

Ю.П. Сташинов, Д.А. Боченков, В.В. Волков

**ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ГЛАВНЫХ ВОДООТЛИВНЫХ
УСТАНОВКАХ ШАХТ**

Рассмотрены особенности главных водоотливных установок шахт как объектов энергоэффективного управления средствами регулируемого электропривода. Определены рациональные режимы работы насосных агрегатов. Предложено использование подкачивающих насосов с асинхронным частотно-регулируемым приводом для обеспечения энергосберегающих режимов работы водоотливных комплексов шахт

Ключевые слова: водоотливные установки шахт, насосный агрегат, регулируемый привод.

Главные водоотливные установки шахт являются крупными потребителями электроэнергии. Поэтому повышение энергетической эффективности их работы является важной научно-технической задачей.

В последние годы получает широкое применение асинхронный частотно-регулируемый привод насосных установок промышленного и бытового водо- и теплоснабжения, в которых благодаря автоматической стабилизации давления в питающей системе при переменном потреблении воды, можно сэкономить до 30–40% электроэнергии и до 12–15% воды и тепла [1, 2].

В связи с этим существует проблема некритичного переноса полученных результатов на главные водоотливные установки шахт, имеющие ряд существенных технологических особенностей, учет которых при решении вопросов применения регулируемого привода насосных агрегатов крайне важен и обязателен. Поэтому приведем краткую характеристику таких установок, а затем рассмотрим их особенности.

На главных водоотливных установках шахт обычно используют центробежные секционные насосы номинальной производительностью 105–850 м³/ч с количеством рабочих колес $N=2-10$ в зависимости от геодезической (геометрической) высоты подачи H_T [3, табл. 2.6)].

Согласно требованиям безопасности [4] емкость водосборника должна быть не менее 4-х часового притока шахтных вод, а рабочая производительность насосного агрегата выбирается из условия откачки суточного притока Q_C не более, чем за 20 ч, т. е. с минимальным запасом, равным $(24/20-1) \cdot 100 = 20\%$. С учетом наличия резервного насоса существенное превышение запаса производительности, связанное с повышением капитальных затрат, требует специального технико-экономического обоснования.

Количество Z_K рабочих колес насоса определяют по формуле [3]

$$Z_K \approx \frac{H_G}{H_K} \cdot \frac{1}{\eta_{TP}},$$

Где H_K – напор на одно колесо в номинальном режиме; $\eta_{TP} = 0,9-0,95$ – КПД трубопровода.

Полученный результат затем округляют до ближайшего целого числа.

Насосные агрегаты оборудуются нерегулируемым асинхронным электроприводом с короткозамкнутыми двигателями мощностью от 250 до 2000 кВт с запуском прямым подключением к питающей сети напряжением 6 кВ. Предусмотрена работа насосных установок в автоматическом режиме с применением серийной аппаратуры автоматизации. Включение и отключение насосных агрегатов производится по сигналам датчиков уровня.

Заливка насосных агрегатов водой перед запуском обычно осуществляется погружными заливочными насосами. Бескавитационная работа высоконапорных насосов с малой вакуумметрической высотой всасывания обеспечивается применением подкачивающих (бустерных) насосов.

К характерным особенностям главных водоотливных установок шахт с точки зрения применения на них регулируемого привода можно отнести следующие:

1. Малые потери напора в трубопроводе ΔH по отношению к геодезической высоте подачи H_G :
 $\Delta H/H_G = (1/\eta_{TP} - 1) \cdot 100\% \approx (5 \dots 11)\%$.

С одной стороны это накладывает существенные ограничения на возможное снижение частоты вращения рабочих колес насоса по условиям откачки суточного притока воды и преодоления геодезической высоты подачи. С другой стороны позволяет при относительно

узком диапазоне регулирования частоты вращения получить необходимое изменение подачи, что важно при выборе варианта регулируемого привода насосных агрегатов.

2. При округлении расчетного количества рабочих колес насоса до ближайшего целого числа возможно появление избыточного по сравнению с расчетным напора (в пределах напора на одно колесо) с возможностью выхода насосного агрегата за пределы рабочей области по производительности. На практике в таких случаях применяют дросселирование сети посредством задвижки на нагнетательном трубопроводе, что приводит к снижению энергетических показателей работы водоотливной установки.

3. Насосный агрегат должен в течение суток выдать на поверхность шахты (поднять на геодезическую высоту H_G , м) объем воды, равный суточному притоку Q_C , м³, т. е., независимо от частоты вращения рабочих колес насоса, выполнить одну и ту же полезную работу

$$A_{\Pi} = g \cdot \rho \cdot Q_C \cdot H_G, \text{ Дж}, \quad (1)$$

затратив на это из питающей сети количество электрической энергии, определяемое по формуле

$$A_0 = \frac{A_{\Pi}}{\eta_0}, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где $g=9.81$ – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; η_0 – общий КПД водоотливной установки, равный произведению коэффициентов полезного действия насоса, трубопровода, приводного электродвигателя, преобразователя (при наличии такового) и сети.

Из (1) и (2) следует, что минимизировать расход электроэнергии можно только обеспечением работы насосной установки с максимальным значением общего КПД (с минимальным удельным расходом энергии).

Известны различные предложения и разработки по внедрению энергоэффективного управления шахтными водоотливными установками. Так, в работе [5] в качестве средства устранения избыточного напора насоса и связанного с ним перерасхода электроэнергии предлагается подрезка рабочего колеса. Технически это мероприятие вполне реализуемо, но в условиях шахты сдерживается сложностью определения необходимой величины подрезки, а,

кроме того, не гарантирует эффективную работу водоотливной установки при изменении характеристик трубопровода и насосных агрегатов в процессе их дальнейшей эксплуатации. Вместе с тем подрезка колеса в совокупности с регулированием частоты вращения может быть эффективным средством дополнительного снижения необходимого диапазона регулирования приводного двигателя.

В серийно выпускаемой аппаратуре автоматизации ВАВ-1М с целью снижения платы за заявленную мощность достаточно простыми техническими средствами реализована возможность управления, обеспечивающего работу насосов вне периодов максимальных нагрузок энергосистемы. Однако для этого может потребоваться увеличение емкости водосборника и расчетной подачи насосных агрегатов.

В работе [6] наоборот предлагается с целью экономии электроэнергии реализовать средствами регулируемого привода автоматическое управление по притоку с поддержанием воды в водосборнике на верхнем уровне. При таком управлении благодаря минимизации числа пусков насосных агрегатов повышается надежность работы и срок службы механического и электрического оборудования водоотливной установки, но увеличивается плата за заявленную мощность в часы пиковых нагрузок энергосистемы. Кроме того, при разности отметок датчиков верхнего и нижнего уровней воды в водосборнике в несколько метров ощутимую экономию электроэнергии можно получить только на водоотливных установках неглубоких шахт с малой геодезической высотой подачи.

В работе [7] предлагается осуществлять регулирование подачи одного или нескольких одновременно работающих насосов в функции уровня воды в водосборнике и текущего притока для достижения минимума потребления электроэнергии в течение суток, что также предполагает применение регулируемого привода.

В работе [8] в случае переменных притоков шахтных вод рекомендуется использовать асинхронный частотно-регулируемый привод насосных агрегатов с изменением частоты вращения в диапазоне $1,05 \dots 0,9$ номинальной $n_{ном}$, при работе с пониженной на 4–10% частотой вращения в зоне минимальных удельных энергозатрат.

Но режим работы насосной установки в процессе ее эксплуатации не остается постоянным из-за изменения характеристик насосных агрегатов, трубопровода и по ряду других причин. Изме-

няются подача и напор, а, следовательно, значения как текущего, так и минимального удельных расходов электроэнергии. В таких условиях обеспечение оптимального по расходу энергии режима работы возможно, по-видимому, только применением поисковой экстремальной системы управления частотой вращения приводного двигателя насосного агрегата на основании оперативной и достоверной информации о текущем значении удельного расхода электроэнергии. Опыта разработки и применения таких систем управления для шахтных водоотливных установок пока нет.

Кроме того, как показывают результаты расчетов, выполненных для 67 типоразмеров насосных агрегатов с изменением геодезической высоты подачи в диапазоне 100...1000 м, экстремальная зависимость удельных энергозатрат от подачи отмечена только для 48 вариантов. При этом снижение удельного расхода электроэнергии при работе в зоне максимальной величины общего к. п. д. водоотливной установки для большинства насосных агрегатов не превышает 4–5% и только для насосов большой производительности ЦНСГ 850-240...960 и ЦН 1200-310 может достигать 8–9,5%.

Тем не менее, наличие экстремальной зависимости удельных энергозатрат от подачи следует учитывать при выборе расчетной подачи насоса, независимо от того, предусматривается или нет применение регулируемого электропривода. С целью снижения расхода электроэнергии при относительно стабильном притоке шахтных вод расчетная подача насоса должна соответствовать режиму работы с максимальным значением общего КПД насосной установки. Как показывают расчеты, это соответствует подаче на 8–18% меньшей номинальной подачи насоса при максимальной величине его КПД.

Необходимо также иметь в виду, что минимум удельного расхода электроэнергии не является абсолютным критерием эффективности функционирования водоотливной установки. Важно знать, ценой каких дополнительных, в частности капитальных, затрат он достигается. С этой точки зрения более объективными могут оказаться другие критерии эффективности, например, широко известный критерий минимума приведенных затрат.

Расчеты показывают, что при относительно высокой средней стоимости высоковольтных преобразователей частоты на модулях *IGBT* (150–250 \$/кВт [9]) дополнительные капитальные затраты, связанные с применением асинхронного частотно-регулируемого привода на главных водоотливных установках шахт, окупаются за

счет экономии электроэнергии за срок, не превышающий 6 лет, только для 13 типоразмеров насосных агрегатов из 67. Полученный результат заставляет искать другие, менее затратные варианты регулируемого электропривода, один из которых будет рассмотрен ниже.

Что же касается регулирования частоты вращения вверх от номинальной, то при использовании серийно выпускаемых асинхронных электродвигателей с номинальной частотой питающего напряжения 50 Гц, это возможно только при наличии соответствующего запаса по подаче насоса, а также по мощности приводного двигателя и преобразователя частоты. Связано это с тем, что частотное регулирование в этой зоне происходит при неизменной величине питающего напряжения с постоянной мощностью, тогда как в соответствии с особенностью характеристики нагрузки требуется увеличение мощности пропорционально 3-й степени относительного повышения угловой скорости.

Поэтому при переменных притоках шахтных вод для обеспечения внепикового управления расчетную подачу насоса следует выбирать из условия откачки максимального притока в интервале времени между максимумами нагрузки в энергосистеме при питании приводного двигателя непосредственно от сети, минуя преобразователь частоты. При меньших притоках для повышения энергоэффективности работы следует снижать подачу только до величины, соответствующей работе насосной установки с максимальным КПД.

При таком управлении требуется регулирование частоты вращения и напора, развиваемого насосным агрегатом, в достаточно узких пределах (в пределах напора на одно рабочее колесо, а при использовании подрезки колеса для устранения избыточного напора в еще более узком диапазоне).

В этом случае при использовании достаточно мощных асинхронных частотно-регулируемых приводов для секционных насосов главных водоотливных установок шахт возникает техническое противоречие: регулирующее воздействие оказывается на все рабочие колеса насоса, тогда как для обеспечения энергоэффективного режима работы установки достаточно было бы регулировать только одно из колес.

Указанное противоречие устраняется при использовании в составе насосной установки одноколесных подкачивающих насосов с

низковольтным асинхронным частотно-регулируемым приводом сравнительно небольшой мощности и стоимости. Естественно, применение подкачивающих насосов усложняет и несколько удорожает водоотливную установку, но, вместе с тем, позволит повысить срок службы насосов благодаря устранению кавитационных явлений, которые, как показывает опыт, в той или иной степени проявляются на большинстве главных водоотливных установок шахт. При этом следует иметь в виду, что некоторые центробежные секционные насосы, например, ЦНС 300-650...1300 с отрицательной допустимой высотой всасывания предназначены для работы только с серийно выпускаемым подкачивающим насосом ВП-340-18Л.

При наличии подкачивающего насоса представляет интерес требующее опытной проверки предложение использовать его для предварительной раскрутки вала основного насоса с целью снижения бросков пускового тока и момента при последующем подключении приводного двигателя к питающей сети [10]. По мнению авторов это позволит дополнительно повысить срок службы электро-механического оборудования водоотливной установки.

Обеспечение энергоэффективного управления насосными агрегатами главных водоотливных установок шахт применением подкачивающих насосов с асинхронным частотно-регулируемым приводом требует решения комплекса вопросов по установлению рациональных параметров и характеристик последних, что является предметом самостоятельного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильинский Н.Ф.* Электропривод в современном мире / Н. Ф. Ильинский // Сб. материалов V международной (XVI Всероссийской) науч. конф.: 18–21 сентября 2007 г. – СПб.: –2007. – С. 17–19.
2. *Ремезов А.Н.* Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода на теплоснабжающих предприятиях ЖКХ / А. Н. Ремезов, А.В. Сорокин // Приводная техника. – 2007. –№ 3. – С. 2–7.
3. *Попов В.М.* Водоотливные установки: справочное пособие / В. М. Попов. – М.: Недра. –1990.
4. *Правила безопасности в угольных шахтах.* – М.: Госгортехнадзор. –2003.
5. *Мамедов А.Ш.* Разработка и обоснование мероприятий по повышению энергоэффективности комплексов шахтного водоотлива: автореф. дис... канд. тех. наук / А.Ш. Мамедов. Екатеринбург. – 2004.

6. *Бабокин Г.И.* Энергосбережение в насосных станциях водоотлива средствами регулируемого электропривода. / Г. И. Бабокин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 11. – С. 305–306.

7. *Тимухин С.А.* Математические модели функционирования и оптимизации комплексов главных водоотливных установок. / С. А. Тимухин [и др.]. // Изв. вузов. Горный журнал. – 2002. – № 4. – С. 121–122.

8. *Черняховский, Р.Л.* Адаптация режимов работы электромеханических комплексов шахтного водоотлива к графикам энергосистемы в условиях переменных водопритоков: автореф. дис... канд. тех. наук / Р. Л. Черняховский. – СПб.: – 2003.

9. *Дробкин Б.З.* Развитие устройств силовой электроники для регулируемых электроприводов / Б. З. Дробкин, М. В. Пронин, А. А. Ефимов // Сб. материалов V международной (XVI Всероссийской) науч. конф.: 18–21 сентября 2007 г. – СПб.: – 2007. – С. 26–32.

10. *Насосный агрегат*: пат. 2311563 Рос. Федерация: МПК F04D 9/04, F04D 13/06 / Бочаров В. М. [и др.]; заявитель и патентообладатель ЮРГТУ (НПИ). – № 2006113486/06; заявл. 20.04.2006; опубл. 27.11.2007 Бюл. № 33. **ПАТ**

J.P. Stashinov, D.A. Bochenkov, V.V. Volkov

TECHNICAL AND POWER ASPECTS OF APPLICATION OF THE ADJUSTABLE ELECTRIC DRIVE ON THE MAIN SPILLWAY MINE INSTALLATIONS

Features of the main spillway mine installations as of the objects of power efficient control by means of the adjustable electric drive are considered. Rational operating modes of pump units are defined. Use of pumping up pumps with an asynchronous frequency-regulated drive for maintenance of energy-efficient operating modes of spillway mine complexes is offered

Key words: spillway mine installations, pump unit, adjustable drive.

Коротко об авторах

Сташинов Ю.П. – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры “Электрификация и автоматизация производства”,

Волков В.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры “Технологические машины и оборудование”,

Шахтинский институт Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), г. Шахты, siurgtu@siurgtu.ru

Боченков Д.А. – аспирант Южно-Российского государственного технического университета (НПИ), г. Новочеркасск, ngty@novoch.ru