

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПНЕВМОПРИВОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Канд. техн. наук, доц. КРАВЕЦ Ф. К., инж. ЛЕВКО Р. Р.

Белорусский национальный технический университет

Успешное использование пневматических приводов для автоматизации технологических процессов в различных областях машиностроения во многом зависит от качества подготовки сжатого воздуха. Особенно важное значение приобретает эта проблема во время эксплуатации пневматического привода технологических и мобильных машин при высокой влажности окружающей среды или в холодных климатических условиях. При попадании влажного воздуха в пневмопривод из него выделяется водоконденсат, что вызывает коррозию, а также происходит смывание смазки с трущихся поверхностей деталей, вследствие чего повышается их износ. При отрицательных температурах водоконденсат замерзает в трубопроводах и аппаратах (приборах), образуя ледяные пробки, что приводит к отказам работы пневмопривода. Решение этих задач связано с необходимостью применения в системах подготовки сжатого воздуха многофункциональных комбинированных пневмоаппаратов: регулятора давления, комбинированного воздухоосушителя, противозамерзателя, влагоотделителя, автоматических конденсатоотводчиков.

В последние годы в нашей стране и за рубежом ведутся интенсивные работы по созданию систем подготовки сжатого воздуха и их пневмоаппаратов, управляемых средствами электронной автоматики, что обеспечивает стабильность рабочих характеристик при длительной эксплуатации и возможность производить контроль за качеством подготовки сжатого воздуха.

Анализ работ по исследованию и расчету систем подготовки сжатого воздуха пневмоприводов технологических машин показал, что в них рассматриваются, как правило, стацио-

нарные условия эксплуатации пневмосистем с постоянным расходом сжатого воздуха. Динамические же процессы, происходящие в системах с учетом функционирования пневмопривода исполнительных механизмов, не рассматриваются. Мало внимания уделяется вопросам очистки и осушки сжатого воздуха от влаги, предполагается, что пневмосистемы технологических машин эксплуатируются, в основном, при положительной температуре окружающей среды. Однако многие технологические машины (роботы, манипуляторы, погрузочно-разгрузочные и другие устройства с пневматическим приводом управления) используются в условиях пониженных температур и повышенной влажности окружающей среды.

Анализ работ по пневмосистемам мобильных машин показал, что для очистки сжатого воздуха от влаги применяются, в основном, влагоотделители центробежного типа, в которых воздух, поступающий от компрессора, предварительно охлаждается, а затем ему придается вращательное движение, вследствие чего происходит влагоотделение. Выделившийся водоконденсат удаляется из пневмосистемы с помощью специальных устройств – конденсатоотводчиков.

На машинах, предназначенных для работы в условиях низких температур ($-40...-50$ °С), повышение надежности пневмопривода достигается введением в сжатый воздух паров жидкостей с низкой температурой замерзания (спирта, антифриза). Применяют также пневмосистемы с повышенным давлением в ресиверах питающей части до 1,8...2,2 МПа с последующим редуцированием (понижением) его до рабочего уровня (0,7...0,8 МПа). При этом влаж-

ность сжатого воздуха частично понижается, однако необходимый запас по точке росы не всегда достигается.

Запас по точке росы Δt_{po} осушенного воздуха на выходе из влагоотделительного устройства определяется как разность между температурой окружающей среды t_a и температурой точки росы t_p осушенного воздуха

$$\Delta t_{po} = t_a - t_p, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Отрицательное значение Δt_{po} показывает, что сжатый воздух еще не охлажден до температуры окружающей среды и его охлаждение будет сопровождаться конденсацией водяного пара. Положительное значение Δt_{po} показывает, что у сжатого воздуха при охлаждении ниже температуры атмосферного воздуха на величину Δt_{po} конденсация пара исключена.

В [1, 2] отмечается, что наиболее перспективной является осушка сжатого воздуха гидроскопическими материалами. При этом из сжатого воздуха удаляется не только вода, но и водяной пар. Адсорбционная осушка позволяет удалить из сжатого воздуха до 95 % содержащихся в сжатом воздухе водяных паров, а точку росы осушенного воздуха можно снизить до $-40 \dots -50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Однако информация [1, 2] носит, в основном, рекламный характер, так как в ней отсутствуют теоретические разработки и практические рекомендации по расчету и проектированию пневмосистем с адсорбционными осушителями, что сдерживает их создание.

В этой связи разработана методика статического расчета параметров адсорбционных осушителей с термической регенерацией адсорбента и короткоциклового безнагревной адсорбцией. Данная методика позволяет на стадии проектирования определить геометрические параметры воздухоосушителя, необходимое количество адсорбента и регенерирующего воздуха в зависимости от общего объема ресиверов пневмосистемы и расхода сжатого воздуха потребителями.

Для исследования динамических процессов, происходящих при осушке сжатого воздуха с учетом электронного управления этим процессом, а также для оценки влияния воздухоосушителя на функционирование других аппаратов пневмосистемы разработаны расчетные

схемы, математические модели и алгоритмы расчета систем подготовки сжатого воздуха для пневмоприводов технологических машин.

Рассмотрим в качестве примера процесс моделирования системы подготовки сжатого воздуха с двухадсорберным воздухоосушителем. Его расчетная схема (рис. 1) и математическая модель (табл. 1) составлялись в соответствии с рекомендациями [3].

После ввода исходных данных производится расчет процесса наполнения ресиверов до максимального уровня давления (0,8 МПа, давление приводится в абсолютных единицах). При этом используется система уравнений (1)–(6). Электрические сигналы на электромагнитные клапаны не подаются, т. е. $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 0$. Наполнение ресиверов системы осуществляется через адсорбирующий осушитель A_1 . Предполагается, что в начальный период работы системы подготовки сжатого воздуха влажность последнего на выходе из осушителей A_1 и A_2 (рис. 1) одинакова, т. е. $\varphi_1 = \varphi_2$.

Если давление в ресиверах системы $p_c < 0,8 \text{ МПа}$, а влажность воздуха на выходе воздухоосушителя A_1 больше, чем у воздухоосушителя A_2 , т. е. $\varphi_1 > \varphi_2$, то подается электрический сигнал U_2 на электромагнитный клапан ($U_2 = 1$), происходит его переключение и воздух от компрессора поступает в ресивер пневмосистемы через воздухоосушитель A_2 . При этом решаются уравнения (1), (2), (6)–(9).

Если влажность воздуха на выходе A_1 снизилась до заданной величины, т. е. $\varphi_1 = \varphi_{min}$, то электрический сигнал U_3 с электромагнитного клапана снимается ($U_3 = 0$) и подается на электромагнитный клапан U_4 ($U_4 = 1$). Последний открывается, и воздух от компрессора через воздухоосушитель A_2 выходит в атмосферу (происходит регенерация адсорбента воздухоосушителя A_2). Решаются уравнения (1), (2), (7), (12), (13).

При снижении влажности воздуха φ_2 на выходе воздухоосушителя A_2 и давлении в ресивере пневмосистемы выше нижнего предела срабатывания регулятора давления, т. е. $p_c > 0,65 \text{ МПа}$, снимается электрический сигнал с электромагнитного клапана U_4 ($U_4 = 0$) и подается на электромагнитный клапан U_1 ($U_1 = 1$) регулятора давления. При этом компрессор переводится на холостой режим, т. е. $Q_k = 0$ или отключается его привод.

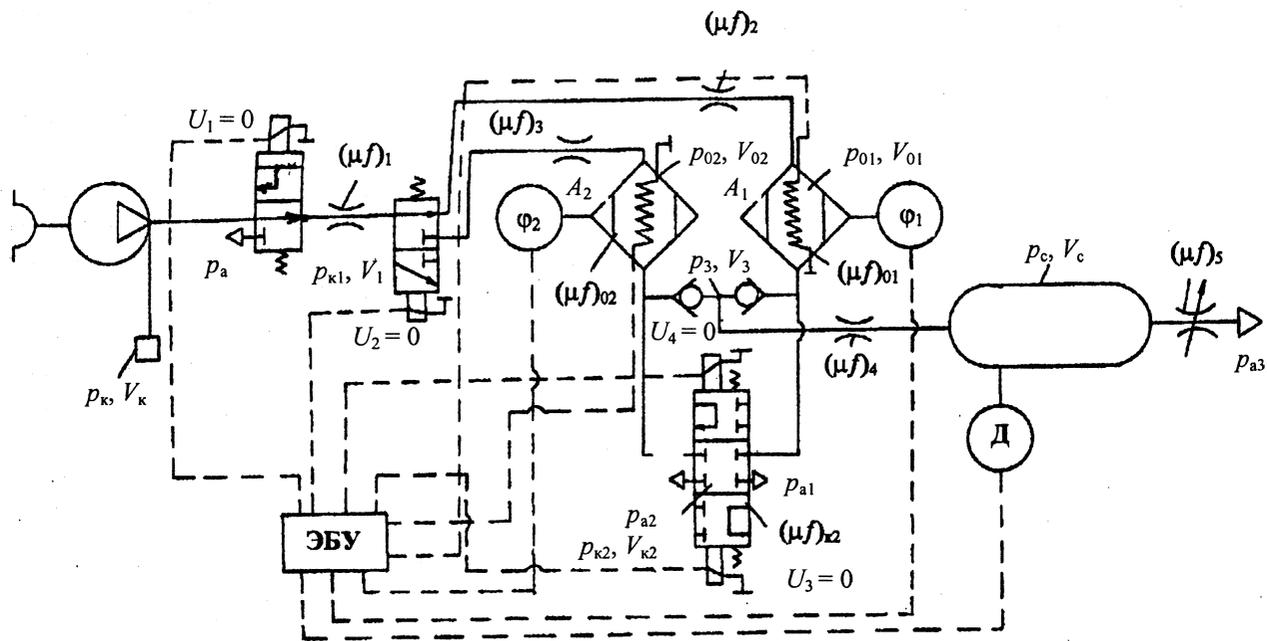


Рис. 1. Расчетная схема системы подготовки сжатого воздуха с двухадсорберным воздухоосушителем пневмосистемы технологических машин

Таблица 1

Математическая модель системы подготовки сжатого воздуха технологических машин

Если $p_c < 0,8$ МПа и $\varphi_1 = \varphi_2$, то $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 0$;

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{K_1}{V_k} Q_k p_k - \frac{K_1}{V_{k1}} (\mu f)_1 p_k \frac{p_k - p_{k1}}{B p_k - p_{k1}}; \quad (1)$$

$$Q_k = \frac{\pi d^2}{4} Si(a - b p_c) n_k; \quad (2)$$

$$\frac{dp_{k1}}{dt} = \frac{K_1}{V_{k1}} \left[(\mu f)_1 p_k \frac{p_k - p_{k1}}{B p_k - p_{k1}} - (\mu f)_2 p_k \frac{p_{k1} - p_{01}}{B p_{k1} - p_{01}} \right]; \quad (3)$$

$$\frac{dp_{01}}{dt} = \frac{K_1}{V_{01}} \left[(\mu f)_2 p_{k1} \frac{p_{k1} - p_{01}}{B p_{k1} - p_{01}} - (\mu f)_{01} p_{01} \frac{p_{01} - p_3}{B p_{01} - p_3} \right]; \quad (4)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{K_1}{V_3} \left[(\mu f)_{01} p_{01} \frac{p_{01} - p_3}{B p_{01} - p_3} - (\mu f)_4 p_3 \frac{p_3 - p_c}{B p_3 - p_c} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{K_1}{V_c} \left[(\mu f)_4 p_3 \frac{p_3 - p_c}{B p_3 - p_c} - (\mu f)_5 p_c \frac{p_c - p_{a3}}{B p_c - p_{a3}} \right]. \quad (6)$$

Если $p_c \geq 0,8$ МПа и $\varphi_1 > \varphi_2$, то $U_2 = 1$; $U_1 = U_3 = U_4 = 0$.

Уравнения (2) и (1);

$$\frac{dp_k}{dt} = \frac{dp_0}{dt} = \frac{dp_1}{dt} = \frac{dp_c}{dt} = 0;$$

$$\frac{dp_{k1}}{dt} = \frac{K_1}{V_{k1}} \left[(\mu f)_1 p_k \frac{p_k - p_{k1}}{B p_k - p_{k1}} - (\mu f)_3 p_{k1} \frac{p_{k1} - p_{02}}{B p_{k1} - p_{02}} \right]; \quad (7)$$

$$\frac{dp_{02}}{dt} = \frac{K_1}{V_{02}} \left[(\mu f)_3 p_{k1} \frac{p_{k1} - p_{02}}{B p_{k1} - p_{02}} - (\mu f)_{02} p_{02} \frac{p_{02} - p_3}{B p_{02} - p_3} \right]; \quad (8)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = \frac{K_1}{V_3} \left[(\mu f)_{02} p_{02} \frac{p_{02} - p_3}{B p_{02} - p_3} - (\mu f)_4 p_3 \frac{p_3 - p_c}{B p_3 - p_c} \right]. \quad (9)$$

Уравнение (6).

Если $p_c \geq 0,8$ МПа и $\varphi_1 > \varphi_2$, то $\frac{dp_3}{dt} = \frac{dp_c}{dt} = 0$; $U_3 = 1$;

$U_1 = U_2 = U_4 = 0$ и решаются уравнения (2), (1), (3);

$$\frac{dp_{01}}{dt} = \frac{K_1}{V_{01}} \left[(\mu f)_2 p_{k1} \frac{p_{k1} - p_{01}}{B p_{k1} - p_{01}} - (\mu f)_{01} p_{01} \frac{p_{01} - p_{k2}}{B p_{01} - p_{k2}} \right]; \quad (10)$$

$$\frac{dp_{k2}}{dt} = \frac{K_1}{V_{k2}} \left[(\mu f)_{01} p_{01} \frac{p_{01} - p_{k2}}{B p_{01} - p_{k2}} - (\mu f)_{k2} p_{k2} \frac{p_{k2} - p_{a2}}{B p_{k2} - p_{a2}} \right]. \quad (11)$$

Если $p_c \geq 0,8$ МПа и $\varphi_2 > \varphi_1$, то $\frac{dp_3}{dt} = \frac{dp_c}{dt} = 0$; $U_4 = 1$;

$U_1 = U_2 = U_3 = 0$ и решаются уравнения: (2), (1), (7);

$$\frac{dp_{02}}{dt} = \frac{K_1}{V_{02}} \left[(\mu f)_3 p_{k1} \frac{p_{k1} - p_{02}}{B p_{k1} - p_{02}} - (\mu f)_{02} p_{02} \frac{p_{02} - p_{k2}}{B p_{02} - p_{k2}} \right]; \quad (12)$$

$$\frac{dp_{k2}}{dt} = \frac{K_1}{V_{k2}} \left[(\mu f)_{02} p_{02} \frac{p_{02} - p_{k2}}{B p_{02} - p_{k2}} - (\mu f)_{k2} p_{k2} \frac{p_{k2} - p_{a2}}{B p_{k2} - p_{a2}} \right]. \quad (13)$$

Если $p_c > 0,65$ МПа и $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_{\min}$, то $U_1 = 1$;

$U_2 = U_3 = U_4 = 0$; $Q_k = 0$.

Если $p_c \leq 0,65$ МПа, то $U_1 = U_2 = U_3 = U_4 = 0$, $Q_k > 0$
и решаются уравнения (1)–(6).

Постоянные и переменные коэффициенты в уравнениях:

$$K_1 = kV_{кр}A; k = 1,41; V_{кр} = 340 \text{ м/с}; A = 0,654; B = 1,13;$$

$$n_k = 8,33...41 \text{ с}^{-1}; V_c = 20^{-2}...80 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3; V_p = 2 \cdot 10^{-2}...10 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3;$$

$$V_0 = V_{01} = V_{02} = 6 \cdot 10^{-2}...12 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3; V_k = V_{k1} = V_{k2} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

$$p_a = p_{a1} = p_{a2} = p_{a3} = 0,1 \text{ МПа.}$$

Коэффициенты аппроксимации $\eta_v = f(p_c)$

$$\text{при } p_{\max} = 0,8 \text{ МПа}; a = 836 \cdot 10^{-6} \text{ 1/об}; b = -39 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{об} \cdot \text{Н.}$$

Начальные условия:

$$p_k = p_0 = p_{01} = p_{02} = p_1 = p_3 = p_{k1} = p_{k2} = p_p = p_c = 0,1 \text{ МПа};$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_{\min}.$$

Численные значения давлений приводятся в абсолютных единицах.

Если давление в ресивере пневмосистемы снизилось до нижнего предела срабатывания регулятора давления, т. е. $p_c \leq 0,65 \text{ МПа}$, то снимается электрический сигнал U_1 ($U_1 = 0$) и компрессор переключается с холостого режима в рабочий режим. Воздух от компрессора поступает через воздухоосушители A_1 или A_2 (в зависимости от влажности воздуха) в ресивер пневмосистемы. При этом решаются соответствующие уравнения, и процесс повторяется.

При изменении параметров системы подготовки сжатого воздуха (объема ресиверов, подачи компрессора, параметров воздухоосушителей, расхода сжатого воздуха из ресиверов пневмосистемы и др.) процесс расчета повторяется и анализируются полученные результаты.

Алгоритм расчета системы подготовки сжатого воздуха реализован в виде пакета программ на алгоритмическом языке «Паскаль». Пакет включает несколько программных единиц, основными из которых являются: управляющая программа; программа ввода исходных данных; программа расчета характеристик клапанных узлов; подпрограмма формирования правых частей дифференциальных уравнений; подпрограмма вывода результатов расчета на печать.

На рис. 2 представлены графики изменения давления воздуха на выходе из компрессора за один цикл подзарядки системы. Анализ графиков показывает, что при установке осушителя следует учитывать, что полуцикл подзарядки системы увеличивается на 6 % – для воздухо-

осушителя без дополнительной регенерационной емкости и на 25 % – для осушителя с дополнительной регенерационной емкостью. При этом время нарастания давления воздуха происходит более плавно. Верхний предел давления за счет дополнительного сопротивления, создаваемого воздухоосушителем, увеличивается незначительно (не более 3 %) и не может существенно повлиять на работу компрессора.

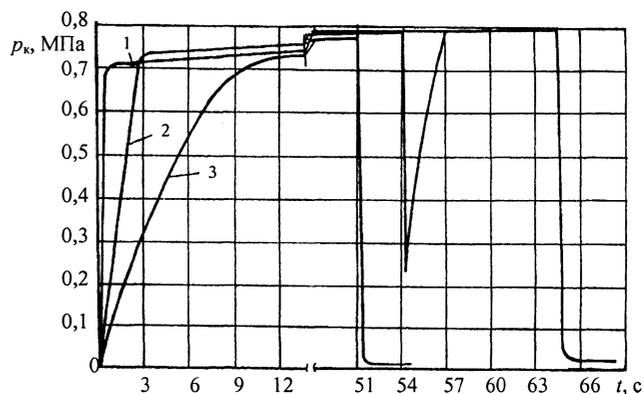


Рис. 2. Графики изменения давления на выходе из компрессора за один цикл подзарядки системы при объеме ресивера $V_p = 9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$: 1 – система без осушителя; 2 – с воздухоосушителем и дополнительной регенерационной емкостью ($V_{рег} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $D_{рег.др.} = 1,6 \text{ мм}$); 3 – с двухадсорберным воздухоосушителем

Проведенные исследования динамики системы подготовки сжатого воздуха технологических машин позволили установить, что в связи с нестабильностью температуры и влажности сжатого воздуха на входе в осушитель при раз-

личных температурах окружающей среды и режимах работы машины, целесообразной является разработка осушителей с принудительным охлаждением нагнетаемого воздуха в полцикле осушки и обогревом адсорбента теплым воздухом, выходящим из компрессора в полцикле регенерации адсорбента. При этом следует по возможности избегать как недостатка, так и избытка адсорбента, т. е. стремиться к равновесию системы «адсорбент – осушаемый воздух – продувочный воздух», что позволит повысить качество подготовки сжатого воздуха для пневмосистем технологических машин.

По результатам выполненной работы можно заключить, что разработанные расчетные схемы, математические модели и алгоритмы расчета систем подготовки сжатого воздуха с воздухоосушителями для пневмосистем технологических машин позволяют определять степень влияния воздухоосушителя на функционирование других аппаратов пневмосистемы,

а также исследовать динамические процессы, происходящие при осушке сжатого воздуха с учетом электронного управления этим процессом.

Разработанная методика динамического расчета системы подготовки сжатого воздуха может быть использована при создании перспективных пневмосистем технологических и мобильных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богдан Н. В., Козача И. М., Романчик Е. А. Перспективные устройства подготовки воздуха в пневматических системах. – Мн.: БелНИИНТИ, 1991. – 441 с.
2. Богдан Н. В., Козача И. М., Романчик Е. А. Перспективные направления совершенствования питающей части пневматических приводов и их аппаратов. – Мн.: БелНИИНТИ, 1990. – 44 с.
3. Метлюк Н. Ф., Автушко В. П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.

УДК 629.113.-592

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ВПРЫСКА БЕНЗИНОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОТКРЫТОГО СОСТОЯНИЯ ФОРСУНОК

Асп. ГУРСКИЙ А. С.

Белорусский национальный технический университет

Снижение потребления топлива без ухудшения мощностных показателей работы двигателя – одна из актуальных проблем в области производства и эксплуатации автомобилей. Среди бензиновых систем питания наилучшие топливные, экономичные и мощностные характеристики имеет электронная система распределенного впрыска бензинового двигателя. Ухудшение этих характеристик происходит при появлении неисправностей в системе. Определить ее неисправность достаточно сложно из-за огромного количества элементов. Одним из методов выявления неисправности является диагностирование системы по выходным показателям: расходу топлива, содержанию окиси

углерода и углеводородов в отработавших газах и др.

Явный признак отклонений технического состояния системы впрыска – изменение количества топлива, потребляемого двигателем. Сложность при определении его расхода заключается в том, что в системе впрыска бензинового двигателя имеются топливопроводы подвода и отвода топлива. Поэтому один расходомер подключается к подающему топливопроводу, второй – к топливопроводу отвода, и для определения расхода необходимо найти разность в их показаниях. При измерениях возникает удвоенная погрешность полученных результатов. С целью ее снижения необходимо