УДК 629.78.075

© Драгун Д.К.,Ермаков В.Ю., Полянский В.И.
Dragun D., Ermakov V., Polyanskii V.

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ И ПЕРЕХОДА ОТ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АГРЕГАТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА К ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

DEVELOPMENT SCHEME FOR SYNTHESIS OF EQUATIONS AND THE TRANSITION FROM THE SYSTEM UNIT PNEUMOHYDRAULIC SPACECRAFT TO EQUIVALENT CIRCUIT PNEUMOHYDRAULIC

Аннотация. *В статье представлена разработка схемы синтеза системы уравнений и перехода от пневмогидравлической системы агрегата космического аппарата к эквивалентной пневмогидравлической цепи. Предлагаемая схема синтеза позволяет разработать алгоритм и программу численного расчета процессов для определенного класса пневмогидравлических цепей, конструируемых при помощи таких уравнений.*

Annotation. *In article working out of the scheme of synthesis of system of the equations and transition from pneumatichydraulic system of the unit of the space vehicle to an equivalent pneumatichydraulic chain is presented. The offered scheme of synthesis allows to develop algorithm and the program of numerical calculation of processes for a certain class of the pneumatichydraulic chains designed by means of such equations.*

Ключевые слова. *Пневмогидравлическая система, эквивалентная пневмогидравлическая цепь, уравнения узлов, ветвей и контуров, космический аппарат.*

Key words. *The pneumatichydraulic system, an equivalent pneumatichydraulic chain, the equations of knots, branches and contours, the space vehicle.*

В соответствии со схемой ПГС разрабатывается эквивалентная пневмогидравлическая цепь (ПГЦ), где агрегаты и конструктивные элементы системы представляются в виде идеализированных элементов или несколькими соединенными определенным (соответствующим) образом идеализированными элементами, для которых имеются описывающие их (точнее, происходящие в них процессы) уравнения, поддающиеся решению (дифференциальные и другие).

ПГЦ строится на основе функциональной оценки и выбора основных агрегатов, узлов и ветвей эквивалентной схемы ПГС [1].

Выделяем по принципиальной схеме ПГС узлы и ветви (разветвления и т.п. могут быть изображены неточно, необходимо смотреть и другие чертежи), выбираем «агрегаты», которые нужно учесть, добавляем необходимые конструктивные элементы по другим чертежам (сужения, расширения и изгибы трубопроводов и т.п., не отраженные в принципиальной схеме; или берем приближенные, условные предположения).

Заменяем выделенные элементы идеализированными элементами или соответствующими схемами замещения, состоящими из идеализированных элементов.

Соединяем идеализированные элементы. При этом могут появиться дополнительные узлы и ветви. Например, в схеме замещения для реального источника расхода.

Драгун Дмитрий Константинович – доктор технических наук, профессор, главный специалист, филиал ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры»-«Конструкторское бюро «Мотор», тел.(495)543-36-76;
Ермаков Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, начальник отдела динамики, ФГУП «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина»;
Полянский Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор, ФГУП «Центральное конструкторское бюро тяжелого машиностроения».

Dragun Dmitry – doctor of technical sciences, the professor, the chief specialist of branch of the FSUE «the Center of operation of objects of a land space infrastructure»-»Design office» Motor», tel. (495)543-36-76;
Ermakov Vladimir –candidate of technical sciences, the chief of department of dynamics of the FSUE «Research-and-production association of a name of S.A.Lavochkina»;
Polyansky Vladimir – doctor of Technical Sciences, the professor, the general director of the FSUE «Central design office of heavy mechanical engineering».

На эквивалентной ПГЦ фиксируется определенное количество $n_у$ узлов и определенное количество $n_в$ ветвей, соединяющих эти узлы.

По эквивалентной ПГЦ формируется структурный граф цепи. Он нужен для удобства учета законов сохранения (обобщенных законов Кирхгофа). Структурный граф состоит соответственно из такого же количества $n_у$ узлов и такого же количества $n_в$ ветвей, что и эквивалентная ПГЦ. Для пользователя программного обеспечения структурный граф нужен, чтобы упростить процедуру формирования соответствующего файла НД. Пользователь при задании файла НД может представлять себе граф мысленно по схеме, рассчитываемой ПГС. Далее определяется «направление» ветвей, то есть направление движения среды по элементам цепи (по трубопроводам, агрегатам и т.п. системы, представленным в цепи этими элементами). Кроме того, необходимо выбрать $n_к = n_в - n_у + 1$ независимых контуров и направление обхода этих контуров.

С использованием графа или самой схемы ПГЦ записываются уравнения баланса расходов для узлов (уравнения узлов), уравнения баланса перепадов давлений для контуров (уравнения контуров) и уравнения связей между расходом и падением давления для каждой из ветвей цепи (уравнения ветвей). Тем самым получаем замкнутую систему $2n_в$ уравнений (или систему векторных уравнений, или общее матричное уравнение цепи) для расходов и перепадов давлений в ветвях. Составим упрощенную эквивалентную схему ПГС на основе одной из реальных систем по чертежу «Схема пневмогидравлическая принципиальная» [1].

Последовательность выбора этой схемы продемонстрирована на серии рисунков ниже.

Как уже говорилось, возможны различные варианты соответствия между реальными функциональными составляющими ПГС и элементами ПГЦ в зависимости от степени приближения (определения) функций агрегатов ПГС через идеализированные элементы ПГЦ. То есть возможны различные варианты построения ПГЦ и соответственно различные схемы проведения расчетов

В первом варианте предполагаем, что работают только несколько «основных» (выбранных нами) ветвей системы, что режим работы установившийся при соответствующем «штатном» состоянии клапанов.

Структурный граф, соответствующий ПГЦ, эквивалентной ПГС представлен на рис. 1.

Составим уравнения узлов и уравнения контуров на примере, приведенном на рисунках ниже.

Уравнения баланса расходов для узлов: (индексы расходов совпадают с индексами ветвей)

$$G_1 - G_2 - G_3 = 0;\; G_3 - G_4 - G_5 = 0;\; -G_1 + G_2 + G_4 + G_5 = 0.$$

В матричном виде

$$\begin{Vmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}.$$

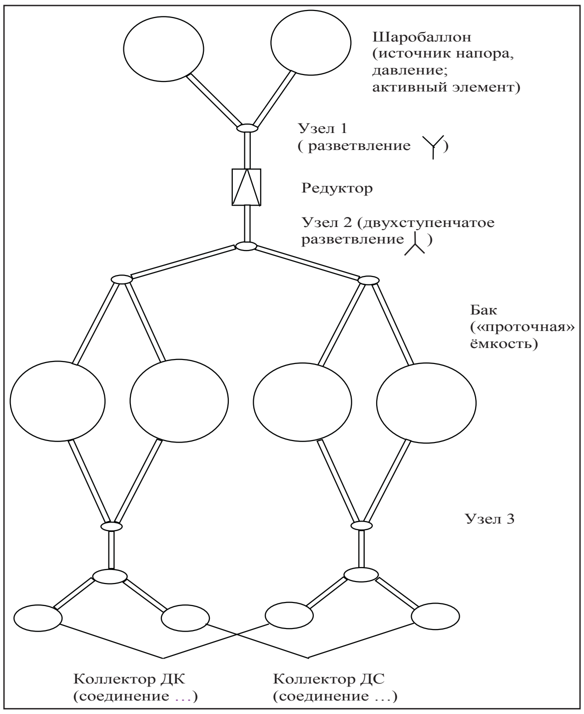

Рис. 1. Эквивалентная схема ПГС

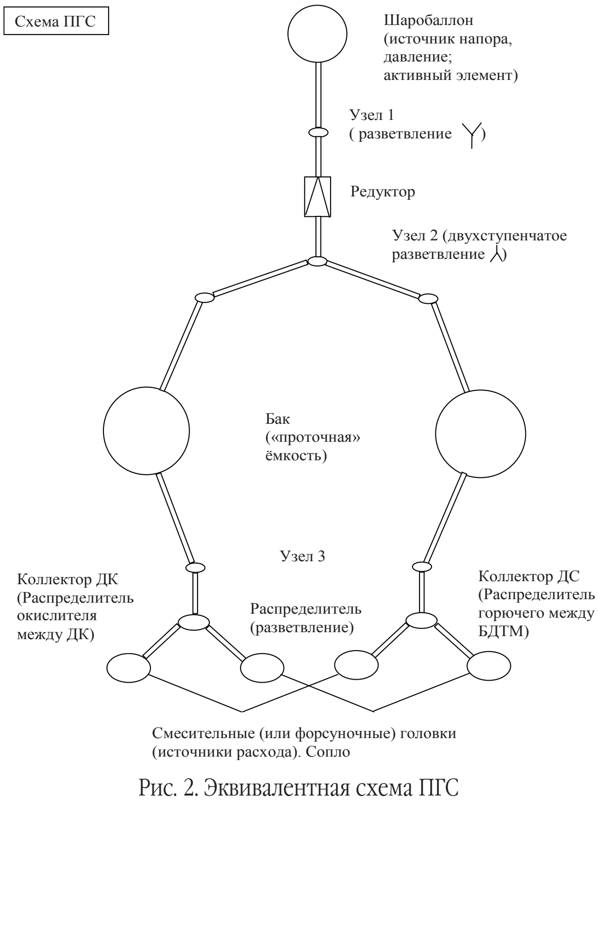

Рис. 2. Эквивалентная схема ПГС

Число уравнений уменьшаем на единицу для получения системы независимых уравнений

$$\begin{Vmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

или сокращенно

AG = 0,

где **A** – матрица узлов с элементами:

a_{ij} = 0, если j-я ветвь не соединяется с i-м узлом;

a_{ij} = 1, если поток подходит к i-му узлу по j-й ветви;

a_{ij} = –1, если поток выходит из i-го узла по j-й ветви;

G – вектор расходов в ветвях.

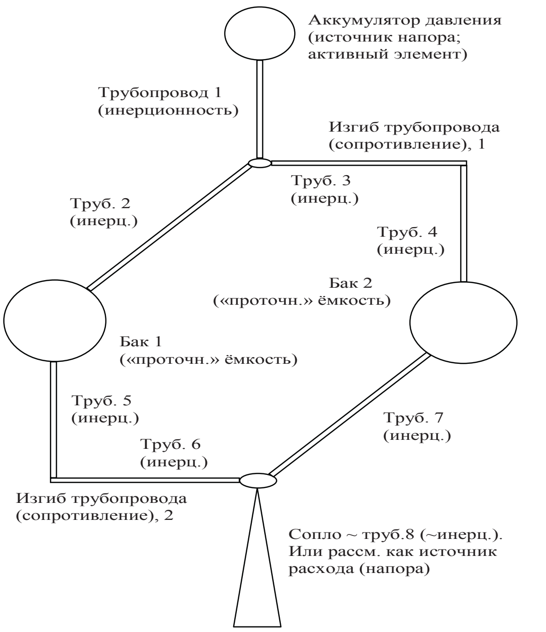

Рис. 3. Эквивалентная схема ПГС

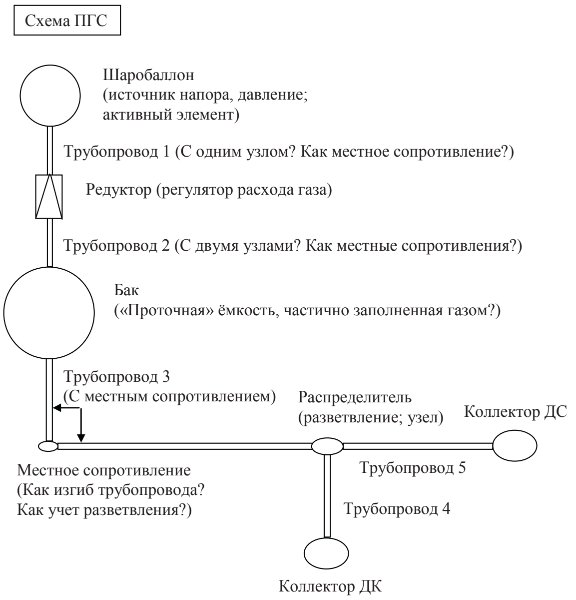

Рис. 4. Эквивалентная схема ПГС

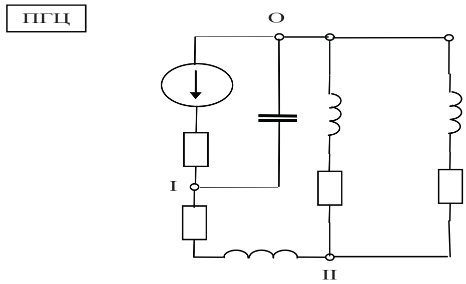

Рис. 5. Эквивалентная схема ПГЦ

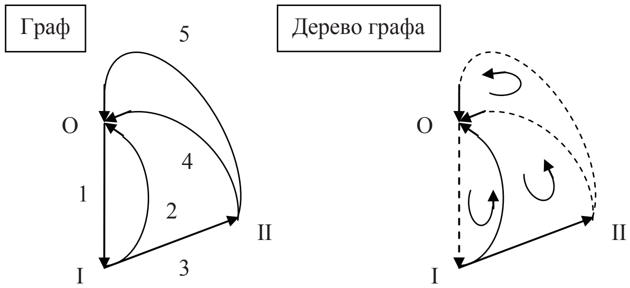

Рис. 6. Структурный граф цепи и дерево графа

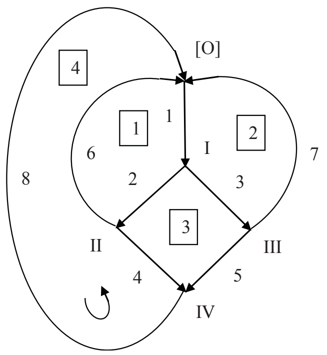

Рис. 7. Номера узлов – римские цифры,
номера ветвей – арабские цифры,
номера контуров – арабские цифры в рамке

Уравнения баланса перепадов давлений для контуров: (индексы перепадов давлений совпадают с номерами ветвей графа)

$$\Delta p_1 + \Delta p_2 = 0\,;$$

$$-\Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 = 0\,;$$

$$-\Delta p_4 + \Delta p_5 = 0\,,$$

в матричном виде

$$\begin{Vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \Delta p_3 \\ \Delta p_4 \\ \Delta p_5 \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Vmatrix}$$

или сокращенно

BΔp = 0,

где **B** – контурная матрица, показывающая, какие ветви входят в каждый из независимых контуров, с элементами:

$b_{ij} = 0$, если j-я ветвь не входит в i-й контур;

$b_{ij} = 1$, если j-я ветвь входит в i-й контур и направление обхода контура совпадает с направлением перепада давления на ветви;

$b_{ij} = -1$, если j-я ветвь входит в i-й контур, но направление обхода контура противоположно направлению перепада давления на ветви;

Δp – вектор перепадов давления на ветвях.

Итак, если $n_у$ – количество узлов, $n_в$ – количество ветвей, то имеем $n_у-1$ независимых уравнений для узлов (число строк в матрице **A** уменьшаем на единицу для получения системы независимых уравнений) и $n_в-n_у+1$ независимых уравнений для контуров.

Приведенная система уравнений баланса для узлов и контуров цепи всегда линейна и содержит в сумме $n_в$ независимых уравнений (по количеству ветвей графа или цепи) относительно $2n_в$ переменных, являющихся компонентами векторов Δp и **G**. Недостающие уравнения – это уравнения связей между расходом и падением давления для каждой из ветвей цепи или уравнения ветвей, в общем случае нелинейные.

У нас элементы, входящие в цепь, являются линейными двухполюсниками. Поэтому уравнения для ветвей предполагаем линейными или линеаризованными.

Для линеаризации уравнений идеализированных элементов в ветвях, которые в дальнейшем будут добавляться к уравнениям ветвей, будем дифференцировать эти уравнения, заменяя дифференциалы малыми отклонениями – вариациями. Переход к амплитудам отклонений (вариаций) позволяет преобразовать уравнения элементов в алгебраические.

Отметим еще раз, что структурный граф эквивалентной ПГЦ отражает только топологию цепи, и не имеет значения, из каких соединенных последовательно идеализированных элементов состоят его ветви. Соответственно в приведенную систему уравнений, которая составлена по структурному графу с целью учета законов сохранения, не входят уравнения идеализированных элементов в ветвях. Для расчета ПГЦ с учетом не рассчитанных, но описанных уравнениями с различной степенью необходимого приближения идеализированных элементов (агрегатов) ветвей ПГЦ, приведенную систему уравнений необходимо дополнить уравнениями идеализированных элементов в ветвях.

В приведенном же виде система уравнений пригодна для конкретных расчетов, если нам нужно знать лишь общий характер протекания процесса при «заранее известных» функциональных характеристиках ветвей, которые и вычисляются при решении уравнений, описывающих процессы в идеализированных элементах (агрегатах), составляющих ветви системы (ПГЦ).

Запишем в линеаризованном виде следующую общую систему уравнений ПГЦ:

уравнения контуров

$$[B]\cdot[\delta\Delta p]=[0];$$

уравнения узлов

$$[A]\cdot[\delta G]=[0];$$

уравнения ветвей

$$[\delta\Delta p]=[Z_G]\cdot[\delta G],$$

где $[B]\equiv[b_{ki}]$ – матрица контуров;

$[\delta\Delta p]\equiv[\delta\Delta p_i]$ – вектор амплитуд размерных вариаций перепадов давлений на ветвях;

$[A]\equiv[a_{ki}]$ – матрица узлов;

$[\delta G]\equiv[\delta G_i]$ – вектор амплитуд размерных вариаций расходов в ветвях;

$[Z_G]\equiv[Z_{Gi}]$ – диагональная матрица размерных сопротивлений ветвей,

или в раскрытом виде

$$\sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\delta\Delta p_i = 0, \quad k=1,...,n_к; \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{n_в} a_{ki}\delta G_i = 0, \quad k=1,...,n_у-1=n_в-n_к; \tag{2}$$

$$\delta\Delta p_i = Z_{G\,i}\delta G_i, \quad i=1,...,n_в, \tag{3}$$

здесь $n_в$–количество ветвей, $n_у$–количество узлов, $n_к$–количество независимых контуров ($n_к=n_в-n_у+1$) в структуре ПГЦ. Приведенная система структурных уравнений цепи линейна и содержит в сумме $2n_в$ независимых уравнений относительно $2n_в$ переменных, являющихся компонентами векторов *δΔp* и *δG*: вариациями перепадов давления $\delta\Delta p_i$ и вариациями расходов δG_i в i-й ветви системы, $1\le i\le n_в$. Назовем эти переменные функциями состояния рабочей среды. Для расчета ПГЦ приведенную систему уравнений необходимо дополнить уравнениями идеализированных элементов (ИдЭ) в ветвях, которые для наиболее типичных ИдЭ в линеаризованном виде будут приведены дальше.

Помимо основных уравнений (1)–(3), имеем также следующие соотношения для ветвей системы:

$$\delta\Delta p_i = \sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}} \delta\Delta p_{i\,j_i}; \tag{4}$$

$$\delta G_i = \delta G_{i1} = ... = \delta G_{i\,n_{эл,i}} \quad \text{или} \quad \delta G_{i\,j_i} = \delta G_i. \tag{5}$$

В приведенных соотношениях индекс «j_i» указывает на то, что переменная с таким индексом принадлежит к i-й ветви и имеет в этой ветви j-й номер, соответствующий j-му элементу, входящему в эту ветвь; $n_{эл,\,i}$ – количество ИдЭ в *i*-й ветви. Выделим в уравнениях отдельно перепады давления на активных элементах (напоры источников, точнее, напоры, создаваемые источниками)

$$\delta\Delta p_i = \delta\Delta p_i^{пассивн} + \delta\Delta p_i^{активн}$$

переобозначим

$$\delta\Delta p_i^{пассивн} = \delta\Delta p_i, \quad \delta\Delta p_i^{активн} = -\delta\Delta H_i,$$

тогда

$$\delta\Delta p_i \to \delta\Delta p_i - \delta\Delta H_i. \qquad (6)$$

Выражение (6) ($n_в$ выражений) с учетом (4) запишем так:

$$\delta\Delta p_i - \delta\Delta H_i = \sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}} \delta\Delta p_{i\,j_i} - \delta\Delta H_i.$$

Могут существовать системы, в которых

$$\delta\Delta H_i = \sum_{j_i=1}^{n_{акт,i}} \delta\Delta H_{i\,j_i},$$

то есть в одной ветви находится несколько источников напора (или расхода), – тогда, учитывая линейность и принцип суперпозиции, реакцию системы на каждое возмущающее воздействие можно рассматривать отдельно. В последнем выражении оставим обозначение $n_{эл,\,i}$, но это будет уже количество пассивных ИдЭ в *i*-й ветви, то есть количество ИдЭ за вычетом количества активных ИдЭ, которое условно обозначено выше как $n_{акт,\,i}$.

Разработка алгоритма формирования систем уравнений идеализированных элементов для контуров.

Приведем линеаризованные уравнения для пассивных двухполюсных элементов, наиболее характерных для рассматриваемого класса задач (линеаризованные уравнения для ИдЭ «инерционность», «сопротивление» и «ёмкость» (проточная)):

$$\frac{L}{F}\frac{d\delta G}{dt} = \rho\cdot L\cdot\delta P_x + \delta\Delta p \to \delta\Delta p = \frac{L}{F}\frac{d\delta G}{dt} - \rho\cdot L\cdot\delta P_x;$$

$$\delta\Delta p = \frac{\lambda\cdot L}{2R}\cdot\frac{G}{\rho\cdot F^2}\cdot\delta G + $$

$$+\frac{L}{4R}\cdot\frac{G^2}{\rho\cdot F^2}\cdot\delta\lambda - \rho\cdot L\cdot\delta P_x;$$

$$\frac{V}{a^2}\frac{d\delta p}{dt} = \delta G_0 - \delta G_1 \to \frac{d\delta p}{dt} = \frac{a^2}{V}\cdot\delta\Delta G \to \delta p = \frac{a^2}{V}\cdot\int\delta\Delta G dt.$$

Для простоты обозначим

$$x_{i\,j_i} = \delta\Delta p_{i\,j_i}; \; x_i = \delta\Delta p_i; \quad y_i = \delta G_i.$$

Будем считать, что внешние массовые силы отсутствуют (или вариация внешних массовых сил равна нулю, $\delta P_x = 0$) и вариацией коэффициента сопротивления можно пренебречь (то есть $\delta\lambda\approx 0$). Введем оператор дифференцирования $q = d/dt$. Тогда уравнения для пассивных двухполюсных элементов, входящих в ветви, с учетом (5) можно записать в следующем обобщенном операторном виде:

$$x_{i\,j_i} = C_{j_i}(q;1/q)\cdot y_i \text{ или } \delta\Delta p_{i\,j_i} = C_{j_i}(q;1/q)\cdot\delta G_i, \quad (7)$$

где составные операторы $C_{j_i}(q;1/q)$ записываются так:

$$C_{j_i}(q;парам.) = \frac{L}{F}\frac{d}{dt} = \frac{L}{F}\cdot q;$$

$$C_{j_i}(параметры) = \frac{\lambda\cdot L}{2R}\cdot\frac{G}{\rho\cdot F^2};$$

$$C_{j_i}(1/q;парам.) = \frac{a^2}{V}\cdot\int dt = \frac{a^2}{V}\cdot\frac{1}{q},$$

соответственно для инерционности, сопротивления и ёмкости (проточной). Заметим, что индексы параметров в некоторых очевидных случаях для простоты опущены. Повторим, что в подробной записи индекс «j_i» указывает на то, что элемент принадлежит к *i*-й ветви и имеет в этой ветви *j*-й номер.

В уравнении (7) $C_{j_i}(q;1/q)$ –это операторы, составленные по уравнениям для ИдЭ из оператора дифференцирования $q = d/dt$ и коэффициентов этих уравнений и соответствующие каждый определенному уравнению.

Введя обозначения

$$\sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}} C_{j_i}(q;1/q) = C_i(q;1/q),$$

можно записать следующие выражения для вариаций перепадов давления в ветвях:

$$\delta\Delta p_i = \sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}}\delta\Delta p_{i\,j_i} = \sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}} C_{j_i}(q;1/q)\cdot\delta G_i = C_i(q;1/q)\cdot\delta G_i. \quad (8)$$

Запишем с учетом (6) формулу (1) для уравнений сохранения контуров в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}(\delta\Delta p_i - \delta\Delta H_i) = 0; \quad \sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\delta\Delta p_i = \sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\delta\Delta H_i. \quad (9)$$

Подставляя выражение (4) в последнюю формулу, получим уравнения

$$\sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}}\delta\Delta p_{i\,j_i} = \sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\delta\Delta H_i,$$

при подстановке в которые уравнений (7), описывающих идеализированные элементы (ИдЭ), получим следующие окончательные уравнения (уравнения сохранения для контуров)

$$\sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\Big[\sum_{j_i=1}^{n_{эл,i}} C_{j_i}(q;1/q)\Big]\delta G_i = \sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\delta\Delta H_i, \; k=1,...,n_к \quad (10)$$

или с учетом (8)

$$\sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}C_i(q;1/q)\cdot\delta G_i = \sum_{i=1}^{n_в} b_{ki}\delta\Delta H_i.$$

Дополнив $n_к$ уравнений (10) $n_в - n_к$ уравнениями (2) (уравнениями сохранения для узлов)

$$\sum_{i=1}^{n_в} a_{ki}\delta G_i = 0; \; k=1,...,n_у-1; \; (n_у-1=n_в-n_к),$$

приходим к системе $n_в$ уравнений для $n_в$ переменных δG_i (вариаций расходов в $n_в$ ветвях системы).

В общую систему уравнений ПГЦ входят уравнения отдельных элементов, из которых состоят ветви цепи, и уравнения сохранения для узлов и контуров цепи.

Можно записать интегро-дифференциальное уравнение (8) для вариации перепада давления $\delta\Delta p_i$ в i-й ветви цепи, просуммировав согласно (4) уравнения для пассивных двухполюсных элементов (инерционности, сопротивления и ёмкости как упругого элемента), входящих в i-ю ветвь последовательно. (Как ёмкость в данном случае описывается непроточное устройство с упругим элементом; для ёмкостей других типов, «замыкающихся» на внешнюю среду, выделяется отдельная ветвь в цепи).

Если, в свою очередь, просуммировать такие уравнения для вариаций перепадов давления для всех ветвей замкнутого контура и ввести оператор дифференцирования $q = d/dt$, то вместо этих интегро-дифференциальных уравнений найдем уравнение контура в операторной форме, представляющее собой выражение для суммы вариаций перепадов давления в ветвях контура для пассивной его части.

Приравняв [согласно (9)] полученное выражение сумме вариаций перепадов давления на активных элементах-источниках напора, входящих в ветви контура, получим уравнение контура в операторной форме (10).

Уравнения сохранения для контуров (10) являются результатом объединения: уравнений сохранения для контуров (1), характерных выражений для вариаций перепада давления (4) и вариаций расхода (5) в ветвях из нескольких элементов, процедуры разделения параметров (6), уравнений (7), описывающих ИдЭ, из которых состоят ветви [2].

Используя систему $n_к$ уравнений сохранения для контуров (10) и $n_у-1=n_в-n_к$ уравнений сохранения для узлов (2), последовательно исключая переменные, можно выделить для каждой из вариаций параметров δG_i свое дифференциальное уравнение.

Таким образом, с помощью уравнений для ИдЭ мы исключили из уравнений сохранения вариации перепадов давлений $\delta\Delta p_{ij}$ и получили замкнутую систему уравнений для нахождения вариаций расходов δG_i.

Перепады давлений $\delta\Delta p_{ij}$ можно найти из тех же уравнений для ИдЭ, а перепады давлений $\delta\Delta p_i$ для ветвей найдем, просуммировав перепады давлений $\delta\Delta p_{ij}$ для соответствующих элементов, входящих в ветви. Перепады давлений $\delta\Delta p_i$ для ветвей находятся также и из уравнений ветвей (3), если известны сопротивления ветвей Z_{G_i} (сопротивления ветвей можно найти как сумму сопротивлений соответствующих элементов, входящих в ветви, включая внутренние сопротивления источников). Или, напротив, при рассчитанных вариациях расходов δG_i и вариациях перепадов давлений $\delta\Delta p_i$ по формуле (3) находятся сопротивления ветвей Z_{G_i}.

На основе системы, составленной из уравнений (10) и уравнений (2), разработан алгоритм и программа численного расчета процессов для определенного класса ПГЦ, конструируемых при помощи таких уравнений [3].

Литература

1. Барышов Д.П., Борисов Р.Б., Ермаков В.Ю., Скороглядов П.И., Сова А.Н. Формирование системы уравнений пневмогидравлической цепи для расчета функций состояния рабочей среды ПГС двигательной установки // Сборник научных трудов №6 по направлению «Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов». Часть 3. – 2011. – с. 36-41.

2. Барышов Д.П., Борисов Р.Б., Ермаков В.Ю., Скороглядов П.И., Сова А.Н. Формирование параметров при интегрировании дифференциальных уравнений пневмогидравлических цепей, описывающих ПГС агрегатов космических аппаратов // Сборник научных трудов №6 по направлению «Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов». Часть 3. – 2011. – с. 42-45.

3. Сова А.Н., Ермаков В.Ю., Барышов Д.П., Морозова Н.А., Скороглядов П.И. Разработка программно-алгоритмического обеспечения для расчета отклонений функций состояния рабочей среды в пневмогидравлической цепи двигательной установки КА «Луна-Ресурс» // Сборник научных трудов №6 по направлению «Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов». Часть 3. – 2011. – с. 46-62.

Материал поступил в редакцию 20. 03. 2012 г.