

УДК 681.5.015.24

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОГО АГРЕГАТА ДОЗИРОВАНИЯ ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ СЕТЕВОГО МЕТОДА

¹Бикташева А.Д., ²Денисова Е.В., ²Черникова М.А.

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,
e-mail: alfinadamirovna@gmail.com;

²Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН, Уфа,
e-mail: denisova.anrb@mail.ru, chernikovamarina18@gmail.com

Настоящая статья посвящена методике расчета статического режима работы гидромеханического агрегата дозирования топлива с помощью метода сетевых моделей. К особенностям сетевого подхода, примененного к агрегату дозирования топлива, можно отнести простое представление сложного устройства в виде графа, а также возможность описать потоки жидкости в нем, учитывать давление, координаты подвижных элементов, площади слива, диаметр и жесткость пружины, массу поршня и диаметр жиклеров. Предложенная методика позволяет рассчитать координаты подвижных элементов при заданной величине затяжки пружины. В результате разработано программное обеспечение для расчета статического режима работы агрегата дозирования топлива, которое позволит получить необходимое количество расчетов для проектирования гидравлических исполнительных механизмов. Матричное представление агрегата дозирования топлива согласуется с представлением двигателя в виде матриц, что в конечном итоге будет использовано в полунатурном стенде.

Ключевые слова: сетевая модель, агрегат дозирования топлива, статический режим, матрица инцидентов

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE STATIC OPERATING MODE OF A HYDRO-MECHANICAL FUEL DOSING UNIT BASED ON THE NETWORK METHOD

¹Biktasheva A.D., ²Denisova E.V., ²Chernikova M.A.

¹Ufa State Oil Technical University, Ufa, e-mail: alfinadamirovna@gmail.com;

²Institute of Mechanics R.R. Mavlyutova Ufa Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Ufa, e-mail: denisova.anrb@mail.ru, chernikovamarina18@gmail.com

This article is devoted to the method for calculating the static operating mode of a hydromechanical fuel metering unit using the network model method. The peculiarities of the network approach applied to the fuel metering unit include a simple representation of a complex device in the form of a graph, as well as the ability to describe the fluid flows in it, take into account the pressure, coordinates of the movable elements, the drainage area, the diameter and spring stiffness, the piston mass and the diameter of the jets. The proposed method allows to calculate the coordinates of the moving elements for a given value of the tightening of the spring. As a result, software has been developed to calculate the static mode of the fuel dosing unit, which will help to obtain the necessary number of calculations for further research. The matrix representation of the fuel metering unit is consistent with the representation of the engine in the form of matrices, which will eventually be used in a semi-stand.

Keywords: network model, fuel dosing unit, static mode, incidence matrix

В настоящее время в связи с быстрым развитием микропроцессорной техники основное внимание уделяется проектированию электронной части системы автоматического управления силовой установки (САУ СУ).

Существующие на данный момент методы расчета гидромеханической САУ СУ довольно неудобны для анализа систем управления, и требуют значительных вычислительных затрат. В частности, метод линеаризации нелинейных уравнений системы, хотя и позволяет найти статические значения параметров агрегата дозирования топлива (АДТ) системы управления, но требует применения разложения в ряд Маклорена, что приводит к значительным вычислительным затратам, и трудно поддается

формализации, что чрезвычайно важно при реализации расчетов на компьютере [1].

Поэтому значительный интерес представляет сетевой метод расчета АДТ, позволяющий производить расчеты посредством матричных операций, которые относительно легко формализуются и довольно просты в машинной реализации.

Целью работы является разработка методики расчета статического режима работы гидромеханической АДТ с точки зрения максимальной формализации метода для последующей реализации на компьютере. Реализация данного метода позволит значительно сократить время расчета, увеличить производительность труда инженера-конструктора [2].

Постановка задачи

Рассмотрим схему АДТ одного из поколений, которое относится к классу двумерных САУ (рис. 1).

Величина расхода топлива зависит от величины переменного сечения окна дозирующей иглы ($f_{иглы}$), величина которого в свою очередь определяется положением сервопоршня (на схеме не показан). При этом на переменном сечении окна $f_{иглы}$ поддерживается заданный перепад давлений $P_1 - P_2 = \text{const}$ с помощью двух клапанов постоянного перепада. Питание осуществляется от топливного агрегата ($P_n = \text{const}$).

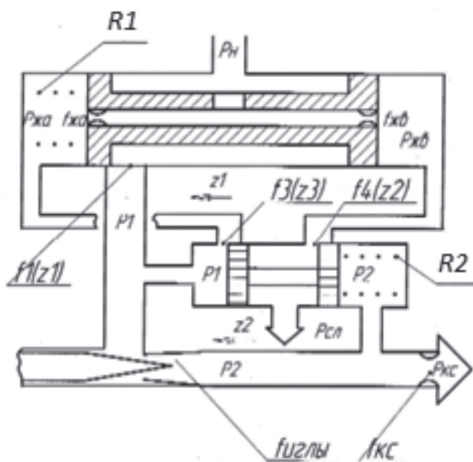


Рис. 1. Схема АДТ ($R1, R2$ – величины затяжки пружины; $z1, z2$ – координаты подвижных элементов; $f_{иглы}$ – величина переменного сечения окна дозирующей иглы; $f1(z1), f3(z3), f4(z2)$ – площади сечения трубопровода (или жиклера); P_n – давление от качающего узла; $P1$ и $P2$ – давление в клапане перепада в левой и правой полостях; $P_{сл}$ – давление слива; $P_{жс}$ – давление камеры сгорания; $f_{жс}$ – площадь форсунок камеры сгорания; $P_{жсб}$ – давление в левой полости; $P_{жсв}$ – давление в правой полости; $f_{жсб}, f_{жсв}$ – площади жиклеров в левой и правой полостях)

Рассмотрим, как будут меняться величины внутренних потоков Q и координаты подвижных элементов z_1, z_2 при изменении затяжки пружины R_2 . Для исследования этого процесса воспользуемся методикой моделирования дозирующего устройства сетевыми моделями.

Методы решения

Для моделирования АДТ с помощью сетевых моделей необходимо построить граф сети. На схеме АДТ места соединений потоков жидкости перенесем на граф сети в виде узла. Для каждого узла указывается давление P_i . Трубопроводы, которыми соединены

узлы, обозначаются дугами и указываются для них веса, которые равны значению $d(f)$:

$$d_i = \frac{1}{a\mu f^2}, \quad (1)$$

где f – площадь сечения трубопровода/жиклера, μ – коэффициент истечения.

$$a = \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}, \quad (2)$$

где $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$, γ – удельный вес топлива.

На граф (рис. 2) наносятся внешние потоки: Q_n – поток, поступающий в АДТ, $Q_{слива}$ – поток слива топлива (возврат в топливный бак), $Q_{жс}$ – поток топлива, поступающий в камеру сгорания.

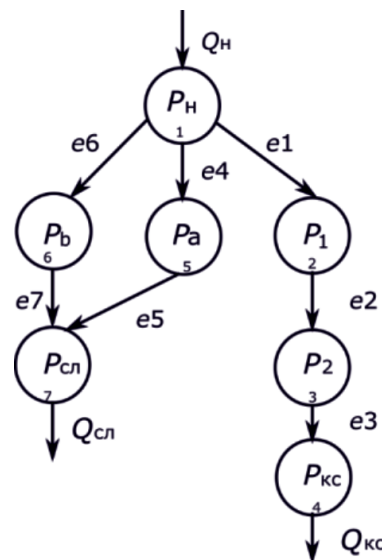


Рис. 2. Граф сети АДТ для расчета статических характеристик

Анализ статического режима гидромеханической системы сетевыми моделями

По условиям работоспособности АДТ в статическом равновесии ($z_1 = 0, z_2 = 0$) необходимо, чтоб разность давлений соответствовала заданной величине $P_1 - P_2 = 7,5 \text{ кг/см}^2$ [1].

Первая подсистема уравнений – это система дифференциальных уравнений, отражающая закон изменения координаты положения подвижных элементов (ПЭ) АДТ во времени:

$$m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = -c_i z_i + V_i, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, \dots, k$; c_i – эквивалентная жесткость пружины i -го ПЭ; m_i – масса i -го ПЭ; $V_i = -R_i + N_i \text{sign} z_i + F_i(P_{1i} - P_{2i})$ – возму-

шающая сила, воздействующая на i -й ПЭ; R_i – величина начального усилия на i -м ПЭ; N_i – сила трения покоя i -го ПЭ; F_i – площадь поперечного сечения поршня i -го ПЭ; P_{1i} и P_{2i} – давления в полостях, ограничивающих перемещение i -го ПЭ.

Из условий эксплуатации известны давления в узлах 1, 4, 7, а также конструкторские параметры, приведённые в табл. 1.

Требуется получить значения вектора внешних потоков системы Q_s . Вектор Q_s представляет собой внешние по отношению к системе потоки, втекающие в каждый ее узел. Знание величин этих потоков необходимо для проектирования силовой установки летательного аппарата. Его размерность равна количеству узлов графа АДТ. Если в узел не втекает внешний

Таблица 1

Конструкторские параметры

Исходные данные для расчетов								
m_1	0,18	кг	P_n	6 865 000	Па	Q_n	30000	л/час
F_1	0,014	м	$P_{кс}$	392 300	Па	$Q_{кс}$	4000	л/час
c_1	0,9022118	Н/м	$P_{слива}$	303 975	Па	$Q_{слива}$	26000	л/час
$d_{жа}$	0,008	м	f_2	78,155	мм ²	$P_1 - P_2$	735498,75	Па
$d_{жс}$	0,008	м	f_n	10	мм ²	μ	0,7	
m_2	0,03		$f_{кс}$	2,11	мм ²	a	819	
F_2	1,22	м	c_2	1,02969825	Н/м	h_3, h_4	2	

Для того, чтобы составить математическую модель АДТ, необходимо описать по известным формулам [3, 4] подсистему уравнений равновесия ПЭ; подсистему уравнений, обеспечивающих выполнение закона сохранения потоков в узлах (выписывается для всех узлов графа); подсистему уравнений, определяющих падение давления на различных участках сети в зависимости от величины потока.

Топология сети может быть описана с помощью матрицы соединений, или инцидентий A_i [3]. Матрица соединений – прямоугольная, число ее строк равно числу узлов, а число столбцов равно числу ветвей сети.

Для графа (рис. 2) составим матрицу соединений (инцидентий) и контурную матрицу данного графа.

Матрица соединений (инцидентий):

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Контурная матрица:

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1].$$

поток, то его величина принимается за ноль. Втекающие потоки записываются положительными значениями, а выходящие – отрицательными, при этом необходимо соблюдать баланс между ними. Для данной схемы вектора внешних потоков (значения даны в литрах в час) следующие:

$$Q_s = \begin{bmatrix} 30000 \\ 0 \\ 0 \\ -4000 \\ 0 \\ 0 \\ -26000 \end{bmatrix}.$$

Первому элементу вектора соответствует первый узел графа АДТ, второму – второй и т.д.

Методику расчета подсистем уравнений можно описать следующими этапами:

1. Задается величина затяжки пружины R_2 с учетом силы трения (как правило, известна из прототипа).

2. Определяется координата положения подвижного элемента:

$$z_2 = \frac{F_2 (P_1 - P_2) - R_2}{c_2}.$$

3. Величины d_3, d_4 определяются по формуле (1), где площадь сечения отверстий $f_4(z_2), f_3(z_2)$ определяются по формуле

$$f_i(z_2) = -\left(\frac{h_i^2 \varphi_{Ni}}{8} - \left(\frac{h_i}{2} - z_2\right) \sqrt{z_2(h_i - z_2)}\right), \quad \text{где}$$

$$\text{где } \varphi_{Ni} = 2 \arctg\left(\sqrt{\frac{\frac{h_i^2}{4}}{\left(\frac{h_i}{2} - z_2\right)^2 - 1}}\right) - \text{изме-}$$

нение угла при перемещении между f_i и z_i поршня, т.е. степень открытия или закрытия отверстия; h_i – разница между z_i и r_p , где r_i – радиус отверстия.

4. Величины внутренних потоков и величины давлений вычисляются по формулам

$$\begin{cases} A_i \cdot Q = Q_s \\ B \cdot d \cdot Q^2 = 0 \end{cases}$$

$$P' = (A_k)^{-1} \cdot R,$$

$$P' = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix},$$

$$A_k = \begin{bmatrix} a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} d_{11}Q_1^2 - a_{11}P_1 \\ d_{22}Q_2^2 - a_{21}P_1 \\ \dots \\ d_{nn}Q_n^2 - a_{n1}P_1 \end{bmatrix},$$

при условии, что $P_1 - P_2 = \text{const.}$

Таблица 2

Результаты расчета при заданной величине R_2

R_2 (задано)	R_1	z_1	z_2	P_b	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	Q_7
кг	кг	мм	мм	Па	л/час	л/час	л/час	л/час	л/час	л/час	л/час
2,60	5,640301	5,9948	6,3611	303975	4000	4000	4000	25944,499	25944,499	55,501	55,501
2,80	5,237850	5,5601	6,1669	303975	4000	4000	4000	25940,947	25940,947	59,053	59,053
3,00	4,855251	5,1467	5,9726	303975	4000	4000	4000	25936,963	25936,963	63,037	63,037
3,05	4,762583	5,0466	5,9241	303975	4000	4000	4000	25935,892	25935,892	64,108	64,108
3,10	4,671078	4,9477	5,8755	303975	4000	4000	4000	25934,789	25934,789	65,211	65,211
3,15	4,580723	4,8500	5,8269	303975	4000	4000	4000	25933,652	25933,652	66,348	66,348
4,00	3,208974	3,3670	5,0015	303975	4000	4000	4000	25907,723	25907,723	92,277	92,277

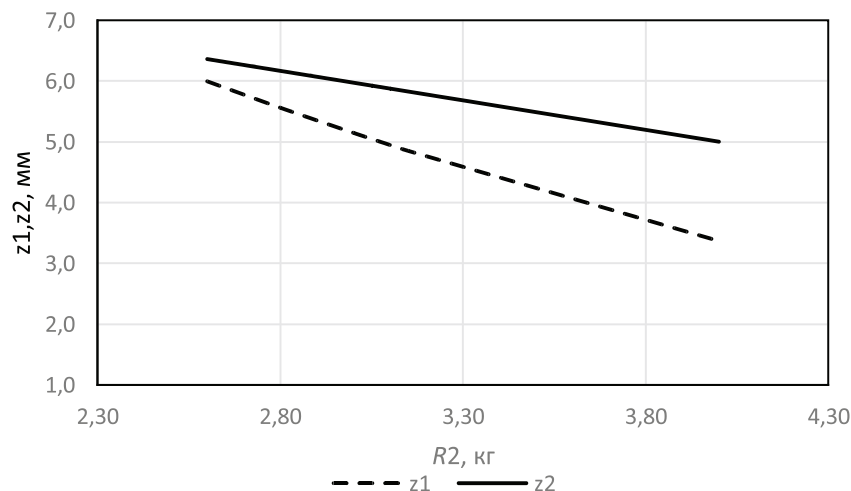


Рис. 3. График зависимости координат положения подвижных элементов (z_1, z_2) от величины затяжки пружины (R_2)

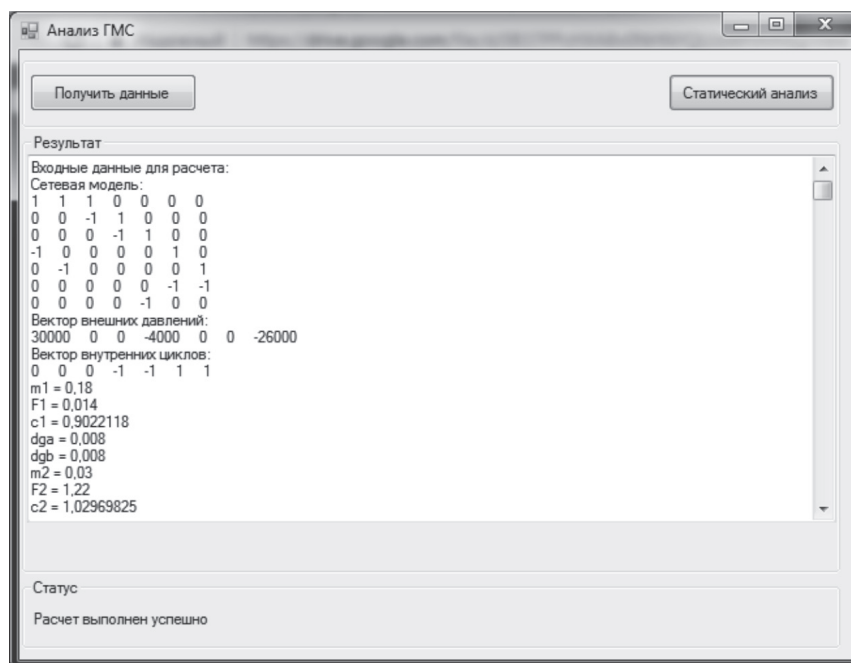


Рис. 4. Программное обеспечение для расчета сетевой модели АДТ

5. Вычисляется величина d_1 , из которого определяется $f_1(z_1)$, и перемещение подвижного элемента z_1 .

6. Определяется величина затяжки пружины R_1 по формуле $R_1 = F_1(P_a - P_b) - c_1 z_1$.

Результаты моделирования

В результате расчета статического режима получены следующие значения, приведенные в табл. 2, для заданной величины затяжки пружины R_2 .

В результате построен график зависимости координат положения подвижных элементов (z_1, z_2) от величины затяжки пружины (R_2).

На графике (рис. 3) видно, что координаты положения подвижных элементов (z_1, z_2) расходятся в зависимости от увеличения величины затяжки пружины.

Для того, чтобы рассчитать данные работы сетевой модели АДТ, было разработано программное обеспечение (ПО) с помощью Visual Studio 2015 (рис. 4), в данном ПО возможно загрузить данные с матрицей инцидентов, входные данные и провести статический анализ для заданных значений R_2 .

Заключение

В результате был проведен анализ работы гидромеханического АДТ в статическом режиме с помощью метода сетевых моделей. Представлена схема сложного АДТ в виде графа и систем уравнений, а также проведены расчеты. Использо-

на теория графов для представления конструкторской схемы АДТ в виде матриц. Разработано ПО, на основе которого проведены расчеты статического режима работы АДТ. Подход расчета параметров АДТ сетевыми моделями и его представление в матричном виде согласуется с матричным представлением режимов работы двигателя [5]. Такой единый подход к объекту управления САУ СУ в будущем планируется использовать на полунатурном стенде и в дальнейшем исследовании взаимной работы АДТ и двигателя с целью повышения качества управления.

Список литературы

1. Черкасов В.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
2. Борисенко А.А., Слотин О.Б., Сахибгареев Н.М., Жодзишский В.А., Каплан А.Б. Современные разработки систем автоматического управления двигателями ОАО «ОМКБ», проблемы и перспективы развития // Сборник тезисов всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». – М., ЦИАМ имени П.И. Баранова, 2015. – С. 838–840.
3. Проблемы проектирования и развития систем автоматического управления и контроля ГТД / С.Т. Кусимов, Б.Г. Ильясов, В.И. Васильев и др. – М.: Машиностроение, 1999. – 609 с.
4. Денисова Е.В., Насибуллаева Э.Ш., Насибуллаев И.Ш. Исследование динамических процессов в элементах топливной автоматики // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 5(158). – С. 31–36.
5. Денисова Е.В., Черникова М.А. Новый подход к проектированию систем автоматического управления силовых установок беспилотных летательных аппаратов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 12-1. – С. 13–18.