

УДК 621.05

Крутиков Г.А., Стрижак М.Г.

УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОАГРЕГАТОВ ЗА СЧЁТ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ТОРМОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА

Введение. Наиболее актуальными задачами при широкомасштабном использовании пневматики в современных производствах является расширение области её применения в сторону существенного увеличения инерционных нагрузок, а также необходимость в сопряжении пневматики с современными микропроцессорными средствами управления. При решении этих задач традиционные способы торможения, основанные на использовании встроенных и внешних тормозных дросселей, гидро- и пневмодемпферов, емкостей оказываются малоприспособными из-за отсутствия эксплуатационной гибкости и неспособности обеспечить безударное срабатывание пневмоагрегата (ПА) при больших инерционных нагрузках. Кроме того, при использовании традиционных способов торможения процесс торможения (управления) никогда не увязывался с возможностью эффективного энергосбережения.

Цель работы. Разработка новых способов и схем торможения в наибольшей степени пригодных для компьютерного управления, способных существенно расширить область эксплуатации в сторону больших инерционных нагрузок, а также осуществить более эффективное использование работоспособности сжатого воздуха.

Основное содержание. Для решения поставленных задач необходимо внедрение новых радикальных и надёжных способов торможения и позиционирования, способных не только обеспечить безударное срабатывание ПА с большой инерционной нагрузкой, но и добиться эффективного энергосбережения. Такими способами торможения являются способы, основанные на *изменении структуры коммутационных связей*.

При торможении путём изменения структуры коммутационных связей тормозной эффект создаётся за счёт перекрытия выхлопной полости, либо за счёт подачи в выхлопную полость воздуха из питающей магистрали. Если учесть, что в этом режиме и рабочая полость может менять объект подключения (переключаться на атмосферу, на другой уровень давления, заглушаться и т.д.), то возникает целый ряд высокоэффективных способов торможения.

Классификацию и индексацию схем торможения проведём в соответствии с состоянием коммутационных трактов в исходном состоянии и при торможении.

Уровень начального перепада давления на поршне (т.е. коммутация полостей цилиндра при фиксации рабочего органа) обозначается в индексе схемы первой римской цифрой (I – с начальным перепадом $p_M - p_A$, удерживающим поршень в крайнем положении; II – без начального перепада с атмосферным давлением в полостях цилиндра $p_A - p_A$; III – с уменьшенным перепадом давления $p_K - p_A$; IV – без начального перепада давления с магистральным давлением в полостях цилиндра $p_M - p_M$).

Варианты коммутации выхлопной полости в период торможения обозначаются в индексе схемы второй арабской цифрой 1, 2, 3, 4, а варианты коммутации рабочей полости рабочего органа (РО) в период торможения обозначаются в индексе схемы третьей буквой *a, б, в, г*.

Все варианты коммутаций в режиме торможения в соответствии с такой нумерацией для случая максимального начального перепада давления (индекс I) даны в таблице 1. Аналогичная таблица получается для вариантов исходного состояния с индексами II, III, IV.

Наиболее рациональный вариант схемы торможения транспортного ПА необходимо выбирать по следующим критериям: времени срабатывания ПА (τ), относительной массе сжатого воздуха, потреблённого в процессе одного срабатывания ПА (\bar{M}), эффективности использования сжатого воздуха (осреднённый за цикл КПД – η_{cp}), степени сжатия воздуха в тормозной полости (σ_{2M}), максимальному ускорению в период торможения ($\ddot{\xi}_M$); стоимости реализации данного способа торможения (c_m), возможности регулирования режима торможения без изменения тормозного пути.

Для объективного сравнения разных схем торможения необходима разработка универсальной математической модели с выделением основных критериев динамического подобия.

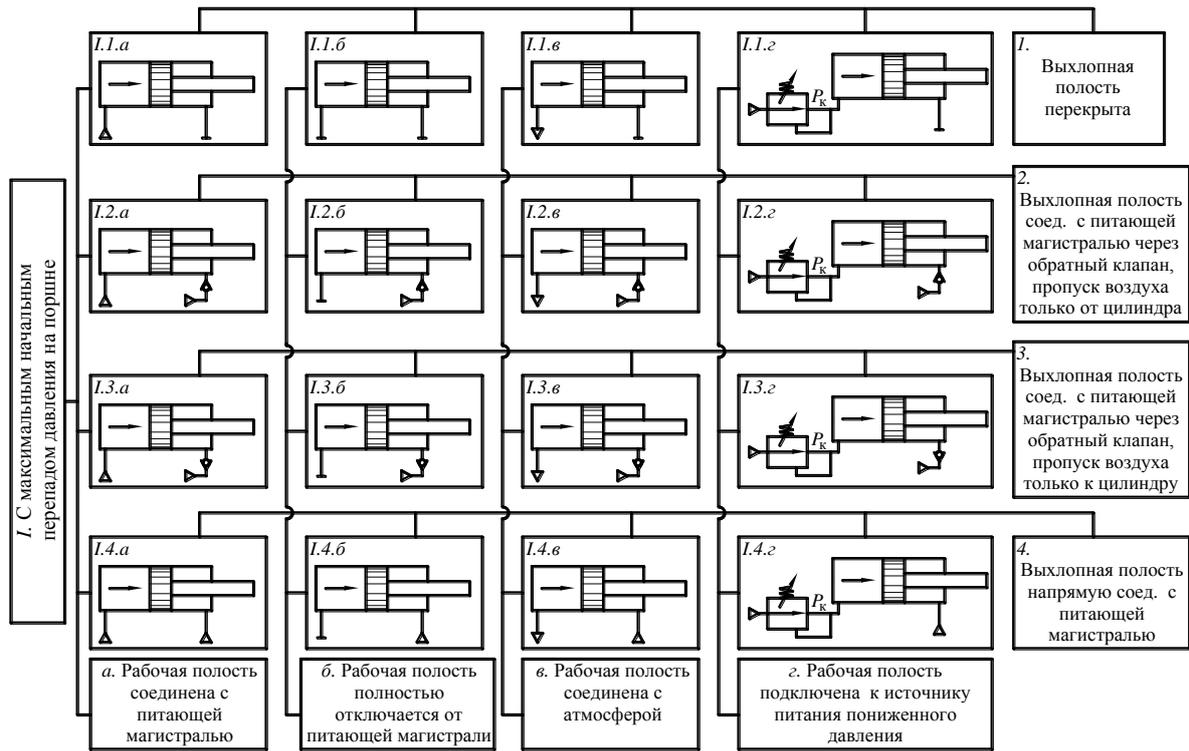
Для оценки схемы ПА в энергетическом отношении будем пользоваться понятием удельной работоспособности сжатого воздуха (l_p) на входе в ПА [2]. Удельная работоспособность l_p – это та часть удельной работы сжатия, произведенной над газом в компрессоре, которая в дальнейшем может быть использована для выполнения механической работы. Анализ процессов сжатия в $T - S$ координатах пока-

зывает, что независимо от характера термодинамического процесса в компрессоре удельную работоспособность воздуха после изобарного охлаждения в холодильнике компрессора в ресивере можно определить по выражению:

$$l_p = RT_M \ln(p_M/p_A), \quad (1)$$

где T_M и p_M – абсолютная температура и давление воздуха в магистрали после ресивера; p_A – атмосферное давление.

Таблица 1 – Варианты коммутации полостей ПА в фазе торможения



При таком подходе все тепловые потери между компрессором и входом в ПА относятся к КПД компрессора, а удельная работоспособность рассматривается как удельная работа в идеальном компрессоре при изотермическом сжатии.

Энергия сжатого воздуха, потребляемая в процессе одного срабатывания:

$$E = RT_M \ln\left(\frac{1}{\sigma_A}\right) \int_0^{t_{cp}} G dt \approx f_{1Э} p_M \sqrt{kRT_M} \ln\left(\frac{1}{\sigma_A}\right) \int_0^{t_{cp}} \varphi\left(\frac{p_1}{p_M}\right) dt, \quad (2)$$

где G – массовый расход воздуха; $f_{1Э}$ – эффективная площадь впускной пневмолинии; $\sigma_A = (p_A/p_M)$; t_{cp} – время срабатывания ПА с учётом подготовительного периода; k – показатель политропы.

$$\varphi\left(\frac{p_1}{p_M}\right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_M}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_M}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & \text{при } 0,528 \leq \frac{p_1}{p_M} \leq 1; \\ 0,579 & \text{при } 0 < \frac{p_1}{p_M} < 0,528. \end{cases}$$

Если проинтегрируем уравнение движения поршня, то получим:

$$F_1 \int_0^{t_{cp}} p_1 v dt = F_2 \int_0^{t_{cp}} p_2 v dt + \int_0^{t_{cp}} m v \frac{dv}{dt} dt + \int_0^{t_{cp}} P v dt, \quad (3)$$

где F_1 и F_2 – площади поршня со стороны нештоковой и штоковой полости; p_1 и p_2 – давления в нештоковой и штоковой полостях; v – скорость поршня; m – масса подвижных частей привода, приведенная к штоку; P – нагрузка на поршень.

Стоящий слева член представляет собой полную внешнюю работу, совершаемую сжатым воздухом в рабочей полости. Первый член справа – внешняя работа выталкивания воздуха из выпускной полости. При постоянной силе сопротивления P на поршне последний член в выражении (3) равен PL (где L –

ход поршня). Интеграл $\int_0^{t_{cp}} m v \frac{dv}{dt} dt$, который идентичен кинетической энергии, для ПА с полным тормо-

жением поршня к концу хода равен нулю. Но для оценки степени энергетического совершенства схемы ПА, для которого перемещение транспортируемой массы из одной точки пространства в другую является основной функцией, такой подход не отражает эффективности использования энергии сжатого воздуха в ПА. Будем оценивать степень энергетического совершенства ПА по осреднённому значению КПД η_{cp} .

Для этого в качестве полезной работы кроме величины PL будем учитывать осредненную за цикл кинетическую энергию подвижных частей привода:

$$T_{кин.ср} = \frac{m}{2t'_{cp}} \int_0^{t'_{cp}} v^2 dt, \quad (4)$$

где t'_{cp} – время движения поршня из начального положения в конечное.

$$\eta_{cp} = \frac{\frac{m}{2t'_{cp}} \int_0^{t'_{cp}} v^2 dt + PL}{f_{1\text{Э}} p_M \sqrt{kRT_M} \ln \left(\frac{1}{\sigma_A} \right) \int_0^{t'_{cp}} \varphi \left(\frac{p_1}{p_M} \right) dt} \quad (5)$$

или с использованием безразмерных параметров:

$$\eta_{cp} = \frac{\frac{\beta}{2\tau'_{cp}} \int_0^{\tau'_{cp}} \xi^2 d\tau + \chi}{\ln \left(\frac{1}{\sigma_A} \right) \int_0^{\tau'_{cp}} \varphi(\sigma_1) d\tau} \quad (6)$$

где $\beta = \frac{ML}{p_M F_1 t_6^2}$ – критерий инерционности (безразмерная масса) – отношение силы инерции при базовом

ускорении L/t_6^2 к максимальной силе, развиваемой поршнем $F_1 P$; $t_6 = \frac{F_1 L}{f_{1\text{Э}} a_M}$ – базовая единица време-

ни, численно равная времени заполнения рабочей полости цилиндра средой, движущейся со скоростью звука $a_M = \sqrt{kRT_M}$ через отверстие, равное эффективной площади $f_{1\text{Э}}$ впускного тракта; $\tau = t/t_6$ – безразмерное время; $\sigma_1 = p_1/p_M$; $\chi = P/(p_M F_1)$ – параметр статической нагрузки; $\xi = \chi/L$ – текущая безразмерная координата поршня.

Таким образом, осреднённый КПД ПА можно рассчитывать в ходе общего процесса численного интегрирования исходной системы уравнений в безразмерной форме, полученных на основе уравнений теплового баланса [1]:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_1}{d\tau} &= \frac{k}{\xi_{01} + \xi} \left[\varphi(\sigma_1) - \sigma_1 \frac{d\xi}{d\tau} \right]; \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} &= \frac{k}{1 + \xi_{02} - \xi} \left[\frac{\Omega \sigma_2^{2k}}{\prod_{21}^F} \varphi\left(\frac{\sigma_A}{\sigma_2}\right) - \sigma_2 \frac{d\xi}{d\tau} \right]; \\ \frac{d\xi}{d\tau} &= \dot{\xi}; \\ \frac{d\dot{\xi}}{d\tau} &= \frac{1}{\beta} \left[\sigma_1 - \prod_{21}^F \sigma_2 - \chi \right]; \\ \frac{dY}{d\tau} &= \frac{\beta \dot{\xi}}{2}; \quad \frac{d\bar{M}}{d\tau} = \varphi(\sigma_1), \end{aligned} \tag{7}$$

где ξ_{01} и ξ_{02} – безразмерные начальные координаты поршня в крайнем левом и правом положениях; $\prod_{21}^F = F_2/F_1$; $\Omega = f_{2\varnothing}/f_{1\varnothing}$.

Первые четыре уравнения системы (7) являются математической моделью типового двустороннего ПА [1], позволяющей найти такие параметры состояния ПА, как безразмерные давления в полостях σ_1 и σ_2 , безразмерный путь ξ и скорость $\dot{\xi}$ поршня. Два последних уравнения необходимы для определения КПД.

После завершения ПА цикла срабатывания и получения на основании численного интегрирования значений τ'_{cp} , Y и \bar{M} определяют η_{cp} привода:

$$\eta_{cp} = \frac{Y/\tau'_{cp} + \chi}{\bar{M} \ln(1/\sigma_A)}, \tag{8}$$

где \bar{M} – относительная масса сжатого воздуха, потреблённого ПА;

$$\bar{M} = \frac{M}{F_1 L \rho_M} = \int_0^{\tau_{cp}} \varphi(\sigma_1) d\tau, \tag{9}$$

где M – абсолютная масса воздуха, потреблённого ПА; ρ_M – плотность воздуха при его параметрах в питающей магистрали.

Величина \bar{M} численно равна отношению массы сжатого воздуха, потреблённого ПА в процессе полного срабатывания, к массе сжатого воздуха, необходимой для заполнения рабочего объёма пневмоцилиндра до давления, равного давлению воздуха в питающей магистрали (полное заполнение). Таким образом, система уравнений (7), дополненная и расширенная путём введения новых переменных Y и \bar{M} , позволяет получить в процессе её интегрирования необходимые для оценки энергетических характеристик параметры.

На рис. 1 представлены 10 наиболее характерных схем ПА с торможением за счёт изменения структуры коммутационных связей из 64 возможных вариантов, отражённых в табл. 1.

Для систематизации расчётов на ЭВМ результаты расчёта сведены в табл. 2, где в первой графе даётся индекс схемы, а в последующих графах даны основные динамические и энергетические параметры (τ , \bar{M} , η_{cp} , σ_{2M} , $\ddot{\xi}_M$, c_m) оговоренные выше. Расчёт проведен при одинаковых для всех схем условиях функционирования ($\beta = 5, \chi = 0,1$), что соответствует большой инерционной нагрузке.

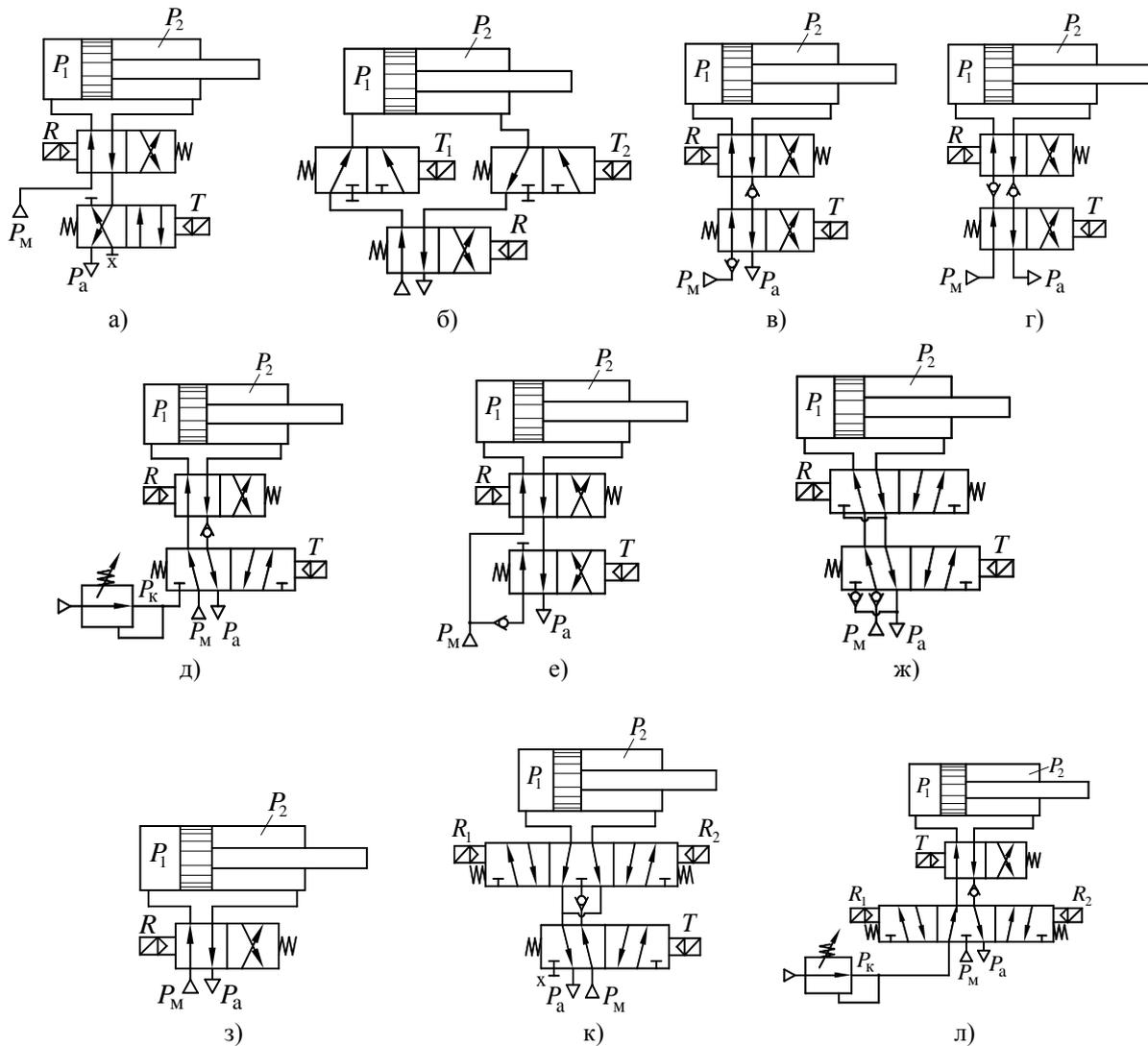


Рисунок 1 – Некоторые схемы при которых осуществляется эффективное торможение ПА (а – I.1.а, б – I.1.б, в – I.2.в, г – I.2.б, д – I.2.г, е – I.3.а, ж – I.3.б, з – I.4.в, к – II.1.б, л – II.2.г)

Для объективного выбора рациональной схемы торможения каждой схеме по всем показателям, предложенным в табл. 2, дана оценка в баллах (цифра под чертой). Схеме, имеющей наилучший показатель по какому-либо параметру, присвоена по этому параметру максимальная десятибалльная оценка. Остальным схемам присвоена более низкая оценка пропорционально ухудшению этого параметра. Коэффициент весомости каждой оценки определяется методом экспертных оценок [3]. Например, для транспортного ПА экспертная оценка коэффициентов весомости составляет: для τ – $k_\tau = 1,0$; для \bar{M} – $k_M = 0,95$; для η_{cp} – $k_\eta = 0,9$; для $\check{\xi}_M$ – $k_{\check{\xi}_M} = 0,7$; для σ_{2M} – $k_\sigma = 0,6$; для c_m – $k_{c_m} = 0,3$.

На основании этой информации подсчитывается комплексный показатель технического уровня К (сумма составленная из произведений коэффициентов весомости каждого показателя на оценку этого показателя).

$$K = k_\tau \cdot B_\tau + k_M \cdot B_M + k_\eta \cdot B_\eta + k_{\check{\xi}_M} \cdot B_{\check{\xi}_M} + k_\sigma \cdot B_\sigma + k_{c_m} \cdot B_{c_m}. \quad (10)$$

Схемы с индексом б и г отличаются от остальных (а и в) неполным заполнением рабочей полости сжатим воздухом, что обеспечивает расширение поданного в рабочую полость воздуха. Действительно,

удельная работоспособность сжатого воздуха состоит из двух компонент [2]: транзитной работоспособности (работы проталкивания) и потенциальной энергии сжатия (т.е. изотермического расширения):

$$l_p = RT_M \ln \frac{P_M}{P_A} + U + \frac{RT_M}{P_M} (P_M - P_A). \quad (11)$$

где U – удельная потенциальная энергия сжатия, которая может быть полностью реализована лишь при расширении по изотерме сжатого воздуха; $RT_M (P_M - P_A) / P_M$ – удельная работа проталкивания (транзитная работоспособность).

Таблица 2 – Основные показатели различных схем торможения

№ п/п	Индекс схемы	τ	\bar{M}	η_{cp}	$\ddot{\xi}_M$	σ_{2M}	c_m	Регул. торм. без изм. торм. пути	К
1	I.1.a	<u>7,4</u>	<u>1,15</u>	<u>0,122</u>	<u>0,325</u>	<u>4,14</u>	<u>2</u>	–	16,3
		9,0	1,4	1,6	2,3	2,4	5		
2	I.1.б	<u>7,65</u>	<u>1,15</u>	<u>0,119</u>	<u>0,23</u>	<u>2,4</u>	<u>3</u>	–	17,1
		8,7	1,4	1,5	3,2	4,2	2,3		
3	I.1.в	<u>7,5</u>	<u>1,48</u>	<u>0,098</u>	<u>0,22</u>	<u>2,03</u>	<u>2,2</u>	–	17,8
		8,9	1,1	1,3	3,4	4,9	4,5		
4	I.2.б	<u>8,35</u>	<u>0,78</u>	<u>0,158</u>	<u>0,085</u>	<u>1</u>	<u>3,2</u>	–	25,1
		8,06	2,2	2	8,8	10	3,1		
5	I.2.г	<u>8,51</u>	<u>0,85</u>	<u>0,148</u>	<u>0,07</u>	<u>1</u>	<u>3,5</u>	+	25,2
		7,8	2,01	1,8	10	10	2,9		
6	I.3.a	<u>7,1</u>	<u>1,36</u>	<u>0,116</u>	<u>0,39</u>	<u>4,8</u>	<u>2,3</u>	–	15,8
		9,4	1,2	1,5	1,9	2,1	4,3		
7	I.3.б	<u>6,96</u>	<u>1,28</u>	<u>0,121</u>	<u>0,396</u>	<u>4,32</u>	<u>3,2</u>	–	15,9
		9,6	1,3	1,6	1,9	2,3	3,1		
8	I.4.в	<u>8,16</u>	<u>1,41</u>	<u>0,092</u>	<u>0,093</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	–	24,9
		8,1	1,2	1,2	8	10	10		
9	II.1.б	<u>6,65</u>	<u>0,313</u>	<u>0,49</u>	<u>0,225</u>	<u>2,4</u>	<u>4</u>	–	26,3
		10	5,3	6,3	3,3	4,2	2,6		
10	III.2.г	<u>7,35</u>	<u>0,21</u>	<u>0,62</u>	<u>0,07</u>	<u>1</u>	<u>4,7</u>	+	38,67
		9,65	8,8	8,5	10	10	2,1		

Поэтому схемы с индексом б и г характеризуются более полным использованием работоспособности сжатого воздуха.

Наивысшим комплексным показателем технического уровня К обладает схема III.2.г, причём, большой отрыв этого показателя от аналогичных показателей для других схем, обеспечивается за счёт значительно более высоких по сравнению с другими схемами энергетических характеристик ($\bar{M} = 0,21$, $\eta_{cp} = 62\%$).

Карта управления пневмораспределителями, которая обеспечивает схеме III.2.г требуемый режим работы представлена в табл. 3.

Схема III.2.г работающая по этому алгоритму (табл. 3) обеспечивает потребление минимального количества сжатого воздуха и максимально возможное сокращение непроизводительной работы выталкивания воздуха из выхлопной полости.

Схемы I.2.г и III.2.г имеют кроме этого ещё одно существенное преимущество: возможность перенастройки режима торможения без изменения тормозного пути только за счёт настройки редукционного клапана. Это же свойство позволяет регулировать величину отрицательного ускорения при торможении,

что весьма существенно в целях предотвращения «пневмоотскока» после отключения тормозного распределителя.

Таблица 3 – Карта управления электромагнитами распределителей для схемы III.2.2

Ситуация		Управляющие сигналы электромагнита		
		T	R ₁	R ₂
Ход вправо BO	разгон РО	1	1	0
	торможение РО	1	0	1
	фиксация РО	1	0	0
Ход влево	разгон РО	0	1	0
	торможение РО	0	0	1
	фиксация РО	0	0	0

Схемы I.2.б I.2.2 имеют следующие достоинства:

- высокий тормозной эффект, создаваемый за счёт одновременного роста давления в тормозной полости и падения давления в рабочей полости;
- предохранение тормозной полости от высоких давлений за счёт возврата избытка воздуха в тормозной полости в сеть (рекуперация);
- ограничение ускорения при торможении и возможность создания плавного равнозамедленного режима торможения, причём для схемы I.2.2 появляется возможность регулировать величину этого ускорения;
- контролируемый и регулируемый импульс тормозного давления (в отличие от режима дроссельного торможения);
- неполное заполнение рабочего объёма сжатым воздухом, которое позволяет наряду с транзитной работоспособностью использовать и работу расширения сжатого воздуха;
- вторым источником улучшения энергетических характеристик является рекуперация в сеть сжатого воздуха из тормозной полости.

Наиболее рациональная с точки зрения минимизации энергозатрат схема III.2.2 кроме перечисленных выше преимуществ имеет:

- минимальные затраты сжатого воздуха на фиксацию поршня в конечном положении;
- минимизацию непроизводительной работы выталкивания воздуха из выхлопной полости.

Сравнительные энергетические характеристики для четырёх рассмотренных схем (рис. 2) даны на рис. 3 и свидетельствуют о возможности кардинального улучшения энергетической эффективности ПА за счёт выбора рациональной схемы торможения.

Кроме существенного улучшения энергетических характеристик необходимо отметить и довольно серьёзное расширение области использования пневмоагрегатов с торможением путём изменения структуры коммутационных связей в сторону увеличения инерционных нагрузок. Так переходные процессы на рис. 2, полученные при весьма значительных инерционных нагрузках ($\beta = 5$), свидетельствуют об обеспечении безударного срабатывания ПА даже в этом случае, тогда как область применения традиционного дроссельного торможения ограничена $\beta < 0,3$.

На рис. 4 показана осциллограмма переходного процесса в пневмоприводе продольного перемещения транспортёра автоматической линии IХАЛ78П, торможение которого осуществлялось по схеме I.2.2.

Основные параметры ПА: $D = 100$ мм, $L = 400$ мм, $f_{1Э} = 0,35 \cdot 10^{-4}$ м², $f_{2Э} = 0,245 \cdot 10^{-4}$ м², $m = 350$ кг, $P = 700$ Н, $p_M = 0,6$ МПа, $p_K = 0,3$ МПа, (давление настройки редуцированного клапана). Как видно из осциллограммы, на значительной части тормозного пути создаётся примерно постоянный перепад давления $p_2 - p_1$, что приводит к равнозамедленному режиму торможения. При этом характер изменения скорости близок к наиболее рациональному режиму – циклоидальному. Осциллограмма полностью подтверждает вывод о высокой эффективности предлагаемого способа торможения, который при сохранении высокого быстродействия ПА обеспечивает плавный режим торможения с заранее заданным ускорением даже при больших инерционных нагрузках.

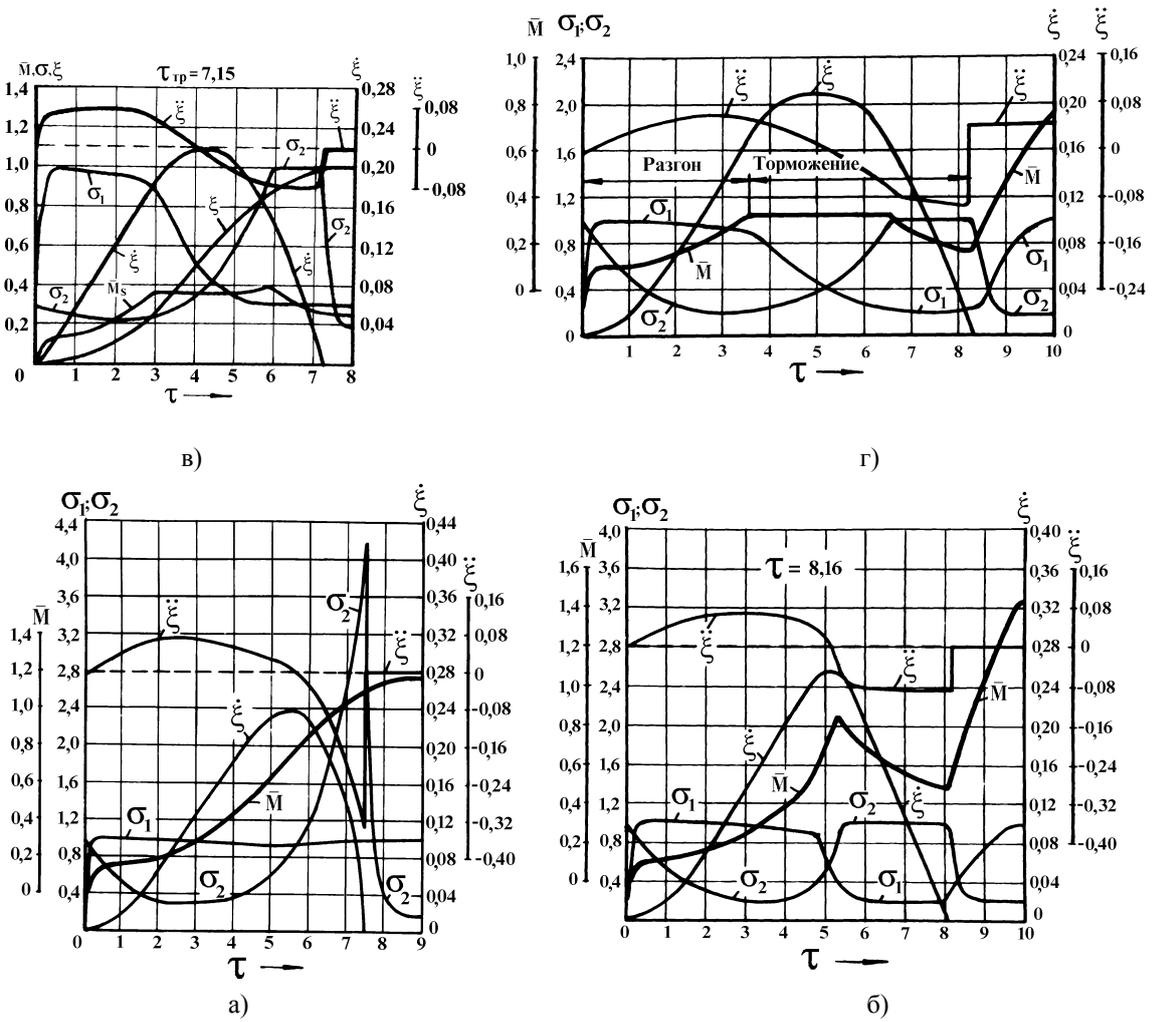


Рисунок 2 – Переходные процессы в безразмерной форме для некоторых схем из табл. 2 (а – I.1.б, б – I.4.в, в – I.2.б, г – III.2.з)

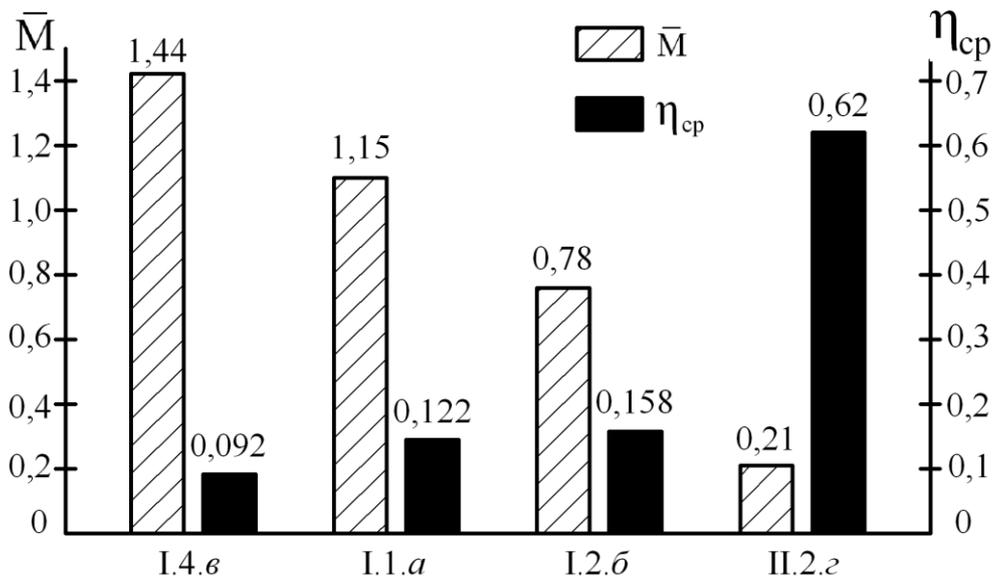


Рисунок 3 – Основные энергетические показатели разных схем торможения

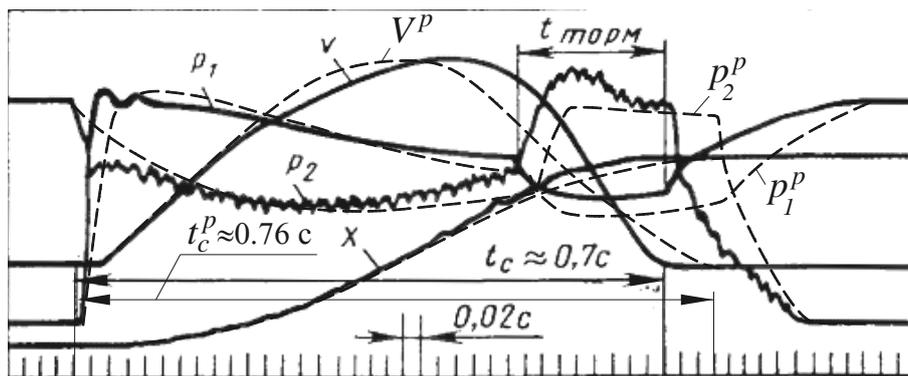


Рисунок 4 – Оциллограмма переходного процесса в пневмоприводе транспортёра автоматической линии
(- - - расчётный переходный процесс)

Выводы. Большое преимущество торможения ПА за счёт изменения структуры коммутационных связей в том, что они, в отличие от схем традиционного дроссельного торможения, обеспечивают контролируемый и регулируемый импульс тормозного давления, характеризуются плавным равнозамедленным режимом торможения, что в конечном итоге позволяет расширить область эксплуатации ПА в сторону значительно больших инерционных нагрузок. Возможность обеспечения наиболее оптимальных коммутационных связей для каждой фазы движения (схема III.2.2) позволяет также кардинальным образом улучшить основные эксплуатационные характеристики ПА и, прежде всего, обеспечить эффективное энергосбережение.

Литература

1. Герц, Е.В. Расчёт пневмоприводов // Е.В. Герц, Г.В. Крейнин Справочное пособие. – М.: Машиностроение. – 1975. – 272 с.
2. Крутиков, Г. А. Определение степени энергетического совершенства пневмоприводов дискретного действия // Г.А. Крутиков Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – Киев: Техніка. – 1985. – Вып. 21. – С. 82–86.
3. Функционально-стоимостной анализ пневматических приводов и устройств // Методические рекомендации для Минстанкопрома. Москва: ВНИИТЭМР. – 1986. – 58 с.

УДК 621.05

Крутіков Г.А., Стрижак М.Г.

ПОКРАЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОАГРЕГАТИВ ЗА РАХУНОК ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ГАЛЬМУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА

Розглянуті способи гальмування, що ґрунтуються на зміні структури комутаційних зв'язків. Обрані найраціональніші способи на основі комплексного показника технічного рівня. Показано, що відібрані таким чином схеми дозволяють розширити область використання пневмоагрегатів у бік суттєвого збільшення інерційних навантажень, а також здійснити ефективне енергозбереження.

Krutikov G., Strizhak M.

IMPROVING ENERGY AND DYNAMIC CHARACTERISTICS BY CHOICE PNEUMATIC UNITS MANAGEMENT BODY BRAKING MODE

The methods of braking based on the change in the structure of the commutation relations were considered. Selected on the basis of rational ways to the complex index of technological level. It is shown that the scheme selected in this way can extend the use of pneumatic units toward a substantial increase in the inertial loads, as well as implement effective energy conservation.