, в том числе при скачкообразных изменениях отбираемой от газотурбогенератора мощности;
- обеспечение равномерного распределения активной мощности между двумя работающими на общую нагрузку генераторами.

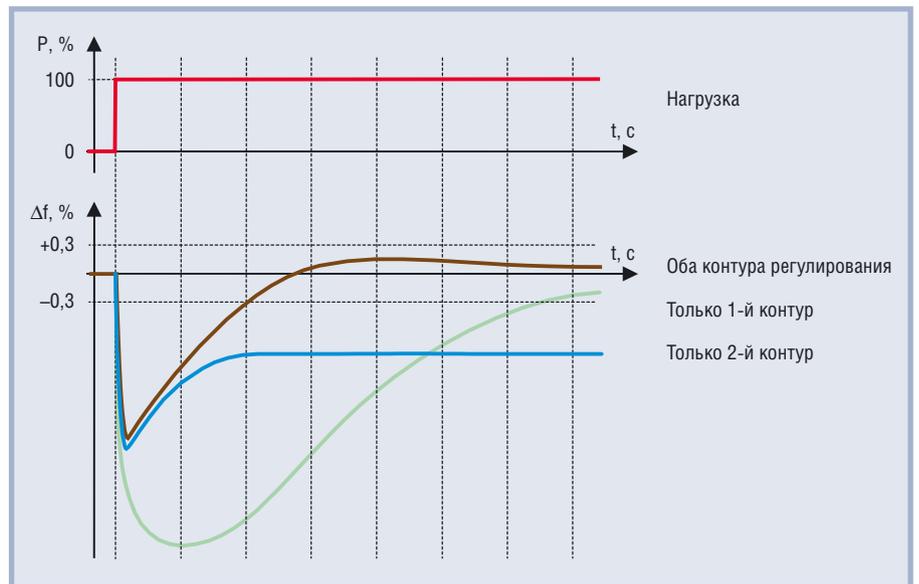
Первая задача представляет собой реализацию автомата состояний с комплексом блокировок и защит. При решении задачи термозащиты и термоограничения большая тепловая инерционность термпар НК-СА компенсировалась прогнозированием температуры по её мгновенному значению и первой производной.

Наиболее сложной и ресурсоёмкой являлась задача регулирования частоты переменного тока, вырабатываемого газотурбогенератором, в функциях отклонения частоты от номинальной и активной мощности, отбираемой от генератора. При этом в системе имеются два контура регулирования час-

тоты: 1) по отклонению частоты от заданной и 2) по возмущению (величина отбираемой от генератора активной мощности). Исполнительным механизмом первого контура является серводвигатель центробежного регулятора скорости, изменяющий усилие сжатия пружины регулятора (канал характеризуется высокой точностью, но имеет малое быстродействие, основное назначение — поддержание частоты в пределах допуска в статических режимах работы ГТГ-100К). Второй контур при помощи пропорционального электромагнитного клапана изменяет подачу топлива в камеру сгорания турбины, обеспечивая минимальное время реагирования на изменения нагрузки. Влияние контуров регулирования на скорость восстановления частоты при набросе 100% отби-

раемой мощности изображено на рис. 5.

Программное обеспечение САУР написано на языке C++ и функционирует под управлением операционной системы ROM-DOS. При написании ПО исходили из того, что алгоритмы функционирования системы могут и должны быть доработаны по результатам макетирования и предварительных испытаний, в ходе которых будут уточнены статические и динамические характеристики ГТГ-100К. Поэтому перечень настраиваемых параметров оказался значительно более широким, чем того требует штатная настройка и эксплуатация газотурбогенератора. Эти настройки были разделены на две группы. В первую группу вошли те параметры, которые допускается настраивать в ходе эксплуатации



Условные обозначения:

P — мощность, % от номинальной; t — время, с; Δf — рассогласование частоты, % от номинальной.

Рис. 5. Зависимость переходного процесса восстановления частоты генератора при набросе 100% мощности от используемых контуров регулирования

ГТГ-100К с помощью панели управления и индикации (их разместили в энергонезависимой памяти микроконтроллера). Учитывая повышенные требования к надёжности, значения настроечных параметров разместили в трёх отдельных областях энергонезависимой памяти, а функции записи в эти области памяти написали таким образом, чтобы сбой записи автоматически обнаруживался и корректная информация всегда восстанавливалась. Вторая группа (значительно большая) содержала параметры, настраиваемые в ходе отладки алгоритмов и кода ПО системы, и была размещена в ini-файлах на флэш-диске MicroPC. По окончании этапа проектирования доступ к второй группе настроек был закрыт.

Такой подход к проектированию ПО системы позволил тонко настроить связку САУР – ГТГ для достижения оптимальной эффективности управления и регулирования, нивелируя изменение динамических параметров турбогенератора, связанное с применением новой топливной аппаратуры.

Высокое быстродействие контроллера 5070 позволило отказаться от специализированных аппаратных решений по измерению активной мощности и определять её расчётным способом, измеряя мгновенные значения токов по двум и напряжений по трём фазам за время, соответствующее одному периоду изменения фазного напряжения, а также определять обрыв фаз. Кроме того, на контроллер были возложены такие задачи, как линеаризация показаний термопары НК-СА и учёт её температурной инерционности при контроле и прогнозировании температуры выходящих газов, а также программное управление скважностью меандра сигнала, используемого для коммутации обмоток управления ползучей скоростью серводвигателя центробежного регулятора скорости, выполняемые в основном цикле программы. Основной цикл при этом выполняется, в зависимости от режима работы ГТГ-100К, от 170 раз в секунду (в режиме работы ГТГ под нагрузкой), до 260 раз в секунду (в режиме ожидания запуска). Объём программного обеспечения САУР составил 19,9 тыс. строк кода на языке C++.

## ИСПЫТАНИЯ

После разработки и изготовления макетного образца был проведён полный комплекс предварительных испы-

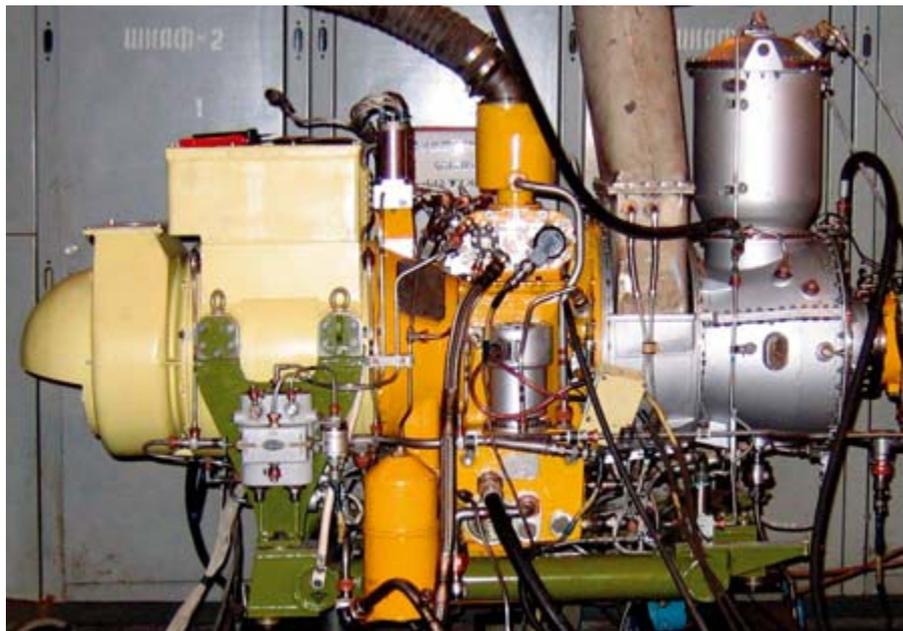


Рис. 6. Газотурбогенератор ГТГ-100К на испытательном стенде

таний, в ходе которых СУ и РЧМ подвергались вибрационным, температурным и прочим воздействиям, — система сохраняла работоспособность при всех оговорённых технических требованиями условиях с запасом. Испытания САУР совместно с газотурбогенератором ГТГ-100К (рис. 6) показали правильность принятых конструктивных, схемных и алгоритмических решений, обеспечивших высокую плотность испытательного процесса и сокративших этап испытаний и доработок до нескольких месяцев. По результатам испытаний макета САУР была доработана и отправлена в производство. Через 8 месяцев после начала работ первая партия САУР на базе MicroPC была поставлена на ИПП «Энергия» для комплектации ГТГ-100К.

В настоящее время партия десантных кораблей «Мурена» (изготовитель — ФГУП «Хабаровский судостроительный завод») была укомплектована ГТГ-100К с новой САУР, корабли, в свою очередь, прошли все испытания и отправлены заказчику.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проделанной в тесном сотрудничестве коллективами НИИА-Чермет и ИПП «Энергия» работы, можно сказать, что применение микропроцессорной техники формата MicroPC позволило:

- создать систему автоматического управления и регулирования таким сложным агрегатом, как газотурбогенератор, с нуля в крайне жёсткие сроки;

- заложить требуемую надёжность и долговечность системы при эксплуатации в неблагоприятных эксплуатационных и климатических условиях;
- решить проблемы адаптации системы к реальным параметрам оборудования;
- упростить схемные решения и аппаратную реализацию отдельных функциональных блоков за счёт высокой производительности контроллера, который обеспечивает расчёт сложных контролируемых величин и управляющих воздействий.

Разработанная система автоматического управления и регулирования газотурбогенератором ГТГ-100К позволила отработать ряд технических решений, общих для любых газовых турбин, и с переделками может быть использована для управления практически любым аналогичным оборудованием (газотурбогенераторами различной мощности, вакуумно-компрессорными установками, детандерами, компрессорами и т.п.).

*Выражаем искреннюю благодарность специалистам фирмы RTS-Ukraine (г. Днепрпетровск). Их консультации сократили время работы на подготовительных этапах проекта и позволили избежать многих ошибок. ●*

**Авторы – сотрудники АОЗТ «НИИАЧермет», телефоны: (+38056) 744-8191, 744-7381, факс: (+38056) 744-7382, и ОАО ИПП «Энергия», телефон: (+380564) 27-3451**