

УДК 621.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126635

*Визначена структура пневмопривода для автоматизації логістичних комплексів, що ґрунтується на зміні комутаційних зв'язків, яка забезпечує ефективне використання працездатності стисненого повітря. Проведений кількісний і якісний аналіз втрат енергії у пневмоприводі. Виділена область застосування енергозберігаючої схеми пневмопривода, яка дозволяє реалізувати інерційні навантаження у 10 разів вищі допустимих навантажень при дросельному гальмуванні і підвищити надійність його роботи*

*Ключові слова: пневмоприводи, гальмування, структура комутаційних зв'язків, збільшення інерційних навантажень*

*Определена структура пневмопривода для автоматизации логистических комплексов, основанная на изменении коммутационных связей, обеспечивающая эффективное использование работоспособности сжатого воздуха. Проведен количественный и качественный анализ потерь энергии в пневмоприводе. Выделена область применения энергосберегающей схемы пневмопривода, которая позволяет реализовать инерционные нагрузки в 10 раз превышающие допустимые нагрузки при дросельном торможении и повысить надежность его работы*

*Ключевые слова: пневмоприводы, торможение, структура коммутационных связей, увеличение инерционных нагрузок*

# ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМОПРИВОДОВ ЛОГИСТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ ИХ УПРАВЛЕНИЯ

**Г. А. Крутиков**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра гидропневмоавтоматики и гидропривода\*\*

E-mail: gkrutikov@gmail.com

**М. Г. Стрижак**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: marjanastryzhak@gmail.com

**В. В. Стрижак**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: stryzhak.vsevolod@gmail.com

\*Кафедра подъемно-транспортные  
машины и оборудования\*\*

\*\*Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
ул. Кирпичева, 2, г. Харьков, Украина, 61002

## 1. Введение

При решении задачи автоматизации погрузочно-разгрузочных работ в складских помещениях все чаще используются манипуляторы портального типа. Причем при реализации поступательных движений в манипуляторах этого типа наиболее рациональным является применение длинноходовых безштоковых пневмоцилиндров [1]. Такие цилиндры, обеспечивая предельную компактность манипулятора, обладают к тому же, в отличие от обычных цилиндров, большой радиальной жесткостью и выполняют роль направляющих движения. Необходимо также принять во внимание, что это самый дешевый, исходя из одновременных затрат, тип привода, отличающийся простотой, экологической чистотой, удобством передачи и утилизации энергоносителя. С другой стороны, сам сжатый воздух является одним из наиболее дорогих энергоносителей. Поэтому при использовании пневмоприводов в логистических комплексах актуальным является решение следующих задач:

- 1) энергосбережения и обеспечения плавного безударного торможения;
- 2) позиционирования рабочего органа привода в условиях достаточно больших инерционных нагрузок.

## 2. Анализ литературных источников и постановка проблемы

Прогресс в области автоматизации производственных процессов отмечен все большим распространением пневматических средств автоматизации. В работе [2] отмечается, что на производство сжатого воздуха в промышленно развитых странах уже сейчас приходится около 10 % в общем энергетическом балансе этих стран. Несмотря на то, что сжатый воздух является одним из наиболее дорогих энергоносителей, вопрос энергосбережения этого носителя остается одним из наименее изученных. В работах [2, 3] предлагаются разные способы экономии сжатого воздуха. Но среди них нет ни одного способа, связанного

с выбором рационального с точки зрения энергосбережения способа торможения и позиционирования рабочего органа пневмодвигателя. Один из способов сбережения сжатого воздуха в рамках всего предприятия предложен в работе [4]. Он предполагает отказ от использования одного единственного компрессора и синхронизацию включения и отключения группы компрессоров в зависимости от потребления сжатого воздуха в заводской сети. Однако вопросу энергоэффективности каждого отдельного потребителя (пневмопривода) внимания не уделяется. В отличие от предыдущих работ, в работе [5] ставится и решается задача повышения энергоэффективности отдельного пневмопривода. Это достигается за счет замены стандартного четырехлинейного пневмораспределителя двумя трехлинейными распределителями и выбора рациональной программы управления ими. К недостаткам работы следует отнести отсутствие теоретических исследований на основе математического моделирования. Это исключает возможность сделать обобщение и определить область рационального использования разработки. В работе [6] отмечается, что за последние 20 лет во всех вновь создаваемых проектах обязательно решается задача энергосбережения. Однако применительно к пневмосистемам это сделать не так просто из-за сложности процессов, протекающих в пневмоприводе. Поэтому предлагается использовать математическое моделирование при решении вопроса об энергосбережении в этих системах. Однако следует отметить, что предложенная в работе модель основана на устаревших представлениях. В частности, на предположении об изотермическом характере термодинамических процессов. В настоящее время хорошо известно (и это доказано), что наиболее корректным является политропический процесс с переменным показателем политропы для описания работы пневмопривода. В работе [7] обращается внимание на то, что нерациональное использование повышенного уровня давления приводит к завышенным энергозатратам. Предлагается в случае необходимости редуцировать давление перед потребителем или, наоборот, там, где нужно более высокое давление, использовать локальное устройство, подобное гидравлическому мультипликатору. Однако в данной работе отсутствует должная теоретическая разработка, позволяющая выбирать рациональные размеры этих устройств.

Обращает на себя внимание сравнительно небольшое количество публикаций, в которых вопрос энергосбережения связывается с процессом торможения и позиционирования рабочего органа пневмопривода. Традиционные способы торможения основаны на использовании внешних или внутренних дросселирующих устройств. Т.е. относятся сугубо к диссипативным методам торможения, преобразующим кинетическую энергию подвижных частей в тепловую [8].

Кроме низкой энергетической эффективности такие способы страдают отсутствием эксплуатационной гибкости, что затрудняет их использование в современных мехатронных системах [8, 9]. Способы торможения, основанные на изменении структуры коммутационных связей, где не используются дросселирующие устройства, позволяют расширить область использования силовой пневматики в сторону значительного увеличения инерционной нагрузки. Также благодаря использованию этих способов торможения удается добиться значительно более эффективной реализации работоспособности (эксергии) сжатого воздуха [10]. Авторы работы [5] обратили внимание

на важную особенность недиссипативного торможения за счет переключения коммутационных связей – возможность использования энергии торможения в виде потенциальной энергии сжатого воздуха в тормозной полости. Далее эта энергия рекупируется в сеть или используется для осуществления обратного хода рабочего органа. Однако материал, изложенный в работе [5], не содержит анализ области применения и исследование качественно и количественного характера энергопотерь.

### 3. Цель и задачи исследования

Цель работы – на основании качественного и количественного анализа потерь энергии в пневмоприводе (ПП) разработать и обосновать структуру ПП, обеспечивающего эффективное использование работоспособности сжатого воздуха, и определить области рационального использования энергосберегающей схемы ПП.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- обосновать наиболее рациональную структуру коммутационных связей для всех фаз движения рабочего органа ПП, обеспечивающих минимизацию непроизводительных энергозатрат;
- разработать энергосберегающую схему ПП и алгоритм ее управления;
- выделить и количественно оценить все компоненты энергозатрат при функционировании дискретного ПП;
- провести компьютерное моделирование на основе разработанной математической модели с целью определения области наиболее рационального использования энергосберегающей схемы ПП.

### 4. Материалы и методы исследования эффективности пневмопривода выбором рациональной схемы торможения и позиционирования рабочего органа

При торможении и позиционировании рабочих органов в ПП с большой инерционной нагрузкой все чаще находят применение способы торможения, основанные на изменении структуры коммутационных связей. Достоинством этих методов торможения является возможность реализовать для всех фаз движения рабочего органа (РО) ПП наиболее рациональные коммутационные связи. В результате этого появляется возможность обеспечить наиболее благоприятный закон торможения и реализовать безударное срабатывание ПП с большой инерционной нагрузкой. Также в этом случае возможным является наиболее полное использование энергии сжатого воздуха.

При создании пневматической системы управления (торможении) путем изменения структуры коммутационных связей возможны два диаметрально противоположных подхода. Первый ориентирован на минимизацию единовременных затрат, т.е. требует минимума аппаратов для реализации достаточно эффективного торможения РО ПП. Второй ориентирован на минимизацию эксплуатационных затрат, т.е. обеспечивает минимум затрат сжатого воздуха для реализации безударного высокоскоростного срабатывания ПП.

В качестве базовой (элементарной) структуры ПП с торможением путем изменения структуры коммутационных связей рассмотрим ПП с двумя трехлинейными

распределителями (рис. 1). Несмотря на наличие двух пневмораспределителей, набор коммутационных связей для обеспечения радикального торможения невелик и фактически ограничивается всего двумя вариантами (табл. 1). Состояние управляющих электромагнитов описывается булевыми переменными  $T_1$  и  $T_2$  (1 – электрический сигнал подан, 0 – электрического сигнала нет).

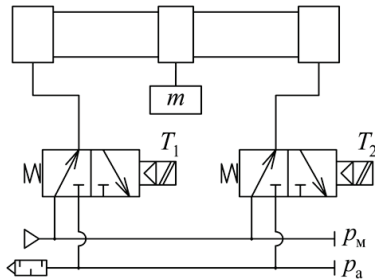


Рис. 1. Базовая (элементарная) схема пневмопривода (схема № 1):  $m$  – масса подвижных частей ПП;  $p_m$  – давление в магистрали питания ПП;  $p_a$  – атмосферное давление;  $T_1, T_2$  – булевы переменные, определяющие состояния управляющих электромагнитов ( $T=1$  – ток подан;  $T=0$  – ток отключен)

Таблица 1  
Карта состояний электромагнитов распределителей для схемы № 1

Ситуация		Состояние электромагнитов	
		$T_1$	$T_2$
Движение вправо	разгон	0	1
	торможение	1	0
	фиксация	0	1
Движение влево	разгон	1	0
	торможение	0	1
	фиксация	1	0

Наряду с надежным тормозным эффектом, данная схема обеспечивает высокое быстродействие и требует минимум аппаратов, поэтому часто рассматривается как эффективная схема ПП с большой и средней инерционной нагрузкой.

4. 1. Структурный синтез энергосберегающей схемы ПП

Принцип синтеза энергосберегающей схемы ПП заключается в том, что каждой фазе движения должны соответствовать наиболее рациональные с точки зрения энергосбережения и максимального быстродействия коммутационные ситуации. Представим их в виде таблицы (табл. 2).

Энергосберегающая схема ПП с торможением путем изменения структуры коммутационных связей, обеспечивающая реализацию всех коммутационных ситуаций табл. 2, представлена на рис. 2, а карта рационального управления распределительными клапанами этой схемы дана в табл. 3.

Для объективного сравнения эффективности этих способов управления ПП разработана универсальная математическая модель в безразмерной форме с выделением основных критериев динамического подобия [10].

Таблица 2  
Коммутационные ситуации для каждой фазы движения ПП

Движение вправо		Движение влево	
Фиксация левого положения		Фиксация левого положения	
Разгон		Разгон	
Торможение		Торможение	
Фиксация правого положения		Фиксация правого положения	

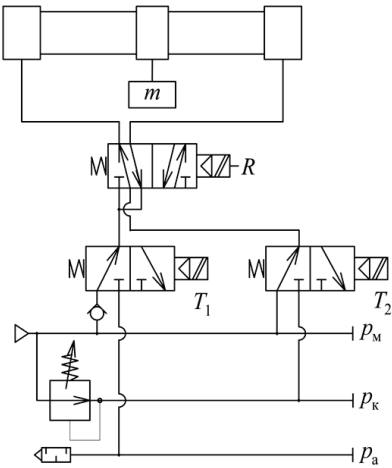


Рис. 2. Энергосберегающая схема пневмопривода (схема № 2)

Таблица 3  
Карта состояний электромагнитов распределителей для схемы № 2

Ситуация		Состояние электромагнитов		
		$T_1$	$T_2$	$R$
Движение вправо	разгон	1	0	0
	торможение	0	1	0
	фиксация	1	1	0
Движение влево	разгон	1	0	1
	торможение	0	1	1
	фиксация	1	1	1

#### 4. 2. Критерии динамического подобия и анализ энергозатрат в ПП с торможением путем изменения структуры коммутационных связей

В качестве основных критериев динамического подобия используются:

- критерий инерционности (безразмерная масса)  $\beta = \frac{mL}{t_0^2 p_m F_1}$ , численно равный отношению силы инерции подвижных частей ПП при базовом ускорении  $L/t_0^2$  к максимальной силе, развиваемой поршнем –  $p_m F_1$  (где  $p_m$  – давление питания,  $F_1$  – площадь поршня;  $L$  – полный ход поршня;  $t_0$  – базовая единица времени);
- параметр статической нагрузки  $\chi = P/p_m F_1$ ;
- базовая единица времени  $t_0 = \frac{F_1 L}{f_1^3 \sqrt{kRT_m}}$ , численно

равная времени заполнения рабочего объема цилиндра ( $F_1 L$ ) воздухом, движущимся со скоростью звука ( $a = \sqrt{kRT_m}$ ) через отверстие, равное эффективной площади впускного тракта  $f_1^3$ .

Методика нормирования дифференциальных уравнений, описывающих рабочие процессы в ПП, основывается на использовании безразмерного времени  $\tau = t/t_0$  и критериев динамического подобия. Эта методика позволяет до предела сократить большое количество конструктивных параметров в математической модели ПП, заменив их независимыми параметрами, определяющими его динамику.

Для оценки степени энергетического совершенства ПП используется понятие эксергии, т. е. удельной работоспособности [9]:

$$l_p = RT_m \ln \frac{p_m}{p_a} = U + \frac{RT_m}{p_m} (p_m - p_a). \quad (1)$$

Первый член, стоящий справа, соответствует потенциальной энергии расширения, второй член представляет собой удельную работу проталкивания, т. е. так называемую транзитную работоспособность.

Оценим степень энергетического совершенства ПП, нагруженных статической и инерционной нагрузкой с полным торможением рабочего органа в конце хода. Оценку целесообразно проводить с помощью осредненно-го за цикл КПД ( $\eta_{cp}$ ) и безразмерной массы сжатого воздуха, потребленного ПП при одном срабатывании ( $\bar{M}$ ) [9]:

$$\eta_{cp} = \frac{\beta}{2\tau'} \int_0^{\tau'} \xi^2 d\tau + \chi, \quad (2)$$

где  $\tau'$  – безразмерное время движения поршня из одной позиции в другую;  $\xi$  – безразмерная скорость поршня;  $\bar{M}$  – безразмерное количество сжатого воздуха, потребленного пневмоприводом;  $\sigma_a$  – безразмерное атмосферное давление:

$$\bar{M} = \frac{\int_0^{\tau} G d\tau}{F_1 L \rho_m} = \int_0^{\tau} \phi(I_1) d\tau, \quad (3)$$

где  $\rho_m$  – плотность воздуха при его параметрах в питающей магистрали;  $G$  – массовый расход;  $\tau$  – безразмерное время полного срабатывания ПП;  $\phi(I_1)$  – расходная функция:

$$\phi(I_1) = \frac{1 + \text{sign}(I - 0,528)}{2} \sqrt{\frac{2}{k-1} (I^{2/k} - I^{(k+1)/k})} + 0,579 \frac{1 - \text{sign}(I - 0,528)}{2}, \quad (4)$$

где  $I_1 = (\sigma_1/\sigma_{m1})^{\text{sign}(\sigma_{m1}-\sigma_1)}$  – отношение давлений на концах трубопровода ( $\sigma_{m1}$  – безразмерное давление в объекте коммутации рабочей полости цилиндра;  $\sigma_1$  – безразмерное давление в рабочей полости цилиндра).

На рис. 3 представлена сравнительная диаграмма затрат сжатого воздуха для пневмоприводов, работающих по схемам на рис. 1 (сплошная линия) и на рис. 2 (пунктирная линия). Результаты получены для ПП при  $\beta = 5$ ,  $\chi = 0,1$ ,  $\sigma_a = 0,2$ .

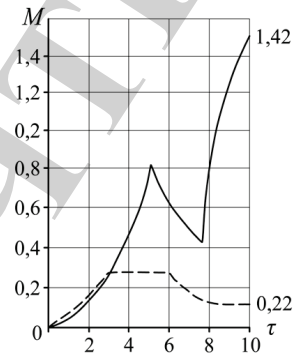


Рис. 3. Затраты сжатого воздуха при срабатывании ПП с базовой схемой № 1 (сплошная линия) и энергосберегающей схемой № 2 (пунктирная линия)

Большой расход сжатого воздуха для схемы на рис. 1 является следствием ее простоты, когда у ПП, имеющего три фазы движения рабочего органа вперед и три фазы при движении назад, существуют всего две коммутационные ситуации.

Эффект энергосбережения для схемы на рис. 2 заключается в том, что для каждой фазы движения реализуются наиболее рациональные коммутационные связи. В фазе разгона используется только транзитная работоспособность (1) поступающего сжатого воздуха. Но поскольку начальный перепад давления на поршне при фиксации был мал ( $p_k - p_a$ ), непроизводительная работа выталкивания сжатого воздуха из выхлопной полости была минимальной, что способствует также повышению быстродействия ПП. В фазе торможения коммутационная ситуация такова, что начинает использоваться потенциальная энергия расширения воздуха в рабочей полости. При этом из выхлопной (тормозной) полости осуществляется рекуперация в сеть сжатого воздуха после открытия обратного клапана.

В режиме фиксации дополнительно сжатый воздух из сети не потребляется и поршень удерживается минимальным перепадом давления ( $p_k - p_a$ ).

Энергетический баланс для сжатого воздуха, потребляемого ПП в процессе одного срабатывания, можно представить в виде следующей зависимости:

$$E_s - E_p = R_1 + E_{np} + E_{nh} + E_{mo} + E_{dp} + E_{\phi}, \quad (5)$$

где  $E_s$  – полная работоспособность сжатого воздуха, потребленного ПП в процессе одного срабатывания;



$E_{нр}$  – потеря работоспособности сжатого воздуха из-за неполноты расширения в рабочей полости цилиндра;  $E_{нп}$  – потеря работоспособности из-за несоответствия реально-го процесса расширения идеальному (изотермическому);  $E_{мо}$  – потеря работоспособности в мертвом объеме ци-линдра;  $E_{др}$  – потеря на дросселирование;  $R_1$  – внешняя механическая работа сжатого воздуха;  $E_{ф}$  – потеря, свя-занная с фиксацией сжатым воздухом рабочего органа в конечном положении;  $E_p$  – работоспособность сжатого воздуха, возвращенного в сеть в результате рекуперации.

Сравнительная диаграмма компонентов энергозатрат для схем № 1 и № 2 (рис. 4) получена при тех же условиях, что и диаграмма на рис. 3. Значения даны в безразмерной форме. Базовая единица энергии (работы)  $E_0 = p_a F_1 L$ .

#### 4. 3. Определение области рационального использо-вания энергосберегающего пневмопривода

Для определения области рационального использова-ния энергосберегающей схемы проведено компьютерное моделирование рабочих процессов в ПП. Рабочие про-цессы отражают разный подход при решении проблемы торможения рабочих органов ПП со средней и большой инерционными нагрузками. Расчеты охватывают достаточно широкую область существования ПП, представленную пространством критериев динамического по-добия  $\beta$  и  $\chi$  (рис. 5, 6). На рис. 5 представ-лена зависимость безразмерного времени срабатывания  $\tau$ , безразмерного тормозного пути  $\xi_t$ , среднего за цикл КПД  $\eta$  и относитель-ной массы сжатого воздуха  $\bar{M}$  от критериев динамического подобия  $\beta$  и  $\chi$ .

Анализ графиков на рис. 5 показывает, что схема № 2 обеспечивает безусловное сниже-ние энергозатрат по сравнению со схемой № 1 во всей области существования ПП. Наиболее существенное снижение энергозатрат дости-гается при  $\chi = 0 \div 0,1$ , а при  $\chi = 0,15 \div 0,3$  снижение существенно лишь при большой инерцион-ной нагрузке ( $\beta = 2 \div 5$ ). При больших значе-ниях  $\chi$  ( $\chi > 0,3$ ) и малых значениях  $\beta$  ( $\beta < 0,5$ ) использование ПП с энергосберегающей струк-турой становится нецелесообразным т.к. не приводит к заметному снижению энерго-затрат. Снижение энергетической эффекти-вности ПП, работающего по схеме № 2, в этой области объясняется следующим. Во-первых, отсутствием рекуперации в сеть из-за мало-го тормозного пути, во-вторых, недостаточно полным расширением сжатого воздуха в рабо-чей полости. Кроме того, меняется сам харак-тер доминирующих энергозатрат.

В фазе разгона используется в основном транзитная работоспособность сжатого воздуха (работа проталкива-ния), когда воздух является лишь кинематическим зве-ном, связывающим компрессор и пневмоцилиндр.

Основной вид потерь этой работоспособности – по-тери на дросселирование. С уменьшением параметра  $\beta$  (уменьшением инерционности) возрастает скорость дви-жения поршня и сокращается тормозной путь. При этом растут потери на дросселирование и потери, связанные с неполнотой расширения воздуха в рабочей полости.

На рис. 6 представлены графики, отражающие рост этих потерь с уменьшением  $\beta$ .

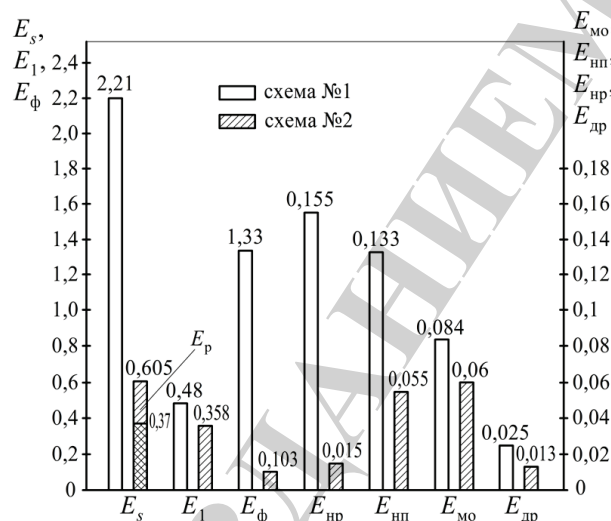


Рис. 4. Сравнительная диаграмма компонентов энергозатрат для схем № 1 и № 2

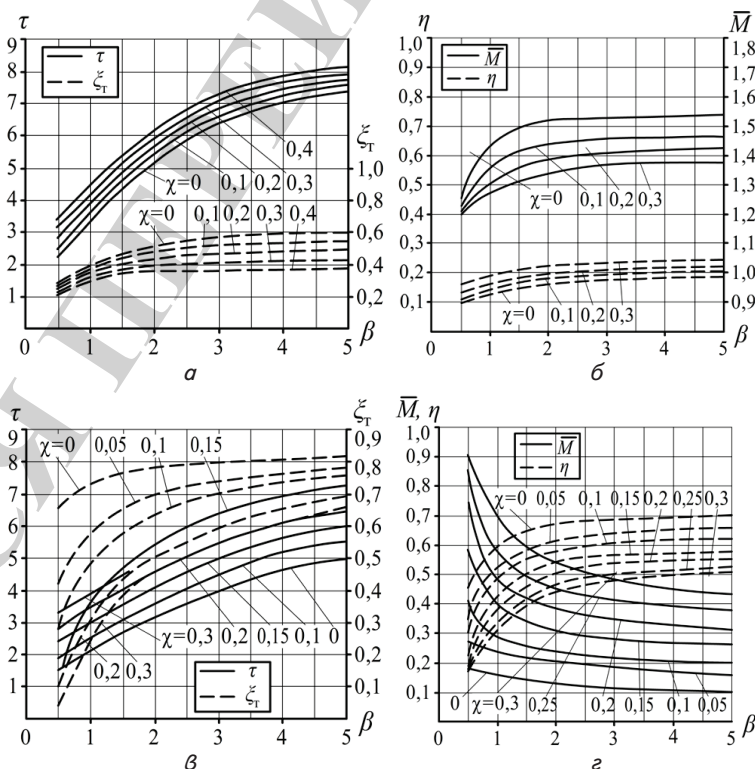


Рис. 5. Зависимость основных эксплуатационных характеристик ПП от критериев динамического подобия  $\beta$  и  $\chi$ : а, б – схема № 1; в, г – схема № 2

Нарастание потерь на дросселирование ( $E_{др}$ ) происхо-дит по экспоненциальному закону. Например, при  $\chi = 0,1$  с уменьшением  $\beta$  от 5 до 0,5 потери на дросселирование возрастают в 11 раз, составляя 1/4 от всей работоспо-собности потока сжатого воздуха, т.е. становятся основным видом потерь. Рост потерь из-за неполноты расширения также значителен и при тех же условиях увеличивается почти в 3,5 раза.

Графики на рис. 5 позволяют дать не только каче-ственную оценку эффективности использования энерго-сберегающей схемы, но и количественную ее оценку. Это позволяет провести сопоставление единовременных

и эксплуатационных затрат и принять обоснованное решение.

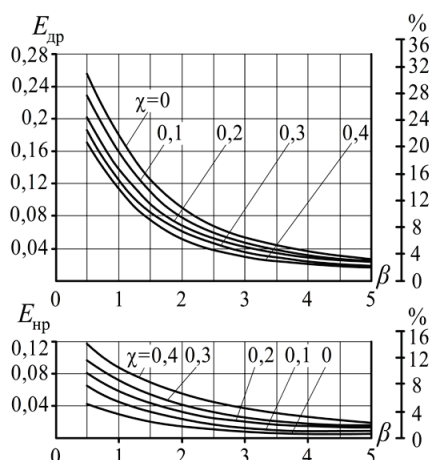


Рис. 6. Зависимость потерь работоспособности сжатого воздуха на дросселирование ( $E_{др}$ ) и из-за неполноты расширения воздуха в рабочей полости ( $E_{нр}$ ) от критериев  $\beta$  и  $\chi$

Пусть, например, пневмоцилиндр с  $D=100$  мм и  $L=400$  мм при  $p_m=0,5$  МПа и с присоединенной массой  $m=400$  кг преодолевает встроенную статическую нагрузку  $P=390$  Н, эффективная площадь впускного тракта  $f_1^0=0,71 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. При этих условиях  $t_0=0,128$  с;  $\beta=2,54$ ;  $\chi \approx 0,1$ . Относительная масса потребленного воздуха в соответствии с графиками на рис. 5 для схемы № 1:  $M_1=1,44$ , для схемы № 2  $M_2=0,22$ , базовая единица массы воздуха:

$$M_0 = \frac{F_1 L p_m}{RT_m} = \frac{0,00785 \cdot 0,4 \cdot 5 \cdot 10^5}{287 \cdot 293} = 0,0186 \text{ кг.}$$

Экономия сжатого воздуха за один цикл при переходе к энергосберегающей схеме составляет:

$$\Delta \bar{M} = M_0 (\bar{M}_1 - \bar{M}_2) = (1,44 - 0,22) 0,0186 = 0,0227 \text{ кг.}$$

При ресурсе пневмоцилиндра  $2 \cdot 10^6$  срабатываний за все время эксплуатации экономия составит  $M_s = 0,0227 \cdot 2 \cdot 10^6 = 45400$  кг или  $7643,1$  м<sup>3</sup> сжатого воздуха при  $p=0,5$  МПа.

При известной цене за 1 м<sup>3</sup> сжатого воздуха и при известной стоимости пневмоаппаратов можно провести сравнение эксплуатационных и единовременных затрат. Сравнительный анализ позволит принять решение о целесообразности использования энергосберегающей схемы привода.

## 5. Обсуждение результатов: область эффективного применения силовой пневматики

В случае традиционного дроссельного торможения процесс торможения рабочего органа при средней и большой инерционной нагрузке ( $\beta \geq 0,5$ ) сопровождается неконтролируемым характером изменения давлений в полостях цилиндров и движением поршня с развитым колебательным процессом. Предложенная схема тормо-

жения обеспечивает оптимальную форму переходного процесса. Высокий тормозной эффект достигается за счет одновременного роста давления в выхлопной полости и падения давления в рабочей полости вплоть до обеспечения постоянного отрицательного перепада давления  $p_m - p_k$ , при котором присутствует постоянное отрицательное ускорение при торможении. Причем уровень этого перепада давления зависит от настройки давления редукционного клапана  $p_k$ . Чем больше инерционная нагрузка, тем стабильнее поддерживается этот перепад. За счет этого область использования силовой пневматики удастся расширить практически на порядок в сторону увеличения инерционной нагрузки (вплоть до значения критерия инерционности  $\beta=5$ ).

Применяя такую схему можно добиться значительно более эффективного использования работоспособности сжатого воздуха за счет того, что:

- в фазе торможения (табл. 2, рис. 2) используется не только транзитная работоспособность, но и потенциальная энергия расширения сжатого воздуха в рабочей полости (1), что совершенно исключено в пневмоприводах с традиционной схемой дроссельного торможения и полным заполнением рабочего объема;

- энергия торможения, т. е. сжатый воздух, из тормозной полости не переходит безвозвратно в тепловую энергию, как в приводах с дроссельным торможением. Она возвращается через открывшийся обратный клапан при  $p_2 \geq p_m$  в питающую магистраль, т. е. реализуется режим рекуперации (пунктирная линия на рис. 3);

- значительно сокращаются затраты сжатого воздуха на фиксацию поршня в конечном положении при минимальном перепаде давления  $p_k - p_a$ , причем, давление  $p_k$  значительно меньше магистрального давления  $p_m$ .

- за счет минимального давления  $p_k$  в полости выхлопа в начальный момент движения поршня существенно сокращается непроизводительная работа выталкивания сжатого воздуха из выхлопной полости.

Такой комплексный характер снижения непроизводительных энергозатрат создает эффект энергосбережения, который позволяет в области рационального использования этого привода ( $\chi < 0,2$  и  $\beta < 2$ ) сократить энергозатраты в 4÷10 раз.

Отличительной особенностью изложенного материала по сравнению с аналогичными публикациями по данной тематике является значительно более высокий уровень обобщения полученных результатов. Благодаря использованию критериев динамического подобия вместо физических параметров, удалось распространить полученные результаты практически на всю область существования подобных приводов (графики на рис. 5, 6). Что дало возможность эффективно и наглядно определить область, в которой использование дискретного привода является рациональным.

На конкретном числовом примере показана инженерная методика решения с помощью этих графиков основной задачи функционально-стоимостного анализа, которая заключается в сопоставлении единовременных и эксплуатационных затрат при принятии решения о целесообразности использования новой разработки на практике. Такой подход предполагает в качестве основных критериев эффективности разработки использовать понятие экономической целесообразности.

Дальнейшим развитием предложенной разработки является переход к, так называемому, компрессионно-приводному режиму (резонансным пневмоприводам). Такие

агрегаты при работе в условиях больших инерционных нагрузок используют аккумулированный в результате торможения сжатый воздух непосредственно для обратного хода. Такой переход позволяет еще более эффективно реализовать работоспособность сжатого воздуха в приводе.

## 7. Выводы

1. Определена рациональная структура коммутационных связей в ПП, где каждой фазе движения соответствуют наиболее рациональные с точки зрения энергосбережения и максимального быстродействия коммутационные ситуации.

2. На основе наиболее рациональной структуры коммутационных связей построена пневматическая схема привода и алгоритм ее управления, энергосбережение в которой обеспечивается за счет того, что:

– в фазе торможения (табл. 2, рис. 2) используется не только транзитная работоспособность, но и потенциальная энергия расширения сжатого воздуха в рабочей полости;

– сжатый воздух из тормозной полости не переходит безвозвратно в тепловую энергию, а возвращается в питающую магистраль;

– сокращаются затраты сжатого воздуха на фиксацию поршня в конечном положении;

– за счет минимального давления  $p_k$  в полости выхода в начальный момент движения поршня существенно сокращается непроизводительная работа выталкивания сжатого воздуха из выхлопной полости.

3. Определены все компоненты потери работоспособности сжатого воздуха при функционировании пневмопривода (5), которые приводят к непроизводительным энергозатратам. Проведен сравнительный количественный анализ потерь энергии при использовании базовой и предложенной схем ПП.

4. Разработана методика определения области рационального использования энергосберегающего привода, основанная на выделении критериев динамического и энергетического подобия. Получены графики зависимости эксплуатационных характеристик ПП от критериев динамического подобия (рис. 5, 6), позволяющие распространить полученные результаты на всю область использования ПП. Предложенная методика позволяет рассчитать количество сжатого воздуха, потребляемого ПП с базовой и с оптимальной структурой коммутационных связей и сравнить полученные результаты в процентном и денежном эквиваленте.

## Литература

1. SMC Pneumatics. Пневматические средства автоматизации. Каталог фирмы SMC. 2011. 867 с.
2. Saidur R., Rahim N. A., Hasanuzzaman M. A review on compressed-air energy use and energy savings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010. Vol. 14, Issue 4. P. 1135–1153. doi: 10.1016/j.rser.2009.11.013
3. Parkkinen J., Zenger K. A New Efficiency Index for Analysing and Minimizing Energy Consumption in Pneumatic Systems // International Journal of Fluid Power. 2008. Vol. 9, Issue 1. P. 45–52. doi: 10.1080/14399776.2008.10781296
4. Mousavi S., Kara S., Kornfeld B. Energy Efficiency of Compressed Air Systems // Procedia CIRP. 2014. Vol. 15. P. 313–318. doi: 10.1016/j.procir.2014.06.026
5. Al-Dakkan K. A., Barth E. J., Goldfarb M. Dynamic Constraint-Based Energy-Saving Control of Pneumatic Servo Systems // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2006. Vol. 128, Issue 3. P. 655. doi: 10.1115/1.2232688
6. Transmission and Consumption of Air Power in Pneumatic System / Chen S., Youn C., Kagawa T., Cai M. // Energy and Power Engineering. 2014. Vol. 06, Issue 13. P. 487–495. doi: 10.4236/epe.2014.613042
7. Analysis of the Energy Efficiency of a Pneumatic Booster Regulator with Energy Recovery / Yang F., Tadano K., Li G., Kagawa T. // Applied Sciences. 2017. Vol. 7, Issue 8. P. 816. doi: 10.3390/app7080816
8. Кудрявцев А. И., Кудрявцев А. А. Пневматические системы и устройства в промышленности. Харьков: Формат, 2011. 479 с.
9. Крутиков Г. А., Стрижак М. Г. Свободнопрограммируемый дискретный пневмопривод с энергосберегающим режимом работы // Інтегровані технології та енергозбереження. 2012. № 1. С. 11–16.
10. Krytikov G., Strizhak M., Strizhak V. The synthesis of structure and parameters of energy efficient pneumatic actuator // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1, Issue 7 (85). P. 38–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.92833