

УДК 621.51

Крутиков Г.А.

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ПНЕВМОПРИВОДА С ТОРМОЖЕНИЕМ В КОНЦЕ ХОДА

Сжатый воздух является одним из наиболее дорогих энергоносителей, используемых в промышленности. Один килоджоуль энергии, получаемый от заводской сети сжатого воздуха обходится в семь-десять раз дороже, чем килоджоуль энергии, используемой в электроприводе [8]. Это связано с тем, что само производство сжатого воздуха требует дорогостоящего компрессорного оборудования и системы кондиционирования, включающей, кроме всего прочего, и систему влагоотделения.

Тем не менее, удельный вес этого вида энергии в современных производствах достаточно велик. На производство сжатого воздуха в промышленно развитых странах приходится в среднем около 10% из общего энергетического баланса [8].

Несмотря на это, энергия сжатого воздуха в пневмоприводах (ПП) с традиционной схемой подключения используется довольно нерационально, в результате чего сжатый воздух, обладающий довольно большой потенциальной энергией, просто выбрасывается в атмосферу из выхлопной полости привода [8]. Кроме того, при инерционной нагрузке на привод там, где используются тормозные устройства, не делается попыток осуществить рекуперацию в сети энергии торможения.

В статье показан один из путей существования повышения эффективности использования работоспособности сжатого воздуха в ПП.

Как показала практика эксплуатации ПП, хорошо зарекомендовала себя в технике гидропривода дроссельное торможение практически непригодно для ПП, нагруженного значительными инерционными нагрузками. Намного более эффективно работают ПП с торможением путем изменения структуры коммутационных связей [3].

Одно из наиболее важных преимуществ таких способов торможения – это возможность рационального использования работоспособности сжатого воздуха, которая приводит к существенному улучшению энергетических характеристик ПП [7].

В работе [3] дана классификация и приведены все возможные схемные решения для пневмоприводов с торможением путем изменения структуры коммутационных связей.

По степени использования энергии сжатого воздуха все ПП с торможением путем изменения структуры коммутационных связей можно разбить на 5 групп:

1. ПП с полным заполнением рабочего объема без использования энергии сжатого воздуха в тормозной полости исполнительного механизма.

2. ПП с неполным заполнением рабочего объема без использования энергии сжатого воздуха в тормозной полости.

3. ПП с полным заполнением рабочего объема и с использованием энергии торможения (рекуперация в сеть).

4. ПП с неполным заполнением рабочего объема и с использованием энергии торможения (рекуперация в сеть).

5. ПП с неполным заполнением рабочего объема и с использованием энергии сжатого воздуха в тормозной полости для совершения рабочим органом обратного хода.

В первом и третьем случаях используется только часть энергии сжатого воздуха – удельная работа выталкивания (транзитная работоспособность). Во втором и четвертом случаях используется, кроме того, потенциальная энергия расширения (сжатия).

Энергия торможения может быть либо возвращена в сеть (второй и четвертый случай), либо использована при обратном ходе для разгона поршня (пятая группа), т.е. для реализации компрессионно-приводного режима работы [6].

Самая простая (базовая) схема пневмопривода, которая дает возможность, тем не менее, осуществлять радикальное торможение, представлена на рис. 1 (схема № 1). Эта схема требует минимума одновременных затрат и в работе [1] рекомендована для больших инерционных нагрузок. Однако, "платой" за простоту аппаратной реализации, когда у привода, имеющего три фазы движения вперед и три фазы движения назад, существует всего две коммутационные ситуации, являются большие непроизводительные энергозатраты.

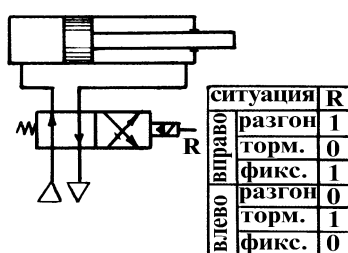


Рисунок 1

Расчёт внутренних переходных процессов в пневмоприводе произведен на ЭВМ по нелинейной математической модели пневмопривода в безразмерной форме. Целесообразность использования безразмерных параметров для исследования динамики пневмопривода изложена в работе [3]. Методика нормирования дифференциальных уравнений была подчинена принципу минимизации безразмерных комплексов [3]. При этом была достигнута наиболее простая форма записи уравнений, а оставшиеся после этого безразмерные комплексы независимых переменных были выделены как критерии динамического подобия.

Условия функционирования и конструктивные параметры привода в этом случае можно описать тремя основными критериями подобия: критерием инерционности B , критерием статической разгрузки χ и относительной эффективной площадью выхлопного тракта Ω . Причем базовая единица времени, минимизирующая количество критериев подобия, равна времени заполнения рабочего объема пневмопривода $F_1 \cdot L$ несжимаемой рабочей средой, движущейся со скоростью звука \dot{a}_M через отверстие, равное эффективной площади впускного тракта f_1^y

$$t_a = \frac{F_1 \cdot L}{f_1^y \cdot \dot{a}_M} = \frac{F_1 \cdot L}{f_1^y \cdot \sqrt{KRT_M}}, \quad (1)$$

где F_1 – площадь поршня; L – полный ход поршня; T_M – температура воздуха в питающей магистрали; R – газовая постоянная.

Основной критерий динамического подобия B также имеет вполне ясный физический смысл: отношение максимальной (индикаторной) силы, развиваемой поршнем, $F_1 \cdot P_M$ к силе инерции при базовом ускорении L/t_a^2 .

$$B = \frac{P_M \cdot F_1}{L \cdot m} \cdot t_a^2; \quad \chi = \frac{P}{P_M \cdot F_1}; \quad \Omega = \frac{f_2^y}{f_1^y}, \quad (2)$$

где m – масса, приводимая в движение поршнем пневмопривода; P_M – давление сжатого воздуха в питающей магистрали; f_2^y – эффективная площадь выпускного тракта пневмопривода.

На рисунке 2 представлен переходный процесс при срабатывании пневмопривода, работающего по схеме № 1. Расчет произведен при следующих параметрах: $B = 0,2$; $\chi = 0,1$; $\Omega = 1$. Такие параметры можно расценить как большая инерционная нагрузка и сравнительно малая статическая нагрузка.

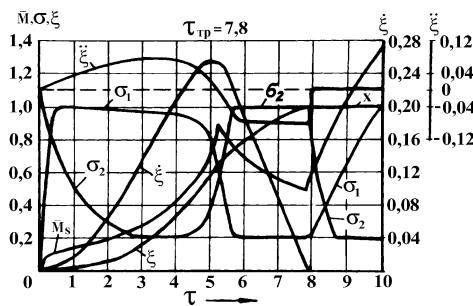


Рисунок 2

На графике выведены следующие безразмерные параметры: $\tau = t/t_a$ – безразмерное время; $\sigma_1 = P_1/P_M$; $\sigma_2 = P_2/P_M$ – безразмерные давления в рабочей и выхлопной полостях; $\xi = X/L$ – безразмерный путь; $\xi \dot{=} (X/L) \cdot t_a$ – безразмерная скорость; $\xi \ddot{=} (X/L) \cdot t_a^2$ – безразмерное ускорение; $\bar{M}_s = M_s / (\rho_M F_1 L)$ – относительное массовое количество сжатого воздуха, потребляемое из сети; $\rho_M = P_M / (R \cdot T_M)$ – плотность воздуха в питающей привод сети.

Из графика видно, что привод с такой схемой торможения эффективно осуществляет торможение, обеспечивая достаточно высокое быстродействие и благоприятный равнозамедленный режим торможения. При реализации режима торможения (при $\xi = \xi_{\text{отд}} = 0,56$) сжатый воздух подается в выхлопную полость, давление в ней резко возрастает и при достижении давления магистрали происходит частичная рекуперация в сеть. Кривая потребления сжатого воздуха $\bar{M}_s(\tau)$ в этот период падает вниз. Но затем при остановке исполнительного механизма пневмораспределитель переключается и вновь подает сжатый воздух в рабочую полость. Кривая потребления сжатого воздуха резко идет вверх и составляет 1,4.

Анализ переходного процесса показывает, что сжатый воздух, подаваемый в рабочую полость, работает без расширения, т.е. потенциальная энергия сжатия практически не используется. Этот воздух, обладающий еще большой работоспособностью в режиме торможения, просто выбрасывается в атмосферу. Для фиксации исполнитель-

ного механизма также используется избыточный перепад давления на поршне, что также приводит к перерасходу сжатого воздуха.

Принцип рационального проектирования энергосберегающей структуры пневмопривода заключается в том, что каждой фазе движения рабочего органа пневмопривода должны соответствовать наиболее оптимальные с точки зрения энергосбережения и максимального быстродействия коммутационные ситуации. В фазе фиксации поршня он должен удерживаться с помощью минимально необходимого перепада давления на поршне, причем меньшее давление должно соответствовать атмосферному, а воздух с более высоким давлением должен отбираться с выхода редуцирующего клапана (давление P_K). В фазе разгона рабочая полость, коммутируемая ранее с атмосферой, соединяется с магистралью питания (давление P_M), и выхлопная полость соединяется с атмосферой. Малое противодействие в выхлопной полости (бывшей рабочей) в начальной фазе движения обеспечивает наиболее быстрый разгон поршня. В фазе торможения рабочая полость через предварительно закрытый обратный клапан должна присоединиться к источнику пониженного давления (P_K), а выхлопная полость через предварительно закрытый обратный клапан присоединяется к магистральной линии питания (P_M). Это обеспечивает намного более полное использование работоспособности сжатого воздуха в рабочей полости, рекуперацию энергии торможения в питающую магистраль и примерно постоянный перепад давления на поршне в заключительной фазе торможения (равнозамедленный режим торможения). После остановки следует режим фиксации, при котором рабочая полость коммутируется с источником пониженного давления (P_K), а выхлопная полость коммутируется с атмосферой.

Аналогично описываются оптимальные связи и при обратном ходе поршня. Таким образом, для двух полостей цилиндра (II – поршневая, III – штоковая) необходимы четыре объекта коммутации полостей цилиндра: магистраль высокого давления; магистраль высокого давления через предварительно закрытый обратный клапан; магистраль пониженного давления и атмосфера.

Разнесенная схема [2], с помощью которой описываются все желаемые коммутационные ситуации для каждой фазы движения представлены на рис. 3.

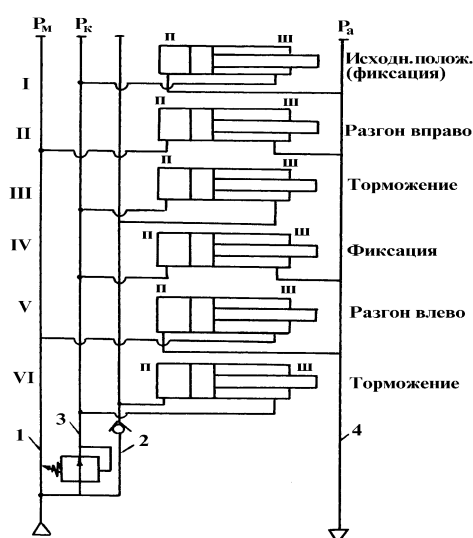


Рисунок 3

На основе разнесенной схемы разбивая граф ситуаций (рис. 4) на две макроситуации А и Б выбираем вариант оптимального соединения пневмоцилиндров с помощью четырехлинейного двухпозиционного пневмораспределителя (рис. 5).

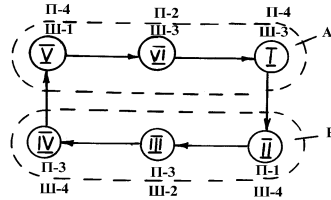


Рисунок 4

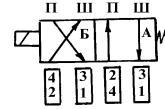


Рисунок 5

Этот вариант коммутаций окончательно реализуется путем введения двух дополнительных трехлинейных распределителей (рис. 6).

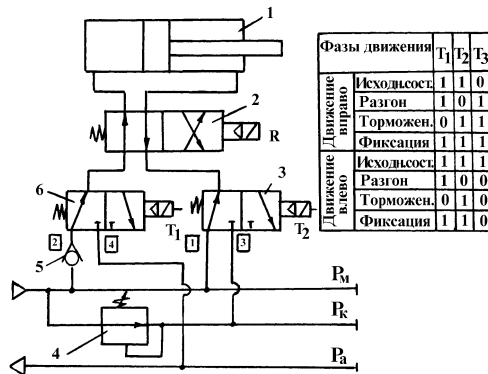


Рисунок 6

Таким образом, пневматическая схема № 2 на рис. 6 совместно с программой управления распределителями, данной на том же рисунке в виде таблицы, позволяет получить энергосберегающую структуру пневмопривода [9]. В этой схеме фиксации поршня в конечном положении используется не максимальный, а минимально необходимый перепад давления, который точно согласуется с действующей встречной нагрузкой χ . Давление настройки редукционного клапана $\sigma_\epsilon = p_\epsilon / p_i$ в этом случае выбирают из равенства

$$\sigma_\epsilon = \Pi_{21} \cdot \sigma_a + \chi, \tag{3}$$

где $\Pi_{21} = F_2 / F_1$ – отношение площадей поршня; $\sigma_a = p_a / p_i$ – относительное атмосферное давление.

Представленный на рис. 7 переходный процесс данного привода свидетельствуют о существенном снижении энергозатрат привода при одновременном увеличении быстродействия. В отличие от базового привода (схема № 1) теперь значительно большая часть энергии потока сжатого воздуха, поданного в рабочую полость, расходуется на совершение внешней механической работы газа, поскольку кроме транзитной рабо-

тоспособности используется и потенциальная энергия расширения. Внешняя работа газа в рабочей полости, к тому же, существенно меньше, чем в базовой схеме, за счет уменьшения работы выталкивания из выхлопной полости из-за более низкого уровня противодействия в выхлопной полости при трогании поршня. Таким образом, снижение давления, используемого для фиксации, улучшает энергетику дискретного пневмопривода двояким образом.

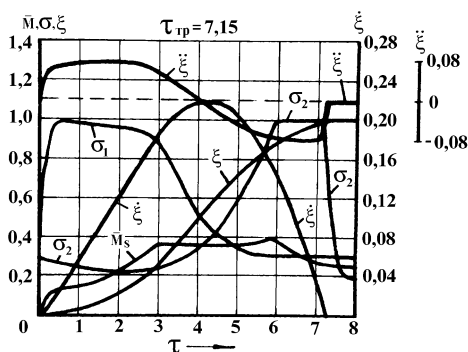


Рисунок 7

Особенности структуры и функционирования пневмопривода, работающего по схеме № 2, которые обеспечивают существенное снижение энергозатрат и повышение его быстродействия, следующие:

1. В фазе разгона из-за малого противодействия привод разгоняется быстрее, подготовительный период практически отсутствует. Поэтому, несмотря на увеличение сопротивлений линий, связанного с установкой дополнительных пневмоаппаратов, быстродействие привода увеличивается. Из-за уменьшения работы выталкивания из выхлопной полости уменьшается и внешняя механическая работа газа в рабочей полости. При этом возрастает необходимый тормозной путь, т.е. момент перекрытия подачи воздуха в рабочую полость наступает раньше, и потребленная масса сжатого воздуха уменьшится.

2. Если в фазе разгона используется в основном транзитная работоспособность сжатого воздуха (работа проталкивания), когда воздух выступает лишь как связующее кинематическое звено между компрессором и пневмоцилиндром, то в фазе торможения для совершения внешней механической работы используется потенциальная работа сжатия (расширения). Чем длиннее фаза торможения, тем полнее используется энергия расширения. Тормозной эффект создается за счет одновременного падения давления в рабочей полости и роста давления в тормозной полости. При достижении давления в тормозной полости давления магистрали происходит рекуперация сжатого воздуха в сеть. При падении давления в рабочей полости в фазе торможения ниже давления настройки редукционного клапана он открывается и поддерживает постоянное давление. Энергию сжатого воздуха, поданную через редукционный клапан, можно расценивать как энергозатраты на фиксацию поршня. Причем эти затраты значительно меньше, чем в предыдущем случае.

3. В фазе фиксации сжатый воздух удаляется из выхлопной (тормозной) полости, а состояние рабочей полости остается без изменений, т.е. потребления сжатого воздуха из сети нет.

Как видно из сравнения переходных процессов на рис. 2 и 7 несмотря на многократное снижение затрат сжатого воздуха с 1,41 до 0,24 в безразмерной форме динамики пневмопривода не только не ухудшилась, но и улучшилась (время срабатывания уменьшилось с 8,00 до 7,15).

Обобщенная диаграмма на рис. 8 свидетельствует, что переход от простых схем к схемам, построенным исходя из минимизации энергозатрат, даёт возможность существенно улучшить энергетические и динамические характеристики.

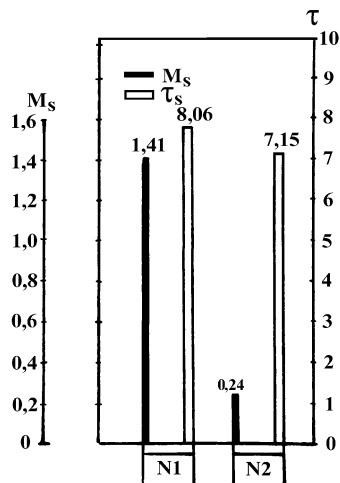


Рисунок 8

Выводы

Анализ энергопотерь в базовой схеме пневмопривода позволил сформулировать требования к выбору наиболее рациональной коммутационной ситуации для каждой фазы движения рабочего органа пневмопривода. Реализация этих требований с помощью формализованного синтеза позволил создать предельно простую схему и порядок включения распределителей, ориентированные на максимальное энергосбережение при работе привода с одновременным улучшением динамических характеристик. Причем, реализация предложенной структуры привода доступна для практического использования и не требует больших единовременных затрат.

Разработанный пневматический модуль можно с успехом использовать и для более сложных свободнопрограммируемых пневмоприводов с микропроцессорным управлением [5].

Литература

1. Зорин А.С., Пашков В.М., Солнцева К.С. Исследование торможения пневмопривода противодавлением // Пневматика и гидравлика. – М.: Машиностроение. – 1990. – Вып. 15. – С. 68–72.

2. Келлерман Ю.И. Проектирование пневматических систем методом разнесенных схем // Стандарты и качество. – 1982. – № 5. – С. 33–37.
3. Крутиков Г.А., Кудрявцев А.И., Пекарь Л.А. К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединенными массами // Пневматика и гидравлика. – М.: Машиностроение. – 1987. – Вып. 13. – С. 51–58.
4. Крутиков Г.А. Определение степени энергетического совершенства пневмоприводов дискретного действия // Гидропривод и гидропневмоавтоматики. – Киев: Техніка. – 1985. – Вып. 32. – С. 38–43.
5. Крутиков Г.А. Оптимальная схема и алгоритм управления свободнопрограммируемого пневмопривода // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – Темат. вип.: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – № 24. – С. 68–75.
6. Крутиков Г.А., Оробченко А.А., Пекарь Л.А. Об использовании компрессорно-приводного режима работы пневмопривода автоманипулятора для улучшения динамических и энергетических характеристик // Теория механизмов и машин. – 1986. – Вып. 41. – С. 31–40.
7. Крутиков Г.А., Томин П., Тот И. Улучшение энергетических характеристик дискретных пневмоприводов за счет выбора рациональной схемы торможения // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1988. – Вып. 11.
8. Снижение энергопотерь в пневмоприводах станков, автоматических манипуляторов и других машин // Методические рекомендации для отрасли. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 112 с.
9. А.С. № 1596142 СССР. Пневматический привод / Г.А. Крутиков, В.В. Седач. Оpubл. 2.08.89. Бюл. № 30, 1990. – 2 с.

УДК 621.51

Крутиков Г.А.

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЗБЕРЕГАЮЧОГО ПНЕВМОПРИВОДУ З ГАЛЬМУВАННЯМ У КІНЦІ ХОДУ

Шляхом структурного синтезу спроектована схема пневмоприводу з гальмуванням, у якій за рахунок створення оптимальних комутаційних зв'язків удалося різко скоротити непродуктивні витрати стисненого повітря.