

Список литературы

1. Халиулин В.И. Технологические схемы изготовления многослойных конструкций.- Казань: КГТУ им. Туполева (КАИ), 1999 г. 149 стр.
2. Стационарные газотурбинные установки. Справочник. Под ред. Л.В. Арсеньев и др. Л.: Машиностроение, 1989 г. 420 стр.
3. Авиационные ГДТ в наземных установках. Под ред. В.В. Шашкина. Л.: Машиностроение 1984 г. 79 стр.

СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОТУРБИНЫХ ПРИВОДНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Кесель Б.А.

ОАО КПП «Авиамотор», г. Казань

1. Необходимость системного подхода к проектированию ГТУ

В настоящее время на отечественном рынке приводных газотурбинных установок для электростанций и газоперекачивающих агрегатов предложения разработчиков и производителей ГТУ превышают гарантированно оплачиваемый спрос со стороны заказчиков. Сложившаяся конъюнктура рынка обуславливает достаточно острую конкуренцию между разработчиками и производителями ГТУ.

В свою очередь, конкуренция диктует необходимость поиска и развития новых потребительских свойств продукции данного типа, удовлетворяющих требованиям заказчиков и соответствующих современному мировому техническому уровню.

Анализ технического уровня современных приводных ГТУ показал, что наиболее интенсивно происходит развитие газотурбинных двигателей, входящих в состав ГТУ. Развитие двигателей идет по линии повышения КПД, а следовательно экономичности. Кроме того, улучшается диагностика двигателей, совершенствуются системы их управления и контроля. Одновременно, анализ систем, обеспечивающих работу двигателей в составе ГТУ: очистки и подготовки циклового воздуха, шумоглушения, топлива и маслообеспечения, отопления и вентиляции, утилизации тепла выхлопных газов, управления и контроля, показал глубоко дифференцированный характер их технического уровня. Данное обстоятельство приводит к значительному снижению эффективности использования ГТУ, как технических систем. Причины такого состояния вспомогательных систем ГТУ заключается в том, что при создании установок технические средства, используемые для формирования систем ГТУ, подбираются методом агрегатирования. При этом реализуется подход частного проектирования. При частном

проектировании основное внимание уделяется совмещению технических требований, содержащихся в технических заданиях, с техническими характеристиками того или иного технического средства, используемого для формирования конкретной системы ГТУ или комплекса систем. При реализации подхода частного проектирования происходит рассеяние таких понятий, как адаптивность технической системы, её эффективность, системная надежность и, как следствие, используется продукция с невысоким техническим уровнем с быстрым моральным старением.

С учетом изложенного, при проектировании таких сложных технических объектов, как приводные ГТУ, необходим системный подход, который позволит в значительной мере устранить недостатки частного проектирования.

2. Направления реализации системного подхода при проектировании приводных ГТУ

Согласно [1], приводные ГТУ относятся к автоматизированным мегакомплексам. Мегакомплекс - совокупность технических средств, взаимодействующих между собой как нечто единое. Автоматизированный мегакомплекс характеризуется большой технико-экономической надежностью.

С точки зрения системного подхода, основным свойством, которым должна обладать спроектированная ГТУ, должна быть адекватность.

Адекватность – долговечность технического средства в условиях эффективности и надежности его действия [1].

Обеспечение адекватности конструкции ГТУ подразумевает четыре группы задач, решение которых формирует комплекс критериев адекватности.

Схема задач по формированию комплекса критериев адекватности представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема задач по формированию критериев адекватности

Понятие адекватности включает в себя две группы критериев: критерии социально-технической адекватности и критерии технической адекватности. По критериям социально-технической адекватности производится оценка отношений: техносфера – общество и техносфера – биосфера. Критерии технической адекватности определяет уро-

вень отношений в технической сфере.

Критерий технической адекватности охватывает следующий круг задач:

- эффективность функционирования, определяемую критериями функционирования;
- условия функционирования, установленные в процессе проектирования, предшествующем процессу конструирования;
- долговечность изделия в процессе эксплуатации, установленную в процессе проектирования;
- надежность действия технического средства.

По отношению к критерию социально-технической адекватности критерий технической адекватности может быть определен как следствие. Это означает, что обоснование технической целесообразности создания ГТУ определенного уровня мощности и конструктивной направленности определяют по критериям социально-технической адекватности, а конкретный конструктивный облик (схему) - по критерию технической адекватности).

Эффективность действия (функционирования) полностью определяется обоснованием технической целесообразности разработки приводной ГТУ. Эффективность действия оценивается основными параметрами создаваемого объекта. Для приводных ГТУ это электрическая мощность, тепловая мощность – главные параметры, определяющие производительность ГТУ. В то же время эти параметры не могут полностью охарактеризовать эффективность действия без параметра топливной эффективности. Параметр топливной эффективности позволяет оценить удельные затраты топлива на выработку единицы полезной (электрической и топливной мощности). Кроме указанных параметров существенную роль при оценке эффективности действия играет характеристика времени – рабочий период эксплуатации.

Условия функционирования приводной ГТУ определяется группой параметров, определяющих взаимодействие установок с окружающей средой, режимами электрической и тепловой нагрузок, показателями топлива, масла, воды. Кроме того, условия функционирования в значительной мере обуславливают показатели конструктивной организации самой ГТУ: гидравлические потери по тракту всасывания и выхлопа, уровень тепловыделений приводного двигателя и т.п.

Следует отметить, что условия функционирования оказывают влияние не только на вышеперечисленные процессы по отдельности, но и их всевозможные сочетания.

Долговечность материального комплекса, составляющего приводную ГТУ определяется в первую очередь прочностными характеристиками материалов, применяемых в конструкции всех систем, элементов и агрегатов, входящих в её состав. Кроме того, долговечность содержит в себе

временной показатель, который показывает длительность сохранения материалами служебных характеристик, обеспечивающих работоспособность приводной ГТУ в течении её жизненного цикла.

Надежность эффективности действия с точки зрения технической адекватности определяется известными характеристиками [2]: вероятностью безотказной работы, средней наработкой на отказ, интенсивностью отказов и рядом других. С точки зрения социально-технической адекватности, задача надежности эффективности действия определяется следующими факторами:

- технической надежностью мегакомплекса и всех составляющих его средств и систем;
- надежностью (гарантии) отсутствия вредного воздействия на окружающую среду (включая человека);
- надежностью эффективного действия системы управления (оператора);
- надежностью эффективного удовлетворения потребности в электроэнергии и топливной энергии, что во многом зависит от вероятных отношений между потребителями производимой энергии и мегакомплексом её производящим;

надежностью отсутствия вредного воздействия окружающей среды и обстановки на действующий мегакомплекс.

3. Количественная оценка эффективности действия приводных ГТУ для электростанций с учетом использования системного подхода

Количественной мерой эффективности промышленной системы, в данном случае приводной ГТУ для электростанции, является произведение производительности системы на продолжительность рабочего периода эксплуатации системы [2].

$$Q = q_i \times t_p, \quad (1)$$

где q_i – производительность промышленной системы;

t_p – рабочий период эксплуатации.

Эффективность Q в выражении (1) можно считать теоретической, которая на практике не будет никогда достигнута.

Причины этого явления заключаются в том, что входящие в выражение (1) величины q_i и t_p не являются постоянными. Величина производительности q_i является убывающей функцией от наработки изделия вследствие накопления в изделии повреждаемости, связанной с действием износа. Величина t_p также не является постоянной величиной и её поведение обусловлено величинами установленных ресурсов агрегатов и изделий, входящих в состав ГТУ.

В практических расчетах [2] величину t_p рассчитывают по выражению (2)

$$t_p = t_r \left(1 - \frac{\sum_1^p t_{\Pi}}{t_k} - \frac{\sum_1^c t_T}{t_r} - \frac{t_B}{t_k} - \frac{t_{opr}}{t_k} \right), \quad (2)$$

где t_k – продолжительность принятого календарного срока эксплуатации; t_{Π} – продолжительность i^{10} планового ремонта; p – число плановых ремонтов; t_T – продолжительность j^{10} технического обслуживания; c – число технических обслуживаний; t_B – продолжительность неплановых ремонтов; t_{opr} – продолжительность организационных простоев.

В выражении (2) та часть уравнения, которая заключена в круглые скобки, носит название показателя эффективного использования промышленной системы и обозначается – $K_{э.и.}$

Тогда выражение (1) может быть записано в виде

$$Q = q_i t_k \cdot K_{э.и.} \quad (3)$$

Количественная оценка условий функционирования является одной из самых сложных и объемных задач, решаемых в процессе системного проектирования. Это обусловлено тем, что приводные ГТУ работают в различных климатических условиях, с часто меняющимися режимами электрической и тепловой нагрузок и рядом других специфических требований к условиям функционирования.

С точки зрения системного проектирования, приводная ГТУ взаимодействует с окружающей средой по нескольким каналам связи, которые принято делить на две группы [3].

В первую группу входят следующие виды воздействий:

A_T – функционально обусловленные входные воздействия;

A_B – вынужденные выходные воздействия.

Во вторую группу входят потоки воздействий, которые передаются от приводной ГТУ потребителю и окружающей среде:

C_T – функционально обусловленные выходные воздействия;

C_B – вынужденные выходные воздействия.

Схема взаимодействия приводной ГТУ с окружающей средой представлена на рис. 2.

Виды воздействий, входящих в группы A_T , A_B , C_T обуславливают процессы накопления повреждений в системах и элементах конструкций приводных ГТУ. Воздействия группы C_B оказывают отрицательное влияние на окружающую среду. Таким образом, условия функционирования приводной ГТУ в процессе её эксплуатации снижают её адекватность. Для обеспечения необходимых сроков службы приводные ГТУ оснащаются специальными системами и устройствами, снижающими последствия отрицательных воздействий групп A_T , A_B и C_T и так же воздействий C_B на окружающую среду со стороны ГТУ. С точки зрения системного подхода

указанные элементы можно считать обладающими демпфирующим действием, т.е. специальные системы, демпфируют отрицательные воздействия, но частично.

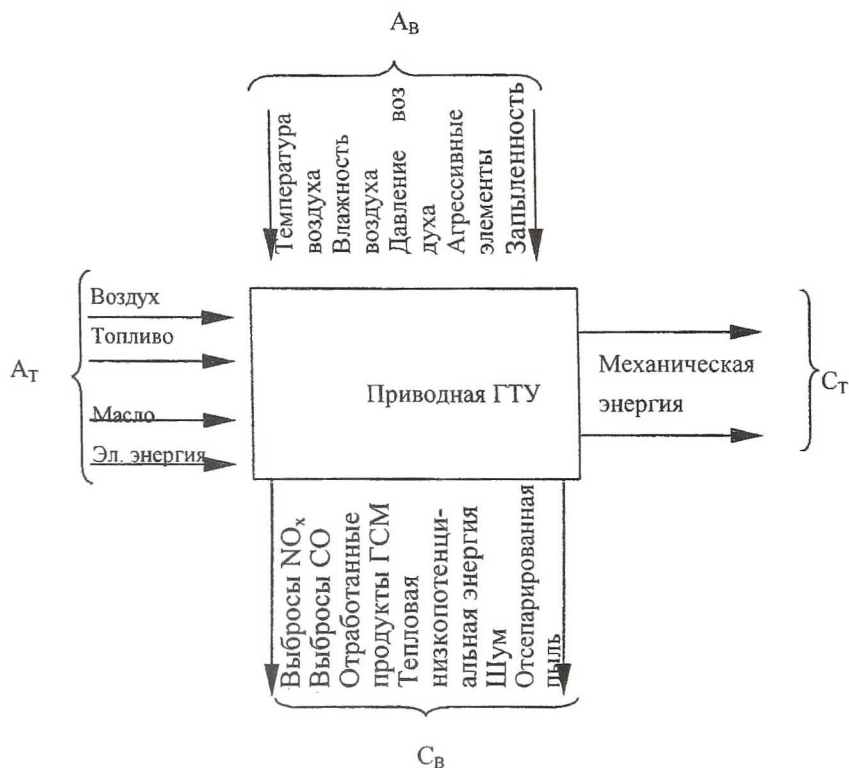


Рис. 2. Схема взаимодействия приводной ГТУ с окружающей средой (условия функционирования)

Анализ режимов работы приводных ГТУ, особенно в качестве приводов электрогенераторов, показал значительную цикличность. Цикличность работы приводных ГТУ обусловлена значительными изменениями потребления электрической энергии в течении суток. Типичный суточный цикл потребления электроэнергии на машиностроительном заводе [4] приведен на рис. 3.

Приведенный на рис. 3 суточный цикл электропотребления требует соответствующего изменения режимов работы ГТУ. Условия функционирования ГТУ будут также меняться пропорционально изменению режимов

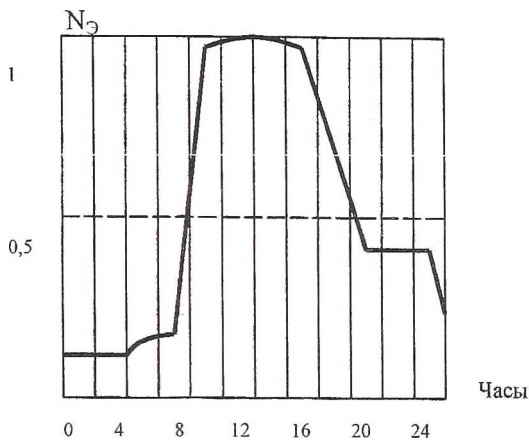


Рис.3. Изменение суточного потребления электроэнергии в условиях машиностроительного завода [4]

работы и характер их изменения будет подобен характеру изменения режимов энергопотребления.

Характерная цикличность работы приводной ГТУ и наличие в её составе систем и устройств, демпфирующих вредные воздействия условий функционирования позволяют представить приводную ГТУ в виде линейного осциллятора с одной степенью свободы и обладающего демпфирующим действием.

Такой подход позволяет количественно оценить условия функционирования на начальных этапах проектирования ГТУ при реализации системного подхода.

Согласно [5] для линейного осциллятора, моделирующего приводную ГТУ, может быть записано выражение определения производительности ГТУ в режиме циклического функционирования.

$$q_i = q_0 + C \cdot e^{-D\tau} \cos(\sqrt{1 - D^2}\tau - \varphi), \quad (4)$$

где q_i – производительность ГТУ при наработке τ ;

q_0 – производительность ГТУ при $\tau = 0$ (номинальная);

D – коэффициент демпфирования воздействий;

e – основание натурального логарифма;

τ – текущее время (наработка);

$$C = \frac{q_0}{\sqrt{1 - D^2}} \text{ - поправочный коэффициент,} \quad (5)$$

$$\varphi \text{ - фазовый угол,} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}}. \quad (6)$$

В свою очередь коэффициент демпфирования $D < 1$ и в первом при-

ближении может быть представлен в виде произведения $D = \bar{K}_{Ai} \cdot \bar{K}_{Ae} \cdot \bar{K}_{Cm}$, а

\bar{K}_{Ai} , \bar{K}_{Ae} , \bar{K}_{Cm} - усредненные коэффициенты условий функционирования, которые определяются отношениями вероятности получения повреждений в конкретных системах к вероятностям безотказной работы каждой из функционирующих систем.

Соответственно с учетом условий функционирования эффективность промышленной системы может быть записана в следующем виде:

$$Q = \left(\sum_{i=1}^N qi \right) \cdot \frac{t_k}{24} \cdot K_{эи}, \quad (7)$$

где q_i определяется по выражению (4)

Входящая в комплекс критерия адекватности долговечность материального комплекса – приводной ГТУ обычно определяется самым нагруженным элементом, входящим в состав указанного комплекса.

Чаще всего этим элементом являются лопатки турбины газогенератора, входящего в состав ГТУ, как элемент, подверженный самым высоким температурным и механическим нагрузкам.

Согласно [2] оценка долговечности турбинных деталей может быть выполнена по уравнению:

$$\theta = \lg t = \frac{A_1 - \frac{1}{K_c} [A_2 \sigma_a + A_2 \sigma_{cT} + A_4 \sigma_T - (A_5 \sigma_{cT}^2 + A_6 \sigma_T^2)]}{B_1 + \frac{1}{K_c} [(B_2 \sigma_{cT} + B_3 \cdot \sigma_T^2) - (B_4 \sigma^2 + B_5 \sigma_T)]}, \quad (8)$$

где t - средняя долговечность турбинной лопатки;

K_c - коэффициент, учитывающий влияние среды на долговечность лопатки;

A_i , B_i - опытные коэффициенты, определяемые по результатам опытных испытаний образцов материала лопатки;

$\sigma_a, \sigma_{cT}, \sigma_T$ - нормированные характеристики прочности материала.

Таким образом, выражение (8) позволяет определить предварительную долговечность материального комплекса по наиболее нагруженному элементу.

Надежность эффективности действия согласно [1] определяется по упрощенной модели. Элементами модели являются:

P_1 - техническая надежность приводной ГТУ по результатам испы-

таний опытного образца;

P_z – надежность (гарантия) отсутствия вредного воздействия окружения на техническое средство, т.е. надежность действия технического средства в функциональных условиях окружения;

P_o – надежность эффективных действий оператора;

P_p – надежность эффективного удовлетворения потребности (бесперебойного снабжения тепловой и электрической энергией);

P_b – надежность (гарантия) отсутствия вредного воздействия технического средства на окружение.

Соответственно, надежность эффективности действия есть произведение

$$P = P_t \cdot P_z \cdot P_o \cdot P_p \cdot P_b \quad (9)$$

Если, в качестве примера принять, что приводная ГТУ создана с показателями

$$P_t = 0,9; P_z = 0,9; P_o = 0,9; P_p = 0,9; P_b = 0,9, \text{ то } P = 0,59$$

Таким образом, при системном проектировании приводных ГТУ определяющим является критерий адекватности, посредством которого можно определить эффективность проектируемого технического средства с учетом производительности, условий функционирования и определенной долговечности, а также оценить надежности эффективности действия.

Список литературы

1. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход.- М.: Мир, 1981. – 454 с.
2. Изотов С.П., Шашкин В.В, Капралов В.М. и др. Авиационные ГТД в наземных установках.- Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1984 – 228 с.
3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества.- М.: Машиностроение, 1988 – 361 с.
4. Особов В., Особов И. К выбору принципиальных схем ГТУ, оптимальных для теплофикации.- Газотурбинные технологии, 9-10. 2000 г., с 20-23.
5. Магнус К. Колебания.- М.: Мир, 1982-303с.