

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЗМОВ С ВЕНТИЛЯТОРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ МОМЕНТА НА ВАЛУ

Введение

Вентиляторной характеристикой момента M в функции скорости вращения ω обладают насосы, вентиляторы, центробежные компрессоры, турбокомпрессоры и другие турбомашин (рис. 1).

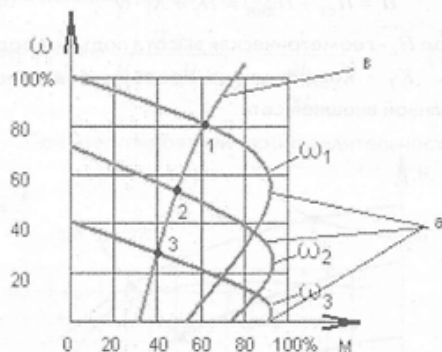


Рис. 1. Механические характеристики регулируемого электропривода (а) и установки с вентиляторной характеристикой момента на валу (в)

Применение частотно-регулируемых электроприводов для данного класса механизмов целесообразно в случае необходимости регулирования их производительности (жидкости и газа) в соответствии с

технологическими потребностями. При этом актуальным является правильный выбор угловой скорости привода $\omega_1, \omega_2, \omega_3$, так как производительность Q , напор H , момент M и мощность P турбомашин однозначно зависят и определяются угловой скоростью ω привода. Как известно, для одной и той же турбомашин значения Q_1, H_1, M_1 и P_1 при скорости ω_1 связаны со значениями Q_2, H_2, M_2 и P_2 при скорости ω_2 следующими соотношениями:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2;$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3. \quad (1)$$

При этом необходимая мощность привода насоса, вентилятора составит:

$$P^H = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H / \eta_H, \quad P^B = \rho \cdot Q / \eta_B; \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости;

η_H, η_B — коэффициенты полезного действия насоса, вентилятора;

p — давление вентилятора.

Как видно из соотношений (1), ожидается, что применение частотно-регулируемых приводов для турбомашин является высокоэкономичным способом регулирования их производительности. Например, при технологической потребности снижения производительности механизма вдвое (по сравнению с её номинальным значением) следует вдвое снизить скорость вращения приводного двигателя, что приведёт к восьмикратному снижению мощности, потребляемой из электросети.

Рассматриваемый класс турбомашин в большинстве случаев выполняется быстроходными, поэтому их приводные двигатели имеют высокую угловую скорость вращения ($\omega_0=150...300$ рад/с) и соединяются с валом приводного механизма непосредственно. Для приводов мощностью свыше 100 кВт устанавливаются асинхронные и синхронные двигатели на напряжение 6 и 10 кВ. Максимальные мощности установок могут составлять 800...1600 кВт и больше, что при длительных режимах их работы предполагает возможность получения существенных объёмов экономии энергии.

Существующие методики оценки эффективности применения преобразователей частоты электроприводов для регулирования производительности механизмов с вентиляторной характеристикой момента на валу [1-6] в большей степени рассматривают задачу энергосбережения в самом электроприводе [1-3], а также учитывают технологические особенности эффективности регулирования турбомашин при их совместной работе на внешнюю трубопроводную сеть [4, 5, 6]. Более широкий, системный подход к решаемой проблеме проявляется в ряде других работ, где комплексно учитывается участие в регулировании не только турбоустановки, но и загрузка двигателя и преобразователя энергии, электрическая питающая сеть, минимизация расходов на эксплуатацию и ремонт оборудования [2], а также изменение коэффициентов полезного действия (КПД) насоса и внешней трубопроводной сети [5] и даже уровень шумов, возникающих при регулировании регуляторов [6].

Однако при этом не учитывается, что при регулировании турбоустановок могут нарушаться условия их устойчивой работы, возможны возникновения аварийных режимов кавитации в насосах и помпажа в вентиля-

торных и компрессорных установках. Кроме того, в данной работе предлагается системный подход оценки эффективности регулирования рабочего режима турбоустановки по уровню удельных энергозатрат на всю цепочку технологического процесса преобразования электрической энергии в механическую, а затем в гидравлический поток рабочей среды, как наиболее обобщенного критерия качества эксплуатации регулируемого электропривода и достигаемого при этом уровня энергосбережения.

1 Эксплуатационные свойства турбоустановок

Эксплуатационные свойства турбомашин определяются зависимостью напора H (давления жидкости или газа, развиваемого механизмом) от производительности Q при различных угловых скоростях вращения ω . Эта зависимость называется $Q-H$ характеристикой и, например, для насоса приведена на рис. 2, где характеристики a соответствуют скоростям вращения насоса $\omega_1, \omega_2, \omega_3$. Нагрузкой для насоса является внешняя трубопроводная сеть (характеристики b, c). Полный напор H в системе "насос – трубопроводная сеть" складывается из статического $H_{ст}$ и динамического $H_{дин}$ напоров. При этом вторая составляющая напора пропорциональна квадрату скорости или квадрату производительности насоса:

$$H = H_{ст} + H_{дин} = H_T + K_1 \cdot Q^2, \quad (3)$$

где H_T - геометрическая высота подъёма воды; K_1 - коэффициент пропорциональности данной внешней сети.

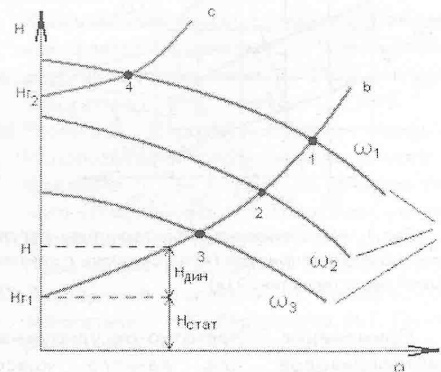


Рис.2. $Q-H$ характеристика насоса (a) при различных скоростях вращения и характеристики внешней (напорной) трубопроводной сети (b и c)

Пересечения характеристик насоса а (рис.2) и трубопроводной сети в и с (точки 1, 2, 3, 4) определяют рабочий режим установки со значением параметров Q_p и H_p при различных скоростях вращения $\omega_1, \omega_2, \omega_3$.

При оценке эффективности регулирования турбоустановок следует учитывать, что с изменением рабочего режима изменяются КПД самой установки, приводного двигателя, преобразователя [5], а также учитывать возможности нарушения условий устойчивости работы установки, возникновение аварийных режимов кавитации насосов и помпажа в компрессорных и вентиляционных установках. К примеру, для случая, когда статическая составляющая напора внешней сети $H_{ст}$ существенно превосходит динамическую $H_{дин}$ (характеристика с, рис.2), регулирование подачи обеспечивается меньшим диапазоном изменения ω ($\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$). Однако регулирование механизма до скоростей вращения ω_2, ω_3 нецелесообразно, т.к. нарушается условие устойчивости (1) согласно второй его составляющей, и характеристика сети с не имеет точек пересечения с характеристиками насоса при скоростях его вращения ω_2, ω_3 (рис.2).

Под КПД внешней сети η_T подразумевается отношение геометрической высоты H_T подъема воды (статический напор $H_{ст}$) к полному напору H (3):

$$\eta_T = \frac{H_T}{H} = \frac{H_{ст}}{H_{ст} + H_{дин}} = \frac{1}{1 + \frac{H_{дин}}{H_{ст}}} \quad (4)$$

При регулировании производительности

установки Q одновременно изменяется и напор H , а соответственно и КПД трубопроводной сети (4).

КПД насоса η_n также существенно изменяется при регулировании его производительности (рис. 3), вплоть до нулевого значения. Рекомендованные значения рабочей зоны КПД насоса составляют 0,95 от его максимального (номинального) значения. В принципе, возможны и более широкие зоны регулирования насоса, когда КПД насоса ниже рекомендованной зоны, однако это снижение КПД допустимо, если компенсируется ростом других составляющих КПД установки, например, КПД трубопроводной сети. Однако, как видно из рис. 3, при $Q/Q_n \leq 0,2$ регулирование будет нецелесообразным, т.к. $\eta_n \leq 0,3 \dots 0$.

К регулированию вентиляторных установок предъявляют ещё более жёсткие ограничения, их работа в зонах, где КПД ниже 0,6, вообще не рекомендуется из соображений экономичности и надежности (предотвращения помпажа).

2 Сравнительный анализ способов регулирования турбоустановок (механизмов)

Производительность турбоустановок можно регулировать различными способами: дросселированием трубопровода, изменением угловой скорости приводного двигателя, использованием гидромффт, изменением числа работающих на магистраль агрегатов, изменением положения регулирующих органов механизма, например, угла установки лопаток рабочего колеса или осевого направляющего аппарата вентиляторов, отжимом клапанов компрессора и др.

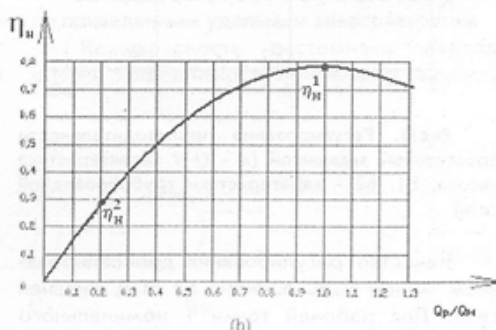
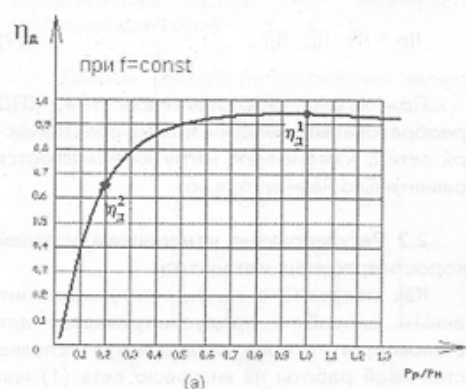


Рис.3. Графики зависимости КПД двигателя (а) и насоса (б) от загрузки

Все способы регулирования производительности механизмов связаны с потерями энергии. В промышленности наибольшее распространение получили первые два способа. Первый из них практически не предусматривает капитальных затрат, но приводит к большим потерям энергии. Второй способ предполагает примерное удвоение капзатрат со стороны регулируемого электропривода, однако обеспечивает экономичное регулирование производительности механизма. Остальные способы регулирования занимают промежуточные значения. Исходя из этого, к сравнительному анализу принимаются первые два способа.

2.1 Регулирование дросселированием в нагнетательной части трубопроводной сети

Регулирование дросселированием осуществляется введением задвижки в трубопровод, что приводит к изменению результирующего сопротивления и вида характеристики трубопроводной сети с b_1 на b_2 (рис. 4). Рабочая точка системы "механизм - сеть" при дросселировании перемещается влево по $Q - H$ характеристике ($\omega = \omega_n = \text{const}$) из точки 1 в точку 2. При этом часть напора ΔH_p теряется на регулирующем устройстве:

$$\Delta H_p = \Delta H_2 - \Delta H_1. \tag{5}$$

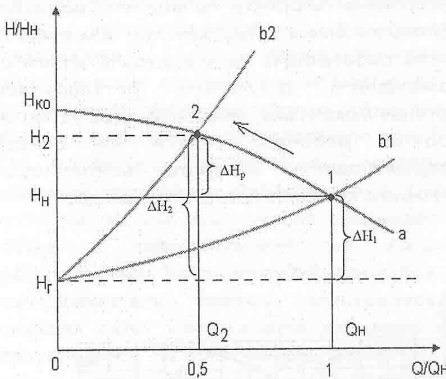


Рис.4. Регулирование производительности дроссельной задвижкой (а - $Q - H$ характеристика насоса; b_1, b_2 - харатеристики трубопроводной сети)

Качество регулирования дросселированием может быть оценено по КПД внешней сети. Для рабочей точки 1 номинального режима с параметрами Q_n, H_n в соответствии с

(4):

$$\eta_{T1} = \frac{H_T}{H_T + \Delta H_1} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta H_1}{H_T}}. \tag{6}$$

Для рабочей точки 2 КПД внешней сети ухудшается до величины:

$$\eta_{T2} = \frac{H_T}{H_T + \Delta H_2} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta H_1 + \Delta H_p}{H_T}}. \tag{7}$$

При определении КПД регулирования следует учесть, что при работе с номинальными параметрами (точка 1) КПД регулирования равен 1 ($\eta_p^1 = 1$), тогда как для точки 2 КПД регулирования будет хуже (меньше единицы) и составит:

$$\eta_p^2 = \frac{H_T + \Delta H_1}{H_T + \Delta H_2} = \frac{H_T + \Delta H_1}{H_T + \Delta H_1 + \Delta H_p} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta H_p}{H_T + \Delta H_1}}. \tag{8}$$

Учитывая комплексность системного подхода к оценке эффективности регулирования, следует учесть, что при изменении рабочего режима из точки 1 в 2, кроме изменения параметров системы "механизм - сеть" H и Q , одновременно изменяются энергетические режимы других элементов, а именно самого насоса и двигателя, которые также можно учесть соответствующим КПД - η_H^1, η_H^2 и η_D^1, η_D^2 (рис. 3).

Поэтому в целом для установки эффект регулирования оценивается:

$$\eta_p = \eta_T^2 \cdot \eta_H^2 \cdot \eta_D^2. \tag{9}$$

При этом предполагается, что КПД преобразователя энергии и КПД электрической сети с изменением нагрузки изменяются сравнительно незначительно.

2.2 Регулирование изменением угловой скорости вращения механизма

Как показано в п. 2., регулирование данным способом предусматривается для установок, в которых соблюдается условие устойчивой работы на внешнюю сеть (1) или между статической $H_{ст}$ и динамической $H_{дин}$

составляющими напора наблюдается примерный паритет:

$$H_{ст} \approx H_{дин} \text{ или } H_{дин} \ll 0,95H. \quad (10)$$

При регулировании производительности насоса посредством изменения скорости вращения (рис.5) его $Q-H$ характеристики a_1 и a_2 соответствуют скоростям вращения ω_1, ω_2 . При этом рабочая точка системы "механизм-сеть" перемещается влево по характеристике трубопроводной сети b из точки 1 в точку 3 и происходит одновременно заданное снижение производительности с Q_H до Q_2 и напора с H_H до H_3 . Составляющая потерь напора $\Delta H_3 < \Delta H_1$ снижается, и КПД трубопроводной сети улучшается в сравнении с (7):

$$\eta_T^3 = \frac{H_T}{H_T + \Delta H_3} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta H_3}{H_T}}. \quad (11)$$

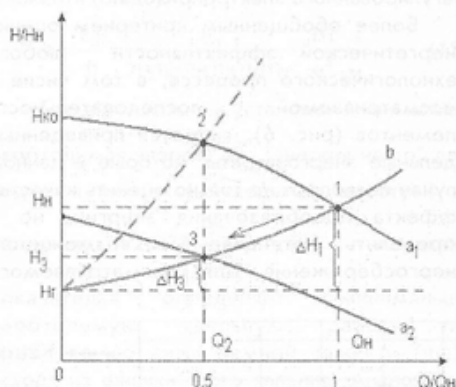


Рис.5. Регулирование производительности изменением скорости вращения (a_1, a_2 - $Q-H$ характеристика насоса; b - харатеристика трубопроводной сети)

Данный способ регулирования является сравнительно экономичным, поскольку с уменьшением производительности снижается

и напор в системе, необходимый для прокачивания меньшего расхода воды через одну и ту же внешнюю сеть. При снижении производительности в два раза (точка 3, рис. 5), мощность, потребляемая приводным двигателем из сети, как явствует из (1), снижается в кубе, т.е. в 8 раз.

В соответствии с системным подходом оценки эффективности регулирования следует учесть взаимное расположение точек регулирования рабочего режима 1 и 3 (рис.5) по отношению к измененным значениям КПД насоса и приводного двигателя (рис.3). Аналогично (9):

$$\eta_p = \eta_T^3 \cdot \eta_H^2 \cdot \eta_d^2. \quad (12)$$

2.3 Сравнение способов регулирования

Для сравнения на рис.5 пунктиром обозначен режим работы системы "механизм-сеть" при регулировании дросселированием (точка 2) в соответствии с рис. 4. Сравнительный эффект обоих способов регулирования оценивается соответствующим КПД регулирования. Если параметры режима регулирования, соответствующие точке 3 (рис.5) принять за минимально возможные $\eta_p^3 = 1$, то КПД регулирования дросселированием по отношению к регулированию изменением частоты вращения составляет:

$$\eta_p^2 = \frac{H_T + \Delta H_3}{H_T + \Delta H_2} = \frac{H_T + \Delta H_3}{H_T + \Delta H_3 + \Delta H_p} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta H_p}{H_T + \Delta H_3}}, \quad (13)$$

где $\Delta H_p = \Delta H_2 - \Delta H_3$ - разность потерь напоров при первом и втором способах регулирования соответственно.

3 Оценка эффективности регулирования по приведенным удельным энергозатратам

Комплексность системного подхода оценки эффективности применения регулирую-

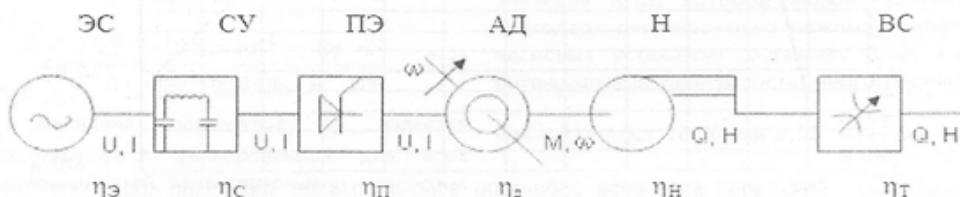


Рис. 6. Технологическая последовательность элементов преобразования энергии при использовании регулируемого электропривода

емого электропривода для механизмов [2] состоит в учете всех элементов технологической последовательности преобразования энергии, начиная от питающей электрической сети и до самой механической установки с её внешней трубопроводной сетью (рис. 6).

В каждом элементе технологической последовательности происходит преобразование одного вида энергии в другой. Естественно, эффективность этих преобразований оценивается КПД соответствующего элемента, а всей последовательности - их произведением. Главными элементами, существенно влияющими на эффективность всей технологической последовательности, являются приводной двигатель АД и сам механизм Н с его внешней сетью ВС, в которых происходит преобразование электрической энергии U, I в механическую M , и далее в энергию гидравлического потока Q, H . При этом следует учитывать, что КПД двигателя зависит не только от его загрузки (рис 3.а), но и от частоты напряжения питания [8] особенно для случаев, когда в качестве регулируемых электроприводов применяются не специальные асинхронные двигатели, а существующие серийные. На рис.7 приведены зависимости изменения КПД серийных двигателей разной полюсности η' от скорости их вращения при регулировании частоты напряжения питания [8]. Из сравнения КПД, согласно рис.7 и рис.3.а следует, что

КПД двигателя снижается в среднем на 10%, что объясняется повышенными потерями в стали, механическими потерями, повышенным скольжением и др.

Преобразователь энергии ПЭ получает электрическую энергию от электрической сети ЭС через согласующее устройство СУ, которое обеспечивает электромагнитную совместимость преобразователя частоты с электрической сетью по показателям качества электрической энергии (высококачественные гармоники, несимметрия, колебания и отклонения напряжения питания). Энергетическая эффективность данных элементов по преобразованию электрической энергии в электрическую довольно высокая, практически не зависит от загрузки и может быть оценена общим КПД в 0,95...0,97. Однако учёт этих элементов необходим при экономической оценке проекта, так как они определяют, в основном, дополнительные капитальные вложения в систему регулируемого электропривода.

Более обобщенным критерием оценки энергетической эффективности любого технологического процесса, в том числе и рассматриваемой последовательности элементов (рис. 6), являются приведенные удельные энергозатраты, которые в данном случае позволяют не только оценить качество эффекта преобразования энергии, но и определить потенциальные возможности энергосбережения. Для рассматриваемого

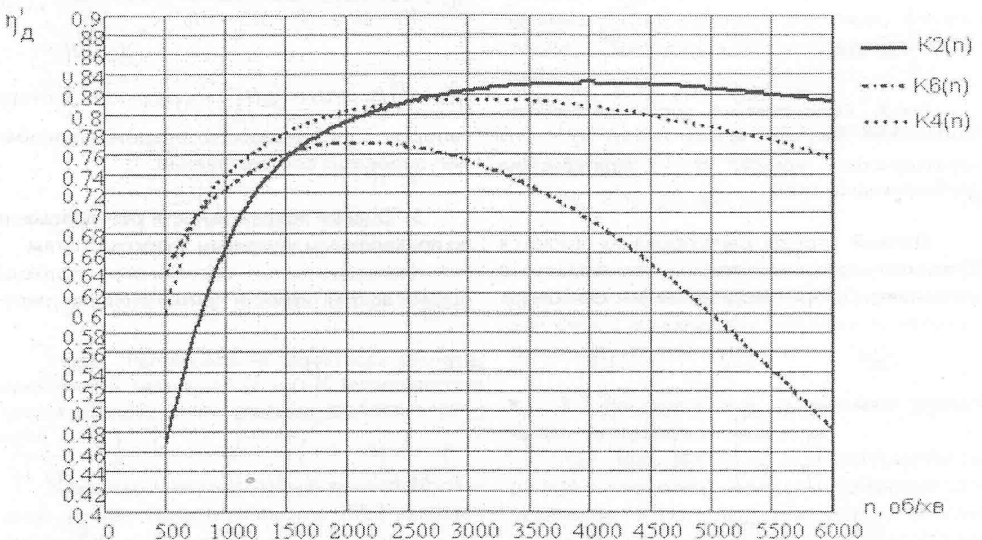


Рис. 7. Графики изменения КПД двигателей 4А80А с разным количеством полюсов (K2, K4, K6) при регулировании частоты напряжения питания

класса турбоустановок удельные энергозатраты определяются отношением расхода энергии W за установленный период времени к количеству перемещенной рабочей среды V за тот же период. Приведение удельных энергозатрат к единице высоты подъема воды H_r или среднему давлению воздуха P_{cp} позволяет безотносительно оперировать данным параметром для сравнительной оценки эффективности функционирования данных установок на различных объектах:

$$\epsilon_H = \frac{W}{V \cdot H_r}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}}; \quad \epsilon_B = \frac{W}{V \cdot P_{cp}}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}. \quad (14)$$

Суть предложенного подхода состоит в определении "энергии нетто", т.е. энергии идеального процесса преобразования без потерь энергии ϵ_0 . Далее учет реальных потерь энергии при преобразованиях в элементах технологической последовательности учитывается КПД соответствующего элемента (рис.6):

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0}{\eta} = \frac{\epsilon_0}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{С}} \eta_{\text{П}} \eta_{\text{Д}} \eta_{\text{Н}} \eta_{\text{Т}}}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}}. \quad (15)$$

Так для насосной установки минимально необходимая энергия ϵ_0^H "энергия нетто" для подъема 1 м^3 чистой воды на высоту 1 м составляет $2,723 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}}$ [9], т.е. этот

показатель определяет минимально необходимую удельную работу по преодолению силы земной тяжести (mg), исходя из физики этого явления. Аналогично для вентиляторной установки минимально необходимая удельная энергия ϵ_0^B для перемещения воздуха составляет

$2,723 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}$, тогда:

$$\epsilon_H = \frac{\epsilon_0^H}{\eta} = \frac{2,723}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{С}} \eta_{\text{П}} \eta_{\text{Д}} \eta_{\text{Н}} \eta_{\text{Т}}}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}};$$

$$\epsilon_B = \frac{\epsilon_0^B}{\eta} = \frac{2,723 \cdot 10^4}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{С}} \eta_{\text{П}} \eta_{\text{Д}} \eta_{\text{В}}}, \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}. \quad (16)$$

Величина параметра ϵ_0 является постоянной и универсальной для всех разновидностей вентиляторных и насосных установок различных отраслей народного хозяйства, кроме случаев, когда на ϵ_0 может

влиять изменение расстояния до центра Земли (изменение ускорения свободного падения - g , $\text{м}/\text{с}^2$), а также загрязненность или плотность (ρ , $\text{г}/\text{м}^3$) перекачиваемой среды.

Анализ (15, 16) свидетельствует, что чем совершеннее преобразование энергии всей технологической последовательности элементов ($\eta \rightarrow 1$), тем ближе реальные приведенные удельные энергозатраты к их идеальному значению ($\epsilon = \epsilon_0$). Невозможно

создание установки, когда $\epsilon = \epsilon_0$. Случаи, когда проектные ϵ , определенные из (15), - $\epsilon < \epsilon_0$ - нонсенс.

По данным ϵ из (15), например, за год можно сравнить между собой эффективность разных эксплуатируемых установок. При проектном сравнении эффективности применения способов регулирования на одной и той же установке (см. п. 2.1 - 2.2) в зависимости (15) достаточно учесть изменения значений КПД по вариантам сравнения:

$$\epsilon_1^H = \frac{2,723}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{С}} \eta_{\text{П}} \eta_{\text{Д}} \eta_{\text{Н}} \eta_{\text{Т}}};$$

$$\epsilon_2^H = \frac{2,723}{\eta_{\text{Э}} \eta_{\text{С}} \eta_{\text{П}} \eta_{\text{Д}} \eta_{\text{Н}} \eta_{\text{Т}}}, \quad (17)$$

а также определить потенциальные возможности энергосбережения:

$$W_1 = \epsilon_1^H \cdot V \cdot H_r, \quad W_2 = \epsilon_2^H \cdot V \cdot H_r,$$

$$\Delta W = W_2 - W_1. \quad (18)$$

Например, для горнодобывающей промышленности [9] среднестатистические данные КПД насосных установок составляют 0,52, что соответствуют согласно (16) уровню приведенных удельных энергозатрат в

$5,24 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}}$. Максимально возможное значение КПД, которое можно получить благодаря регулированию режимов работы насосных установок составляет 0,62, т.е. потенциальные возможности энергосбереже-

ния составляют 10 % или $0,52 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{м}^3 \cdot \text{м}}$, а для одной установки средней мощности возможная экономия электроэнергии достигает $547\,000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ за год.

При осуществлении регулирования насосных установок на других объектах [5,6] (в коммунально-бытовом секторе, тепловых электростанциях и др.), где необходимо более глубокое регулирование производительности, экономия электроэнергии может составлять до 50% при одновременном снижении потерь и непроизводительных расходов воды до 25%.

4 Оценка эффективности применения преобразователя частоты для плавного пуска двигателя

Момент на валу асинхронного двигателя пропорционален квадрату питающего напряжения. Поэтому допустимое длительное падение питающего напряжения регламентируется величиной не более 5%. В момент прямого пуска двигателя с механизмом на валу, когда пусковой ток достигает 5...7 кратной величины от его номинального значения, для обеспечения условий надежного пуска механизма допускается кратковременное падение питающего напряжения приводного двигателя до величины не более 12%.

Для выполнения данных условий при прямом пуске двигателя приходится применять кабели повышенного поперечного сечения по сравнению с сечениями, выбранными по условию допустимого нагрева. Особенно при больших длинах питающих линий (600...1200м) приходится включать даже несколько параллельных кабелей.

Преобразователь частоты (ПЧ) сглаживает пусковой режим двигателя, и пусковой ток двигателя превышает его номинальное значение только в 1,5 раза. В этом случае предоставляется возможным выполнить условие 12%-ного падения напряжения при меньшем сечении питающего кабеля. Снижение стоимости питающей линии должно обеспечить окупаемость ПЧ.

Таким образом, пусковой ток при прямом пуске двигателя составит:

$$I_{II}^{III} = (5...7)I_H, \quad (19)$$

а при применении ПЧ:

$$I_{II}^{II} = 1,5I_H. \quad (20)$$

Для обоих случаев допустимое кратковременное падение напряжения в фазном проводе питающей линии составляет:

$$\Delta U = 0,12U_H. \quad (21)$$

Допустимые сопротивления фазного провода в каждом из вариантов составят:

$$R^{III} = \Delta U / I_{II}^{III} = 0,12U_H / (5...7)I_H, \quad (22)$$

$$R^{II} = \Delta U / I_{II}^{II} = 0,12U_H / 1,5I_H. \quad (23)$$

Допустимая величина сечения провода кабеля составит:

$$S^{III} = \rho \cdot l / R^{III} = \rho \cdot l \cdot (5...7)I_H / 0,12U_H, \quad (24)$$

$$S^{II} = \rho \cdot l / R^{II} = \rho \cdot l \cdot 1,5 \cdot I_H / 0,12U_H, \quad (25)$$

где l - длина проводника, м;

ρ - удельное сопротивление проводника при температуре 40°C, (для алюминия $\rho=0,031 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$,

для меди $\rho=0,02 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$).

По данным сечениям для сравнения выбираются кабели, определяются их стоимости C^{III} , C^{II} и разница стоимостей:

$$\Delta C = C^{III} - C^{II}. \quad (26)$$

5 Определение величины экономического эффекта и срока окупаемости

Источником экономического эффекта является денежная экономия ΔC стоимости снижения потребления электроэнергии в результате регулирования механизма или стоимости линии при применении ПЧ плавного пуска двигателя.

Экономический эффект в первом случае за расчетный период T_p составит:

$$\Xi = \Delta C^T \cdot T_p - \Delta K, \quad (27)$$

где ΔC^T - годовая экономия стоимости электроэнергии в результате регулирования;

ΔK - единовременное увеличение капитальных затрат на электропривод, включая устройства совместимости с сетью по качеству электроэнергии.

Срок окупаемости капитальных вложений:

$$T_{OK} = \Delta K / \Delta C^T \quad (28)$$

Во втором случае сравниваются варианты капитальных затрат:

$$З^{III} = C^{III}, \quad (29)$$

$$З^{II} = C^{II} + \Delta K. \quad (30)$$

Выводы

Разработанная методика технико-экономической оценки эффективности применения преобразователей частоты для регулируемых электроприводов позволяет

комплексно учесть влияние на принимаемое решение всех элементов технологической последовательности преобразования энергии от питающей электросети до рабочего механизма. В качестве интегрального критерия оценки принимаются приведенные удельные энергозатраты по конечному результату технологического процесса, что наиболее полно отражает суть народнохозяйственного подхода к решению поставленной задачи.

Литература

1. Ильинский Н.Ф., Рожановский Ю.В., Горнов А.О. Энергосбережение в электроприводе. М.: Высшая школа, 1989, с.127.
2. Луговой А.В. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода. "Электротехника", 1999, №5, с.62-67.
3. Хашимов А.А. Энергосберегающие системы автоматизированного электропривода переменного тока. "Электротехника", 1995, №11, с.34-39.
4. Браславский И.Я. О возможностях энергоснабжения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов. "Электротехника", 1998, №8, с.2-6.
5. Лезнов Б.С., Чебанов В.Б. Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотведения. "Электротехника", 1995, №7, с.9-12.
6. Г. Оттерпол, Райнер Хюбнер. Технические и экономические аспекты применения энергосберегающих электроприводов в насосных и вентиляторных механизмах (из опыта фирмы "Elpro AG", Германия). "Электротехника", 1995, №7, с.12-16.
7. Ильин В.К. Предпосылки к внедрению регулируемого электропривода на центральных тепловых пунктах г. Москвы. "Электротехника", 1995, №7, с.16-17.
8. Войтех О.А., Попович О. М. Вибір та адаптація серійних асинхронних двигунів для роботи від джерел з регулюванням частоти. Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб.наук.праць. - 2003 - №3(6). - с.34-39.
9. Шевчук С.П. Повышение эффективности водоотливных установок. Учебное пособие. - Киев, УМК ВО, 1990, 104с.