

Д.В. БАТРАКОВ, ассистент, ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

АНАЛИЗ И ОСОБЕННОСТИ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШАХТНЫХ НАСОСНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Проведен анализ способов повышения энергоэффективности электропривода насосных водоотливных установок шахт. Приведены особенности применения частотного регулирования параметрами работы электропривода на примере шахтной водоотливной насосной установки с насосом ЦНС 300-600. Рассмотрен комбинированный способ регулирования подачи и напора насоса, сочетающий изменение частоты вращения рабочего колеса насоса с дросселированием. Обоснована целесообразность внедрения частотно-регулируемого электропривода, в частности «комбинированным» способом, для регулирования параметров работы шахтных насосных водоотливных установок.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Анализ потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает [1-6], что большая часть потерь (до 90%) приходится на сферу энергопотребления, тогда как потери при передаче электроэнергии составляют лишь 9-10 %. Из этого становится ясно, что основные усилия по энергосбережению должны быть сконцентрированы именно в сфере потребления электроэнергии. Энергосбережение в любой сфере сводится к снижению бесполезных потерь энергии.

Стоимость электроэнергии [1-6], потребляемой ежегодно средним двигателем в промышленности, почти в 5 раз превосходит его собственную стоимость. Очевидно, что за время службы двигателя (десятки лет) энергетическая составляющая несоизмеримо выше составляющей, связанной с капитальными затратами, в связи с чем вопросы оптимизации именно энергетической составляющей являются особенно важными.

В условиях шахт большая часть электроэнергии потребляется электроприводами насосов и вентиляторов, установленная мощность которых на глубоких шахтах достигает 40% от мощности всех электропотребителей. Стоимость электроэнергии в общей сумме эксплуатационных расходов составляет до 40-50% [1-4]. Как показывает статистика, в процессе перекачки нерационально расходуется до 20% энергии. В отдельных случаях этот показатель возрастает до 40%. С увеличением глубины разработки до 2000 м [7] неизбежным является увеличение стоимости расходов на водоотлив и затраты на электроэнергию для электропривода насосов. Таким образом, повышение энергетической эффективности работы шахтных насосов и их электропривода является актуальной научно-практической задачей.

Анализ исследований и публикаций. Проблемы повышения эффективности шахтного водоотлива и методы регулирования подачи насосов рассматривались в работах А.П. Германа, В.Г. Гейера, Г.М. Тимошенко, В.М. Попова, Н.Г. Картавого, В.Я. Карелина, В.В. Мазуренко. Частотно-регулируемому электроприводу насосов посвящены работы М.И. Чиликина, А.С. Сандлера, В.В. Рудакова, Г.Д. Онищенко, М.Г. Юнькова, Н.Ф. Ильинского и других ученых. В работах Лезнова Б.С. рассматривался вопрос энергосбережения и регулируемого привода в насосных установках [1-2]. В работах [8-10] указаны недостатки и пути повышения энергетических и эксплуатационных характеристик энергоёмких установок в технологиях горно-металлургического комплекса. Однако в недостаточной степени раскрыт вопрос об особенностях применения способа частотного регулирования электроприводом насосных водоотливных установок шахт при учёте обеспечения технологических параметров системы водоотлива.

Изложение материала и результаты. В настоящее время энергосбережение стало приоритетным направлением технической политики. Это связано, во-первых, с дефицитом основных энергоресурсов, во-вторых, с возрастающей стоимостью их добычи, в-третьих, с глобальными экологическими проблемами, обозначившимися в последнее время.

Современный уровень развития силовой электроники, микропроцессорных средств управления и контроля, средств автоматического регулирования позволяет широко использовать эти технические достижения для решения задач энергосбережения. Применение современных способов регулирования скорости технологических механизмов в сочетании с широкими возможностями автоматизации может обеспечить оптимальное использование энергетических ресурсов.

Далеко не всегда можно подобрать насосный агрегат, который сможет обеспечить требуемый расход жидкости при заданном давлении. Проще всего подобрать насос, который с запасом может выполнить поставленную задачу.

Возможна периодическая работа шахтного насосного агрегата при управлении в старто-стопном режиме. Данный способ широко применяется в системах водоотлива шахт Кривбасса. В связи с тем, что время работы электродвигателя существенно больше времени его пуска, можно считать, что КПД насоса близко к максимальному значению. При работе насосной установки на аккумулирующую ёмкость (водосборник) регулирование режима работы осуществляется включением насосного агрегата при достижении заданного верхнего значения и отключением при снижении уровня воды до заданного нижнего значения. Если насосная установка состоит из нескольких агрегатов, режим ее работы отличается тем, что задается по нескольким верхним и нижним уровням, при достижении которых изменяется число работающих агрегатов.

С увеличением притока вод частота включения-отключения агрегатов будет увеличиваться, так как объем жидкости в резервуаре увеличивается быстрее. Без использования аккумулирующей емкости с ростом притока воды подачу приходится увеличивать. При уменьшении притока подача и давление должны быть уменьшены. Приведение в соответствие притока и подачи осуществлялось до настоящего времени изменением числа работающих насосных агрегатов или изменением степени открытия задвижек (затворов) на напорных линиях насосов и насосных установок. Число включений-отключений насосных агрегатов при этом может достигать нескольких раз в сутки. Для агрегатов большой мощности такое количество включений недопустимо, поэтому в насосных установках мощностью выше 150 кВт вместо этого применяется дросселирование потока воды задвижкой. При закрытии задвижки эффективное поперечное сечение трубопровода уменьшается. Вследствие этого подача воды уменьшается, а напор, развиваемый насосом, возрастает. Мощность, потребляемая электроприводом насоса для этого способа регулирования, также остается примерно постоянной. Ее излишек расходуется на повышение давления в трубопроводе выше расчетного значения, что приводит к преждевременному износу трубопроводных систем и запорных устройств. Кроме того, это является причиной повышенного напора воды и утечек воды через стыки и щели.

Серьезной проблемой возникающей при включении-отключении насосных агрегатов является гидроудар. Гидроудар оказывает влияние на все части напорного трубопровода, создающих гидравлическое сопротивление. При отключении насосного агрегата статический напор воды закрывает обратный клапан, и скорость движения столба жидкости резко падает до нуля. Кинетическая энергия несжимаемой воды вызывает резкий скачок давления в напорном трубопроводе и вызывает порывы ветхих участков труб и мест их соединений – соединительных муфт, фланцев и т.д.

При разработке или покупке станций управления насосами необходимо учитывать тяжелый режим пуска насоса. Это обусловлено 6-7, а иногда и 10-кратными пусковыми токами и продолжительным временем разгона [8-10], что обусловлено принципами пуска асинхронных двигателей и большой инерцией рабочего колеса и лопастей насоса. Кроме электрических и механических перегрузок двигатель подвергается и большим тепловым перегрузкам во время пуска, что в совокупности значительно снижает его надежность.

Приемлемым вариантом является также использование устройства плавного пуска (УПП) для запуска/останова приводного двигателя насосного агрегата [8-10]. Среднее по функциональности УПП позволяет ограничить пусковой ток асинхронного двигателя, минимизировать просадку сетевого напряжения питания, оптимизировать пусковой и тормозной моменты для безударных разгонов и остановок приводимых механизмов, продлить срок использования подшипников и других деталей машин. Система защиты предотвращает возникновение токовых перегрузок от заклинивания механических частей привода. Недостатком УПП является отсутствие широкого диапазона регулирования частоты вращения в установившемся режиме.

Наиболее энергоэффективным способом запуска насоса и регулирования его рабочих параметров является частотное регулирование. Частотный пуск двигателя происходит плавно, а ток не превышает номинального значения, что дает возможность насосу работать в старто-стопном режиме и включаться только при достижении определенного уровня жидкости в водосборнике. При этом частотное регулирование с помощью преобразователя частоты используется не только для разгона, но и для эффективного регулирования параметров насосной системы.

Перечислим следующие преимущества применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода в насосных установках: плавный пуск электродвигателя, отсутствие механических нагрузок на двигатель и бросков тока в сети; снижение аварийности гидравлической или пневматической сети за счет поддержания минимально необходимого давления; снижение уровня шума, создаваемого технологическим оборудованием; снижение аварийности электрооборудования за счет устранения ударных пусковых токов; эффективное использование потребляемой насосным агрегатом мощности во всем диапазоне регулирования; обеспечение коэффициента мощности электродвигателя насоса на уровне 0,8-0,92; экономия электроэнергии до 50%; удобство автоматизации; удобство и простота внедрения; обеспечение автономной и безопасной работы, интеграция в автоматические системы управления техпроцессом.

Рассмотрим особенности применения частотного регулирования на примере шахтной водоотливной насосной установки с насосом ЦНС 300-600. При изменении частоты вращения рабочего колеса насоса с n_1 до n_2 его характеристики $Q-H$, $Q-N$, и $Q-\eta$ изменяются по закону подобия

$$Q_A / Q_B = n_1 / n_2; H_A / H_B = (n_1 / n_2)^2; N_A / N_B = (n_1 / n_2)^3, \quad (1)$$

где Q_A , H_A , N_A - подача ($\text{м}^3/\text{ч}$), напор (м) и мощность насоса (кВт), соответствующие частоте вращения рабочего колеса n_1 (об/мин); Q_B , H_B , N_B - подача, напор и мощность насоса, соответствующие частоте вращения рабочего колеса n_2 .

Подача насоса при уменьшении частоты питающей сети при неизменной характеристике сети 4 (рис. 1) уменьшится с Q_A до Q_B . При этом характеристика насоса 1 перемещается вниз и становится кривой 1'.

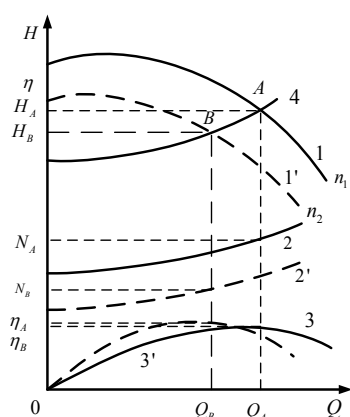


Рис. 1. Характеристики насоса и сети при регулировании изменением частоты вращения рабочего колеса

Так как во всех режимах работы напор насоса равен сопротивлению сети, сокращаются непроизводительные потери в системе «насос-сеть». Экономичность при регулировании насосов изменением частоты вращения n не снижается от того, что рабочая точка системы при изменении скорости n не отклоняется от режима максимального коэффициента полезного действия (КПД) (рис. 1), что наглядно видно по характеристикам $\eta(Q)$ - 3 и 3' соответственно. Данный способ достаточно просто может быть реализован для насосов, имеющих привод от двигателей с переменной частотой вращения [1-6].

Насосы в условиях шахт Криворожского железорудного бассейна оснащены приводами с асинхронными короткозамкнутыми электродвигателями, частота вращения которых не регулируется. КПД электродвигателя зависит от его нагрузки, т.е. отношения рабочей мощности насоса к номинальной мощности двигателя.

При регулировании частоты вращения с помощью преобразователя частоты его КПД определяют в зависимости от отношения выходного рабочего напряжения к номинальному [1-2]

$$\frac{u}{u_n} = \sqrt{\frac{M \cdot n}{M_n \cdot n_n}}, \quad (2)$$

где U, M, n и U_n, M_n, n_n - рабочие и номинальные значения напряжения, момента и частоты вращения вала насоса соответственно.

Следует отметить, что особенностью применения способа регулирования частоты вращения насоса с помощью преобразователя частоты в условиях шахтного водоотлива является обеспечение минимального уровня напора, создаваемого насосом для обеспечения технологических параметров водоотлива. Таким образом при полностью открытой задвижке - кривая 3 (рис. 2) применение частотного регулирования ограничивается значениями напора H_a, H_{a1} , где $H_{a1} = H_{дон}$ - минимально допустимый напор создаваемый насосом ЦНС-300-600. При этом подача соответствует значению Q_1 ($\text{м}^3/\text{ч}$). Для дальнейшего уменьшения подачи необходимо прибегнуть к дросселированию (метод «задвижки»).

Рассмотрим комбинированный способ для регулирования подачи насоса и напора, сочетающий изменение частоты вращения рабочего колеса насоса с дросселированием [4-6]. На рис. 2 изображены характеристики насоса 1 и сети 3.

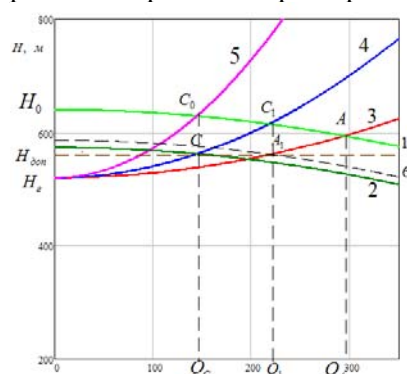


Рис. 2. Характеристики насоса и сети при регулировании комбинированным способом

Подача насоса, определяемая их пересечением, равна Q_A . Пусть требуется изменить подачу насоса до величины Q_C и при этом напор должен быть минимально допустимым для обеспечения технологических параметров системы шахтного водоотлива и в процессе регулирования не снижаться менее $H_{дон}$.

Для этого сначала производится дросселирование трубопровода до подачи, определяемого соотношением

$$Q_1 = Q_C \sqrt{\frac{H_0 - H_r}{H_{дон} - H_r + kQ_C^2}}, \quad (3)$$

где H_0 - напор насоса при минимальной подаче, м; H_r - гидравлический напор системы водоотлива, м; $H_{дон}$ - минимально допустимый для данной системы напор, м; Q_C - требуемая величина подачи, м³/ч.

Характеристика сети будет определяться кривой 4. Затем необходимо уменьшить частоту вращения привода до значения

$$n = n_0 \sqrt{\frac{H_{дон} + kQ_C^2}{H_0}}; \quad (4)$$

где n_0 - исходная частота вращения насоса, об/мин.

При этом рабочая точка переходит с рабочей точки C_1 в точку C , а характеристика насоса определяется кривой 2.

Рассмотрим применение данного метода регулирования работой агрегата водоотливной установки на базе насоса ЦНС 300-600. Частота вращения рабочего колеса насоса ЦНС-300-600 $n_0=1475$ об/мин, принимаемый максимальный напор при минимальной подаче $H_0 = 640$ м, минимально допустимый напор насоса для обеспечения технологических параметров водоотливной установки $H_{дон}=560$ м, минимально допустимая рабочая подача насоса для обеспечения технологических параметров водоотливной установки $Q_C=145$ м³/ч.

Характеристика трубопровода определяется выражением

$$H=H_r+aQ^2, \quad (5)$$

где H - напор в системе при соответствующей подаче Q ; H_r - гидравлический напор системы водоотлива, м; Q - подача, м³/ч; a - суммарный коэффициент сопротивления системы.

Рассчитав по известным методикам [3] уравнение характеристики трубопровода, имеем: $H_3=520+0,00085Q^2$ м. Уравнение естественной характеристики насоса: $H_2=640+0,000531Q^2$ м, упрощенное уравнение предельно допустимой характеристики насоса при частотном регулировании при открытой задвижке (рабочая точка A_1): $H_6=587-0,000531Q^2$, м. Подача при дросселировании, определяется из (3)

$$Q_1 = 145 \sqrt{\frac{640 - 520}{560 - 520 + 0,00085 \cdot 145^2}} = 218,45, \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тогда подача для предельно допустимой характеристики насоса при частотном регулировании и при открытой задвижке $Q_{A1} = Q_{c1} = Q_6 = 218,45$ м³/ч. Подача при уменьшении частоты вращения рабочего колеса насоса от значения n_1 до значения n_c при комбинированном способе регулирования $Q_C=145$ м³/ч. Подача при дросселировании без применения частотного регулирования $Q_{C0}=145$ м³/ч.

Мощность, потребляемая электродвигателем насоса, определяется из выражения, кВт

$$N_{ДВ} = 1,1 \cdot \frac{\gamma \cdot Q_{раб} \cdot H_{раб}}{3600 \cdot 102 \cdot \eta_{раб}}, \quad (6)$$

Расчеты подачи, напора, КПД и мощности, потребляемой электродвигателем насоса в характерных точках работы приведены в табл. 1.

Расчет параметров работы насоса в рабочих точках

Рабочая точка	Параметр			
	подача, м ³ /ч	напор, м	КПД, о.е.	потребляемая мощность, кВт
A	295	593,8	0,65	807
A ₁	218,45	561	0,65	565
C ₁	218,45	615	0,59	682
C	145	562	0,59	414
C ₀	145	629	0,5	546

Из табл. 1 следует, что при полностью открытой задвижке трубопровода системы водоотлива частотное регулирование позволяет регулировать подачу в диапазоне 295-218,45 м³/ч при минимально допустимом напоре 560 м. Напор изменяется в пределах 594-561 м соответственно. Для максимально возможной производительности насоса значение потребляемой мощности $N_A=807$ кВт. Уменьшение значения подачи с помощью частотного регулирования до значения 218,45 м³/ч и обеспечения минимально необходимого напора в 561 м приводит к уменьшению потребляемой мощности из сети на 242 кВт до уровня 565 кВт. Значение же КПД остается на максимально возможном уровне (см. рис. 1). При уменьшении значения подачи с помощью дросселирования до значения 218,45 м³/ч значительно увеличивается напор в системе (до 615 м), что приводит к негативным последствиям [8-10], при этом потребляемая мощность из сети составляет 682 кВт, что превышает аналогичный показатель при частотном регулировании на 117 кВт. Значение КПД снижается и составляет 0,59 (см. рис. 1). При необходимости обеспечения меньшего значения подачи, например до 145 м³/ч, целесообразно и единственно возможно использование способа «комбинированного» регулирования (дросселирование-частотное регулирование). Преимуществом данного способа по сравнению с дросселированием (на примере шахтных водоотливных установок с насосами ЦНС-300-600), являются (см. табл. 1) уменьшение потребляемой мощности электродвигателем на 132 кВт (414-546 кВт соответственно), уменьшение напора на 67 м (562-629 м соответственно), увеличение КПД на 20 % (0,59-0,5 соответственно).

Выводы и направления дальнейших исследований. Из рассмотренных способов запуска и регулирования рабочих параметров насоса наиболее энергоэффективным является частотное регулирование. Рассмотренный комбинированный способ регулирования подачи и напора, учитывает обеспечение технологических параметров системы водоотлива. Приведенное обоснование и расчёты подтверждают целесообразность широкого использования частотно-регулируемого электропривода, в особенности «комбинированным» способом, для регулирования параметров работы водоотливных установок шахт, что обуславливает актуальность проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Список літератури

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. – М.: ИК «Ягобра» Биоинформсервис, 1998. – 285 с.
2. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Машиностроение, 1981. – 144 с.
3. Картавий Н.Г., Топорков А.А. Шахтные стационарные установки. – М.: Недра, 1978. – 263 с.
4. <http://www.proenergo.ru/energy.htm>
5. <http://masters.donntu.edu.ua/2008/eltf/sukiasyan/library/letter2.htm>
6. <http://www.tsdservice.com.ua/energoberejenie-v-sistemah-ventilyacii.html>
7. Ступник Н.И., Письменный С.В. Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды/ Н.И. Ступник, С.В. Письменный//Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. – Вип. 30, 2012. – С. 3-7.
8. Осадчук Ю. Г. Концепция подхода к ресурсо-энергосбережению горно-металлургического комплекса. / Ю. Г. Осадчук //В кн. Разработка рудных месторождений. //Научно-технический сборник. - Кривой Рог: КТУ, 2002, №78, С.95-100.
9. Осадчук Ю.Г. Повышение энергетических и эксплуатационных характеристик энергоёмких установок – турбомеханизмов горно-металлургического комплекса. - В кн. Горная электромеханика и автоматика. / Ю.Г. Осадчук // Труды Международной научно-технической конференции. – Донецк, 2003, т.2., С.146-151.
10. Суртаев В.В., Осадчук Ю.Г., Батраков Д.В., Герасимчук О.В., Замицкий О.В. Підвищення енергоефективності турбомеханізмів в енергоємних технологіях гірничо-металургійного комплексу. //Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг. – Вип. 30, 2012. – С. 155-160..

Рукопись поступила в редакцию 18.03.13