

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2011 А. М. Гареев, А. Н. Коптев, Т. М. Гареев

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрен метод моделирования современных гидравлических комплексов на основе применения теории динамических аналогий. Описан алгоритм моделирования состояния гидравлической системы по параметрам рабочей жидкости.

Гидравлическая система, рабочая жидкость, диагностика, упреждающее обслуживание, чистота рабочей жидкости, математическое описание.

Известно, что диагностика играет особую важную роль при анализе работоспособности автоматизированных технологических систем, в том числе и гидравлических, когда участие человека в таких системах незначительно, что исключает возможность непосредственной оценки состояния системы оператором или наладчиком. Одним из современных инструментов оперативной диагностики является анализ рабочих жидкостей.

Своевременно выполненный анализ позволяет определить начало интенсивного

износа деталей узлов трения агрегатов гидравлических систем (ГС). Однако, современные ГС обладают как принципиальными, так и структурными особенностями и разнообразием физических процессов, происходящих при их функционировании. Гидравлический комплекс современного авиалайнера представляет собой сложную электрогидромеханическую систему (рис. 1). Это обстоятельство затрудняет создание единой методики технической диагностики в связи с отсутствием методики математического описа-

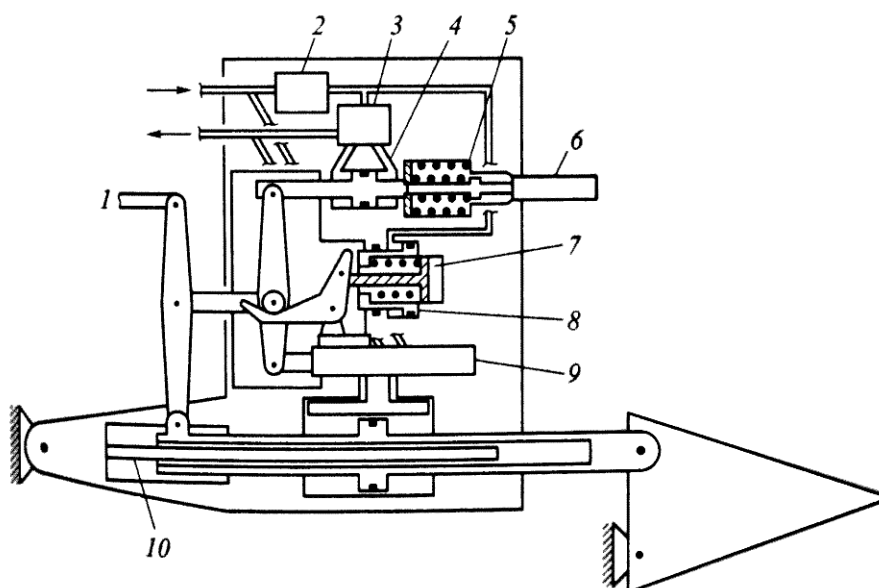


Рис. 1. Электрогидравлический рулевой привод с механической упругой позиционной обратной связью: 1 – входное звено от механической системы управления; 2 – отсечной клапан; 3 – электрогидравлический сервозолотник; 4 – поршневой преобразующий гидроцилиндр; 5 – центрирование управляющего поршня; 6 и 10 – датчик линейных перемещений контура обратной связи; 7 – пружинный стопор автопилота; 8 – поршень отключения автопилота; 9 – главный управляющий золотник

ния состояний, в которых может находиться подобная система в период эксплуатации.

Цель данной работы - получение математического описания сложных автоматизированных технологических систем с учётом общеизвестных законов, справедливых для данной области физических явлений [1]. Эти законы отражают опыт, накопленный ранее для других аналогичных систем. Наиболее часто используются законы Кирхгофа (в электрических системах), принцип Даламбера (в механике), уравнения кинетики химических реакций, уравнения энергетического (в частности теплового) баланса, уравнения материального баланса, вытекающие из общих законов сохранения энергии и массы, и т. д.

При анализе сложной системы в качестве эталона целесообразно выбрать электрические сети (цепи), теорию и методы расчета которых разработал Г. Крон [2].

Подтверждением правильности такого выбора являются результаты, полученные на основе метода динамических аналогий [1]. Этот метод использует аналогию сходных величин различных физических систем. Такие аналогии для величин электрической и гидравлической систем представлены в табл. 1.

На основе динамических аналогий можно получить общий вид уравнения, опи-

сывающего исследуемую систему. Для этого мысленно расчленив физическую систему в направлении передачи энергии на ряд элементов, которые соответствуют участкам системы, обладающим инерционностью, сопротивлением, емкостью и т. д., заменяем каждый элемент аналогами в соответствии с табл. 2. Множители p и $1/p$ в табл. 2 означают операторы дифференцирования и интегрирования, соответственно. Затем эти члены объединяются в уравнение в соответствии со структурной схемой анализируемого объекта.

Анализ бортовых систем современных воздушных судов (ВС) позволил выделить другие важные особенности их построения, дающих основания проводить аналогии между гидравлическими и электрическими системами. Они заключаются в том, что как сама гидросистема, так и её подсистемы характеризуются, во-первых, сравнительно небольшим перечнем используемых элементов и агрегатов, во-вторых, практически неограниченным разнообразием схемных, конструкторских и технологических решений при их реализации и, в-третьих, значительной сложностью. Такие особенности построения оборудования свойственны и электрическим цепям.

Однако построить эквивалентную схему реальных ГС в терминах электрических

Таблица 1

Электрические системы	Механические системы		Гидравлические (пневматические) системы
	Поступательное движение	Вращательное движение	
Напряжение, U	Сила, F	Крутящий момент, M	Давление, P
Ток, i	Линейная скорость, V	Угловая скорость, N	Расход, q
Заряд, q	Линейное перемещение, X	Угловое перемещение, φ	Объем, V
Активное сопротивление, R	Коэффициент вязкого трения, S	Сопротивление вращению, R_B	Коэффициент гидравлического сопротивления, R_r
Индуктивность, L	Масса, m	Момент инерции, I	Инертность, J
Ёмкость, C	Эластичность, $1/K$	Эластичность, $1/C_M$	Сжимаемость, C_r

Таблица 2

Электрические системы	Гидравлические системы
Сопротивление $U_R = Ri$	$R_r Q$
Индуктивность $U_L = pLi$	pJQ
Емкость $U_C = \frac{1}{pC}i$	$\frac{1}{pC_r}Q$
1-й закон Кирхгофа $\sum_j i_j = 0$	$\sum_j Q_j = 0$
2-й закон Кирхгофа $\sum_j U_j = U$	$\sum_j p_j = p$
Потери энергии в сопротивлении Ri^2	$R_r Q^2$
Запас энергии в индуктивности $\frac{Li^2}{2}$	$\frac{JQ^2}{2}$
Запас энергии в емкости $\frac{CU^2}{2}$	$\frac{C_r p^2}{2}$

цепей на основе приведённых таблиц не представляется возможным, так как характеристики далеко не всех элементов ГС можно описать на основе приведённых в таблицах параметров. Построить же такую схему можно на основе тензорной методологии.

Задача применения тензорного анализа электрогидромеханического комплекса предполагает построение модели исследуемой системы (класса систем), которое заключается в составлении уравнений, описывающих эту систему относительно выбранных физических величин рабочего тела, и приведение их к тензорному виду. Такие уравнения должны быть инвариантными, т. е. при переходе от одной частной системы координат, описывающей какой-либо функциональный блок, к другому однотипному блоку общий вид уравнений не должен изменяться.

В качестве примера рассмотрим участок ГС, схематически изображённый на рис. 2.

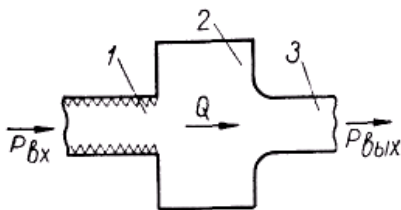


Рис. 2. Участок гидравлической системы

Вследствие трения в элементе 1 давление падает. По аналогии с электрическим сопротивлением (активным) падение давления $\Delta P_1 = R_r Q$. Элемент 2 может аккумулировать энергию движущейся жидкости (аналог электрической емкости):

$$\Delta P_2 = \frac{1}{C_r} \int Q dt .$$

Соответственно для элемента 3 получим:

$$\Delta P_3 = I_r \frac{dQ}{dt} .$$

Для участка в целом модель изменения параметров рабочей жидкости будет иметь вид

$$P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}} = \sum_{i=1}^3 \Delta P_i = I_r \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C_r} \int Q dt + R_r Q .$$

Таким образом, сложный электрогидромеханический комплекс аналогично рассмотренному примеру можно описать k -сетью и исследовать средствами тензорного анализа цепей [2]. При этом, если число элементов систем настолько велико, что расчёт её как целого производить слишком трудоёмко или невозможно, то необходимо применять метод расчёта по частям, который получил название *диакоптика*. Модель сис-

темы аналитически расчленяется на независимые подсистемы и связывающую их цепь пересечений [3]. Результаты расчёта сравнительно небольших подсистем используются в качестве воздействий для цепи пересечений. Поскольку для цепи пересечений отклики подсистем служат воздействиями, то она рассчитывается как двойственная по отношению к подсистемам. Результаты расчета цепи пересечений используются как дополнительные воздействия, учитывающие взаимодействие подсистем. В сумме результаты расчёта подсистем и обратной реакции на подсистемы составляют полное решение системы как единого целого. Это значительно повышает скорость и эффективность расчёта больших по размеру сложных систем.

Для того, чтобы охарактеризовать процесс взаимодействия потока рабочей жидкости и какого-либо гидроагрегата, необходимо задать воздействие и импеданс.

Воздействия на i -ый элемент гидравлической подсистемы задаются расходом жидкости через элемент Q_i и падением на нём давления Δp_i , произведение которых даёт мощность, потребляемую i -ым элементом:

$$N_i = \Delta p_i Q_i / 612,$$

где N_i – мощность, кВт; Δp_i – перепад давления, кгс/см²; Q_i – расход, л/мин.

При помощи импеданса можно охарактеризовать то преобразование, которое испытывает поток в данном элементе, т. е. он отражает свойства элемента как преобразователя энергии. Выражения для определения импеданса можно получить на основе расходных характеристик элементов гидравлической подсистемы.

Расходными характеристиками называют зависимости между двумя гидравлическими параметрами $\Delta p = p_{\text{вых}} - p_{\text{вх}} = f(Q)$. Тогда импеданс i -го элемента гидравлической подсистемы может быть определён как производная от Δp_i по Q_i :

$$z_i = \frac{d\Delta p_i}{dQ_i}. \quad (1)$$

Расходные характеристики элементов гидросистем достаточно подробно описаны

в литературе [4]. Например, для фильтров, использующих фильтроматериалы со сложной поровой структурой, используют расходную характеристику

$$\Delta p = \frac{\mu}{kS_\phi} Q,$$

где k – удельная пропускная способность единицы поверхности фильтроматериалов при перепаде давления в 0,1 МПа; S_ϕ – площадь фильтроэлемента; μ – динамический коэффициент вязкости. Соответственно, импеданс фильтра

$$z_\phi = \mu / (kS_\phi).$$

Следует отметить, что расходные характеристики многих элементов ГС имеют нелинейный характер, что усложняет задачу анализа ГС. Так, расходные характеристики для трубопроводов в зависимости от режима течения жидкости (ламинарного или турбулентного) имеют вид

$$\Delta p_n = k_n Q,$$

$$\Delta p_m = k_m Q^2,$$

где k – коэффициент пропорциональности, значение которого определяется параметрами трубопровода (его длиной и диаметром) и режимом течения жидкости. Поэтому расходная характеристика состоит из двух участков – прямолинейного и квадратичного, соединённых переходной зоной. Анализ процессов, протекающих в гидравлической подсистеме, показывает, что для них наиболее характерно турбулентное течение жидкости в трубопроводах.

Ранее было отмечено, что пространство-структура гидравлической подсистемы образуется набором, проходящих по ветвям независимых путей, которые используются как системы координат. Пути могут быть двух типов: замкнутыми и разомкнутыми. В теории цепей замкнутые пути называются контурами. Для разомкнутого пути главную роль играют узлы начала и конца, поэтому эквивалентом этому понятию в теории цепей является пара узлов.

Для составления модели гидросистемы можно воспользоваться двумя обобщёнными законами, полученными Кирхгофом.

1. *Закон узлов.* Сумма всех «продольных переменных» в любом узле системы должна быть равна нулю.

2. *Закон контуров.* Сумма всех «поперечных переменных» вдоль любого замкнутого контура системы равна нулю.

Продольные переменные характеризуют передачу чего-либо через элемент, например, электрического тока через сопротивление или потока жидкости через агрегат (расход жидкости). Поперечные переменные определяют разность состояний на концах элемента, например, падение напряжения на сопротивлении или разность давлений на входе и выходе гидроагрегатов.

Детальный анализ структурных схем гидравлической подсистемы, используемых на воздушном судне, показывает, что для их описания целесообразно использовать контурный способ. При этом заданными считаются значения давлений нагнетания p_n , создаваемые источниками питания, и импедансы элементов гидравлической подсистемы (расходные характеристики), а расходы рабочей жидкости через элементы являются искомыми величинами. Тогда модель гидравлической подсистемы будет состояться на основе закона контуров или уравнения баланса давлений для контуров:

$$p_n = \sum_{j=1}^n \Delta p_j, \quad (2)$$

где Δp_j – потери давления на j -ом элементе гидравлической подсистемы; n – количество элементов гидравлической подсистемы, потребляющих энергию. Количество таких уравнений будет определяться числом контуров в рассматриваемой гидравлической подсистеме и для получения однозначного решения должно быть равно числу определяемых величин.

Подставив в уравнения баланса давлений зависимости, описывающие расходные характеристики, с учётом последовательности включения компонентов гидравлической подсистемы, получим искомую модель.

При любых преобразованиях структуры цепи количество переменных (размер-

ность пространства цепи) остаётся постоянным, равным количеству ветвей.

Таким образом, получить уравнения, характеризующие процессы, протекающие в гидравлической подсистеме, можно на основе закона Кирхгофа для контуров с учётом расходных характеристик элементов, входящих в состав исследуемой гидравлической подсистеме. При этом модель гидравлической подсистемы будет представлять собой систему уравнений.

Составив уравнения, описывающие процессы, происходящие в гидравлической подсистеме, необходимо решить следующую задачу - привести эти уравнения к тензорному виду.

При переходе от отдельной ветви к цепи из многих ветвей предполагаем, что полученная при соединении система продолжает описываться такими же по форме уравнениями, как и отдельная ветвь, но каждый символ в уравнении теперь представляет собой не отдельное число, а матрицу соответствующего порядка. Крон назвал это допущение как «постулат первого обобщения».

На основе контурного способа описания гидравлической подсистемы с учётом (1) уравнение, описывающее преобразование потока отдельной ветвью ГС, можно представить как $\Delta p = z \cdot Q$.

Геометрическое представление гидравлической подсистемы как сложного пространства-структуры, включающего ряд взаимно дополняющих друг друга элементов, позволяет представить состав и связи элементов гидравлической подсистемы посредством компаунд-тензоров [2]. Такое представление возможно в том случае, когда каждый компонент геометрического объекта сам есть геометрический объект той же валентности.

Тогда уравнение, описывающее гидравлическую подсистему в целом, будет иметь следующий вид

$$P = Z \cdot Q, \quad (3)$$

где P – компаунд-тензор значений давления источников питания, по контурам гидравлической подсистемы; Q – компаунд-тензор значений расхода жидкости на элементах

контуров; Z – компаунд-тензор импедансов элементов. Компаунд-тензор импедансов элементов гидравлической подсистемы будет составляться на основе матрицы M , описывающей объект – конкретную гидравлическую подсистему с учётом расходных характеристик каждого её компонента.

На основе тензорного выражения (3) можно составить эквивалентную модель ГС, в которой каждый элемент гидравлической подсистемы будет заменен эквивалентным элементом электрических цепей с импедансом, описываемым матрицей Z . Для расчёта этой эквивалентной модели можно использовать аппарат тензорного анализа электрических сетей (цепей) [2].

Таким образом, разработан метод анализа гидравлической подсистемы электрогидромеханического комплекса путём расчёта параметров рабочего тела (перепад давления, расход жидкости) с использованием тензорного подхода. При этом в качестве эталонной системы выбраны электрические сети. Разработана методика составления модели гидравлической подсистемы сложного,

представляющего собой математические соотношения, описывающие преобразование физических величин, рабочего тела. Описана методика приведения этой модели к тензорному виду.

Данная статья написана по результатам проведения поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Библиографический список

1. Кулик, В. Т. Алгоритмизация объектов управления: справочник [Текст] / В. Т. Кулик. - Киев: Наукова думка, 1968. - 363 с.
2. Петров А. Е. Тензорная методология в теории систем [Текст]/ А. Е. Петров. – М.: Радио и связь, 1985. - 152 с.
3. Гареев, А. М. Упреждающее обслуживание гидравлических систем летательных аппаратов [Текст]/ А. М. Гареев, С. Н. Тиц. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. – 112 с.
4. Шумилов, И. С. Системы управления рулями самолётов [Текст]/ И. С. Шумилов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 469 с.

USING THE THEORY OF DYNAMIC ANALOGIES FOR MODELLING AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS

© 2011 A. M. Gareyev, A. N. Koptev, T. M. Gareyev

Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The paper presents a method of modeling up-to-date hydraulic complexes on the basis of using the theory of dynamic analogies. An algorithm of modeling the state of a hydraulic system on the basis of working fluid parameters is described.

Hydraulic system, working fluid, diagnostics, proactive maintenance, fluid contamination, mathematical description.

Информация об авторах

Гареев Альберт Минеасхатович, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: gareyev@ssau.ru. Область научных интересов: оперативный контроль технического состояния авиационной техники; неразрушающие методы контроля.

Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: оперативный контроль технического состояния авиационной техники; неразрушающие методы контроля.

Гареев Тальгат Минеасхатович, аспирант кафедры эксплуатации авиационной техники, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: оперативный контроль технического состояния авиационной техники; неразрушающие методы контроля.

Gareev Albert Mineaskhatovitch, Ph.D., Associate Professor, department of aircraft system maintenance, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: gareyev@ssau.ru. Area of research: fast control of aircraft system technical condition, non-destructive methods of control.

Koptev Anatoliy Nikitovich, Ph.D., Professor, Head of aircraft system maintenance department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: expeditious control of aircraft system technical condition, non-destructive methods of control.

Gareev Talgat Mineaskhatovitch, post-graduate student, department of aircraft system maintenance, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). Area of research: fast control of aircraft system technical condition, non-destructive methods of control.