

**МЕТОДИКО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДВС**

Автоматизированные системы параметрического диагностирования (АСПД) газотурбинных двигателей начали свое развитие с применения к маршевым двигателям летательных аппаратов и в настоящее время востребованы в области наземного применения для приводов газоперекачивающих агрегатов и передвижных электростанций. Аналогичными системами целесообразно оснастить и наземные нефте- и газоперекачивающие агрегаты с приводом на основе дизелей. Применение полноразмерных функциональных АСПД на автомобильном транспорте не может быть столь же эффективно из-за сравнительно слабых вычислительных мощностей бортовых микропроцессоров и неравномерности рабочих режимов объекта диагностирования [1]. Промежуточным вариантом могут являться системы для водного и железнодорожного транспорта, однако их алгоритмическое обеспечение будет составлять лишь подмножество того, что можно реализовать в условиях нефтеперекачивающей станции. Такие АСПД, имея множество сходных черт с АСПД газотурбинных двигателей, будут иметь и ряд отличий, связанных с особенностями контролируемого объекта.

Разработка математического обеспечения АСПД – сложная и трудоемкая задача, для успешного решения которой требуется методическая и экспериментальная база.

Анализ задач диагностирования сложных технических объектов показывает, что алгоритмы их решения базируются на применении одного из следующих общих методов диагностирования:

1. Допускового контроля;
2. Тренд-анализа;
3. Поиска неисправностей;
4. Прогнозирования.

Но, кроме основных алгоритмов контроля и диагностирования, работоспособность системы обеспечивают вспомогательные алгоритмы, которым в литературе уделяется гораздо меньше внимания, однако их значимость для работы диагностической системы чрезвычайно высока, а по трудоемкости разработки и отладки они не уступают основным алгоритмам.

Рассмотрим состав алгоритмического обеспечения АСПД и набор методик, которые являются основой для разработки алгоритмов диагностирования.

На рис. 1 представлена схема взаимодействия основных модулей программного комплекса АСПД на различных этапах обработки информации от ее получения до отображения диагностических реше-

ний. В рассматриваемую схему не входят аппаратная часть измерительной системы и электронные цепи передачи данных. Исходной является информация, поступающая в обработку в цифровом виде. Программный комплекс (ПК) реализуется на базе персонального компьютера. Основными функциями программного комплекса являются хранение информации, настройка (конфигурирование) алгоритмов контроля, алгоритмическая обработка информации, визуализация промежуточных и окончательных результатов.

Функция *хранения данных* является важной составной частью программного комплекса. Исходные данные могут храниться в специальных форматах, поскольку их объем велик, а обработка может происходить последовательно. Данные с результатами первичной обработки и с результатами диагностирования целесообразно хранить в формате базы данных для удобства доступа.

*Модель-генератор* применяется на начальном этапе отработки алгоритмов, когда измерительные данные отсутствуют.

*Алгоритмическое обеспечение* системы состоит из алгоритмов предварительной и диагностической обработки. Алгоритмы могут применяться как в условиях стационарных диагностических систем, так и в бортовых системах. Функция *идентификации* служит для настройки математических моделей, и является инструментальным средством инженера-проектировщика. Таким же инструментальным средством является и *конфигуратор алгоритмов* – функция программного комплекса, посредством которой осуществляется его настройка. Функция *визуализации* результатов идентификации и контроля делает работу с программным комплексом более удобной.

Методы, предлагаемые для использования в АСПД, могут применяться как в оперативном режиме (то есть в режиме реального времени на работающем двигателе), так и по информации, зарегистрированной в накопителе. Методы реализуются в виде диагностических алгоритмов. Рассмотрим систематизированные группы алгоритмов, которые в различном составе присутствуют в любой конфигурации ПК АСПД.

Рассмотрим алгоритмы, работающие в ПК АСПД. Их можно разделить на две основные группы. Алгоритмы *предварительной обработки* вычисляют параметры, которые выбраны в качестве диагностических. Основное требование к таким параметрам – их значения должны зависеть от технического состояния двигателя, и не зависеть от входных пара-

метров (режим и атмосферные условия). Алгоритмы *диагностической обработки* анализируют значения диагностических параметров и формируют рекомен-

дации о возможности и перспективах дальнейшей эксплуатации двигателя, а возможно, и о месте нахождения неисправности.

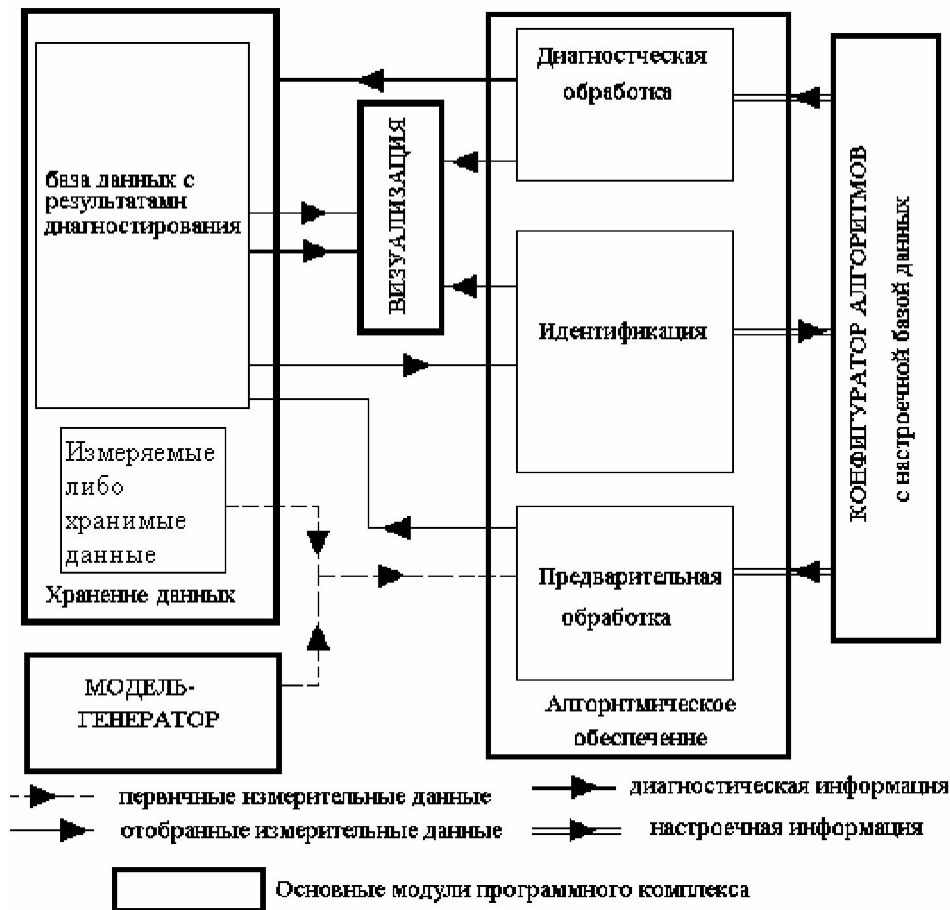


Рис. 1. Схема алгоритмической обработки информации в программном комплексе АСПД

### Алгоритмы первичной обработки

#### 1. Алгоритм подготовки входной информации.

Рассмотрим выполняемые функции.

— Проверка нахождения параметра в контрольном диапазоне.

— Вычисление статистических характеристик измеряемого параметра.

— Расчет сглаженного значения параметра.

— Расчет математического ожидания квадрата параметра  $M_i^2$ .

— Расчет оценки дисперсии измеряемого параметра  $S_i^2$  на текущем шаге.

Для сокращения объема хранимой при вычислениях информации желательное применение рекуррентных алгоритмов. Особое внимание при программной реализации методики следует уделить тому, чтобы не потерять точность вычислений на фоне потери машинной точности.

Для настройки алгоритма необходимо задать:

- допустимый диапазон измерения параметра;
- допуск на разовое приращение значения;

— предел критерия установившегося режима;

— предельное значение СКО;

— коэффициент сглаживания;

2. Алгоритм идентификации режима работы объекта.

Выполняемые функции:

— формирование признака «двигатель работает»;

— формирование номера зоны контроля для установления диапазона применяемой модели;

— формирование признака «установившийся режим» (УР);

Применение любой методики в АСПД может быть успешным только в случае четкого понимания того, в каких условиях и на каких режимах применение этой методики допустимо. Так, например, попытка использовать допусковый контроль путем сравнения текущего значения параметра со статической моделью его нормального состояния даст заведомо ложный результат в случае контроля на переходном режиме работы двигателя. Это происходит потому, что все соотношения между параметрами в

статической модели не учитывают энерговыделение или энергопоглощение массами, движущимися ускоренно. Другой случай – когда модель нормального состояния представляет собой не одну, а несколько различных функций, каждая из которых верна только при заданной конфигурации двухпозиционных управляющих устройств (например, приводной нагнетатель воздуха включен/выключен).

Таким образом, для каждой из методик существует набор условий, при которых ее применение допустимо, и которые можно объединить в один признак, разрешающий применение методики, или указывающий какая из моделей нормального состояния должна быть применена. Некоторые из признаков носят общий характер для нескольких методик. Рассмотрим некоторые из них.

Признак «двигатель работает» формируется по результатам проверки совместного выполнения  $M$  из  $N$  условий  $Y_i > C_i$ , где  $Y_i$  – измеряемый либо вычисляемый параметр, по которому проверяется режим двигателя;  $C_i$  – константа – нижний уровень проверяемого параметра, характерный для работающего двигателя,  $i=1,2,\dots,N$  – номер проверяемого условия,  $N$  – количество проверяемых условий (обычно 2-3),  $M$  – количество условий, которые должны выполняться, чтобы признать двигатель работающим (в частном случае  $M=N$ ).

В качестве  $Y_i$  параметров могут выступать частоты вращения роторов, температура газов в горячей части двигателя, крутящий момент, давление за компрессором и т.п.

Признак *зоны контроля* формируется для того, чтобы из нескольких математических моделей одного параметра выбрать именно ту, которая описывает текущую область режимов работы двигателя и атмосферных условий, либо отвергнуть все и отменить контроль, если работа происходит в зоне, для которой математическая модель не идентифицировалась.

Большинство из проверок технического состояния двигателя производится в условиях энергетического равновесия контролируемой системы, когда не происходит ускоренного движения роторов, а элементы двигателя сохраняют постоянство температуры и не меняется положение органов управления. Косвенным признаком такой стабильности может служить стабильность некоторых параметров двигателя и внешних условий достаточно продолжительное время. Признак установившегося режима работы двигателя (УРД) формируется, когда условия стабильности выбранных параметров выполняются. Однако невозможно соблюсти условия полного равенства каждого из параметров его предыдущему значению вследствие измерительного шума; изменения внешних условий; влияния возмущений от регулятора двигателя. Поэтому нельзя ожидать абсолютной стабильности ни одного из наблюдаемых параметров, но можно считать стабильным режим, на котором параметр меняется на незначительную ве-

личину и медленно. Формирование критерия стабильности отдельного параметра может осуществляться сравнением его скорости изменения с предельным значением. Иные методы (например, Хальда-Аббе [11]) показали себя менее эффективными. Признак УРД можно считать сформированным, если выполняются условия стабильности для  $N$  выбранных при формировании соответствующего алгоритма параметров. В качестве таких параметров могут быть использованы частота вращения коленчатого вала, температуры в горячей части двигателя, расход топлива, температура масла в двигателе, а также постоянство положения органов управления двигателем.

Для настройки алгоритма необходимо задать:

- критерии оценки рабочего состояния двигателя;
- критерии определения зон контроля;
- состав параметров, по которым формируется признак УР.

3. *Алгоритм расчета не измеряемых параметров.*

В алгоритме рассчитываются параметры, не измеряемые непосредственно, но представляющие интерес для эксплуатации. Это могут быть: приведенные параметры двигателя, удельный и суточный расход топлива, производительность транспортировки нефти или газа, наработка двигателя на различных режимах, запасы устойчивости газоперекачивающих компрессоров, другие параметры станционного оборудования, и т.п. Методики их расчета не являются диагностическими, но сами параметры могут использоваться для анализа в диагностических методиках.

Особенность расчета приведенных параметров для ДВС состоит в том, что коэффициенты формул приведения сильно зависят от типа двигателя и не являются универсальными.

4. *Алгоритм управления регистрацией информационных срезов и учет наработки.*

Выполняемые функции:

- выбор участков работы, пригодных для диагностической обработки;
- учет общей наработки двигателя;
- подготовка информационного среза для регистрации.

Для работы с методиками тренд-анализа и прогнозирования, а в некоторых случаях и допускового контроля, целесообразно использовать информацию, прошедшую предварительную обработку. Таким образом отсеиваются переходные режимы, а параметры работы на установившихся режимах прореживаются (для уменьшения объема неинформативных данных) и сглаживаются (для снижения влияния случайной погрешности измерения). Прореживание заключается в том, что на регистрацию попадают информационные срезы с частотой, не превышающей заданную (один раз в час, один раз в 10 минут

работы двигателя и т.д.), и только при наличии признака работы двигателя и признака установившегося режима. Сглаживание происходит путем осреднения на заданном интервале, либо рекуррентно. Интервал осреднения выбирается от 1 (без осреднения) до 60 предыдущих записей. Бинарные параметры при этом мажорируются (например, по правилу «два из трех»). Сформированный таким образом информационный срез сохраняется для диагностической обработки.

Для исследования процессов изменения технического состояния необходима привязка параметров двигателя ко времени его работы, поэтому в информационном срезе фиксируется также время наработки, учет которого происходит суммированием временных участков при наличии признака работы двигателя.

Для настройки алгоритма необходимо задать:

- периодичность регистрации информационных срезов;
- интервал осреднения параметров перед регистрацией.

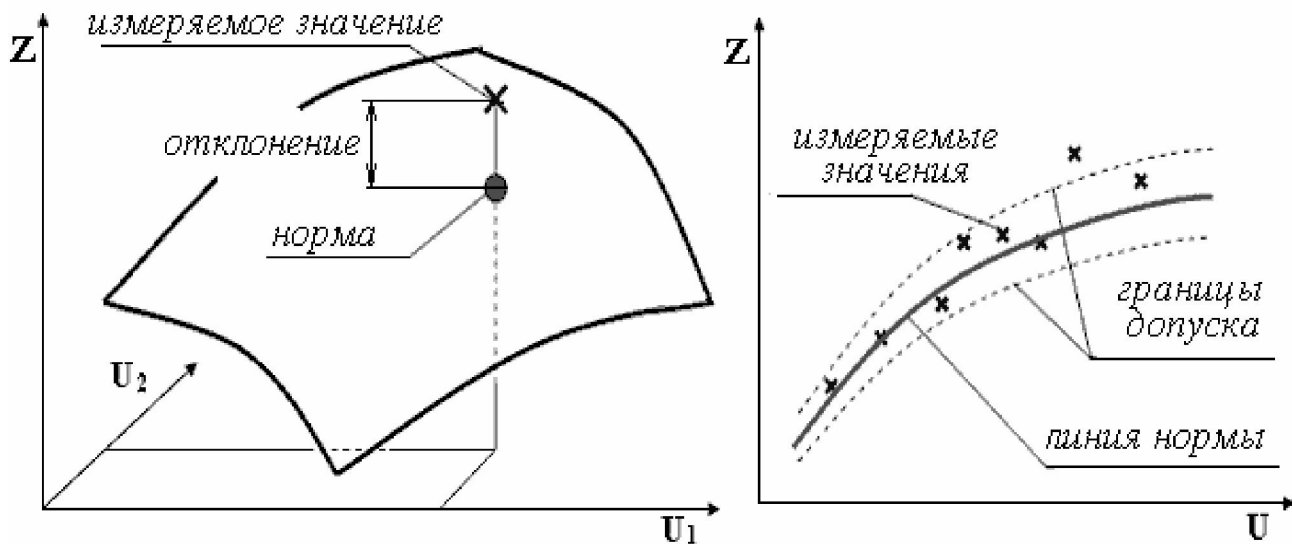


Рис. 2. Допусковый контроль

Показателями качества двигателя могут являться сами измеряемые параметры; тогда  $\bar{Z} = \bar{Y}$ . Возможно также контролировать техническое состояние двигателей по параметрам, которые непосредственно не измеряются. Так параметры двигателя могут быть приведены к стандартным атмосферным условиям, если для данной модели существует методика приведения.

Для вычисления номинальных значений используется математическая модель вида  $\bar{Y} = F(\bar{U})$ , где  $\bar{U}$  – вектор входных параметров (параметров, определяющих атмосферные условия и режим работы двигателя).

Важное практическое значение имеет случай применения регрессионных моделей, вида

### Алгоритмы диагностического анализа

#### 1. Алгоритм допускового контроля параметров двигателя.

Допусковый контроль заключается в следующем (рис.2). На этапе проектирования АСД выбираются контролируемые показатели  $\bar{Z}$  качества объекта и определяется их связь  $\bar{Z} = f(\bar{Y})$  с измеряемыми параметрами  $\bar{Y}$ . Назначаются номинальные значения норм контролируемых показателей и допустимые отклонения – в сторону увеличения  $\bar{D}_g$  и в сторону уменьшения  $\bar{D}_n$ . При контроле измеряют параметры объекта  $\bar{Y}$ , по ним вычисляют контролируемые показатели  $\bar{Z}$ , определяют их отклонения от номинальных значений  $\Delta\bar{Z} = \bar{Z} - \bar{Z}_{ном}$  и проверяют для каждого  $i$ -го показателя условие  $D_{н.и} < \Delta Z_i < D_{в.и}$ . Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, объект неисправен.

$\bar{Y} = \bar{F}(\bar{U}_p, \bar{U}_a, \bar{\alpha})$ , где  $\bar{U}_p$  – режимные параметры,  $\bar{U}_a$  – параметры атмосферного воздуха,  $\bar{\alpha}$  – параметры модели.

Эффективность контроля с использованием индивидуальной модели существенно зависит от следующих факторов состава входных параметров  $\bar{U}$ ; математической структуры модели  $F(\bar{U})$ ; способа формирования модели.

Обычный вид функции  $F$  – полиномиальный. Состав режимных параметров  $\bar{U}_p$  определяется методами структурной идентификации, коэффициенты полинома  $\bar{\alpha}$  определяются в ходе параметрической идентификации методами регрессионного анализа

[2]. Алгоритм идентификации [3, 4] не входит непосредственно в алгоритмическое обеспечение обработки данных, а относится к настройкам функций программного комплекса. Достоверность и точность идентификации при выбранной структуре модели существенно зависят от имеющейся экспериментальной информации.

Процедура сбора этой информации может быть реализована в режиме пассивного или активного эксперимента. Наибольший экономический эффект от применения параметрического диагностического анализа в эксплуатации может быть достигнут, если не требуется выполнять специальных работ по периодическому снятию характеристик двигателей. Вместо этого будем использовать информацию, накапливаемую в эксплуатационных условиях, но при этом необходимо контролировать плотность заполнения области определения. Иначе, в реальных условиях, информация будет накапливаться в локальной области и из-за влияния погрешностей измерений и структурной неадекватности идентифицируемой модели погрешности в зонах, слабо заполненных исходными данными, могут оказаться недопустимо большими. Чтобы избежать подобных ошибок, предлагается в режиме пассивного эксперимента проводить активную селекцию данных, обеспечивая заполнение области изменения аргументов модели с заданной равномерностью.

В некоторых случаях (при контрольных испытаниях в производстве и ремонте) эта модель может быть общей для всех двигателей данного типа. Однако с целью повышения достоверности контроля в эксплуатации эта модель должна отражать индивидуальные особенности каждого экземпляра двигателя [5]. Так отклонение от нормы контролируемого параметра, свидетельствующее о развитии неисправности, может составить 3-5%, однако на такую же величину могут отличаться два новых исправных двигателя одной серии [6].

Вычисляемые при выполнении допускового контроля отклонения параметров от нормальных значений в дальнейшем можно использовать при распознавании неисправностей.

Еще одной проблемой, которая должна быть решена при реализации данного метода, является назначение допусков. При назначении допуска для допускового контроля на практике возможны два случая. В первом - допуск назначается исходя из приводимых в технической документации двигателя предельно допустимых значений измеряемых параметров. Такой подход эффективен для задания допусков на отклонения параметров элементов системы управления. Во втором случае допуск назначается исходя из реального

поведения диагностического параметра.

Таким образом, алгоритм допускового контроля выполняет следующие функции:

- вычисление нормы параметра;
- вычисление отклонения от нормы;
- проверка нахождения нормы в пределах допуска и формирование сообщения о результатах контроля.

Для настройки алгоритма необходимо задать:

- условия входа в алгоритм;
- состав контролируемых параметров;
- индивидуальную модель нормального состояния каждого контролируемого параметра;
- допуск на отклонение.

*2. Алгоритм распознавания дефектных состояний двигателя.*

Выявляет неисправный узел в зависимости от рассчитанных отклонений контролируемых параметров. Алгоритм описан в работе [7].

Для настройки алгоритма необходимо:

- описание дефекта в виде одного или двух векторов коэффициентов влияния распознаваемого дефекта на отклонения контролируемых параметров;
- значения отклонений контролируемых параметров, вычисленные в алгоритме допускового контроля.

Одним из применений методики распознавания стала методика оценки диагностической ценности параметров, позволяющая выработать рекомендации по составу и точности измерительной системы [8];

*3. Алгоритм отсева сбойных значений диагностических параметров.*

При анализе параметров ГТД в значения входных и вычисляемых параметров могут входить грубые выбросы (сбои). Выявить и исключить сбои позволяет сравнение каждого наблюдения со значениями, зарегистрированными в другие моменты времени. При этом проверяется, является ли отклонение данного наблюдения от остальных статистически допустимым, то есть, определяется ли оно случайным разбросом значений, связанным с характерным уровнем погрешностей.

Существует целая группа описанных в литературе статистических методов выявления грубых ошибок, позволяющих производить отбраковку аномальных данных (например, [9]). Для этого можно использовать критерии Колмогорова, Пирсона и др. В частности, если допустить предположение о нормальном распределении погрешностей измерений, то можно прибегнуть к правилу “трех  $\sigma$ ”.

*4. Алгоритм тренд – анализа.*

Задача тренд-анализа может рассматриваться как проверка стационарности случайного процесса

результатов регистрации параметров технического объекта. В результате рассмотрения специальной литературы, посвященной вопросам статистического анализа, установлено, что рассматриваемая задача тренд-анализа может быть сведена к одной из трех задач математической статистики. Ниже перечислены эти задачи:

– Оценка случайности расхождения между заданным математическим ожиданием и выборочным средним.

– Оценка принадлежности двух выборок одной генеральной совокупности.

– Выявление закономерности в последовательности данных.

Каждая из указанных задач имеет свои методы решения и соответствующие статистические критерии. Эти методы достаточно полно описаны в литературе [10, 11].

Тренд-анализ является эффективным средством раннего обнаружения неисправностей, поэтому он широко используется в существующих системах диагностирования авиационных ГТД.

Особенностью предлагаемого подхода является использование в качестве параметров, для которых проводится анализ тех отклонений контролируемого параметра от модели нормального состояния, которые были получены при работе алгоритма допускового контроля.

5. *Алгоритм прогнозирования технического состояния.*

Прогнозирование с точки зрения диагностирования технического состояния объекта – это процесс, в результате которого получают вероятностные данные о будущем состоянии этого объекта. Необходимость в прогнозировании обусловлена тем обстоятельством, что будущее многих явлений и процессов, происходящих в двигателе, неизвестное в данный момент, имеет большое значение для правильного принятия решений о дальнейшей эксплуатации двигателя в настоящем.

Известно большое количество методов, методик и способов прогнозирования [12, 13, 14], но все они основаны на двух крайних подходах: эвристическом и математическом. Наибольший интерес представляют математические методы прогнозирования, в отличие от эвристических не связанные с экспертными знаниями об объекте, для которых характерен подбор и обоснование математической модели исследуемого процесса, а также методов ее идентификации. Задача прогнозирования при этом сводится к решению уравнений, описывающих данную модель для заданного момента времени.

Среди математических методов прогнозирования в особую группу выделяются методы экстраполяции (статистические методы), основным достоинством которых являются простота реализации вычислительного алгоритма и малые затраты машинного времени. В качестве математического аппарата используются методы максимального правдоподобия, наименьших квадратов и др.

В состав диагностической системы могут быть включены различные алгоритмы, но следует учитывать, что некоторые из них используют в качестве исходной информации результаты работы других алгоритмов. На рис. 3 представлена иерархическая схема, отражающая возможность использования нижерасположенных алгоритмов от результата работы вышерасположенных. Таким образом, если в АСПД отсутствует или еще не сконфигурирован один из алгоритмов, то не могут быть настроены ни один из тех, к которым от него идут связи вниз.

Таким образом, можно выделить следующие результаты работы:

1. Обоснована возможность разработки автоматизированной системы функционального диагностирования мощных дизелей стационарного применения.

2. Описан необходимый состав и последовательность взаимодействия компонентов обработки информации.

3. Рассмотрен необходимый состав алгоритмического обеспечения комплекса и некоторые теоретические методики, необходимые для реализации алгоритмов.

4. Рассмотрены алгоритмы предварительной обработки измерительной информации;

5. Методами допускового контроля и тренд-анализа предлагается анализировать не сами параметры рабочего процесса, а отклонения контролируемых параметров от их нормальных значений, рассчитанных с использованием модели.

6. Модели нормального состояния должны отражать индивидуальные особенности двигателя, что обеспечивается методами параметрической идентификации.

7. Многие из упомянутых методик подробно разработаны, а алгоритмы реализованы и отлажены для иных технических объектов и позволяют применять их к диагностированию ДВС с минимальными доработками.

8. Теоретическая состоятельность и практическая полезность подобных систем подтверждаются опытом разработки и эксплуатации АСПД для газотурбинных приводов газокompрессорных станций и электростанций.



Рис.3. Иерархическая схема взаимодействия алгоритмов АСПД

**Список литературы:**

1. Горячий А.А. Проблемы повышения эффективности систем диагностирования ДВС на этапе проектирования // Двигатели внутреннего сгорания. Научно-технический журнал. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003, № 1-2. – С 53 – 57. 2. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами / Под ред. В.Г. Горского: Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 957 с. 3. Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей / С.В. Епифанов, Б.И. Кузнецов, И.Н. Богаенко, Г.Г. Грабовский, В.А. Дюков, С.А. Кузьменко, Н.А. Рюшин, А.А. Самецкий. – К.: Техніка, 1998. – 312 с. 4. Горячий А.А. Идентификация диагностических математических моделей ДВС // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2001. – Вып. 26 Двигатели и энергоустановки. – С. 256 – 260. 5. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с. 6. Иванков В.А., Белогуб А.В., Горячий А.А. О возможности форси-

ровки двигателя СН-6Д (1Ч8/7.5) по мощности: Сб. науч. тр. ХГПУ. – 1998. – Вып. 6. В 4 ч. Ч. 2. – Харьков: Харьк. гос. политехн. ун-т, 1998. – С. 46 – 50. 7. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с. 8. Епифанов С.В., Лобода И.И. Анализ диагностируемости ГТД параметрическими методами // Авиационно-космическая техника и технология. Тр. Харьк. авиац. ин-та 1994. – С. 73 – 76. 9. Шаракианэ А.С., Железнов И.Г., Ивницкий В.А. Сложные системы.: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1977. – 247 с. 10. Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений. – Л.: Энергия, 1979. – 285 с. 11. Закс Л. Основы теории статистических решений.: Пер. с нем. – Л.: Энергия, 1979. – 285 с. 12. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление. – М.: Мир, 1974. – Вып. 1. – 408 с. 13. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – К.: Техніка, 1975. – 311 с. 14. Ивахненко А.Г., Лапа Р.Г. Предсказание случайных процессов. – К.: Наук. думка, 1971. – 416 с.