

УДК: 621.431.75: 681.5.09

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГТД В САУ

© 2012 М. С. Гайдай, А. В. Добродеев, Н. А. Мухаммедов, В. В. Червонюк

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Рассмотрены причины, ограничивающие применимость адаптивного управления САУ с использованием математических моделей ГТД. Предложен способ корректировки модели в эксплуатации, связанной с изменением характеристик двигателей в процессе ресурсной наработки.

САУ, БММД, деградация, адаптивное управление, компенсация отказов.

Введение

Хорошо известно, что развитие газотурбинных двигателей заключается не только в совершенствовании конструкции, внедрении новых технологий производства, но и в совершенствовании существующих и соз-

дании новых принципов управления.

В настоящее время, в связи с развитием электронно-информационных технологий, всё шире используются методы математического моделирования. Области их применения представлены на рис. 1.

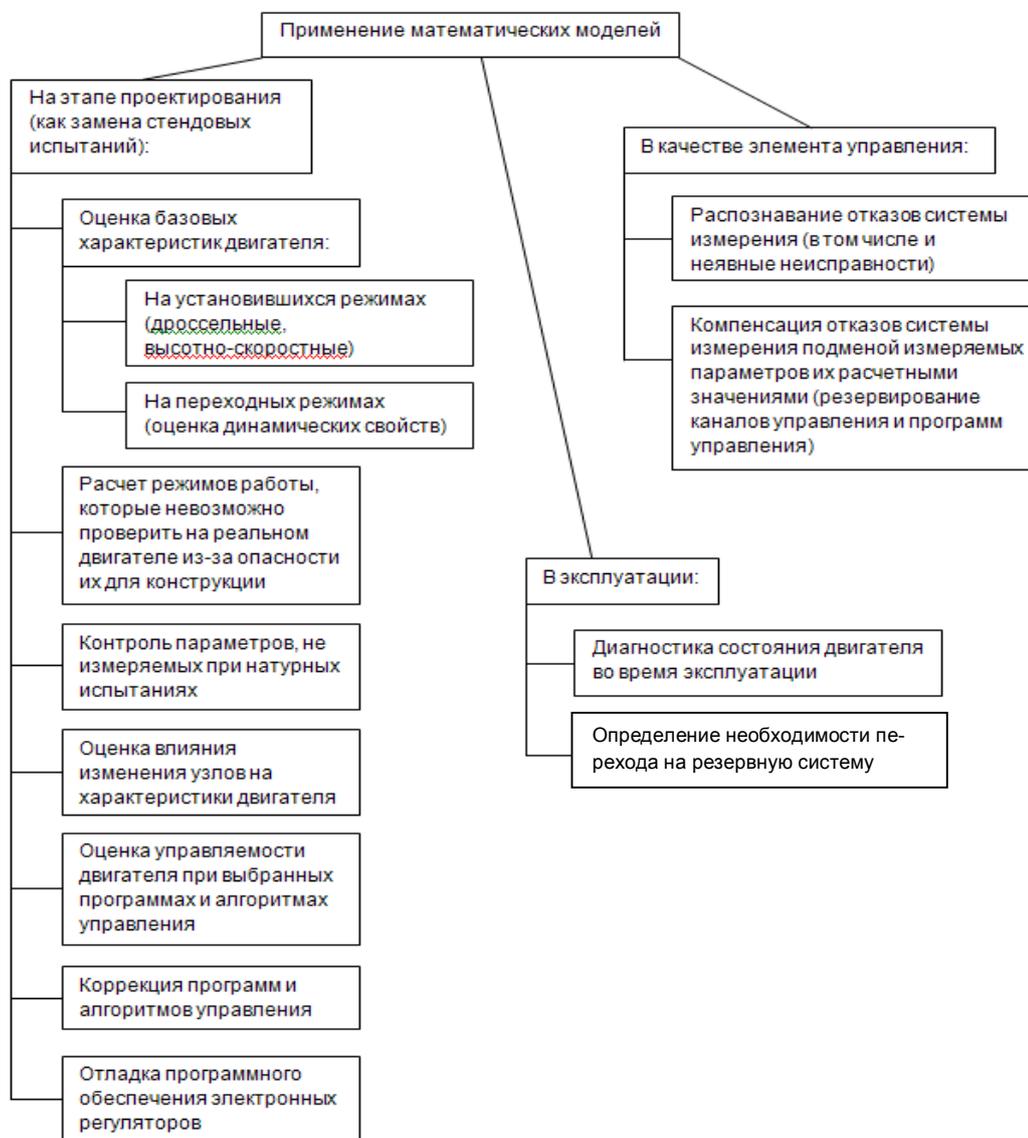


Рис. 1. Основные этапы обеспечения применения математического моделирования

Несомненно, применение математического моделирования на этапе проектирования значительно сокращает время разработки и доводки, снижает затраты, риски проектирования и позволяет более глубоко анализировать процессы, происходящие в двигателе.

Однако не менее широкие возможности открываются при внедрении математического моделирования в систему управления. В настоящее время в качестве перспективных методов управления рассматриваются [1]:

- адаптивное управление (изменение управления при изменении условий эксплуатации, состояния элементов конструкции и целей полёта);

- компенсация отказов системы измерения и повреждений агрегатов двигателя.

Для осуществления перехода к данным методам управления необходима интеллектуализация алгоритмов управления, достижимая применением бортовой математической модели двигателя (БММД).

Основным препятствием к широкому применению БММД является деградация как двигателя (то есть рассогласование изначально заложенных параметров двигателя и реальных параметров, изменяющихся в процессе эксплуатации), так и его системы измерения.

Деградация системы измерения

Деградация системы измерения ГТД может проявляться как:

- отказ датчиков измерения параметров ГТД, приводящий к переходу на резервные программы управления и ограничители либо к переходу на гидромеханическую (дублирующую) систему управления;

- неправильные показания датчиков. При этом, если показания датчика находятся в области эксплуатационных (возможных) значений, то объект (двигатель) будет считаться неисправным при фактически исправном состоянии.

Деградация двигателя

В процессе длительной эксплуатации под действием повреждающих факторов изменяются газодинамические, прочностные, виброакустические характеристики, что отражается на способности ГТД выполнять заданные функции [2] (т.е. сохранять работоспособное состояние [4]).

Различные причины и механизмы возникновения деградации турбореактивных двигателей исследовались Зэйтой А. В. [4], Курцем Р. и Бруном К. [5]. В течение эксплуатации двигатель подвергается как переменным нагрузкам, так и влиянию окружающей среды, которые вызывают эрозионный износ, коррозию, изменение геометрии (овализацию, изгибы, нарушения соосности и т.д.) его узлов. Выделяют следующие основные причины деградации двигателя:

- загрязнение, вызываемое налипанием частиц на элементы конструкции и обтекаемые поверхности;

- окисление металлов кислородом из газа в проточной части, которое интенсифицируется под воздействием высоких температур рабочего процесса;

- эрозионный износ – абразивное удаление частиц металла с обтекаемых поверхностей при соударении с твёрдыми частицами (обычно больше 20 мкм);

- повреждение посторонними объектами, попадающими в проточную часть двигателя (мелкие камни с ВПП, птицы);

- истирание контактных поверхностей между роторными и статорными частями, вызывающее увеличение зазоров, а соответственно и утечек рабочего тела.

Рассмотрим влияние различных факторов на основные эксплуатационные параметры двигателя, такие как тяга, топливная эффективность, ресурс.

Попадание песка/пыли

При эксплуатации авиационных двигателей в пустынных районах велика вероятность засасывания песка с взлётно-посадочной полосы. Этому влиянию подвергаются также ГТД, используемые как СУ танков, несмотря на применение различных типов фильтрующих устройств.

Посторонние частицы могут оказывать двойственное влияние:

- мелкие частицы пыли налипают на поверхности, образуя проточную часть, что приводит к увеличению гидравлических потерь, снижению КПД узлов, уменьшению тяги и ухудшению топливной эффективности. Либо при условии поддержания постоянной тяги – к увеличению расхода топлива, а значит повышению температуры газа в

турбине, что негативно сказывается на ресурсе турбинных лопаток;

- крупные частицы (песок) вызывают эрозионный износ лопаток компрессора, что негативно сказывается на их ресурсе. При этом для обеспечения заданной тяги, анало-

гично попаданию пыли, повышается расход топлива, температура газов в турбине – уменьшается ресурс турбинных лопаток.

Характер изменения параметров в зависимости от массы песка, прошедшего через двигатель, приведён на рис. 2.

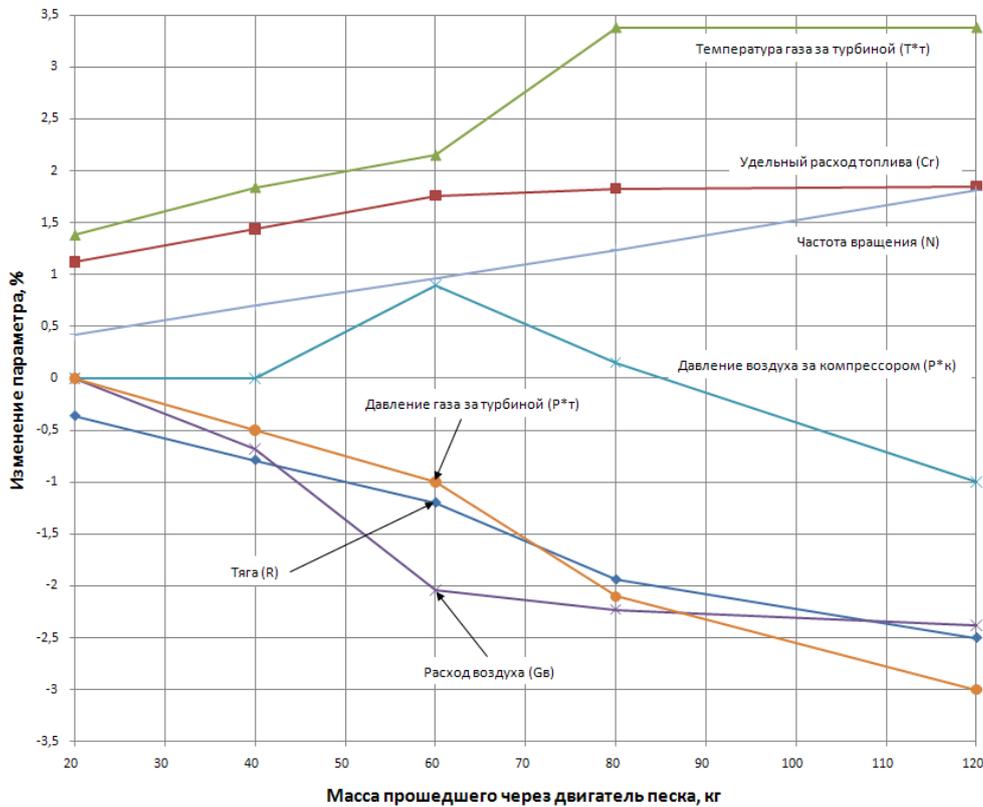


Рис. 2. Изменение параметров двигателя в зависимости от массы прошедшего через него песка

Попадание воды

При эксплуатации ГТД в морских условиях высока вероятность попадания воды в проточную часть двигателя. При впрыске воды на вход компрессора за счёт её интенсивного испарения в тракте происходит снижение температуры воздуха. Как показывают исследования, искусственный впрыск воды является эффективным средством форсирования мощности и одновременного повышения запасов газодинамической устойчивости. Известны системы, использующие подобный эффект [6].

Негативное влияние на параметры и элементы конструкции двигателя оказывает соль, содержащаяся в морской воде.

Засоление проточной части

Отложение солей на элементах проточной части ГТД (накипь) оказывает значительное негативное влияние на параметры

двигателя.

Изменения термогазодинамических характеристик ГТД особенно опасны в компрессоре, так как могут привести к значительному изменению границы его газодинамической устойчивости (уменьшению запаса устойчивости компрессора, а в крайних случаях к помпажу) [7].

Отложения соли могут наблюдаться и в проточной части турбины. Засоление внутренних каналов охлаждаемых турбин ведёт к уменьшению сечения охлаждающих каналов или к полному их закупориванию, что, в конечном итоге, приводит к перегреву материала лопаток, снижению его прочностных свойств, надёжности и ресурса.

ГТД, оснащенные теплообменниками, имеют аналогичные проблемы. В частности, закупорка каналов теплообменника может привести к ухудшению охлаждения турбин-

ных лопаток. Кроме того, мелкие кристаллы соли могут попасть и в подшипниковые опоры двигателя и существенно снизить их надёжность и ресурс.

Влияние наработки

Загрязнение проточной части, окисление элементов конструкции и увеличение

зазоров из-за истирания контактных поверхностей между ротором и статором характерно для любых типов ГТД. Влияние этих факторов становится всё более заметным с увеличением наработки двигателя. Изменение параметров при длительных испытаниях приведено на рис. 3.

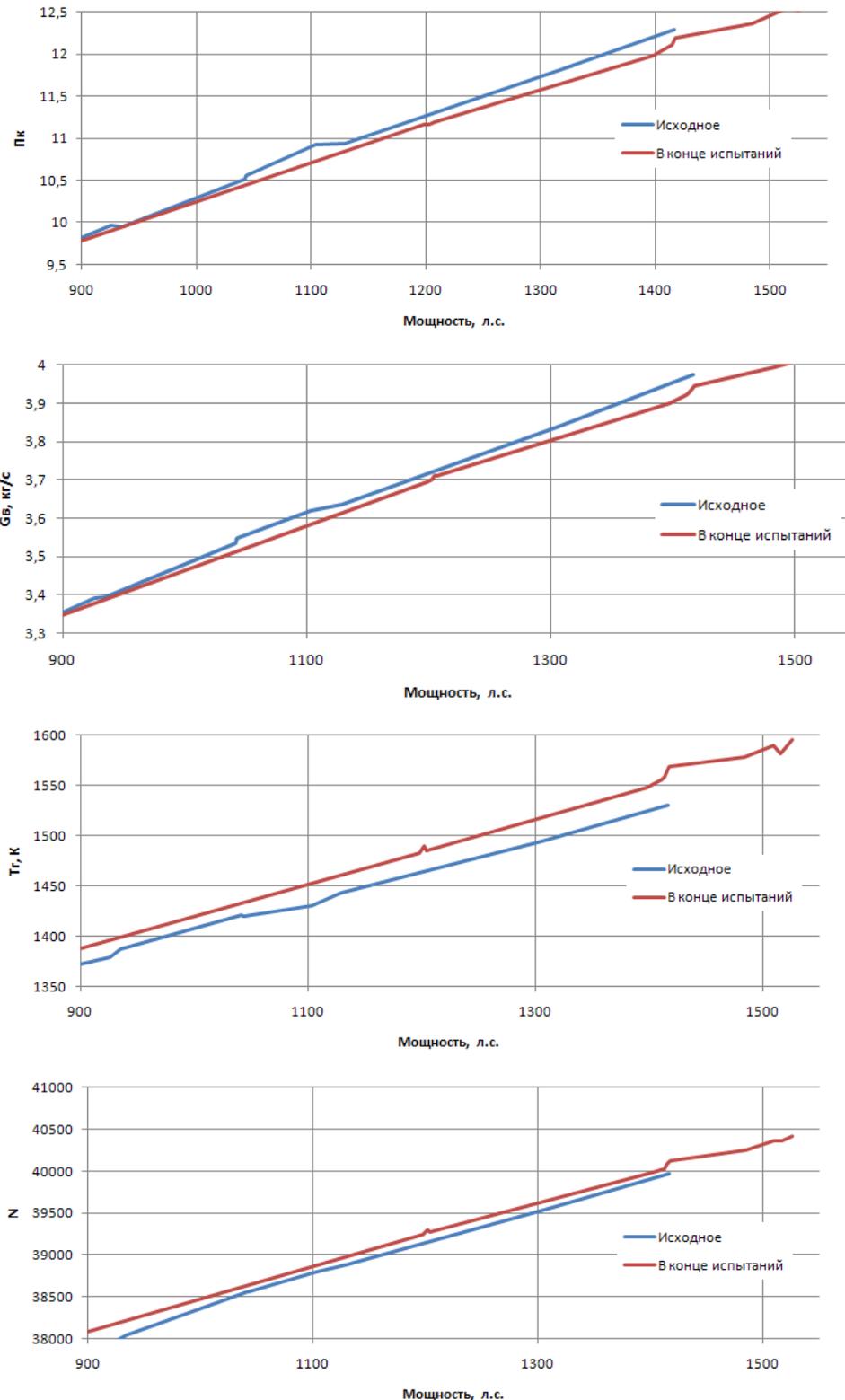


Рис. 3. Изменение параметров двигателя по результатам длительных испытаний

В соответствии с законом управления $n=f(Aру\delta)$ для поддержания постоянной частоты вращения (ухудшение незначительно $\approx(0,1 \dots 0,2)$ %) увеличивался расход топлива, что видно по увеличению температуры газов за камерой сгорания (до 1,5 %). Однако даже при постоянной частоте вращения степень сжатия воздуха в компрессоре снизилась на 2%, что связано с увеличением зазоров, а значит и перетечек рабочего тела.

Таким образом, с ростом наработки для двигателей характерно снижение параметров термогазодинамического цикла, которое в итоге сводится к уменьшению тяги. Для поддержания постоянной тяги в процессе эксплуатации необходимо повышать расход топлива, что приведёт к росту температуры газа в турбине. При этом возрастёт теплонапряжённость лопаток сопловых аппаратов

и рабочих колёс, снизится их ресурс.

Реализация БММД

Наиболее простая линейная бортовая математическая модель может быть представлена совокупностью дроссельных характеристик:

- $Gm_{np}=f(n2_{np})$;
- $\pi^*_{к\Sigma}=f(n2_{np})$;
- $T^*_{m np}=f(n2_{np})$;
- $S=f(n2_{np})$.

Подобная модель позволит в случае отказов датчиков параметров $n1, n2, P^*_{к}, T^*_{m}, Gm(\alpha_{ou}), T^*_{vx}, P^*_{vx}$ подменить их показания расчётными значениями.

Рассмотрим наихудшую ситуацию – на ухудшение параметров двигателя оказывают влияние все рассмотренные факторы. Максимальные абсолютные отклонения параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Максимальные абсолютные отклонения параметров от исходных значений под влиянием различных факторов

Параметр	Фактор				
	Песок	Вода	Соль	Наработка	Суммарное влияние
$\pi^*_{к} (P^*_{к})$	-1 %	const	-	-2 %	-3 %
n	+1,8 %	const	+0,32 %	- 0,15 %	+1,97 %
$Gm (Cr)$	+1,8 %	+1,5 %	+5 %	+1 %	+9,3 %
$G\epsilon$	-2,4 %	-	-	+1,25 %	-1,15 %
$T^*_{г} (T^*_{m})$	+3,4 %	+1,7 %	+3,6 %	+1,5 %	+10,2 %

Допустим, двигатель работает на максимальном режиме на ограничении максимальной температуры газов за турбиной $T^*_{m max}=f(T^*_{vx})$.

При отказе датчика T^*_{m} его показания будут заменены расчётными значениями, которые на 10,2% ниже измеренных. Таким образом, при длительной работе на максимальном режиме произойдёт перегрев турбинных лопаток, вплоть до прогара.

Следует отметить, что при использовании комплексных параметров в управлении погрешность будет ещё значительнее. Например, для параметра $Gm/P^*_{к}$ расчётное значение будет на 12,7% меньше измеренного.

Таким образом, можно заключить, что применение математической модели с постоянными характеристиками двигателя не-

целесообразно, так как не даёт представления о реальном состоянии параметров в процессе эксплуатации.

Очевидно, что при использовании адаптивной БММД подобная ситуация была бы исключена. Для внедрения адаптивных БММД необходимо разработать алгоритмы учёта изменения параметров в процессе эксплуатации под влиянием разных факторов.

Предлагается следующий подход к решению проблемы.

Задаются следующие исходные данные:

1. $X_0=f(\Pi)$ – дроссельная характеристика, соответствующая новому двигателю («рабочая»);
2. A – значение рассогласования между исходной дроссельной характеристикой и текущим уровнем параметра X , при превы-

шении которого дроссельная характеристика признаётся несоответствующей объекту и не может использоваться для решения задач управления;

3. i – шаг измерения;

4. $X_{nop}=f(\Pi)$ – пороговая дроссельная характеристика, соответствующая наихудшему состоянию двигателя, при котором допускается эксплуатация.

Во время эксплуатации двигателя осуществляется следующий алгоритм:

1. Измеряется параметр X_i .

2. Сравняется измеренное значение параметра X_i с «рабочим» значением X_0 :

2.1) $X_0 - X_i < A$ – возвращение к п. 1;

2.2) $X_0 - X_i > A$;

2.3) автоматическое построение дроссельной характеристики $X_i=f(\Pi)$ по данным, получаемым в процессе эксплуатации;

2.4) значения $X_i=f(\Pi)$ присваиваются $X_0=f(\Pi)$, и в дальнейшем используются в качестве «рабочих».

3. Сравняется измеренное значение параметра X_i с пороговым значением X_{nop} :

1) $X_{nop} - X_i > 0$ – возвращение к п. 1;

2) $X_{nop} - X_i < 0$ – выдача сигнала о прекращении эксплуатации.

Представленный вариант корректировки математической модели описан на рис. 4 и в блок-схеме на рис. 5.

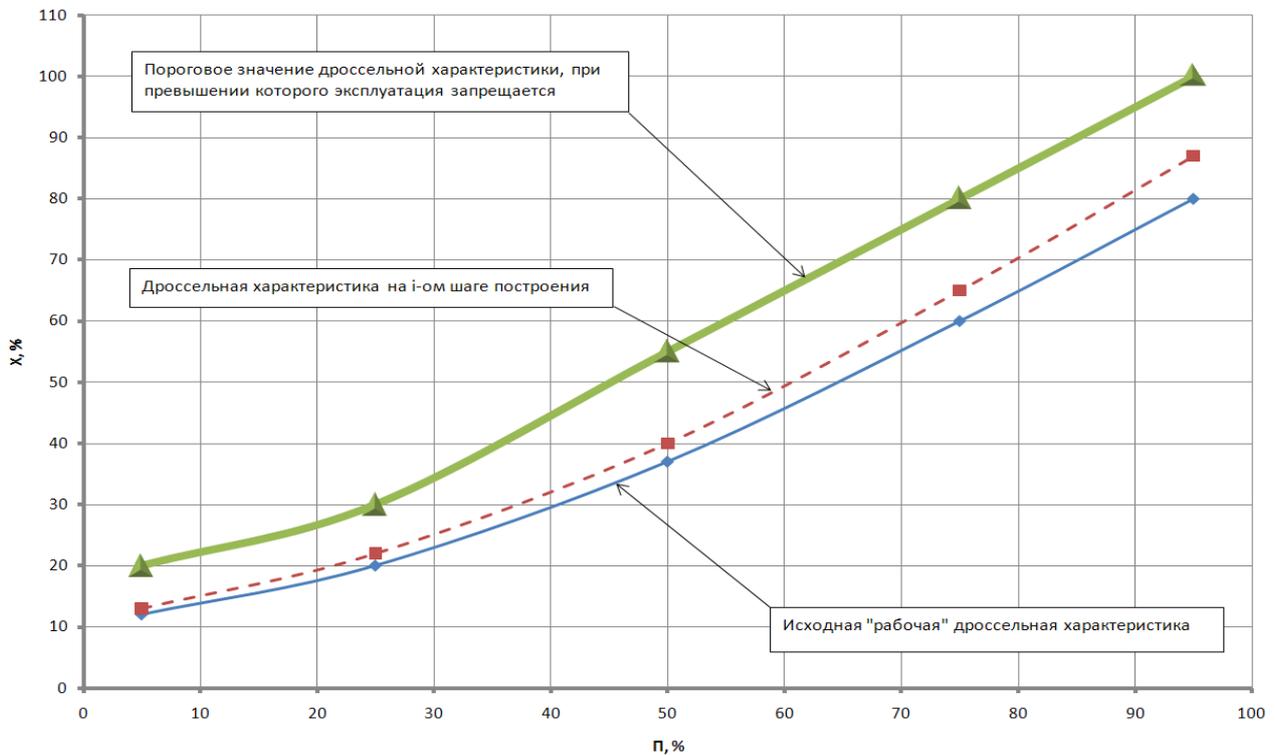


Рис. 4. Алгоритм изменения линейной математической модели при изменении свойств двигателя

Преимуществами описанного способа являются:

- простота создания математической модели;
- простота реализации алгоритма подстройки;
- автоматическое построение изменённой модели;
- не требуется дополнительных исследований – исходная дроссельная характеристика снимается для каждого выпускаемого двигателя;

- проверенная и отлаженная адаптивная БММД не требует вмешательства оператора.

К недостаткам способа можно отнести:

- применимость только для линейной БММД;
- сложность реализации алгоритма автоматической подстройки дроссельной характеристики;
- не учитывается характер изменения параметров на переходных режимах.

Выводы

Установлено, что перспективными спо-

собами управления являются адаптивное управление и компенсация отказов системы измерения и дефектов агрегатов САУ. Систематизированы основные факторы, влияющие на техническое состояние двигателя, приведены экспериментальные материалы, позволяющие оценить степень влияния этих факторов. Показана недостаточная точность существующих математических моделей, не позволяющая использовать их в качестве бортовых математических моделей двигателей для решения задач управления.

Предложен способ реализации линейной математической модели, способной автоматически корректироваться при изменении свойств двигателя.

Продолжением работы может являться разработка алгоритмов корректировки для моделей более высокого уровня, например поузловых; дальнейшее изучение влияния различных эксплуатационных факторов на состояние двигателя; анализ степени того или иного влияния для двигателей различных типов и назначений.

Библиографический список

1. ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности [Текст] В II т. Т. II / колл. авторов; под общ. науч. ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2005. – 496 с.
2. Сиротин, Н.Н. Конструкция и эксплуатация, повреждаемость и работоспособность газотурбинных двигателей. (Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок) [Текст] / Н.Н. Сиротин. – М.: РИА «ИМ-Информ», 2002. – 442 с.
3. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения.
4. Zaita, A.V. Performance deterioration modeling in aircraft gas turbine engines [Text] / A.V. Zaita, G. Buley, G. Karlsons // Transaction of ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998. -Vol. 120, -No. 2. - P. 344-349.
5. Kurtz, R. Degradation in Gas Turbine Systems [Text] / R. Kurtz, K. Brun // ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001. -Vol. 123. - P.70-77.
6. Пат. №2261351 Российская Федерация Способ кратковременного увеличения запасов газодинамической устойчивости газотурбинного двигателя в экстремальных условиях его эксплуатации [Текст]. Оpubл. 2005.
7. Андриец, А.Г. Исследование влияния засоления отдельных элементов ГТД на его характеристики [Текст] / А.Г. Андриец, И.И. Сухно // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 119/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь, 2011.

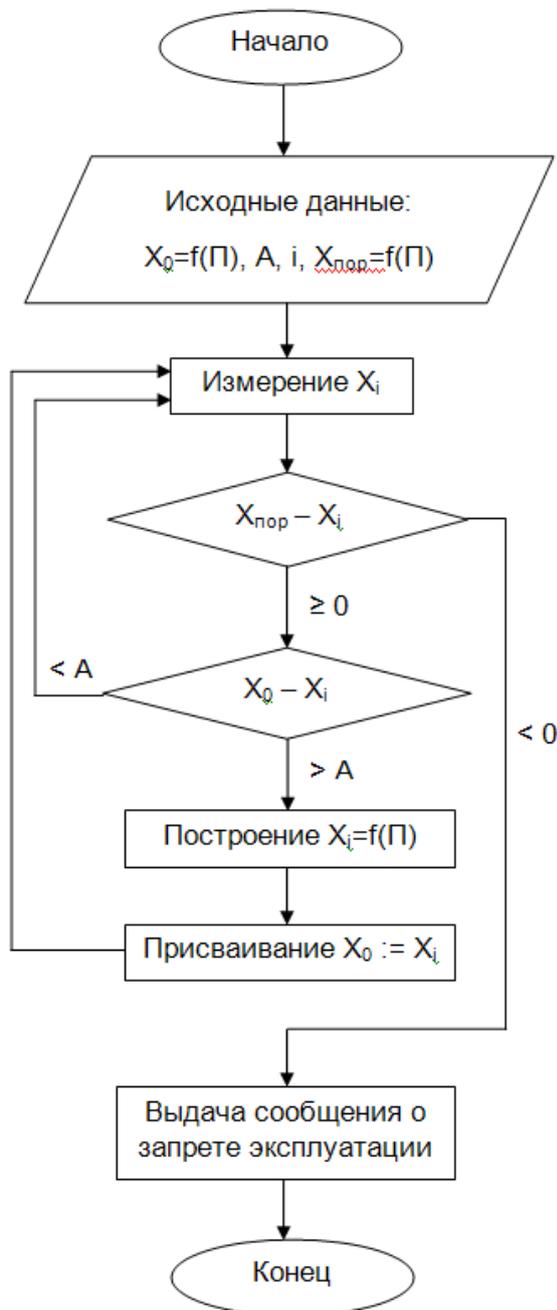


Рис. 5. Блок-схема алгоритма

OBSTACLES OF ON-BOARD MATHEMATICAL MODELS APPLICATION IN ACS

© 2012 M. S. Gayday, A. V. Dobrodeev, N. A. Muhammedov, V. V. Chervonyuk

JSC «NPO «Saturn», Rybinsk

In this article are considered reasons limiting applicability of model-based adaptive control. Also it's offered way of the adjustment to linear model in operation with changing of engine's conditions.

ACS, OBMM, degradation, adaptive control, failure compensation.

Информация об авторах

Гайдай Максим Станиславович, начальник КО САУ научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: ms.gaidai@mail.ru. Область научных интересов: диагностика и контроль технического состояния авиационных двигателей.

Добродеев Андрей Валерьевич, эксперт по САУ ГТД научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: dobrodeevy@mail.ru. Область научных интересов: моделирование процессов ГТД.

Мухаммедов Никита Атамурадович, инженер-конструктор КО САУ научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: muhammedov.na@gmail.com. Область научных интересов: математические модели ГТД.

Червонюк Владимир Васильевич, главный конструктор по САУ ГТД научно-производственного объединения «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: sau@npo-saturn.ru. Область научных интересов: концепция построения САУ газотурбинных двигателей.

Gayday Maksim Stanislavovich, Head of ACS Design Department JSC «NPO «SATURN», Rybinsk, Yaroslavl region. E-mail: ms.gaidai@mail.ru. Area of research: diagnostics and control of a technical condition of aviation engines.

Dobrodeev Andrey Valeryevich, ACS Expert JSC «NPO «SATURN», Rybinsk, Yaroslavl region. E-mail: dobrodeevy@mail.ru. Area of research: modeling of processes in gas-turbine engines.

Muhammedov Nikita Atamyradovich, Design Engeneer of ACS Design Department JSC «NPO «SATURN», Rybinsk, Yaroslavl region. E-mail: muhammedov.na@gmail.com. Area of research: gas-turbine engine's mathematical models.

Chervonyuk Vladimir Vasilyevich, General Design Engeneer of ACS JSC «NPO «SATURN», Rybinsk, Yaroslavl region. E-mail: sau@npo-saturn.ru. Area of research: concept of gas-turbine engine's SAU realization.