

УДК 621.3.078.4: 621.512

А.В. Бобров, Е.Е. Полякова

(Украина, Днепропетровск, Государственное ВУЗ "НГУ")

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА СЖАТОГО ВОЗДУХА НА УРОВНИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Система двухпозиционного регулирования давления довольно широко применяется в поршневых компрессорных установках. Благодаря поддержанию в системе давления в заданном интервале (P_{min} – P_{max}), обеспечивается нормальный режим работы потребителей сжатого воздуха.

Ранее в работе [1] было предложено, что для повышения энергоэффективности системы следует выполнить “плавающим” верхний уровень давления, причем при этом рассматривался электротехнический комплекс “электрическая сеть – компрессор – пневмосеть” в целом, а также был введен критерий экономичности для системы управления – КПД.

Для обоснования энергетического показателя электротехнического комплекса необходимо четко знать зависимости между различными элементами и всего комплекса в целом, с измеряемыми параметрами. Это позволит определить наиболее весомые, с точки зрения потерь энергии, элементы электротехнического комплекса, а также установить взаимосвязь между ними. Так как, потери энергии в различных элементах электротехнического комплекса отличаются друг от друга своими весовыми значениями.

Для этого в работе [2] было установлено, какая существует взаимосвязь между измеряемыми параметрами и потерей мощности в различных элементах электротехнического комплекса с учетом существующих связей между ними. Все это дает возможность исследовать реальную картину изменения потерь мощности в элементах электротехнического комплекса при различных режимах работы технологического оборудования. Однако, если учитывать потери энергии в элементах электромеханической системы, то можно сразу решить несколько проблем, которые присутствуют в предыдущем решении. Во-первых, производить сравнение потерь в различных элементах электротехнического комплекса в виде потерь энергии будет наиболее правильно с энергетической точки зрения. В предыдущем же варианте единицей измерения потерь является мощность. Во-вторых, при правильном подборе интервала дискретизации можно записать, что:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1..T} N_i \cdot t_i \quad (1)$$

В этом случае упрощаются расчеты по определению потерь в элементах электротехнического комплекса, так как производить вычисления в виде суммирования потерь мощности менее ресурсоемко с точки зрения вычислительной мощности управляющей системы.

Исходя из вышесказанного и работы [3] запишем следующие формулы для определения потерь энергии в элементах электротехнического комплекса.

$$\Delta \mathcal{E}_{11} = \sum_{i=0..t1} 3r_0 l \left[\frac{2 \frac{n}{n-1} P_1 Q_{компл} \left(\left(\frac{P_{2,i+1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2 \cdot n}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{мех} \eta_{пол} \eta_{дв}}}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right]^2, \quad (2)$$

где $\Delta \mathcal{E}_{11}$ – потери энергии в электрической сети за время накачки сжатого воздуха, кВт·ч; r_0 – удельное сопротивление проводника, Ом/км; l – длина линии, км; t_1 – время накачки сжатого воздуха, с; P_1 – атмосферное давление, Па; $Q_{компл}$ – объемная производительность по условиям всасывания, м³/с; n – показатель политропы, для поршневых компрессоров $n = 1,2 - 1,35$ [3]; $\eta_{дв}$ – КПД двигателя; $\eta_{пол}$ – индикаторный КПД относительно политропного процесса сжатия, равный 0,8 – 0,9 [3]; $\eta_{мех}$ – механический КПД, учитывающий потери на трение кривошипно-шатунного механизма и поршня компрессора, $\eta_{мех} = 0,85 - 0,95$ [3]; U – напряжение питающей сети; P_2 – давление в пневмосистеме, Па.

$$\Delta\mathcal{E}_{21} = \sum_{i=0..t_1} 2 \frac{n}{n-1} P_1 Q_{\text{компл}} \left(\left(\frac{P_{2i+1}}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{2 \cdot n}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_{\text{мех}} \eta_{\text{пол}} \eta_{\text{дв}}} - \sum_{i=0..t_1} P_{2i+1} \left(B_0 + B_1 e^{\frac{-P_{2i+1}}{B_2}} \right) \quad (3)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{21}$ – потери энергии в АД и компрессорной установке за время накачки сжатого воздуха, кВт·ч; t_1 – время накачки сжатого воздуха, с; P_1 – атмосферное давление, Па; $Q_{\text{компл}}$ – объемная производительность по условиям всасывания, м³/с; n – показатель политропы, для поршневых компрессоров $n = 1,2 - 1,35$ [3]; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя; $\eta_{\text{пол}}$ – индикаторный КПД относительно политропного процесса сжатия, равный 0,8 – 0,9 [3]; $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД, учитывающий потери на трение кривошипно-шатунного механизма и поршня компрессора, $\eta_{\text{мех}} = 0,85 - 0,95$ [3]; P_2 – давление в пневмосистеме, Па; B_0, B_1, B_2 – расчетные коэффициенты производительности компрессора.

$$\Delta\mathcal{E}_{31} = \sum_{i=0..t_1} P_{2i+1} \left(C_0 + C_1 e^{\frac{-P_{2i+1}}{C_2}} \right) \quad (4)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{31}$ – потери энергии в системе трубопроводов сжатого воздуха за время накачки сжатого воздуха, кВт·ч; t_1 – время накачки сжатого воздуха, ч; C_0, C_1, C_2 – расчетные коэффициенты потерь сжатого воздуха в пневмосистеме.

$$\Delta\mathcal{E}_{32} = \sum_{i=t_1..T} P_{2i+1} \left(C_0 + C_1 e^{\frac{-P_{2i+1}}{C_2}} \right) \quad (5)$$

где $\Delta\mathcal{E}_{32}$ – потери энергии в системе трубопроводов сжатого воздуха, за время спуска сжатого воздуха, кВт·ч; t_2 – время спуска сжатого воздуха, ч; P_2 – давление в пневмосистеме, Па; C_0, C_1, C_2 – расчетные коэффициенты потерь сжатого воздуха в пневмосистеме.

Время полного цикла накачки и спуска сжатого воздуха [4,5], мин,

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2, \quad (6)$$

где t_1 – время накачки сжатого воздуха, мин; t_2 – время спуска давления, мин.

Установим зависимость изменения давления в пневмосети P_2 , Па, от расхода сжатого воздуха, потребляемого различными пневмоприемниками, $Q_{\text{потр}}$, м³/мин. Так как на участке спуска давления, в отличие от накачки, отсутствует параметр производительности компрессорной установки, то запишем два уравнения. Для участка накачки:

$$P_{2i} = P_{\text{min}}; \quad P_{2i+1} = P_{2i} + \Delta P_{\text{компл}i+1} - \Delta P_{\text{потерь}i+1} - \Delta P_{\text{потр}i+1}, \quad (7)$$

где P_{2i} – давление в пневмосистеме на i -м шаге, Па; $\Delta P_{\text{компл}i+1}$ – приращение давления в пневмосистеме за счет производительности компрессора, Па; $\Delta P_{\text{потерь}i+1}$ – снижение давления в пневмосистеме за счет потерь сжатого воздуха в пневмосистеме, Па; $\Delta P_{\text{потр}i+1}$ – снижение давления в пневмосистеме за счет потребления сжатого воздуха пневмоприемниками, Па.

Приращение давления в пневмосистеме за счет производительности компрессора определяется как:

$$\Delta P_{\text{ком}i+1} = \left(B_1 + B_2 e^{\frac{-P_{2i}}{B_3}} \right) \frac{RT\rho}{V_{\text{рес}} \cdot 980000}, \quad (8)$$

где B_1, B_2, B_3 – расчетные коэффициенты производительности компрессорной установки; T – температура газа, К; $R = 287$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная для воздуха; $\rho = 1,29$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях; $V_{\text{рес}}$ – объем ресивера, м³.

Снижение давления в пневмосистеме за счет потерь сжатого воздуха в пневмосистеме

$$\Delta P_{\text{потерь}i+1} = \left(C_1 + C_2 e^{\frac{-P_{2i}}{C_3}} \right) \frac{RT\rho}{V_{\text{труб}} \cdot 980000}, \quad (9)$$

где C_1, C_2, C_3 – расчетные коэффициенты потерь сжатого воздуха в пневмосистеме; $V_{\text{труб}}$ – объем пневматической сети, м³.

Снижение давления в пневмосистеме за счет потребления сжатого воздуха пневмоприемниками

$$\Delta P_{\text{потр}i+1} = \frac{Q_{\text{потр}} P_{2i} RT\rho}{60 \cdot 980000}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{потр}}$ – расход сжатого воздуха, потребляемого пневмоприемниками, м³/мин; P_{2i} – давление в пневмосистеме, на i -м шаге, Па.

Для участка спуска давления:

$$P_{21} = P_{\text{max}}; \quad P_{2i+1} = P_{2i} - \Delta P_{\text{потерь}i+1} - \Delta P_{\text{потр}i+1}, \quad (11)$$

где P_{2i} – давление в пневмосистеме на i -м шаге, Па; $\Delta P_{\text{потерь}i}$ – снижение давления в пневмосистеме за счет потерь сжатого воздуха в пневмосистеме, Па; $\Delta P_{\text{потр}i}$ – снижение давления в пневмосистеме за счет потребления сжатого воздуха пневмоприемниками, Па.

Возникает вопрос об определении времени накачки t_1 , мин, и времени спуска давления t_2 , мин. Эту задачу можно решить, если обратиться к формулам (7) – (11). Проанализировав их, мы видим, что давление в пневмосистеме P_2 на каждом последующем шаге зависит от предыдущего значения и изменится на некоторую величину Δ (это либо приращение, либо снижение уровня давления в пневмосистеме) в зависимости от участка накачки или спуска. Далее можно записать, что приращение давления для участка накачки:

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{dP_{\text{ком}}}{dt} - \frac{dP_{\text{потерь}}}{dt} - \frac{dP_{\text{потр}}}{dt}, \quad (12)$$

а для участка спуска:

$$\frac{dP_2}{dt} = -\frac{dP_{\text{потерь}}}{dt} - \frac{dP_{\text{потр}}}{dt}. \quad (13)$$

Понятно, что приращение давления dP_2 происходит за отрезок времени dt и зависит от потерь сжатого воздуха в пневмосети $Q_{\text{потерь}}$, м³/мин, производительности компрессорной установки $Q_{\text{комп}}$, м³/мин, величины потребления сжатого воздуха пневмоприемниками $Q_{\text{потр}}$, м³/мин. Отсюда следует, что количество приращений давления i от P_{min} до P_{max} будет соответствовать единицам измерения времени расхода сжатого воздуха – мин. Это утверждение справедливо и для участка спуска давления от P_{max} до P_{min} .

Для построения графиков зависимостей (2) – (5) используем следующие параметры электротехнического комплекса: $P_2 = 0,6 - 0,8$ МПа; $P_1 = 0,1$ МПа; $n = 1,24$; $Q_1 = 20$ м³/мин; $\eta_{\text{мех}} = 0,85$;

$\eta_{пол} = 0,88$; $h_{де} = 0,8$; $\cos \varphi = 0,8$; $U = 0,38 \text{ кВ}$; $r_0 = 0,00035 \text{ Ом/м}$; $l = 40 \text{ м}$; $P_k = 0,8 \text{ МПа}$;
 $P_n = 0,6 \text{ МПа}$; $V_{рес} = 8,3 \text{ м}^3$; $V_{труб} = 21 \text{ м}^3$.

Расчетные коэффициенты производительности компрессора (рис. 1, 2):

Вариант 1 – $B_1 = 212,745$; $B_2 = -190,778$; $B_3 = -153,934$.

Вариант 2 – $B_1 = 44,526$; $B_2 = -24,239$; $B_3 = -24,035$.

Расчетные коэффициенты потерь сжатого воздуха в пневмосистеме (рис. 3):

$C_1 = 315,714$; $C_2 = -315,714$; $B_3 = -162,804$.

Здесь следует отметить, что с изменением исходных значений (величин) параметров электротехнического комплекса могут изменяться и потери энергии в его элементах. Однако характер полученных зависимостей потерь энергии останется прежним исходя из исследований, описанных А.И.Карабиным, Д.Л. Гарбузом. Это утверждение основано на изложенных ниже фактах. А для наглядности, рассмотрим два варианта электротехнического комплекса, с различными параметрами производительности компрессоров.

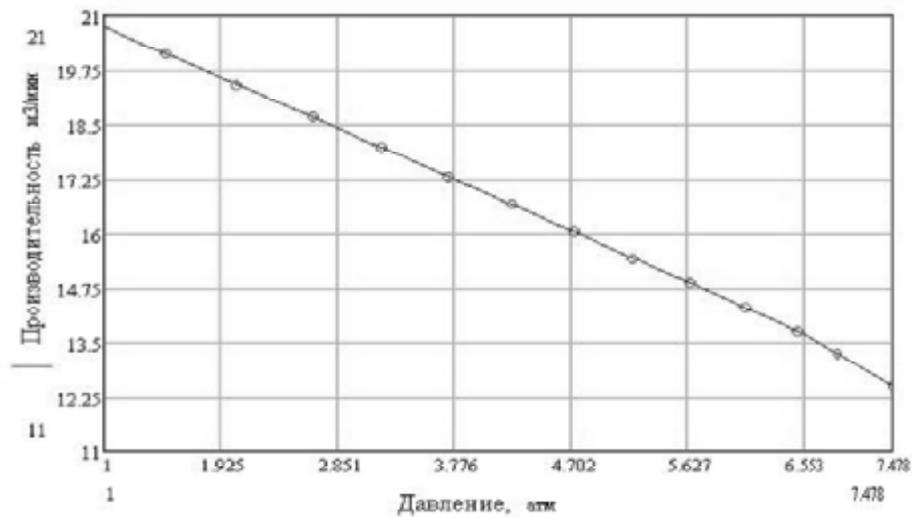


Рис. 1. График зависимости производительности компрессора от давлением в ресивере (вариант 1)

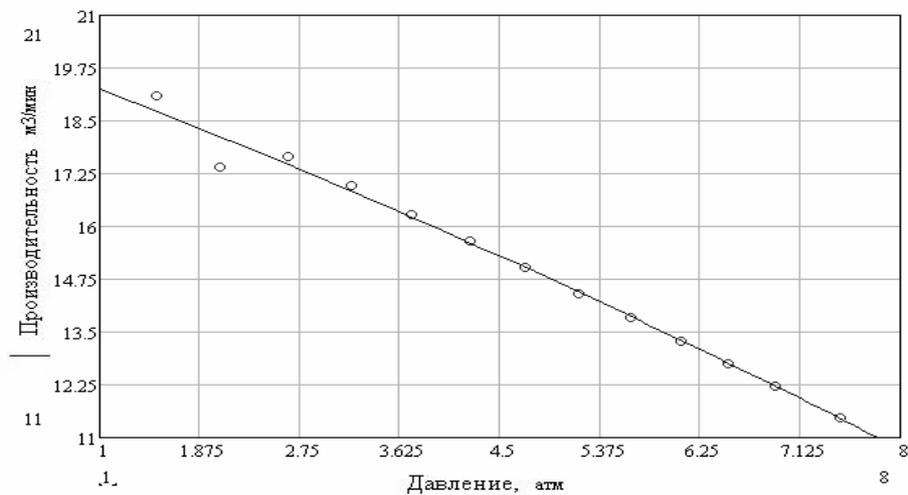


Рис. 2. График зависимости производительности компрессора от давлением в ресивере (вариант 2)

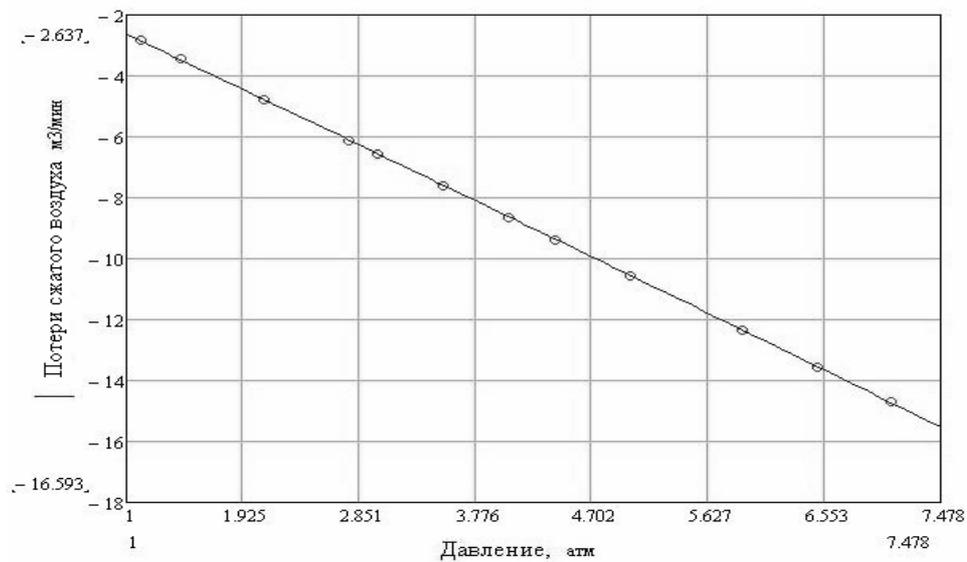


Рис. 3. График зависимости потерь сжатого воздуха в пневмосети от давления в ней

Проанализировав зависимости, представленные на рис. 4 и 5, потерь энергии в электросети ΔE_{11} от расхода сжатого воздуха видим, что с повышением расхода сжатого воздуха увеличивается потребление энергии асинхронным приводом поршневого компрессора, и соответственно тока, протекающего в электрической сети.

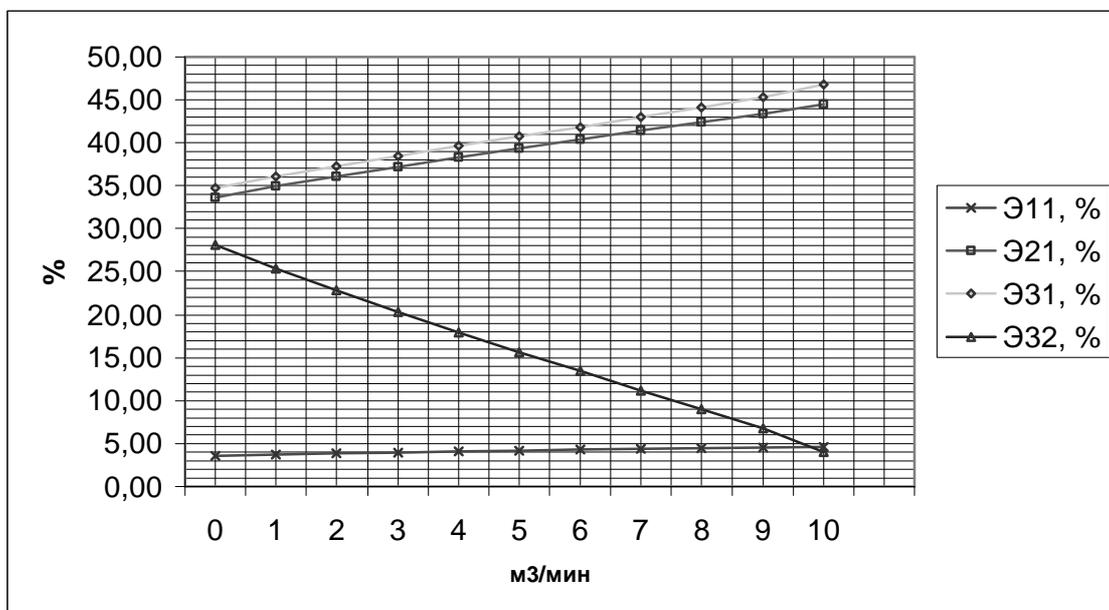


Рис. 4. График зависимости расхода сжатого воздуха от производительности компрессора и потерь энергии в элементах электротехнического комплекса (вариант 2)

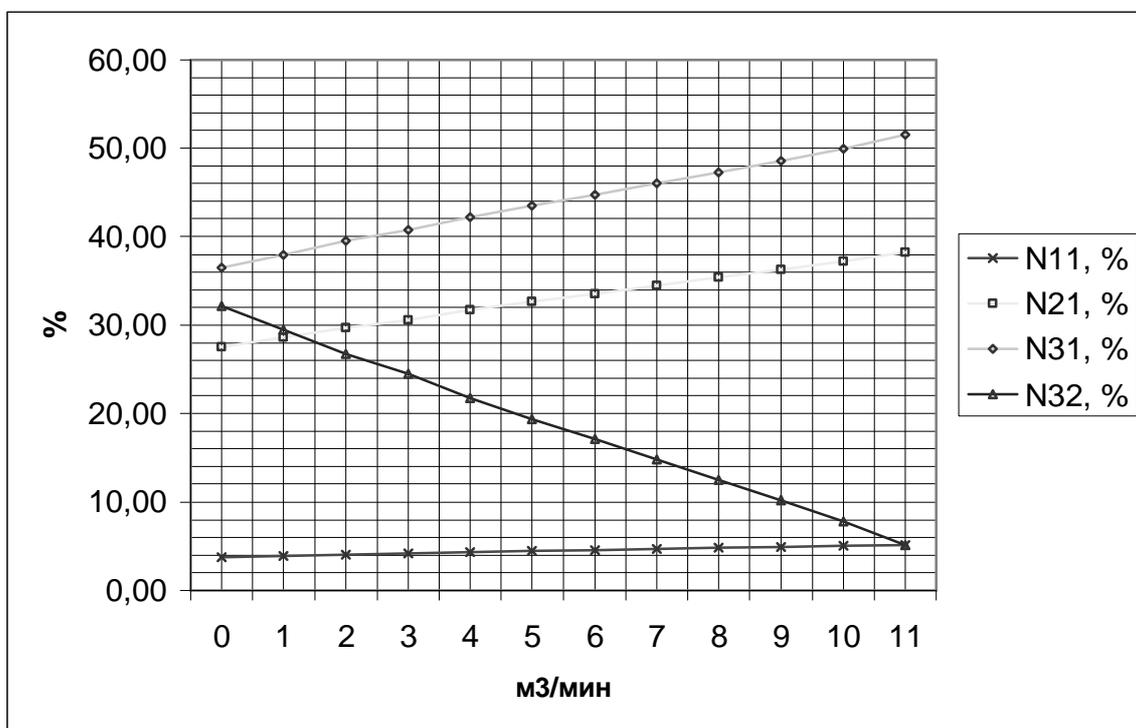


Рис. 5. График зависимости расхода сжатого воздуха от производительности компрессора и потерь энергии в элементах электротехнического комплекса (вариант 1)

Ясно, что при неизменных параметрах электрической сети и увеличении электрического тока, протекающего в ней, потери активной энергии будут возрастать.

Рассмотрим весовую составляющую потерь энергии в данном элементе электротехнического комплекса. Как видно из вышеприведенных зависимостей (рис. 4, 5), весовое значение потерь энергии в этом элементе в общей сумме потерь электротехнического комплекса является незначительным и составляет всего 3,60 – 5,14 % от суммарных потерь энергии.

Отсюда следует, что даже при увеличении некоторых параметров электрической сети, таких как удельное сопротивление (Ом/км) и ее протяженность (км), влияние этого элемента электротехнического комплекса на общий суммарный уровень потерь энергии будет минимальное. Однако для получения общего решения необходимо учитывать потери энергии в электрической сети как элементе электротехнического комплекса, т.е. учитывать вариант с подключением маломощных поршневых компрессоров с асинхронным двигателем, имеющим короткозамкнутый ротор, через протяженную электрическую сеть. Такой вариант возможен на производствах, накладывающих ограничения по технике безопасности (взрывоопасные, кислотные среды и т.п.). В этом случае размещение оборудования происходит по критериям безопасности, а не с точки зрения экономической эффективности.

Анализ зависимости потерь энергии в системе "электропривод-компрессор" от расхода сжатого воздуха $\Delta \mathcal{E}_{21}$ (рис. 4, 5) показывает, что на интервале накачивания сжатого воздуха в пневмосистему при увеличении расхода сжатого воздуха потери энергии в системе "электропривод – компрессор" возрастают. Данный процесс, происходящий в этой системе, объясняется следующим образом: при увеличении расхода сжатого воздуха мощность, потребляемая асинхронным приводом поршневого компрессора возрастает, а по закону Бойля-Мариотта объемная подача сжатого воздуха в пневмосеть уменьшается. Добавим, что согласно выражению (12) при увеличении расхода сжатого воздуха из пневмосети так же увеличивается время накачивания сжатого воздуха до максимального давления P_{max} . Ясно, что при увеличении времени работы системы "электропривод-компрессор" будут увеличиваться и потери энергии (см. уравнение (3)). Итак, с увеличением расхода сжатого воздуха из пневмосети возрастают затраты активной энергии на производство сжатого воздуха и соответственно потери в системе "электропривод – компрессор". Что касается весовой составляющей потерь энергии в данных элементах электротехнического комплекса, то, как следует из графиков (рис. 4, 5), она является значительной и составляет 27,52 – 4,52 % от суммарных потерь энергии всего электротехнического комплекса. Как видим, с увеличением давления сжатого воздуха в пневмосистеме и неизменном (или увеличивающемся) расходе сжатого воздуха его потребителями, затраты электрической энергии на его производство и соответственно потери в элементах электротехнического комплекса "электроприводе – компрессоре" становятся большими.

Из зависимости потерь энергии в пневмосистеме за время накачивания сжатого воздуха от его расхода $\Delta \mathcal{E}_{31}$ следует, что потери энергии в пневмосистеме возрастают с увеличением расхода сжатого воздуха. Проанализируем данную зависимость. В пневмосети вследствие ее неполной герметичности наблюдаются утечки сжатого воздуха из пневмосистемы. Этот процесс, в свою очередь, приводит к потерям энергии в этом элементе электротехнического комплекса. К сожалению, полную герметичность пневмосистемы не всегда можно обеспечить по технологическим причинам, например, на шахтах с взрывоопасной средой по газу и пыли используются фланцевые соединения трубопровода, которые по определению не герметичны. Добавим, что исходя из зависимости (12) при увеличении расхода сжатого воздуха из пневмосети происходит увеличение времени накачивания сжатого воздуха до максимального давления P_{max} . Ясно, что с увеличением времени накачивания и давления согласно выражению (4) будут возрастать потери энергии в пневмосистеме. Как видно из рис. 4, 5, весовое значение потерь энергии в этом элементе в общей сумме потерь электротехнического комплекса является значительным и составляет 34,71 – 51,49 % от суммарных потерь энергии. Следовательно, при изменении некоторых параметров пневмосети, (увеличении объема (m^3), протяженности (км), герметичности) могут возрастать потери энергии в ней. Принимая во внимание весовое значение потерь энергии в этом элементе электротехнического комплекса необходимо отметить, что их снижение позволит повысить энергетические показатели в целом всего комплекса.

Из зависимости потерь энергии в пневмосистеме за время спуска давления от расхода сжатого воздуха $\Delta \mathcal{E}_{32}$ видно, что потери энергии в пневмосистеме снижаются с увеличением расхода сжатого воздуха. Как было отмечено раньше, потери энергии в пневмосистеме происходят вследствие утечек сжатого воздуха. В данном случае, исходя из выражения (13), при увеличении расхода сжатого воздуха из пневмосети наблюдается уменьшение времени спуска давления сжатого воздуха до P_{min} . Ясно, что с уменьшением времени спуска и давления будут снижаться потери энергии в пневмосистеме. Причем весовое значение потерь энергии в этом элементе является наиболее изменчивым и составляет 32,14 – 4,04 % от суммарных потерь энергии электротехнического комплекса.

Определив значения потерь энергии во всех элементах электротехнического комплекса, можно констатировать, что наиболее весомыми, с точки зрения потерь энергии, являются такие элементы, как "электропривод – компрессор" и "пневматическая сеть". Поэтому для уменьшения потерь энергии в наиболее весомых элементах электротехнического комплекса и повышения КПД электромеханической системы в целом необходимо использовать "плавающий" – недетерминированный верхний уровень давления.

Список литературы

1. Бобров, А.В. Повышение энергоэффективности поршневых компрессоров [Текст] / А.В. Бобров // Техн. електродинаміка. – 2004. – №3. – С. 70 – 71.
2. Бобров, А.В. Нагрузка пневматической сети и ее влияние на уровни потерь мощности в элементах электротехнического комплекса поршневой компрессорной установки [Текст] / А.В. Бобров // Вісник приазовського техн. ун-ту. Ч. II. Енергетика. – Маріуполь, 2008. – С. 68-71.
3. Выпанасенко, С.И. Обоснование контролируемых параметров при повышении энергоэффективности поршневых компрессоров [Текст] / С.И. Выпанасенко, А.В. Бобров // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. 2004. – Вип. 72. – С. 95-99.
4. Выпанасенко, С.И. Определение оптимального верхнего уровня давления в системе двухпозиционного управления поршневых компрессоров при ограничении количества пусков и учете пусковых потерь [Текст] / С.И. Выпанасенко, В.В. Кириченко, А.В. Бобров // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. 2005. – Вип. 74. – С. 71-75.
5. Бобров, А.В. Определение максимального уровня давления энергоэффективной системы управления поршневых компрессорных установок при ограничении количества пусков [Текст] / А.В. Бобров // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації: зб. матеріалів конф. – Кременчук, 2007. – С.171.

Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.