

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

© 2018

**А. М. Гареев** кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[gareyev@ssau.ru](mailto:gareyev@ssau.ru)

**И. А. Попельнюк** аспирант;  
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва;  
[iap@ssau.ru](mailto:iap@ssau.ru)

Рассматривается диагностирование гидравлических систем с применением фазовых портретов. Приведён краткий обзор существующих методов диагностирования гидравлических систем с указанием их преимуществ и недостатков. Предложен подход, основанный на анализе динамических характеристик гидравлической системы и фазовых портретов гидромеханических агрегатов при их исправном и неисправном состояниях. В качестве примера рассмотрена динамическая модель упрощённой гидравлической системы, состоящей из типовых компонентов. Путём настройки параметров модели в гидромеханические агрегаты искусственно внесены характерные неисправности, встречающиеся в эксплуатации, такие как внутренние утечки в насосе, загрязнение рабочей жидкости механическими примесями, зависание клапана и другие. Построено семейство фазовых портретов гидравлического привода для исправного и различных неисправных состояний, предложена количественная оценка их изменений, основанная на вычислении разности площадей фигур. Установлено, что отказы и неисправности вносят изменения в фазовые портреты гидромеханических агрегатов, что делает возможным применение предложенного подхода в качестве основы для диагностирования технического состояния гидравлических систем.

*Воздушное судно; гидравлическая система; отказы и неисправности; диагностирование; динамическая модель; фазовые портреты; сравнительный анализ.*

---

*Цитирование:* Гареев А.М., Попельнюк И.А. Использование фазовых портретов гидромеханических агрегатов для диагностирования гидравлических систем воздушных судов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 3. С. 44-55.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-44-55

### Введение

Анализ направлений модернизации систем и бортового комплекса оборудования воздушных судов (ВС) показывает, что в ближайшем будущем гидромеханические агрегаты будут активно использоваться в системах управления, механизации, уборки выпуска шасси. При этом конструкция агрегатов постоянно усложняется, а сами гидравлические системы (ГС) становятся многокомпонентными с применением электронных модулей, что, в свою очередь, делает задачу обеспечения надёжности систем по-прежнему актуальной.

Для решения указанной задачи необходим комплексный подход, учитывающий обеспечение высокого уровня надёжности агрегатов ГС на этапах проектирования и производства – с одной стороны и строгое соблюдение правил и норм их технического обслуживания (ТО), ремонта (Р) – с другой стороны.

В настоящее время периодичность и объём работ по ТО и Р гидравлических систем ВС регламентированы в рамках трёх стратегий [1]. Анализ показывает, что эффективной в эксплуатации является стратегия эксплуатации по состоянию. В рамках этой

стратегии критерием предельного состояния изделия является значение диагностического параметра, по достижению которого использование изделия по назначению прекращается и оно подлежит восстановлению или списанию.

Применение стратегии ТО и Р с контролем параметров позволяет поддерживать более высокие уровни безотказности изделий за счёт своевременного выявления и устранения отказов и неисправностей, а также существенно сократить время простоя ВС на ТО и Р. Однако для реализации данной стратегии необходимы эффективные методы и средства диагностики и контроля состояния ГС, позволяющие не только фиксировать техническое состояние агрегатов, но и определять тенденции его развития.

### Постановка задачи

Традиционный подход к диагностированию технического состояния ГС заключается в установлении предельных значений статических параметров (давления, расхода, температуры жидкости, времени выхода исполнительного штока и т.д.). Такой подход позволяет выявить явно выраженные отказы и неисправности. При этом для определения конкретного отказавшего агрегата в составе ГС зачастую требуются дополнительные исследования.

Более перспективным методом является мониторинг концентрации загрязнений рабочей жидкости как разновидность трибодиагностики [2-4]. Рабочая жидкость в данном случае является носителем информации о состоянии трущихся пар. Как показывает опыт, отрезок времени от начала процесса разрушения поверхностного слоя до момента полного разрушения детали, как правило, достаточно велик, что даёт возможность обнаруживать отказы и неисправности уже на начальном этапе процесса изнашивания. Спектральный анализ частиц износа, содержащихся в рабочей жидкости (РЖ), позволяет с определённой долей вероятности определить отказавший агрегат ГС. Несомненным преимуществом данного метода является возможность контролировать состояние всей системы по одному параметру и заблаговременно обнаруживать различные нарушения в её работе.

Для жидкостных систем хорошо себя зарекомендовала виброакустическая диагностика [5-7]. Она базируется на общих принципах распознавания состояний технических систем по исходной информации, содержащейся в виброакустическом сигнале. В качестве диагностических признаков используют характеристики виброакустического сигнала, измеренного на том или ином агрегате ГС. Преимуществом подобных методов является возможность обнаруживать отказы и неисправности на ранних этапах и весьма точно определять отказавшие агрегаты ГС.

Общим недостатком вышеперечисленных методов для их реализации на современных ГС является ограниченная область их применения. Так, при помощи мониторинга загрязнённости РЖ хорошо определяются износы трущихся пар, а виброакустические методы целесообразно применять для агрегатов, создающих в процессе работы вибрации и акустический шум. В случае применения только одного из методов существенная часть отказов и неисправностей может быть и не определена. Кроме того, реализация данных методов требует значительного усложнения конструкции ГС, в том числе из-за необходимости применения нестандартных датчиков, блоков обработки информации и т.д., а также существенных затрат.

Поэтому с целью повышения уровня надёжности и безотказности ГС, а также минимизации затрат на ТО и Р актуальной является задача разработки интегральной системы контроля и диагностики, сочетающей в себе алгоритмы принятия решений на базе математических моделей, учитывающих изменения состояния агрегатов во времени и реализуемых на современных программно-вычислительных комплексах. Главной особенностью данной системы должна стать её универсальность, т.е. способность

определять все возможные отказы и неисправности типовых гидромеханических агрегатов, максимально используя стандартные средства диагностирования (датчики основных параметров) без усложнения конструкции ГС.

### Метод решения

Современная ГС представляет собой сеть со сложной топологией (большое количество элементов с разнообразной структурой их соединения) [8;9].

Укрупнённая структура типовой ГС ВС представлена на рис. 1.

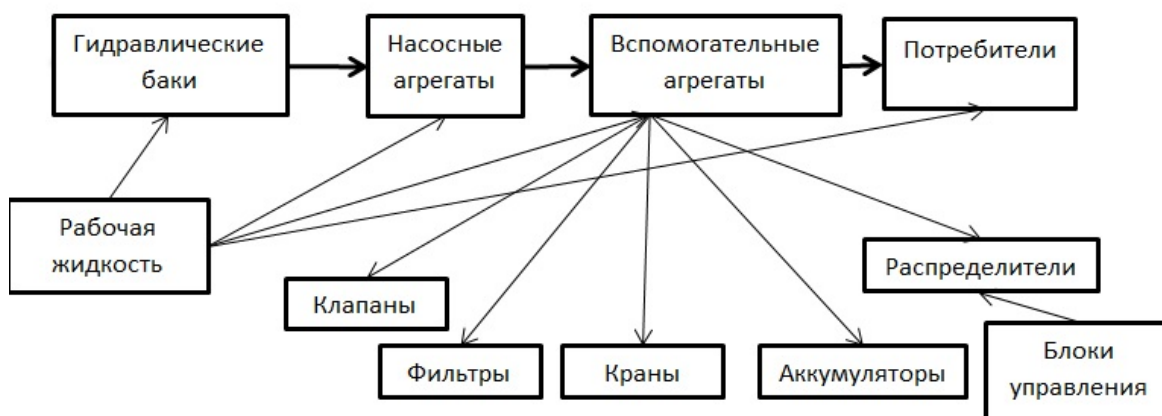


Рис. 1. Укрупнённая структура типовой авиационной ГС

Каждая группа агрегатов характеризуется своим набором параметров: гидравлический бак – объёмом жидкости, давлением наддува ( $V, P_{над}$  соответственно); рабочая жидкость – количеством механических примесей, вязкостью, плотностью, кислотностью, температурой ( $n_{прим}, \nu, \rho, k, t^\circ$  соответственно), насосные агрегаты – расходом и давлением жидкости, частотой вращения привода, коэффициентом полезного действия ( $Q, P, n, \eta$  соответственно), а в случае применения электрического привода – током, напряжением и его внутренним силовым импедансом ( $U_n, I_n, Z_n$  соответственно); вспомогательные агрегаты – тонкостью фильтрации жидкости, площадями проходных сечений, временем открытия/перекрытия клапанов/кранов и давлением срабатывания клапанов ( $n_{прим}, \nu, \rho, k, t^\circ$  соответственно); потребители – силой и перемещением выходного штока гидравлического цилиндра, временем перемещения выходного штока ( $F, x, \tau_n$  соответственно), силой противодействия нагрузки и его силовым импедансом ( $F_n, Z_n$  соответственно); блок управления – напряжением и силой тока ( $U_y, I_y$  соответственно), подаваемым на электрогидравлические распределители.

Указанные параметры можно классифицировать по степени их влияния на техническое состояние системы. В результате можно выбрать те из них, которые оказывают на него существенное влияние и только их учитывать при формировании диагностических признаков ГС.

С учётом изложенного для упрощённой ГС можно представить следующее выражение:

$$\{Q, P, \eta, F, x, t_{сраб}, n_{прим}, \nu\} \subseteq S,$$

где  $S$  – состояние ГС.

В любой момент времени  $t_i$  состояние ГС может быть представлено в восьмимерном пространстве состояний вектором  $S_{t_i}$ , компонентами которого являются значения каждого из восьми параметров в данный момент времени.

Все указанные параметры из множества  $S$  могут быть разделены на входные  $\{Q, P, \eta, n_{прим}, v\} \subset X$  и выходные  $\{F, x, t_{сраб}\} \subset Y$  параметры, связанные некоторой функцией  $f = Y(X)$ .

Функция  $f$  описывается системой из 15 уравнений, связывающих входные и выходные параметры. При этом большинство зависимостей между указанными параметрами в настоящий момент не имеют теоретического описания и устанавливаются полуэмпирическим путём на базе экспериментальных статистических данных.

Учитывая, что основой для диагностирования ГС является применение показаний датчиков основных её параметров, таких как давление, расход и степень загрязнённости рабочей жидкости, длительность переключений исполнительных органов [10;11], целесообразно в качестве диагностических признаков для разрабатываемой системы использовать производные параметров.

Обобщённое представление ГС как динамической системы позволяет при её диагностировании использовать измеряемые параметры не только путём точечной оценки их значений в определённые промежутки времени, но и отслеживать процесс их изменения. Частными случаями такого представления являются фазовый портрет (ФП) узла ГС, связывающий скорость изменения какого-либо выходного параметра от самого параметра во времени [12], и динамический портрет системы, связывающий изменения во времени давления и расхода, площадь внутри замкнутого контура которого характеризует мощность модуля системы. Сравнение ФП гидравлических агрегатов в нормальном состоянии и в случае появления тех или иных отказов и неисправностей является подходом, на основе которого возможно реализовать диагностическую систему, позволяющую зафиксировать нарушения в работе ГС ещё на этапе их зарождения и определить неисправный агрегат.

В качестве инструмента для моделирования динамики ГС можно использовать пакеты программ Matlab/SIMulink, AMESIM [13].

Для примера рассмотрим построение фазовых портретов гидромеханических агрегатов упрощённой ГС, состоящей из гидравлического бака, насоса постоянной производительности, обратного клапана, дросселя, гидравлического распределителя и гидравлического привода (рис. 2).

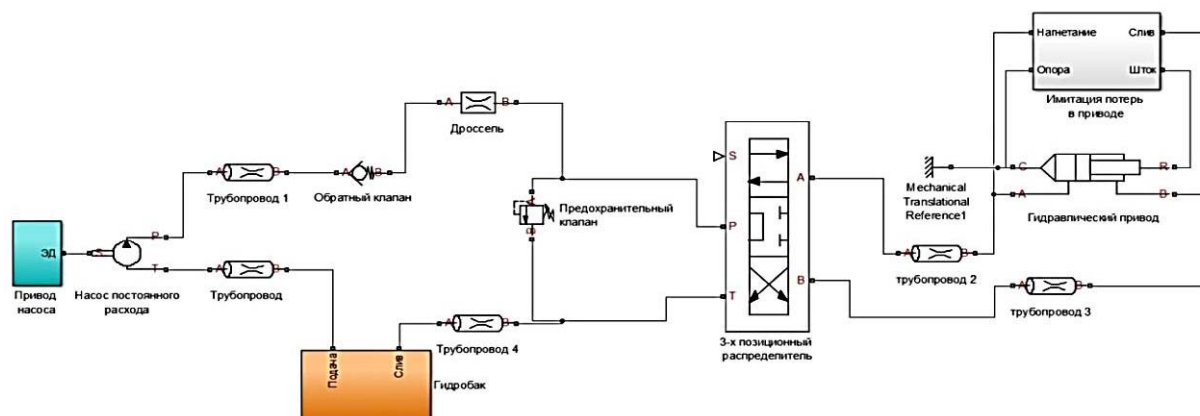


Рис. 2. Структурная схема исследуемой ГС

Принцип действия ГС основан на том, что рабочая жидкость из гидравлического бака подводится на вход насоса постоянного расхода и через обратный клапан и дроссель (служит для регулировки давления в системе) подаётся на вход в трёхпозиционный распределитель (рис. 2). Далее, в зависимости от управляющего сигнала, распределитель сообщает соответствующие полости гидравлического привода с линиями нагнетания или слива, в результате чего шток совершает поступательное движение. В системе также предусмотрен предохранительный клапан для дросселирования давления из системы при превышении давления сверх допустимого значения.

В качестве исходных данных были приняты следующие значения параметров:

- производительность насоса – 31 л/мин;
- частота вращения вала насоса – 2500 об/мин;
- диапазон рабочего давления в гидроприводе – 8...11 МПа;
- статическая нагрузка на шток гидравлического привода – 3 МН;
- площадь проходного сечения распределителя – 50 мм<sup>2</sup>.

Структурная схема данной ГС, реализованная в среде MATLAB/SIMulink с использованием готовых блоков из пакета SimHydraulic [13], представлена на рис. 3.

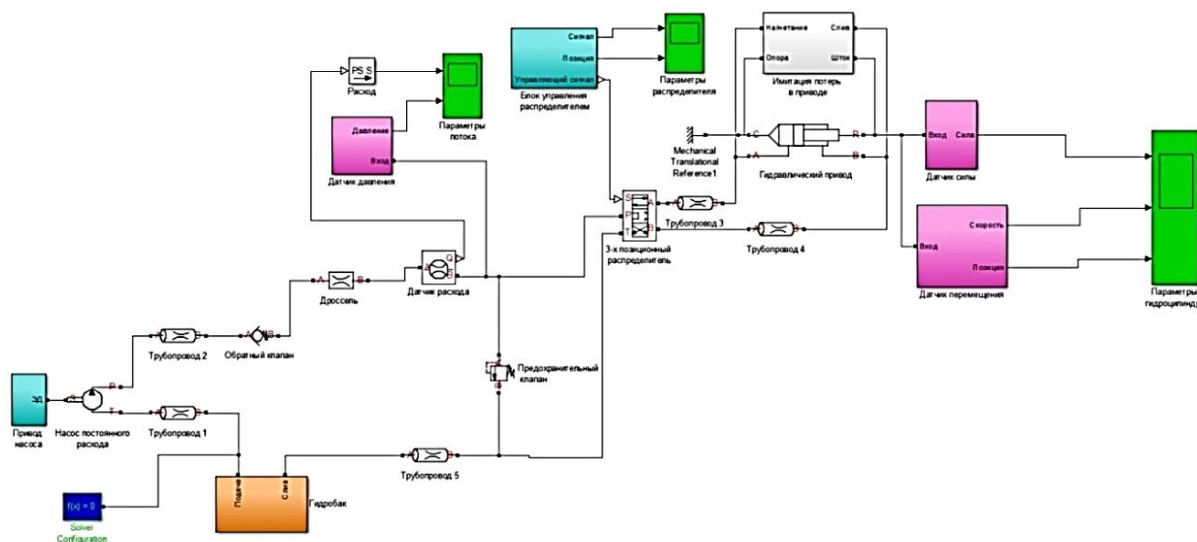
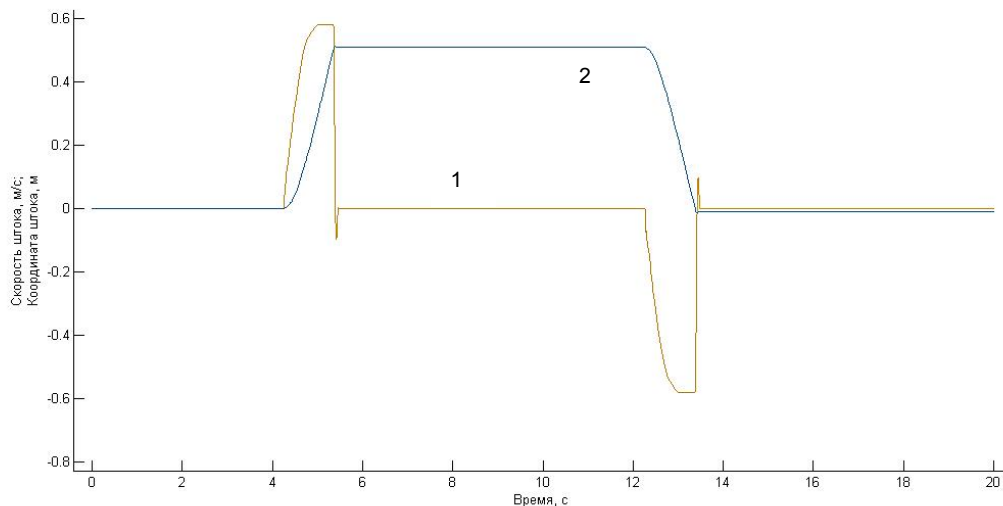
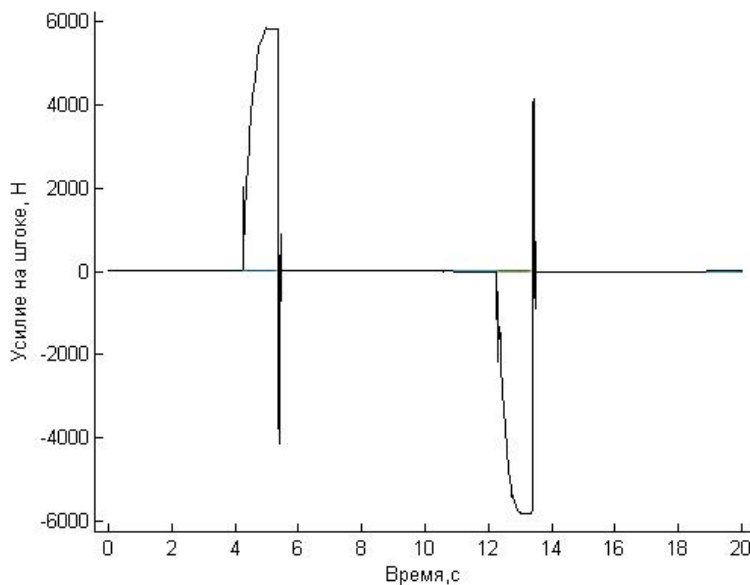


Рис. 3. Динамическая модель исследуемой ГС в среде MATLAB/SIMulink

Для считывания информации с модулей ГС в блок-схему (рис. 3) были встроены датчики давления и расхода; силы, развиваемой штоком, и его перемещения. Добавлен блок решателя «Solver» с переменным шагом максимального значения 0,1 с, использующий неявный метод интегрирования Рунге-Кутты в начале решения, и метод, использующий формулы обратного дифференцирования второго порядка в последующем. Наличие блока-решателя обеспечивает вычисление значений всех измеряемых параметров в гидроприводе в течение заданного времени с заданной точностью. Для более удобного вывода полученных значений в виде графиков функций «параметр – время» использованы блоки «Scope» и «GraphXY». После завершения процесса симуляции работы данной ГС при ступенчатом изменении положения распределителя были получены зависимости  $F(t), V(t), x(t)$  (рис. 4), где  $F$  – сила, приложенная от штока гидравлического привода к нагрузке;  $V$  – скорость движения штока гидравлического привода;  $x$  – координата штока гидравлического привода.



а



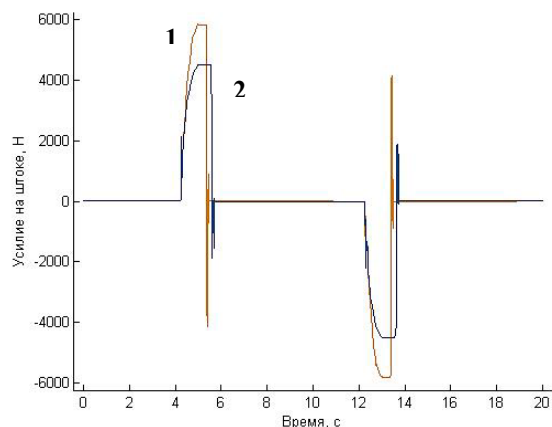
б

Рис. 4. Зависимости параметров гидравлического привода от времени:  
а – скорость (1) и координата (2) штока; б – усилие на штоке

Затем путём настройки параметров блоков динамической модели искусственно были введены неисправности, связанные с механической частью системы и изменением параметров рабочей жидкости:

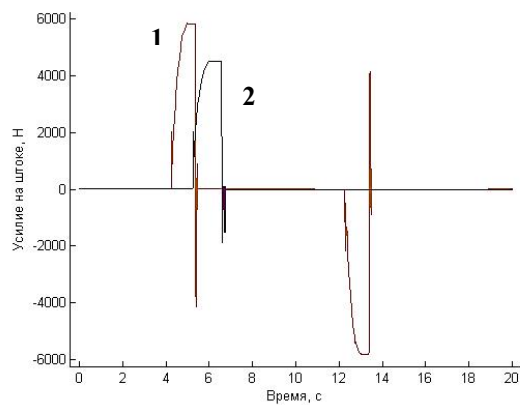
- внутренние утечки в насосе;
- неисправность блока управления трёхпозиционного распределителя;
- повышенная концентрация загрязнений в рабочей жидкости (облитерация дроссельной щели);
- ухудшение вязкости и плотности рабочей жидкости;
- неисправность предохранительного клапана.

На рис. 5 показано изменение значения усилия на выходном штоке гидравлического привода при различных неисправностях в ГС.



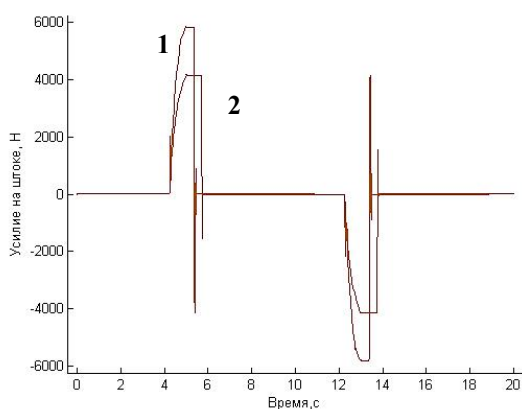
а

1 – без внутренних утечек в насосе;  
2 – с внутренними утечками в насосе



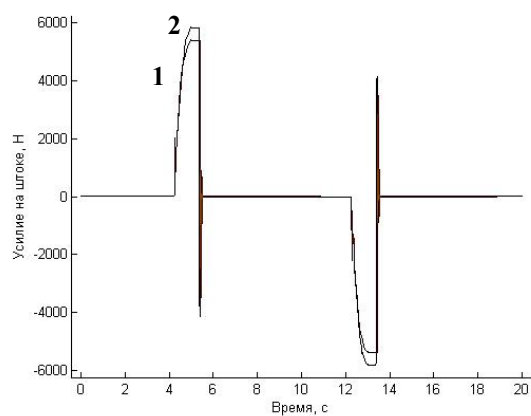
б

1 – исправный распределитель;  
2 – неисправный распределитель



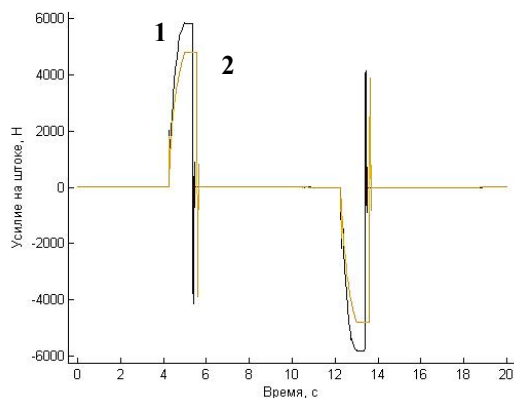
в

1 – рабочая жидкость, соответствующая нормам;  
2 – облитерация дроссельной щели механическими примесями



г

1 – нормальная температура рабочей жидкости;  
2 – перегрев рабочей жидкости



д

1 – исправный предохранительный клапан;  
2 – заклинивание золотника предохранительного клапана

Рис. 5. Изменение усилия на выходном штоке гидравлического привода при различных неисправностях в ГС:

а – внутренние утечки в насосе; б – неисправность блока управления распределителем;  
в – загрязнение механическими примесями (облитерация дроссельной щели); г – ухудшение вязкости и плотности рабочей жидкости; д – неисправность предохранительного клапана

На рис. 6 изображено семейство ФП гидравлического привода при исправном состоянии ГС и при различных неисправностях в виде графиков  $V = f(x)$ .

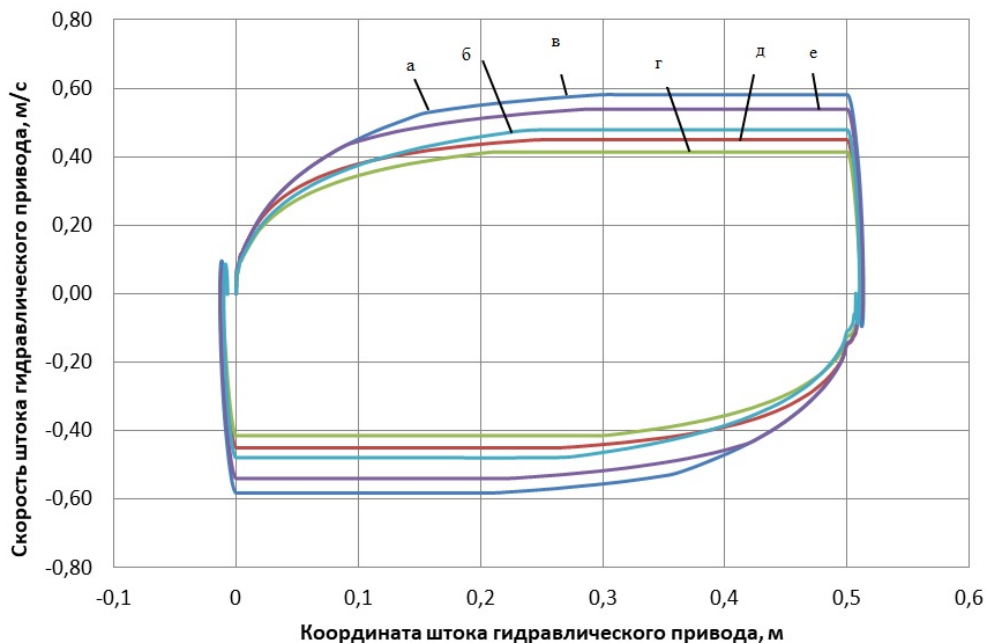


Рис. 6. Семейство фазовых портретов гидравлического привода:  
 а – исправная ГС; б – внутренние утечки в насосе; в – неисправность блока управления распределителем; г – засорение механическими примесями (облитерация дроссельной щели); д – перегрев рабочей жидкости; е – неисправность предохранительного клапана

### Анализ результатов

В ходе математического моделирования установлено, что появление неисправностей в ГС приводит к изменению выходных параметров гидравлического привода, что подтверждается изменением его ФП. Для количественной оценки изменения ФП предлагается использовать вычисление разницы между площадями фигур, ограниченных соответствующими графиками и осями координат. ФП можно представить в виде многоугольника, площадь которого рассчитывается по формуле Гаусса:

$$S = \frac{1}{2} \left[ \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} + x_n y_1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i - x_1 y_n \right], \quad (1)$$

где  $S$  – площадь многоугольника;  $n$  – количество сторон многоугольника;  $(x_i; y_i), i = 1, 2, \dots, n$  – координаты вершин многоугольника.

Для примера проведём сравнение площади ФП гидравлического привода при исправном состоянии системы ( $S_{испр.}$ ) и в случае загрязнения рабочей жидкости механическими примесями ( $S_{неиспр.}$ ), т.к. эта неисправность при визуальном сравнении (рис. 6, г) имеет наибольшие изменения в ФП гидравлического привода.



Подставив в (1) значения координат опорных точек многоугольника (ФП), получим  $S_{испр.} = 0,4996$ ,  $S_{неиспр.} = 0,3200$ .

Следовательно  $\Delta = S_{испр.} - S_{неиспр.} = 0,4996 - 0,3200 = 0,1796$ , т. е. изменение площадей ФП составляет 36% (рис. 7).

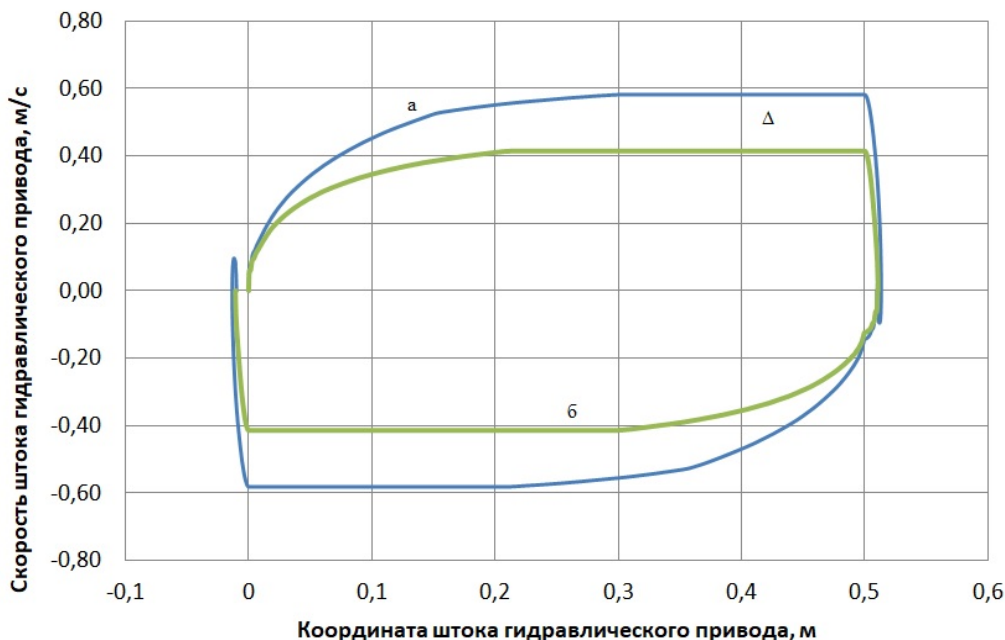


Рис. 7. Сравнение площадей ФП гидравлического привода при различных состояниях ГС:

*а – исправная ГС; б – загрязнение рабочей жидкости механическими примесями (облитерация дроссельной щели); Δ – разность площадей*

Однако двухмерный ФП не всегда достоверно характеризует техническое состояние ГС. Так, при неисправности блока управления трёхпозиционного распределителя на рис. 5, б видна задержка в работе гидравлического привода, что свидетельствует о задержке в работе распределителя. Однако ФП для случаев исправного и неисправного распределителя идентичны (рис. 6, а и б, в соответственно). Поэтому в необходимых случаях для повышения достоверности диагностирования требуется использовать трёхмерные ФП, учитывающие изменение параметров во времени.

### Заключение

Полученные результаты подтверждают возможность применения ФП для создания интегральной системы контроля и диагностики ГС, сочетающей в себе алгоритмы принятия решений, базирующейся на динамических моделях изменения состояния агрегатов ГС во времени и анализе их ФП, которые будут реализовываться на современных программно-вычислительных комплексах.

Достоверность диагностирования с применением ФП зависит в основном от двух факторов: от точности математической модели, отражающей реальные процессы, происходящие в ГС; от классификатора, с помощью которого будет реализован алгоритм опроса и принятия решения о техническом состоянии ГС [14;15]. Существующие классификаторы (нейронные сети, деревья решений, метод опорных векторов, метод k-

ближайших векторов) весьма многообразны, имеют свои особенности и применяются в зависимости от условий конкретной прикладной задачи.

Дальнейшие направления исследований в данной области связаны с разработкой точных математических моделей агрегатов ГС, их экспериментальной верификацией и поиском оптимального классификатора для реализации программной части диагностической системы.

### Библиографический список

1. Гареев А.М. Разработка и исследование упреждающих технологий обслуживания гидравлических систем на базе встроенного контроля чистоты рабочей жидкости. Дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2008. 154 с.
2. Тимиркеев Р.Г., Сапожников В.М. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 152 с.
3. Ковалев М.А., Логвинов Л.М. Диагностирование технического состояния агрегатов гидросистем воздушных судов в процессе эксплуатации // Сб. докладов IV научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности». М.: Московский авиационный институт, 2007. С. 940-945.
4. Ковалев М.А., Логвинов Л.М., Хабло И.И. Встроенная система контроля уровня загрязнения рабочей жидкости гидросистем воздушных судов // Авиационная промышленность. 2009. № 1. С. 51-56.
5. Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г., Хомяков Е.И. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984. 119 с.
6. Комаров А.А. Надёжность гидравлических устройств самолётов. М.: Машиностроение, 1976. 224 с.
7. Киселёв Ю.В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники: электронное учебное пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 2010. 103 с.
8. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
9. Сапожников В.М. Монтаж и испытания гидравлических и пневматических систем на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1972. 272 с.
10. Машошин О.Ф. Диагностика авиационной техники: учебное пособие. М.: Московский государственный технический университет гражданской авиации, 2007. 141 с.
11. Никитин О.Ф. Надёжность, диагностика и эксплуатация гидропривода мобильных объектов. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007. 311 с.
12. Ризниченко Г.Ю. Лекции по математическим моделям в биологии. Часть 1. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. 232 с.
13. Руппель А.А., Сагандыков А.А., Кобытов М.С. Моделирование гидравлических систем в Matlab: учебное пособие. Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2009. 172 с.
14. Скрыбин А.В. Системы контроля технического состояния и прогнозирования неисправностей электромеханических рулевых приводов летательного аппарата. Современный уровень развития // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2018. № 2. С. 50-63.
15. Lurette C., Lecoeuche S. Unsupervised and auto-adaptive neural architecture for on-line monitoring. Application to a hydraulic process // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2003. V. 16, Iss. 5-6. P. 441-451. DOI: 10.1016/s0952-1976(03)00064-2

## USE OF PHASE PORTRAITS OF HYDRO-MECHANICAL UNITS FOR DIAGNOSING AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEMS

© 2018

**A. M. Gareyev** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Maintenance;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[gareyev@ssau.ru](mailto:gareyev@ssau.ru)

**I. A. Popelnyuk** Postgraduate Student;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[iap@ssau.ru](mailto:iap@ssau.ru)

The article deals with diagnostics of hydraulic systems using phase portraits. A brief review of the existing methods for diagnosing hydraulic units identifying their advantages and disadvantages is given. An approach based on the analysis of dynamic characteristics of a hydraulic system and phase portraits of hydro-mechanical units in their operational and faulty conditions is proposed. As an example, we consider a dynamic model of a simplified hydraulic system consisting of standard components. By adjusting the model parameters characteristic faults typically occurring in operation, such as internal leaks in the pump, contamination of the hydraulic fluid with mechanical impurities, sticking of the valve, etc. were artificially introduced in hydro-mechanical units. A family of phase portraits of a hydraulic system for the operational condition and various faulty ones was constructed. A quantitative estimate of their changes, based on calculating the difference in the areas of the figures restricted by their graphs, is proposed. As a result, it was established that failures and malfunctions introduce changes in the phase portraits of hydro-mechanical units, which makes it possible to apply the proposed approach as a basis for diagnosing the technical condition of hydraulic systems.

*Aircraft; hydraulic system; failures and faults; diagnosis; dynamic model; phase portraits; comparative analysis.*

---

*Citation:* Gareyev A.M., Popelnyuk I.A. Use of phase portraits of hydro-mechanical units for diagnosing aircraft hydraulic systems. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. V. 17, no. 3. P. 44-55.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-3-44-55

### References

1. Gareyev A.M. *Razrabotka i issledovanie uprezhdayushchikh tekhnologiy obsluzhivaniya gidravlicheskih system na baze vstroennogo kontrolya chistoty rabochey zhidkosti*. Dis. ... kand.tekhn. nauk [Development and research of proactive hydraulic system maintenance technologies based on inline control of hydraulic fluid pollution]. Samara, 2008. 154 p.
2. Timirkeev R.G., Sapozhnikov V.M. *Promyshlennaya chistota i tonkaya fil'tratsiya rabochikh zhidkostey letatel'nykh apparatov* [Industrial purity and fine filtration of aircraft hydraulic fluids]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 152 p.
3. Kovalev M.A., Logvinov L.M. Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya agregatov gidrosistem vozdushnykh sudov v protsesse ekspluatatsii. *Sb. dokladov IV nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Issledovaniya i perspektivnye razrabotki v aviatsionnoy promyshlennosti»*. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 2007. P. 940-945. (In Russ.)
4. Kovalev M.A., Logvinov L.M., Khablo I.I. Built-in system for monitoring contamination level of the operating fluid aircraft hydraulic systems. *Aviation Industry*. 2009. No. 1. P. 51-56. (In Russ.)
5. Balitskiy F.Ya., Ivanova M.A., Sokolova A.G., Khomyakov E.I. *Vibroakusticheskaya diagnostika zarozhdayushchikhsya defektov* [Vibroacoustic diagnosis of incipient defects]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 119 p.
6. Komarov A.A. *Nadezhnost' gidravlicheskih ustroystv samoletov* [Reliability of aircraft hydraulic devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 224 p.

7. Kiselev Yu.V. *Vibratsionnaya diagnostika system i konstruksiy aviatsionnoy tekhniki: elektronnoe uchebnoe posobie* [Vibration diagnostics of aircraft systems and structures]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2010. 103 p.
8. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika* [Mechanical engineering hydraulics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971. 672 p.
9. Sapozhnikov V.M. *Montazh i ispytaniya gidravlicheskih i pnevmaticheskikh system na letatel'nykh apparatakh* [Installation and testing of hydraulic and pneumatic systems on aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 272 p.
10. Mashoshin O.F. *Diagnostika aviatsionnoy tekhniki: uchebnoe posobie* [Diagnostics of aircraft]. Moscow: Moscow State Technical University of Civil Aviation Publ., 2007. 141 p.
11. Nikitin O.F. *Nadezhnost', diagnostika i ekspluatatsiya gidroprivoda mobil'nykh ob"ektov* [Reliability, diagnostics and operation of the hydraulic drive of mobile objects]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2007. 311 p.
12. Ryzhichenko G.Yu. *Lektsii po matematicheskim modelyam v biologii. Chast' 1* [Lectures on mathematical models in biology. Part 1]. Izhevsk: NITS «Regulyarnaya i Khaoticheskaya Dinamika» Publ., 2002. 232 p.
13. Ruppel A.A., Sagandykov A.A., Korytov M.S. *Modelirovanie gidravlicheskih sistem v Matlab: uchebnoe posobie* [Modeling of hydraulic systems in Matlab]. Omsk: Siberian State Automobile and Highway Academy Publ., 2009. 172 p.
14. Skryabin A.V. The health usage monitoring systems for control surface electromechanical actuator. The state of the art. *Polyot. All-Russian Scientific-Technical Journal*. 2018. No. 2. P. 50-63. (In Russ.)
15. Lurette C., Lecoeuche S. Unsupervised and auto-adaptive neural architecture for on-line monitoring. Application to a hydraulic process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003. V. 16, Iss. 5-6. P. 441-451. DOI: 10.1016/s0952-1976(03)00064-2