

УДК 621.452.2.043 + 621.822

В.Л. ДЖЕППА, А.А. ДУБРОВИНСКИЙ, М.И. КОШКИН

Государственное конструкторское бюро "Южное", Днепропетровск, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОНАСОСНОГО АГРЕГАТА

Рассмотрена конструктивная схема пневмонасосного агрегата "электромеханического" типа, в которой управление работой двух пневмогидроцилиндров осуществляется электропневмоклапанами с помощью электрического управляющего блока по сигналам датчиков конечного положения поршней. Получены зависимости, описывающие происходящие в агрегате процессы, составлена методика расчета основных проектных параметров пневмонасосного агрегата.

ракетная техника, подача компонентов топлива, пневмонасосный агрегат, пневмогидроцилиндр, рабочая жидкость, управляющий блок

В ракетной технике нашли применение в основном центробежные насосы с турбинным приводом. В последнее время проявляется интерес к пневмонасосным агрегатам (ПНА) с насосом и приводом объемного типа, особенно для подачи сравнительно малых расходов компонентов топлива.

Известны ПНА в виде чисто "механического" устройства, управление которым осуществляется посредством кинематического взаимодействия управляющих и исполнительных элементов [1 – 3], причем для работы требуется только подача сжатого газа. Такой ПНА очень трудоемок в изготовлении из-за сложности его конструкции и требует много времени для экспериментальной отработки.

При исполнении ПНА в виде "электромеханического" изделия управление его работой осуществляется специальным электрическим управляющим блоком, задействующим электропневмоклапаны (ЭПК) подачи и дренажа сжатого газа по сигналам датчиков конечного положения гидравлических поршней [4]. Для работы такого ПНА, кроме сжатого газа, требуется еще и электропитание, однако конструкция получается проще и легко отлаживается.

Схема ПНА "электромеханического" типа пред-

ставлена на рис. 1, а циклограмма его работы при максимальной производительности по расходу – на рис. 2.

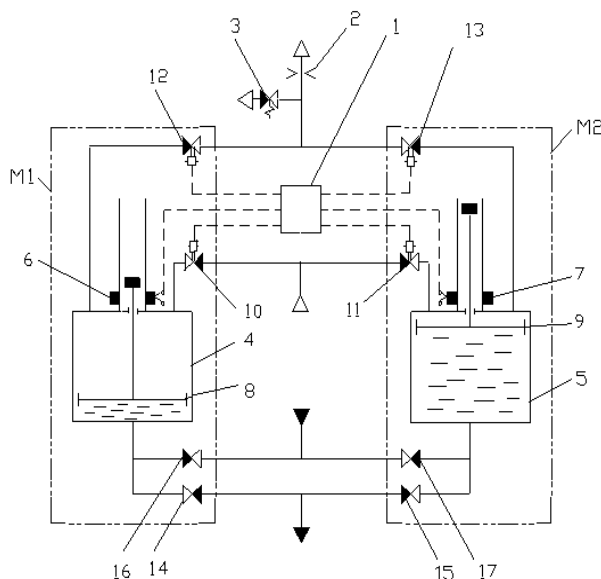


Рис. 1. Конструктивная схема ПНА "электромеханического" типа:

M1, M2 – модуль; 1 – управляющий блок;
2 – жиклер; 3 – предохранительный клапан;
4, 5 – пневмогидроцилиндр; 6, 7 – датчики конечного положения поршня; 8, 9 – поршень; 10...13 – ЭПК;
14...17 – обратный клапан

ПНА (смотри рис. 1) состоит из двух модулей M1 и M2, управляющего блока 1, жиклера 2 и предохранительного клапана 3. Каждый модуль M1 (M2) содержит пневмогидроцилиндр 4 (5) с ЭПК 10, 12 (11, 13) и обратными клапанами 14, 16 (15, 17).

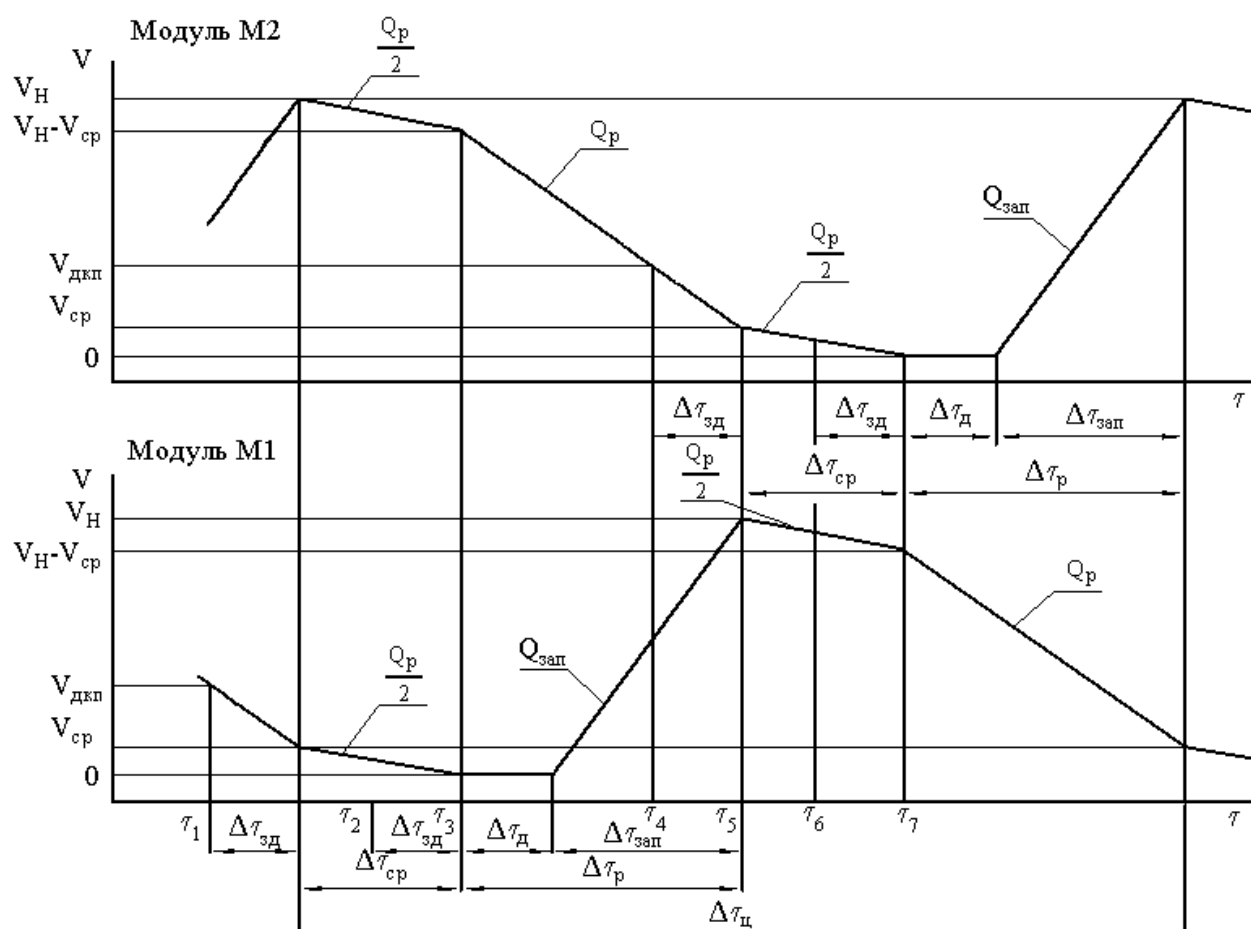


Рис. 2. Циклограмма работы ПНА при максимальной производительности

Пневмогидроцилиндры 4 и 5 снабжены датчиками 6 и 7 конечного положения поршней 8 и 9.

В исходном положении поршни 8 и 9 находятся в верхнем положении (на механическом упоре), подпоршневые полости заполнены рабочей жидкостью, ЭПК 10 и 11 закрыты, а ЭПК 12 и 13 открыты. По команде на задействование ПНА закрывается ЭПК 12 и открывается ЭПК 10. Поршень 8 под воздействием сжатого газа начинает двигаться вниз, обеспечивая расход рабочей жидкости к потребителю через обратный клапан 14.

Благодаря наличию электропневмоклапанов, электрического блока и датчиков конечного положения поршней каждый пневмогидроцилиндр подключается к работе раньше, чем происходит реверс поршня в другом. В процессе работы пневмонасоса поршни не достигают своих нижних механических

упоров, а время задержки срабатывания электропневмоклапанов (для обеспечения реверса поршней только после того, как давление рабочей жидкости в нагнетательной гидролинии другого пневмогидроцилиндра достигнет нужного значения), легко отработать настройкой электрического блока. Это обеспечивает отсутствие провалов давления рабочей жидкости на выходе из пневмонасоса.

Отсутствие в конструкции пневмонасоса кинематически связанных между собой движущихся элементов позволяет уменьшить число уплотнений, что приводит к повышению надежности.

Рассмотрим работу ПНА от момента времени, когда поршень 8 доходит до нижнего конечного положения (но не механического упора) и срабатывает датчик 6 (момент времени τ_1 на рис. 2). Управляющий блок 1 выдает команду на закрытие ЭПК 13 и

открытие ЭПК 11. Через время $\Delta\tau_{30}$, равное времени задержки срабатывания ЭПК, сжатый газ через ЭПК 11 поступает в надпоршневую полость пневмогидроцилиндра 5, обеспечивая подачу рабочей жидкости к потребителю через обратный клапан 15. Рабочая жидкость расходуется одновременно из двух пневмогидроцилиндров. В момент времени τ_2 подается команда на закрытие ЭПК 10 и открытие ЭПК 12, которая выполняется через время $\Delta\tau_{30}$. С момента времени τ_3 рабочая жидкость расходуется только из пневмогидроцилиндра 5.

В течении времени $\Delta\tau_0$ сжатый газ из надпоршневой полости пневмогидроцилиндра 4 срабатывает сначала через предохранительный клапан 3, затем через жиклер 2 при постоянном давлении в надпоршневой полости, а подпоршневая полость при этом заполняется рабочей жидкостью через обратный клапан 16 под давлением наддува бака с жидкостью.

Когда поршень 9 доходит до нижнего положения (но не механического упора), при котором срабатывает датчик концевого положения 7 (момент времени τ_4), подается команда на закрытие ЭПК 12 и открытие ЭПК 10, которая выполняется через время $\Delta\tau_{30}$ (момент времени τ_5). К этому времени поршень 8 должен дойти до своего верхнего положения (до механического упора). Под действием сжатого газа, поступающего через ЭПК 10, рабочая жидкость начинает расходоваться из пневмогидроцилиндра 4 через обратный клапан 14. Некоторое время ($\Delta\tau_{cp}$) рабочая жидкость расходуется одновременно из двух пневмогидроцилиндров.

В момент времени τ_6 подается команда на закрытие ЭПК 11 и открытие ЭПК 13, которая выполняется через время $\Delta\tau_{cp}$ (момент времени τ_7). Рабочая жидкость расходуется только из пневмогидроцилиндра 4 через обратный клапан 14, а пневмогидроци-

линдр 5 заполняется рабочей жидкостью через обратный клапан 17.

В дальнейшем в соответствии с описанным процессом поочередно задействуются модули М1 и М2.

Как видно из графических построений на рис. 2, для функционирования ПНА необходимо, чтобы время $\Delta\tau_p$ расходования жидкости только из одного модуля было равно или больше времени $\Delta\tau_0$ дренажа газа из надпоршневого объема и времени $\Delta\tau_{зан}$ заполнения жидкостью подпоршневого объема пневмогидроцилиндра

$$\Delta\tau_p \geq \Delta\tau_0 + \Delta\tau_{зан}. \quad (1)$$

Время расходования рабочей жидкости

$$\Delta\tau_p = \frac{V_n - 2V_{cp}}{Q_p},$$

где V_n – полезный объем насоса;

V_{cp} – объем жидкости, расходуемый из насоса при совместной работе модулей;

Q_p – объемный расход жидкости на выходе из ПНА.

С учетом того, что

$$V_{cp} = \Delta\tau_{cp} \cdot \frac{Q_p}{2},$$

где $\Delta\tau_{cp}$ – время совместного вытеснения жидкости из модулей, время $\Delta\tau_p$ можно выразить зависимостью

$$\Delta\tau_p = \frac{V_n}{Q_p} - \Delta\tau_{cp}. \quad (2)$$

Время заполнения подпоршневого объема рабочей жидкостью

$$\Delta\tau_{зан} = \frac{V_n}{Q_{зан}}, \quad (3)$$

где $Q_{зан}$ – объемный расход рабочей жидкости на входе в ПНА.

При дренажировании газа из постоянного надпоршневого объема в предположении изотермичности процесса

$$\frac{dP}{d\tau} = -\frac{RT}{V_H} G, \quad (4)$$

где P – давление газа;

T – температура газа;

R – газовая постоянная;

G – массовый расход газа.

Расход газа G при сверхкритическом истечении вычисляется по известной формуле

$$G = P\mu f \sqrt{\frac{k}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент расхода;

f – площадь жиклера;

k – показатель адиабаты.

Из-за наличия сил трения между поршнем и цилиндром, а также неравенства площадей поршня, на которые воздействуют газ и жидкость, давление газа и жидкости в пневмогидроцилиндре будут отличаться друг от друга. Для учета этого явления введем соответствующие коэффициенты $k_{зан} \geq 1$ и $k_p > 1$. Тогда связь между давлениями газа и жидкости можно выразить соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} P_{г зан} &= k_{зан} P_{ж зан}; \\ P_{сж г} &= k_p P_{ж п}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $P_{г зан}$ – давление газа в надпоршневом объеме при заполнении подпоршневого объема жидкостью;

$P_{ж зан}$ – давление жидкости в подпоршневом объеме при его заполнении;

$P_{сж г}$ – давление сжатого газа в надпоршневом объеме при вытеснении (расходовании) жидкости из подпоршневого объема;

$P_{ж п}$ – давление жидкости в подпоршневом объеме при ее расходовании.

При открытии дренажного ЭПК сжатый газ срабатывается сначала от давления $P_{сж г}$ до давления $P_{пр}$, на которое настроен предохранительный клапан, за пренебрежимо малое время по сравнению с временем истечения газа через жиклер от давления $P_{пр}$ до давления $P_{г зан}$.

Решая уравнение (4) с учетом (5), получим

$$\Delta\tau_0 = \frac{V_H}{\mu f \sqrt{kRT \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \cdot \ln \frac{P_{пр}}{P_{г зан}}. \quad (7)$$

Исходя из равенства абсолютных величин скоростей изменения объемов жидкости и газа при заполнении рабочей жидкостью подпоршневого объема

$$Q_{зан} = \frac{G}{\rho}, \quad (8)$$

где ρ – плотность газа.

Из уравнений (5) и (8) с учетом известного соотношения $\rho = P/(RT)$ получим

$$Q_{зан} = \mu f \sqrt{kRT \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (9)$$

Как видно из (9), объемный расход жидкости $Q_{зан}$ на установившемся режиме заполнения подпоршневого объема не зависит от давления газа над поршнем, а определяется только проходным сечением жиклера и температурой газа.

С учетом соотношения (9) формулу (7) можно записать в виде

$$\Delta\tau_0 = \frac{V_H}{Q_{зан}} \ln \frac{P_{пр}}{P_{г зан}}. \quad (10)$$

Из уравнения (1) после подстановки в него зависимостей (2), (3) и (10) получим

$$Q_{зан} \geq \frac{V_H \left(\ln \frac{P_{пр}}{P_{г зан}} + 1 \right)}{\frac{V_H}{Q_p} - \Delta\tau_{ср}}. \quad (11)$$

При выводе формулы (11) сделано допущение, что полезный объем жидкостной полости насоса равен максимальному объему надпоршневой полости, включая трубопроводы подачи и дренажа сжатого газа.

Расход рабочей жидкости при заполнении подпоршневого объема зависит от давления наддува бака P_0 , давления под поршнем $P_{ж зан}$, гидравлического сопротивления подводящей магистрали ξ_m

(включая обратный клапан ПНА) и плотности жидкости $\rho_{ж}$

$$P_0 - P_{ж\text{ зап}} = \xi_M Q_{зап}^2 \rho_{ж} \quad (12)$$

В ракетной технике компоненты топлива (рабочие жидкости) обычно насыщены газом. Поэтому при проектировании ПНА следует учитывать возможное образование несплошности в потоке рабочей жидкости при заполнении подпоршневого объема, связанное с понижением давления при прохождении подводящей магистрали.

В дальнейшем при выходе из ПНА возрастание давления должно привести к уменьшению объема газовых включений, однако количественно этот процесс описать сложно.

Указанные проблемы выходят за рамки настоящей работы, поэтому будем полагать, что для каждого конкретного случая всегда существует теоретическая или эмпирическая зависимость, которая определяет связь между допустимым перепадом давления на подводящей магистрали, ее гидравлическим сопротивлением и расходом рабочей жидкости

$$P_0 - P_{ж\text{ зап}} \leq F_1(Q_{зап}, \xi_M) \quad (13)$$

Приведенные соотношения позволяют рассчитать проектные параметры ПНА. Исходными данными для расчета являются:

1) теплофизические параметры рабочей жидкости и газа ее насыщения;

2) расход рабочей жидкости Q_p , давление в баке P_0 и в жидкостной полости пневмогидроцилиндра $P_{ж\text{ п}}$ (давление на выходе ПНА);

3) время задержки срабатывания ЭПК.

Расчет проводят в следующей последовательности.

а) из соотношений (6) находим $P_{сж\text{ г}}$;

б) При помощи уравнений (6), (12) и (13) находят аналитическую или графическую функциональную зависимость

$$F_2(Q_{зап}, \xi_M, P_{г\text{ зап}}) = 0; \quad (14)$$

с) радуются значениями $P_{пр}$ ($P_{пр} > P_{г\text{ зап}}$), $\Delta\tau_{ср}$ ($\Delta\tau_{ср} > \Delta\tau_{гд}$) и минимально возможной величиной ξ_M . Решая совместно систему уравнений (11) и (14), определяют $Q_{зап}$ и V_n ;

д) из уравнения (9) находим проходное сечение жиклера f ;

е) При помощи зависимостей (2), (3) и (7) вычисляют временные характеристики ПНА – $\Delta\tau_p$, $\Delta\tau_{зап}$, $\Delta\tau_d$ и продолжительность цикла ПНА

$$\Delta\tau_{ц} = 2(\Delta\tau_{ср} + \Delta\tau_d + \Delta\tau_{зап}).$$

В случае, если допустимый перепад давления на подводящей магистрали более чем на порядок превышает допуск на давление настройки предохранительного клапана ($P_{пр} > P_{г\text{ зап}}$, $\Delta\tau_d > 0$), тогда выражение (11) примет вид

$$Q_{зап} \geq \frac{Q_p}{1 - Q_p \cdot \Delta\tau_{ср}}.$$

Литература

1. А.с. СССР №1765510 А1, кл. F04B9/12. Пневмонасос / И.И. Калиниченко, В.Г. Курейчик, Ю.П. Просвирыков, С.П. Скороходов, Г.Г. Хохлов // Бюл. №36, 1992 г.
2. Патент Украины №57095, кл. F04B9/12. Пневмонасос / В.Н. Шнякин, В.Г. Курейчик, И.И. Калиниченко, С.А. Шевченко // Бюлл. № 6, 2003 г.
3. Пневмонасосный агрегат для систем подачи жидкостного ракетного двигателя / В.Н. Шнякин, В.Г. Курейчик, В.И. Конох, Г.Г. Хохлов, И.Ю. Кука. // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: НАКУ "ХАИ". – 2004. – Вып. 8/16. – С. 249 – 250.
4. Заявка на изобретение № а 2005 00019, кл. F04B9/12. Пневмонасос / В.Л. Джеппа, А.А. Дубровинский, М.И. Кошкин. Заявлено 04.01.2005.

Поступила в редакцию 4.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Габринцев, Национальная академия государственного управления при президенте Украины, Днепропетровск.