Библиотека СОК



ЭКОНОМИЯ
ТОПЛИВА
И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Серия основана в 1981 году

Б. С. Лезнов

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1991

ББК 31.280.7
Л41
УДК 621.65.004.18

Рецензент канд. техн. наук Р.А. Новодережкин

Лезнов Б.С.

Л41 Экономия электроэнергии в насосных установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.: ил. – (Экономия топлива и электроэнергии)

ISBN 5-283-02011-8

Приводятся общие сведения о режиме работы отдельных насосных агрегатов различного вида и насосных установок в целом. Рассматриваются режимы энергопотребления насосной установки, основных и вспомогательных ее систем и механизмов, устанавливаются основные виды потерь электроэнергии, даются рекомендации по снижению потерь электроэнергии в насосных установках с применением современных систем регулирования режимов работы.

Для инженеров-проектировщиков и эксплуатационников насосных установок.

Л $\frac{2201010000\text{-}391}{051(01)\text{-}91}$ 41-90

ББК 31.280.7

ISBN 5-283-02011-8

© Автор, 1991

ПРЕДИСЛОВИЕ

Насосные установки страны ежегодно расходуют около 300 млрд. кВт·ч электроэнергии, т.е. примерно 20% всей электроэнергии, вырабатываемой энергосистемами страны. Высокое энергопотребление этих объектов придает важное народнохозяйственное значение проблеме экономии электроэнергии в насосных установках. К сожалению, большинство насосных установок работает не самым экономичным образом. Так, например, в результате применения неэкономичных способов регулирования режимов работы насосов в системах водоснабжения и водоотведения теряется 5–15% потребляемой электроэнергии, а в некоторых из них потери достигают 20 – 25 %.

Широкое распространение в этих системах экономичных способов регулирования, основанных на изменении частоты вращения рабочих колес насосов, позволит уменьшить потребление электроэнергии на 14–15 млрд. кВт·ч, т.е. сэкономить примерно 1% электроэнергии, вырабатываемой энергосистемами страны. Для сравнения укажем, что ежегодный прирост выработки электроэнергии в стране не превышает 3,5 – 4 %.

Применение современных способов регулирования насосов позволяет также увеличить единичную мощность насосных агрегатов и тем самым уменьшить их общее число на насосных станциях. Благодаря этому при определенных условиях могут быть существенно снижены строительные объемы насосных станций. Кроме того, применение способов регулирования за счет стабилизации давления уменьшает утечки и соответственно сокращает расход воды в системах водоснабжения на 3–5 %.

Существуют и другие способы экономии электроэнергии в насосных установках. Например, придание кромке рабочих колес оптимального профиля и шлифовка лопастей рабочего колеса насоса позволяют снизить энергопотребление на 2–3 %.

В настоящем издании анализируются причины потерь электроэнергии в насосных установках, обобщается опыт различных предприятий и организаций по экономии электроэнергии в насосных установках, описываются способы снижения потерь электроэнергии в насосных установках, дается информация о технических средствах обеспечения экономичных режимов работы насосных установок различного назначения. Основное внимание уделяется насосным установкам систем водоснабжения и водоотведения и применению в них регулируе-

мого электропривода. Рассматриваются насосные установки с подачей до 15 $м^3/с$ и напором до 200 м, оснащенные агрегатами мощностью до 5 МВт. Однако приводимые сведения могут быть использованы и при эксплуатации более мощных насосных агрегатов.

В издании использованы результаты собственных исследований автора, а также публикации других отечественных и зарубежных специалистов. Особенностью работы является комплексный подход к изложению материала, предусматривающий совместное рассмотрение взаимосвязанных процессов в гидравлических, электрических и других устройствах насосных установок, что позволяет ознакомить специалистов, работающих в смежных областях (технологии, энергетики, автоматики), с проблемой экономии электроэнергии в целом.

Для инженерно-технических работников, занятых эксплуатацией и проектированием промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных насосных установок различного назначения.

При рецензировании рукописи большую помощь оказал канд. техн. наук Р.А. Новодережкин, которого автор искренне благодарит за ценные замечания при подготовке рукописи к печати.

Все замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10. Энергоатомиздат.

Автор

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ И РЕЖИМАХ ИХ РАБОТЫ

1. НАСОСЫ И НАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ

Гидравлическая машина, создающая напорное перемещение жидкости при сообщении ей энергии, называется н а с о с о м. Насос в совокупности с электроприводом и передаточным механизмом (муфтой, редуктором, шкивом и т.п) образует н а с о с н ы й а г р е г а т. Комплекс оборудования, обеспечивающий работу насосов в требуемом режиме и состоящий из одного или нескольких насосных агрегатов, трубопроводов, запорной и регулирующей арматуры, контрольно-измерительной аппаратуры, а также аппаратуры управления и защиты, образует н а с о с н у ю у с т а н о в к у. Сооружение, в состав которого входят одна или нескольких насосных установок, а также вспомогательные системы и оборудование, бытовые и производственные помещения, обеспечивающие работоспособность объекта в целом, называется н а с о с н о й с т а н ц и е й.

Основными параметрами, характеризующими режим работы насосной установки, являются напор и подача. Н а п о р – разность удельных энергий жидкости в напорном и всасывающем патрубках насоса, необходимая для подъема жидкости на заданную высоту и преодоления сил трения в трубопроводе. П о д а ч а – объем жидкости, перекачиваемый насосной установкой за единицу времени.

Р е ж и м о м работы насосной установки называется определенный порядок работы ее оборудования в соответствии с изменяющимися условиями работы системы в целом.

В зависимости от назначения и рода перекачиваемой жидкости насосные установки подразделяются на водопроводные, канализационные, мелиоративные, теплофикационные, нефтеперекачивающие и др.

Насосные в о д о п р о в о д н ы е с т а н ц и и в зависимости от места, занимаемого в общей схеме водоснабжения, подразделяют на станции I и II подъема и повысительные.

Н а с о с н а я с т а н ц и я I п о д ъ е м а (рис. 1) забирает воду из источника водоснабжения (река, озеро, водохранилище, артезианская скважина и т.п.) и подает ее на очистные сооружения.

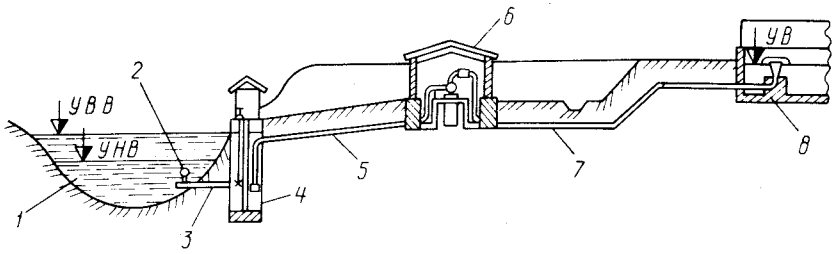


Рис. 1. Схема сооружений насосной станции I подъема:

1 – источник водоснабжения (река); *2* – водозаборное устройство; *3* – самотечный трубопровод; *4* – береговой колодец; *5* – всасывающая труба насоса; *6* – здание насосной станции; *7* – напорный трубопровод; *8* – приемная камера смесителя или водонапорная башня

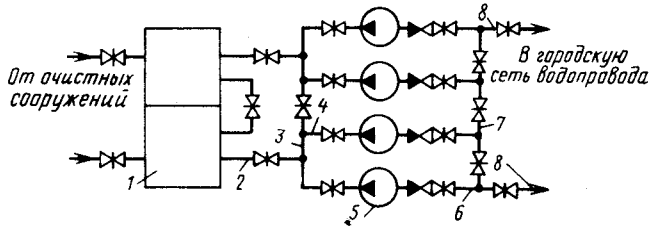


Рис. 2. Схема насосной станции II подъема:

1– секционный резервуар чистой воды; *2* – всасывающий водовод; *3* – всасывающий коллектор; *4* – всасывающая линия насоса; *5* – насос; *6* – напорная линия насосов; *7* – напорный коллектор; *8* – напорные водоводы

Насосная станция II подъема подает воду из резервуаров чистой воды в распределительную сеть (рис. 2).

В тех случаях, когда развиваемое давление недостаточно для подъема воды на требуемую высоту, сооружаются повысительные насосные станции (станции подкачки). Насосные установки этих станций увеличивают напор в сети, забирая воду из одного участка водовода или сети и подавая ее в другой водовод или участок сети. При этом забор воды может осуществляться как через промежуточные резервуары, которые выполняют функции регулирующих емкостей, так и без них. В последнем случае установки работают по схеме "из трубы в трубу" (рис. 3).

В зависимости от назначения водопроводные насосные станции (ВНС) подразделяются на станции технической и питьевой воды. Устройство этих станций, как правило, одинаково, но режимы их работы отличаются друг от друга.

Канализационные насосные станции (КНС) предназначены для перекачки сточных вод к месту очистки. В зависимости от места в

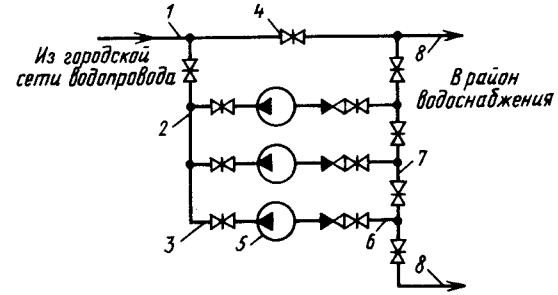


Рис. 3. Схема насосной станции подкачки (бустерной):

1 – всасывающая магистраль; *2* – всасывающий коллектор; *3* – всасывающая линия насосов; *4* – обводная задвижка; *5* – насос; *6* – напорная линия насосов; *7* – напорный коллектор; *8* – напорные водоводы

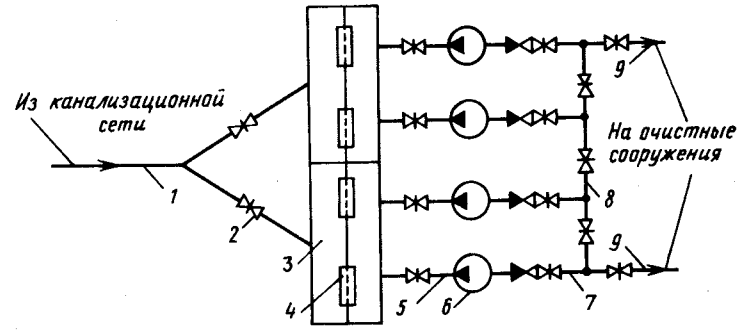


Рис. 4. Канализационная насосная станция:

1 – самотечный коллектор; *2* – щитовой затвор; *3* – приемный резервуар; *4* – механическая решетка с граблями; *5* – всасывающая линия насоса; *6* – насос; *7* – напорная линия насоса; *8* – напорный коллектор; *9* – напорные водоводы

общей схеме канализации КНС подразделяют на местные, районные и главные (центральные). Кроме того, КНС подразделяются по роду перекачиваемых стоков (бытовые, производственные и др.). КНС оборудуются как насосами для сточных жидкостей, так и другими насосами, предназначенными для перекачки загрязненных вод.

На рис. 4 приведена схема канализационной насосной станции. Сточные воды из сети поступают в приемный резервуар КНС, над которым размещается сороудерживающее и дробильное оборудование, предназначенное для задержки и измельчения крупных предметов, попадающих а канализацию. Далее сточные воды подаются насосами в напорные водоводы и по ним поступают на очистные сооружения.

Мелиоративные насосные станции подразделяются на станции орошения и осушительных систем. Насосные станции орошения в свою очередь делятся на головные, промежуточные перекачивающие и дождевальные. Устройство головных станций аналогично водопроводным станциям I подъема. Промежуточные перекачивающие насосные станции по устройству аналогичны водопроводным повысительным станциям.

Дождевальные насосные станции предназначены для подачи воды дождевальным машинам, которая может осуществляться или через открытые каналы или через закрытую сеть орошения. В последнем случае насосная станция оснащается кроме основных насосных агрегатов бустерными насосами для поддержания давления в закрытой сети в период, когда не работают основные насосы. Кроме того, на этих станциях обычно устанавливаются водо-воздушные баки, обеспечивающие автоматизацию работы основных и бустерных насосов при включении и отключении дождевальных машин.

Насосные станции осушительных систем перекачивают поверхностные воды или снижают уровень грунтовых вод. При этих станциях обычно сооружают резервуар для приема стоков. По устройству и режиму работы эти станции напоминают КНС.

Теплофикационные насосные станции предназначены для подачи горячей воды в системы отопления и горячего водоснабжения жилых и общественных зданий, а также технологическим потребителям. Источниками горячей воды являются центральные котельные и теплоэлектроцентрали, на которых обычно устанавливаются сетевые насосы. С помощью сетевых насосов вода пропускается через водоподогреватели, где она нагревается паром из теплофикационных отборов турбин и далее через теплофикационную сеть поступает к потребителю. К теплофикационным сетям присоединяются тепловые пункты, в которых устанавливаются насосы, подающие горячую воду непосредственно потребителю для отопления и других нужд.

Насосные установки тепловых электростанций (ТЭС) выполняют разнообразные функции в технологическом процессе выработки электрической и тепловой энергии. Питательные насосы подают воду в котельный агрегат. Конденсатный насос перекачивает конденсат (превратившийся в воду отработанный в турбине пар) в деаэратор. Циркуляционный насос обеспечивает постоянную циркуляцию охлаждающей воды через конденсатор и охлаждающие устройства (градирни, брызгальные бассейны).

Широкое распространение получили насосные установки, предназначенные для транспортировки нефтепродуктов. Находят они применение и в строительстве: для водопонижения, откачки загрязненных вод из котлованов, подачи различного рода жидких и полужидких компонентов (растворов, бетонов и т.п.). Применяются насосные установки и в горнорудной промышленности для транспортировки различного рода пульп (землесосы, земснаряды и проч.).

Насосные станции комплектуются одним или несколькими насосными агрегатами (до 12 агрегатов). Если в состав насосной установки входят несколько агрегатов, напорные и всасывающие линии насосов связываются между собой соответственно напорными и всасывающими коллекторами. К напорным коллекторам присоединяются напорные водоводы, а к всасывающим коллекторам – всасывающие водоводы. Если при насосной станции имеются приемные резервуары, всасывающие коллекторы могут не предусматриваться, а всасывающие линии насосов соединяются непосредственно с резервуаром.

На рис. 1–4 рассмотрено несколько характерных схем насосных установок.

2. ОБОРУДОВАНИЕ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

К основному оборудованию насосных установок относят насосы, приводы насосов (электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания), а также трубопроводы с регулирующей и запорной арматурой.

На современных насосных установках наибольшее распространение получили лопастные насосы: центробежные и осевые.

Центробежные насосы. Внутри неподвижного корпуса 1 (рис. 5), имеющего спиральную форму, находится рабочее колесо *2*, закрепленное на валу *3*. Колесо *2* состоит из двух дисков, между которыми расположены лопасти *4*. Корпус насоса соединен с всасывающим и напорным трубопроводами патрубками *5* и *6*. Если корпус насоса и его всасывающий трубопровод наполнить жидкостью, а затем привести во вращение рабочее колесо, то жидкость под действием лопастей рабочего колеса приходит во вращение. Центробежные силы перемещают жидкость на периферию, где создается повышенное давление, а в центре колеса – разрежение. За счет этой разности давлений жидкость поступает в напорный трубопровод. Так осуществляется непрерывная подача жидкости насосом.

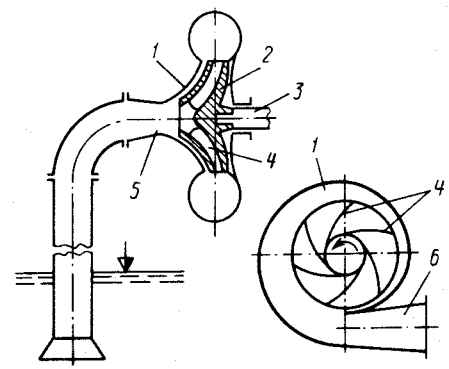


Рис. 5. Схема одноступенчатого центробежного насоса

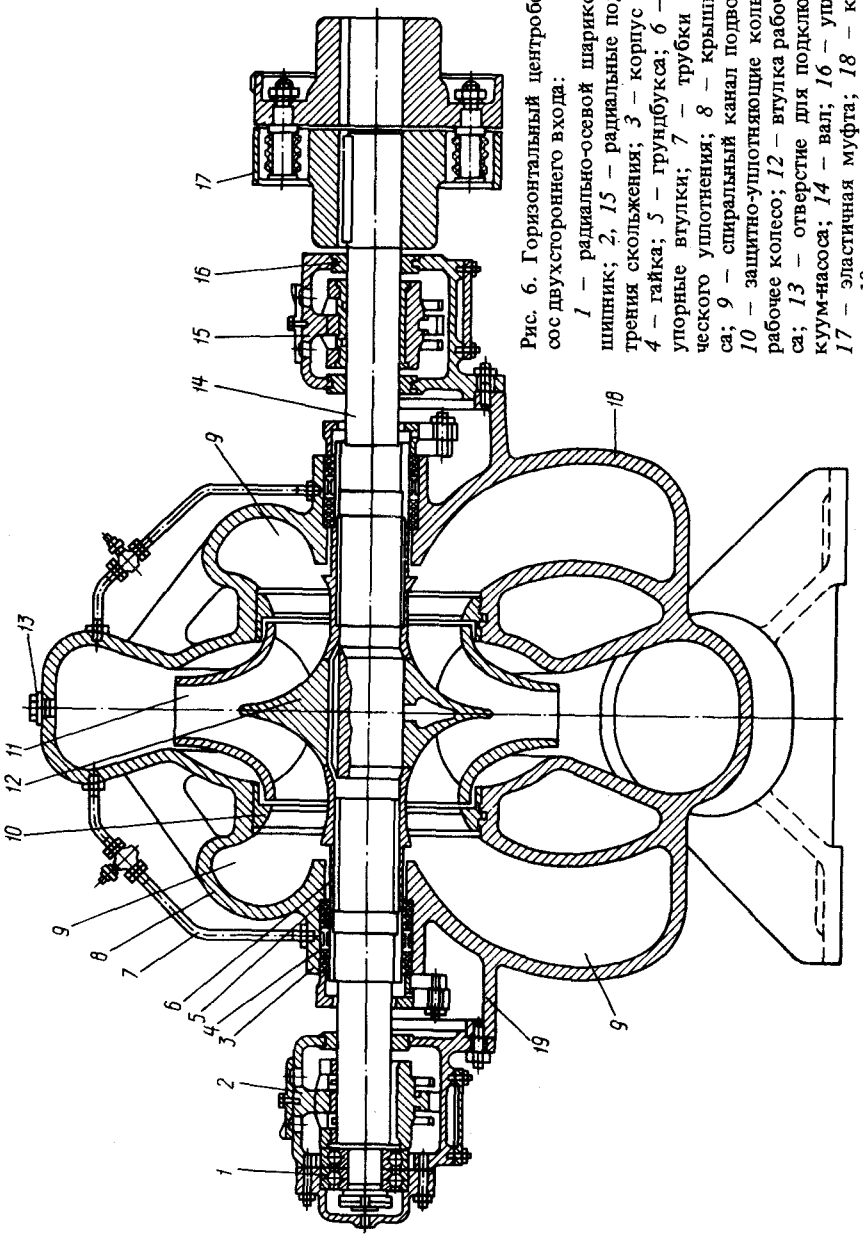


Рис. 6. Горизонтальный центробежный насос двухстороннего входа:
1 – радиально-осевой шариковый подшипник; *2, 15* – радиальные подшипники трения скольжения; *3* – корпус сальника; *4* – гайка; *5* – грундбукса; *6* – защитно-упорные втулки; *7* – трубки гидравлического уплотнения; *8* – крышка корпуса; *9* – спиральный канал подвода воды; *10* – защитно-уплотняющие кольца; *11* – рабочее колесо; *12* – втулка рабочего колеса; *13* – отверстие для подключения вакуум-насоса; *14* – вал; *16* – уплотнение; *17* – эластичная муфта; *18* – корпус насоса; *19* – кронштейн

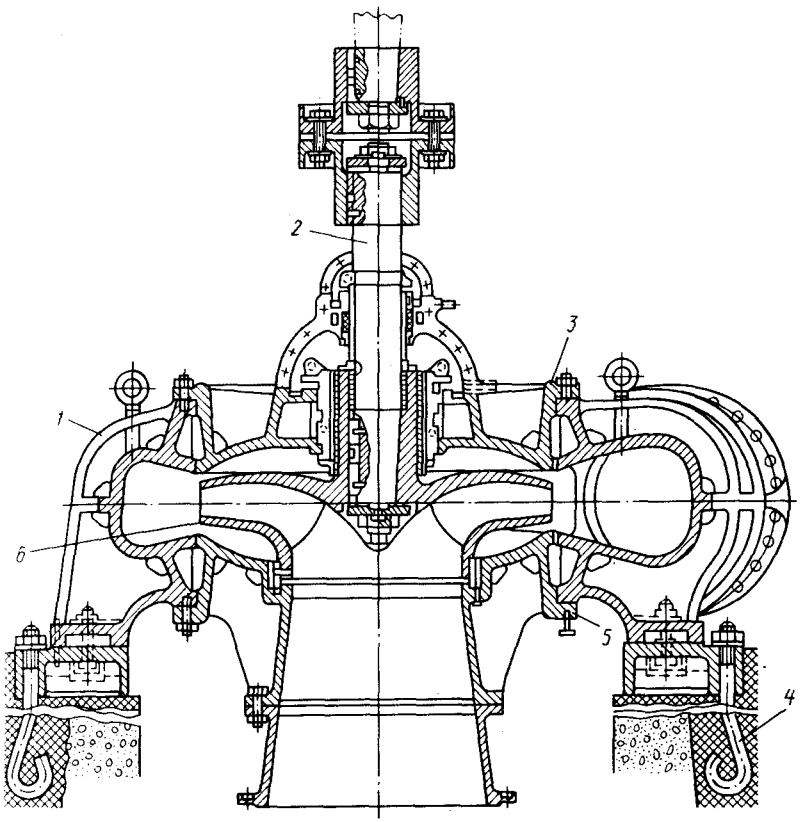


Рис. 7. Центробежный вертикальный насос 1000В-4/63А (40В-16):
1 – корпус; *2* – вал; *3* – крышка корпуса верхняя; *4* – болт фундаментный; *5* – крышка корпуса нижняя; *6* – рабочее колесо

Центробежные насосы могут быть как одноступенчатые (с одним рабочим колесом), так и многоступенчатые (с несколькими колесами). Конструктивно в зависимости от расположения вала они подразделяются на насосы горизонтальные (рис. 6) и вертикальные (рис. 7).

Осевые насосы. Рабочее колесо (рис. 8) вращается в сферической камере. При воздействии лопастей рабочего колеса на жидкость за счет изменения скорости течения давление над лопастью повышается, а под ней понижается. Благодаря разности давлений жидкость перемещается вдоль оси насоса.

Осевые насосы изготавливаются двух типов: с жёстко закрепленными лопастями рабочего колеса (типа О) и с поворотны-

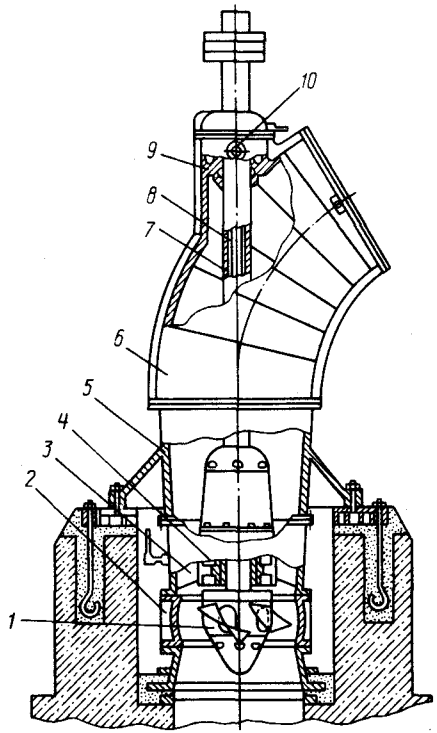


Рис. 8. Осевой насос типа ОП:

1 – рабочее колесо с поворотными лопастями; *2* – сферическая камера; *3* – спрямляющий аппарат; *4* – нижняя опора вала; *5* – диффузор с лапами для крепления к фундаментным плитам; *6* – корпус насоса; *7* – полый вал; *8* – шток привода механизма разворота лопастей; *9* – верхний направляющий подшипник; *10* – механизм поворота лопастей с ручным приводом

ми лопастями (типа ОП). Насосы обоих типов могут выпускаться в двух исполнениях: Г – с горизонтальным расположением вала, В – с вертикальным.

Рабочее колесо осевых насосов типа ОП состоит из втулки обтекаемой формы, на которой укреплены поворотные лопасти (рис. 8). Возможность изменения угла установки лопастей позволяет регулировать подачу и напор насоса в широких пределах при сохранении высоких значений КПД.

Привод насосов. Для привода насосов используются преимущественно асинхронные короткозамкнутые и синхронные двигатели переменного тока. В редких случаях используются асинхроннные электродвигатели с фазным ротором. Электродвигатели мощностью до 350 кВт выполняются на напряжение 380–660 В, а выше – на 6–10 кВ. В ряде случаев, особенно в передвижных насосных установках, для привода насосов используются двигатели внутреннего сгорания.

Трубопроводы. Трубопроводная арматура. Внутренние трубопроводы насосных станций (напорные и всасывающие линии насосов, всасывающие и напорные коллекторы и др.) выполняются из стальных труб. Соединение стальных труб осуществляется сваркой. В качестве трубопроводной арматуры в насосных установках используются задвижки, затворы, обратные затворы (клапаны).

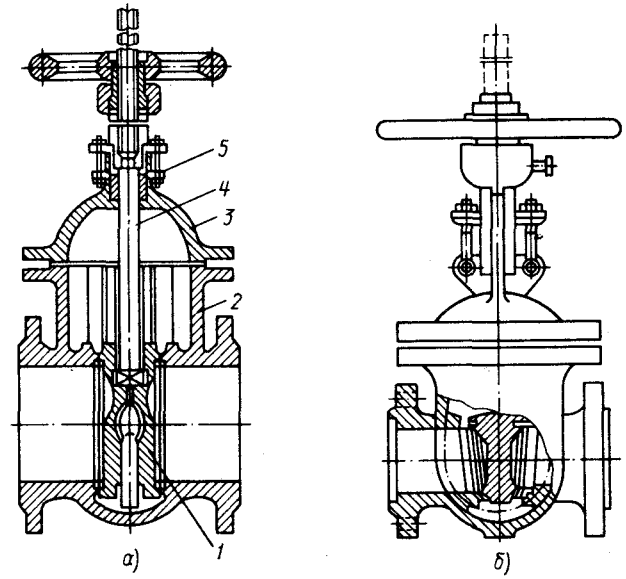


Рис. 9. Задвижки с ручным приводом:

а – параллельная; *б* – клиновая; *1* – запорный диск; *2* – корпус; *3* – крышка; *4* – шпиндель; *5* – сальник

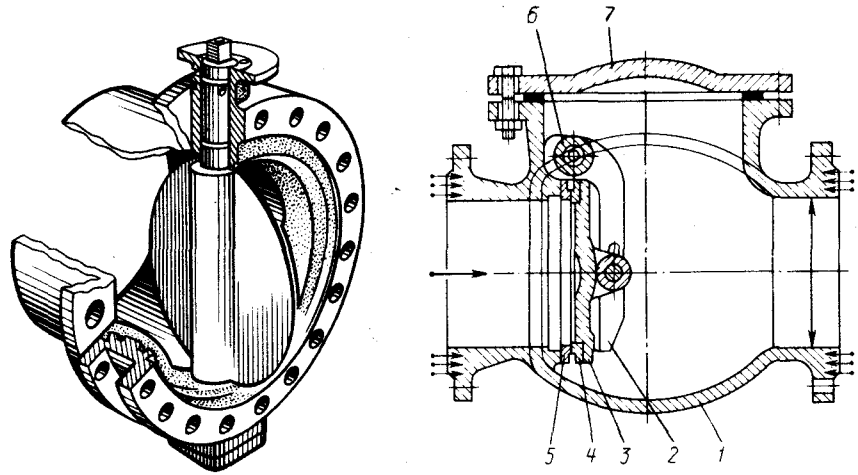


Рис. 10. Затвор дисковый с эластичной рубашкой в корпусе

Рис. 11. Однодисковый обратный поворотный фланцевый затвор:

1 – корпус; *2* – рычаг; *3* – диск; *4* – уплотнение диска; *5* – уплотнение корпуса; *6* – ось; *7* – крышка

В зависимости от конструкции задвижки подразделяются на параллельные (рис. 9, *а*) и клиновые (рис. 9, *б*). Задвижки большого диаметра, а также работающие с дистанционным и автоматическим управлением, оборудуются гидравлическими или электрическими приводами. Для уравновешивания давления по обе стороны диска у крупных задвижет предусматривается обводная задвижка (байпас).

В качестве запорной и регулирующей арматуры используются затворы. Широкое распространение в последнее время получили дисковые затворы (рис. 10), которые оборудуются электрическими приводами.

Обратные затворы (рис. 11) предназначены для того, чтобы воспрепятствовать опорожнению напорных трубопроводов и обратному вращению насоса после его остановки. Конструкции обратных затворов различны: с замедленной посадкой, однодисковые, многодисковые, с противовесом и др.

Во время работы насоса под действием потока воды диск поворачивается на оси и вода проходит через затвор. После остановки насоса диск под действием собственного веса и давления воды со стороны напорного водовода опускается и затвор закрывается.

3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ НАСОСОВ И НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Режимы работы насосной установки существенно зависят от изменения режимов водопотребления или притока сточной жидкости. Это наглядно проявляется при работе систем водоподачи и водоотведения. Как правило, режимы водопотребления и притока сточных вод определяются многими, не зависящими друг от друга причинами: климатическими и погодными условиями, режимом работы предприятий и организаций города, числом культурно-зрелищных мероприятий, содержанием их программ.

Режим водопотребления обычно характеризуется суточными, недельными и т.п. графиками водопотребления. На рис. 12 представлен примерный суточный график водопотребления небольшого населенного пункта.

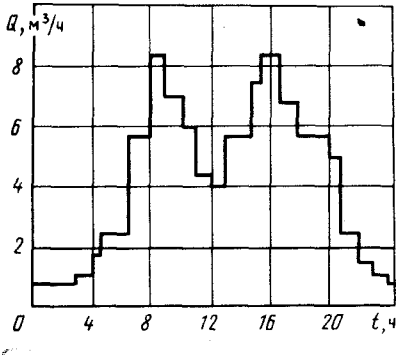


Рис. 12. Суточный график водопотребления

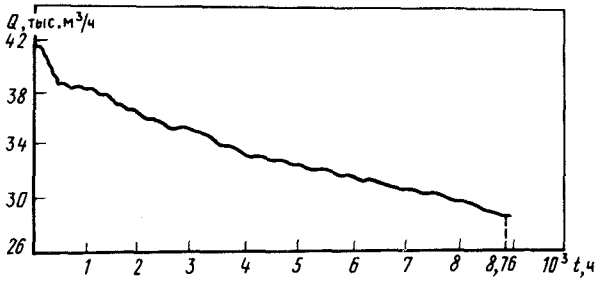


Рис. 13. Кривая распределения водоподачи за год крупной водопроводной станции

Кроме того, режим водопотребления характеризуется кривой распределения подач, которая дает представление о диапазоне изменения водопотребления за тот или иной промежуток времени (месяц, год и т.п.) и длительности работы системы с тем или иным водопотреблением (рис. 13). Графики водопотребления характеризуются коэффициентами неравномерности. Максимальный коэффициент неравномерности: $K_{макс} = Q_{макс}/Q_{ср}$, где $Q_{макс}$ – максимальное водопотребление; $Q_{ср}$ – среднее значение водопотребления. Минимальный коэффициент неравномерности $K_{мин} = Q_{мин}/Q_{ср}$, где $Q_{мин}$ – минимальное водопотребление. Диапазон колебания водопотребления характеризуется отношением $\lambda = Q_{мин}/Q_{макс}$, которое может быть также выражено через коэффициенты максимальной и минимальной неравномерности $\lambda = K_{мин}/K_{макс}$.

Режим притока сточных вод характеризуется графиками притока, которые имеют вид, аналогичный графикам водопотребления, а также коэффициентами неравномерности.

Режимы работы насосных установок промышленных предприятий определяются главным образом технологическим процессом предприятия. Существуют режимы водопотребления и перекачки, аналогичные режимам работы городских водопроводных и канализационных насосных станций. Насосные установки промышленных предприятий могут быть и с явно выраженным ночным и дневным режимом водопотребления (рис. 14).

Режимы работы теплофикационных насосных установок, систем оборотного водоснабжения существенно зависят от температуры наружного воздуха, а следовательно, и от времени года, климата и подачи.

Подача насосных установок, работающих непосредственно в сеть без промежуточных емкостей в каждый момент времени, равна водопотреблению (при отсутствии утечек и непроизводительных расходов). В действительности в любой системе водоподачи имеются утечки и непроизводительные расходы, значения которых достигают во многих

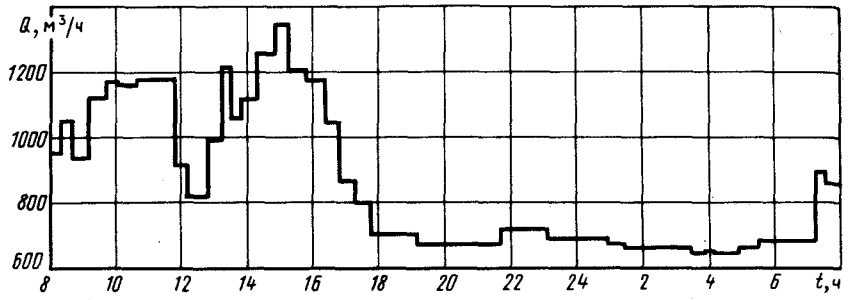


Рис. 14. Суточный график водоподачи насосной установки свиноводческого промышленного комплекса

случаях 15–20% общей подачи. Следовательно, подача насосной установки должна быть больше водопотребления именно на это значение.

При стабильном водопотреблении установки работают с постоянными подачей и давлением или напором, которые между собой связаны соотношением $H = p/\rho g$, где H – напор, м; p – давление насоса, Па; ρ – плотность жидкой среды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2. С ростом водопотребления подачу приходится увеличивать. При этом потери давления в трубах увеличиваются. Чтобы компенсировать эти потери, следует увеличить давление, развиваемое насосной установкой. При уменьшении водопотребления подача и давление должны быть уменьшены. Приведение в соответствие водопотребления и подачи осуществляется в настоящее время чаще всего изменением числа работающих насосных агрегатов или степени открытия задвижек (затворов) на напорных линиях насосов и насосных установок.

Режим работы насосной установки, подающей воду потребителю через аккумулирующую емкость (резервуар, водонапорную башню и т.п.), характерен тем, что в отдельные периоды времени подача насосной установки отличается от водопотребления. Если подача больше водопотребления, уровень воды в резервуаре поднимается, если меньше, уровень падает. В случае равенства подачи и водопотребления уровень в резервуаре стабилизируется на одной отметке.

Регулирование режима работы насосной установки, состоящей из одного агрегата, осуществляется включением агрегата при снижении уровня воды до заданного нижнего значения и отключением при достижении заданного верхнего значения. Затем цикл повторяется. Если насосная установка состоит из нескольких агрегатов, ее режим работы отличается тем, что задается по нескольку верхних и нижних уровней, при достижении которых изменяется число работающих агрегатов. С увеличением водопотребления частота включений агрегатов увеличивается, продолжительность пауз уменьшается, поскольку при увеличении водопотребления быстрей срабатывается объем жидкости в резервуаре, при этом уровень жидкости быстрей достигает нижнего положения и вследствие этого чаще происходит включение дополнительных насосов.

Режим работы насосных установок при откачке жидкости из резервуаров (канализационных, осушительных, мелиоративных и т.п.) аналогичен вышеописанным с тем отличием, что агрегаты включаются в работу при наполнении резервуаров до верхних уровней, а отключаются при опорожнении до нижних.

Число включений-отключений насосных агрегатов в насосных станциях с резервуарами достигает 40–50, а в ряде случаев 100 включений в сутки. Поскольку такое число включений для агрегатов большой мощности недопустимо, в насосных установках с агрегатами мощностью свыше 150 кВт вместо их включений-отключений применяется дросселирование потока воды задвижкой (затвором). При увеличении притока уровень жидкости в резервуаре, из которого жидкость откачивают, поднимается. В этом случае задвижка на напорной линии насоса приоткрывается. С уменьшением притока уровень падает и задвижка прикрывается.

В насосных установках, подающих воду в резервуары, при увеличении водопотребления уровень в резервуаре падает. В этом случае задвижки (затворы) на напорных линиях приоткрываются. При уменьшении водопотребления уровень поднимается, а задвижка (затвор) в этом случае прикрывается.

Контроль за режимом работы насосной установки осуществляется с помощью следующих измерительных устройств: манометров, уровнемеров, расходомеров, счетчиков электроэнергии, амперметров и т.д. Изменение режима работы насосной установки влияет на режим работы отдельных насосных агрегатов, из которых состоит установка.

Анализ режима работы насосных установок выполняется с использованием характеристик насосов и трубопроводов. Характеристиками насоса называются зависимости напора H, мощности N, коэффициента полезного действия η и допустимой вакуумметрической высоты всасывания $H_{\text{вак}}^{\text{доп}}$ или кавитационного запаса $\Delta h_{\text{доп}}$ от подачи насоса Q при определенной частоте вращения n рабочего колеса диаметром D.

На рис. 15 представлены рабочие характеристики центробежного насоса Д1250-65 для колес трех диаметров: 460, 430 и 400 мм при частоте вращения 1450 об/мин. Характеристики насосов других типов могут отличаться от представленных на рис.1.5. Характеристики Q–H могут быть более пологими или крутыми, непрерывно снижающимися или сначала возрастающими, а зазем снижающимися. Характеристики Q–H центробежных насосов в пределах рекомендуемых подач описы-

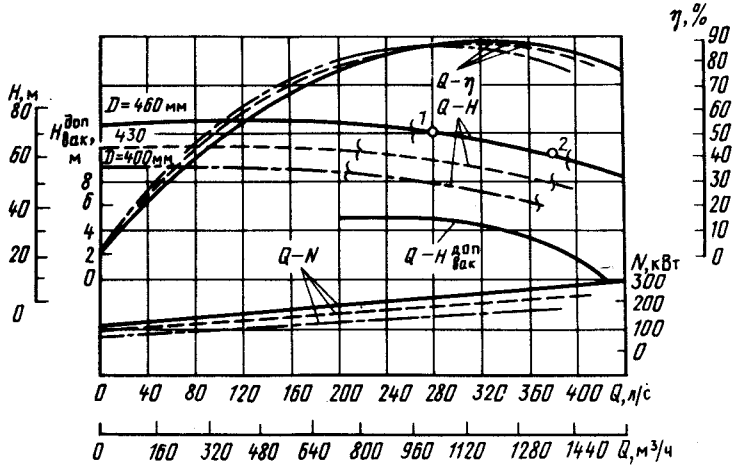


Рис. 15. Рабочие характеристики центробежного насоса:
D – диаметр рабочего колеса

ваются уравнением квадратичной параболы:

$$H_н = H_ф - S_ф Q^2, \qquad (1)$$

где $H_ф$ – фиктивный напор при нулевой подаче, м; $S_ф$ – гидравлическое фиктивное сопротивление насоса, м(с/л)^2. Значения параметров $H_ф$ и $S_ф$ для отечественных насосов приводятся в [4].

При необходимости ф и к т и в н ы е параметры могут быть определены по каталожным данным насоса или по экспериментальным данным. Для этого следует определить координаты двух точек рабочей части напорной характеристики насоса, например точки *1* и *2* (рис. 1.5). Этим двум точкам соответствуют значения напоров H_1 и H_2, м, и подачи Q_1 и Q_2, л/с, с учетом которых далее определяются значения фиктивных параметров насоса, м(с/л)^2, при нулевой подаче:

$$S_ф = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}; \qquad (2)$$

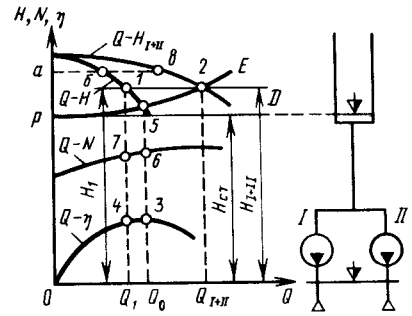
$$H_ф = H_1 + S_ф Q_1^2 \qquad (3)$$

или

$$H_ф = H_2 + S_ф Q_2^2. \qquad (3а)$$

Значения фиктивного напора зависят от конструктивных параметров насоса. Отношение фиктивного напора к номинальному напору $H_ф/H_б = H_ф^*$, так же как и коэффициент быстроходности, дает пред-

Рис. 16. График параллельной работы двух одинаковых центробежных насосов совместно с трубопроводом



ставление о крутизне напорной характеристики насоса. Для большинства наиболее распространенных отечественных центробежных насосов для чистой воды относительный фиктивный напор $H_ф^* \approx 1{,}25$, а для насосов динамических для сточной жидкости $H_ф^* = 1{,}45$.

Наибольшую крутизну имеют характеристики Q–H осевых насосов, для которых $H_ф^* = 2$. Кроме того, они также имеют и точки перегиба.

Для анализа режима работы насосных установок с несколькими насосами, работающими параллельно или последовательно, используют с у м м а р н ы е характеристики нескольких насосов. При п а р а л л е л ь н о й работе насосы подают воду в один напорный водовод или в одну систему трубопроводов. Суммарная характеристика Q–H параллельно работающих насосов строится сложением абсцисс их характеристик при одном и том же значении ординаты (напора), так как их общая подача равна сумме подач каждого насоса. Например, для нахождения точки *в* суммарной характеристики Q–H двух насосов одного типа необходимо удвоить отрезок *аб*, т.е. *ав* = 2*аб* (рис. 16). Точно также находят остальные точки суммарной характеристики. Если параллельно работают 3 насоса, длина отрезка *аб* утраивается, если 4, то увеличивается вчетверо, и т.д.

При п о с л е д о в а т е л ь н о й работе двух центробежных насосов один из них подает жидкость во всасывающий патрубок другого, который подает жидкость в систему трубопроводов. Суммарная характеристика Q–H последовательно работающих насосов строится сложением ординаты их характеристик при одной и той же подаче, так как развиваемый ими напор равен сумме напоров, создаваемых каждым насосом.

Зависимость между расходом жидкости через трубопровод и напором, который требуется для обеспечения этого расхода, называется х а р а к т е р и с т и к о й трубопровода и описывается уравнением

$$H_с = H_{ст} + SQ^2, \qquad (4)$$

где $H_с$ – напор в начале трубопровода; S – гидравлическое сопротив-

ление трубопровода; $H_{ст}$ – статический напор, обусловленный разностью геодезических отметок подачи и приема жидкости.

Графически характеристика трубопровода изображается параболой (рис. 16). Суммарная характеристика нескольких трубопроводов, соединенных последовательно, строится сложением ординат характеристик этих трубопроводов при одной и той же подаче (абсциссе), соединенных параллельно – сложением абсцисс характеристик трубопроводов при одинаковых ординатах (напорах).

Пересечение характеристик $Q–H$ насоса и трубопровода (точка *5* на рис. 16) дает р а б о ч у ю точку насоса. Координаты этой точки в плоскости $Q–H$ соответствуют подаче и напору при данном режиме работы насоса и трубопровода.

Режим работы группы насосов определяется пересечением суммарной характеристики $Q–H_{I+II}$ группы насосов с характеристикой трубопровода (системы трубопроводов). Этому режиму соответствует точка *2* с координатами: подача – Q_{I+II}, напор – H_{I+II} (рис. 16).

Режим работы каждого из параллельно работающих насосов определяется следующим образом (рис. 16): через точку *2* проводят линию, параллельную оси абсцисс. Пересечением этой линии с характеристикой $Q–H$ одного насоса в точке *1* определит рабочую точку одного из параллельно работающих насосов. Координаты точки *1* соответствуют расходу Q_1 и напору H_1 каждого из насосов. КПД насоса, соответствующий этому режиму, определяется ординатой точки *4* на пересечении кривой $Q–\eta$ с перпендикуляром, опущенным из точки *1*, а мощность, потребляемая одним насосом, ординатой точки *6* на пересечении кривой $N–Q$ с тем же перпендикуляром.

Работа насоса наиболее э к о н о м и ч н а, когда его подача и напор соответствуют максимальному значению КПД. Вместе с тем допускается некоторое отклонение рабочих параметров этих насосов от значений, указанных в каталогах. Однако они при этом не должны выходить за пределы рекомендуемых подач насоса, которые отмечаются извилистыми вертикальными черточками на характеристиках $Q–H$. За этими пределами насосы работают с низкими значениями КПД, при этом возможна перегрузка насосного агрегата, а также существует опасность возникновения кавитации и помпажа.

Нарушение сплошности потока жидкости, сопровождаемое образованием пузырьков, заполненных парами жидкости, газами или их смесью, называется к а в и т а ц и е й. Явление кавитации сопровождается дополнительными потерями энергии и разрушением поверхностей рабочего колеса и корпуса насоса.

В насосах, характеристика $Q–H$ которых состоит из двух ветвей, возрастающей и падающей (рис. 17), возможно возникновение явления, называемого п о м п а ж е м. В этом случае возможно пересечение характеристики трубопровода с характеристикой насоса в двух точках *А* и *Б*. При этом насос работает попеременно с рабочими парамет-

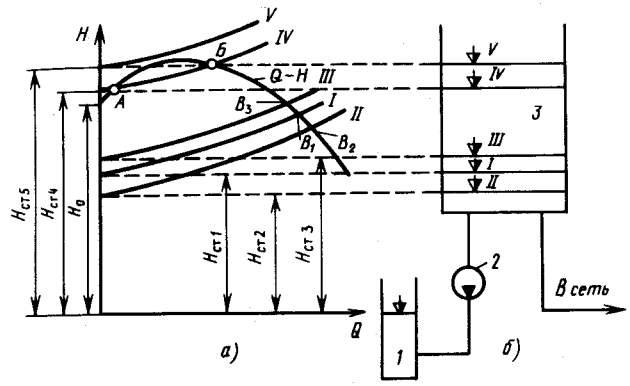


Рис. 17 Устойчивость работы насоса:

а – график совместной работы насоса и насосной станции; *б* – схема насосной установки; *1* – приемный резервуар; *2* – насос; *3* – напорный резервуар; *I–V* – характеристики трубопровода, соответствующие *I–V* уровням в напорном резервуаре

рами, соответствующими точкам *А* и *Б*, а вся система работает неустойчиво, меняется нагрузка на агрегате, возникают гидравлические удары.

Работа насоса в режимах помпажа и кавитации недопустима.

Преднамеренное изменение подачи и напора насосов в соответствии с новым режимом работы системы называется р е г у л и р о в а н и е м. Центробежные насосы регулируются изменением ч а с т о т ы в р а щ е н и я рабочих колес или изменением с т е п е н и о т к р ы т и я задвижки (затвора) на напорной линии. Прикрывая или открывая затвор, изменяют крутизну характеристики $Q–H$ трубопровода (рис. 18), которая зависит от его гидравлического сопротивления. Прикрывая затвор, увеличивают крутизну характеристики, при этом рабочая точка насоса A_1 перемещается в положение A_2. При этом подача уменьша-

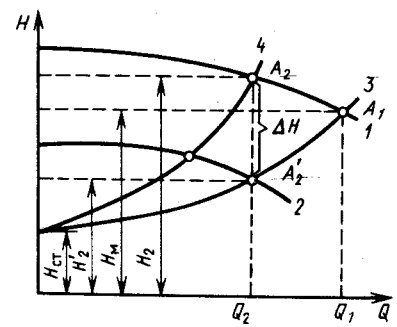


Рис. 18. Регулирование режима работы центробежного насоса дросселированием:

1 – характеристика $Q–H$ насоса при номинальной частоте вращения; *2* – то же при уменьшенной частоте вращения; *3* – характеристика $Q–H$ трубопровода при полном открытии затвора; *4* – то же при уменьшении степени открытия затвора

ется до значения Q_2, напор, развиваемый насосом, возрастает до значения H_2, а напор на трубопроводе за затвором снижается до значения H_2' за счет потерь напора ΔH в затворе.

Увеличивая степень открытия затвора, уменьшают крутизну характеристики трубопровода. Вследствие этого подача увеличивается, напор, развиваемый насосом, уменьшается, а напор в трубопроводе за затвором возрастает. Этот способ регулирования считается малоэкономичным, так как на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления в затворе требуются дополнительные затраты энергии.

При изменении частоты вращения насоса изменяется положение характеристики Q–H насоса. Уменьшая частоту вращения, перемещают характеристику вниз параллельно самой себе. При этом рабочая точка, перемещаясь по характеристике трубопровода, занимает положение A_2', следовательно, подача уменьшается так же, как и напор в сети и напор, развиваемый насосом.

Увеличение частоты вращения вызывает обратные явления. Этот способ регулирования более экономичен, но требует применения специального регулируемого электропривода, что усложняет и удорожает насосную установку.

Кроме того, режим работы центробежных насосов может регулироваться с помощью направляющего аппарата, устанавливаемого на входе воды в насос, впуском воздуха в корпус насоса и другими способами.

Осевые насосы регулируются поворотом лопастей рабочих колес. Более подробно процесс регулирования режимов работы насосов см. в § 12.

Глава 2

ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

4. ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОСНОВНЫМИ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ

Прогнозирование потребления электроэнергии. Электроэнергия, потребляемая насосными агрегатами, расходуется на подъем жидкости и преодоление гидродинамического сопротивления в трубопроводах. Кроме того, часть электроэнергии расходуется и в самих насосных агрегатах на преодоление сил трения в сальниках и подшипниках насосных агрегатов, на нагрев стали и меди в электродвигателе, на его вентиляцию и проч. Отношение полезно использованной в насосном агрегате электроэнергии к полученной характеризуется КПД агрегата. Для современных насосных агрегатов в зависимости от их мощности, назначения и других факторов КПД изменяется от 0,3 до 0,9.

Мощность, кВт, потребляемая насосом, определяется по формуле

$$N = \frac{\rho g Q H}{1000 \eta_н}, \qquad (5)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; Q – подача насоса, м^3/с; g – ускорение свободного падения, g = 9,81 м/с^2; H – напор насоса, м; $\eta_н$ – КПД насоса.

Мощность, кВт, потребляемая насосным агрегатом,

$$P = \frac{N}{\eta_{эд}\,\eta_{пр}}, \qquad (6)$$

где $\eta_{эд}$ – КПД электродвигателя; $\eta_{пр}$ – КПД преобразующего устройства (частотного преобразователя, трансмиссии и т.п.).

Мощность агрегатов на современных насосных станциях достигает 3,5–5 МВт, а отдельных агрегатов в крупных оросительных системах 12 МВт.

Количество электроэнергии, потребляемой агрегатом за время t, при работе с постоянной подачей и неизменным давлением определяется по формуле

$$W = Pt, \qquad (7)$$

где t – время работы, ч.

В реальных установках насосные агрегаты обычно работают с переменной подачей (см. рис. 12) и соответственно с переменным давлением. Вследствие этого мощность, потребляемая агрегатом в течение некоторого времени, принимает различные значения. Поэтому использование формулы (7) ограничивается теми случаями, когда насосная установка длительно работает в равномерном режиме.

Для определения количества электроэнергии, потребляемой насосными станциями при работе в неравномерном режиме, разработаны методы, которые позволяют прогнозировать потребление электроэнергии насосными установками систем водоподачи и водоотведения [12, 40]. Ниже излагается упрощенная методика прогнозирования, разработанная во ВНИИВОДГЕО [40].

На рис. 19 представлен график совместной работы насоса и трубопровода, а также упорядоченная диаграмма (кривая распределения) подачи жидкости. Под упорядоченной диаграммой (понятие заимствовано из [50]) подачи жидкости понимается кривая, соединяющая ординаты графиков подачи жидкости в порядке возрастания или убывания. Диаграмма строится для длительного расчетного периода времени, например года.

Характеристика трубопровода описывается уравнением (4), а характеристика насоса – уравнением (1). Упорядоченная диаграмма (полностью или частично) может быть аппроксимирована уравнением

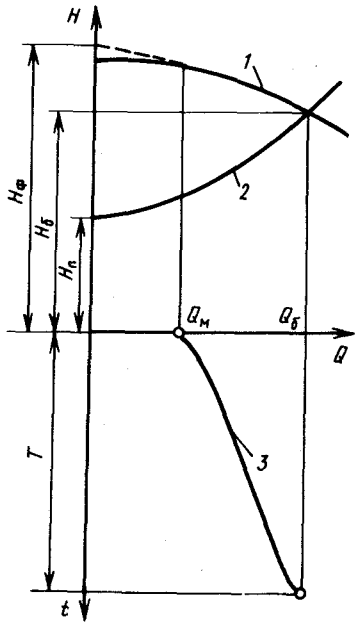


Рис. 19. График совместной работы насоса с трубопроводом и упорядоченная диаграмма подачи жидкости:

1 – напорная характеристика насоса; *2* – характеристика трубопровода; *3* – диаграмма подач

прямой линии:

$$Q = Q_б \left[(1-\lambda)\frac{t}{T} + \lambda \right], \qquad (8)$$

где $Q_б$ – наибольшая для данной насосной установки подача за расчетный период; λ – относительная минимальная подача для данной установки, $\lambda = Q_м/Q_б$; T – длительность расчетного периода; $Q_м$ – наименьшая для данной установки подача за расчетный период. В качестве расчетного периода принимается продолжительный отрезок времени, например год, т.е. $T = 8760$ ч.

С использованием уравнений (5) и (8) получена зависимость потребляемой насосами мощности от времени, которая справедлива при условии, что насос работает без излишнего напора. При ее выводе приняты некоторые допущения, в частности, что насосы работают в пределах рабочей зоны и, следовательно, КПД в процессе работы изменяются незначительно.

После интегрирования этой зависимости в пределах от 0 до T и некоторых других преобразований получено выражение для определения количества энергии:

$$W = \frac{N_б T}{\eta_{эд}} \frac{(1+\lambda)}{4} \left[(1 + H_п^*) + \lambda^2 (1 - H_п^*) \right], \qquad (9)$$

где $N_б$ – мощность, потребляемая насосом при максимальной подаче, кВт; $H_п^* = H_п/H_б$ – относительный статический напор. Мощность $N_б$ вычисляется по формуле (5) при подстановке соответствующих значений максимальной для данной установки подачи $Q_б$ и напора $H_б$, соответствующего этой подаче (рис. 19).

Уравнение (9) позволяет вычислить потребление энергии насосной установкой за расчетный период времени T при условии, что ее агрегаты поддерживают минимально необходимый напор в полном соответствии с уравнением (4), т.е. установка работает без превышения напора. Погрешность вычислений составляет $\pm (10 \div 15)$ %.

Если зависимость $H = f(Q)$ выразить уравнением характеристики насоса (*1*), а не трубопровода, аналогичным образом можно получить выражение для определения потребления электроэнергии насосным агрегатом при работе с превышением напора:

$$W = \frac{N_б T}{\eta_{эд}} \frac{(1+\lambda)}{4} \left[(1 + H_ф^*) + \lambda^2 (1 - H_ф^*) \right], \qquad (10)$$

где $H_ф^* = H_ф/H_б$ – относительный фиктивный напор насоса при нулевой подаче.

Уравнение (10) получено для установки с одним работающим насосным агрегатом. Если одновременно работают несколько насосов, развиваемый ими напор несколько ниже, чем напор, развиваемый при тех же условиях одним насосом. По этой причине в уравнение (10) следует

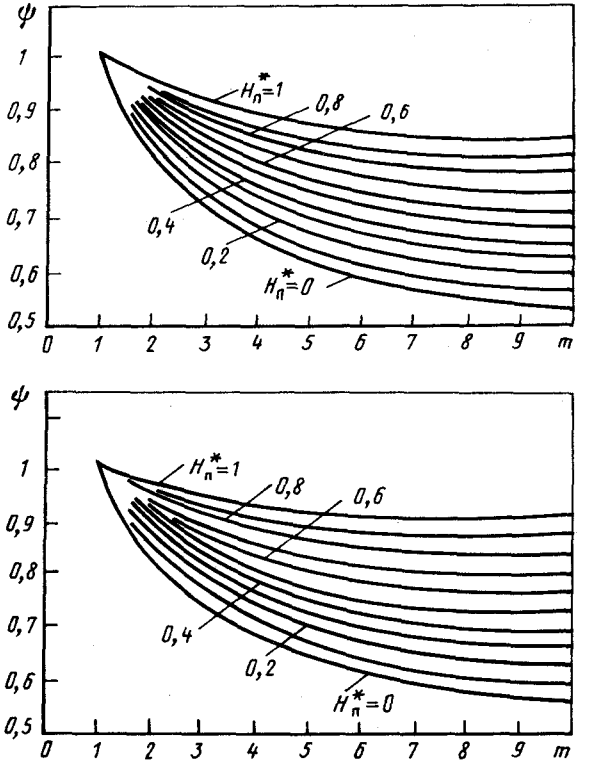


Рис. 20. Зависимость понижающего коэффициента ψ от числа работающих насосных агрегатов и относительного статического напора:

а – при $H_ф^* = 1{,}45$; *б* – при $H_ф^* = 1{,}25$

ввести понижающий коэффициент ψ, значение которого зависит от числа работающих агрегатов и относительного статического напора $H^*_п$ (рис. 20, *а, б*).

Фактическое энергопотребление и удельные расходы электроэнергии. Количество электроэнергии, вычисленное по (9), соответствует оптимальному режиму работы насосной установки, т.е. работе без превышения напоров, при максимальных значениях КПД и т.д. В действительности реальные режимы работы отличаются от оптимальных. Основное отличие заключается в том, что напор, развиваемый насосными установками, превышает значения, определяемые уравнением (4). Поэтому реальное энергопотребление в большинстве случаев превышает количество электроэнергии, вычисленное по (9).

Обычно энергопотребление насосных установок планируется на основе средних статистических норм, которые выше научно обоснованных. В настоящее время удельный расход энергии на подачу и отведение 1 м^3 воды в среднем по стране составляет 500–550 кВт·ч/тыс.м^3 [49].

В зависимости от местных условий для каждой насосной установки норма энергопотребления существенно отличается от средней и в большую, и в меньшую сторону. Отличие вызвано главным образом тем, что высота подъема жидкости разных насосных установок различна. В связи с этим в некоторых хозяйствах удельные нормы расходования электроэнергии планируются не на единицу объема поданной жидкости, а на произведение массы поданной жидкости и развиваемого насосами напора. Например, в московском и ленинградском водопроводах норма потребления энергии колеблется в пределах 3,3 – 4 кВт·ч/(тыс.т·м). Такое расхождение в значениях для разных насосных установок обусловлено состоянием насосных агрегатов, а также гидравлическим сопротивлением всасывающих и напорных трубопроводов и арматуры насосных установок. С точки зрения энергетической оценки системы водоподачи (насосной установки, водоводов и сети) использование норм энергопотребления в единицах измерения кВт·ч/м^3 предпочтительней, чем в кВт·ч/ (тыс.т·м). Объясняется это тем, что во втором случае норма энергопотребления по сути является величиной, обратной КПД насоса, поэтому она достаточно объективно характеризует лишь состояние насосного агрегата. Однако эта норма не может характеризовать экономичность работы системы водоподачи в целом. В § 8 показано, что работа системы водоподачи тем экономичнее, чем ниже напор в системе. Поэтому удельная норма расходования энергии должна стимулировать принятие мер по снижению напора в системе водоподачи. К числу таких мер относится: регулирование угловой скорости насосов в соответствии с изменением режима водопотребления или притока сточных вод и т.п., очистка внутренних поверхностей труб, покрытие внутренних поверхностей труб необрастающими составами и др. Принятие же в качестве норматива кВт·ч/тыс. т·м) создает иллюзию снижения расхода энергии в то время, как фактически она используется нерационально.

Таким образом, для оценки состояния системы водоподачи в целом целесообразно использовать норму энергопотребления, выраженную в кВт·ч/тыс.м^3, а для оценки состояния насосных агрегатов норму, выраженную в кВт·ч/(тыс.т·м).

Учет расхода электроэнергии. Электроэнергия, потребляемая насосными агрегатами, измеряется с помощью счетчиков активной и реактивной электрической энергии. Для этого или счетчики устанавливаются на каждом насосном агрегате, или потребляемая ими электроэнергия определяется как разница показаний общестанционных счетчиков, установленных на питающих линиях насосной станции и счетчиков собственных нужд станций, учитывающих расход электроэнергии на отопление, освещение, вентиляцию и прочие нужды.

При этом из общего расхода электроэнергии вычитается значение энергопотребления субабонентами, если таковые получают электроэнергию непосредственно через насосную станцию.

Измерение потребляемой электроэнергии с помощью счетчиков наиболее точно информирует о фактическом потреблении электроэнергии на действующих объектах.

Для прогнозирования потребления электроэнергии проектируемыми и вновь строящимися насосными станциями используются расчетные методы. Расчетные методы позволяют также сравнивать фактические затраты электроэнергии с ее научно обоснованным потреблением и тем самым выявить возможные пути ее экономии.

Для определения фактических удельных расходов электроэнергии на перекачку жидкости необходимо оборудовать насосную станцию расходомерами. Без исправного расходомерного хозяйства невозможно обеспечить экономичную работу основного насосного оборудования.

В насосных установках наибольшее распространение получили методы измерения расхода жидкости с помощью сужающих устройств: диафрагм и сопл в комплекте с дифманометрами. Сужающее устройство обычно устанавливается в напорных, а иногда и во всасывающих трубопроводах.

Основным недостатком при использовании сужающих устройств является необходимость их установки на прямых участках трубопроводов, что практически невозможно выполнить внутри насосных станций. Чаще всего расходомерные устройства выносятся на трубопроводы вне насосной станции.

Необходимо иметь в виду, что при широком диапазоне измерений подачи (1:3 и больше) на одном трубопроводе устанавливаются два дифманометра, один из которых градуирован на большие, а другой на малые расходы насосной установки.

Измерение расходов без сужающих устройств осуществляется индукционными и ультразвуковыми расходомерами.

Обязательным элементом расходомерных устройств должны быть счетные интегрирующие приставки. Наличие таких приставок в сочетании со счетчиками электроэнергии позволяет достаточно точно определять фактические удельные расходы электроэнергии, кВт·ч/тыс.м^3 на подачу жидкости:

$$w_{уд} = \frac{W}{Q}, \qquad (11)$$

где W – расход электроэнергии за время $T_р$, кВт·ч; Q – подача воды за время $T_р$, м^3.

Для бо́льшей объективности расчетные периоды $T_р$ должны быть достаточно представительны. Так, например, для системы водоподачи и водоотведения таким периодом следует считать неделю, поскольку за это время происходят наиболее характерные изменения в режиме работы насосных установок.

Зная фактический удельный расход электроэнергии, можно объективно оценить целесообразность того или иного мероприятия по экономии электроэнергии в насосной установке. Для этого надо определить удельный расход электроэнергии, вычисленный по результатам измерений до проведения мероприятий по экономии электроэнергии $w_{уд1}$, а затем после $w_{уд2}$. Тогда фактическая экономия электроэнергии за год будет равна

$$W_{эк} = (w_{уд1} - w_{уд2})Q_{год}, \qquad (12)$$

где $Q_{год}$ – объем перекачки за год.

Целесообразно корректирующие измерения и расчеты повторять 3–4 раза в год, чтобы учесть сезонные изменения в режимах работы насосных установок. Возможные пути экономии электроэнергии подробно рассмотрены в гл. 4.

5. ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ

Вспомогательные системы в своем составе содержат разнообразные электроприемники, в том числе электроприводы центробежных, водокольцевых и шестеренчатых насосов, компрессоров, задвижек и затворов, транспортеров, дробилок, граблей и сеток, тельферов и кранов. Обычно даже на крупных насосных станциях мощность каждого из этих электроприемников сравнительно невелика – от 1 до 15 кВт. Исключение составляют электроприводы дробилок, мощность которых доходит до 75 кВт, и электроприводы осушительных насосов, мощность которых в крупных насосных станциях достигает нескольких сот киловатт.

Общим для вспомогательных систем является периодический, кратковременный режим для работы. Электроприемники таких механизмов, как задвижки, затворы, осушительные насосы, и некоторые другие работают эпизодически и также кратковременно.

По этим причинам доля потребления этих электроприемников в общем балансе энергопотребления сравнительно невелика и составляет примерно 2–3%. Количество электроэнергии, потребляемой этими системами, зависит от разнообразных причин. Так, например, энергопотребление насосов дренажных систем зависит от общего состояния оборудования и строительных конструкций насосной станции. При хорошем состоянии сальников насосов, задвижек, затворов, при отсутствии течи через стены и другие элементы зданий насосных станций дренажные насосы включаются реже, продолжительность их работы незначительна и, следовательно, энергопотребление невелико.

Насосы осушительных систем включаются в работу в случае аварийного затопления помещений насосных станций, а также при плановых проверках состояния оборудования.

Следовательно, отсутствие аварийных ситуаций снижает энергопотребление этими насосными агрегатами практически до нуля, что также справедливо и для насосов систем пожаротушения.

Меры, обеспечивающие снижение энергопотребления этими и другими системами и механизмами, рассмотрены в гл. 4.

6. РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫЕ НУЖДЫ

Отопление и вентиляция. Для обеспечения нормальных условий работы обслуживающего персонала в насосной станции поддерживается температура не ниже +16 °С и влажность 40–60%, а в тех помещениях, где постоянного присутствия персонала не требуется (помещения распределительных устройств, вращающихся сеток и др.), – не ниже +5 °С. Верхний предел температуры поддерживается в диапазоне 25 – 30 °С.

Необходимый температурно-влажностный режим обеспечивается в помещениях системами отопления и вентиляции.

Системы отопления насосных станций, расположенных в зоне действия тепловых сетей, присоединяют к этим сетям. В противном случае сооружают собственные котельные, которые оборудуют электроводогрейными котлами или котлами, работающими на органическом топливе.

В насосных установках получили распространение электроводогрейные котлы ВНИИЭТО типа КЭВЗ (ЭПЗ). В котлах этого типа вода используется как проводник, через который пропускают ток. Вода нагревается в зазорах между фазовыми электродами и электродами, соединенными с нулем электрической сети и корпусом котла.

Котлы этого типа изготавливаются мощностью 25, 60, 100, 250, 400 и 1000 кВт. Регулирование мощности котла осуществляется изменением площади электродов, погружаемых в воду. Диапазон регулирования мощности котлов этого типа от 10 до 100 %.

Кроме электроводогрейных котлов для отопления насосных станций используются также электрические печи сопротивления с трубчатыми электронагревателями (ТЭН). Используются ТЭН различной мощности (от 0,3 до 5 кВт).

Доля электроэнергии, потребляемая системой электроотопления сравнительно с другими хозяйственно-бытовыми потребителями и вспомогательными системами достигает наибольшего значения и доходит до 6 % общего энергопотребления насосных станций.

В насосных установках с котлами, работающими на органическом топливе и получающими тепловую энергию из теплосети, потребление электроэнергии незначительно, так как она расходуется преимущественно подпиточными, циркуляционными и другими насосами мощность которых невелика. Однако в этом случае насосные станции потребляют большие количества тепловой энергии или органического топлива (газа, угля).

В зависимости от продолжительности отопительного сезона, габаритов насосных станций и других факторов годовое потребление тепловой энергии насосными станциями достигает $(4{,}2 \div 21)\,10^5$ млн. Дж.

Количество потребляемой тепловой энергии в значительной мере зависит от состояния отопительной системы, а также исправности дверных, оконных проемов и других элементов здания.

Системы вентиляции насосных станций не относятся к энергоемким потребителям, тем не менее в канализационных насосных станциях, особенно глубокого заложения, расход электроэнергии на вентиляцию достигает 1–2 %.

Электроосвещение. В качестве источников света используются лампы накаливания, газоразрядные, в том числе люминесцентные низкого давления и ртутные высокого давления. Электроосвещение насосных станций подразделяется на рабочее, ремонтное, охранное и аварийное.

Рабочее освещение обеспечивает освещенность в машинных залах 20–50 лк при использовании ламп накаливания и 50–100 лк – люминесцентных ламп. В помещениях щитов управления и местных диспетчерских пунктов (МДП) освещенность должна быть 50–100 лк при использовании ламп накаливания и 100–150 лк – люминесцентных ламп.

Ремонтное освещение осуществляется переносными ручными светильниками, присоединяемыми к электросети напряжением 12 В.

Охранное освещение размещают вдоль ограждения территории станции, в ряде случаев его совмещают с наружным освещением территории и обеспечивают освещенность до 5 лк.

Аварийное освещение включается в работу автоматически при отключении рабочего освещения. Светильники аварийного освещения питаются от аккумуляторных батарей. При их отсутствии персонал станций обеспечивается переносными фонарями с аккумуляторами. Аварийное освещение обеспечивает на диспетчерских пунктах и щитах управления примерно 20–30% нормальной освещенности, а в остальных помещениях – до 5 %.

На освещение расходуется 1–2 % общего потребления электроэнергии.

7. БАЛАНС ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

При рассмотрении режима энергопотребления насосных станций установлено, что на долю основных насосных агрегатов, обеспечивающих перекачку жидкости, расходуется от 75 до 95% всей потребляемой электроэнергии. Причем эта доля тем больше, чем больше насосная установка. В насосных установках с агрегатами мощностью 800 – 1000 кВт свыше 90–95% потребляемой электроэнергии расходуется основными агрегатами, а в небольших насосных установках (особенно тех, в которых электроэнергия используется для отопления помещений насосной станции и других нужд) с агрегатами мощностью до 160 кВт эта доля потребляемой электроэнергии снижается до 75% общего потребления станции, а в ряде случаев (мелкие насосные установки) и до 50%.

От 5 до 10% общего потребления электроэнергии расходуется на отопление зданий насосных станций. Вспомогательные системы и механизмы насосных станций потребляют 2–3% общего расхода электроэнергии. Системы вентиляции и электроосвещения обычно потребляют по 1–2% общего расхода электроэнергии. Кроме того, некоторая часть потребляемой электроэнергии расходуется на питание приборов сигнализации, контроля, оперативных устройств (выключателей, реле и т.п.) и устройств автоматики.

В ряде случаев через распределительные устройства насосных станций осуществляется потребление электроэнергии субабонентами, которые к непосредственным потребителям насосных станций не относятся. Следует иметь в виду, что при составлении энергетического баланса станции их учитывать необходимо. Для учета электроэнергии, потребляемой субабонентами, необходимо устанавливать отдельные счетчики.

Из рассмотрения баланса энергопотребления видно, что наиболее энергоемкими потребителями являются основные насосные агрегаты, осуществляющие перекачку жидкости. Потребление электроэнергии основными агрегатами в наибольшей степени зависит от технологического процесса транспортировки воды (см. § 4). Для обеспечения экономичной работы насосной установки должна быть прежде всего обеспечена экономичная работа основных насосных агрегатов. Разумеется, при этом необходимо также уделить внимание вспомогательным систе-

мам и механизмам, устройствам вентиляции, отопления и освещения. Однако наибольшее внимание следует уделять режимам работы основных агрегатов.

Глава 3

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

8. РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ, СВЯЗАННЫЙ С НЕРАЦИОНАЛЬНЫМ ПОВЫШЕНИЕМ НАПОРА

Насосные установки работают с повышенным напором из-за увеличения гидравлического сопротивления системы трубопроводов, колебаний уровня жидкости в приемных и напорных резервуарах, а также режима притока или потребления жидкости.

Повышение напора в результате изменения гидравлического сопротивления *не является постоянным, а зависит от расхода жидкости*, т.е. влияет на значение динамической составляющей напора $v^2/2g$, развиваемого насосной установкой, изменяет крутизну характеристики трубопровода (см. рис. 18).

Изменение напора в результате колебаний уровня не зависит от расхода жидкости и влияет только на значение статической составляющей напора $H_{ст}$, развиваемого насосной установкой. При этом крутизна характеристики Q–H не меняется, а меняется ее положение в координатах Q и H. При увеличении статической составляющей характеристика трубопровода перемещается вверх, при уменьшении – вниз (см. рис. 17).

Увеличение гидравлического сопротивления системы. Одной из распространенных *причин увеличения гидравлического сопротивления* труб является их внутренняя к о р р о з и я, в результате которой снижается пропускная способность трубопроводов и возникает необходимость в повышении напора, создаваемого насосной станцией, чтобы при повышенном гидравлическом сопротивлении обеспечить подачу того же количества жидкости.

Наряду с коррозией источником дополнительного гидравлического сопротивления является низкое качество труб и плохой монтаж трубопроводов. Трубы, изготовленные со значительными отклонениями от установленных размеров и геометрической формы, при соединении друг с другом образуют уступы, которые увеличивают гидравлическое сопротивление трубопроводов. Аналогичный отрицательный эффект *создают сварочные швы, выполненные с низким качеством.*

Источником возникновения дополнительного гидравлического сопротивления является также низкий уровень эксплуатации оборудования насосных установок и системы трубопроводов. Из-за невнимательности эксплуатационного персонала возможно неполное открытие затворов и задвижек. Имеют место случаи, когда после завершения ремонтных работ остаются закрытыми некоторые задвижки и затворы. В результате отдельные участки трубопроводов остаются выведенными из работы, что также является причиной повышения напора в системе транспортировки жидкости и требует дополнительных затрат электроэнергии.

В ряде случаев увеличение гидравлического сопротивления обусловлено неудачной конструкцией трубопроводной арматуры. Так, например, запорный орган обратных затворов существующей конструкции удерживается в открытом состоянии подъемной силой движущегося потока жидкости. При работе насоса с пониженной подачей уменьшается скорость потока жидкости, вследствие этого уменьшается его подъемная сила. В результате поворотный диск обратного затвора поворачивается на небольшой угол и частично остается в потоке, что ведет к увеличению гидравлического сопротивления и дополнительным потерям электроэнергии.

Выявить *такие и им подобные источники повышения гидравлического* сопротивления можно при плановых и выборочных внеплановых испытаниях водоводов, магистралей и отдельных трубопроводов сети. В ходе таких испытаний должны быть построены характеристики трубопроводов и сделано их сравнение с результатами расчетов и предыдущих испытаний. Увеличение крутизны фактической характеристики трубопровода по сравнению с расчетной или построенной по результатам предыдущих испытаний указывает на то, что в трубопроводе есть дополнительные сопротивления и необходимо принять меры к их обнаружению и устранению.

Меры по снижению гидравлических сопротивлений и вызванных ими изменений напоров рассмотрены в гл. 4.

Однако и при идеальном состоянии труб и трубопроводной арматуры может наблюдаться превышение напора, что обуславливается режимом притока или потребления жидкости.

Работа насосной установки с превышением динамической составляющей напора. Как известно, динамическая составляющая напора, развиваемого насосной установкой, зависит от расхода жидкости:

$$h_{дин} = SQ^p, \qquad (13)$$

где p – коэффициент, зависящий от материала труб и их срока службы, $p = 1{,}8 \div 2$.

При работе насосной установки с подачей меньше расчетной возникает несоответствие между напором, развиваемым насосом, и напором, требуемым для подачи того или иного количества жидкости (т.е. превышение напора насоса). Сравнение характеристики центробежных насосов и трубопроводов показывает, что при уменьшении подачи требуемый напор также уменьшается, а развиваемый насосом напор увеличивается.

Разность значений этих напоров и есть превышение напора сверх требуемого:

$$\Delta H = H_{н} - H_{с}. \qquad (14)$$

Из графика совместной работы насоса и трубопровода (см. рис. 18) видно, что значение ΔH тем больше, чем круче характеристики насоса и трубопровода, и тем больше, чем меньше фактическая подача насоса по сравнению с расчетной.

Подстановкой в (14) значений $H_{н}$ и $H_{с}$ из (1) и (4) после некоторых преобразований получена зависимость превышения напора от расхода Q и параметров $H_{ф}$ и $H_{ст}$, характеризующих крутизну характеристик насоса и трубопровода:

$$\Delta H = \Delta H_{ф} \left[1 - \left(\frac{Q}{Q_{б}} \right)^{2} \right], \qquad (15)$$

где $\Delta H_{ф} = H_{ф} - H_{ст}$; остальные обозначения приняты такие же, как в выражениях (1) и (4).

Напор ΔH теряется в затворах и задвижках, дросселирующих напорные коммуникации, в водоразборных кранах и другой арматуре, через которую потребитель отбирает жидкость из системы.

На превышение напора нерационально расходуется дополнительная мощность, кВт:

$$\Delta N = \frac{\rho g Q \Delta H}{1000\,\eta}, \qquad (16)$$

где обозначения приняты те же, что и в (5).

Если насос работает в течение времени t с превышением напора ΔH, то количество бесполезно теряемой электроэнергии, кВт·ч, равно

$$\Delta W = \Delta N t. \qquad (17)$$

В течение расчетного периода подача и соответственно превышение напора все время меняются. При этом получаемый перерасход электроэнергии за расчетный период определяется как сумма электроэнергии, расходуемой в разные периоды времени работы установки:

$$\Delta W_{\Sigma} = \frac{\rho g}{1000\,\eta} \Sigma Q_{i} \Delta H_{i} t_{i}, \qquad (18)$$

где Q_{i}, ΔH_{i} – подача и превышение напора за промежуток времени t_{i}.

Выражением (18) удобно пользоваться в тех случаях, когда установка значительные промежутки времени работает в равномерном режиме. При переменном режиме работы бывает затруднительно определить, сколько времени установка работает с той или иной подачей и какое превышение напора соответствует этой подаче.

Переменный режим работы характерен для многих насосных установок, в частности работающих в системах водоподачи и водоотведения. Используя в этих случаях тот же прием, что и в § 4, можно представить зависимость подачи от времени в виде упорядоченной диаграммы [см. уравнение (8)], а после некоторых преобразований получить выражение, определяющее расход электроэнергии на нерациональное превышение напора:

$$\Delta W_{\Sigma} = N_{б} T \left\{ \frac{1}{4} H_{п}^{*} \left(\frac{H_{ф}^{*}}{H_{п}^{*}} - 1 \right) (1 - \lambda)(1 + \lambda)^{2} \right\}. \qquad (19)$$

Обозначим выражение в фигурной скобке через w^{*}, выражение (19) приводится к виду

$$\Delta W_{\Sigma} = N_{б} T w^{*}, \qquad (20)$$

где $N_{б}$ – наибольшая потребляемая мощность установки, кВт; w^{*} – параметр, характеризующий относительные потери электроэнергии, вызванные превышением напора ΔH.

Значение w^{*} зависит от фиктивного напора $H_{ф}^{*}$, который характеризует крутизну характеристик насоса, от относительного статического напора $H_{п}^{*}$, который определяет крутизну характеристики трубопровода, и от относительной минимальной водоподачи λ.

Поскольку фиктивная высота подъема воды однотипных насосов примерно одинакова (для чистой воды $H_{ф}^{*} = 1{,}25$, для сточных вод $H_{ф}^{*} = 1{,}45$), могут быть построены расчетные кривые для различных групп насосов, с помощью которых существенно облегчаются вычисления потерь энергии, вызванных превышением напора насоса. На рис. 21 представлены расчетные кривые $w^{*} = f(\lambda, H_{п}^{*})$ для водяных насосов и насосов, предназначенных для сточных жидкостей. Используя зависимость (20), можно построить расчетные кривые для других видов насосов. Ниже приводится пример расчета с использованием данных кривых.

Пример 1. На водопроводной насосной станции насос типа Д 3200-75 подает воду на высоту $H_{ст} = 36$ м, развивая при максимальной подаче $Q_{б} = 1$ м^{3}/с напор $H_{б} = 60$ м, минимальная подача $Q_{м} = 0{,}5$ м^{3}/с. Регулирование режима работы насоса осуществляется дросселированием задвижкой на напорной линии. Время работы установки в расчетный период времени (год) 8760 ч.

Р е ш е н и е. Вычисляем относительную минимальную подачу $\lambda = Q_{м}/Q_{б} = 0{,}5/1 = 0{,}5$ и относительный статический напор $H_{п}^{*} = H_{ст}/H_{б} = 36/60 = 0{,}6$.

Относительные потери электроэнергии, соответствующие этим значениям λ и $H_{п}^{*}$, определяем с помощью расчетных кривых (рис. 21):

$$w_{эк}^{*} = 0{,}182.$$

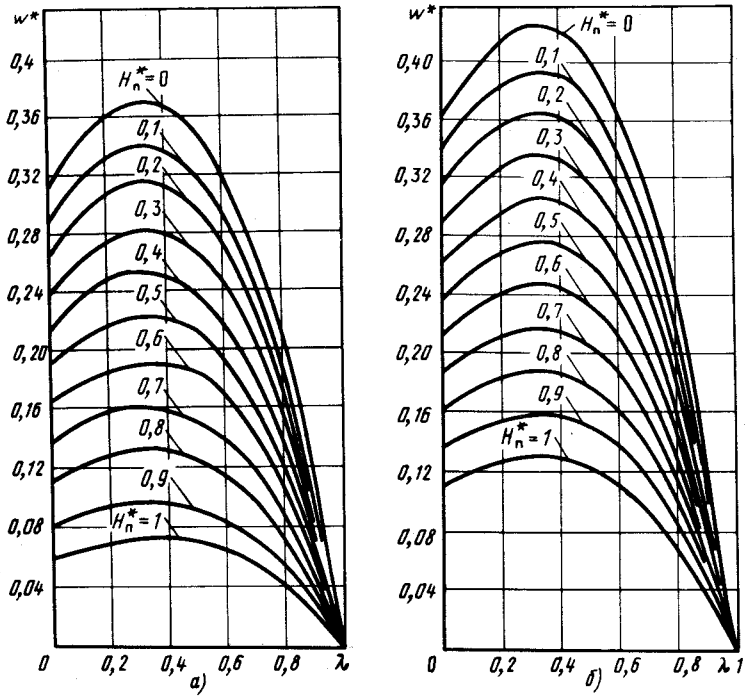


Рис. 21. Зависимость относительных потерь электроэнергии при дросселировании насосов:

а – для чистой воды; *б* – для сточной жидкости

Вычисляем наибольшую потребляемую мощность насосной установки по формуле (5):

$$N_б = \frac{1000 \cdot 9{,}81 \cdot 1 \cdot 60}{1000 \cdot 0{,}85} \cong 692{,}5 \text{ кВт}.$$

Расход электроэнергии на превышение напора в этой установке определяем по (20):

$$\Delta W_\Sigma = 692{,}5 \cdot 8760 \cdot 0{,}182 \cong 1104067 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Работа насосной установки с превышением статической составляющей напора. В ряде насосных установок наблюдается изменение не динамической, а статической составляющей напора. Оно возникает преимущественно за счет колебаний уровня в приемном резервуаре установки. Такой режим характерен для насосных установок систем водоотведения, в том числе систем осушения, канализации и т.п. Эти установки работают обычно циклически. При наполнении резервуара насосы

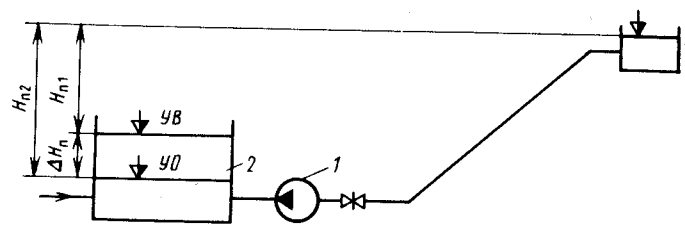


Рис. 22. Схема насосной установки с переменным статическим напором:

УВ – уровень включения; *УО* – уровень отключения; *1* – насос; *2* – приемный резервуар

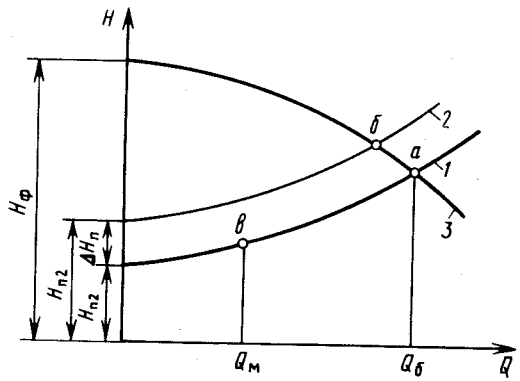


Рис. 23. График совместной работы насоса, трубопровода и резервуаров с переменным статическим напором:

1 – характеристика трубопровода при нижнем уровне; *2* – то же при верхнем уровне; *3* – характеристика насоса

включаются в работу, при опорожнении отключаются. Схема такой установки представлена на рис. 22, а график совместной работы насоса, трубопровода и резервуара – на рис. 23. В циклическом режиме работы (рис. 23) при включении в работу насоса статический напор равен $H_{п1}$, а при отключении соответственно становится равным $H_{п2}$. Изменение статического напора определяется разностью отметок включения (УВ) и отключения (УО) насоса.

По этой причине характеристика трубопровода в начальный период откачки занимает положение *1*, а в конце – положение *2*. При этом рабочая точка насоса, работающего с постоянной частотой вращения, перемещается по напорной характеристике насоса от точки *а* до точки *б*, т.е. насос работает с переменным напором от $H_а$ до $H_б$.

Если бы удалось обеспечить такой режим работы установки, при котором насос в каждый момент времени откачивает из резервуара столько жидкости, сколько ее туда поступает, то уровень можно было бы стабилизировать на верхней отметке УВ.

Очевидно, что перекачка жидкости с более высокого уровня требует меньших затрат электроэнергии, чем с нижнего, т.е. обеспечивает более экономичный режим работы насосной установки. Такой режим

может быть обеспечен изменением частоты вращения насоса. При этом рабочая точка насоса перемещается по характеристике трубопровода от точки *а* до точки *в* (рис. 23), т.е. насос работает с переменным напором от $H_а$ до $H_в$. Нетрудно видеть, что в таком режиме работы развиваемый насосом напор меньше, чем в предыдущем. Следовательно, и расход электроэнергии на перекачку одного и того же объема жидкости меньше при стабилизации уровня в резервуаре на верхней отметке УВ, чем при циклическом режиме работы.

Кроме того, равномерная работа насосных агрегатов исключает их многократные включения и отключения, что благотворно влияет на повышение надежности и долговечности работы технологического и электротехнического оборудования насосных установок. В [22] приведен вывод уравнения, позволяющего вычислить перерасход электроэнергии, который имеет место при работе в циклическом режиме работы установки:

$$\Delta W_\Sigma = N_б T \frac{1-\lambda}{2} \left\{ H_ф^* - (H_ф^* - 1) \times \right.$$

$$\left. \times \frac{3}{5} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta H_п}{\Delta H_ф}\right)^5}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\Delta H_п}{\Delta H_ф}\right)^3}} - \left[H_п^* + \frac{1}{2}(1 - H_п^*)(1 + \lambda^2) \right] \right\}, \quad (21)$$

где $\Delta H_ф = H_ф - H_п$; $\Delta H_п = H_{п2} - H_{п1}$; прочие обозначения приняты те же, что и в предыдущих уравнениях. Уравнение (21) громоздко и неудобно для использования при вычислениях, поэтому оно приводится к тому же виду, что и (20):

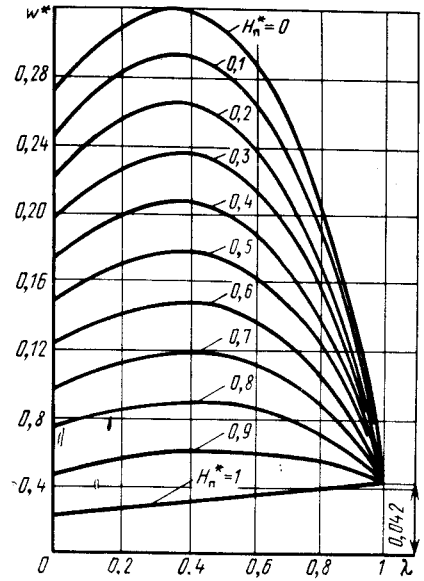
$$\Delta W_\Sigma = N_б T w^*. \quad (22)$$

Зависимость $w^* = f(\lambda, H_п^*)$ для рассматриваемого случая представлена на рис. 24. Эти расчетные кривые используются аналогично рассмотренным ранее на рис. 21.

Анализ режимов работы действующих насосных установок различного назначения показывает, что на повышение динамической составляющей напора в насосных установках в зависимости от местных условий расходуется до 15%, а в отдельных случаях до 25% электроэнергии, расходуемой на транспортировку жидкости. На повышение статической составляющей напора расходуется до 5–10%, а в отдельных случаях до 20% электроэнергии, расходуемой на транспортировку жидкости.

Из приведенных выше рассуждений видно, что для устранения потерь электроэнергии в насосных установках, вызванных превышениями

Рис. 24. Зависимость относительных потерь электроэнергии при ступенчатом регулировании насосов для сточных жидкостей



напора, необходимо обеспечить такой режим, при котором рабочая точка насоса перемещалась бы по характеристике трубопровода, а уровень в приемном резервуаре стабилизировался бы на верхнем максимально допустимом уровне.

В случае подачи жидкости насосной установкой в напорный резервуар (например, в водонапорную башню) насосный агрегат включается в работу при опорожненном резервуаре до заданного нижнего уровня, а отключается при достижении заданного верхнего уровня. Затем цикл повторяется.

При таком режиме работы превышение напора в насосной установке возникает при размещении датчика верхнего уровня в резервуаре на слишком высокой отметке, а также при его ненадежной работе. Особенно часто такие случаи имеют место в системах сельскохозяйственного водоснабжения. При низких температурах наружного воздуха датчики уровня в резервуаре, установленные без подогрева, выходят из строя. По этой причине уровень воды в баке резервуара (водонапорной башни) поднимается до уровня переливной трубы. В результате расходуется электроэнергия не только на подъем воды сверх необходимого уровня, но также на перекачку воды, бесполезно вытекающей из бака башни.

Работа насосной установки с превышением динамической и статической составляющих напора. Во многих случаях возможна работа насосной установки с превышением как статической, так и динамической составляющих напоров. В этом случае одновременно изменяются и крутизна характеристики трубопровода, и ее положение по высоте в координатах Q и H (рис. 25).

Кривые $I_1 - I_4$ показывают зависимость динамических потерь напора $v^2/2g$ в трубопроводе от расхода при различных гидравлических сопротивлениях. Кривые $II_1 - II_4$ являются характеристиками трубопровода при разных значениях статической высоты подачи жидкости и гидравлического сопротивления. Этим графикам соответствуют ра-

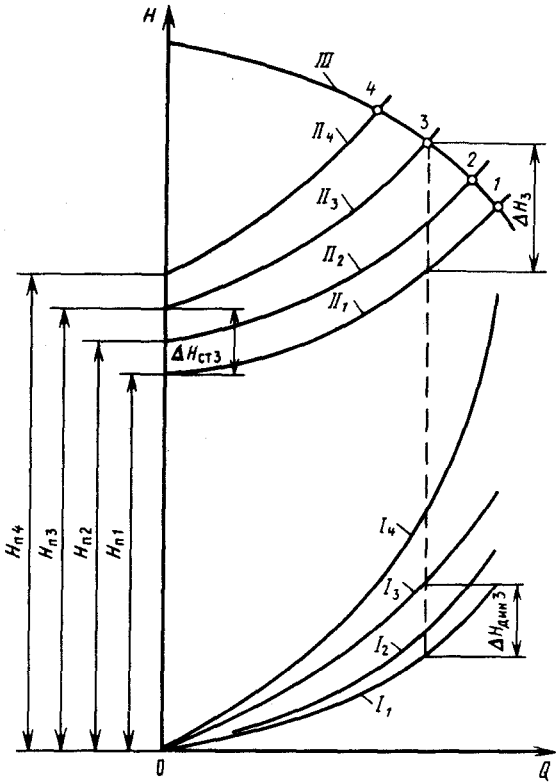


Рис. 25. График совместной работы насоса при переменных динамической и статической составляющих напора:

I – изменение потерь напора в трубопроводе в зависимости от разных значений гидравлического сопротивления; *II* – характеристика трубопровода при разных значениях гидравлического сопротивления и статической составляющей напора; *III* – напорная характеристика нерегулируемого насоса

бочие точки насосной установки *1–4*. Точкам *2–4* соответствуют свои значения превышения напора, обусловленного как статической, так и динамической составляющими напорами. Так, например, превышение напора, соответствующее рабочей точке *3*, равно $\Delta H_3 = \Delta H_{ст3} + \Delta H_{дин3}$.

Определение потерь электроэнергии в случае одновременного превышения статических и динамических составляющих напора осуществляется с помощью уравнения (20) и расчетных кривых, представленных на рис. 21 или 24, поскольку в процессе работы превышения напора последовательно и равновероятно принимают значения от 0 до ΔH_4. В этом режиме для определения потерь электроэнергии достаточно оп-

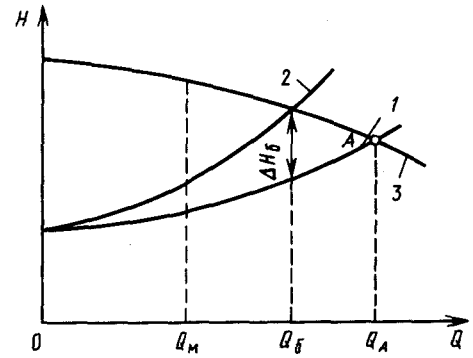


Рис. 26. Дросселирование насоса при максимальной подаче:

1 – характеристика трубопровода при открытой напорной задвижке; *2* – характеристика дросселированного трубопровода; *3* – характеристика нерегулируемого насоса

ределить $\lambda = Q_4/Q_1$ и $H_п^* = H_{п1}/H_1$ и далее по расчетным кривым (см. рис. 21 или 24) определить значение относительных потерь электроэнергии w^*. Дальнейший порядок расчета аналогичен ранее приведенному примеру 1.

В некоторых случаях, например при неполном развитии водопроводной сети, насосы дросселируют даже при максимальной подаче для данной насосной установки (рис. 26). В таких условиях насосная установка работает при наибольшей подаче $Q_б$ с превышением напора $\Delta H_б$. Чтобы определить потери электроэнергии в этом случае, можно также воспользоваться уравнением (20) и расчетными кривыми (см. рис. 21 и 24). Для этого сначала вычисляют $\lambda_1 = Q_м/Q_А$ и $H_п^* = H_п/H_А$. Далее с учетом этих значений по расчетным кривым (см. рис. 21 или 24) определяют относительные потери электроэнергии w_1^*. Затем вычисляют $\lambda_2 = Q_б/Q_А$ и $H_и^* = H_п/H_А$, по которым определяют относительные потери электроэнергии w_2^*. После чего определяют расчетное значение $w_{расч}^* = w_1^* - w_2^*$, подставляя которое в (20), вычисляют потери ΔW_Σ.

Изложенные выше приемы расчета относятся к насосным установкам, в которых работает один насос. Однако они могут использоваться и для расчета насосных установок, состоящих из группы насосов. В этом случае в расчет потерь электроэнергии вводится с н и ж а ю щ и й коэффициент φ [40]:

$$\Delta W_\Sigma = N_б T w^* \varphi, \qquad (23)$$

где $N_б$ – мощность, кВт, потребляемая насосами при их наибольшей суммарной подаче; φ – снижающий коэффициент, значение которого преимущественно зависит от числа работающих насосов в режиме наибольших подач для данной установки (прочие факторы, например изменение КПД и др., не учитываются):

Число работающих насосов m	1	2	3	4	5
Снижающий коэффициент φ	1	0,75	0,66	0,56	0,5

Число работающих насосов m	6	7	8	9	10
Снижающий коэффициент φ	0,47	0,44	0,42	0,4	0,38

При работе нескольких насосов благодаря изменению числа работающих насосов превышение напора уменьшается, а в отдельные моменты отсутствует, что и учитывается введением снижающего коэффициента.

9. ЗАТРАТЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПЕРЕКАЧКУ УТЕЧЕК И НЕПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ

Часть воды, подаваемой потребителю, бесполезно вытекает через неплотности в трубопроводной арматуре, в санитарно-технических приборах и других устройствах. Кроме того, за счет повышения напора в сети через водоразборную арматуру потребителю подается воды больше, чем требуется.

Утечки и непроизводительные расходы достигают 20–25% общего расхода воды. На их перекачку расходуется дополнительно 20–25% электроэнергии, затрачиваемой на подачу воды. Кроме того, утечки и непроизводительные расходы воды попадают в канализацию, что также требует дополнительных затрат электроэнергии на их перекачку и обработку в системе водоотведения и очистки сточных вод.

Результатами экспериментальных исследований [43] установлено, что наибольшая доля утечек воды приходится на смывные бачки и составляет до 40% всех видов утечек и нерациональных расходов. Повышение напора увеличивает утечки через неплотности в поплавковом клапане, одновременно существенно повышается уровень воды в смывном бачке вплоть до переливного отверстия, через которое вода поступает в канализацию, что дополнительно увеличивает расход электроэнергии на перекачку и обработку сточных вод.

Экспериментальные исследования показали, что для стабилизации уровня воды в смывном бачке ниже переливного отверстия напор в трубопроводе перед бачком должен быть не больше 40 м.

Следующее место по утечкам воды после смывных бачков занимают непроизводительные расходы, составляющие до 23% общих потерь воды. Эти расходы также зависят от превышения напора в сети, а кроме того, и от колебаний температуры горячей воды в системе горячего водоснабжения.

Так, слишком большой напор в системе водоснабжения увеличивает непроизводительные расходы. Выборочное обследование ряда абонентских вводов в г. Москве показало, что напор на вводе потребителей превышает требуемый на 30–45%. Низкая температура горячей воды заставляет потребителя сливать большое количество воды в канализацию до тех пор, пока из системы не пойдет вода более высокой температуры. Минимальные расходы горячей воды имеют место при температуре 55 – 60 °С.

Большое количество рассредоточенных потребителей в системе водоснабжения затрудняет устранение утечек полностью. Во всяком случае устранение утечек у потребителей мало зависит от эксплуатационного персонала насосных станций. Однако существует возможность уменьшить их за счет оптимизации режима работы насосных установок.

Оценить потери электроэнергии в насосных установках, вызванные утечками и непроизводительными расходами воды, можно следующим образом. Известно, что количество воды, вытекающей из отверстия, пропорционально корню квадратному из значения напоров:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \sqrt{\frac{H_1}{H_2}}, \qquad (24)$$

где Q_1 – расход при нормальном напоре H_1; Q_2 – то же при повышенном напоре H_2. Следовательно, наличие повышенного напора в сети увеличивает утечки и непроизводительные расходы на значение

$$\Delta Q = Q_2 - Q_1 = Q_1(\sqrt{H_2/H_1} - 1). \qquad (25)$$

Расчеты, выполненные с учетом (25), а также экспериментальные исследования показывают, что повышенные напоры увеличивают утечки и непроизводительные расходы на 13–20%, а общий расход воды – на 2–5% [17].

10. ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ НАСОСОВ В РЕЖИМЕ, НЕ СООТВЕТСТВУЮЩЕМ ИХ НОМИНАЛЬНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Ограниченная номенклатура насосов, отсутствие точных исходных данных при проектировании насосных установок и сетей, постоянное изменение условий эксплуатации и другие причины приводят к тому, что реальный режим работы насосных установок может существенно отличаться от расчетного. При этом возможны следующие основные варианты.

Работа насоса с подачей меньше расчетной, и напором выше расчетного. Этому режиму соответствует график совместной работы насосной установки и трубопровода (рис. 27). Согласно графику большую часть времени установка работает с напором, значительно большим, чем это требуется для подачи нужного количества жидкости (рабочая точка *б*). Такой режим влечет за собой повышение напора, увеличение утечек и непроизводительных расходов воды и как следствие существенный перерасход электроэнергии (см. § 9).

Кроме того, большую часть времени насос работает с КПД более низким, чем его номинальные значения $\eta_б < \eta_{ном}$ (рис. 27).

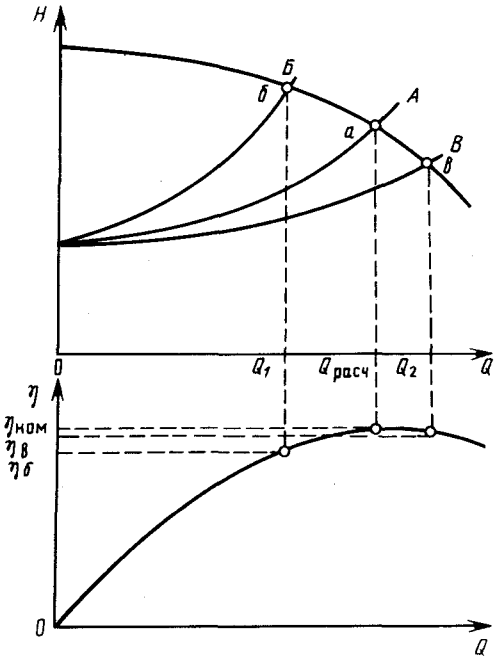


Рис. 27. Работа насоса при КПД, отличающемся от номинального:

А – расчетная характеристика трубопровода; *Б* – характеристика трубопровода с повышенным гидравлическим сопротивлением; *В* – то же с пониженным

Работа насоса с подачей больше расчетной и напором ниже расчетного. Этому режиму соответствует рабочая точка *в* (рис. 27). В этом случае насос также работает с КПД ниже номинального $\eta_в < \eta_{ном}$.

Работа насоса с КПД, отличающимся от номинального, влечет за собой увеличение потребляемой мощности и как следствие увеличение затрат электроэнергии на транспортировку жидкости.

При этом следует иметь в виду, что приводной электродвигатель подбирается к насосу таким образом, чтобы номинальным параметрам насоса соответствовали номинальные параметры электродвигателя. Следовательно, при работе насоса в режиме, отличающемся от номинального, электродвигатель также используется не в номинальном режиме. Как известно, работа электродвигателя в режиме, отличающемся от номинального, связана с ухудшением его КПД и коэффициента мощности $\cos\varphi$, что ведет к появлению дополнительных потерь электроэнергии в электродвигателе и элементах электроснабжения.

Основными причинами неудачного подбора насосов и несоответствия его параметров режиму работы сети является отсутствие надежных исходных данных при проектировании системы транспортировки жидкости. Особенно это характерно для систем водоснабжения и водоотведения (см. § 11). Количество энергии, теряемой из-за работы насосных агрегатов с КПД $\eta_{факт}$, отличающимся от номинального значения $\eta_{ном}$, определяют по формуле

$$\Delta W = \frac{\gamma Q H}{102\,\eta_{ном}}\, t \left(\frac{\eta_{ном}}{\eta_{факт}} - 1 \right). \qquad (26)$$

Глава 4

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

11. ПРАВИЛЬНЫЙ ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ – ОСНОВА УСТРАНЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Режим работы насосной установки тесно связан с режимом работы системы транспортировки жидкости в целом. Одной из основных причин неэкономичной работы насосной установки является несоответствие рабочих параметров насоса (напор, подача) режиму работы системы (см. гл. 3). В некоторых условиях могут возникнуть не только неэкономичные, но даже опасные для насосов и системы трубопроводов режимы работы. Для обеспечения экономичных и безопасных режимов работы насосных установок прежде всего необходимо правильно выбрать состав насосного оборудования, определить наиболее экономичные сочетания разнотипных насосов, устранить несоответствие параметров насосной установки и сети за счет подбора рабочих колес различного размера или частоты их вращения.

На в ы б о р насосов влияют разнообразные факторы [21]: назначение насоса, схема насосной установки, режим притока и потребления жидкости, гидравлические параметры системы, свойства перекачиваемой жидкости, условия обслуживания насосных агрегатов и др.

Как правило, насос должен использоваться в тех условиях работы, на которые он рассчитан, т.е. должен перекачивать те жидкости, для которых он предназначен. В противном случае насосы работают в неэкономичном режиме и преждевременно выходят из строя. Например, использование водяных насосов, рассчитанных на подачу чистой воды, для перекачки сточной жидкости ведет к преждевременному износу проточной части насоса, ухудшению КПД, увеличению расхода энергии, усложнению и удорожанию обслуживания агрегата. В связи с тем, что номенклатура насосов, изготавливаемых промышленностью, ограничена, приходится применять насосы не по прямому назначению.

В тех случаях, когда насосы перекачивают жидкости, отличающиеся по своим физико-химическим свойствам от расчетных, следует принимать *специальные меры*, обеспечивающие приемлемые условия их эксплуатации. Например, при использовании водяных насосов для перекачки загрязненных жидкостей нужно ограничить попадание в насос посторонних включений, увеличить зазоры в проточной части насосов путем обточки рабочих колес. Рекомендуется реконструкция сальниковых уплотнений и подшипниковых узлов, предусматривающая подачу в эти узлы чистой воды из технического водопровода для охлаждения и смазки лигнофолевых и резиновых подшипников и для создания гидравлических затворов в сальниковых уплотнениях.

Необходимы также *организационно-технические* меры: увеличение числа осмотров, проверок, ревизий и профилактических ремонтов. Целесообразно сократить продолжительность ремонтного цикла, чтобы обеспечить своевременную замену и восстановление изношенных деталей и узлов. Однако эти меры не всегда дают желаемый результат, поэтому более целесообразно применять, если возможно, близкие по своему назначению насосы. Например, для перекачки сточных вод можно использовать грунтовые или иные подобные насосы.

Одним из важных требований является использование насосов в режимах, соответствующих их номинальным параметрам. Отклонение рабочих параметров насоса от номинальных влечет за собой снижение КПД и как следствие перерасход электроэнергии [см. гл. 3, уравнение (26)]. Сказанное не означает, что насосы могут работать только в одной жестко фиксированной рабочей точке. Допускается некоторое отклонение рабочих параметров от значений, указанных в каталогах, но при этом они не должны выходить за пределы рабочей зоны насоса (на характеристиках Q–H насосов она отмечена вертикальными извилистыми линиями). Использование насосов за пределами рабочей зоны в значительной мере ухудшает их КПД и в ряде случаев связано с переходом насосов в недопустимый режим работы. При уменьшении подачи может возникнуть помпаж, а при увеличении – кавитация (см. гл. 1).

При выборе насоса необходимо учитывать возможные изменения в гидравлической схеме насосной установки, поскольку от этого могут меняться условия работы насосных агрегатов. Например, при параллельном соединении насосов изменение числа работающих насосов или режима работы одного из них (изменение частоты вращения или степени дросселирования) влечет за собой изменение нагрузки других. При определенных условиях эти изменения могут привести к неэкономичным или недопустимым условиям работы насосных агрегатов.

Параллельная работа нескольких трубопроводов снижает общее гидравлическое сопротивление системы и влечет за собой увеличение подачи насосов, а последовательная повышает сопротивление, влечет за собой увеличение напора и снижает подачу. Вследствие этого выбор типа и марки насосов должен соответствовать возможным изменениям в гидравлической схеме насосной установки и системы в целом.

На выбор насосов влияют также колебания уровня или давления на входе в насосы. Особенное внимание должно быть обращено на обеспечение бескавитационного режима работы насосов. Для этого необходимо, чтобы давление на входе в насос было больше критического, в качестве которого принимается давление насыщенных паров перекачиваемой жидкости.

В тех случаях, когда насос используется в качестве повышающего (бустерного), возможно снижение давления на его всасывающей ли-

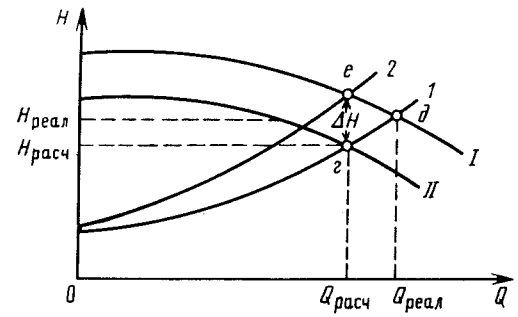


Рис. 28. Приведение в соответствие расчетного и реального режимов работы насосов:

I – исходная характеристика насоса; *II* – то же с обточенным колесом; *1* – исходная характеристика трубопровода; *2* – то же дросселированного трубопровода

нии из-за чрезмерного отбора жидкости из сети низкого давления или из-за недостаточного сечения всасывающих линий. Необходимо контролировать давление на всасывающих линиях насосов так же, как и уровень в приемных резервуарах насосных станций.

Решающее влияние на режим работы насоса оказывают гидравлические параметры системы. Совместная работа насосной установки и сети трубопроводов возможна в том случае, если подача насоса равна расходу в сети, а развиваемый насосами напор равен потерям напора в системе и статической высоте подъема жидкости. Несоответствие параметров насосной установки и системы трубопроводов, выбор насосов с "запасом" по напору и расходу без принятия специальных мер ведут к появлению режимов перегрузки, явлений кавитации, помпажа и др.

В случае несоответствия расчетных и реальных параметров создается такой режим работы, при котором или не обеспечивается требуемая подача жидкости потребителю, или подача осуществляется с повышенным энергопотреблением. Существуют различные способы приведения в соответствие реальных и расчетных режимов работы насосных установок.

На рис. 28 показана характеристика трубопровода *1*, на котором расположена точка *г*, определяющая расчетные значения подачи $Q_{расч}$ и напора $H_{расч}$. Здесь же показана характеристика насоса, который выбран с запасом по напору. Его характеристика (кривая *I*) расположена выше, чем это необходимо. В результате реальная подача $Q_{реал}$ и реальный напор $H_{реал}$, значения которых определяются координатами точки *д*, оказываются больше расчетных значений. Для приведения в соответствие этих значений необходимо обточить рабочее колесо так, чтобы характеристика насоса заняла положение кривой *II* и прошла через расчетную точку *г*, или дросселировать трубопровод так, чтобы его характеристика заняла более высокое положение (кривая *2*), а реальный расход сравнялся с расчетным. Но в этом случае развиваемый им напор превысит расчетное значение на ΔH, теряемое в дросселирующем органе затвора. Поэтому предпочтительней принять вариант с об-

точкой колеса. Однако принимая решение об обточке или замене колеса, следует быть уверенным в том, что расчетный режим будет продолжаться достаточно долго и обратная замена рабочего колеса потребуется не скоро. При замене рабочих колес целесообразно использовать стандартные колеса меньшего диаметра, изготавливаемые промышленностью. Отечественные насосы с колесами уменьшенного диаметра в своей маркировке содержат в зависимости от размера диаметра рабочего колеса литеру "а" или "б". Например, центробежный насос Д1250-65 с колесом нормального диаметра 460 мм в маркировке дополнительной литеры не содержит, модификация этого же насоса с рабочим колесом диаметром 430 мм имеет маркировку Д1250-65а, а с колесом 400 мм соответственно Д1250-65б. Если рабочее колесо подходящего диаметра отсутствует или стандартный диаметр не соответствует режиму работы насосного агрегата, рабочее колесо обтачивается по месту.

Размер обточки рабочего колеса определяется с помощью известных формул приведения:

$$Q_1/Q_2 = D_1/D_2; \quad H_1/H_2 = (D_1/D_2)^2 \tag{27}$$

при $n_s < 200$;

$$Q_1/Q_2 = \sqrt{(D_1/D_2)^3}; \quad H_1/H_2 = (D_1/D_2)^3 \tag{28}$$

при $n_s > 200$;

где n_s – коэффициент быстроходности; Q_1 и H_1 – подача и напор насоса при нормальном диаметре рабочего колеса D_1 соответственно; Q_2 и H_2 – то же при обточенном диаметре D_2. В зависимости от значения n_s рекомендуется производить обточки колес в следующих пределах:

Коэффициент быстроходности n_s	60–120	120–200	200–300
Предел обточки, %	20–15	15–10	10–5

Коэффициент быстроходности n_s есть частота вращения эталонного (геометрически подобного рассматриваемому) насоса, создающего при работе на воде напор, равный 1 м (H = 1 м), который дает подачу 0,75 м^3/с при наибольшем значении КПД насоса. Этот коэффициент определяется по формуле

$$n_s = \frac{3{,}65\, n\sqrt{Q_{\text{опт}}}}{\sqrt[4]{H_{\text{опт}}^3}}, \tag{29}$$

где n – частота вращения рассматриваемого насоса, об/мин; $Q_{\text{опт}}$ – подача того же насоса при оптимальном значении КПД, м^3/с; $H_{\text{опт}}$ – напор того же насоса, соответствующий значению $Q_{\text{опт}}$, м.

Если нет уверенности в том, что работа насосных установок с пониженной подачей и напором будет продолжительной, прибегают к дросселированию напорных коммуникаций. Здесь уместно обратить внимание на то обстоятельство, что во многих системах расчетный режим характеризуется не одной, а множеством рабочих точек в широком диапазоне изменения подач и напоров. В этих случаях задача выбора насоса существенно усложняется и при определенных условиях не может быть решена подбором какого-либо одного насоса, работающего с постоянной частотой вращения. Для этих условий задача решается установкой нескольких насосов с различными характеристиками, применением в насосном агрегате регулируемого привода, с помощью которого изменяется частота вращения одного или нескольких насосов. Совокупностью описанных приемов можно привести в соответствие режим работы насосной установки и сети при изменяющихся внешних воздействиях.

При выборе насосов должны учитываться также свойства перекачиваемой жидкости, и прежде всего ее вязкость. Вязкость может изменяться как при изменении температуры окружающей среды, так и под воздействием энергии, сообщаемой жидкости насосом.

Центробежные насосы, относящиеся к классу динамических насосов, предназначены для перекачки маловязких жидкостей. В некоторых случаях они используются для перекачки жидкостей, вязких при нормальных температурах и маловязких при повышенных.

В процессе эксплуатации одни и те же насосы могут использоваться для перекачки жидкостей различной вязкости, например нефтепродуктов. При изменении вязкости перекачиваемой жидкости возникает необходимость в изменении режима работы насосного агрегата.

При выборе насоса необходимо учитывать возможность попадания газообразных включений в перекачиваемую жидкость. Например, попадание воздуха в воду изменяет вид напорных характеристик насоса, – их очертания становятся более крутыми. При этом уменьшается подача и развиваемый насосом напор.

При слишком большом содержании воздуха в воде (более 5%) применение обычных центробежных насосов недопустимо. Для перекачки водо-воздушных смесей должны применяться специальные типы насосов (водокольцевые и т.п.).

При выборе типа насосного агрегата необходимо также учитывать условия его обслуживания, в том числе тип помещения (закрытые или открытые), периодичность работы насоса, вид привода, способ регулирования, квалификацию персонала, число и тип имеющихся на объекте насосов, технические характеристики грузоподъемных механизмов, наличие ремонтной базы и др.

В любом случае выбор насосных агрегатов кроме технических расчетов должен сопровождаться экономическими расчетами, обеспечивающими минимизацию приведенных затрат [39].

Особое внимание следует уделять обоснованию возможности совместной работы разнотипных насосов во всем диапазоне изменений режимов работы насосной установки. При параллельной работе насосных агрегатов требуется сохранение примерного равенства номинальных напоров в рабочей зоне характеристики, а при последовательной – равенства подачи. При этом следует иметь в виду, что не всегда насосы, работающие параллельно при максимальных подачах, смогут работать вместе при минимальных и наоборот.

По этим причинам при выборе насосов необходимо анализировать совместный режим работы насосов и трубопроводов с определением рабочих параметров насосной установки в целом и каждого из агрегатов по отдельности. В ходе анализа необходимо учитывать возможные режимы работы установки во всем диапазоне изменения подач (от максимального до минимального значения) с учетом колебаний уровня жидкости в приемных и напорных резервуарах, а также изменения давления на входе и выходе из насосных установок.

12. ЭКОНОМИЧНЫЕ СПОСОБЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Как уже отмечалось, насосные установки могут состоять из нескольких насосных агрегатов, соединенных между собой или параллельно, или последовательно, или смешанным образом. Комбинируя различные способы соединения нескольких насосов и изменяя число работающих насосов, можно изменять суммарную напорную характеристику насосной установки. На рис. 29, *а* представлена схема насосной установки, состоящей из двух групп насосов. Каждая группа состоит из двух подпорных и одного магистрального насосов. Подпорные насосы *3* и *4*; *5* и *6* соединены между собой параллельно, а магистральные *1* и *2* соединены с подпорными последовательно.

На рис. 29, *б* представлены графики совместной работы насосной установки и водоводов. Включение насосов в различных комбинациях позволяет получить довольно большое число рабочих точек, каждой из которых соответствуют свои значения подачи и напора.

При выборе насоса или группы насосов, включаемых в работу, необходимо учитывать значение и характер изменения подач, продолжительность работы установки с той или иной подачей, обеспечивая при этом минимальное число включений или отключений насосных агрегатов. Следует иметь в виду, что число включений крупных насосных агрегатов мощностью 2500–5000 кВт ограничивается до 50–120 включений в год. Поэтому, если известно по опыту эксплуатации, что продолжительность работы одного из насосных агрегатов невелика и что в скором времени предстоит его отключение и включение в работу другого насосного агрегата, следует воздержаться от включения первого агрегата и сразу включать в работу второй, даже если некоторое

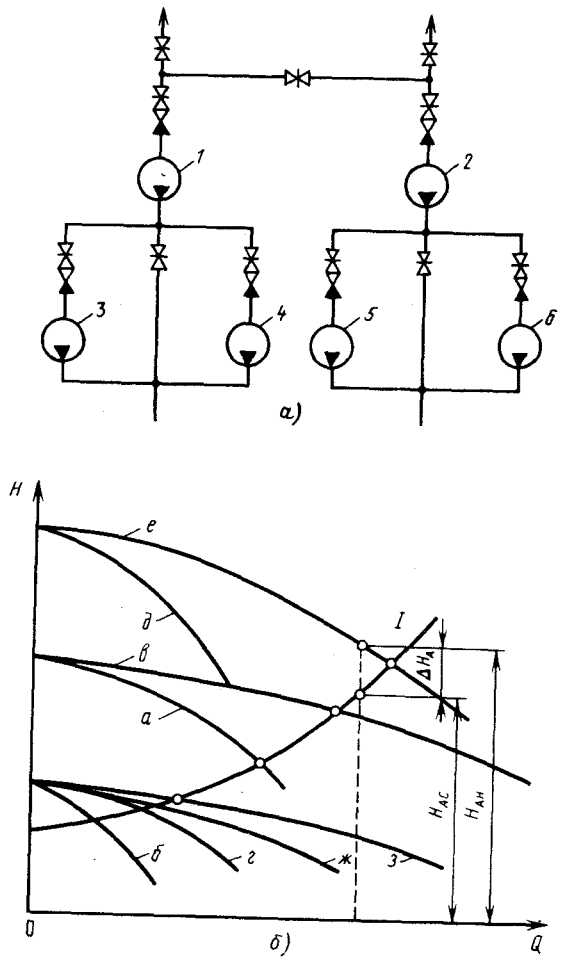


Рис. 29. Совместная работа последовательно-параллельно соединенных насосов и водоводов (см. схему рис. 28):

а – последовательно-параллельное соединение насосов; *б* – график совместной работы насосов и водоводов; *I* –характеристика водоводов; *а* – напорная характеристика одного магистрального насоса *1* или *2*; *б* – то же одного подпорного насоса *3* или *4* (*5* или *6*); *в* – суммарная характеристика двух магистральных насосов *1 + 2*; *г* – то же двух подпорных насосов *3 + 4*; *д* – то же одного магистрального и двух подпорных насосов *1 + 3 + 4*; *е* – то же всей насосной установки *1+2+3+4+5+6*; *ж*, *з* – то же трех и четырех подпорных насосов соответственно

время режим работы насосной установки не будет оптимальным. Такие решения должны быть заранее выданы оперативному персоналу насосной установки.

Для обеспечения экономичного использования насосных агрегатов рекомендуется большую часть времени держать в работе те из них, что имеют более высокий КПД. Эта рекомендация подтверждается примером, приведенным в [52]. Увеличение времени использования насоса с высоким КПД и низкими удельными расходами электроэнергии (28 – 43,5 кВт·ч/1000 м^3) с 4500 до 6240 ч/год и уменьшение времени использования насосного агрегата с низким КПД и высокими удельными расходами электроэнергии (35–52 кВт·ч/1000 м^3) с 4500 до 2700 ч/год позволило сократить годовое энергопотребление насосной установки на 264 000 кВт·ч без всяких дополнительных затрат, только за счет организации более экономичного режима работы насосной установки.

При организации режима работы разнотипных насосных агрегатов необходим критерий выбора времени перехода от одного насосного агрегата (или их группы) к другому. Для этого целесообразно построить для каждого насосного агрегата (или их группы) кривые удельных расходов энергии $Э = f(Q)$. Точки пересечения этих кривых определяют значения подач, при которых целесообразно один из агрегатов включать в работу, а другой отключать [9].

Правильный подбор состава работающих насосных агрегатов еще не обеспечивает минимальных расходов электроэнергии на перекачку жидкости. При разнотипных насосных агрегатах следует, кроме того, правильно распределить нагрузку между ними и выявить границы их выгодного использования во всем диапазоне изменения подач насосной установки. При работе насосных агрегатов с постоянной частотой вращения для этого необходимо дросселировать в определенной мере тот или иной из работающих насосов. Если насосный агрегат оборудован регулируемым приводом, чтобы обеспечить наиболее выгодное распределение нагрузок между работающими параллельно насосными агрегатами необходимо соответствующим образом изменять частоту их вращения.

Дросселирование центробежного насоса возможно только в том случае, если насос имеет некоторое превышение напора (см. гл. 3). В пределах этого превышения напора допускается дросселировать насос.

Критерием правильного распределения нагрузок между насосами является минимум суммарных энергозатрат одновременно работающих параллельно насосных агрегатов. Для большинства отечественных насосов, для которых графики характеристики $N = f(Q)$ имеют вид вогнутых вниз кривых минимум энергозатрат обеспечивается, если приросты мощности каждого из работающих параллельно

насосных агрегатов равны

$$\frac{dN_1}{dQ} = \frac{dN_2}{dQ} = \frac{dN_3}{dQ} = \ldots = \frac{dN_n}{dQ}. \qquad (30)$$

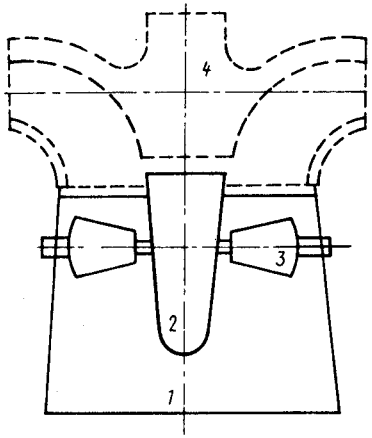
Во всяком случае в первую очередь следует более полно загружать насосные агрегаты, у которых меньше относительные приросты мощности.

Изложенные принципы распределения нагрузки между работающими параллельно насосными агрегатами обеспечивают до 5% экономии электроэнергии. Оптимальное распределение нагрузок между насосными агрегатами, частота вращения которых может регулироваться, из условия экономичной работы насосной установки дает равенство КПД или удельных затрат электроэнергии этих агрегатов.

В насосных установках, оборудованных осевыми насосами, регулирование режима работы установок осуществляется изменением угла поворота лопастей рабочего колеса. Отечественная промышленность изготавливает насосы, оснащенные поворотными лопастями и рассчитанные на подачу до 40 м^3/с и напор до 27 м [20]. В большинстве случаев насосы этого типа ограничены по напорам до 15 м. Осевые насосы используются в крупных низконапорных насосных установках систем орошения, шлюзов, водопроводных станций первого подъема, а также на тепловых и атомных электростанциях.

Рабочее колесо осевого насоса состоит из втулки обтекаемой формы, на которой укреплены поворотные лопасти. Расчетному положению лопастей соответствует угол их установки $\varphi = 0$. Угол φ может быть уменьшен или увеличен. Механизм поворота лопастей имеет ручной, электрический или гидравлический привод. При ручном приводе угол поворота изменяется только на неработающем двигателе. Наличие привода электрического или гидравлического позволяет регулировать подачу во время работы насоса. Диапазон изменения угла установки лопастей сравнительно широк от $-(4 \div 10)^\circ$ до $+(2 \div 6)^\circ$. Возможность изменения угла установки лопастей позволяет изменять крутизну напорной характеристики насоса и, следовательно, регулировать его подачу и напор. При этом сохраняются сравнительно высокие значения КПД насоса.

Для регулирования режима работы крупных вертикальных насосов, кроме того, используются поворотно-лопастные входные направляющие аппараты (ВНА) [41], устанавливаемые непосредственно перед входом в насос (рис. 30). Конструкция ВНА достаточно проста для насосов с односторонним входом. ВНА состоит из цилиндрического или конического корпуса, в котором размещается обтекатель и 9–12 поворотных лопаток, размещенных на равном расстоянии друг от друга по окружности корпуса. Направляющий аппарат снабжен устройством, обеспечивающим синхронный поворот лопаток на один и тот же угол.



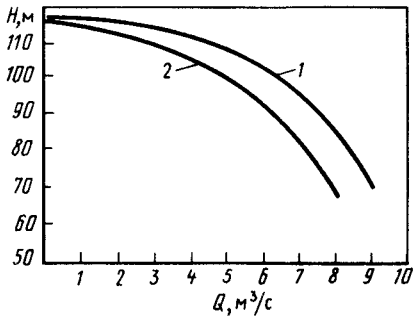


Рис. 30. Схема входного направляющего аппарата (ВНА):

1 – корпус; *2* – обтекатель; *3* – поворотные лопатки; *4* – рабочее колесо регулируемого насоса

Рис. 31. Напорные характеристики насоса с ВНА:

1, 2 – при повороте лопаток ВНА на угол $\alpha = -10^\circ$ и при $\alpha = +5^\circ$ соответственно. Для промежуточных значений α соответствующие характеристики расположены между кривыми *1* и *2*

Для автоматизации процесса управления устройство оснащается электроприводом. В настоящее время отечественная промышленность выпускает серийно насосы типа 2400ВР-25/25, оснащенные таким устройством. Изготовлено два головных образца насосов типа 1200ВР-6,3/100 и готовятся к производству насосы типа 20000ВР-16/63А.

Поворот лопаток ВНА изменяет крутизну напорных характеристик насоса (рис. 31), благодаря чему изменение подачи насоса происходит без превышения напоров. Этим и обусловлена энергетическая эффективность этого способа регулирования, которая тем выше, чем ниже расчетный напор. Наиболее целесообразным считается применение этого способа регулирования в насосных установках водопроводных станций первого подъема, оснащенных вертикальными насосами с односторонним входом, например типа В [41].

В [34] описывается также способ регулирования центробежных насосов впуском небольших количеств воздуха во всасывающую линию насоса, не превышающих 10–14% подачи насоса. Впуск воздуха изменяет положение напорной характеристики насоса. Ввод 10% воздуха аналогичен по своему эффекту снижению частоты вращения насоса примерно на 12%. КПД насоса при этом, по данным [34], изменяется незначительно. Однако этот способ регулирования не получил распространения в практике водоснабжения, так как при этом возможно нарушение нормального водоснабжения из-за попадания воздуха в сеть трубопроводов.

Упомянутые способы регулирования хотя и снижают расход электроэнергии, но не обеспечивают минимально возможного ее потребления и имеют ограниченную область применения. Более высокую эффективность обеспечивают способы регулирования, основанные на изменении частоты вращения рабочих колес центробежных насосов.

Изменение частоты вращения рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров. При этом изменяется положение характеристик насоса. При изменении частоты вращения насоса пересчет характеристик осуществляется с помощью так называемых формул приведения [16, 55]:

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2; \tag{31}$$

$$H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2; \tag{32}$$

$$N_1/N_2 = (n_1/n_2)^3; \tag{33}$$

$$M_1/M_2 = (n_1/n_2)^2. \tag{34}$$

В отдельных частных случаях, например при работе одиночного насоса без статического напора, формулы приведения можно использовать для определения рабочих параметров насоса, работающего с измененной частотой вращения. При работе с противодавлением этого делать нельзя, так как рабочие параметры насоса зависят также и от характеристики системы трубопроводов, на которую он работает.

Ниже рассматриваются изменения основных рабочих параметров насоса в зависимости от его частоты вращения при работе на систему со статическим напором. Приводятся в аналитической и графической форме зависимости для их определения.

Напорная характеристика центробежного насоса, работающего с переменной частотой вращения, описывается согласно [4] уравнением

$$H = H_\Phi (n/n_{\text{ном}})^2 - S_\Phi Q^2, \tag{35}$$

где H_Φ и S_Φ – фиктивные параметры насоса (см. гл. 1); n и $n_{\text{ном}}$ – переменное и номинальное значения частоты вращения насоса соответственно. Из (5) видно, что гидравлические потери в насосе при одной и той же подаче не зависят от частоты вращения. Это значит, что при ее изменении напорные характеристики насоса остаются подобными друг другу и только изменяют свое положение по вертикали в координатах Q и H на графике совместной работы насоса и трубопровода (рис. 32). На том же графике представлена характеристика трубопровода, на который работает насос. Характеристика трубопровода описывается зависимостью (4). Пересечение характеристик *1*, *2*, *3* насоса, последовательно изменяющего свою частоту вращения n_1, n_2, n_3, с характеристикой *4* трубопровода определяет положение рабочих точек

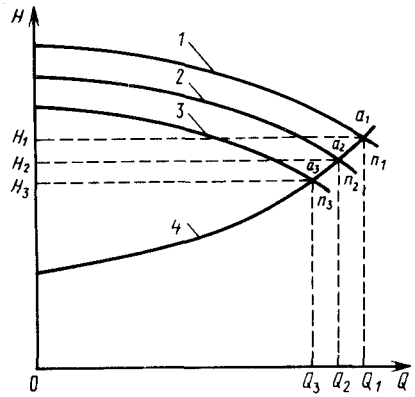


Рис. 32. График совместной работы насоса, работающего с переменной частотой вращения, и трубопровода:

1–4 – напорные характеристики насоса при n_1, n_2, n_3, n_4 соответственно; *5* – характеристика трубопровода

a_1, a_2, a_3. Этим точкам соответствуют значения рабочих параметров насоса: напора H_1, H_2, H_3 и подачи Q_1, Q_2, Q_3. Таким образом, рабочие точки характеристики насоса при изменении его частоты вращения располагаются на характеристике трубопровода.

Совместным решением уравнений характеристик трубопровода (4) и насоса (35) относительно параметра Q получена зависимость изменения подачи насоса от его частоты вращения:

$$Q = Q_б \sqrt{\frac{(n/n_{ном})^2 - (H_п/H_ф)}{1 - (H_п/H_ф)}}. \qquad (36)$$

Из (36) видно, что подача насоса зависит не только от частоты вращения, но и от отношения $H_п/H_ф$.

Принимая в качестве базисных значений $Q_б$, $H_б$ и $n_{ном}$, зависимость (36) приводят к виду

$$Q^* = \sqrt{\frac{n^{*2} - (H_п^*/H_ф^*)}{1 - (H_п^*/H_ф^*)}}, \qquad (37)$$

где $Q^* = Q/Q_б$ – относительная подача; $n^* = n/n_{ном}$ – относительная частота вращения насоса; $H_п^* = H_п/H_б$ – относительный статический напор; $H_ф^* = H_ф^*/H_б$ – относительная фиктивная высота подъема жидкости. С использованием (37) на рис. 33 приведена графически зависимость изменения подачи насоса от его частоты вращения для разных значений отношения $H_п^*/H_ф^*$. Представленные кривые наглядно показывают, что квадратичная зависимость изменения подачи от частоты вращения насоса наблюдается только при $H_п^*/H_ф^* = 0$, т.е. при работе без статического напора. Аналогичным образом получена зависимость изменения

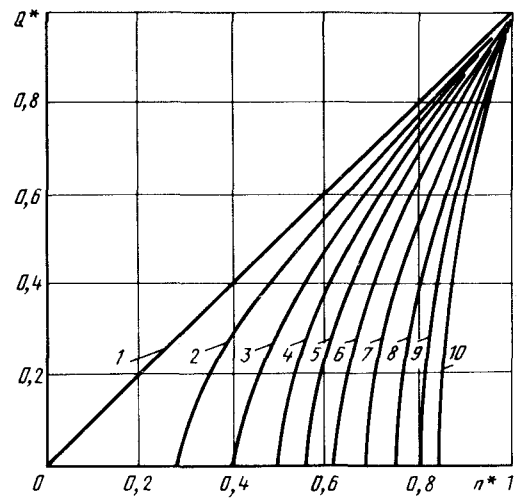


Рис. 33. Изменение подачи насоса в зависимости от частоты вращения при различных значениях $H_п/H_ф$:

1 – 0; *2* – 0,08; *3* – 0,16; *4* – 0,24; *5* – 0,32; *6* – 0,4; *7* – 0,48; *8* – 0,56; *9* – 0,64; *10* – 0,72

напора, развиваемого насосом, от его частоты вращения

$$H^* = H_п^* + (1 + H_п^*)\left[\frac{n^{*2} - (H_п^*/H_ф^*)}{1 - (H_п^*/H_ф^*)}\right]. \qquad (38)$$

С использованием (38) построена зависимость напора насоса от его частоты вращения при разных значениях $H_п^*/H_ф^*$ (рис. 34). При построении этой зависимости принято $H_ф^* = 1{,}25$, характерное для многих насосов, предназначенных для подачи чистой воды. Аналогичные зависимости могут быть построены с помощью (38) и для других значений $H_ф^*$, т.е. для насосов с другой крутизной напорной характеристики Q–H.

С помощью графиков (рис. 34) можно определить те значения напора и частоты вращения, при которых насос прекращает оказывать влияние на работу насосной установки, т.е. его подача становится равной нулю, а развиваемый напор сравнивается со статическим напором. В этот момент времени обратный затвор насосной установки закрывается, а если его нет, начинается ток воды через насос в противоположном направлении. Эти значения напора и частоты вращения определяются координатами точек пересечения графиков $H^* = f(n^*)$ с кривой OA (рис. 34). Кривая OA описывается уравнением $H^* = n^{*2} H_ф^*$.

Важнейшим параметром насоса является его КПД. Изменение КПД в зависимости от частоты вращения насоса определяют с помощью фор-

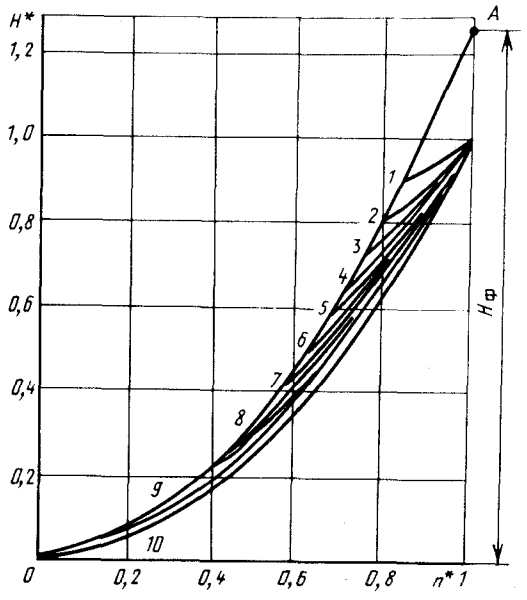


Рис. 34. Изменение напора насоса в зависимости от частоты вращения при $H_ф^* = 1{,}25$ и различных значениях $H_п/H_ф$:

1 – 0; *2* – 0,16; *3* – 0,24; *4* – 0,3; *5* – 0,4; *6* – 0,48; *7* – 0,56; *8* – 0,64; *9* – 0,72; *10* – 0,8

мулы Муди, преобразованной для насосов:

$$\frac{1-\eta^2}{1-\eta_1} = \left(\frac{D_1^2 n_1}{D_2^2 n_2}\right)^2, \qquad (39)$$

где η_2, n_2, D_2 – КПД, частота вращения и диаметр рабочего колеса насоса; η_1, n_1, D_1 – то же геометрически подобного насоса. После некоторых преобразований получаем

$$\eta = 1 - \frac{1-\eta_{ном}}{n^*}, \qquad (40)$$

где $\eta_{ном}$ – значение КПД при номинальной частоте вращения насоса. Следует подчеркнуть, что КПД насоса при номинальной частоте вращения не является номинальным КПД. За номинальный КПД насоса принимается только максимальное значение КПД при номинальной частоте вращения рабочего колеса насоса. Прочие значения КПД насоса при номинальной частоте вращения задаются обычно в виде опытных кривых и приводятся в каталогах насосов [13, 45]. Зависимость изменения КПД от значений подачи при постоянной номинальной частоте вращения для наиболее распространенных отечественных насосов средней и большой мощности (Д и В соответственно) описывается эмпирически:

$$\eta^* = \eta/\eta_{ном} = 1 - (1 - Q^*)^{2,3}. \qquad (41)$$

С использованием уравнений (35), (36), (39)–(41) подстановкой значений Q, H и η в (5) получены зависимости для определения мощности, потребляемой насосом, при изменении частоты вращения для различных значений $H_п/H_ф$ (рис. 35). Представленные графики показывают, что реальная зависимость мощности от частоты вращения тем больше отличается от кубической параболы, описываемой формулой приведения, чем больше отношение $H_п/H_ф$, и только при $H_п = 0$ мощность, потребляемая насосом, пропорциональна частоте вращения в кубе.

Следующим важным параметром насоса является его механическая характеристика, т.е. зависимость момента сопротивления насоса от частоты вращения. От вида механической характеристики зависят энергетические показатели привода – потери в приводе и его КПД.

Момент сопротивления, Н·м, любого механизма, в том числе и насоса, определяется выражением

$$M_c = 9569N/n, \qquad (42)$$

где N – мощность, кВт; n – частота вращения, об/мин. Подставляя в (42) значения мощности из (5), получаем выражение момента сопротивления, Н·м, насоса через его рабочие параметры:

$$M_c = \frac{9565\rho g Q H}{1000\eta_н n} = 9{,}565\,\frac{\rho g Q H}{\eta_н n}. \qquad (43)$$

В относительных единицах (43) имеет вид

$$M_c^* = \frac{Q^* H^*}{\eta^* n^*}. \qquad (44)$$

С использованием уравнений (36), (38), (40) и (41) путем подстановки значений рабочих параметров насоса в (44) определены и построены графически механические характеристики насоса для различных значений $H_п^*/H_ф^*$ (рис. 36). Представленные зависимости наглядно демонстрируют отличие механических характеристик насосов от квадратичной параболы, построенной в соответствии с (34), что дает основание представить формулу приведения (34) в более общем виде:

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^k, \qquad (45)$$

где $k = 2 \div 5$. Меньшие значения k относятся к одиночным насосам, ра-

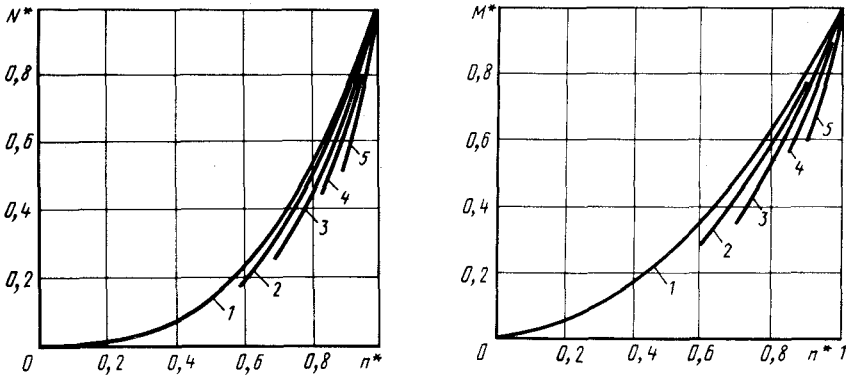


Рис. 35. Изменение потребляемой насосом мощности в зависимости от частоты вращения при различных значениях $H_{\text{п}}/H_{\text{ф}}$:
1 – 0; *2* – 0,32; *3* – 0,48; *4* – 0,64; *5* – 0,8

Рис. 36. Изменение момента сопротивления насоса в зависимости от частоты вращения при различных значениях $H^*_{\text{п}}/H^*_{\text{ф}}$:
1 – 0; *2* – 0,32; *3* – 0,48; *4* – 0,64; *5* – 0,8

ботающим без статического напора, бо́льшие – к насосам, работающим с большим статическим напором. Для насосов систем водоподачи и водоотведения $k = 3 \div 5$.

Уравнения (43) и (44) справедливы до тех пор, пока развиваемый насосом напор не сравняется со статическим напором. С этого времени подача насоса и его КПД становятся равными нулю и уравнения обращаются в неопределенность вида 0/0, что соответствует граничной частоте вращения

$$n_{\text{гр}} = n_{\text{ном}} \sqrt{\frac{H_{\text{пр}}}{H_{\text{ф}}}}, \qquad (46)$$

которая определяет границу между рабочим и нерабочим режимами насоса.

После уменьшения частоты вращения насоса ниже граничной момент сопротивления изменяется в соответствии с уравнением

$$M_{\text{с}} = (M_0 - M_{\text{т}})\,(n/n_{\text{ном}})^2 + M_{\text{т}}, \qquad (47)$$

где M_0 – момент сопротивления насосоа при закрытой задвижке и номинальной частоте вращения насоса; $M_{\text{т}}$ – момент сопротивления насоса, обусловленный трением в его сальниках и подшипниках. Момент M_0 определяется подстановкой в (42) значения мощности холостого хода насоса и его номинальной частоты вращения. Момент $M_{\text{т}}$ согласно опытным данным составляет 5–10% номинального момента насоса.

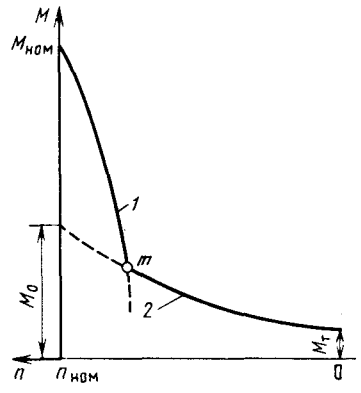


Рис. 37. Механическая характеристика насоса:
1 – рабочая ветвь; *2* – ветвь холостого хода

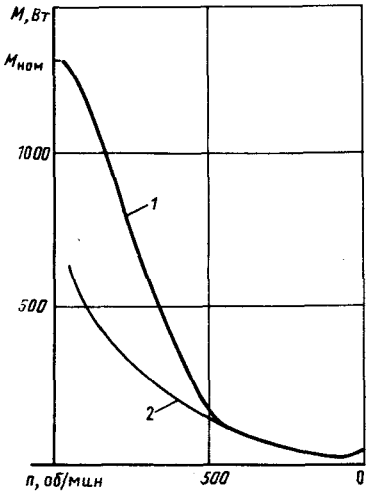


Рис. 38. Экспериментальная механическая характеристика насоса:
1 – рабочая ветвь; *2* – ветвь холостого хода

Таким образом, механическая характеристика центробежного насоса при статическом напоре состоит из двух ветвей, одна из которых строится в соответствии с (43), (44), а другая согласно (47) (рис. 37). Для сравнения механическая характеристика, построенная по экспериментальным данным, приведена на рис. 38.

Из вышесказанного следует, что недопустимо определять рабочие параметры насоса простым пересчетом значений номинальных параметров по формулам приведения (31) – (34). Рабочие параметры насосов должны определяться по результатам анализа реального режима работы насосной установки и сети трубопроводов с учетом крутизны их характеристик, определяемых отношением $H_{\text{п}}/H_{\text{ф}}$.

В ходе разработки и эксплуатации системы регулирования режима работы насосной установки возникает задача, обратная только что рассмотренной, – требуется определить, какая должна быть частота вращения насосных агрегатов, чтобы обеспечить нужный режим работы установки. В § 8 показано, что превышение напора является одной из причин возникновения потерь электроэнергии в насосных установках. Следовательно, целесообразно поддерживать такую частоту вращения насоса, при которой в координатах Q–H геометрическое место его рабочих точек лежало бы на рабочей характеристике трубопровода. Совместным решением уравнения напорной характеристики насоса (35) и трубопровода (4) относительно частоты вращения получено вы-

ражение

$$n = n_{\text{ном}} \sqrt{\frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}} + \left(1 - \frac{H_{\text{п}}}{H_{\text{ф}}}\right)\left(\frac{Q}{Q_{\text{б}}}\right)^2}, \qquad (48)$$

где $H_{\text{п}}$ – статическая составляющая напора; $H_{\text{ф}}$ – фиктивная высота подъема жидкости при нулевой подаче; $Q_{\text{б}}$ – наибольшая для данной системы подача насоса.

Работа насоса с частотой вращения, определяемой уравнением (48), обеспечивает поддержание минимальных значений напора на выходе насосной установки во всем диапазоне изменения ее подачи. Благодаря ликвидации превышения напора энергопотребление насоса уменьшается до необходимого минимума.

При регулировании частоты вращения в соответствии с (48) снижение энергопотребления по абсолютному значению равно потерям, обусловленным превышением напоров, которые имеют место при работе насосов с постоянной частотой вращения.

Отсюда следует, что вычисление снижения энергопотребления при замене дросселирования регулированием частоты вращения насоса согласно (48), может быть выполнено с использованием (19), (20) и расчетных кривых (см. рис. 21).

С использованием тех же уравнений и расчетных кривых вычисляется снижение энергопотребления при замене дросселирования в тех насосных установках, где наряду с изменениями расхода в системе происходят колебания напоров на всасывающих линиях насоса. Такой режим характерен для повышающих (бустерных) насосных станций систем городского водоснабжения. При этом одновременно снижаются до нулевого значения статические и динамические составляющие превышения напора.

При замене циклического регулирования насоса изменением частоты его вращения снижение энергопотребления вычисляется с помощью уравнений (21) и расчетных кривых (см. рис. 24).

При выполнении расчетов следует иметь в виду, что уравнения (19)–(21) и кривые (см. рис. 21, 24) относятся к режиму работы одиночного насоса. Как отмечалось в § 8, при параллельной работе нескольких насосов превышение напоров меньше, чем при работе одного большого эквивалентного насоса. Следовательно, потери электроэнергии при использовании нескольких насосов меньше, чем при работе одного большого насоса. По этой причине снижение энергопотребления для нескольких параллельно работающих насосов следует вычислять, как для одного эквивалентного насоса с учетом снижающего коэффициента φ [см. (23)]. Рассмотрим пример расчета снижения энергопотребления.

Пример 2. Режим работы насоса Д1250-65 регулируется изменением частоты вращения его рабочего колеса. Требуется определить, на сколько снизилось его энергопотребление по сравнению с дросселированием

напорной линии насоса (регулирование затвором). При этом: наибольшая за расчетный период подача насоса в данной установке $Q_{\text{б}}$ = = 1250 м^3/ч (0,348 м^3/с); напор, соответствующий наибольшей подаче, $H_{\text{б}}$ = 65 м; наименьшая за расчетный период подача насоса $Q_{\text{м}}$ = = 375 м^3/ч (0,104 м^3/с); статическая составляющая напора (разница геодезических отметок насосной установки и потребителя плюс свободный напор у потребителя) $H_{\text{п}}$ = 35 м; КПД насоса $\eta_{\text{н}}$ = 0,85; длительность расчетного периода T = 1 год (8760 ч).

Р е ш е н и е. Мощность, потребляемая насосом, при наибольшей подаче согласно (5)

$$N_{\text{б}} = \frac{\rho g Q_{\text{б}} H_{\text{б}}}{1000\,\eta_{\text{н}}} = \frac{1000 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}348 \cdot 65}{1000 \cdot 0{,}85} = 261 \text{ кВт}.$$

Относительная минимальная подача $\lambda = Q_{\text{м}}/Q_{\text{б}} = 375/1250 = 0{,}3$; относительный статический напор $H^*_{\text{п}} = H_{\text{п}}/H_{\text{б}} = 35/65 = 0{,}54$. По расчетным кривым $w^* = f(\lambda, H^*_{\text{п}})$ (см. рис. 21, *а*) для $\lambda = 0{,}3$ и $H^*_{\text{п}} = 0{,}5$ определяем относительную экономию электроэнергии $w^* = 0{,}21$.

Снижающий коэффициент для одного насосного агрегата $\varphi = 1$ [см. уравнение (23)]. Снижение энергопотребления насоса согласно (23) составляет

$$\Delta W = N_{\text{б}} T w^* \varphi = 261 \cdot 8760 \cdot 0{,}21 \cdot 1 = 480\,136 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

До настоящего времени речь шла о снижении энергопотребления насосов и насосных установок, при этом не употреблялся термин экономия электроэнергии. Дело в том, что регулирование частоты вращения насоса осуществляется с применением различного рода устройств: электродвигателей, преобразователей и т.п. Поэтому результирующая экономия электроэнергии должна определяться с учетом потерь в устройствах, регулирующих частоту вращения насоса.

В современных насосных установках изменение частоты вращения насосов чаще всего осуществляется с применением р е г у л и р у е м о г о э л е к т р о п р и в о д а. Основные виды регулируемого электропривода рассмотрены в гл. 5. Здесь мы остановимся только на его энергетических характеристиках.

По своим энергетическим характеристикам регулируемые электроприводы подразделяются на три основные группы:

приводы с потерями энергии скольжения (электродвигатели с реостатом в цепи ротора, приводы с гидравлическими и электромагнитными муфтами скольжения и т.п.);

приводы с рекуперацией энергии скольжения (электрические, электромеханические и асинхронные вентильные каскады и т.п.);

приводы, регулирующие без потерь энергии скольжения (частотные приводы, вентильные двигатели, многоскоростные двигатели).

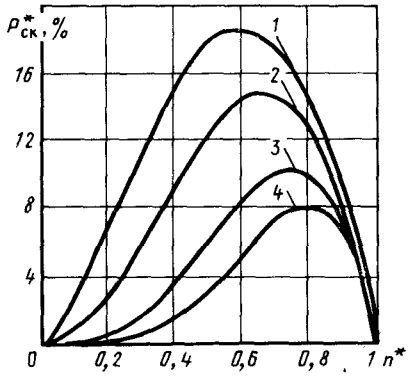


Рис. 39. Изменение потерь скольжения в зависимости от частоты вращения привода:

1 – при $k = 1{,}5$; *2* – при $k = 2$; *3* – при $k = 3$; *4* – при $k = 4$

При этом потери в электроприводе в значительной мере определяются потерями энергии скольжения.

При рассмотрении энергетических процессов в электроприводе электрическая мощность, потребляемая из сети, а также потери мощности в электроприводе обозначаем P, в отличие от механической мощности на валу насоса, обозначаемой N.

Потери мощности скольжения в электроприводе группы существенно зависят от вида механической характеристики механизма и частоты вращения насоса [9]:

$$P^*_{ск} = (1 - n^*)\, n^{*k}, \tag{49}$$

где n^* – частота вращения насоса в относительных единицах; k – показатель степени в уравнении механической характеристики.

В [9] показано, что максимальное значение потерь мощности скольжения

$$P^*_{ск.макс} = \frac{k^k}{(k+1)^{k+1}} \tag{50}$$

имеет место при частоте вращения

$$n^* = \frac{k}{k+1}. \tag{51}$$

На рис. 39 представлена зависимость потери мощности скольжения от частоты вращения и значения k. При $k = 2 \div 5$ максимальное значение потерь скольжения не превышает 8 – 15 % номинальной мощности насосного агрегата. Этим потерям соответствуют частоты вращения, равные 65 – 80% номинальных значений, что совпадает с диапазоном регулирования насосов по скорости. При таких условиях потери скольжения в среднем равны 4 – 8% номинальной мощности насоса. Низкие

значения потерь в сочетании с невысокой стоимостью электроприводов первой группы делают целесообразным их применение в насосных установках.

Приведенный выше анализ показывает, что потери энергии скольжения существенно зависят от параметров и режима работы насосных установок. В [40] приводится уравнение, в котором энергия скольжения $W_{ск}$, теряемая в регулируемом приводе за расчетный период T, выражена через технологические параметры:

$$W_{ск} = N_б T \left\{ \frac{1 - H^*_п}{3(1-\lambda)\sqrt{1 - (H^*_п/H^*_ф)}} \left[\left(3\frac{H^*_п}{1 - H^*_п} - \right.\right.\right.$$

$$- 2\frac{H^*_п/H^*_ф}{1 - (H^*_п/H^*_ф)} + 1 \left.\right) \sqrt{1 + \frac{H^*_п/H^*_ф}{1 - (H^*_п/H^*_ф)}} -$$

$$- \left(3\frac{H^*_п}{1 - H^*_п} - 2\frac{H^*_п/H^*_ф}{1 - (H^*_п/H^*_ф)} + \lambda^2 \right) \sqrt{\lambda^2 + \frac{H^*_п/H^*_ф}{1 - \dfrac{H^*_п/H^*_ф}{1 - (H^*_п/H^*_ф)}}} -$$

$$\left. \left. - \frac{3}{4}(1-\lambda^2) \left(1 + \lambda^2 + 2\frac{H^*_п}{1 - H^*_п} \right) \sqrt{1 - \frac{H^*_п}{H^*_ф}} \right] \right\}. \tag{52}$$

Кроме потерь скольжения в приводах этой группы имеют место потери на вентиляцию, трение в подшипниках, щеточных контактах и др., которые составляют 1 – 3% суммарных потерь. С учетом этих потерь суммарные потери составляют

$$W_{пот} \approx (1{,}01 \div 1{,}03)\, W_{ск}. \tag{53}$$

Для упрощения расчетов выражение в фигурной скобке в (52) обозначаем через $w^*_{ск}$, тогда (53) принимает вид

$$W_{пот} = (1 + \zeta) N_б T w^*_{ск}, \tag{54}$$

где ζ – коэффициент, учитывающий потери, не зависящие от скольжения; $w^*_{ск}$ – относительные потери скольжения, определяемые с помощью расчетных кривых, представленных на рис. 40 в виде зависимости $w^*_{ск} = f(\lambda, H^*_п)$ для двух значений $H^*_ф = 1{,}25;\ 1{,}45$.

Результирующая экономия электроэнергии в случае применения ре-

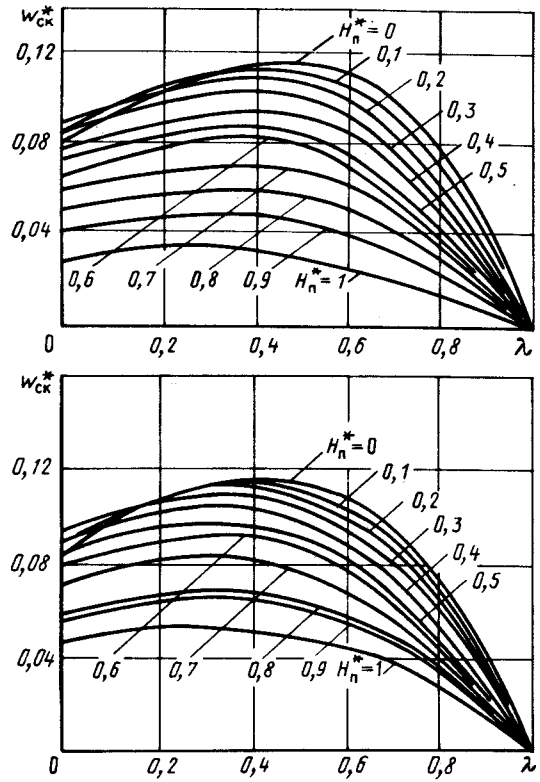


Рис. 40. Изменение потерь скольжения в зависимости от параметров λ и $H^*_п$:

а – для насосов чистой воды $H^*_ф$ = 1,25; *б* – для насосов сточной жидкости $H^*_ф$ = 1,45

гулируемых приводов с потерями скольжения равна

$$W_{рез.ск} = (1 - \zeta)\frac{N_б T}{\eta_{эд}} w^*_{эк}\varphi, \qquad (55)$$

где $w^*_{эк} = w^* - w^*_{ск}$ – относительная экономия электроэнергии, определяемая с помощью расчетных кривых $w^*_{эк} = f(\lambda, H^*_п)$; $\eta_{эд}$ – КПД приводного электродвигателя. Расчетные кривые w^* (рис. 41) построены для двух значений $H^*_ф$ = 1,25; 1,45. Для других значений $H^*_ф$ зависимости $w^*_{ск} = f(\lambda, H^*_п)$ могут быть получены графически с использованием уравнений (19), (21) и (50).

В регулируемых электроприводах второй группы с рекуперацией энергии скольжения часть энергии возвращается обратно в электричес-

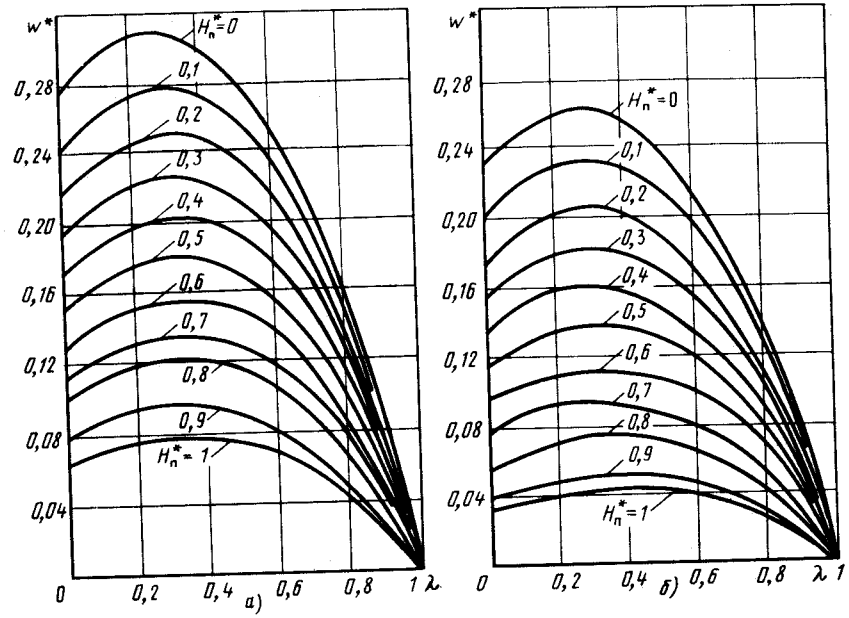


Рис. 41. Изменение относительной экономии электроэнергии в зависимости от λ и $H^*_п$ при замене дросселирования регулированием частоты вращения насоса:

а – для насосов чистой воды; *б* – для насосов сточной жидкости

кую сеть, но какая-то часть все-таки теряется в электроприводе:

$$W_{пот.ск} \approx W_{ск}(1 - \eta_к), \qquad (56)$$

где $\eta_к$ – КПД каскадой схемы. Современные каскадные схемы имеют довольно высокий КПД (0,9 ÷ 0,95). Благодаря этому электроприводы второй группы характеризуются высокими энергетическими показателями.

Кроме потерь, зависящих от потерь скольжения, в каскадных схемах имеют место постоянные потери, которые составляют примерно 3% потребляемой мощности. Ориентировочно суммарные потери в электроприводе при выполнении экономических расчетов можно принять

$$W_{пот} \approx \zeta W_{эк}, \qquad (57)$$

где ζ = 0,02 ÷ 0,05.

С учетом изложенного результирующая экономия электроэнергии в случае применения электроприводов с рекуперацией энергии сколь-

жения

$$W_{эк} = (1 - \zeta)\frac{N_б T w^*}{\eta_{э.д}}, \qquad (58)$$

где w^* – относительная экономия электроэнергии, определяемая по графикам (см. рис. 21, *а, б*; 24) в зависимости от того, какой способ регулирования заменяется и какими насосами оснащена установка.

Потери в электроприводах третьей группы, работающих без потерь скольжения, обусловлены потерями в частотных преобразователях, а также снижением КПД электродвигателя из-за несинусоидальности преобразованного тока. Потери в таких приводах согласно [40] равны

$$W_{пот} = N_б T(1 + \zeta - \eta_{пр}), \qquad (59)$$

где ζ – коэффициент, учитывающий потери за счет несинусоидальности преобразованного тока, $\zeta = 0{,}03 \div 0{,}05$; $\eta_{пр}$ – КПД частотного преобразователя, $\eta_{пр} = 0{,}9 \div 0{,}95$.

В случае применения электроприводов, регулирующих без потерь скольжения, результирующая экономия электроэнергии с учетом потерь в электроприводе определяется по формуле

$$W_{рез} = (N_б T/\eta_{эд})[w^* - (1 + \zeta - \eta_{пр})]. \qquad (60)$$

В насосных установках применяются не только плавно регулируемые электроприводы, но и приводы с асинхронными многоскоростными электродвигателями, частота вращения которых меняется дискретно (ступенями) в соответствии с зависимостью

$$n = (60f/p)(1 - s), \qquad (61)$$

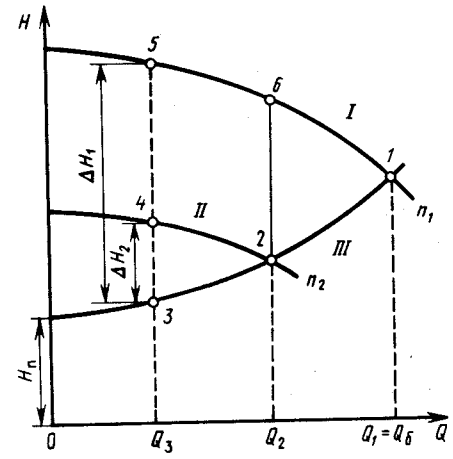
где f – частота тока питающей сети, $f = 50$ Гц (СССР); p – число пар полюсов электродвигателя, $p = 1, 2, 3 \ldots$; s – скольжение асинхронного двигателя, $s = 0{,}02 \div 0{,}04$.

Регулирование частоты вращения многоскоростных электродвигателей осуществляется изменением пар полюсов. Поскольку число пар полюсов не может быть дробным, при $f = 50$ Гц без учета скольжения частота вращения многоскоростных асинхронных электродвигателей имеет следующие значения: 3000, 1500, 1000, 750 об/мин и т.д.

Изменяя ступенями частоту вращения электродвигателя можно дискретно менять положение напорной характеристики насоса (рис. 42). Благодаря этому изменению существенно уменьшаются превышения напоров в режиме минимальных подач. По своему эффекту оснащение насоса многоскоростным электродвигателем равнозначно установке на станции дополнительно небольшого насоса (так называемого разновеса). Хотя этот способ регулирования не ликвидирует превышения напоров полностью, но благодаря их уменьшению обеспечивает более экономичный режим работы насосной установки.

Рис. 42. Режим работы двухскоростного насосного агрегата:

I – напорная характеристика насоса при работе на высшей скорости; *II* – то же при работе на низшей скорости; *III* – характеристика трубопровода



Эффективность применения многоскоростных электродвигателей можно оценить следующим образом. Применение двухскоростного электродвигателя снимает превышения напоров, ограниченное криволинейным четырехугольником $2-4-5-6$ (рис. 42). Следовательно, экономия электроэнергии за счет снятия этих напоров может быть определена как разность потерь электроэнергии, затрачиваемой на превышение напоров, ограниченных ординатами криволинейного треугольника $1-3-5$ и ординатами криволинейных треугольников $1-2-6$ и $2-3-4$ (рис. 42). Тогда экономия электроэнергии равна

$$W_{эк} = (1 - \zeta)[N_1 T w^* - (N_1 T_1 w_1^* + N_2 T_2 w_2^*)], \qquad (62)$$

где N_1 и N_2 – значения мощности, потребляемой при Q_1, H_1 и Q_2, H_2 соответственно, кВт; $T = T_1 + T_2$ – расчетный период времени, ч; T_1, T_2 – время работы, ч, насоса с частотой вращения электродвигателя n_1 и n_2 соответственно; w^*, w_1^*, w_2^* – относительные потери электроэнергии, определяемые по графикам (см. рис. 21, 24) для $\lambda = Q_3/Q_1$, $\lambda_1 = Q_2/Q_1$ при $H_п^* = H_п/H_1$ и $\lambda_2 = Q_3/Q_2$ при $H_п^* = H_п/H_2$; $\zeta = 0{,}02 \div 0{,}03$ – снижающий коэффициент, учитывающий, что КПД многоскоростных электродвигателей на 2–3 % ниже, чем односкоростных.

Для 3–4-скоростных электродвигателей экономия электроэнергии вычисляется аналогичным образом с учетом того, что при этом увеличивается число напорных характеристик и, следовательно, превышение напоров уменьшается еще больше. Естественно, что при этом экономия электроэнергии еще больше увеличивается.

В заключение следует еще раз обратить внимание на то, что рассматриваемая методика определения экономии электроэнергии, заимствованная из [40], является упрощенной, а приведенные формулы являются приближенными, так как при их выводе сделаны некоторые допу-

щения. В частности, не учитывается изменение КПД насоса при изменении частоты его вращения, поскольку при этом экономия электроэнергии, обусловленная снижением напоров, обычно больше, чем потери электроэнергии за счет снижения КПД насоса при изменении его частоты вращения. Учет потерь электроэнергии, обусловленный изменением КПД насосного агрегата, осуществляется с помощью уравнения (26).

Однако эта методика позволяет достаточно быстро и просто оценить экономию электроэнергии, которая может быть получена при использовании регулируемого электропривода в насосных установках. Сравнение прогнозируемой экономии электроэнергии с фактической, полученной при внедрении регулируемого электропривода на действующих объектах, показывает, что погрешность вычисления составляет 10–15%. Учитывая отсутствие достаточно надежных исходных данных о будущем режиме работы насосных установок, эту погрешность можно считать приемлемой при разработке практических мероприятий по экономии электроэнергии в насосных установках.

Необходимо также отметить, что регулирование частоты вращения требует применения дополнительных устройств, что увеличивает капитальные затраты. В то же время регулирование частоты вращения позволяет увеличить единичную мощность насосных агрегатов и уменьшить их общее число на станции и, следовательно, снизить капитальные затраты. Поэтому принятие решения об использовании регулируемого электропривода в насосной установке должно основываться на технико-экономическом расчете с учетом изменения всех видов затрат (см. § 20).

13. КОНТРОЛЬ И УСТРАНЕНИЕ ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ КАК СРЕДСТВО ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В процессе эксплуатации насосов из-за износа увеличиваются зазоры между уплотнительным кольцом и рабочим колесом насоса, в результате чего увеличивается переток жидкости из напорной части насоса во всасывающую, снижается КПД насоса и как следствие увеличивается потребление электроэнергии на перекачку жидкости. Поэтому становится важной задача своевременного обнаружения увеличенных зазоров между рабочим колесом и уплотнительным кольцом.

Проверка зазоров осуществляется обычно в ходе текущих, средних и капитальных ремонтов. Размер зазора зависит от диаметра рабочего колеса насоса, его типа и приводится в сопроводительной технической документации насосного агрегата. Зазоры измеряют в точках, расположенных в диаметрально противоположных направлениях, при четырех положениях рабочего колеса, поворачиваемого в одном направлении на угол 90°. Несимметричность измеренных зазоров не должна превышать 20% среднего значения размера зазора.

Для обеспечения нормальной и экономичной работы насосов важно соблюдение оптимальных размеров зазоров в подшипниках. Слишком малые зазоры ведут к увеличению потерь на трение и, следовательно, нерационально увеличивают расход электроэнергии, а большие вызывают биение и преждевременный износ оборудования.

Для экономичной работы насосного агрегата следует обеспечивать предусмотренную для данной конструкции смазку. Подшипники качения и баббитовые подшипники смазываются моторными маслами соответствующей вязкости и других физико-химических свойств. Резиновые и лигнофолевые подшипники смазываются чистой водой (мутность не более 50 мг/л). Расход воды на смазку одного подшипника зависит от диаметра рабочего колеса насоса:

Диаметр рабочего колеса, мм	До 1100	До 1850	До 2600
Расход воды, л/с	0,5	1	2

Во избежание больших потерь на трение в сальниках насосов затяжка нажимной буксы не должна быть излишне большой. Набивка сальника собирается из отдельных колец с косым срезом и размером зазора в стыках 3–5 мм. При установке колец стыки смещают относительно друг друга на угол 100–120°. Кольца водяного затвора устанавливают напротив отверстия, через которое подают в сальник воду, т.е. кольцо делит сальниковую набивку пополам. Нажимная букса входит в сальниковую коробку примерно на 1/3 длины так, чтобы вода, охлаждающая и смазывающая сальник, вытекала отдельными каплями.

Для уменьшения потерь на трение следует также обеспечивать правильную центровку линии валов насоса и двигателя.

Если контроль зазоров возможен только в ходе ремонтов и профилактических осмотров, о состоянии насосных агрегатов в повседневной эксплуатации судят по показаниям контрольно-измерительных приборов (КИП): манометров, расходомеров, амперметров, ваттметров, счетчиков электроэнергии. Увеличение показаний амперметров, ваттметров, счетчиков при постоянной подаче свидетельствует об ухудшении состояния насосного агрегата, повышенном износе рабочего колеса, чрезмерной затяжке сальников, неудовлетворительном состоянии подшипников. Снижение подачи и напора насоса в сочетании с увеличением тока нагрузки и потребляемой мощности указывает на повышенный износ рабочего колеса.

Неэкономичные режимы работы насосных агрегатов имеют место при неисправности гидромеханического оборудования насосной установки. Неисправные обратные клапаны, задвижки, затворы могут находиться в промежуточном положении и создавать дополнительное гидравлическое сопротивление в коммуникациях насосных установок. В этом случае наблюдается увеличение напора, развиваемого насосом с одновременным снижением напора в сети. Подача насоса при этом уменьшается так же, как ток нагрузки и потребляемая мощность на-

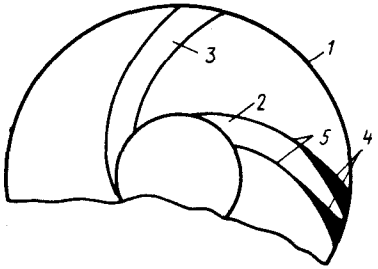


Рис. 43. Профилирование лопастей рабочих колес и их шлифовка:

1 – рабочее колесо; *2* – профилированная лопасть; *3* – непрофилированная лопасть; *4* – удаляемый материал профилированной лопасти; *5* – шлифуемые поверхности лопасти

сосного агрегата. Аналогичные явления наблюдаются при обрастании труб, которое вызывает дополнительное потребление электроэнергии.

Царапины и другие мелкие повреждения рабочих колес насосов, вызванные истиранием их поверхности взвешенными абразивными веществами, например песком в воде, кавитационные свищи и каверны при небольшой глубине (до 2 мм) зачищают наждачным камнем. При большей глубине их заваривают электросваркой. Свищи и трещины, расположенные по краям элементов рабочего колеса, рассверливают или разделывают зубилом, а затем заваривают электросваркой.

В крупных насосных агрегатах (рабочее колесо диаметром около 1 м и более) прибегают к шлифовке поверхностей лопаток рабочих колес и придают кромкам рабочих колес более выгодный гидродинамический профиль (рис. 43). Такая мера позволяет снизить потребление электроэнергии насосным агрегатом примерно на 1% (повысить КПД насоса на 1–2%) [56].

Эффективным средством экономии электроэнергии в водоводах является поддержание в должном порядке системы трубопроводов и трубопроводной арматуры. По данным [48], 50% всей годовой потребности воды в СССР подается по трубам с коррозионными отложениями. Согласно [19, 48] эти отложения уменьшают живое сечение труб до 20% и увеличивают гидравлическое сопротивление труб в 3 раза больше расчетного. Для труб диаметром 200 мм и выше применяется гидромеханический способ очистки с помощью специального устройства. Описание устройства для гидромеханической очистки труб приводится в [19]. Это устройство обеспечивает очистку всей внутренней поверхности труб диаметром от 200 до 1400 мм при зарастании живого сечения трубопроводов до 20%. За один рабочий цикл устройство очищает участки трубопровода длиной 2–10 км.

Для предотвращения обрастания труб в мировой и отечественной практике применяются цементно-песчаные, полиэтиленовые, эпоксидные и другие покрытия [48]. Обычно при прокладке новых трубопроводов на внутреннюю поверхность труб защитное покрытие наносится в заводских условиях, а действующих трубопроводов – после их очистки в полевых условиях. Цементные покрытия с различными добавками, в том числе полимерными, толщиной 1–3 см препятствуют коррозии материала труб [48]. Несмотря на некоторое уменьшение внутреннего диаметра труб, покрытия повышают пропускную способность труб, снижают энергозатраты на подачу жидкости.

Получил также распространение метод протяжки внутрь трубопровода полиэтиленовых труб толщиной стенки 1–2 мм [48]. Пространство между полиэтиленовыми трубами и внутренней поверхностью трубопровода тампонируется цементным раствором низких марок. Восстановление таким способом проржавевших металлических и поврежденных асбестоцементных и железобетонных труб обходится на 70–40% дешевле стоимости их перекладки.

Разработаны и другие методы восстановления труб (покрытия на основе эпоксидных смол, полимеризирующихся полиэфирных смол и др.), но пока они еще практического применения не нашли [48].

Глава 5

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

14. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КАК ОСНОВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ РАБОТЫ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

В § 12 показано, что центробежные насосы энергетически наиболее эффективно регулируются изменением их частоты вращения. Частота вращения насосов может быть изменена, если в качестве приводного двигателя используются тепловые двигатели: газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания (ДВС) или регулируемый электропривод.

Устройство и характеристики газовых турбин и ДВС таковы, что они могут обеспечить изменение частоты вращения насосов в необходимом диапазоне. Однако для систем автоматического управления (САУ) режимом работы насосных установок обычно используются различные виды регулируемого электропривода. Регулируемый электропривод подразделяется на две основные группы: постоянного и переменного тока. Электроприводом называют устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую и состоящее из электродвигателя, передаточного механизма (трансмиссии, муфты, редуктора) и системы управления. В регулируемый электропривод входят также устройства, обеспечивающие изменение частоты вращения насосного агрегата в целом или только одного насоса. Эти устройства выполняют обычно две функции: являются силовыми преобразователями электроэнергии и в то же время элементами системы управления.

Процесс регулирования частоты вращения любого механизма, в том числе и насоса, удобно анализировать с помощью механических характеристик насосного агрегата (см. § 12). Ниже рассматриваются

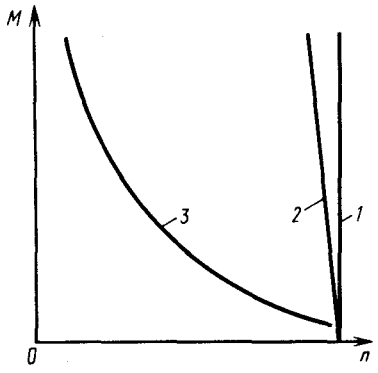


Рис. 44. Механические характеристики электродвигателей

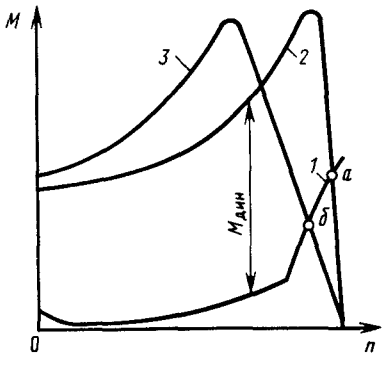


Рис. 45. Механические характеристики насосного агрегата

механические характеристики электродвигателей, которые сопоставляются с механическими характеристиками насосов.

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его вращающего момента от частоты вращения и подразделяется на три основных вида:

абсолютно жесткие (кривая *1* на рис. 44) – свойственны синхронным электродвигателям, частота которых остается постоянной при изменении вращающего момента;

жесткие (кривая *2* на рис. 44) – свойственны асинхронным электродвигателям (в рабочей части характеристики) и электродвигателям постоянного тока с параллельным возбуждением, частота вращения которых незначительно меняется при изменении вращающего момента;

мягкие (кривая *3* на рис. 44) – свойственны электродвигателям постоянного тока с последовательным возбуждением, частота вращения которых существенно изменяется при изменении вращающего момента.

Существуют и другие разновидности механических характеристик. Например, механическая характеристика электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением занимает промежуточное положение между характеристиками электродвигателей с параллельным и последовательным возбуждением. Механическая характеристика асинхронного электродвигателя с сопротивлением, введенным в роторную цепь, мягче аналогичной характеристики короткозамкнутого электродвигателя и т.д. Механические характеристики регулируемых электроприводов принципиально отличаются от характеристик нерегулируемых тем, что в процессе регулирования они изменяют свое положение, или свою форму, или то и другое одновременно.

Рассмотрим механические характеристики насосного агрегата. На рис. 45 представлены механические характеристики центробежного насоса, оборудованного обратным затвором (кривая *1*) и электродвигателя с короткозамкнутым ротором (кривая *2*). Разница значений вращающего момента электродвигателя и момента сопротивления называется динамическим моментом. Если вращающий момент больше момента сопротивления, динамический момент считается положительным, если меньше – отрицательным. Под воздействием положительного динамического момента насосный агрегат начинает работать с ускорением, т.е. разгоняется. Если динамический момент отрицательный, насосный агрегат работает с замедлением, т.е. тормозится. При равенстве этих моментов имеет место установившийся режим работы, т.е. насосный агрегат работает с постоянной частотой вращения. Эта частота вращения и соответствующий ей момент определяются пересечением механических характеристик электродвигателя и насоса (точка *а* на рис. 45). Если в процессе регулирования тем или иным способом изменить механическую характеристику, например сделать ее более мягкой за счет введения дополнительного сопротивления в роторную цепь электродвигателя (кривая *3* на рис. 45), момент вращения электродвигателя станет меньше момента сопротивления. Под воздействием отрицательного динамического момента насосный агрегат начинает работать с замедлением, т.е. тормозится до тех пор, пока вращающий момент и момент сопротивления опять не уравновесятся (точка *б* на рис. 45). Этой точке соответствует своя частота вращения и свое значение момента. Таким образом, процесс регулирования частоты вращения насосного агрегата непрерывно сопровождается изменениями вращающего момента электродвигателя и момента сопротивления насоса.

Рассмотрим основные виды регулируемого электропривода, применяемого в насосных установках. Регулирование частоты вращения насоса может осуществляться или изменением частоты вращения электродвигателя, жестко соединенного с насосом, или изменением передаточного отношения трансмиссии, соединяющей насос с электродвигателем, который работает с постоянной скоростью.

15. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Электродвигатели подразделяются на два основных вида: постоянного и переменного тока. В насосных установках используются преимущественно двигатели переменного тока. Однако за рубежом в насосных установках изредка используются регулируемые электроприводы на основе двигателей постоянного тока.

Регулирование частоты вращения электродвигателей постоянного тока. Существуют электродвигатели постоянного тока параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. В насосных установках применяются электродвигатели параллельного возбуждения, частота вращения которых определяется

выражением

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R_a}{C\Phi}, \qquad (63)$$

где U – напряжение, подводимое к двигателю; I_a – ток якорной цепи; Φ – магнитный поток электродвигателя, пропорциональный току возбуждения; ΣR_a – суммарное сопротивление якорной цепи; C – коэффициент пропорциональности.

Согласно (63) возможны три способа регулирования частоты вращения электродвигателя: изменением напряжения, подводимого к электродвигателю; введением добавочного сопротивления в цепь якоря; изменением магнитного потока (тока возбуждения) электродвигателя.

Регулирование введением дополнительного сопротивления в якорную цепь применяется редко из-за своей неэкономичности. В добавочном сопротивлении теряется мощность:

$$P_a = I_a R_д, \qquad (64)$$

где I_a – ток якорной цепи, А; $R_д$ – добавочное сопротивление, Ом.

Механические характеристики электродвигателя постоянного тока при разных способах регулирования представлены на рис. 46. Сопоставление механических характеристик электродвигателя и насосов показывает, что электропривод постоянного тока вполне соответствует условиям работы насосов.

В современном электроприводе постоянного тока питание электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением *2* осуществ-

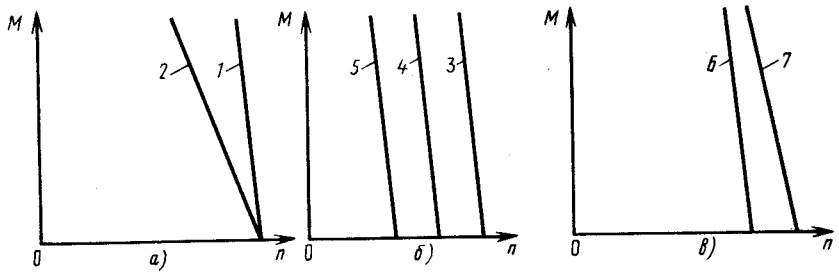
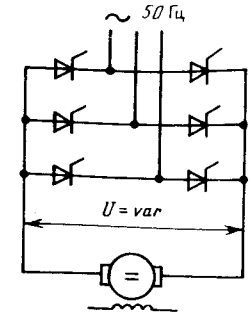


Рис. 46. Механическая характеристика электродвигателей постоянного тока:

а – при введении дополнительного сопротивления в цепь якоря; *б* – при изменении напряжения на зажимах якоря; *в* – при изменении магнитного потока (тока возбуждения); *1* – без сопротивления в цепи якоря; *2* – с добавочным сопротивлением в цепи якоря; *3* – при номинальном напряжении; *4, 5* – при пониженном напряжении; *6* – при нормальном возбуждении; *7* – при уменьшении магнитного потока

Рис. 47. Схема регулируемого электропривода постоянного тока



вляется от управляемых полупроводниковых выпрямителей *1* (рис. 47). Эти выпрямители характеризуются как надежные и экономичные (КПД = = 0,9÷0,95). В конструкции электродвигателя постоянного тока имеется коллектор и щеточный аппарат, что усложняет эксплуатацию электропривода, поэтому широкого распространения в насосных установках электроприводы постоянного тока не получили. Тем не менее за рубежом такие электродвители в отдельных случаях используются в насосных агрегатах мощностью до 600 – 800 кВт.

Более широкое распространение в отечественной и зарубежной практике получил регулируемый электропривод переменного тока. Частота вращения электродвигателя переменного тока зависит от частоты питающего тока f, числа пар полюсов p и скольжения s [см. (61)]. Изменяя один или несколько параметров, входящих в (61), можно изменить частоту вращения электродвигателя и, следовательно, насоса.

Частотный электропривод. Основным элементом частотного электропривода является тиристорный (частотный) преобразователь. В этом преобразователе постоянная частота питающей сети f_1 преобразуется в переменную f_2. Пропорционально частоте f_2 изменяется частота вращения электродвигателя, подключенного к выходу преобразователя.

Частотные преобразователи подразделяются на два основных вида: с промежуточным звеном постоянного тока и с непосредственной связью. Схема частотного преобразователя первого вида представлена на рис. 48 и 49. Преобразователь состоит из выпрямителя *В*, фильтра *Ф* и инвертора *И*.

Посредством частотного преобразователя практически неизменные сетевые параметры напряжения U_1 и частота f_1 преобразуются в изменяемые параметры U_2 и f_2, требуемые для системы управления.

Для обеспечения устойчивой работы электродвигателя ограничения его перегрузки по току и магнитному потоку, поддержания высоких энергетических показателей частотный преобразователь должен поддерживать определенное соотношение между входными и выходными параметрами, зависящее от вида механической характеристики насоса. Эти соотношения получаются из уравнения закона частотного регулирования Костенко [6]

$$U_1/U_2 = \sqrt{M_1/M_2}\, f_1/f_2. \qquad (65)$$

Для насосов, работающих без статического напора, т.е. тех, чья механическая характеристика описывается уравнением квадратичной па-

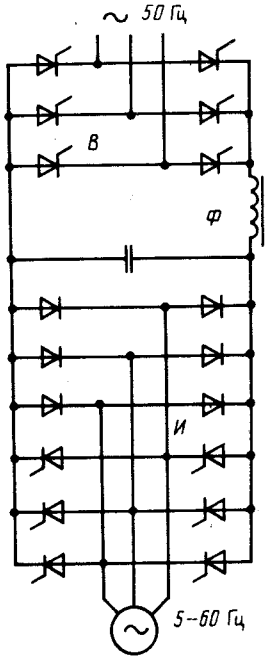


Рис. 48. Схема частотного электропривода с инвертором напряжения

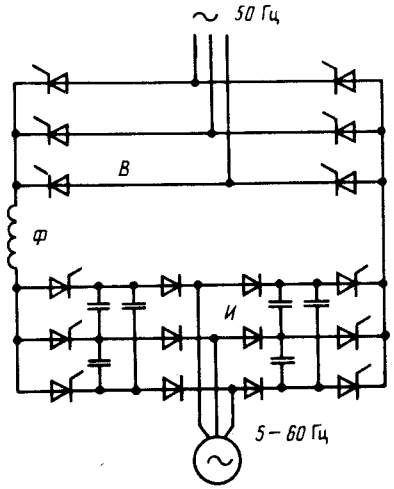


Рис. 49. Схема частотного электропривода с инвертором тока

раболы [см. (31) – (34)], должно соблюдаться соотношение

$$U_1/f_1^2 = U_2/f_2^2 = \text{const}. \qquad (66)$$

Для насосов, работающих со статическим напором, должно соблюдаться более сложное соотношение

$$U_1/f_1^{1+\frac{k}{2}} = U_2/f_2^{1+\frac{k}{2}}, \qquad (67)$$

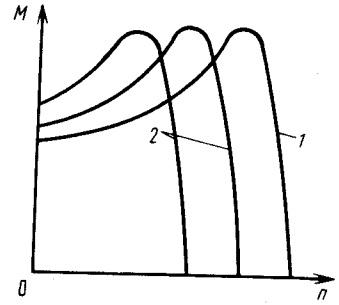
где k – показатель степени в уравнении механической характеристики насоса (45).

В большинстве случаев в насосных установках приходится использовать преобразователи промышленного исполнения, обеспечивающие соотношение

$$U_1/f_1 = U_2/f_2 = \text{const}. \qquad (68)$$

На рис. 50 представлены механические характеристики асинхронного электродвигателя при частотном регулировании и соблюдении соотношения (68). При уменьшении частоты f_2 механическая характеристика не только меняет свое положение в координатах n–M, но несколько изменяет свою форму. В частности, снижается максимальный момент электродвигателя, что обусловлено тем, что при соблюдении соотношения (68) при изменении частоты f_1 не учитывается влияние на вращающий момент изменений активного сопротивления статора. При частотном регулировании с учетом этого влияния максимальный момент остается неизменным, форма механической характеристики сохраняется, меняется только ее положение.

Рис. 50. Механические характеристики частотного электропривода при максимальных (*1*) и пониженных (*2*) частотах



Частотные преобразователи выполняются на базе автономных инверторов тока (АИТ) или на базе автономных инверторов напряжения (АИН). В частотных преобразователях на базе АИН (см. рис. 48) в звене постоянного тока выпрямляется напряжение. Сглаживающий фильтр в этих преобразователях состоит из дросселя, включенного последовательно с инвертором, и конденсатора, подключаемого параллельно АИН. На выходе преобразователя форма кривой выходного напряжения (обычно прямоугольная) определяется порядком переключения тиристоров, а форма кривой тока (синусоидальная) зависит от характера нагрузки.

В частотных преобразователях на базе АИТ (см. рис. 49) в звене постоянного тока выпрямляется ток. Сглаживающий фильтр состоит из дросселя, включаемого последовательно с инвертором. На выходе преобразователя форма кривой выходного тока определяется порядком переключения тиристоров, а форма кривой напряжения (синусоидальная) – характером нагрузки.

Частотные преобразователи на базе АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) имеют более высокие энергетические характеристики за счет того, что на выходе преобразователя обеспечивается форма кривых тока и напряжения, приближающаяся к синусоидальной. В этих преобразователях в отличие от описанных выше могут использоваться неуправляемые выпрямители.

Отечественная электропромышленность изготавливает частотные преобразователи серии ЭКТ на базе АИН, серии ПЧТ и ПЧР-2 на базе АИТ и серии ПЧШ на базе АИН с ШИМ [3, 14].

Отмеченная несинусоидальность кривых выходного напряжения и тока частотных преобразователей должна учитываться при выборе электродвигателя для частотного электропривода.

Обычно на выходе частотного преобразователя формируется прямоугольная или трапециевидная кривая напряжения (тока), содержащая высшие гармонические составляющие. Их наличие влечет за собой увеличение потерь в электродвигателе. По этой причине при работе электропривода на частотах вращения, близких к номинальной, происходит перегрузка электродвигателя. Кроме того, при работе на пониженных частотах вращения ухудшаются условия охлаждения самовентилируемых электродвигателей, которые чаще всего применяются в приводе насосов. Однако в обычном диапазоне регулирования насосных агрегатов (1:2 или 1:3) это ухудшение условий вентиляции компенсируется существенным снижением нагрузки за счет уменьшения подачи и напора насоса. При работе же на частотах, близких к номинальным, ухудшение условий охлаждения в сочетании с появлением гармоник высших порядков требует снижения допустимой механической мощности на 8–15%. При этом на 1–2% снижается максимальный момент электродвигателя, его КПД – на 1–4%, $\cos\varphi$ – на 5–7%.

По [14] в случае применения асинхронного самовентилируемого электродвигателя в приводе механизма, момент которого изменяется пропорционально квадрату частоты вращения, допустимая мощность на валу электродвигателя должна быть снижена до значения

$$P_{доп} = P_{ном}(7{,}2 + p)/(8{,}64 + p), \qquad (69)$$

где p – число пар полюсов электродвигателя.

Во избежание перегрузки электродвигателя необходимо или ограничить верхнее значение его частоты вращения, или оснастить привод более мощным электродвигателем. Последняя мера обязательна в тех случаях, когда предусматривается работа насосного агрегата с частотой $f_2 > 50$ Гц. Ограничение верхнего значения частоты вращения двигателя осуществляется ограничением частоты f_2 до 47 – 45 Гц. Увеличение номинальной мощности приводного электродвигателя осуществляется с учетом (69) с округлением до ближайшего стандартного значения.

При этом ограничение частоты f_2 влечет за собой снижение положения напорной характеристики насоса. Это следует учитывать при совместной работе регулируемых и нерегулируемых насосных агрегатов (см. § 15, 16).

Особенностью применения регулируемого частотного электропривода является возможность использования одного частотного преобразователя для привода нескольких насосных агрегатов. От одного преобразователя достаточно большой мощности могут получать питание одновременно несколько одинаковых насосных агрегатов.

Возможно также поочередное подключение к одному частотному преобразователю насосных агрегатов, соизмеримых по мощности.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает ряд частотных преобразователей мощностью до 400 кВт и напряжением 380 и 220 В. Разработаны и изготавливаются отдельные образцы частотных преобразователей мощностью до 3500 кВт. Сведения об отечественных частотных преобразователях с промежуточным звеном постоянного тока приведены в приложениях 1, 2 и 3.

Наряду с преобразователями частоты с промежуточным звеном постоянного тока в электроприводе насосов используются частотные преобразователи с непосредственной связью.

Отличительной особенностью частотного преобразователя без промежуточного звена постоянного тока является синусоидальная форма кривой напряжения на выходе, образованная из участков синусоид преобразуемого напряжения. Второй особенностью этого преобразователя является невозможность получить на выходе частоту, равную частоте, питающей сети. Частота на выходе преобразователя обычно составляет 25–33 Гц.

В настоящее время отечественная промышленность осваивает серийное производство тиристорного асинхронного электропривода серии ЭТА1-01 на базе преобразователя с непосредственной связью и двухфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 265 кВт при номинальной частоте вращения 1000 и 2000 об/мин [51]. Сравнительно низкая стоимость этого электропривода делает его перспективным для использования в насосных агрегатах небольшой мощности.

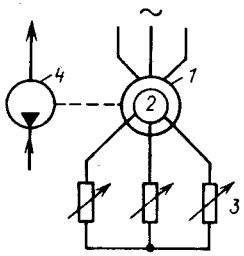
Выбор основного оборудования для частотного электропривода осуществляется в следующем порядке:

определяется мощность на валу насоса при работе с номинальной подачей и соответствующим ей напором по формуле (5);

из каталога подбирается короткозамкнутый электродвигатель, номинальная мощность которого должна быть на 20–30 % больше потребляемой насосом мощности. Номинальная частота вращения электродвигателя должна соответствовать номинальной частоте вращения насоса;

в соответствии с выбранной мощностью приводного электродвигателя подбирается серийный преобразователь частоты, номинальная мощность которого равна или больше номинальной мощности электродвигателя насосного агрегата $P_{пр} \geqslant P_{дв}$, а напряжение преобразователя соответствует номинальному напряжению электродвигателя $U_{пр} = U_{дв}$.

Регулирование частоты вращения электродвигателей изменением их скольжения осуществляется введением в цепь ротора электродвигателя дополнительного сопротивления или встречной электродвижущей силы (ЭДС), а также изменением напряжения на статоре электродвигателя.



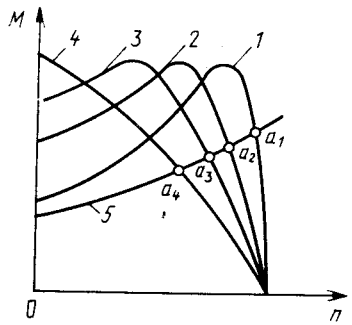


Рис. 51. Схема регулирования частоты вращения электродвигателя введением добавочного сопротивления в цепь ротора:

1 – обмотка статора электродвигателя; *2* – обмотка ротора электродвигателя; *3* – реостат; *4* – насос

Рис. 52. Механические характеристики асинхронного электродвигателя при введении добавочного активного сопротивления

1 – естественная механическая характеристика электродвигателя $R_{доб} = 0$; *2–4* – механические характеристики электродвигателя при разных значениях $R_{доб}$; *5* – механическая характеристика насоса

Введение добавочного сопротивления может быть осуществлено при использовании электродвигателей с фазным ротором (рис. 51). При увеличении активного сопротивления роторной цепи электродвигателя изменяется форма механической характеристики электродвигателя, она становится более мягкой (рис. 52). Измененная механическая характеристика электродвигателя пересекается с механической характеристикой насоса в точках $a_1 - a_4$ и т.д. Каждой из этих точек соответствуют свои значения момента и частоты вращения. Плавное изменение добавочного сопротивления в цепи ротора двигателя позволяет плавно изменять форму механической характеристики электродвигателя и, следовательно, плавно изменять частоту вращения насосного агрегата. Увеличение скольжения электродвигателя за счет увеличения сопротивления цепи ротора связано с увеличением потерь скольжения. Мощность и энергия потерь скольжения в регулируемом электроприводе в этом случае вычисляется с помощью уравнений (49) и (52) и расчетных кривых (см. рис. 40).

Электропривод по схеме асинхронно-вентильного каскада (АВК). В этом электроприводе регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется изменением ЭДС, вводимой в обмотку ротора асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Энергия скольжения ротора рекуперируется в питающую электрическую сеть через преобразователь АВК, который состоит из двух основных элементов: неуправляемого выпрямителя и управляемого инвертора. Кроме того,

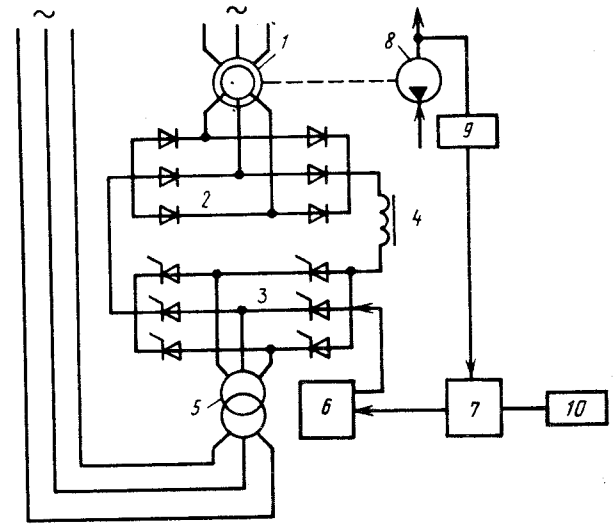


Рис. 53. Регулируемый электропривод насоса по схеме АВК:

1 – электродвигатель с фазным ротором; *2* – неуправляемый выпрямитель; *3* – управляемый инвертор; *4* – сглаживающий дроссель; *5* – согласующий трансформатор; *6* – система импульсно-фазового управления (СИФУ) инвертора; *7* – технологический регулятор; *8* – насос; *9* – датчик технологический (давления); *10* – задатчик

в состав привода входят сглаживающий дроссель, согласующий трансформатор и станция управления. Схема электропривода приведена на рис. 53.

При работе в двигательном режиме ниже синхронной скорости ток ротора асинхронного двигателя выпрямляется, а затем преобразуется в переменный ток частоты сети с помощью управляемых тиристоров, работающих в инверторном режиме. При этом ток в первичной обмотке трансформатора, протекающий под действием выпрямленного напряжения ротора, находится в противофазе с напряжением сети. Благодаря этому имеет место отдача активной электроэнергии в сеть.

Механические характеристики электропривода для разных значений выпрямленного напряжения представлены на рис. 54.

Изменяя значения выпрямленного напряжения от нуля до номинального напряжения ротора, можно регулировать частоту вращения электродвигателя в полном диапазоне от номинального значения до нуля. Но для этого номинальные значения напряжений преобразователя и ротора должны быть равны. Сравнительно высокие значения роторного напряжения электродвигателей (до 1000–1300 В) требуют в этом случае применения довольно сложных и громоздких преобразователей АВК. В то же время требуемый диапазон регулирования частоты вращения

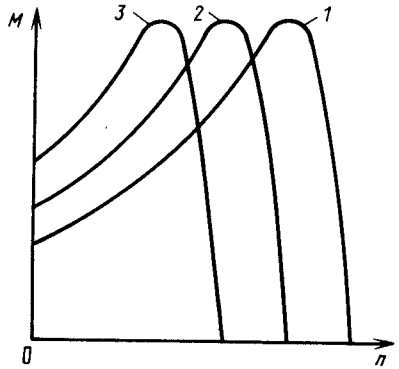


Рис. 54. Механические характеристики электропривода по схеме АВК:

1 – естественная характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором (выпрямленное напряжение $U_d = 0$); *2, 3* – механические характеристики электродвигателя при увеличении выпрямленного напряжения

центробежных насосов в ряде систем транспортирования жидкости, например водоснабжения и водоотведения, относительно мал (20–30% номинального значения). В таких условиях регулирование частоты вращения в требуемом диапазоне целесообразно осуществлять по схеме АВК, а разгон ротора до рабочего диапазона регулирования – на пусковых резисторах. После того как ротор наберет требуемую частоту вращения и его напряжение станет меньше, чем номинальное напряжение преобразователя АВК, контакторы станции управления отключают пусковые резисторы и подключают частотный преобразователь к роторной цепи электродвигателя. Далее регулирование осуществляется изменением выпрямленного напряжения преобразователя АВК.

Порядок выбора резисторов и расчета пускового режима электропривода по схеме АВК приведен в [40].

Электропривод по схеме АВК имеет некоторые особенности, определяющие целесообразность использования его в САУ насосных установок:

в каскаде преобразуется не вся мощность, подводимая к насосному агрегату, а только рекуперируемая мощность скольжения, которая в приводе насосных агрегатов (см. § 12) не превышает 15% номинальной мощности электропривода;

мощность преобразователей АВК существенно зависит от глубины регулирования электропривода по скорости. Ограниченный диапазон регулирования насосов позволяет использовать менее мощные и, следовательно, более простые преобразователи;

зависимость вращающего момента от частоты вращения во второй и более высоких степенях позволяет осуществлять разгон электропривода в одну-две ступени.

Существенным недостатком электропривода по схеме АВК является некомплектная поставка его элементов (электродвигателя, преобразователей, станции управления), поставляемых на объект по отдельности.

Выбор основного оборудования для электропривода по схеме АВК осуществляется в следующем порядке:

определяется мощность на валу насоса при работе с номинальной подачей и соответствующим ей напором по формуле (5);

из каталога подбирается электродвигатель с фазным ротором, номинальная мощность которого должна быть на 5–15% больше потребляемой насосом мощности. Номинальная частота вращения электродвигателя должна соответствовать номинальной частоте вращения насоса;

из каталога для электродвигателя определяются номинальные параметры роторной цепи выбранного электродвигателя: напряжение $U_{н.р}$ и ток $I_{н.р}$. Задаваясь минимальным значением требуемого статического напора $H^*_п$ и фиктивной высотой подъема воды $H^*_ф$, вычисляется максимально возможное скольжение электродвигателя в данной насосной установке

$$s_{макс} = 1 - \sqrt{\frac{H^*_п}{H_ф}}. \qquad (70)$$

Для найденного значения $s_{макс}$ определяется максимально возможное напряжение на кольцах ротора асинхронного электродвигателя:

$$U_р = U_{н.р}\, s_{макс}. \qquad (71)$$

По значению напряжения $U_р$ выбирается номинальное линейное напряжение питания выпрямителя (номинальное напряжение преобразовательного агрегата АВК) по условию

$$U_{н.а} \geqslant U_р.$$

Определяется номинальный ток преобразовательного агрегата АВК (ток питающей фазы выпрямителя):

$$I_{н.а} \geqslant I_{н.р}.$$

По найденным значениям $U_{н.а}$ и $I_{н.а}$ выбирается тип преобразователя АВК, технические характеристики которого приведены в приложении 4 и 5.

После выбора преобразователя АВК выбираются согласующие трансформаторы. Они необходимы в том случае, если номинальное напряжение питающей сети отличается от номинального напряжения преобразователя АВК.

Номинальное напряжение преобразователей отечественных электроприводов АВК (ТДП-2 и т.п.) равно 0,4 кВ, поэтому согласующие трансформаторы предусматриваются в приводе высоковольтных электродвигателей. Требуемая мощность трансформатора, кВ·А:

$$S_{тр} = 1{,}1\sqrt{3}\, U_{2т}\, I_{н.р}, \qquad (72)$$

где $U_{2т}$ – номинальное линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора, кВ; $I_{н.р}$ – ток ротора, А. Число трансформаторов выбирается в соответствии с типом преобразователя. Для одноинверторных преобразователей – один трансформатор, для двухинверторных преобразователей – два трансформатора. Тип трансформаторов выбирается по местным условиям в зависимости от способа его размещения: в отдельном помещении или на открытом воздухе устанавливаются масляные трансформаторы, а в помещении насосной станции сухие трансформаторы. Высшее напряжение трансформатора соответствует напряжению питающей сети.

Преобразователи типа АВК с одномостовыми инверторами могут быть присоединены к общей станционной сети 380/220 В при условии достаточной мощности трансформаторов собственных нужд. В этом случае, чтобы исключить искажения напряжения питающей сети, вызванной коммутацией тиристоров инвертора и ограничить ударный ток, проходящий через тиристоры инвертора, преобразователи должны быть подключены через токоограничивающие реакторы (типа РТСТ и т.д.). Индуктивность реакторов должна быть больше индуктивности рассеяния трансформаторов в 4–5 раз. Система управления запитывается в этом случае непосредственно от сети, т.е. выше реактора.

Станция управления выбирается по номинальному току ротора двигателя в зависимости от требуемого диапазона регулирования по частоте вращения. Диапазон регулирования определяется требуемой минимальной частотой вращения насоса:

$$D = \frac{n_{мин}}{n_{ном}} = 1 - s_{макс}. \qquad (73)$$

Обычно в системах водоснабжения и водоотведения регулируемые насосы работают в диапазоне 1:2, т.е. со скольжением не более 0,5. Чаще всего максимальное скольжение не превышает 0,25–0,3. Поэтому в большинстве случаев могут быть применены станции управления с частичным диапазоном регулирования. Номинальный ток станции управления должен быть больше или равен току ротора $I_{н.ст} \geqslant I_{н.р}$.

Пусковые резисторы электропривода по схеме АВК выбираются в соответствии с методикой, изложенной в [40].

Технические характеристики современных отечественных преобразователей типа ТДП и станций управления ШДУ, изготавливаемых ПО "Электровыпрямитель" и ЧЭАЗ [1, 25], приведены в приложении 4, 5. Преобразователи ТДП и станции ШДУ предназначены для регулируемых электроприводов мощностью от 250 до 2000 кВт.

Регулирование частоты вращения электродвигателей изменением напряжения на его статоре. Вращающий момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения, подводимого к электродвигателю [6]:

$$M_{вр} = KU^2. \qquad (74)$$

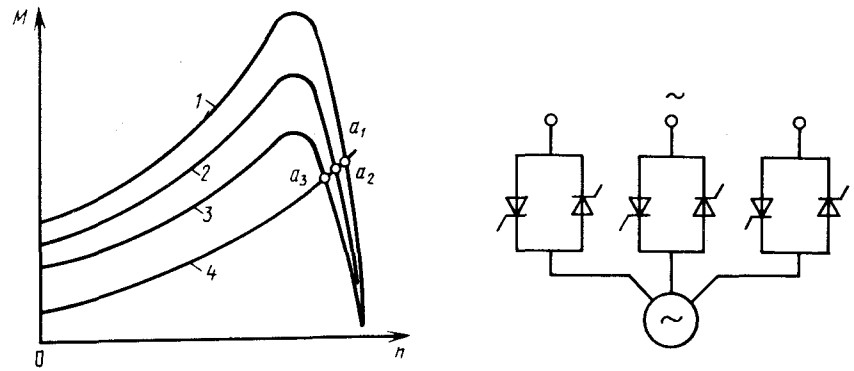


Рис. 55. Механические характеристики электродвигателя при изменении напряжения:

1 – естественная характеристика; *2, 3* – характеристики при пониженном напряжении; *4* – механическая характеристика насоса

Рис. 56. Электропривод с тиристорным (частотным) регулятором напряжения

По этой причине изменение напряжения на зажимах статора изменяет форму механической характеристики электродвигателя. Рассматривая совместно механические характеристики насоса и электродвигателя (рис. 55), на зажимах которого изменяется напряжение, видим, что каждому изменению напряжения соответствует своя рабочая точка $a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n$, каждой точке соответствует свое скольжение $s_1, s_2, s_3, \ldots, s_n$. При изменении напряжения значение критического скольжения не изменяется, поэтому максимальный момент при любых изменениях напряжения соответствует одному и тому же значению скольжения, равному примерно 0,1–0,2. Этим определяется сравнительно узкий диапазон регулирования по частоте вращения, который может обеспечить этот способ регулирования. Регулирование напряжения на статоре двигателя осуществляется обычно с помощью тиристорного (частотного) регулятора напряжения (рис. 56).

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов электродвигателя. Этот способ регулирования используется в случае применения многоскоростных электродвигателей.

Обмотки статора многоскоростных электродвигателей разделены на части, начала и концы которых выведены на клеммы электродвигателя. Обмотки роторов многоскоростных электродвигателей выполняются короткозамкнутыми. Переключая обмотки и их части в определенном сочетании, изменяют число пар полюсов электродвигателя. При этом в соответствии с уравнением (61) частота вращения электродвигателя изменяется ступенчато.

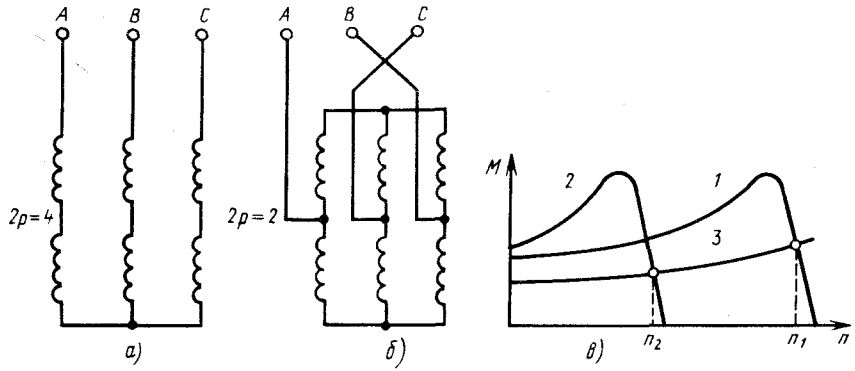


Рис. 57. Двухскоростной электродвигатель:

а – схема соединений обмоток, соответствующая низшей скорости $2p = 4$; *б* – то же при высшей скорости $2p = 2$; *в* – механическая характеристика двигателя; *1* – при $2p = 2$; *2* – при $2p = 4$; *3* – механическая характеристика насоса

На рис. 57 представлена принципиальная схема соединения обмоток статора, позволяющая изменить число пар полюсов в отношении 1:2, и соответствующие этим соединениям механические характеристики электродвигателя. Здесь же приведена механическая характеристика насоса. Пересечение этих характеристик определяет значения частот вращения и моментов сопротивления, соответствующих работе электродвигателя с разным числом пар полюсов.

Переключение обмоток и их частей выполняется масляными выключателями и контакторами с блокировкой, исключающей возможность включения нескольких частот вращения одновременно. При переключении числа пар полюсов частота вращения электродвигателя возрастает во столько раз, во сколько уменьшается число витков в каждой фазе обмотки статора. Благодаря этому ЭДС, наведенная в фазе, остается неизменной, и поэтому менять напряжение, подводимое к статору, не требуется.

Многоскоростные двигатели изготавливаются в виде низковольтных двух- и четырехскоростных асинхронных короткозамкнутых машин (единая серия электродвигателей мощностью до 100 кВт) и высоковольтных двухскоростных электродвигателей большой мощности. Для электропривода вертикальных насосов используют электродвигатели серии ДВДА напряжением 6 кВ, мощностью от 500 до 1400 кВт с синхронной частотой вращения 500/300, 500/375, 375/300 об/мин. Краткие характеристики многоскоростных электродвигателей приведены в приложении 6.

Система электропривода на базе вентильного электродвигателя занимает особое место в ряду регулируемых электроприводов переменного тока. По принципу действия эта система аналогична электро-

двигателю постоянного тока, у которого функции коллектора и щеточного аппарата выполняет тиристорный инвертор и датчик положения ротора в пространстве. Вентильный электродвигатель поэтому называют также и бесколлекторным электродвигателем постоянного тока.

В то же время наличие в составе электропривода частотного преобразователя дает основание отнести его к группе частотных электроприводов.

Вентильным электродвигателем называется электромеханическая система, состоящая из преобразователя частоты, синхронного электродвигателя и устройства, указывающего положение его ротора в пространстве. Преобразователь выполнен с явно выраженным звеном постоянного тока и состоит из управляемых выпрямителя и инвертора. Коммутация тиристорных вентилей инвертора в зоне малых частот осуществляется с помощью датчика положения ротора, а в зоне значений частот более 3–5 Гц осуществляется по коммутирующей сверхпереходной ЭДС, получаемой из напряжения на зажимах электродвигателя с помощью узла выделения коммутирующей ЭДС. Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в цепь постоянного тока включаются сглаживающие дроссели (реакторы). Принципиальная схема электропривода на базе вентильного электродвигателя представлена на рис. 58.

Отличительной особенностью этого вида электропривода является возможность использования в качестве приводного электродвигателя обычного, серийно выпускаемого синхронного электродвигателя. Это особенно ценно при внедрении данного вида электропривода на действующих объектах, так как при этом не требуется замены установленных на насосных станциях электродвигателей. Однако следует иметь в виду, что ограничения в нагрузке насосного агрегата, вызванного наличием высших гармонических составляющих на выходе преобразователя, для этого вида электропривода такие же, как и для частотного.

Преобразователи вентильных электродвигателей изготавливаются в двух модификациях: с низковольтной и высоковольтной преобразовательной частью.

Высоковольтные электроприводы (6–10 кВ), содержащие преобразователи с низковольтной частью, комплектуются понижающими трансформаторами, через которые они подключаются к питающей сети напряжением 6–10 кВ, и повышающими трансформаторами, через которые осуществляется питание высоковольтных электродвигателей (6 – 10 кВ).

Приводы с высоковольтной преобразовательной частью не имеют в своем составе повышающих и понижающих трансформаторов. Однако преобразовательная высоковольтная часть этой модификации выполняется в виде нескольких последовательно соединенных тирис-

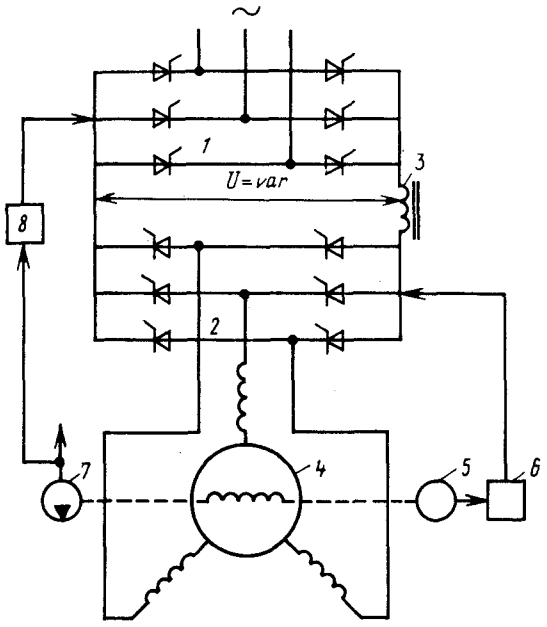


Рис. 58. Схема вентильного электродвигателя:

1 – управляемый выпрямитель; *2* – управляемый инвертор; *3* – сглаживающий дроссель; *4* – синхронный электродвигатель; *5* – датчик положения ротора двигателя; *6* – система импульсно-фазового управления интвертора; *7* – насос; *8* – система управления выпрямителем

торных вентилей. Из-за этого усложняется не только силовая часть, но и система управления выпрямителем и инвертором.

Вентильный электродвигатель является одним из самых сложных, дорогих и громоздких видов регулируемого электропривода. Технические характеристики преобразователей этого вида приведены в приложении 7. Порядок выбора оборудования для электропривода на базе вентильного электродвигателя аналогичен вышеизложенному для частотных приводов по номинальным параметрам приводного электродвигателя с учетом дополнительной нагрузки электродвигателей за счет несинусоидальности преобразованного тока.

16. РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ С ВАРИАТОРАМИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Существуют регулируемые электроприводы, в которых электродвигатели работают практически с неизменной частотой вращения. Такие электроприводы состоят из нерегулируемого синхронного или асинхронного короткозамкнутого электродви-

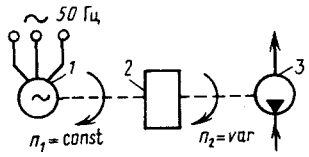


Рис. 59. Привод с вариатором частоты вращения:

1 – электродвигатель; *2* – вариатор; *3* – насос

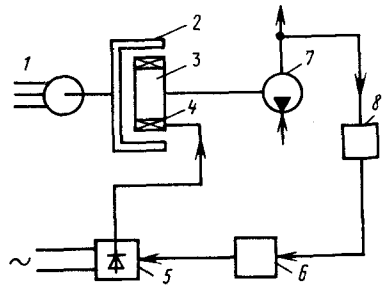


Рис. 60. Регулируемый электропривод насоса с индукторной муфтой скольжения (ИМС):

1 – короткозамкнутый асинхронный электродвигатель; *2* – якорь ИМС; *3* – индуктор ИМС; *4* – обмотка ИМС; *5* – возбудитель ИМС (управляемый выпрямитель); *6* – блок автоматики; *7* – насос; *8* – датчик давления

гателя и устройства, преобразующего постоянную частоту вращения электродвигателя в переменную частоту вращения насоса (рис. 59). К таким устройствам относятся механические вариаторы, гидравлические и электромагнитные муфты скольжения различных типов. Основным преимуществом таких электроприводов является их низкая стоимость и возможность использования наиболее простых и надежных нерегулируемых электродвигателей любого типа (синхронных и др.). К недостаткам этой группы электроприводов относится наличие потерь скольжения, а также необходимость компоновки этого регулирующего устройства в один агрегат вместе с двигателем и насосом.

Привод с электромагнитными муфтами скольжения (ЭМС). В приводе насосов чаще всего используются ЭМС индукторного типа (ИМС), которые являются основным элементом электропривода. Индукторная муфта скольжения (рис. 60) состоит из индуктора с обмоткой возбуждения и якоря. Обмотка возбуждения получает питание от источника постоянного или выпрямленного тока. Якорь ИМС соединен с асинхронным короткозамкнутым (или синхронным) электродвигателем, а индуктор – с механизмом (насосом). Якорь и индуктор изготавливаются из массивных отливок и поковок. Вращающий момент от двигателя к насосу передается через электромагнитное поле в зазоре между якорем и индуктором. Частота вращения насоса регулируется изменением тока возбуждения ИМС. Механические характеристики ИМС для разных значений тока возбуждения представлены на рис. 61. Характерной особенностью ИМС является наличие потерь скольжения, которые выделяются в виде тепла в якоре ИМС. Это тепло в ИМС с передающим моментом до 2 кН·м отводится обычно воздушным охлаждением, а при передаваемых моментах

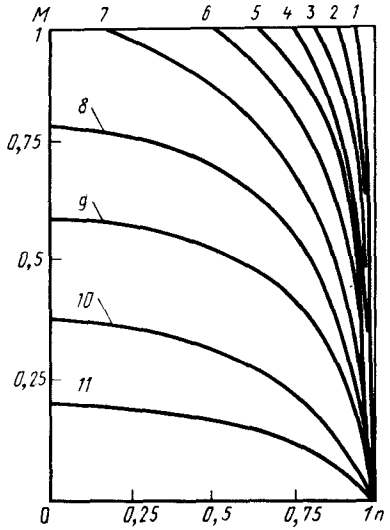


Рис. 61. Механические характеристики ИМС:

1 – при номинальном токе возбуждения; *2 – 11* – при токе возбуждения, равном 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,05 номинального значения соответственно

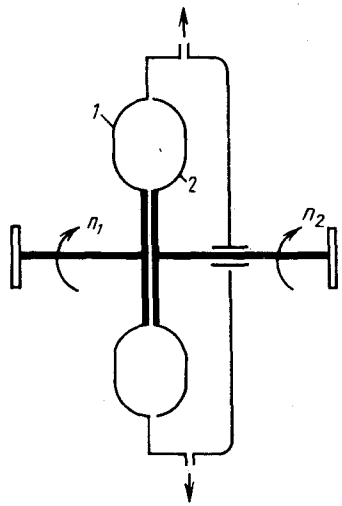


Рис. 62. Гидромуфта:

1 – ведущее колесо; *2* – ведомое колесо

больших 5 кН·м устраивается водяное охлаждение. Потери скольжения вычисляются с помощью уравнений, приведенных в § 12. При этом потери скольжения в ИМС существенно зависят от вида механической характеристики механизма. Как известно, механическая характеристика насоса зависит от его частоты вращения во второй, а в ряде случаев в 3–5-й степени. Благодаря этому обстоятельству максимальное значение мощности потерь скольжения не превышает 10–15% номинальной мощности электропривода и соответствуют 3/4 – 2/3 номинальной частоты вращения. Средние значения мощности потерь скольжения оказываются еще меньше. Это и еще сравнительно низкая стоимость ИМС делают экономически выгодным их применение в электроприводе центробежных насосов. Обычно ИМС используются в электроприводе насосных агрегатов мощностью до 250 кВт [27].

Выбор оборудования для систем с ИМС осуществляются в следующем порядке.

Определяется мощность на валу насоса при работе с номинальной подачей и соответствующим ей напором по формуле (5).

Определяется момент сопротивления насоса при номинальной загрузке согласно (42).

По найденному значению момента сопротивления из каталога [54] подбирается ИМС, вращающий момент которой равен или больше момента сопротивления насоса $M_{вр} \geqslant M_c$.

В соответствии с рекомендациями каталога [54] для возбуждения используются преобразователи тиристорные однофазные типа ПТО-230-32П. В настоящее время ПТО сняты с производства и заменены устройствами серии БУ-3509. Для возбуждения ИМС подходящим является устройство БУ-3509-22В-2У4. Номинальный ток устройства должен быть равен или больше тока возбуждения ИМС, т.е. $I_н \geqslant I_в$.

В качестве приводного электродвигателя выбирается из каталога серийный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель переменного тока соответствующей мощности (на 5–10% больше номинальной мощности насоса).

При использовании ИМС в электроприводе насосов следует иметь в виду низкое качество ИМС, изготавливаемых в настоящее время [26]. В связи с этим при подготовке ИМС к монтажу необходимо выполнить ряд операций, обеспечивающих их надежную работу [40].

Привод с гидромуфтами. Гидравлическая муфта (ГМ) состоит из двух колес: турбинного и насосного, помещенных в общую полость, заполненную машинным маслом (рис. 62). Турбинное (ведомое) колесо соединяется с насосом, а насосное (ведущее) колесо – с электродвигателем, который вращается практически с постоянной частотой вращения. Частота вращения ведомого колеса изменяется в зависимости от степени заполнения полости муфты рабочей жидкостью (маслом).

На рис. 63 показаны механические характеристики ГМ. Обращает на себя внимание наличие неустойчивой зоны работы ГМ (участок, ограниченный линиями $a-b$ и $d-c$), обусловленной скачкообразными переформированиями потока жидкости в ГМ под действием центробежных сил. По этой причине механическая характеристика насоса должна располагаться ниже зоны неустойчивой работы. Это обстоятельство следует учитывать при выборе ГМ для насоса. В процессе регулирования частоты вращения ГМ, так же как и электромагнитная муфта, работает со скольжением. Поэтому электроприводы с ГМ по своим

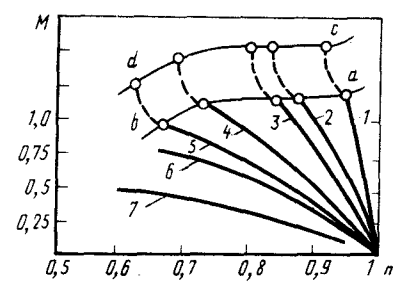


Рис. 63. Механические характеристики гидромуфты:

1 – при номинальном расходе жидкости; *2 – 7* – при пониженном расходе жидкости

энергетическим характеристикам аналогичны приводу с ЭМС или электроприводу с дополнительными сопротивлениями в цепи ротора фазного асинхронного электродвигателя. Потери скольжения в ГМ определяются по (52). Потери скольжения нагревают рабочую жидкость (масло), поэтому для отвода тепла в состав ГМ включают холодильники.

К недостаткам ГМ относится также сложность конструкции, обусловленная необходимостью подавать рабочую жидкость (масло) во вращающиеся полости насосного и турбинного колес.

Наибольшее распространение получили ГМ в электроприводе питательных насосов тепловых электростанций. Отечественная промышленность выпускает ГМ, рассчитанные на электроприводы мощностью 2000–8000 кВт с частотой вращения 3000 об/мин [44]. Поскольку габариты ГМ, так же как и ЭМС, зависят от передаваемого момента, а момент обратно пропорционален номинальной частоте вращение электропривода, применение ГМ целесообразно преимущественно в насосных агрегатах с высокими значениями частоты вращения. В этом случае ГМ получаются довольно компактными.

Электропривод с механическими вариаторами. Существуют вариаторы различных типов: лобовые, шаровые, торовые и т.д.

В насосных агрегатах используются клиноременные вариаторы с раздвижными конусами. Основными элементами вариатора являются ведущий и ведомый шкивы, а также бесконечный клиновой ремень. Каждый из шкивов состоит из пары раздвижных конусов. Когда одну пару раздвигают, другая сдвигается. При этом ремень так перемещается в конусах, что рабочий радиус одной пары уменьшается, а другой – увеличивается. За счет этого изменяется передаточное отношение вариатора и осуществляется регулирование частоты вращения насоса при неизменной частоте вращения электродвигателя.

Частота вращения ведомого шкива

$$n = n_0 \zeta R/r, \qquad (75)$$

где n_0 – постоянная частота вращения ведущего шкива; R – рабочий радиус ведущего шкива; r – то же ведомого шкива; ζ – коэффициент, учитывающий проскальзывание (до 0,97).

На рис. 64 вариатор показан в двух положениях. В нейтральном положении *I* расстояния между конусами одинаковы, $R_1 = r_1$, следовательно, $n_1 = n_0$. Когда конусы ведомого шкива раздвигаются, конусы ведущего сдвигаются, при этом рабочие радиусы изменяются: $R_2 > r_1$, а следовательно, $n_2 > n_0$. Когда конусы ведущего шкива раздвигаются и сближаются конусы ведомого шкива, то $n_2 < n_0$. Передаточное отношение таких вариаторов обеспечивает диапазон изменения частоты вращения механизма в пределах до 1:8 – 1:12. Передаваемая мощность привода с вариаторами не превышает обычно 100–200 кВт.

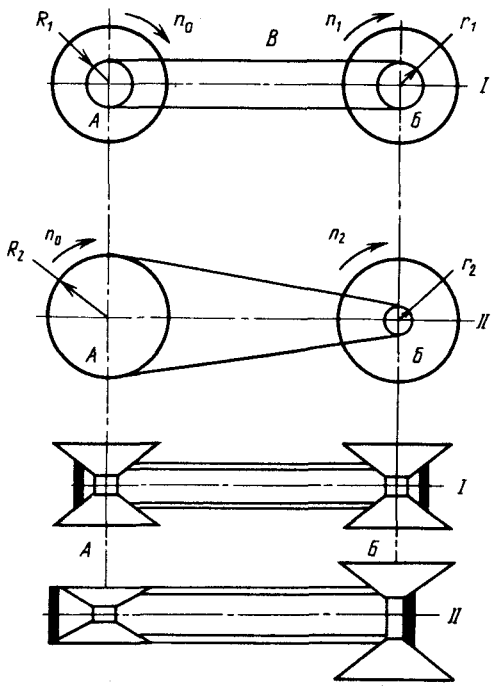


Рис. 64. Клиноременный вариатор с раздвижными конусами: *А* – ведущий шкив; *Б* – ведомый шкив; *В* – ремень

На рис. 65 показана схема вертикального насосного агрегата одной из датских фирм, оснащенного клиноременным вариатором. Мощность привода 150 кВт. Изменение расстояний между конусами шкивов осуществляется с помощью исполнительного механизма, что дает возможность автоматизировать работу электропривода. Агрегат оснащен также блоком управления, куда поступает сигнал от технологического преобразователя (давления, уровня и т.п.).

Обычно электроприводом с механическим вариатором комплектуются насосные агрегаты мощностью до 150 кВт с подачей до 1500 м^3/ч и напором до 70 м. Номинальная частота вращения электродвигателя насоса 1500–1700 об/мин. Потери мощности в вариаторах такого типа составляют 4–7 % в зависимости от мощности и глубины регулирования.

Энергетическая эффективность способов регулирования насосных агрегатов, работающих с постоянной и переменной частотой вращения, характеризуется изменением потребляемой насосом мощности в зависимости от его подачи (рис. 66). Значения мощности и подачи для удобства сравнения даны в относительных единицах. Кривые *1* и *2* относятся к насосным агрегатам, работающим с постоянной частотой вращения, регулирование осуществляется сбросом жидкости в приемный резервуар через байпас и дросселированием напорных линий соответственно. Кривая *3* относится к насосам, частота вращения которых меняется ступенчато. Кривые *4–6* характеризуют потребление мощности насосами, частота вращения которых плавно изменяется с использованием различных видов регулируемого при-

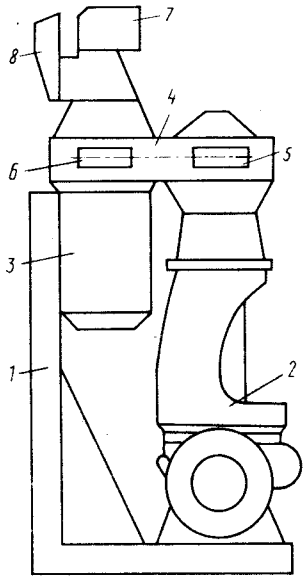


Рис. 65. Насосный агрегат с механическим вариатором:

1 – станина; *2* – насос; *3* – электродвигатель; *4* – вариатор; *5* – ведомый шкив; *6* – ведущий шкив; *7* – привод механизма управления вариатором; *8* – блок управления

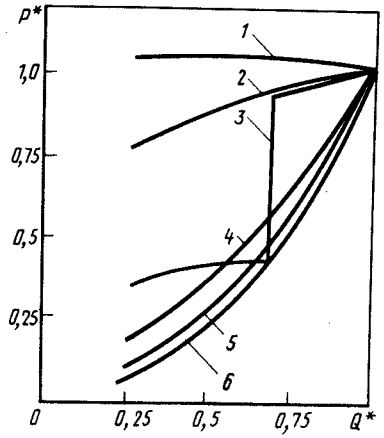


Рис. 66. Зависимость потребляемой насосом мощности от подачи при разных способах регулирования

вода: с потерями скольжения, с рекуперацией потерь скольжения и без потерь скольжения соответственно.

Представленные на рис. 66 зависимости показывают, что регулирование подачи при переменной частоте вращения осуществляется с меньшими затратами энергии, чем при постоянной.

Необходимо обратить внимание, что любой вид регулируемого электропривода содержит в своем составе то или иное устройство, преобразующее энергию (преобразователи, муфты и др.). В любом из этих устройств имеют место те или иные потери электроэнергии. Поэтому КПД любого насосного агрегата, оснащенного регулируемым электроприводом, всегда ниже, чем нерегулируемого, разумеется, при прочих равных условиях.

Энергетическая эффективность регулируемого привода обеспечивается главным образом тем, что с его помощью поддерживается более выгодный с энергетической точки зрения технологический процесс перекачки жидкости насосными установками. Необходимый режим работы насосных установок создается с помощью соответствующих систем управления. Современные системы управления режимами работы насосных установок различного назначения, содержащих в своем

составе автоматизированный регулируемый электропривод, рассмотрены в гл. 6. Рекомендации по выбору вида регулируемого электропривода для различных условий их применения в САУ насосных установок даны в § 21.

Глава 6

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

17. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПОРА В СИСТЕМЕ ПОДАЧИ ЖИДКОСТИ

Для значительной группы насосных установок экономичный режим обеспечивается стабилизацией напора в системе подачи жидкости. К таким установкам относятся насосные станции II и III подъемов промышленных и городских водопроводов, насосные станции подкачки, станции закрытых систем орошения и им подобные. Необходимость стабилизации напора в сети этих станций обусловлена переменным характером режима водопотребления. Вероятностный характер водопотребления требует непрерывных изменений в режиме работы насосной установки. Изменения должны выполняться так, чтобы поддерживались требуемые значения технологических параметров (подач, напоров) в системе в целом и одновременно обеспечивалось минимально возможное энергопотребление насосной установки.

Эта задача решается системой автоматического управления (САУ) насосной установки, стабилизирующей напор в сети по заданному значению. Стабилизировать напор во всех точках сложной разветвленной сети практически невозможно. Поэтому речь может идти о стабилизации напоров в некоторых отдельных точках сети, называемых диктующими. В качестве диктующих выбирают точки, обеспечение нормального напора в которых гарантирует поддержание таких же или более высоких напоров в остальных точках сети. Как правило, в качестве диктующей выбирается точка, наиболее удаленная в гидравлическом отношении, расположенная на наиболее высоких отметках.

Местоположение диктующих точек определяется гидравлическим расчетом сети или опытным путем по результатам длительных эксплуатационных наблюдений. При существенном перераспределении потоков воды в сети, вызванное локальными изменениями водопотребления различными группами потребителей, диктующая точка может менять свое местоположение. При работе сети совместно с насосными станциями, близко выдвинутыми к потребителям, например станциями подкачки, диктующая точка может располагаться на напорном коллекторе станции. Основным параметром регулирования в системах, стабилизирующих напор в сети, является напор в диктующей точке (точках).

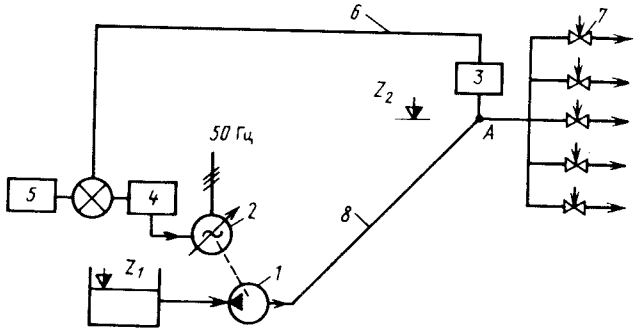


Рис. 67. Принципиальная схема стабилизации напора в диктующей точке водопроводной сети:

1 – центробежный насос; *2* – регулируемый электропривод; *3* – датчик давления; *4* – ПИ-регулятор; *5* – задающее устройство; *6* – канал связи; *7* – водоразборные устройства; *8* – водовод

Стабилизация напора в этой точке обеспечивает необходимый минимум напора в сети и снижает затраты электроэнергии на подачу воды.

Рассмотрим процесс стабилизации напора в диктующей точке сети на примере простой неразветвленной сети. Предположим что на станции работает один насос (рис. 67).

Для нормального водоснабжения потребителей в диктующей точке A должен поддерживаться так называемый свободный напор $H_{св}$. Точка A расположена на отметке Z_2 выше уровня воды в резервуаре. Потери напоров в водоводе зависят от значений расхода во второй степени. Следовательно, насос, чтобы поднять воду с отметки Z_1 на отметку Z_2, преодолеть гидравлическое сопротивление и обеспечить заданный свободный напор, должен развить напор

$$H = (Z_2 - Z_1) + H_{св} + SQ^2. \qquad (76)$$

Графически зависимость требуемого напора на выходе из насосной станции от расхода изображена кривой *1* на рис. 68. Если эта зависимость соблюдается, в диктующей точке поддерживается стабильный требуемый напор $H_{св}$:

$$H_A = (Z_2 - Z_1) + H_{св}. \qquad (77)$$

Однако этот напор при работе насоса с постоянной частотой вращения поддерживается только в режиме максимальной подачи. В остальное время, когда насос работает с пониженной подачей, система работает с повышенным напором. Чтобы обеспечить работу насосной установки без превышения напора при всех значениях водопотребления, разработана САУ, оснащенная регулируемым электроприводом [10].

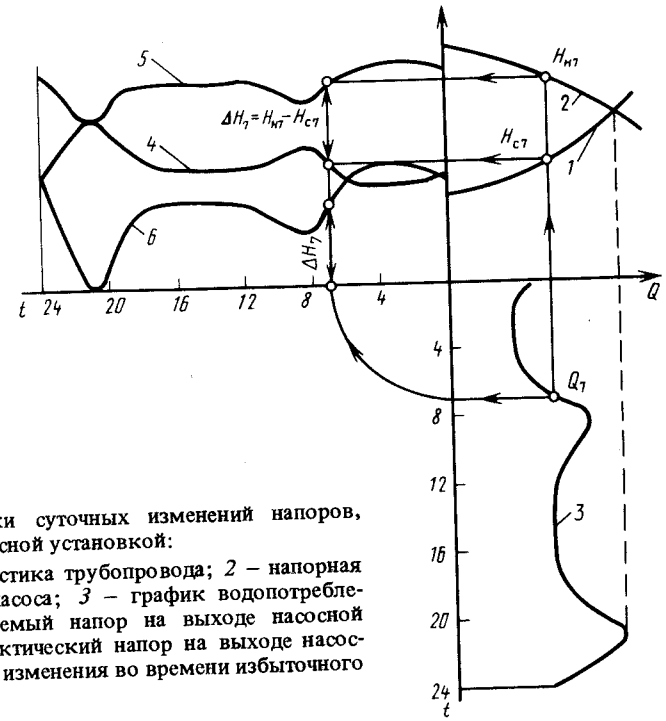


Рис. 68. Графики суточных изменений напоров, развиваемых насосной установкой:

1 – характеристика трубопровода; *2* – напорная характеристика насоса; *3* – график водопотребления; *4* – требуемый напор на выходе насосной станции; *5* – фактический напор на выходе насосной станции; *6* – изменения во времени избыточного напора

САУ состоит из насосного агрегата, оснащенного регулируемым электроприводом, преобразователя давления, пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора), задающего устройства – датчика значения регулируемого параметра (напора) и каналов связи между преобразователем и регулятором (см. рис. 67). Сигналы от преобразователя давления, установленного в диктующей точке сети, и от задающего устройства поступают в ПИ-регулятор, где они сравниваются и после соответствующей обработки передаются в систему управления регулируемого электропривода насосного агрегата. Если напор в диктующей точке оказывается выше заданного, в привод поступает команда на уменьшение частоты вращения электродвигателя насоса, и наоборот. При соответствии напора в диктующей точке заданному значению изменение частоты вращения насоса прекращается.

Процесс регулирования идет следующим образом. В некоторый момент времени t_1 насос работает с частотой вращения n_1, подачей Q_1 и напором H_1 (рис. 69). Этому режиму соответствуют потери напора $h_{дин\,1}$. Тогда напор в диктующей точке A равен $H_{A\,1} = H_1 - h_{дин\,1}$. Будем считать, что этот напор в начале процесса соответствует заданному значению напора в диктующей точке $H_{зад}$.

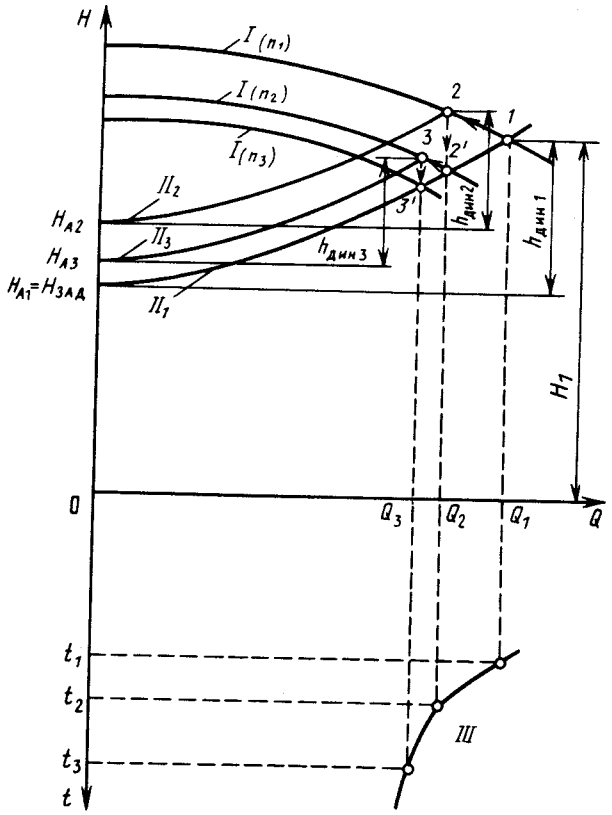


Рис. 69. Процесс стабилизации напора в диктующей точке A:

$I_{(n1)}$, $I_{(n2)}$, $I_{(n3)}$ – характеристики регулируемого насоса при n_1, n_2, n_3 соответственно; II_1, II_2, II_3 – характеристики водовода в разные моменты времени t_1, t_2, t_3 соответственно; III – график водопотребления

Предположим, что в следующий момент времени t_2 потребитель, закрывая один из водоразборных кранов, уменьшает отбор воды из системы. Уменьшенной подаче насоса Q_2 соответствуют возросший напор H_2 и пониженные потери напора $h_{дин\,2}$. Вследствие происшедших изменений в режиме работы системы напор в точке A становится равным $H_{A2} = H_2 - h_{дин\,2}$. Как видно из рис. 69, H_{A2} больше заданного значения напора $H_{зад} = H_{A1}$. Сигнал преобразователя давления, установленного в точке A, сравнивается с сигналом задающего устройства. Преобразованный сигнал рассогласования поступает в систему управления регулирующего привода. В результате частота вращения уменьшается до тех пор, пока напор в диктующей точке не примет

опять заданного значения $H_{зад} = H_{A1}$. При изменении частоты вращения напорная характеристика займет положение, соответствующее частоте вращения n_2, а на коллекторе насосной станции установится новое значение напора H_2'. Таким образом, рабочая точка насоса на графике последовательно занимает положение *1*, затем *2* и, наконец, *2'* (рис. 69).

Если вследствие закрытия другого водоразборного крана произойдет дальнейшее уменьшение водопотребления до значения Q_3, рабочая точка насоса последовательно переместится из точки *2'* в точку *3*, а затем *3'*. В этом случае в результате действия САУ напорная характеристика насоса перемещается в положение, соответствующее частоте вращения n_3.

Система управления обычно настраивается так, чтобы изменения частоты вращения происходили при малых отклонениях значений напора в диктующей точке от заданных значений. По этой причине криволинейные треугольники *1, 2, 2'* и *2', 3, 3'* на графике имеют небольшие размеры. Вследствие этого рабочая точка насоса практически плавно перемещается по характеристике трубопровода и, следовательно, система работает без превышения напоров, т.е. в экономичном режиме.

Процесс стабилизации напора в диктующей точке сети при работе нескольких насосных агрегатов происходит сложнее. Если все работающие агрегаты оборудованы регулируемым приводом, процесс регулирования идет аналогично описанному с тем отличием, что команда об изменении частоты вращения поступает одновременно на все работающие насосные агрегаты. Тогда частота вращения работающих агрегатов изменяется синхронно, и вследствие этого одновременно и единообразно изменяют свое положение напорные характеристики всех насосов. Благодаря этому рабочие параметры этих насосов (подача, напор, КПД и др.) изменяются одинаково и, следовательно, распределение нагрузок между работающими насосными агрегатами происходит равномерно.

Более сложно решается задача в тех случаях, когда работают одновременно регулируемые и нерегулируемые насосные агрегаты. В этом случае процесс регулирования осуществляется изменением частоты вращения регулируемых агрегатов и периодическим изменением числа работающих нерегулируемых насосов.

На рис. 70 представлен график совместной работы сети и двух насосов: регулируемого и нерегулируемого. Как и в предыдущем случае, при изменении водопотребления и увеличении напора в диктующей точке частота вращения регулируемого насоса уменьшается, а при снижении напора возрастает. Но при этом характеристика регулируемого насоса изменяет свое положение, а нерегулируемого остается неизменной. По этой причине, хотя насосы работают с одним и тем же напором, подача у них разная.

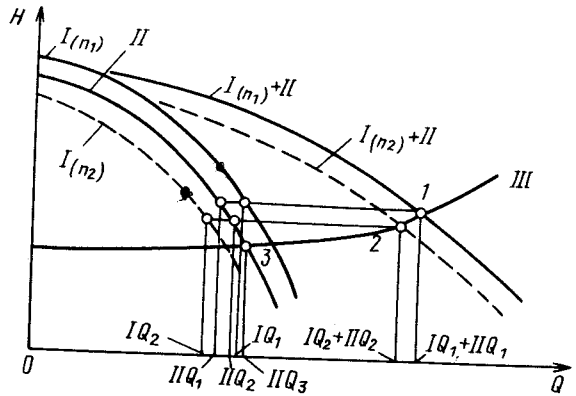


Рис. 70. График совместной работы сети и насосов (регулируемого и нерегулируемого):

$I_{(n1)}$ – напорная характеристика регулируемого насоса при частоте вращения n_1; $I_{(n2)}$ – то же при n_2; II – напорная характеристика нерегулируемого насоса; $I_{(n1)} + II$, $I_{(n2)} + II$ – суммарные напорные характеристики обоих насосов при n_1 и n_2 соответственно; III – характеристика трубопровода

При уменьшении частоты вращения регулируемый насос работает с меньшей подачей, а подача нерегулируемого увеличивается. Другие рабочие параметры регулируемого и нерегулируемого насосных агрегатов (КПД, мощности и т.д.) тоже различаются. В случае существенного изменения водопотребления наступает момент, когда подача регулируемого насоса снижается до нуля, а подача нерегулируемого насоса увеличивается до некоторого значения IIQ_3 (точка *3*, рис. 70). В это время напор нерегулируемого насоса становится больше, чем регулируемого. Обратный клапан регулируемого насоса закрывается, а если он отсутствует, вода идет через насос в обратном направлении. Ввиду бессмысленности такого режима САУ в этот момент времени отключает нерегулируемый насос и форсирует частоту вращения регулируемого насоса до максимального значения. При дальнейшем уменьшении водопотребления процесс регулирования осуществляется только изменением частоты вращения регулируемого насоса.

Если же регулируемый насос вследствие увеличения водопотребления выйдет на максимально возможную частоту вращения и, несмотря на это, не сможет обеспечить подачу воды в требуемом количестве и напор на выходе насосной станции начнет резко снижаться, САУ должна дать импульс на включение нерегулируемого насоса и убавить частоту вращения регулируемого насоса до нужного значения.

Следует иметь в виду, что процесс изменения водопотребления не всегда идет монотонно. Часто при достижении граничного значения подачи Q_3 процесс может остановиться и пойти в обратную сторону. В таких

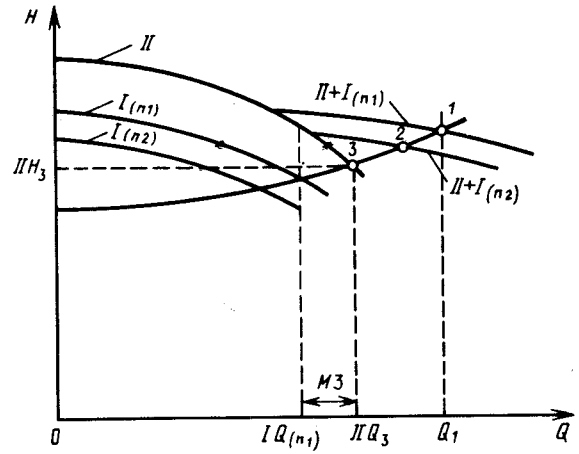


Рис. 71. Образование мертвых зон (*МЗ*) в процессе регулирования насосной установки:

$I_{(n1)}$ – напорная характеристика регулируемого насоса при частоте вращения n_1; $I_{(n2)}$ – то же при n_2; II – то же нерегулируемого насоса; III – характеристика трубопровода

случаях возникает ситуация, в которой нерегулируемый насос будет многократно включаться и отключаться. Во избежание таких явлений САУ должна содержать блокировочное устройство, позволяющее отключать или включать нерегулируемый насос только при наличии устойчивой тенденции изменения водопотребления. В ряде случаев, например если водопотребление длительное время колеблется около граничного значения Q_3, целесообразно оснащение обоих насосов регулируемыми электроприводами с тем, чтобы при этом режиме они оба работали с пониженной частотой вращения.

В случае установки на насосной станции разнотипных насосов во избежание образования так называемых мертвых зон регулируемым электроприводом целесообразно оснащать наиболее крупные насосы с наиболее пологой характеристикой [40]. Мертвая зона возникает если регулируемым электроприводом оборудуется насос, напорная характеристика которого лежит ниже характеристики нерегулируемого насоса. В этих условиях при достижении граничного значения подачи Q_3 отключать нерегулируемый насос нельзя, поскольку регулируемый насос, работая даже с максимальной частотой вращения, не обеспечит нужную подачу $I(Q_{n1}) < IIQ_3$. В то же время оказывать влияние на процесс регулирования он уже не может, поскольку развиваемый им напор меньше напора IIH_3 нерегулируемого насоса (рис. 71). Если же регулируемым электроприводом оборудуется более крупный насос, САУ может дать импульс на отключение нерегулируемого насоса с не-

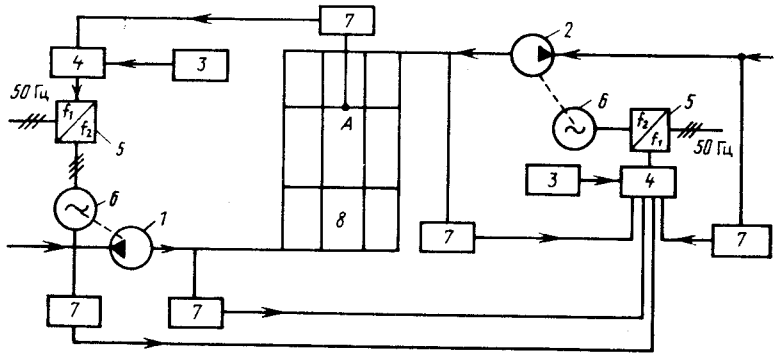


Рис. 72. Автоматизированная система подачи воды в общую сеть двумя насосными станциями

которым упреждением, пока водопотребление еще не снизилось до граничного значения водоподачи Q_3. Импульс на включение нерегулируемого насоса может быть дан также заблаговременно, пока водопотребление не увеличится до граничного значения Q_3. Благодаря этому ограничивается работа насосного агрегата в зоне низких КПД, что улучшает процесс регулирования.

Задача стабилизации напора еще больше осложняется, если вода в сеть подается несколькими насосными установками, например двумя. Для обеспечения оптимального распределения подач между насосными установками и минимального энергопотребления в системе следует поддерживать определенное соотношение между технологическими параметрами обеих насосных установок.

Как показано в [9, 11], минимум энергозатрат обеспечивается при соблюдении следующего соотношения:

$$(H_1 - h_1 \cdot 1/3) - (H_2 - h_2 \cdot 1/3) = 2/3(z_1 - z_2), \qquad (78)$$

где H_1, H_2 — напор на выходе из первой и второй насосных установок соответственно; h_1, h_2 — напор на входе тех же установок; z_1, z_2 — геодезические отметки осей насосов тех же установок.

Приведенное соотношение может быть преобразовано для систем с бóльшим количеством насосных станций, работающих в общую сеть. На рис. 72 представлена САУ режимами работы двух насосных установок, реализующая соотношение (78) [11]. Особо следует подчеркнуть, что соблюдение соотношения (78) обеспечивает минимизацию энергетических затрат в системе в целом. При этом КПД отдельных элементов системы, например насосных агрегатов, могут быть меньше, чем их максимальные значения.

САУ состоит (рис. 72) из регулируемых насосных агрегатов *1* и *2*, общей водопроводной сети *8*, в диктующей точке *A* которой установлен преобразователь давления *7*. Аналогичные преобразователи установлены на входе и выходе обоих насосов. Электрический сигнал от преобразователя давления *7*, пропорциональный напору в точке *A*, поступает на вход ПИ-регулятора *4* насосного агрегата *1*. В соответствии с изменениями напора в точке *A*, вызванными колебаниями водопотребления в сети, с помощью частотного преобразователя *5* изменяется частота вращения асинхронного электродвигателя *6* насосного агрегата *1*. При этом изменяется напор на его входе и выходе. Сигналы, пропорциональные этим напорам, поступают в ПИ-регулятор *4* насосного агрегата *2*. В этот же регулятор поступают сигналы от преобразователей давления, установленных на входе и выходе агрегата *2*, а также сигнал, пропорциональный разности геодезических отметок насосов *1* и *2* и от задатчика *3*. В ПИ-регуляторе *4* поступившие сигналы обрабатываются, и в результате выдается сигнал на изменение частоты вращения асинхронного электродвигателя *6* насосного агрегата *2*. Частота вращения агрегата *2* подстраивается с помощью частотного преобразователя *5* к частоте вращения агрегата *1* таким образом, чтобы удовлетворялось соотношение (78). При этом достигается экономия электроэнергии за счет правильного распределения нагрузки между насосными станциями и обеспечения минимума затрат энергии для данной системы подачи жидкости в данном режиме работы.

18. СТАБИЛИЗАЦИЯ УРОВНЯ В РЕЗЕРВУАРАХ

Работа канализационных и им подобных насосных установок с циклическим регулированием работы насосных агрегатов и переменным уровнем жидкости в приемных резервуарах связана с потерями электроэнергии (см. § 8). Отсюда возникает необходимость стабилизации уровня жидкости на высоких отметках.

В современных отечественных и зарубежных системах регулирование режимов работы насосных установок осуществляется посредством автоматизированного регулируемого электропривода. В таких системах регулируемым параметром является уровень жидкости в резервуаре, значение которого выбирается исходя из следующих соображений. С энергетической точки зрения уровень следует поддерживать на самой высокой отметке, так как это уменьшает статическую высоту подъема жидкости. Однако для того чтобы жидкость не выливалась из резервуара, уровень должен быть ниже отметки пола помещения резервуаров или отметки низа переливной трубы на 30 – 50 см. Это расстояние позволяет своевременно включить резервный насосный агрегат при выходе из строя системы регулирования. Одновременно должны быть приняты меры, исключающие опорожнение резервуара до такой степени, чтобы не возник режим кавитации насоса. Обычно заданный уровень поддерживается с точностью ± 50 мм. Современное развитие техники позволяет поддерживать заданный уро-

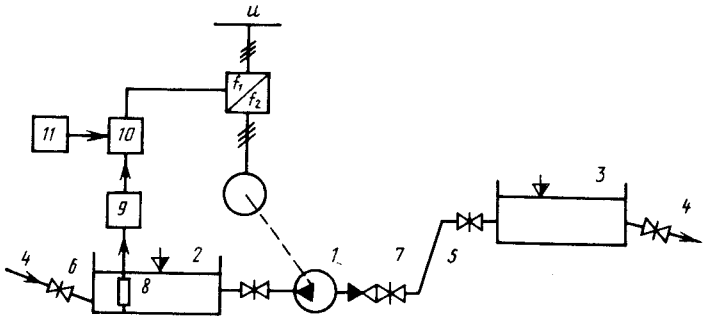


Рис. 73. Система транспорта жидкости с резервуарами:

1 – насос; *2* – приемный резервуар; *3* – напорный резервуар; *4* – самотечные водоводы; *5* – напорный водовод; *6* – щитовой затвор; *7* – напорная задвижка; *8* – датчик уровня; *9* – преобразователь датчика уровня; *10* – регулятор; *11* – задатчик

вень и с бóльшей точностью – до ± 10 мм. Однако такая высокая точность влечет за собой непрерывное изменение частоты вращения электродвигателя насосного агрегата и вследствие этого способствует возникновению знакопеременных нагрузок на отдельные элементы насосного агрегата (эластичные муфты, соединяющие насос с двигателем и др.), ведущих к преждевременному их износу. Поэтому в ряде случаев приходится устанавливать повышенную зону нечувствительности системы регулирования, что понижает точность стабилизации уровня (до ± 100 мм).

Процесс стабилизации уровня в приемном резервуаре рассмотрим на примере системы, изображенной на рис. 73. Согласно [47] насосная станция, работающая совместно с резервуаром, как объект автоматического регулирования не обладает свойством самовыравнивания.

Статическая ошибка регулирования уровня при использовании регулятора, реализующего пропорциональный закон регулирования, достигает 1,5 м. При использовании интегрирующего регулятора возникают незатухающие колебания уровня до 1 м, что соизмеримо с геометрическими размерами резервуара. В [47] показано, что качество регулирования может быть существенно улучшено за счет применения регулятора, реализующего пропорционально-интегральный закон регулирования, т.е. ПИ-регулятора. Разработанная во ВНИИВОДГЕО схема стабилизации уровня [26, 47] содержит: уровнемер с аналоговым электрическим сигналом, пропорциональным уровню, ПИ-регулятор, насосный агрегат с регулируемым приводом (рис. 73). Система реализована на нескольких канализационных станциях г. Москвы. В качестве уровнемера использованы в одних случаях ультразвуковые акустические приборы ЭХО-3, в других – система измерения уровня в резервуаре *1* с использованием воздушного колокола *2*, дифференциального

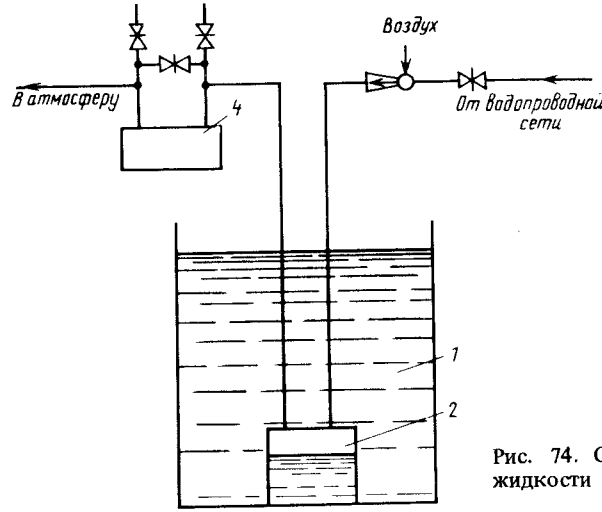


Рис. 74. Схема измерения уровня жидкости в резервуаре

манометра *4* и эжектора *3* (рис. 74). Воздушный колокол представляет собой отрезок трубы, заваренный сверху, с прорезями для поступления жидкости в его полость. В верхней части трубы вварены два штуцера, к которым подведены две импульсные трубки. По одной из них подается водо-воздушная смесь от эжектора. Вода к эжектору подается из системы водоснабжения насосной станции под давлением 0,1 – 0,2 МПа. Воздух, подаваемый эжектором, обеспечивает компенсацию растворяющегося в сточной воде кислорода, препятствует засорению импульсных трубок и внутренней полости колокола. По второй импульсной трубке через воздушную подушку передается давление столба жидкости в одну из камер дифференциального манометра. Вторая камера дифференциального манометра сообщается с атмосферой. Это давление пропорционально уровню жидкости в резервуаре.

В качестве преобразователя давления в электрический сигнал используется дифференциальный манометр любого типа (например, ДМЭУ) с выходом 0–5 мА, прямо пропорциональным перепаду давления. Опыт эксплуатации показал, что в условиях канализационных насосных станций, перекачивающих загрязненные воды, эта система измерения уровня более надежна, чем акустический прибор ЭХО-3.

В качестве ПИ-регуляторов могут быть использованы блоки регулирующие аналоговые с непрерывным выходным сигналом 0–5 мА, осуществляющие алгебраическое суммирование и масштабирование унифицированных сигналов постоянного тока, например Р-17 системы "Каскад 2" или РБА-П системы АКЭСР (см. приложение 9).

В качестве регулируемого электропривода в системе предусматривается использование одного из типов электропривода, описанных

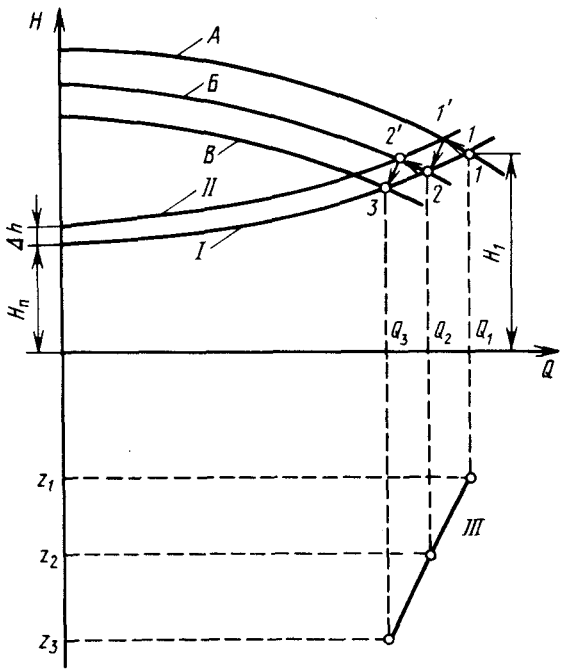


Рис. 75. Процесс стабилизации уровня жидкости в резервуаре:

А – напорная характеристика насоса при n_1; *Б* – то же при n_2; *В* – то же при n_3; *I* – характеристика трубопровода при заданном уровне в резервуаре; *II* – то же при пониженном уровне в резервуаре; *III* – график изменения притока

в гл. 5, в том числе: индукторных муфт скольжения (ИМС) с питанием возбуждения от тиристорных блоков БУ-3509 и им подобных; частотных преобразователей серии ПЧТ, ПЧР-2, *SAMI* (фирма Strømberg) и других типов; электроприводов по схеме АВК на базе преобразователей ТДП-2 и станций управления ШДУ; электроприводов на базе вентильных электродвигателей с преобразователями ПЧВН, ПЧВС и др.

Процесс регулирования в системе водоотведения следующий (рис. 75). В некоторый момент времени t_1 насос работает с частотой вращения n_1 и обеспечивает подачу Q_1, напор H_1. Этому режиму соответствует уровень жидкости в резервуаре h_1 и приток q_1. Предположим, что этот уровень соответствует заданному, т.е. в этот момент времени $Q_1 = q_1$, а $h_1 = h_{зад}$. Предположим, что в следующий момент времени t_2 приток изменится в сторону уменьшения и станет равным q_2. Вследствие несоответствия притока и откачки $q_2 > Q_1$ уровень воды в резервуаре снизится на некоторое значение Δh. Следовательно, возрастает статическая составляющая напора и характеристика трубопровода займет положение *II*. При этом подача насоса тоже несколько уменьшится до точки *1'*. Однако это не компенсирует уменьшение притока. Подача насоса за счет криволинейности характеристик насоса и трубопроводов снижается в гораздо меньшей степени, чем уменьшится приток. При этом произойдет рассогласование задающего сигнала системы регулирования и сигнала, поступающего от преобразователя уровня. В результате этого регулятор выдает обработанный по ПИ-закону импульс в систему управления регулируемого электропривода, снижающий частоту вращения электродвигателя насосного агрегата. В результате характеристика насоса переместится в положение *Б*, соответствующее частоте вращения n_2, новому значению притока q_2 и заданному уровню сточной жидкости в резервуаре (точка *2*). В случае дальнейшего уменьшения притока на то же значение характеристика трубопровода опять займет положение *II*, рабочая точка насоса переместится в точку *2'*. Система регулирования сработает аналогичным образом и характеристика насоса переместится в положение *В*, а рабочая точка – в положение *3*. Ввиду высокой чувствительности системы регулирования ее реагирование происходит при малых отклонениях уровня от заданного значения и вследствие этого криволинейные треугольники *1, 1', 2* и *2, 2', 3* имеют малые размеры. Поэтому рабочая точка практически плавно перемещается по характеристике водовода. При увеличении притока система регулирования действует аналогично, но в противоположном направлении.

В результате процесс регулирования поддерживает заданный уровень жидкости в приемном резервуаре, обеспечивая равенство подачи насоса и притока $Q = q$ и стабильность заданного уровня. Таким образом, обеспечивается работа насосной установки в экономичном режиме, без превышения статических напоров. Опыт применения систем стабилизации в канализационных насосных установках показал их работоспособность и эффективность [3, 26].

Стабилизация уровня жидкости в напорных резервуарах несколько отличается от стабилизации уровня в приемных резервуарах. Разница заключается в том, что при уменьшении водоразбора уровень в резервуарах не снижается, а поднимается, но и в этом случае статическая составляющая напора увеличивается, а частота вращения электродвигателя насоса в результате действия системы регулирования уменьшается. При увеличении водопотребления, наоборот, уровень жидкости в резервуаре падает, статическая составляющая напора уменьшается, а частота вращения увеличивается. Основная цель системы стабилизации уровня жидкости в напорном резервуаре заключается в поддержании уровня на заданной минимальной отметке.

В системах стабилизации уровня, так же как и в системах стабилизации напоров в сети (см. § 17), необходимо предусматривать включение дополнительных нерегулируемых насосов при существенных уве-

личениях притока или водопотребления и отключение их при уменьшении.

Регулируемым приводом должны оснащаться наиболее крупные насосные агрегаты с наиболее пологой характеристикой. В случае использования однотипных насосов во избежании образования мертвых зон рабочие колеса нерегулируемых насосов должны иметь диаметры, меньшие регулируемых. При равенстве диаметров и работе регулируемого насоса в режиме максимальных подач с повышенной частотой вращения (в случае применения частотного электропривода) он должен быть укомплектован двигателем повышенной мощности в соответствии с рекомендациями (см. § 15).

В САУ насосной установки, откачивающей жидкость из резервуара, следует предусматривать блокировку, исключающую работу насоса при недопустимо низких уровнях жидкости в резервуаре, что может иметь место при минимальных притоках сточных вод.

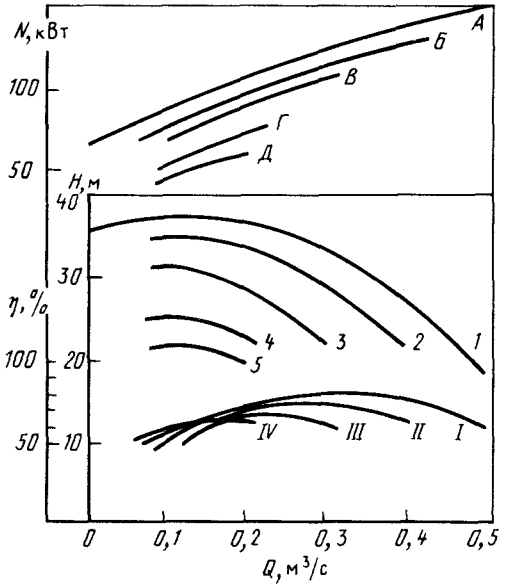
19. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

Несмотря на явные преимущества, регулируемый электропривод еще не получил широкого распространения в насосных установках. В настоящее время сложились условия, требующие его более широкого использования. Бурное развитие полупроводниковой техники позволило создать на базе статических преобразователей надежные и сравнительно недорогие регулируемые электроприводы. Кроме того, мировой энергетический кризис наглядно продемонстрировал подлинную ценность энергетических ресурсов и стимулировал меры по их рациональному расходованию. В результате этого расширились работы по исследованию, разработке и созданию насосных установок, оснащенных автоматизированным регулируемым электроприводом. Ниже приводится описание некоторых, наиболее характерных установок.

Водопроводная насосная станция подкачки с регулируемым приводом на основе ИМС. Эта установка примечательна тем, что на ней впервые в практике отечественного водоснабжения был применен регулируемый электропривод. Номинальные параметры регулируемого насосного агрегата: подача 0,35 м^3/с, напор 30 м, мощность 155 кВт, частота вращения 980 об/мин, вращающий момент ИМС – 1,6 кН·м. Станция работает с 5–6 до 23–24 часов. В работе находится 1–2 насосных агрегата. Характерной особенностью станции является длинный (около 1 км) всасывающий водовод диаметром 600 мм и два коротких (до 100 м) напорных водовода диаметром 600 и 700 мм. Благодаря этой особенности режим работы станции характеризуется сравнительно большими потерями во всасывающих линиях станции и незначительными потерями в напорных коммуникациях. По этим причинам для поддержания требуемого напора в районе водоснабжения, и

Рис. 76. Рабочие характеристики регулируемого насоса:

1 – напорная характеристика насоса при n = 980 об/мин; *2* – то же при 916 об/мин; *3* – то же при 875 об/мин; *4* – то же при 800 об/мин; *5* – то же при 750 об/мин; *А* – характеристика потребляемой мощности при n = 980 об/мин; *Б* – то же при 916 об/мин; *В* – то же при 875 об/мин; *Г* – то же при 800 об/мин; *Д* – то же при 750 об/мин; *I* – характеристика КПД при n = = 980 об/мин; *II* – то же при 916 об/мин; *III* – то же при 875 об/мин; *IV* – то же при 800 об/мин



в том числе в диктующей точке сети, достаточно поддерживать на напорном коллекторе установки стабильный напор 30 м. В периоды малого водоразбора напор поднимается до 43 м, что ведет к нерациональным потерям электроэнергии. Установка ИМС позволила стабилизировать напор на коллекторе насосной станции и сэкономить 225 тыс.кВт·ч в год, т.е. 15% общего энергопотребления. Ниже приводятся некоторые наиболее интересные результаты, полученные при испытаниях и в ходе эксплуатации этой установки. На рис. 76 представлены характеристики регулируемого насоса при разных значениях частоты вращения (от 980 до 750 об/мин).

Зависимость КПД насосного агрегата в целом и отдельных его элементов от подачи представлена на рис. 77, *а* и *б* приведены зависимости потребляемой мощности от подачи насоса. Совместное рассмотрение этих зависимостей показывает, что, несмотря на ухудшение КПД насосного агрегата из-за наличия потерь скольжения в ИМС, потребление электроэнергии при регулировании частоты вращения оказывается ниже, чем при работе насоса с постоянной частотой вращения.

Зависимость потерь скольжения в ИМС от частоты вращения насоса и механические характеристики насоса представлены на рис. 38 и 78.

На рис. 79 показана суточная диаграмма напоров в диктующей точке сети, расположенной на расстоянии 1-5–2 км от насосной станции. В этот период времени на напорном коллекторе насосной станции поддерживался стабильный напор, равный 30 м, за исключением промежутка времени от 21 до 24 м, когда напор в отдельные моменты вре-

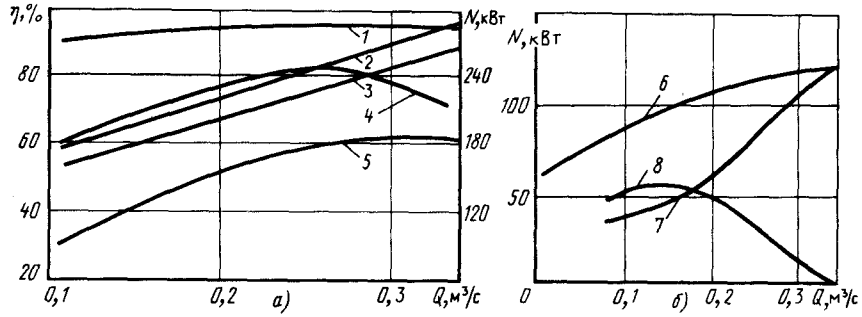


Рис. 77. Зависимость КПД (*а*) и потребляемой мощности насоса (*б*) от подачи:
1 – КПД электродвигателя; *2* – КПД ИМС; *3* – КПД электропривода; *4* – КПД насоса; *5* – КПД агрегата; *6* – потребляемая мощность при дросселировании; *7* – то же при регулировании частоты вращения; *8* – экономия мощности

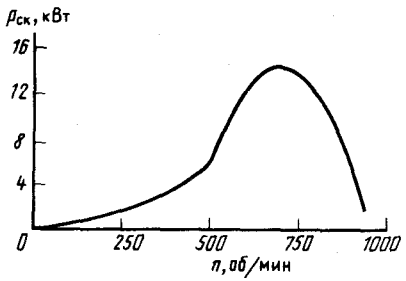


Рис. 78. Зависимость потерь скольжения в ИМС от частоты вращения

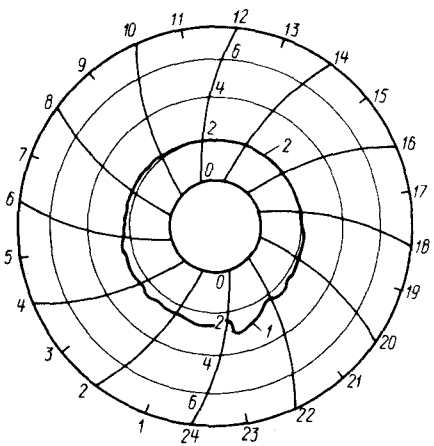


Рис. 79. Суточная диаграмма напоров в диктующей точке сети:
1 – регулируемый агрегат не работает; *2* – регулируемый агрегат работает

мени поднимался до 38 м. Соответственно в диктующей точке напор был 21–22 м (участок диаграммы *2*), а в период от 21 до 24 поднимался до 30 м (участок диаграммы *1*), т.е. когда установка работала без регулирования, так как в это время регулируемый агрегат был отключен из-за возникновения мертвой зоны (см. § 18).

Результаты испытаний и год опытной эксплуатации описанной установки показали, что электромагнитные муфты скольжения индукторного типа при условии изготовления их в соответствии с техническими условиями являются простым и надежным средством регулирования

насосных агрегатов систем водоснабжения мощностью до 220 кВт и, несмотря на потери скольжения, при определенных режимах работы насосных установок обеспечивают значительную экономию электроэнергии (до 15–20% общего энергопотребления).

Канализационная насосная станция перекачки с регулируемым электроприводом на основе ИМС. Целесообразность применения САУ с регулируемым электроприводом в канализационных насосных станциях с учетом существующего у нас в стране соотношения цен на оборудование и электроэнергию и других факторов обоснована в работах ВНИИВОДГЕО [22, 40]. Экспериментальная проверка этих предположений была осуществлена на Ивановской канализационной насосной станции г. Москвы [26]. На этой станции два установленных насосных агрегата из шести были оснащены ИМС, изготавливаемыми серийно [54]. Номинальные параметры агрегатов: подача 800 м³/ч (0,22 м³/с), напор 33 м (0,33 МПа), мощность 160 кВт, частота вращения 960 об/мин, вращающий момент ИМС 1,60 кН·м (160 кгс·м).

Регулирование режима работы установки без регулируемого электропривода осуществлялось периодическим включением-отключением насосных агрегатов. Число включений составляло 30–40 в сутки, а число работающих агрегатов в зависимости от притока изменялось от 1 до 3.

Принципиальная схема САУ режима работы насосной установки приведена на рис. 80. Система автоматического регулирования изменяет частоту вращения одного или двух регулируемых агрегатов и общее число работающих агрегатов в соответствии с изменением притока. Частота вращения изменяется по сигналу отклонения, формирующемуся при выходе уровня из заданных пределов. Сигнал отклонения, обработанный по ПИ-закону, поступает на вход системы импульсно-фазного управления тиристорного возбудителя ИМС. Тем самым регулируется ее ток возбуждения и соответственно частота вращения электродвигателя насоса.

При существенных изменениях притока, когда изменение частоты вращения регулируемого насоса не обеспечивает требуемого изменения подачи насосной установки, возникает необходимость в изменении общего числа работающих на станции агрегатов. Для этого служит блок взаимодействия регулируемых и нерегулируемых агрегатов. Блок отключает один из нерегулируемых агрегатов и форсирует возбуждение ИМС до максимального значения тока (5 А) в тот момент времени, когда частота вращения регулируемого насоса становится настолько малой, что его обратный затвор закрывается и насос прекращает откачку. Если же частота вращения регулируемого насоса достигает максимального значения, а приток продолжает увеличиваться и установка не справляется с откачкой сточных вод из резервуара, блок включает дополнительно один из нерегулируемых агрегатов и уменьшает возбуждение ИМС до минимума.

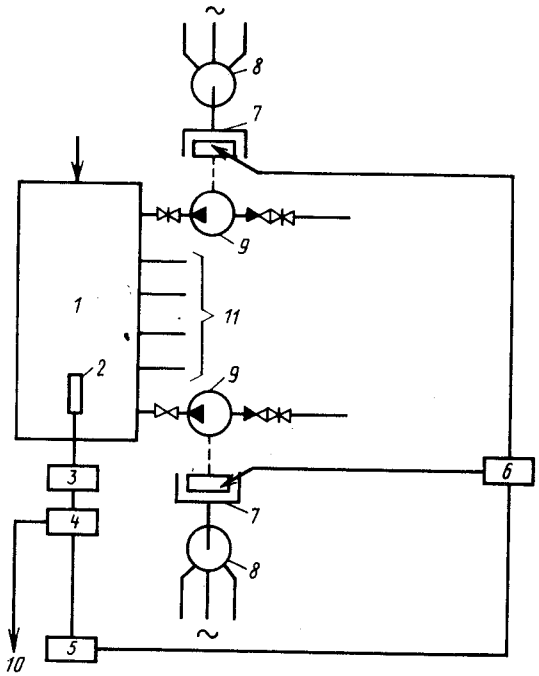


Рис. 80. Регулируемая канализационная насосная установка:

1 – приемный резервуар; *2* – преобразователь уровня; *3* – ПИ-регулятор; *4* – блок взаимодействия регулируемых и нерегулируемых агрегатов; *5* – тиристорный (частотный) преобразователь (выпрямитель); *6* – переключатель; *7* – ИМС; *8* – электродвигатель; *9* – насос; *10* – в схему управления нерегулируемых агрегатов; *11* – к нерегулируемым агрегатам

Система обеспечивает стабилизацию уровня в резервуаре насосной станции с точностью ± 50 мм и кратковременными отклонениями (до 350 мм) при подключении или отключении нерегулируемого насосного агрегата.

Система позволяет регулировать частоту вращения одновременно нескольких, в данном случае двух, агрегатов.

Необходимость в таком режиме работы возникает при незначительном превышении притока над подачей одного насоса. В таких условиях параллельная работа регулируемого и нерегулируемого агрегатов неустойчива, так как нагрузка регулируемого агрегата составляет всего 5–10% номинала. Возникающие при этом незначительные изменения притока влекут за собой включение и отключение нерегулируемого агрегата. Вследствие этого создаются значительные возмущающие воздействия, которые не всегда могут быть сняты системой регулирования. Синхронная работа двух регулируемых агрегатов, эквивалентная

Таблица 1. **Расход электроэнергии при разных способах регулирования режима работы Ивановской канализационной насосной станции**

Способ регулирования	Продолжительность работы, сут	Общий расход электроэнергии, кВт·ч	Расход электроэнергии, кВт·ч		Объем перекачиваемых стоков, тыс. $м^3$	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/1000 $м^3$
			на собственные нужды	на перекачку стоков		
Плавное с переменной частотой вращения	7	41 700	6294	35 405	227	156
Ступенчатое с постоянной частотой вращения	7	42 000	4074	37 926	218	173

Примечание. Экономия электроэнергии, %: $Э = 100\ (173-156)/173 = 9{,}8$.

работе одного агрегата большой мощности, предотвращает возникновение неустойчивых режимов работы.

Внедрение системы регулирования позволило сократить потребление электроэнергии примерно на 10%, т.е. на 170 000 кВт в год (табл. 1), а также число включений насосных агрегатов с 30 до 3 в сутки.

Повышение эффективности САУ обеспечивается введением устройства, изменяющего число работающих агрегатов до того, как регулируемый насосный агрегат войдет в зону недопустимо низких КПД. Такое устройство разработано во ВНИИВОДГЕО и прошло проверку на одной из действующих московских канализационных станций.

Одновременно опыт эксплуатации выявил чрезвычайно низкую надежность ИМС, серийно изготавливаемых нашей промышленностью, что не позволяет рекомендовать их для широкого внедрения до приведения их в соответствие с лучшими образцами ИМС, изготавливаемых зарубежными фирмами.

На объекте испытывались несколько систем регулирования: с дискретными и аналоговыми преобразователями уровня различных типов. В условиях канализационных насосных станций наиболее надежными оказались аналоговые преобразователи с воздушным колоколом (см. § 18).

Канализационная насосная станция с регулируемым электроприводом по схеме АВК [25]. В г. Москве длительное время работает САУ Кунцевской канализационной насосной станции, на которой установлено шесть насосных агрегатов мощностью 800 кВт, в том числе 3–4 рабочих. Система автоматического регулирования состоит из одного асинхронного электродвигателя с фазным ротором мощностью 800 кВт и частотой вращения 740 об/мин, преобразователя АВК, функции которого выполняет агрегат ТДП2-630-400-1Т, состоящий из

выпрямителя и инвертора, сглаживающего дросселя ФРОС-800, согласующего трансформатора ТС-400, станции управления ШДУ-6902-48А и пусковых резисторов, преобразователя уровня, состоящего из воздушного колокола и дифференциального манометра; ПИ-регулятора Р-17.

Система стабилизирует уровень жидкости в резервуаре с точностью ± 7–10 см. Более высокая точность стабилизации уровня влекла за собой повышенный износ пальцев эластичной муфты, соединяющей электродвигатель с насосом. Повышенный износ обусловлен волнением жидкости в резервуаре (высота волны до 20 см), что потребовало увеличить зону нечувствительности САУ и снизить точность стабилизации уровня. Принцип действия системы регулирования частоты вращения агрегата аналогичен вышеописанной. Изменение числа работающих на станции насосных агрегатов осуществляется оперативным пёрсоналом.

Использование этой системы в насосной установке экономит ежегодно 600–700 тыс. кВт·ч электроэнергии, т.е. примерно 4–5 % общего энергопотребления.

Дополнительные капитальные затраты, обусловленные применением системы регулирования в насосной установке, составили 15 тыс. руб. Регулируемый насосный агрегат используется в течение года до 5000 час.

В настоящее время в целях повышения эффективности работы САУ и снижения износа регулируемого насосного агрегата намечено оснащение еще одного насоса регулируемым электроприводом того же типа.

Водопроводные насосные станции с регулируемым электроприводом по схеме АВК [25]. На одной из насосных станций III подъема Чебоксарского горводоканала установлен электропривод по схеме АВК мощностью 250 кВт. В приводе использован агрегат ТДП2-630-400-1Т, разработанный ВНИИР и изготовленный ПО "Электровыпрямитель" [1, 25].

Энергетическая эффективность применения этого привода по часам суток характеризуется данными, приведенными в табл. 2.

Согласно табл. 2 среднесуточная экономия электроэнергии достигает 29 %. Столь большая экономия обусловлена специфическим технологическим режимом работы установки (большая неравномерность подачи $\lambda = Q_{мин}/Q_{макс} = 0{,}354$; значительная динамическая составляющая напора и т.д.). Удельные расходы электроэнергии при регулировании составляют в среднем 200–210 кВт·ч/1000 м^3, а при работе без регулируемого электропривода доходят до 300–310 кВт·ч/1000 м^3. Аналогичными системами с насосными агрегатами мощностью до 800 кВт оборудованы еще 5 установок в г. Чебоксары.

Кроме серийных общепромышленных преобразователей в электроприводах по схеме АВК используются также преобразователи собственной разработки эксплуатирующих организаций [17, 18, 25].

Таблица 2. **Эффективность применения электропривода по схеме АВК в насосной установке**

Время суток, ч	Подача воды, м^3/ч	Потребление энергии, кВт·ч		Экономия электроэнергии, кВт·ч
		с регулируемым электроприводом	без регулируемого электропривода	
0 – 1	205	28,5	83,5	55
1 – 2	190	28	85,5	57,5
2 – 3	180	27	84,5	57,5
3 – 4	170	25	85,5	60,5
4 – 5	168	27,5	87	59,5
5 – 6	200	46	83	37
6 – 7	215	68,5	96,5	28
7 – 8	255	50,5	78	27,5
8 – 9	390	86	107	21
9 – 10	406	92,5	108	15,5
10 – 11	400	89,5	108	18,5
11 – 12	395	89,5	106,5	17
12 – 13	380	90,5	106,5	16
13 – 14	366	87,5	103	15,5
14 – 15	360	88	104,5	16,5
15 – 16	355	88	106,5	18,5
16 – 17	358	89,5	107	17,5
17 – 18	374	97	107	10
18 – 19	402	99,5	109	9,5
19 – 20	430	100,5	108	7,5
20 – 21	440	82	108	26
21 – 22	456	111	110	−1
22 – 23	390	43,5	101	57
23 – 24	260	32	94	62
Итого: 0 – 24	7745	1667,5	2377,5	710

Примечание. Экономия электроэнергии, %: $Э = 100\,(2377{,}5 - 1667{,}5)/2377{,}5 = 29{,}86$.

В г. Вильнюсе на водопроводной насосной станции Новая Вилия установлен один из таких электроприводов. Его мощность составляет 150 кВт. В электроприводе применен принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Благодаря этому привод отличается от общепромышленного более высоким коэффициентом мощности $\cos\varphi$. На базе этого электропривода создана САУ режима работы насосной станции. Характерной особенностью САУ является использование радиоканала для передачи информации об изменениях напора в диктующей точке сети.

Разработанная инженерным центром ПО "Вандуо" САУ с автоматизированным регулируемым электроприводом по схеме АВК позволила стабилизировать напор в диктующей точке (рис. 81) и благодаря

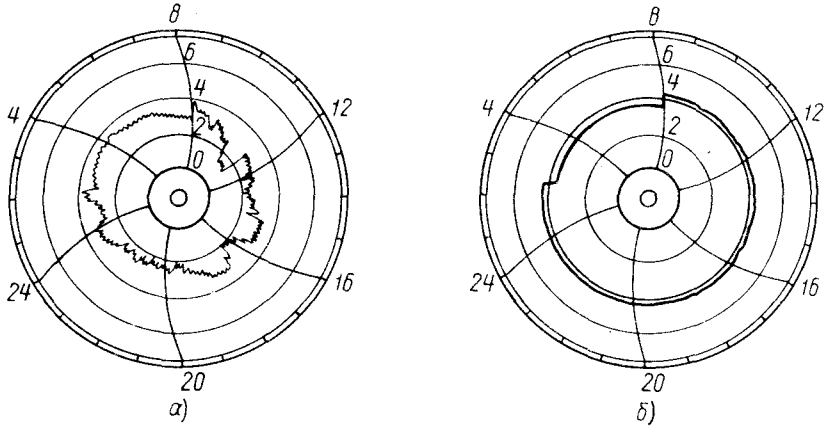


Рис. 81. Суточная диаграмма напоров в диктующей точке сети района водоснабжения Новая Вилия до (*а*) и после (*б*) внедрения САУ

этому снизить энергопотребление насосной установки на 6%. Сравнительно малая экономия электроэнергии объясняется тем, что район водоснабжения расположен на довольно высоких отметках по отношению к насосной станции. Аналогичные автоматизированные электроприводы мощностью от 150 до 630 кВт работают более чем в десяти насосных установках Литовского распубликанского объединения водопроводно-канализационного хозяйства [25], экономия электроэнергии в которых составляет 5 – 15%, достигая в отдельных случаях 20 – 30%.

Канализационные насосные станции с частотными электроприводами [3]. В насосной станции Мосвокстрой (г. Москва) обычный короткозамкнутый асинхронный электродвигатель насоса мощностью 110 кВт включен через преобразователь ПЧТ, разработанный в НИИ ХЭМЗ. Система управления электроприводом построена аналогично ранее описанным, за исключением того что в качестве преобразователя уровня в системе использован ультразвуковой уровнемер ЭХО-3. Применение частотного электропривода в этой установке уменьшает потребление электроэнергии на 60 тыс. кВт·ч в год, т.е. примерно на 5%.

В канализационных насосных станциях г. Москвы используются также частотные преобразователи типа ПЧР-2 и производства финской фирмы Strømberg, на основе которых созданы и работают свыше 10 систем автоматического регулирования режима работы канализационных станций с агрегатами мощностью от 75 до 160 кВт. Система регулирования с применением частотного преобразователя типа SAMI фирмы Strømberg длительное время эксплуатируется на Ново-Нагатинской станции, обеспечивая экономию электроэнергии 7 – 8% общего ее потребления.

Частотные преобразователи фирмы Strømberg – высоконадежные и достаточно компактные средства регулирования насосных агрегатов. Для обеспечения равномерного использования насосных агрегатов предусматривается устройство, с помощью которого они могут поочередно подключаться к одному преобразователю.

Водопроводные станции с частотным электроприводом. Частотные электроприводы применяются на ряде водопроводных насосных станций (преимущественно станций подкачки), оснащенных насосными агрегатами мощностью до 200 кВт. Например, две московские насосные станции подкачки, работающие в общую сеть, оснащены частотными преобразователями фирмы Strømberg, включенными в САУ. По предварительным данным, применение регулируемого электропривода на этом объекте снижает потребление электроэнергии на 10–12% и позволяет стабилизировать напор в диктующей точке в заданном пределе (32 ± 1) м [11].

Известны случаи применения отечественных частотных преобразователей типа ПЧТ в г. Харькове, типа ЭКТ – в г. Ленинграде и др.

Канализационная насосная станция с приводом на базе вентильного электродвигателя [10]. На Филевской канализационной насосной станции г. Москвы внедрена САУ с использованием электропривода на базе вентильного электродвигателя. Из шести насосов марки 30-ФВ-17, установленных на станции, один из них оснащен таким электроприводом с применением преобразователя ПЧВН, разработанного НИИ ХЭМЗ. Мощность электропривода 1600 кВт, напряжение двигателя 10 кВ. Преобразователь подключен к питающей электросети через понижающий сухой трансформатор мощностью 4000 кВ·А, а двигатель – к преобразователю через такой же повышающий трансформатор. В состав преобразователя входит также тиристорный преобразователь для питания системы возбуждения синхронного электродвигателя, который при внедрении электропривода не заменялся. Система управления электроприводом насоса аналогична вышеописанным. В качестве датчика уровня использован воздушный колокол и дифманометр с выходом 0–5 мА. В системе управления использован ПИ-регулятор типа Р-17. Применение САУ с регулируемым электроприводом снизило потребление электроэнергии примерно на 1200 тыс. кВт·ч в год, улучшило условия эксплуатации насосного оборудования, облегчило условия работы оперативного персонала.

Анализ работы САУ и выполненные расчеты показывают, что оборудование аналогичным электроприводом второго насосного агрегата позволило бы увеличить экономию электроэнергии почти вдвое. На станции прошло проверку устройство, исключающее работу регулируемого насоса в зоне низких КПД.

Водопроводные насосные станции с электроприводом на базе вентильного электродвигателя. В г. Москве на Северной водопроводной станции один из вертикальных насосов марки 32В-19 оснащен приво-

дом такого же типа, который применен на Филевской канализационной насосной станции. Система управления насосным агрегатом Северной водопроводной станции в отличие от канализационной обеспечивает стабилизацию напора на напорном коллекторе станции, а не уровень жидкости в резервуаре.

Ввиду того что в дневное время общее число насосных агрегатов, работающих на Северной водопроводной станции, достигает 12–15, один регулируемый насосный агрегат не может оказать влияние на дневной режим работы объекта. Поэтому регулируемый насосный агрегат Северной водопроводной станции работает только в ночное время, когда в работе участвуют 4–5 агрегатов. На коллекторе насосной станции в ночное время поддерживается напор, равный 36 м, а не 42 м, как днем.

Экономия электроэнергии за счет применения САУ с регулируемым электроприводом для этого объекта составляет примерно 2,2 млн.кВт·ч в год. Для того чтобы САУ могла использоваться круглосуточно регулируемым электроприводом, должно быть оснащено 5–7 агрегатов из всего их числа на станции. При этом на группу из 2–3 нерегулируемых насосных агрегатов в работе должен находиться один регулируемый. В этих условиях экономия электроэнергии может быть увеличена до 15 млн. кВт·ч в год.

Мощные электроприводы на базе вентильного электродвигателя мощностью 5 МВт применены в каскаде насосных станций Харьковского водопровода. Применение таких электроприводов позволило сэкономить 30 220 тыс. кВт·ч/год [36].

Многоскоростные электродвигатели в насосных установках [9]. Циркуляционные насосные станции некоторых московских ТЭЦ укомплектованы вертикальными насосными агрегатами с двухскоростными двигателями марки ДВДА215/64-16-20К. Из семи насосов каждой станции два приводятся во вращение этими электродвигателями. Номинальная мощность двигателей 1400 кВт, частота вращения 375 и 300 об/мин. Наличие таких насосных агрегатов позволяет лучше приспосабливать режим работы насосной установки к режиму работы теплосети. Применяются двухскоростные электродвигатели и в водопроводных насосных установках.

20. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В САУ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Применение регулируемого электропривода в САУ насосных установок, с одной стороны, уменьшает потребление энергии, с другой – требует дополнительных капитальных затрат. Поэтому целесообразность применения регулируемого электропривода в САУ насосных установок определяется сравнением приведенных затрат двух вариантов: б а з о в о г о и н о в о г о. За новый вариант принимается насосная установка, оснащенная регулируемым электроприводом, а за базовый – установка, агрегаты которой работают с постоянной частотой вращения.

В соответствии с общепринятой методикой [29] приведенные затраты определяются выражением

$$З = C + EK, \tag{79}$$

где $З$ – приведенные затраты на единицу продукции, руб.; C – себестоимость единицы продукции, руб.; K – удельные капитальные вложения в производственные фонды, руб.; E – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

В насосных установках за единицу продукции принимается объем жидкости, перекачиваемый за год [40].

Разница в приведенных затратах по вариантам равна

$$\Delta З = C_б + EK_б - C_н - EK_н = \Delta C + E\Delta K, \tag{80}$$

где индексом "б" обозначены затраты по базовому варианту, а "н" – по новому

Разница в себестоимости продукции определяется выражением

$$\Delta C = \Delta C_w + \Delta C_Q + \Delta C_q - \Delta A, \tag{81}$$

где ΔC_w – стоимость электроэнергии, сэкономленной в течение года за счет применения регулируемого электропривода; ΔC_Q – стоимость утечек и непроизводительных расходов воды, уменьшенных за счет применения регулируемого электропривода; ΔC_q – стоимость транспорта и обработки утечек и непроизводительных расходов сточной воды в системе водоотведения; ΔA – изменение амортизационных отчислений, обусловленное изменением капитальных вложений в связи с применением регулируемого электропривода.

Стоимость сэкономленной электроэнергии

$$\Delta C_w = \Delta W Ц_w, \tag{82}$$

где ΔW – экономия электроэнергии, кВт·ч; $Ц_w$ – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч [38]. При двухставочном тарифе берется ставка только за израсходованную электроэнергию, так как обычно применение регулируемого электропривода не влияет на максимум заявленной мощности. При одноставочном тарифе $Ц_w$ = 0,04 руб/(кВт·ч), за исключением отдельных районов страны, где $Ц_w$ = 0,06÷0,1 руб/(кВт·ч). При двухставочном тарифе $Ц_w$ = (0,015 ÷ 0,025) руб/(кВт.ч) [38].

Стоимость сэкономленной воды

$$\Delta C_Q = \Delta Q Ц_Q, \tag{83}$$

где ΔQ – экономия воды (см. § 9), м^3; $Ц_Q$ – стоимость воды, руб/м^3.

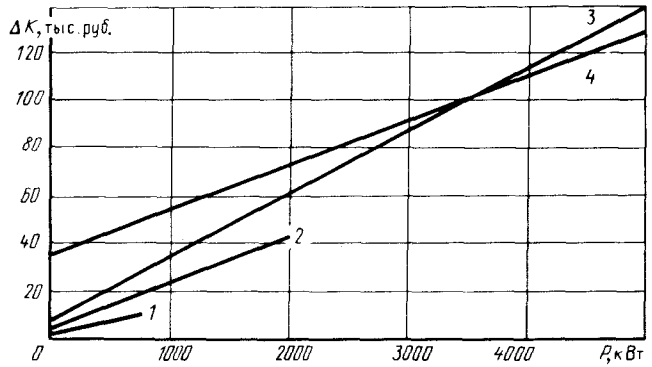


Рис. 82. Дополнительные капитальные затраты, обусловленные применением регулируемого электропривода:

1 – ИМС; *2* – по схеме АВК; *3* – частотного; *4* – на основе вентильного электродвигателя

Для различных систем водоснабжения стоимость воды колеблется: $Ц_Q = 0{,}015 \div 0{,}1$ руб/м^3.

Затраты на перекачку и обработку утечек и непроизводительных расходов сточной воды в системе водоотведения

$$\Delta C_q = \Delta Q Ц_q, \qquad (84)$$

где $Ц_q$ – стоимость перекачки и обработки 1 м^3 сточной воды, $Ц_q = 0{,}03 \div 0{,}05$ руб/м^3.

Амортизационные отчисления зависят от значения ΔK:

$$\Delta A = A \Delta K, \qquad (85)$$

где A – амортизационные отчисления от капитальных вложений, %. Согласно [32] для электрического оборудования A = 8,1%, для насосов 19%, для трубопроводной арматуры 21,3%, для строительной части зданий и сооружений 2,6%.

Дополнительные капитальные вложения, связанные с применением регулируемого электропривода в САУ насосных установок, зависят прежде всего от вида электропривода и его мощности. На рис. 82 представлены зависимости дополнительных капитальных вложений от мощности для наиболее распространенных в нашей стране регулируемых электроприводов. Разумеется, этими зависимостями следует пользоваться для расчетов общего характера. Для конкретных установок ΔK следует определять по действующим прейскурантам и ценникам. Однако применение регулируемого электропривода увеличивает капитальные вложения только в том случае, если он применяется в действующей насосной установке. При строительстве новой или реконструкции существующей установки применение регулируемого электропривода может снизить суммарные капитальные вложения благодаря укрупнению единичной мощности насосных агрегатов и уменьшению их числа [24, 40]. При отсутствии регулируемого электропривода на станциях устанавливают большое число агрегатов (до 10–12) относительно небольшой мощности. В ряде случаев берут разнотипные насосы или насосы одного типа, но с различными диаметрами рабочих колес. Такое решение сопряжено с большими габаритами зданий насосных станций.

Применение в насосных агрегатах регулируемого электропривода дает возможность использовать крупные насосные агрегаты в режиме малых подач. Благодаря этому можно, увеличив единичную мощность агрегатов, уменьшить их общее число и, следовательно, уменьшить габариты зданий, упростить гидравлическую схему станции, уменьшить число трубопроводной арматуры и число ячеек в электрическом распределительном устройстве (РУ) и т.д. В результате применение регулируемого электропривода не только не увеличивает капитальные вложения, но даже уменьшает их при определенных условиях.

Выполненные расчеты показали, что применение регулируемого электропривода в сочетании с укрупнением единичной мощности позволяет уменьшить приведенные затраты до 50% [24].

На рис. 83 показаны гидравлическая схема и схема размещения оборудования двух вариантов водопроводной насосной станции. Номинальная подача станции 260–270 тыс.м^3/сут, номинальный напор 70–75 м. В первом варианте предусматривается установка 8 насосов Д3200-75 мощностью 800 кВт с электроприводом от синхронных нерегулируемых электродвигателей. Во втором варианте предусматривается установка 5 насосов Д6300-80, в том числе два из них оборудуются регулируемым электроприводом по схеме АВК.

Сравнением двух компоновок установлено, что размеры здания станции по второму варианту меньше на 15%, чем по первому. При этом существенно упростилась гидравлическая схема, а электрические схемы по обоим вариантам незначительно отличаются друг от друга. Результаты расчета [24] показывают, что капиталовложения по электрической части из-за применения регулируемого электропривода возросли с 83 тыс.руб. до 140 тыс.руб., по гидромеханической части остались без изменений, примерно 54 тыс.руб., по строительной части уменьшились с 387 тыс.руб. до 310 тыс.руб. Приведенные затраты по второму варианту с учетом экономии электроэнергии, воды и капиталовложений уменьшились на 42%.

Таким образом, применение регулируемого электропривода в насосных установках позволяет наряду с экономией электроэнергии и воды уменьшить число насосных агрегатов, упростить гидравлическую схему станции, уменьшить строительные объемы здания насосной станции. В связи с этим возникают вторичные экономические эф-

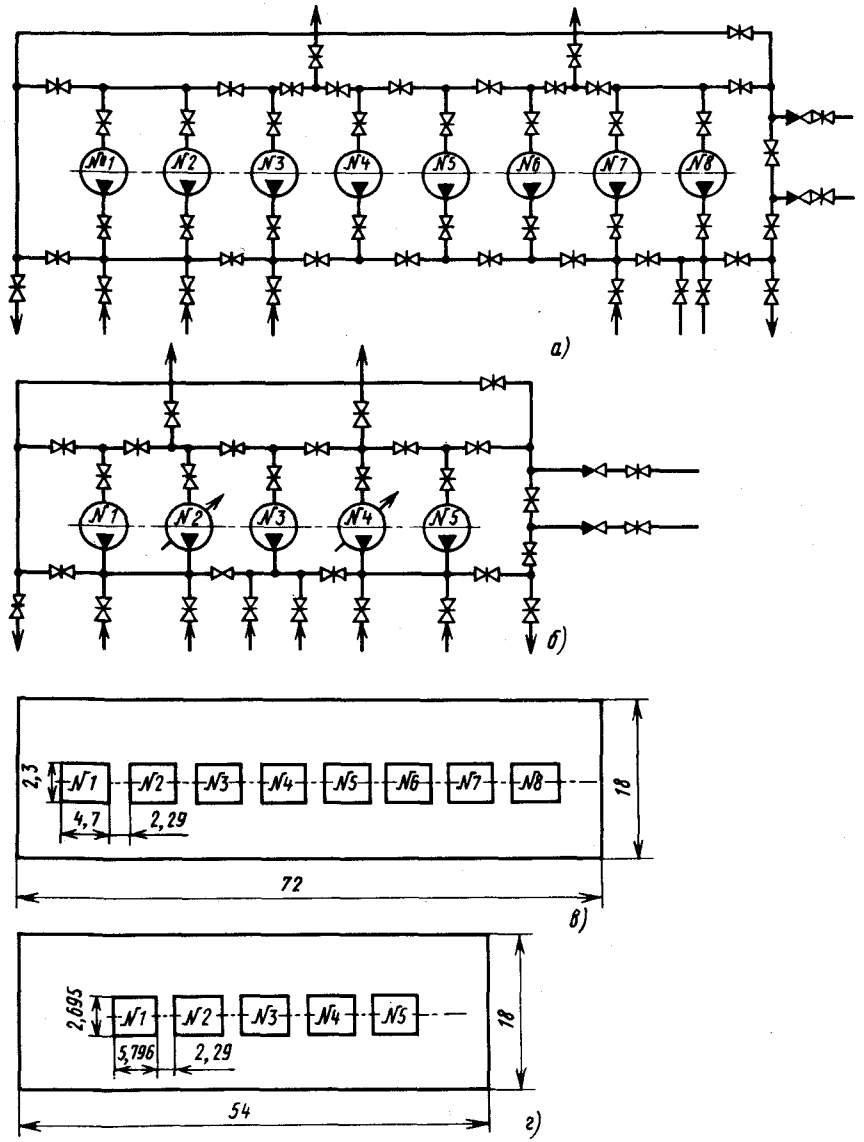


Рис. 83. Укрупнение единичной мощности насосных агрегатов:

а – гидравлическая схема водопроводной насосной станции с 8 насосными агрегатами мощностью 800 кВт; *б* – то же с 5 агрегатами мощностью 1600 кВт, в том числе два с электроприводом по схеме АВК; *в* – размещение 8 агрегатов мощностью по 800 кВт; *г* – то же 5 агрегатов мощностью по 1600 кВт

фекты: уменьшаются расходы на отопление, освещение и ремонт здания. Приведенные затраты в зависимости от назначения станций и других конкретных условий могут быть сокращены на 20–50%. Особое внимание следует обратить на целесообразность укрупнения единичной мощности насосных агрегатов в реконструируемых установках при увеличении их производительности. Расчеты, выполненные для ряда объектов, показали, что таким образом может быть увеличена производительность насосных станций без расширения их производственных площадей.

Вместе с тем расчеты и анализ эффективности регулируемого электропривода в действующих насосных установках показывает, что в небольших насосных установках с агрегатами мощностью до 75 кВт, особенно в тех случаях, когда они работают с большой статической составляющей напора, оказывается нецелесообразным применение регулируемых электроприводов. В этих случаях целесообразно применять более простые системы регулирования с применением дросселирования, изменения числа работающих насосных агрегатов, байпасирования. Последний способ особенно целесообразен в случае использования насосов с возрастающим участком напорной характеристики и большой глубиной регулирования, так как он позволяет избежать помпажа.

Подробное изложение методики определения целесообразности применения регулируемого электропривода в САУ насосных установок с указанием цен на оборудование и других справочных данных содержится в [40].

21. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ САУ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

Выбор электропривода для конкретной установки осуществляется с учетом различных факторов: соотношения стоимости оборудования и электроэнергии, условий эксплуатации, удобства размещения оборудования, типа установленных насосов и электродвигателей, числа насосных агрегатов и их мощности, квалификации обслуживающего персонала, возможности уменьшения числа установленных насосов за счет укрупнения единичной мощности агрегатов и т.д. Различен подход к выбору электропривода для существующих (действующих), вновь проектируемых и реконструируемых объектов. Вследствие этого не существует какого-либо одного вида электропривода, который должен применяться во всех насосных установках при любых условиях использования.

Применение САУ с регулируемым электроприводом целесообразно обычно в тех случаях, когда:

насосная водопроводная установка подает воду непосредственно в сеть (насосные станции II, III подъемов, станции подкачки и т.п.);

объем приемных резервуаров канализационных и иных насосных станций не превышает обычных размеров, т.е. его емкость не превышает 5–10-минутной подачи наиболее крупного насоса;

диапазон колебания водопотребления или притока достаточно большой (не менее 15–20% максимальной подачи);

динамическая составляющая водоподачи достаточно большая (не менее 20–30% общей высоты подъема жидкости).

В отдельных случаях, например для обеспечения равномерного режима работы очистных сооружений, целесообразно применение регулируемого электропривода в насосных установках 1 подъема водопроводных станций. Применение САУ с регулируемым электроприводом экономически целесообразно при мощности насосных агрегатов 75–100 кВт и выше.

В насосных агрегатах мощностью 75–220 кВт наиболее целесообразно применение регулируемого электропривода с частотными преобразователями или ИМС, а для насосов мощностью 250–2000 кВт наиболее подходящим является электропривод по схеме АВК. Для агрегатов большой мощности, до 1600–5000 кВт, особенно вертикальных, целесообразно применять электропривод на основе вентильного двигателя.

Приведенные рекомендации носят общий характер и справедливы при существующем соотношении цен на электроэнергию и оборудование, используемое в электроприводе, а также при действующих нормах амортизации и сроках окупаемости.

С учетом конкретных условий или при изменении исходных данных границы области целесообразного применения САУ с регулируемым электроприводом могут изменяться в ту или иную сторону. Так, например, для агрегатов 250–2000 кВт, как отмечалось выше, наиболее целесообразно применение регулируемых электроприводов по схеме АВК. Однако этот вид электропривода может быть использован только в горизонтальных агрегатах, так как электродвигатели с фазным ротором, необходимые для этого привода, в настоящее время в вертикальном исполнении промышленностью не изготавливаются. Поэтому в вертикальных насосных агрегатах мощностью 800–2000 кВт применяются электроприводы на основе вентильных электродвигателей.

В насосных установках мощностью 75–220 кВт конкурентоспособны два вида электропривода: частотный и с ИМС. Для насосных агрегатов, работающих с частотой вращения 600–750 об/мин и менее, передаваемый момент существенно возрастает, из-за этого габариты ИМС значительно увеличиваются и, следовательно, возрастает стоимость. В таких условиях применение частотного электропривода становится предпочтительней электропривода с ИМС. Более полные рекомендации по выбору вида регулируемого электропривода для конкретных насосных установок, основанные на сравнении сопоставимых вариантов, даны в [40].

Применяя САУ с регулируемым электроприводом, целесообразно свести число насосных агрегатов до минимума. Минимальным для насосных установок 1-й категории числом насосных агрегатов следует считать 4 (два рабочих, два резервных). Если два рабочих агрегата не могут обеспечить требуемую максимальную подачу, их число следует увеличить до 5. В этом случае общее число насосных агрегатов должно быть 6–7, из них 2 резервных.

Регулируемым электроприводом рекомендуется оборудовать 2–3 насосных агрегата, если на станции установлено 4–6 агрегатов и 3–4, если на станции установлено 7–8 агрегатов.

Во избежание образования так называемых мертвых зон в процессе регулирования напорная характеристика регулируемого насоса должна располагаться несколько выше характеристики нерегулируемого насоса. Поэтому регулируемым электроприводом следует оборудовать наиболее крупные насосы с наиболее пологой характеристикой $Q–H$.

Если предполагается установка однотипных насосов, следует иметь в виду, что максимальная частота вращения регулируемого насоса примерно на 5% ниже нерегулируемого. Поэтому надо принимать дополнительные меры, обеспечивающие работу установки без мертвых зон. Такой мерой является обточка рабочих колес нерегулируемых насосов так, чтобы их напорные характеристики располагались несколько ниже напорных характеристик регулируемого насоса, работающего с максимальной частотой вращения.

Определяя число регулируемых насосов, следует иметь в виду, что понижение частоты вращения одного из насосов может вызвать перегрузку нерегулируемых насосов, вывести рабочие точки нерегулируемых насосов за пределы рабочей зоны, снизить их КПД и в особо неблагоприятных условиях вызвать кавитацию. Если такие условия имеют место, регулируемый электропривод должен быть установлен на всех насосных агрегатах, а изменение частоты вращения насосов, работающих параллельно, должно осуществляться синхронно, т.е. одновременно и на одно и то же значение. Синхронное изменение частоты вращения обеспечивается управлением всех насосов от общей системы автоматики.

В случае установки регулируемых и нерегулируемых насосных агрегатов, работающих параллельно, САУ должна предусматривать не только изменение частоты вращения регулируемых насосов, но и изменение числа работающих нерегулируемых агрегатов. При этом включение или отключение нерегулируемых агрегатов должно осуществляться заблаговременно, до того как подача регулируемого насоса уменьшится до нулевого значения, чтобы исключить работу насоса в зоне низких КПД.

Применение в насосных установках САУ с регулируемым электроприводом предъявляет специфические требования к гидравлической

схеме насосной установки. Обязательным элементом гидравлической схемы являются обратные затворы на напорных линиях регулируемых насосов, так как при работе на малых частотах вращения возможно обратное движение жидкости. Обратные затворы рекомендуется устанавливать на горизонтальных участках трубопроводов во избежание возникновения дополнительных потерь электроэнергии из-за промежуточного положения тарели обратного затвора в потоке в режиме малых подач.

Более полные рекомендации по применению регулируемого электропривода в САУ насосных установок приведены в [40].

Приложение 1

Технические характеристики частотных преобразователей типа ПЧТ [3, 14]

Тип преобразователя	Номинальные параметры			Мощность приводного электродвигателя, кВт	Габаритные размеры (высота × ширина × глубина), мм	Масса, кг	Стоимость, руб.
	Напряжение, В	Ток, А	Мощность, кВ·А				
ПЧТ-11	380	50	33	18,5–22	1800×1400×400	670	3740
ПЧТ-12	380	100	66	30–55	1800×1400×400	730	4240
ПЧТ-13	380	160	106	75–90	1800×1400×600	1000	5620
ПЧТ-14	380	200	132	90–110	1800×1400×600	1100	5870
ПЧТ-15	380	400	264	132–200	1800×1600×800	1200	9150
ПЧТ-16	380	630	416	250–315	1800×1600×800	1300	9815
ПЧТ-17	380	800	528	400	1800×2400×800	1700	11 865

Примечания: 1. Разработчик: НИИ ХЭМЗ, г. Харьков. 2. Изготовитель: ХЭМЗ, г. Харьков. 3. Преобразователи на токи 400 А и выше дополнительно комплектуются реакторами типа ФРОС (см. приложение 2).

Приложение 2

Технические характеристики реакторов типа ФРОС

Тип преобразователя	Тип реактора	Ток, А	Индуктивность, мГн	Габариты, мм	Масса, кг
ПЧТ-15	ФРОС-500/0,5	500	3,25	500×475×700	340
ПЧТ-16	ФРОС-1000/0,5	800	5	630×630×790	510
ПЧТ-17	ФРОС-1000/0,5	1000	1,6	580×585×740	470

Приложение 3

Технические характеристики частотных преобразователей ТТЕ, ТТП [37]

Тип преобразователя	Номинальные параметры			Мощность приводного электродвигателя, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Стоимость, руб.
	Напряжение, В	Ток, А	Мощность, кВ·А				
ТТЕ-25-380-5-50 УХЛ4	380	25	16,5	До 10	1400×600×400	150	3300
ТТП-63-380-50 УХЛ4	380	63	41,5	30–55	1600×600×600	300	4250
ТТП-160-380-50 УХЛ4	380	160	105	75–90	1900×800×600	405	5450
ТТП-400-380-50 УХЛ4	380	400	263,5	132–200	2150×1600×600	1050	10 400

Примечания: 1. Разработчик: ВНИИ "Преобразователь", г. Запорожье. 2. Изготовитель: ПО "Преобразователь", г. Запорожье.

Приложение 4

Технические характеристики оборудования для привода по схеме преобразователь АВК – агрегат ТДП-2 [1]

Тип агрегата	Номинальное напряжение агрегата, В	Ток агрегата, А		Напряжение питающей сети, В	Численный состав оборудования, шт.			Габаритные размеры без реактора, мм				Масса, кг	Стоимость, руб.
		номинальный	максимальный		Выпрямитель агрегата	Инвертор агрегата	Реактор (тип)	Высота		Ширина	Глубина		
								Без вентилятора	С вентилятором				
ТДП2-0630/400-1Т	350	630	1100	400	1	1	1 (ФРОС-800, $I_н = 800$ А)	2200	2640	1200	600	750	6200
ТДП2-0630/400-2Т	700	630	1100	400×2	1	2	1 (ФРОС-800, $I_н = 800$ А)	2200	2640	1800	600	1150	9980
ТДП2-1250/400-1Т	350	1250	2200	400	1	1	1 (ФРОС-2000, $I_н = 800$ А)	2200	2640	2400	600	1450	11 230
ТДП2-1250/400-2Т	700	1250	2200	400×2	1	2	1 (ФРОС-2000, $I_н = 800$ А)	2200	2640	3600	600	2250	19 600
ТДП2-2500/400-2Т	350	2500	4400	400	Агрегат типа ТДП2-1250/400-1Т – 2 шт.			2200	2640	4800	600	2900	22 460
ТДП2-2500/400-4Т	700	2500	4400	400×2	Агрегат типа ТДП2-1250/400-2Т – 2 шт.			2200	2640	7200	600	4500	39 200

Примечания: 1. Разработчик: ВНИИ Релестроения, г. Чебоксары. 2. Изготовитель: ПО "Электровыпрямитель", г. Саранск. 3. Характеристики станции управления ШДУ см. в приложении 5.

Приложение 5

Технические характеристики станции управления АВК типа ШДУ

Тип станции управления	Типовой индекс	Диапазон регулирования скорости (АВК)	Номинальное напряжение, В		Число пусковых ступеней, шт.	Номинальный ток, А		Габаритный размер (ширина), мм	Масса, кг	Назначение
			статора	ротора		статора	ротора			
ШДУ6801	48А4УХЛ4	Полный	660	660*	–	630	630	1610	520	Управление статором и ротором двигателей низкого напряжения
	47А404	"	660	660*	–	500	500	1610	520	
ШДУ6802	48А4УХЛ4	Частичный	660	660*	5	630	630	2410	850	
	47А404	"	660	660*	5	500	500	2410	850	
ШДУ6901	48А4УХЛ4	Полный	–	660*	–	–	630	810	320	Управление ротором двигателей высокого напряжения
	47А404	"	–	660*	–	–	500	810	320	
ШДУ6902	48А4УХЛ4	Частичный	–	660*	5	–	630	1610	550	
	47А404	"	–	660*	5	–	500	1610	550	
ШДУ6903	51А4УХЛ4	Полный	–	660**	–	–	1250	2010	740	
	50А404	"	–	660**	–	–	1000	2010	740	
	54А4УХЛ4	"	–	660**	–	–	2500	2010	740	
	53А404	"	–	660**	–	–	2000	2010	740	
ШДУ6904	51А4УХЛ4	Частичный	–	660*	5	–	1250		740	
	50А404	"	–	660*	5	–	1000	4010	1650	
	54А4УХЛ4	"	–	660*	5	–	2500	4010	1650	
	53А404	"	–	660*	5	–	2000	4010	1650	

Продолжение прилож. 5

Тип станции управления	Типовой индекс	Диапазон регулирования скорости (АВК)	Номинальное напряжение, В		Число пусковых ступеней, шт.	Номинальный ток, А		Габаритный размер (ширина), мм	Масса, кг	Назначение
			статора	ротора		статора	ротора			
ШДУ6905	48А4УХЛ4	„	–	660*	5	–	2×630	4010	1580	Управление роторами двух двигателей высокого напряжения
	47А404	„	–	660*	5	–	2×500	4010	1580	
ШДУ6906	46А4УХЛ4	Частичный	–	660*	4	–	400	610	280	Вспомогательные для увеличения пусковых ступеней
	45А404	„	–	660*	4	–	320	610	280	
	50А4УХЛ4	„	–	660*	4	–	1000	810	400	
	49А404	„	–	660*	4	–	800	810	400	

*Допускается кратковременное (1 мин) повышение напряжения до 2000 В при пуске электродвигателя.

**Допускается кратковременное (1 мин) повышение напряжения до 1000 В при пуске электродвигателя. Использование станций для пуска двигателя с номинальным напряжением ротора выше 1000 В согласуется с разработчиком.

Примечания: 1. Разработчик: ВНИИ релестроения, г. Чебоксары. 2. Изготовитель: ЧЭАЗ, г. Чебоксары. 3. Для всех типов станции управления: номинальное напряжение в цепи управления ~220 В; габаритные размеры, мм (высота×глубина), 2200×600. 4. Стоимость станции ШДУ примерно 4000 руб.

Приложение 6

Технические характеристики двухскоростных электродвигателей типа ДВДА (напряжение 6 кВ, частота тока 50 Гц)

Тип электродвигателя	Мощность, кВт	Ток статора, А	Кратность пускового тока $I_{пуск}/I_{ном}$, отн.ед	Частота вращения (синхронная), об/мин	Скольжение, %
ДВДА 260/99-16-20	5000/2500	665/363	5/4,5	375/300	1/1,1
ДВДА 260/79-20-24	3150/1600	458/258	4,5/4,3	300/250	1/1
ДВДА 260/99-20-24	4000/2500	580/387	4,5/4	300/250	1/1,1
ДВДА 215/64-16-20	1400/700	188/110	4,5/4	375/300	1/1
ДВДА 215/49-10-12	1600/1000	190/120	5/5	600/500	0,9/0,9
ДВДА 215/39-12-16	1000/500	123/67	5/4,8	500/375	0,9/0,94
ДВДА 173/49-12-16	800/400	99/60	5/4,8	500/375	1,2/1
ДВДА 173/29-10-12	500/315	66/46	6/6,5	600/500	1/1

Тип электродвигателя	cos φ	КПД, %	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$, отн. ед	$\frac{M_{макс}}{M_{ном}}$, отн. ед.	Момент инерции, кН·м^2	Максимальная нагрузка на пяту, кН
ДВДА 260/99-16-20	0,76/0,7	95,2/94,6	0,9/0,9	1,9/1,8	100	700
ДВДА 260/79-20-24	0,7/0,64	94,2/93,5	0,7/0,7	1,8/1,9	85	600
ДВДА 260/99-20-24	0,7/0,66	95/94	0,7/0,7	2/1,8	105	650
ДВДА 215/64-16-20	0,7/0,68	93,1/91,1	0,65/0,75	2/2,1	27,5	300
ДВДА 215/49-10-12	0,87/0,86	93/92,9	0,6/0,7	–	22,5	300
ДВДА 215/39-12-16	0,85/0,79	92/90,8	0,8/0,9	2,1/2,1	17,5	200
ДВДА 173/49-12-16	0,84/0,71	92,9/90,5	0,9/1	2,2/2,4	9,5	180
ДВДА 173/29-10-12	0,81/0,74	90,5/89	0,9/1,2	2,5/1,2	6,5	180

Примечание. В числителе приведены параметры, соответствующие высшей частоте вращения, а в знаменателе – низшей.

Приложение 7

Технические характеристики привода на базе вентильного электродвигателя с преобразователями типа ПЧВН [3, 14]

Мощность, кВт	Параметры преобразовательной части		Тип трансформатора*	Количество, шт.	Мощность, кВ·А	Тип реактора; технические характеристики	Число реакторов, шт.	Габаритные размеры (длина × глубина × высота), мм
	Ток, А	Напряжение, В						
800	1000	825	ТСЗП-1000/10	1	1000	ФРОСЗ-800;	2	8500 × 1350 × 2600
1250	1600	825	ТСЗП-1000/10	1	1000	1250 А; 0,8 мГн		
			ТСЗП-1600/10	1	1600	ФРОСЗ-1250;	2	8900 × 1350 × 2600
			ТСЗП-1600/10	1	1600	2000 А; 0,48 мГн		
1600	2000	825	ТМП-2500/10	1	2500	ФРОСЗ-1250;	2	8850×1880×3600
			ТМП-2500/10	1	2500	2000 А; 0,48 мГн		
2000	2000	1050	ТМП-4000/10	1	4000	ФРОСЗ-1250;	2	9100 × 2600 × 4000
			ТМП-4000/10	1	4000	2000 А; 0,48 мГн		
3150	4000	825	ТМП-4000/10	1	4000	ФРОСЗ-4000;	2	10300 × 2600 × 4000
			ТМП-4000/10	1	4000	4000 А; 0,4 мГн		
4000	4000	1050	ТМП-6300/10	1	6300	ФРОСЗ-4000;	2	11500 × 3400 × 4300
			ТМП-6300/10	1	6300	4000 А; 0,4 мГн		
5000	5000	1050	ТДПД-8000/10	1	8000	ФРОСЗ-5000;	2	13220 × 4500 × 4500
			ТДПД-8000/10	1	8000	5000 А; 0,32 мГн		
6300	8000	825	ТДПД-8000/10	1	8000	ФРОСЗ-4000;	4	23460 × 4300 × 4000
			ТМП-4000/10	2	4000	4000 А; 0,4 мГн		
8000	8000	1050	ТДПД-12500/10	1	12500	ФРОСЗ-4000;	4	26120 × 4500 × 4500
			ТМП-6300/10	2	6300	4000 А; 0,4 мГн		
10 000	10 000	1050	ТДПД-12500/10	1	12 500	ФРОСЗ-5000	4	27280 × 4500 × 4500
			ТМП-6300/10	2	6300	5000 А; 0,32 мГн		
12 500	12 500	1050	ТДПД-16000/10	1	16 000	ФРОСЗ-6300	4	28400 × 4850 × 5000
			ТДП-10000/10	2	10 000	6250 А; 0,252 мГн		
16 000	16 000	105Э	ТРДПД-20000/10	1	20 000	ФРОСЗ-4000	8	37100 × 4700 × 5000
			ТДП-10000/10	2	10 000	4000 А; 0,4 мГн		
22 000	20 000	1050	ТРДПД-32000/10	1	32 000	ФРОСЗ-5000	8	49020 × 5000 × 5300
			ТМП-6300/10	4	6300	5000 А; 0,32 мГн		
25 000	25 000	1050	ТРДПД-32000/10	1	32000	ФРОСЗ-6300	8	49500 × 5000 × 5300
			ТМП-6300/10	4	6300	6250 А; 0,252 мГн		

*Понижающие трансформаторы питаются от сети 6 или 10 кВ. В числителе указаны понижающие, а в знаменателе – повышающие трансформаторы.

Примечания: 1. Стоимость привода от 50 000 до 500 000 руб. в зависимости от мощности. 2. Диапазон регулирования 1:10. 3. КПД при номинальной нагрузке 0,95. 4. Разработчик: НИИ ХЭМЗ, г. Харьков. 5. Изготовитель: ХЭМЗ, г. Харьков

Приложение 8

Технические характеристики электромагнитных муфт скольжения серии ИМС [27, 40]

Тип ИМС	Номинальные параметры			Момент силы, Н·м		Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Стоимость, руб.
	Вращающий момент, Н·м	Скольжение, об/мин	Ток возбуждения, А	Якорь	Индуктор			
ИМСМ-7,5	75,6	100	1,0	65	35	180	610 × 380 × 254	607
ИМСМ-20	216	50	1,4	150	75	350	700 × 480 × 318	778
ИМСМ-40	392	50	3	800	400	590	915 × 650 × 670	1274
ИМСМ-75	736	50	3	1950	650	1170	1035 × 725 × 700	1739
ИМСМ-100	981	50	3	1950	650	1170	1075 × 725 × 700	1926
ИМСМ-160	1570	50	5	3300	1400	1740	1225 × 860 × 650	2600

Примечания: 1. Разработчик: ГПИ Тяжпромэлектропроект. 2. Изготовитель: Киргизкабельмаш.

Приложение 9

Технические характеристики приборов и средства автоматизации, используемые для САУ насосных установок

Преобразователи давления с электрическим выходным сигналом

Малогабаритные измерительные преобразователи с компенсацией магнитных потоков МПЭ-МИ (манометры) предназначены для измерения избыточного давления неагрессивных жидких или газообразных сред и преобразования его в унифицированный электрический выходной сигнал постоянного тока. 0–5, 0–20 или 4–20 мА. Верхние пределы измерения 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60 МПа. Класс точности 0,6; 1 или 1,5. Материал деталей, контактирующих с контролируемой средой, – сплав 36НХТЮ и сталь 12Х18Н10Т.

Питание прибора переменным током напряжением 220 В частотой 50, Гц; потребляемая мощность для приборов с выходным сигналом постоянного тока 0–5 мА – 5 В·А, для приборов с выходным сигналом постоянного тока 0–20 и 4–20 мА – 12 В·А. Сопротивление нагрузки, подключаемой на входе манометров с учетом линии связи, не более 2,5 кОм при верхнем значении выходного сигнала 5 мА и не более 1 кОм при верхнем значении выходного сигнала 20 мА.

Приборы предназначены для работы при температуре окружающего воздуха от 5 до 60 °С и относительной влажности до 98%. По требованию заказчика приборы могут поставляться для работы при температуре окружающего воздуха от –30 до +60 °С.

Габаритные размеры 225×160×266 мм; масса 4 кг.

Исполнение: для нормальных условий. экспортное, тропическое. Изготовитель – Казанское ПО "Теплоконтроль".

Блок регулирующий аналоговый РБА-П

Блок предназначен для формирования сигнала рассогласования и его динамического преобразования в соответствии с П-, ПИ-, ПИД-законом регулирования с ограничением выходного сигнала по верхнему и нижнему уровням.

Входные сигналы постоянного тока: 0–5, 0–20, 4–20 мА; 0–10 В.

Выходные сигналы постоянного тока: (–10)–(+10) 0–10 В; 0–5, 0–20, 4–20 мА.

Потребляемая мощность 15 В·А.

Габаритные размеры 80×160×537 мм; масса 6 кг.

Блок входит в состав агрегатного комплекса аналоговых электрических средств регулирования (АКЭСР), построен по модульному принципу на базе интегральных микросхем. Блоки устанавливаются в закрытых помещениях при температуре окружающего воздуха от 5 до 50 °С и относительной влажности до 80%. Окружающая среда не должна содержать агрессивных паров и газов.

Изготовитель – ПО "Геофизприбор", г. Ивано-Франковск.

Блок регулирующий аналоговый с непрерывным входным сигналом Р17

Блок предназначен для выполнения следующих функций: алгебраического суммирования и масштабирования до четырех входных унифицированных сигналов постоянного тока. Блок обеспечивает формирование по выбору П-, ПД-, ПИ- или ПИД-закона регулирования, двустороннее регулируемое ограничение выходного сигнала, демпфирование сигнала отклонения, безударное переключение режимов работы и ручное управление выходным сигналом, введение сигнала задания, формирование сигнала отклонения. Выходные сигналы постоянного тока 0–5, 0–20, 4–20 мА и 0÷10 В. Коэффициент пропорциональности 0,3–100.

Постоянная времени интегрирования в зависимости от исполнения 20–2000, 5–500, 0,5–50 с. Постоянная времени дифференцирования 0–600; 0–100 или 0–10 с. Постоянная времени демпфирования 0–10 с. Потребляемая мощность 15 В·А.

Габаритные размеры 60×160×550 мм; масса 5 кг.

Блок входит в комплекс регулирующих и функциональных блоков на микроэлектронной базе "Каскад-2". Питание блока осуществляется переменным током 220 В частотой 50 или 60 Гц. Блок выпускается в приборном исполнении, предназначен для утопленного щитового монтажа на вертикальной плоскости в закрытых взрывозащищенных помещениях при отсутствии агрессивных компонентов. Рассчитан на работу при температуре окружающего воздуха от 5 до 50 °С и относительной влажности до 80%.

Изготовитель – Московский завод тепловой автоматики (МЗТА).

Прибор регулирующий программируемый микропроцессорный ПРОТАР

Прибор ПРОТАР предназначен для применения в автоматизированных системах управления технологическими процессами. Прибор используется в схемах стабилизации технологических параметров, программного, каскадного, многосвязного регулирования с реализацией сложных алгоритмов обработки информации.

Прибор ПРОТАР разработан с целью замены комплекса "Каскад-2" и аналогичных комплексов.

ПРОТАР является свободно программируемым многофункциональным прибором. В число функций, выполняемых прибором, входят: регулирование по П-, ПД-, ПИ- или ПИД-закону, масштабирование и демпфирование сигналов и т.д.

Благодаря своей многофункциональности ПРОТАР заменяет несколько (в среднем четыре–шесть) приборов комплекса "Каскад-2".

Основой элементной базы прибора является однокристальная микроЭВМ типа КР1816ВЕ35 (КМ1816ВЕ48).

Прибор рассчитан на эксплуатацию в закрытых взрывозащищенных помещениях при температуре воздуха от 5 до 50 °С, влажности 80% при 35 °С, без примесей агрессивных паров и газов.

Прибор изготавливается в трех модификациях: ПРОТАР-100 с встроенным пультом оператора; ПРОТАР-110 с выносным пультом и ПРОТАР-110 без пульта управления.

Аналоговые входные сигналы прибора (по выбору): 0–5, 0(4)–20 мА, 0–10, 0–2, 0–10, 0–1 В.

Входное сопротивление (соответственно сигналам): 400, 100, $2 \cdot 10^4$ Ом, 10^5, 10^5, 10^5.

Выходной аналоговый сигнал 0÷10 В, сопротивление нагрузки 2 кОм.

Габаритные размеры приборов:

ПРОТАР-100 370 × 120 × 60, ПРОТАР-110 373 × 120 × 60 мм.

Масса приборов:

ПРОТАР-100 2, 6, ПРОТАР-110 (с пультом оператора) 3,1 кг.

Изготовитель МЗТА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агрегаты** тиристорные диодные серии ТДП-2 и станции управления пуском типа ШДУ для электроприводов по схеме асинхронно-вентильного каскада: 08.06.02–81. М.: Информэлектро, 1982.

2. **Александров Н.А., Краснов В.Е., Роговой В.И.** Асинхронные двигатели частотно-регулируемых электроприводов//Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 231–240.

3. **Бару А.Ю., Эпштейн И.И., Пак В.Н.** Преобразователи частоты для канализационных насосных станций//Водоснабжение и санитарная техника. 1986. № 3.

4. **Белозоров Н.П., Луговской М.В.** Расчет систем водоснабжения с применением вычислительной техники. М.: Колос, 1973.

5. **Брежнев В.И.** Эксплуатация водопроводных сетей/МКХ РСФСР. М., 1963.

6. **Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С.** Электрические машины. М.: Высшая школа, 1987. Ч. 1, 2.

7. **Вешеневский С.Н.** Характеристики двигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977.

8. **Водоснабжение** Москвы (в вопросах и ответах). М.: Московский рабочий, 1983.

9. **Гинзбург Я.Н., Лезнов Б.С.** Современные методы регулирования режимов работы систем водоснабжения крупных городов. М.: ГОСИНТИ, 1976.

10. **Гинзбург Я.Н., Лезнов Б.С., Чебанов В.Б.** Внедрение автоматизированных систем регулируемого электропривода в насосные установки//Автоматизация и управление системами водоснабжения и водоотведения. М., 1986. (Тр. ВНИИВОДГЕО).

11. **Гинзбург Я.Н., Чебанов В.Б.** Система оптимального управления насосными станциями подкачки//Автоматизация и управление процессами очистки и транспорта воды. М., 1988. (Тр. ВНИИВОДГЕО).

12. **Глезер А.Л.** Определение величины электроэнергии, расходуемой насосом, подающим воду в сеть//Водоснабжение и санитарная техника. 1978. № 4.

13. **Динамические** насосы для сточных жидкостей. Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1986.

14. **Дмитриенко Ю.А.** Регулируемый электропривод насосных агрегатов. Кишинев: Штиинца, 1985.

15. **Загорский А.Е.** Электродвигатели переменной частоты. М.: Энергия, 1975.

16. **Карелин В.Я., Минаев А.В.** Насосы и насосные станции. М.: Стройиздат, 1986.

17. **Контаутас Р.К.** Исследование и разработка методов регулирования систем городского водоснабжения: Автореф. дис. . . . канд. техн. наук. М., 1982.

18. **Контаутас Р.К.** Электропривод для насосных станций//Жилищное и коммунальное хозяйство. 1985. № 8.

19. **Корнопелев В.А., Казарян В.Л., Яновский Ю.Г.** Восстановление и защита трубопроводов от коррозионных обрастаний как средство интенсификации работы сети//Интенсификация действующих систем водоснабжения на основе внедрения новой техники и технологии. М.: МДНТП, 1986.

20. **Крупные** центробежные и осевые насосы/И.И. Киселев, А.Л. Герман, Л.М. Лебедев и др. М.: Машиностроение, 1977.

21. **Кузнецов О.В., Цыборовский Л.Н.** Подбор насосного оборудования//Экспресс-информация. Серия ХМ-4. № 6. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1981.

22. **Лезнов Б.С.** Экономичное регулирование режимов работы канализационных насосных станций/Ред. журн. Водоснабжение и санитарная техника. М., 1983. Деп. в ВНИИС, № 4651.

23. **Лезнов Б.С., Лезнов С.И.** Справочник молодого машиниста насосных станций. – 2-е изд. М.: Агропромиздат, 1985.

24. **Лезнов Б.С., Воробьева Н.П.** Снижение материалоемкости и стоимости насосных станций//Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 1.

25. **Лезнов Б.С., Чебанов В.Б., Контаутас Р.К.** Регулирование насосных агрегатов с рекуперацией энергии скольжения//Водоснабжение и санитарная техника. 1986. № 9.

26. **Лезнов Б.С., Чебанов В.Б., Чурганов А.В.** Регулирование режимов работы канализационной насосной установки//Водоснабжение и санитарная техника. 1985. № 4.

27. **Лейбзон Я.И.** Монтаж и эксплуатация контактных и бесконтактных муфт скольжения. М.: Энергия, 1978.

28. **Лобачев П.В.** Современные средства измерения расхода жидкости//Интенсификация действующих систем водоснабжения на основе внедрения новой техники и технологии. М.: МДНТП, 1986.

29. **Методика** (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рацпредложений. М.: Экономика, 1977.

30. **Методические** рекомендации по приближенному расчету эффективности применения регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения. М.: ВИЭСХ, 1980.

31. **Москаленко В.В.** Современные системы автоматизированного электропривода. М.: Высшая школа, 1980.

32. **Нормы** амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР. М.: Экономика, 1974.

33. **Онищенко Г.Б., Локтева И.Л.** Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979.

34. **Попов В.С., Кузьмина Т.А.** Автоматическое регулирование производительности насосных агрегатов в системах водоснабжения и очистки сточных вод нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий//М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1972.

35. **Пособие** по проектированию автоматизации и диспетчеризации систем водоснабжения (к СНиП 2.04.02–84)//М.: ЦИТП, 1985.

36. **Предложения,** премированные на 42-м Всесоюзном конкурсе по экономии электрической и тепловой энергии//Промышленная энергетика. 1988. № 1.

37. **Преобразователи** частоты серий ТТЕ, ТТП//ЛК 05.70.02.86. Информэлектро. Изготовитель ПО "Преобразователь". М.: 1986.

38. **Прейскурант № 09–01.** Тарифы на электрическую и тепловую энергию, отпускаемую энергосистемами и электрическими станциями//Министерства энергетики и электрификации СССР. М.: Прейскурантиздат, 1990.

39. **Рациональное** использование воды и топливно-энергетических ресурсов в коммунальном хозяйстве//Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара. М.: НТО коммунального хозяйства и бытового обслуживания, 1985.

40. **Рекомендации** по применению регулируемого электропривода в системах автоматического управления водопроводных и канализационных насосных установок. М.: ВНИИВОДГЕО, 1987.

41. **Руднев С.С., Гейнц В.Г., Жуковский Р.И.** Регулирование лопастных насосов//Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 7.

42. **Сандлер А.С., Сарбатов Р.С.** Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974.

43. **Свищов А.П., Скотников Ю.А.** Пути устранения потерь воды в жилых зданиях//Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 1.

44. **Туркин А.Н.** Гидромуфты питательных насосов тепловых электростанций. М.: Энергия, 1974.

45. **Центробежные** насосы двухстороннего входа. Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1982.

46. **Цыпина Г.С., Чичеров В.В.** Методика определения затрат на электроэнергию систем водоснабжения и канализации на предпроектных станциях//Стр-во и архитектура. Инженерное обеспечение объектов стр-ва. Серия 9. Экспресс-информация. Вып. 5. М.: ВНИИС, 1986.

47. **Чебанов В.Б.** Стабилизация уровня в приемных резервуарах канализационных насосных станций//Автоматизация и управление систем водоснабжения и водоотведения. М., 1986. (Тр. ВНИИВОДГЕО).

48. **Шевелев А.Ф., Яновский Ю.Г.** Методы защиты от коррозии действующих водопроводов//Водоснабжение и санитарная техника. 1988. № 1.

49. **60** лет ленинского плана ГОЭЛРО: Сб. статей/Под ред. П.С. Непорожнего. М.: Энергия, 1980.

50. **Электрические** нагрузки промышленных предприятий/С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн и др. Л.: Энергия, 1971.

51. **Электроприводы** тиристорные асинхронных серии ЭТА1-01. Отраслевой каталог. 08.4. Чебоксары, 1987.

52. **Reheis H.F.** Energy conservation in municipal water systems. OpFlow, Denver. USA. 1984.

53. **Scharpenberg H., Strreck A.** Die untersynchrone Stromrichterkaskade für grosse Kreiselpumpen//Brown Boveri Mitteilungen. 1982. Vol. 69. No 4/5. P. 142–150.

54. **Электропривод** переменного тока с индукторной муфтой скольжения: 0.8.99.04–69. М.: Информэлектро, 1969.

55. **Гейнц В.Г.** Как определить величину обточки рабочего колеса центробежного насоса // Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 6.

56. **Гейнц В.Г.** Затыловка лопаток рабочих колес центробежных насосов эффективна //Водоснабжение и санитарная техника. 1990. № 6.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Глава 1. **Общие сведения о насосных установках и режимах их работы** 5
1. Насосы и насосные установки 5
2. Оборудование насосных установок 9
3. Режимы работы насосов и насосных установок 14
Глава 2. **Энергопотребление насосных установок** 22
4. Потребление электроэнергии основными насосными агрегатами 22
5. Потребление электроэнергии вспомогательными системами 28
6. Расход электроэнергии на хозяйственно-бытовые нужды 29
7. Баланс энергопотребления 31
Глава 3. **Потери электроэнергии в насосных установках** 32
8. Расход электроэнергии, связанный с нерациональным повышением напора 32
9. Затраты электроэнергии на перекачку утечек и непроизводительных расходов воды 42
10. Потери электроэнергии при работе насосов в режиме, не соответствующем их номинальным параметрам 43
Глава 4. **Снижение потерь электроэнергии в насосных установках** 45
11. Правильный выбор оборудования – основа устранения потерь электроэнергии 45
12. Экономичные способы регулирования режимов работы насосных установок 50
13. Контроль и устранение износа оборудования как средство экономии электроэнергии 70
Глава 5. **Регулируемый электропривод насосных агрегатов** 73
14. Регулируемый электропривод как основа систем управления режимом работы насосных установок 73
15. Регулирование частоты вращения электродвигателей 75
16. Регулируемые электроприводы с вариаторами частоты вращения 90
Глава 6. **Современные системы регулирования режимов работы насосных установок** 97
17. Стабилизация напора в системе подачи жидкости 97
18. Стабилизация уровня в резервуарах 105
19. Опыт применения регулируемого электропривода в насосных установках 110
20. Технико-экономическая эффективность применения регулируемого электропривода в САУ насосных установок 120
21. Рекомендации по применению САУ с регулируемым электроприводом в насосных установках 125
Приложения 128
Список литературы 143

Производственно-практическое издание

Лезнов Борис Семенович

ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В НАСОСНЫХ УСТАНОВКАХ

Редактор *Э.Н. Полякова*
Художник обложки *Б.Н. Тумин*
Художественный редактор *Т.Н. Хромова*
Технический редактор *Н.М. Брудная*
Корректор *Н.И. Курдюкова*
ИБ № 3093

Набор выполнен в издательстве. Подписано в печать с оригинала-макета 26.12.90. Формат 60 x 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 8,82. Усл. кр.-отт. 9,06. Уч.-изд. л. 9,46. Тираж 11000 экз. Заказ 6149. Цена 45 к.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО "Первая Образцовая типография" Государственного комитета СССР по печати. 113054, Москва, Валовая ул., 28.