

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

*Председатель
Л.А. ПУЧКОВ*

*президент МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*Зам. председателя
Л.Х. ГИТИС*

*директор
Издательства МГГУ*

*Члены редсовета
А.П. ДМИТРИЕВ*

академик РАЕН

Б.А. КАРТОЗИЯ

академик РАЕН

А.В. КОРЧАК

академик МАН ВШ

М.В. КУРЛЕНЯ

академик РАН

В.Н. ОПАРИН

*чл.-корр. РАН,
директор ИГД СО
РАН*

В.И. ОСИПОВ

академик РАН

В.Л. ПЕТРОВ

академик МАН ВШ

А.Д. РУБАН

*чл.-корр. РАН,
зам. директора
ИПКОН РАН*

Э.М. СОКОЛОВ

академик МАН ВШ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

академик РАН

В.А. ЧАНТУРИЯ

академик РАН

В.Н. Фашиленко

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
НАСОСНЫХ
И ВЕНТИЛЯТОРНЫХ
УСТАНОВОК
ГОРНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по образованию в области
горного дела в качестве учебного пособия
для студентов вузов, обучающихся по специальности
«Электропривод и автоматика промышленных установок
и технологических комплексов» (квалификация —
горный инженер) направления подготовки
«Электротехника, электромеханика
и электротехнологии»*



**МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»**

2011

УДК 62-83:622.63:622.53
ББК 31.291:31.56:31.76
Ф 12

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253—03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124—94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д. 012634.11.10

Экспертиза проведена Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела (письмо № 51-37/6 от 09.04.2009)

Рецензенты:

- д-р техн. наук, проф. *М.С. Еришов* (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина);
- канд. техн. наук, проф. *А.Д. Яризов* (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина);
- д-р техн. наук, проф. *Ю.В. Шевырев* (РГГУ)

Фащиленко В.Н.

Ф 12 Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. — 260 с.: ил.

ISBN 978-5-98672-189-7 (в пер.)

Изложены принципы построения систем регулируемого электропривода центробежных машин, применяемых в горном производстве. Рассмотрены способы оптимального управления по динамическим и точностным параметрам электроприводами переменного тока насосных и вентиляторных установок. Приведены методики расчета параметров разомкнутых и замкнутых систем управления. Даны примеры расчетов как рабочих характеристик насосов и вентиляторов, определяющих свойства электроприводов, так и статических характеристик регулируемых электроприводов. Предложены модели насосных и вентиляторных агрегатов в среде MatLab с использованием средств визуального моделирования Simulink для исследования электромеханических процессов, происходящих в центробежных машинах.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (квалификация — горный инженер) направления подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Может быть полезно специалистам, занятым разработкой, внедрением и эксплуатацией электроприводов вентиляторных и насосных установок.

УДК 62-83:622.63:622.53
ББК 31.291:31.56:31.76

ISBN 978-5-98672-189-7

© В.Н. Фащиленко, 2011
© Издательство «Горная книга», 2011
© Дизайн книги. Издательство «Горная книга», 2011

ВВЕДЕНИЕ

Система регулируемого электропривода в насосных установках применяется в тех случаях, когда необходимо привести в соответствие режим работы насоса с режимом работы водопроводной сети. Водопотребление большинства потребителей непрерывно изменяется во времени по случайно-вероятностным законам. Диапазон изменения водопотребления довольно широк, колеблется в пределах 1,2:1—1,5:1. Чтобы отслеживать эти изменения, необходимо непрерывно регулировать режим работы насосной установки.

Процесс регулирования осложнен несоответствием характеристик центробежных насосов и трубопроводов. Для увеличения подачи воды по трубопроводу напор на насосной станции необходимо увеличивать, однако характеристики центробежных насосов таковы, что напор падает при увеличении подачи. При уменьшении же подачи воды напор увеличивается. Поэтому в периоды уменьшенного водопотребления система работает с избыточным напором и его приходится гасить на задвижках и дросселирующих устройствах. Это приводит к избыточному потреблению электроэнергии, возникновению прорывов труб и дополнительным утечкам. Замечено, что наиболее часто аварии, связанные с прорывом труб в коммунальной сфере, случаются в ночное время, когда резко падает водопотребление.

Аналогичные процессы происходят в вентиляторных установках. Характеристики вентиляторов по своему виду похожи на характеристики насосов, а характеристики воздуховодов — характеристикам трубопроводов системы водоснабжения. Поэтому в вентиляторных установках тоже имеется несоответствие между характеристиками вентиляторов и воздуховодов.

Несоответствие характеристик можно устранить различными способами. Наибольшее распространение получила система регулирования частоты вращения насосов и вентиляторов средствами регулируемого электропривода из-за его высокой энерго-

эффективности. Частота вращения насосов должна регулироваться в соответствии с водопотреблением, а вентиляторов в соответствии с воздухопотреблением. При уменьшении частоты вращения уменьшается подача и развиваемый напор (давление). При увеличении частоты вращения напор (давление) увеличивается одновременно с увеличением подачи.

Энергетическая эффективность при изменении частоты вращения рабочих колес турбомашин доказана давно, однако на вопросы энергосбережения в отечественных насосных и вентиляторных установках длительное время не обращали серьезного внимания. Этому способствовали два основных фактора: низкие тарифы на электроэнергию и низкая надежность энергосберегающего оборудования. Положение существенно изменилось в 70-х годах прошлого столетия, когда разразился мировой энергетический кризис. В результате выявилась истинная ценность энергетических ресурсов и появилась возможность создания достаточно надежных регулируемых электроприводов с полупроводниковой техникой и систем управления на базе микроконтроллеров и микропроцессорной техники.

В настоящее время горная промышленность использует регулируемые электропривода насосных установок в основном для процессов обогащения полезных ископаемых, в оборотных системах водоснабжения, для подачи чистой воды, как для населения градообразующих предприятий, так и для технологических нужд. Здесь используется система автоматического управления со стабилизацией давления в трубопроводе и стабилизацией уровня в зумпфах для гидротранспорта. В некоторых случаях отмечено применение регулируемых электроприводов в системах водоотлива шахт, рудников и карьеров со стабилизацией уровня в водосборных зумпфах.

Регулируемые электропривода вентиляторных установок используются в системах проветривания тупиковых выработок, калориферных установках для обогрева шахтных стволов в холодное время года, калориферных установках для обогрева производственных помещений, воздуходувок в котельных для сжигания топлива и т.д.

ГЛАВА 1

**РЕЖИМЫ
РАБОТЫ
ТУРБОМАШИН**

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАСОСНЫХ, ВЕНТИЛЯТОРНЫХ И КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВКАХ

1.1.1. Насосные установки

Гидравлическая машина, создающая напорное перемещение жидкости при сообщении ей энергии, называется *насосом*. Насос в совокупности с электроприводом и передаточным механизмом образует *насосный агрегат*. Комплекс оборудования, обеспечивающий работу насосов в требуемом режиме, состоящей из насосных агрегатов, трубопроводов, запорной или регулирующей арматуры, аппаратуры управления и защиты образуют *насосную установку*.

Основными параметрами, характеризующими режим работы насосной установки, являются напор (давление) и подача.

Давление — это разность удельных энергий жидкости в напорном и всасывающем патрубках насоса, необходимая для подъема жидкости на заданную высоту и для преодоления сил трения в трубопроводе. В настоящее время используются различные единицы измерения давления. Соотношения между единицами измерения давления приведены в табл. 1.1.

Подача — это объем жидкости, перекачиваемой насосной установкой за единицу времени ($\text{м}^3/\text{час}$, $\text{м}^3/\text{мин}$, $\text{м}^3/\text{с}$ и т.д.).

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

На современных насосных установках получили распространение лопастные насосы: центробежные и осевые. В центробежных насосах внутри неподвижного корпуса, имеющего спиральную форму, находится рабочее колесо, закрепленное на валу. Колесо состоит из двух дисков, между которыми расположены лопасти. Корпус насоса соединен с всасывающим и напорным трубопроводами с помощью патрубков. 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.

Таблица 1.1

Таблица соотношений между единицами измерения давления

Единицы измерения	кПа	бар	кгс/см ²	м вод.ст. (при 4 °С)	мм рт.ст.	атм
кПа	1	10 ⁻²	1,0197·10 ⁻²	0,101972	7,50062	0,9869·10 ⁻²
бар	100	1	1,01972	10,1972	750,062	0,9869
кгс/см ²	98,0665	0,980665	1	10	735,559	0,96784
м вод.ст. (при 4 °С)	9,80665	9,8066·10 ⁻²	0,1	1	73,5559	9,6784·10 ⁻²
мм рт.ст.	0,133322	1,3332·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻²	1	1,3158·10 ⁻³
атм	101,325	1,01325	1,0332	10,3508	760	1

Рабочее колесо осевых насосов 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 жестко закрепленными лопастями рабочего колеса и с поворотными лопастями. Возможность изменения угла установки лопастей позволяет регулировать подачу и напор в широких пределах при сохранении высоких значений КПД.

Для привода насосов используются преимущественно асинхронные с короткозамкнутым ротором и синхронные двигатели переменного тока. В некоторых случаях используются асинхронные электродвигатели с фазным ротором. Электродвигатели мощностью до 400 кВт выполняются на напряжение 380 и 660 В, а выше этой мощности — на 6—10 кВ.

1.1.2. Воздуходувные машины

Воздуходувные машины служат для перемещения и сжатия воздуха и других газов. По степени сжатия воздуходувные машины подразделяются на вентиляторы, воздуходувки и компрессоры.

Вентиляторы обеспечивают подачу воздуха при сравнительно низком давлении до 1 м вод. ст. (10^4 Па). При этом сжатия и нагрева воздуха не происходит.

Воздуходувки обеспечивают подачу воздуха с давлением 0,1—3 атм (10^4 — $3 \cdot 10^5$ Па). При этом происходит сжатие и нагрев воздуха. Но воздуходувки не имеют в своем составе охлаждающих устройств, т.е. в этих машинах имеет место адиабатический процесс.

Компрессоры обеспечивают подачу воздуха с давлением 2 атм ($2 \cdot 10^5$ Па) и выше. В своем составе они имеют устройства, охлаждающие воздух, который нагревается в процессе подачи, т.е. в этой машине имеет место изотермический процесс.

Вентиляторы широко используются в системах вентиляции и кондиционирования воздуха производственных зданий, в рудниках, шахтах, тоннелях и других подземных сооружениях.

Воздуходувки применяются в металлургическом производстве — для подачи воздуха в конверторы, доменные и мартеновские печи. Как дымососы широко используются в процессах обогащения полезных ископаемых, в том числе и железных руд. В котельных воздуходувки используются для подачи воздуха в зону горения котлов и обеспечения эффективного горения углей, мазута и т.п.

Компрессоры используются для подачи сжатого воздуха в цеха промышленных предприятий, в забой горнорудных предприятий для приведения в движение отбойных молотков, перфораторов и другого пневмоинструмента. Сжатый воздух широко используется в процессах флотации и пенной сепарации при обогащении полиметаллических руд.

Воздуходувные машины имеют много общего с центробежными насосами, поскольку и в тех и других используется центробежная сила, действующая на частицы воздуха или воды,

развивающаяся при вращении рабочих колес. Рабочие характеристики воздуходушных машин имеют сходство с рабочими характеристиками насосов.

Вместе с тем имеют место существенные отличия турбо-воздудушных машин от центробежных насосов:

- насосы перекачивают воду — несжимаемую жидкость, а воздуходушные машины — сжимаемый воздух (газ);
- в насосах энергия расходуется на подъем воды и на перемещение воды по трубопроводам, в вентиляторах энергия расходуется на перемещение воздуха по воздуходушным, а в воздуходушках и компрессорах — также на сжатие воздуха;
- насосы дросселируются на напорных линиях, а воздуходушные машины (особенно мощные) — на всасывающих.

В качестве привода для воздуходушных машин, в основном, используются синхронные и асинхронные, высоковольтные и низковольтные электродвигатели. В соответствии с условиями их использования электродвигатели могут иметь открытое, закрытое, влагозащищенное, взрывобезопасное или другое исполнение, которое выбирается в зависимости от окружающей среды.

1.2. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОМАШИН И ТРУБОПРОВОДОВ (ВОЗДУШОВОДОВ)

Основные рабочие параметры турбомашин определяются их характеристиками. Характеристиками турбомашин называются зависимости основных параметров (напора H или давления p , мощности N и коэффициента полезного действия η) от подачи турбомашин Q при определенной угловой скорости рабочего колеса. На рис. 1.1 представлена напорная характеристика $Q-H$ турбомашин (1). Характеристики $Q-H$ могут быть более пологими или крутыми, непрерывно снижающимися (стабильными) или сначала возрастающими, а затем снижающимися.

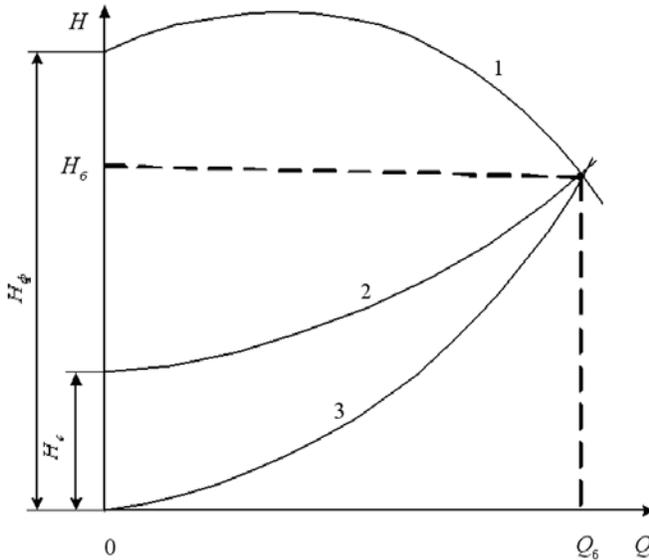


Рис. 1.1. Рабочие характеристики турбомашин:

1 — напорная характеристика; 2 — характеристика трубопровода насоса; 3 — характеристика воздуховода вентилятора

Рассмотрение характеристик показывает, что рабочие параметры турбомашин могут изменяться в широких пределах. При этом увеличение подачи влечет за собой уменьшение напора (давления), а уменьшение подачи связано с увеличением напора (давления). Характеристики $Q - H$ турбомашин в пределах рекомендуемых подач описываются уравнением участка квадратичной параболы:

$$H = H_{\phi} - S_{\phi} \cdot Q^2, \quad (1.1)$$

где H_{ϕ} — фиктивный напор (давление) при нулевой подаче; S_{ϕ} — гидравлическое фиктивное сопротивление турбомашин.

Значения фиктивного напора (давления) зависят от конструктивных параметров турбомашин. Отношение фиктивного напора к номинальному напору $H_{\phi} / H_{ном}$ дает представление о крутизне напорной характеристики турбомашин. Так как

при правильном подборе турбомашин $H_{ном} = H_б$ (где $H_б$ — базовый напор, соответствующий наибольшей базовой подаче $Q_б$), то $H_ф / H_{ном} = H_ф / H_б = H_ф^*$. Тогда относительный фиктивный напор турбомашин $H_ф^*$ определяет крутизну напорной характеристики. Для большинства наиболее распространенных центробежных насосов чистой воды относительный фиктивный напор $H_ф^* \approx 1,25$, а для грунтовых насосов $H_ф^* \approx 1,45$. Наибольшую крутизну имеют напорные характеристики осевых насосов, для которых $H_ф^* \approx 2$. Кроме того, характеристики этих насосов имеют точки перегиба на напорной характеристике.

Для большинства вентиляторов относительный фиктивный напор $H_ф^* \approx 2$, а для компрессоров $H_ф^* \approx 3$.

Зависимость между расходом жидкости через трубопровод и напором, который требуется для обеспечения этого расхода, называется характеристикой трубопровода и описывается уравнением

$$H = H_c + S \cdot Q^2, \quad (1.2)$$

где H — напор в начале трубопровода, фактически на выходе насоса; H_c — статический напор, обусловленный разностью геодезических отметок подачи и приема жидкости; S — гидравлическое сопротивление трубопровода или воздуховода; Q — расход жидкости через трубопровод или воздуха через воздуховод.

Графически характеристика трубопровода изображается отрезком параболы 2 на рис. 1.1. Характеристика воздуховода для вентиляторов отличается от характеристики трубопровода для насоса тем, что статический напор, вызванный разностью геодезических отметок, отсутствует. Поэтому характеристика воздуховода изображается отрезком параболы 3 на рис. 1.1, проходящей через начало координат. Пересечение характеристик турбомашин и трубопровода или воздуховода определяет

положение рабочей точки. Координаты этой точки в плоскости $Q-H$ соответствуют подаче и напору при данном режиме работы турбомашины и трубопровода или воздуховода.

1.3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТУРБОМАШИН

1.3.1. Режимы работы насосных установок

Режимы работы насосных установок зависят от изменения режимов водопотребления или притоков жидкостей в зумпфы, скважины и другие сборные емкости, откуда производится откачка жидкостей насосами.

Режим водопотребления характеризуется обычно суточными, месячными и годовыми графиками водопотребления. На рис. 1.2 представлен примерный суточный график водопотребления жилого многоквартирного дома.

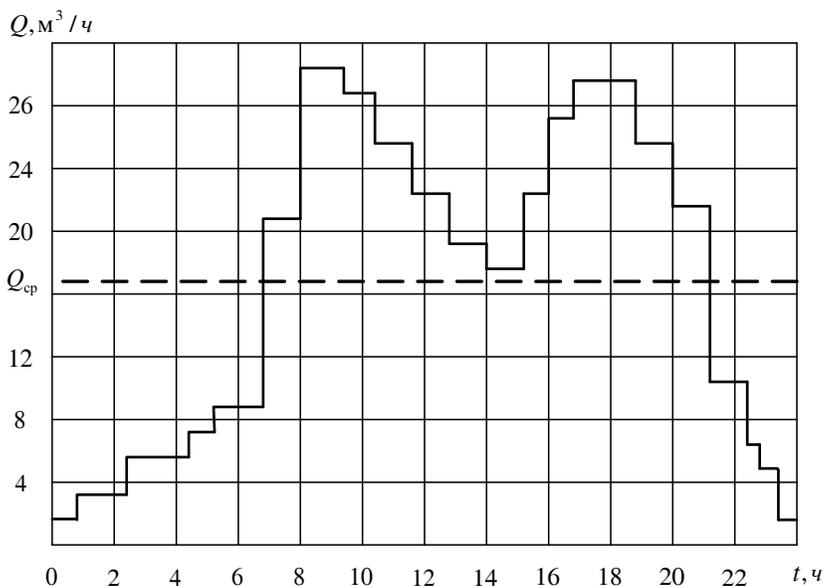


Рис. 1.2. Суточный график водопотребления

Графики водопотребления характеризуются коэффициентами неравномерности. Максимальный коэффициент неравномерности

$$K_{\max} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\text{cp}}}, \quad (1.3)$$

где Q_{\max} — максимальное водопотребление; Q_{cp} — среднее водопотребление.

Среднее водопотребление определяется по графику водопотребления графическим или аналитическим способом. При графическом способе определения среднего водопотребления необходимо чтобы суммарная площадь графика, ограниченная линиями графика, соответствовала прямоугольнику с площадью, равной площади графика, у которого основание равно рассматриваемому периоду, а высота прямоугольника равна Q_{cp} .

При аналитическом способе определения среднего водопотребления используется выражение

$$Q_{\text{cp}} = \frac{\sum_i^n Q_i \cdot t_i}{\sum_i^n t_i}, \quad (1.4)$$

где Q_i — водопотребление на i -м интервале времени t_i графика водопотребления; n — количество интервалов времени замера водопотребления.

Применительно к графику водопотребления рис. 1.2 получено среднее водопотребление $Q_{\text{cp}} = 16,8 \text{ м}^3/\text{час}$, а максимальный коэффициент неравномерности $K_{\max} = 1,69$.

Минимальный коэффициент неравномерности

$$K_{\min} = \frac{Q_{\min}}{Q_{\text{cp}}}, \quad (1.5)$$

где Q_{\min} — минимальное водопотребление. Применительно

к графику водопотребления рис. 1.2 получен минимальный коэффициент водопотребления $K_{\min} = 0,095$.

В зависимости от того, за какой период времени берется Q_{cp} , коэффициенты неравномерности могут быть часовыми, суточными или годовыми. Для большинства горнопромышленных предприятий используется период времени, равный техническому году продолжительностью 8760 часов, при котором учитываются сезонные изменения водопотребления.

В ряде случаев для анализа водопотребления используется коэффициент относительной минимальной подачи

$$\lambda = \frac{Q_m}{Q_b} = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}, \quad (1.6)$$

где Q_m — наименьшая подача насоса в системе водоснабжения; Q_b — наибольшая подача насоса в системе водоснабжения, обычно соответствует номинальной (базовой) подаче насоса.

Режимы работы насосных установок горнопромышленных предприятий определяются, главным образом, технологическим процессом предприятия, с круглосуточным графиком работы. Поэтому график водопотребления для них является более равномерным по сравнению с графиком рис. 1.2 в системе коммунального водопотребления.

1.3.2. Режимы работы воздуходувных машин

Режимы работы воздуходувных установок зависят от разнообразных природных и производственных факторов.

Режимы работы вентиляторов систем кондиционирования и вентиляции зависят преимущественно от погодных условий, сезонных колебаний температуры. От этих же причин зависят режимы работы вентиляторов градирни в системах оборотного водоснабжения горнопромышленных предприятий. Однако, в этом случае на температурные колебания, вызванные сезонными и погодными условиями, накладываются влияние технологического процесса и условия эксплуатации конкретного пред-

приятия. В этих случаях диапазон изменения подачи вентилятора изменяется от 0 до 100 % максимальной подачи воздуха.

На режим работы вентиляторов, работающих в системах проветривания подземных выработок, существенно влияет степень запыленности, загазованности и задымленности подземных выработок. В зависимости от этих факторов, а также местных природных и производственных условий диапазон подачи воздуха вентиляторными установками может изменяться от 60 до 100 % максимальной подачи воздуха.

Режимы работы воздуходувок котельных установок определяются, главным образом, режимом работы котлов. Количество подаваемого воздуха зависит от того, сколько котлов находится в работе, от согласованности температурного графика, качества топлива и атмосферного давления. Диапазон подачи воздуха в этих установках колеблется от 30 до 100 % максимальной подачи воздуха.

Режим работы компрессорных установок определяется производственным циклом цехов предприятия. Например, система подачи сжатого воздуха рудничной промплощадки подает в рабочую смену 80—100 % максимальной подачи, а в ремонтную смену подача воздуха падает до 10—15 %. На обогатительных фабриках железорудных предприятий и металлургических заводах количество сжатого воздуха, подаваемого в цеха, изменяется в диапазоне от 20 до 100 %.

Режим работы воздуходувных установок так же, как и насосных, может быть охарактеризован отношением $\lambda = Q_m / Q_0$.

1.3.3. Способы управления режимами работы насосных установок

При стабильном водопотреблении установки работают с постоянной подачей Q и напором H . Понятие напор равноценно термину давление p . Перевод единиц измерения от напора в метрах водного столба (м вод.ст.) к давлению в паскалях (Па) производится в соответствии с данными табл. 1.1. Однако, необходимо иметь в виду, что соотношения в таблице

справедливы для жидкостей с плотностью чистой воды, т.е. $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. В горной промышленности часто используется жидкая среда с отличной от чистой воды плотностью, предназначенной для перекачки насосными установками. Это может быть пульпа или концентрат в процессах обогащения. В этом случае связь между напором и давлением находят из соотношения

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g}, \quad (1.7)$$

где H — напор, м; p — давление жидкой среды насоса, Па; ρ — плотность жидкой среды, кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

С ростом водопотребления подачу приходится увеличивать. При этом увеличиваются потери давления и утечки в трубах. Чтобы компенсировать эти потери, следует увеличить подачу насоса. При уменьшении водопотребления подача и давление должны быть уменьшены. Приведение в соответствие водопотребления и подачи осуществлялось до настоящего времени чаще всего изменением числа работающих насосных агрегатов или степени открытия задвижек на напорных линиях насосных установок. В настоящее время все чаще используется способ регулирования частоты вращения рабочих колес насосов с помощью регулируемого электропривода.

На горных предприятиях очень часто жидкую среду подают на установку или потребителю от аккумулирующего резервуара, например, зумпфа. Аналогичный случай имеет место при добыче полезного ископаемого методом подземного выщелачивания. Здесь выкачивание раствора полезного ископаемого осуществляется из скважины посредством погружного насоса. В этих случаях режим работы насосной установки характерен тем, что в отдельные периоды времени подача насосной установки отличается от притока жидкой среды в аккумулирующий резервуар или скважину. Если подача насоса больше притока жидкой среды в резервуар, то уровень падает, если меньше, уровень

увеличивается. При равенстве подачи и притока уровень в резервуаре стабилизируется на одной отметке.

Особенно опасным является случай малого притока жидкой среды в резервуар при большой подаче насоса, так как при этом возможен режим сухого хода, сопровождающийся кавитационными процессами. Кавитацией называется процесс нарушения сплошности потока жидкости, который сопровождается образованием пузырьков, заполненных парами жидкости, воздуха или газа. Явление кавитации вызывает дополнительные потери энергии и разрушение поверхности рабочего колеса и корпуса насоса.

Переполнение зумпфа, возникающее при большом притоке и малой подаче насоса, также недопустимо, так как в этом случае требуются дополнительные трудозатраты, связанные с ликвидацией последствий. Кроме этого, имеются потери энергии и продукции.

Приведение в соответствие притока жидкой среды в резервуары и подачи насоса осуществляется, в случае использования нерегулируемого электропривода, посредством включения насосного агрегата при достижении жидкостью верхнего уровня и отключением, когда уровень жидкости станет минимальным. С увеличением притока жидкой среды частота включения насосных агрегатов увеличивается, продолжительность пауз уменьшается, так как при увеличении притока объем жидкости в резервуаре увеличивается быстрее. Число включений-отключений насосных агрегатов может достигать больших величин, что является недопустимым, особенно для агрегатов большой мощности. В этих случаях более предпочтительно использовать регулируемый электропривод насосных установок.

Преднамеренное изменение подачи и напора насоса, в соответствии с изменяющимся режимом работы системы, называется регулированием. Центробежные насосы регулируются путем изменения степени открытия задвижки на напорной линии или путем изменения частоты вращения рабочих колес.

Прикрывая или открывая задвижку, изменяют крутизну характеристики трубопровода (рис. 1.3), которая зависит от его

гидравлического сопротивления. Прикрывая задвижку, увеличивают крутизну характеристики трубопровода, при этом рабочая точка насоса I перемещается в положение II . В этом случае подача уменьшается до значения Q_2 , напор, развиваемый насосом, возрастает до значения H_2 , а напор на трубопроводе за задвижкой снижается до значения H'_2 . Снижение напора за задвижкой происходит за счет потерь напора ΔH в задвижке.

Увеличивая степень открытия задвижки, уменьшают крутизну характеристики трубопровода. Вследствие этого подача увеличивается, напор, развиваемый насосом, уменьшается, а напор в трубопроводе за задвижкой возрастает. Этот способ регулирования, именуемый дросселированием, считается малоэкономичным, так как на преодоление дополнительного гидравлического сопротивления в затворе требуются дополнительные затраты энергии. Более экономичным способом регулирования является изменение частоты вращения насосов.

Вместе с этим необходимо отметить, что в ряде случаев невозможно регулировать режимы работы центробежных насосов без дросселирования. Это касается тех случаев, когда трубопровод проложен по пересеченной местности. Например, жидкость подается от насосной установки по трубопроводу вначале на возвышенность, а после возвышенности вниз по склону к потребителю. При этом у потребителя наблюдается повышенное давление, которое можно снизить только за счет дросселирования и регулируемый электропривод в данном случае не обеспечит необходимый режим работы системы водоснабжения.

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

Увеличение частоты вращения рабочего колеса увеличивает подачу и напор насоса, а также напор в сети. Этот способ

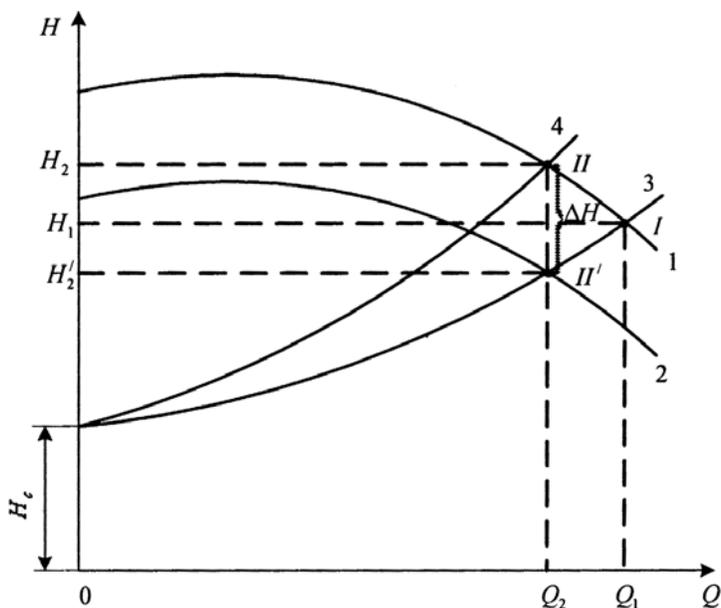


Рис. 1.3. Регулирование режима работы центробежного насоса: 1 — характеристика насоса при номинальной частоте вращения; 2 — то же при уменьшении частоты вращения; 3 — характеристика трубопровода при полном открытии задвижки; 4 — то же при уменьшении степени открытия затвора

регулирования более экономичен по сравнению с дросселированием, но требует применения специального регулируемого электропривода.

Режимы работы осевых насосов регулируют обычно поворотом лопастей рабочих колес. Механизм поворота лопастей имеет ручной, электрический или гидравлический привод. При ручном приводе угол поворота изменяется только при неработающем двигателе. Наличие электрического или гидравлического привода позволяет регулировать подачу осевого насоса за счет поворота лопастей без остановки насоса. 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.

1.3.4. Способы управления режимами работы вентиляторных установок

Из принципа подобия турбомашин [13] (насосов, вентиляторов, воздуходувок, компрессоров), вытекают общие свойства функционирования этих установок. Поэтому способы регулирования режимов работы вентиляторов принципиально не отличаются от способов регулирования насосов. Однако конкретные условия работы этих машин различны, режимы потребления воздуха существенно отличаются от режимов водопотребления. Вентиляторы, в отличие от насосов, перекачивают воздух и другие сжимаемые газы, в то время, как вода и другие жидкости являются несжимаемыми. Эти обстоятельства необходимо учитывать при выборе способов регулирования режимов работы вентиляторных установок.

Принципиально режимы работы вентиляторов регулируются теми же способами, что и насосы. Чаще всего в вентиляторных установках используются следующие способы:

- дросселирование воздушного потока на всасывающей линии установки с помощью заслонок и задвижек;
- закручивание входящего в рабочее колесо воздуха с помощью специальных направляющих аппаратов, диффузоров и прочих устройств;
- ступенчатое регулирование частоты вращения рабочего колеса механическим или электромашинным способом (изменением числа пар полюсов многоскоростного электродвигателя);
- плавное регулирование частоты вращения рабочего колеса средствами регулируемого электропривода.

Используются в вентиляторных установках и комбинированные способы регулирования режимов их работы, например, закручивание потока воздуха с помощью осевого направляющего аппарата и изменение частоты вращения многоскоростным электродвигателем.

ГЛАВА 2

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
ТУРБОМАШИН**

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

С энергетической точки зрения наиболее эффективным способом согласования режимов подачи турбомашин и потребления жидкости или воздуха является регулирование частоты вращения рабочих колес. Частота вращения может быть изменена различными способами, однако для построения систем автоматического управления насосными и вентиляторными установками наиболее удобным и эффективным является регулируемый электропривод различного вида. Электропривод состоит из приводного электродвигателя, передаточного механизма (трансмиссии, гидравлической или электромагнитной муфты, редуктора и др.) и системы управления. В регулируемый электропривод входят также устройства, обеспечивающие изменение частоты вращения агрегата. Эти устройства выполняют функции преобразования электрической энергии (преобразовательные устройства) и являются элементами системы управления. В целом замкнутая система управления может быть построена как по принципу подчиненного регулирования координат, так и с суммирующим усилителем. Практика использования систем управления насосными и вентиляторными установками средствами регулируемого электропривода показывает, что наибольшее распространение получила одноконтурная система управления с отрицательной обратной связью, замкнутой по регулируемой координате на ПИ (пропорционально-интегральный) регулятор или ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) регулятор.

Регулируемый электропривод подразделяется на две основные группы: постоянного и переменного тока. В современном электроприводе постоянного тока питание электродвигателей постоянного тока с параллельным или независимым возбуждением осуществляется от тиристорных преобразователей. В конструкции электродвигателя постоянного тока имеется коллектор и щеточный аппарат, что усложняет их эксплуатацию,

поэтому широкого распространения в насосных и вентиляторных установках электропривода постоянного тока не получили. Тем не менее, за рубежом такие электродвигатели в отдельных случаях использовались в насосных агрегатах мощностью до 800 кВт.

В отечественной практике для насосов и вентиляторов в качестве приводных используются только асинхронные и в меньшей степени синхронные электродвигатели. Насосные и вентиляторные установки малой и средней мощности обычно оснащаются асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором. В мощных насосных установках часто используются синхронные двигатели, а в вентиляторных — асинхронные электродвигатели с фазным ротором, особенно для вентиляторов главного проветривания шахт и рудников. Для вентиляторов градирен и вертикальных насосов изредка используются низковольтные двух- и четырехскоростные асинхронные электродвигатели мощностью до 160 кВт и двухскоростные высоковольтные асинхронные электродвигатели серии ДВДА напряжением 6 кВ, мощностью от 500 до 1400 кВт.

Угловая скорость асинхронного электродвигателя определяется выражением

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_1(1-s)}{p_n}, \quad (2.1)$$

где f_1 — частота тока питающей сети; s — скольжение асинхронного электродвигателя; p_n — число пар полюсов электродвигателя.

Выражение (2.1) определяет способы регулирования угловой скорости (частоты вращения) асинхронного электродвигателя:

- изменением частоты тока в статорной цепи асинхронного электродвигателя, для чего используются преобразователи частоты;
- изменением скольжения асинхронного электродвигателя, для чего используются каскадные схемы с противо-ЭДС в роторной цепи;

- изменением числа пар полюсов, для чего используются схемы переключения статорных обмоток асинхронного электродвигателя, позволяющие изменять число пар полюсов.

Кроме вышеназванных способов регулирования, применяется параметрическое управление, заключающееся в изменении напряжения в статорной цепи асинхронного электродвигателя. Для этого способа применяются тиристорные регуляторы напряжения. Параметрический способ регулирования возможен для применения в насосных агрегатах с небольшим диапазоном регулирования скорости.

В последнее десятилетие все большее распространение начинают получать вентильные электродвигатели большой мощности на базе синхронной машины, в частности и для турбомашин. Наличие в составе вентильного электродвигателя преобразователя частоты позволяет отнести его к группе частотно-регулируемых электроприводов.

2.2. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Регулирование скорости асинхронного и синхронного электродвигателя изменением частоты питающего напряжения является наиболее экономичным и эффективным. При частотном регулировании скольжение асинхронной машины, независимо от диапазона регулирования, поддерживается сравнительно небольшим и потери в электродвигателе невелики. Частотно-регулируемый электропривод не уступает электроприводу постоянного тока, как по статическим, так и по динамическим свойствам. Если при этом учесть, что асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в 1,5—2 раза легче и в 3 раза дешевле, чем аналогичный двигатель постоянного тока, то становится очевидной высокая эффективность использования асинхронных электроприводов с частотным управлением.

При работе преобразователя частоты на асинхронную и синхронную машину, кроме регулирования частоты, возни-

кает необходимость регулирования напряжения в статорной цепи. Это связано с тем, что при изменении частоты магнитный поток электрической машины будет изменяться обратно пропорционально частоте питания. Таким образом, при снижении частоты ниже номинальной поток возрастает, что приводит к насыщению магнитопровода и резкому возрастанию намагничивающего тока. Возрастание же частоты при неизменном напряжении приводит к недоиспользованию электродвигателя.

Академиком М.П. Костенко был сформулирован закон частотного регулирования: «Если сконструировать асинхронный двигатель для частоты f_n , момента M_n и напряжения на зажимах U_n и изменять затем при частоте f и моменте M напряжение U таким образом, чтобы всегда было удовлетворено соотношение

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} \sqrt{\frac{M}{M_n}}, \quad (2.2)$$

то двигатель будет работать при практически неизменном коэффициенте устойчивости, неизменном $\cos \varphi$, постоянном абсолютном скольжении и коэффициенте полезного действия, зависящем только от изменения частоты и не зависящем от изменения момента на валу, если насыщение магнитной системы не слишком велико».

Правила регулирования асинхронных и синхронных электродвигателей при изменении частоты питающего тока приведены в табл. 2.1.

В настоящее время используются тиристорные и транзисторные преобразователи частоты, применяемые в регулируемых электроприводах с асинхронными и синхронными двигателями, которые можно разделить на три группы:

- непосредственные преобразователи частоты (НПЧ);
- двухзвенные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения (ПЧ с АИН);

- двухзвенные преобразователи частоты с автономным инвертором тока (ПЧ с АИТ).

Таблица 2.1

Правила частотного регулирования

Закон частотного регулирования	M/M_n	U/U_n	P/P_n	Φ/Φ_n	I/I_n
Постоянная мощность $M = M_n (f_n / f)$	f_n / f	$\sqrt{f / f_n}$	const	$\sqrt{f_n / f}$	$\sqrt{f_n / f}$
Постоянный момент $M = M_n = \text{const}$	const	f / f_n	f / f_n	const	const
Вентиляторный закон $M = M_n (f / f_n)^2$	$(f / f_n)^2$	$(f / f_n)^2$	$(f / f_n)^3$	f / f_n	f / f_n

Двухзвенные преобразователи частоты имеют промежуточный контур постоянного напряжения или тока.

Для насосных и вентиляторных установок малой и средней мощности получил применение асинхронный, а большой мощности — синхронный частотно-регулируемый электропривод. Развитие полупроводниковой техники и микроэлектроники позволило электротехнической промышленности создать преобразователи частоты для асинхронных и синхронных электроприводов (системы ПЧ-АД и ПЧ-СД, в общем случае ПЧ-Д) с качеством регулирования, не уступающим электроприводам постоянного тока. Современные системы частотно-регулируемых электроприводов обладают высокими энергетическими показателями, глубоким диапазоном регулирования, их можно использовать с различными структурами управления.

Наибольшее распространение получили преобразователи частоты со звеном постоянного тока (двухзвенные преобразователи частоты), содержащий управляемый или неуправляемый выпрямитель (первое звено) и автономный инвертор (второе звено). В случае использования управляемого выпрямителя в качестве первого звена, этим устройством осуществляется функция формирования выходного напряжения ПЧ или защитные функции. Если используется неуправляемый выпрямитель, то функция формирования выходного напряжения возлагается на

автономный инвертор. Кроме этого автономный инвертор формирует выходную частоту ПЧ как в случае с управляемым, так и неуправляемым выпрямителем. Управление напряжением и частотой в преобразователях частоты создает возможность формирования различных законов частотного регулирования.

Различают два вида преобразователей частоты со звеном постоянного тока: с автономным инвертором тока (ПЧ-Д с АИТ) и автономным инвертором напряжения (ПЧ-Д с АИН). Преобразователи частоты с автономным инвертором тока (рис. 2.1) содержат управляемый выпрямитель и инвертор, выполненный на запираемых тиристорах типа ГТО, за счет чего добиваются высокого коэффициента мощности, практически равный единице. Наиболее часто преобразователи частоты с автономным инвертором тока используют для высоковольтных синхронных электроприводов насосных установок, как это показано на рис. 2.1. Основными достоинствами ПЧ-Д с АИТ являются: возможность рекуперации энергии в сеть; близкое к синусоидальному выходное напряжение; безаварийность режима КЗ по выходу. К недостаткам следует отнести: ограниченность верхнего диапазона регулирования выходной частоты (обычно $f_{\max.вых} = 70$ Гц); коммутационные перенапряжения на тиристорах АИТ, которые возрастают с увеличением частоты.

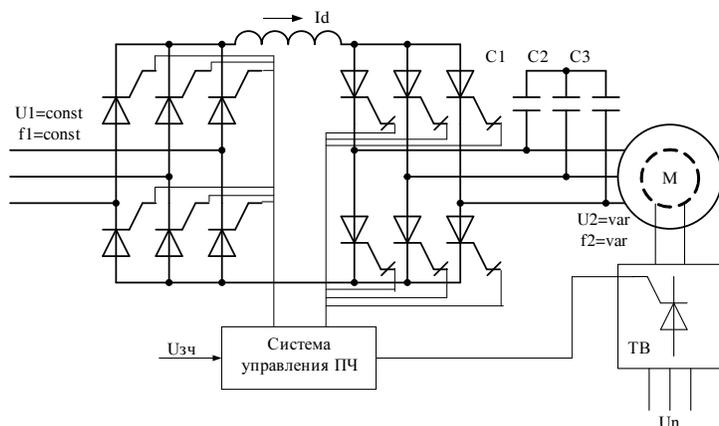


Рис. 2.1. Частотно-регулируемый синхронный электропривод с преобразователем частоты на базе автономного инвертора тока

Преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения (рис. 2.2) содержат неуправляемый выпрямитель и инвертор, выполненный на силовых полевых транзисторах модульного исполнения типа IGBT. Транзисторный вариант позволяет формировать синусоидальное напряжение переменной частоты на обмотках статора асинхронного двигателя за счет широтно-импульсной модуляции. Основные достоинства ПЧ-Д с АИН: практически синусоидальный ток нагрузки; широкий диапазон выходных частот от 0 до 1000 Гц; возможность подключения к одному преобразователю частоты несколько электродвигателей. Недостатком является невозможность получения генераторного режима с отдачей энергии в сеть из-за наличия неуправляемого выпрямителя, который имеет одностороннюю проводимость.

Описанные свойства схем двухзвенных ПЧ определяют области их использования. ПЧ-Д с автономным инвертором тока применяют в высокодинамичных индивидуальных электроприводах, а ПЧ-Д с автономным инвертором напряжения применяют в групповых и индивидуальных электроприводах со спокойными динамическими процессами.

Суммарный КПД выпрямителя и автономного инвертора составляет 0,95—0,96. Постоянная времени около 0,005 секунды.

Для насосных и вентиляторных установок преобразователи частоты с автономным инвертором тока применяют только

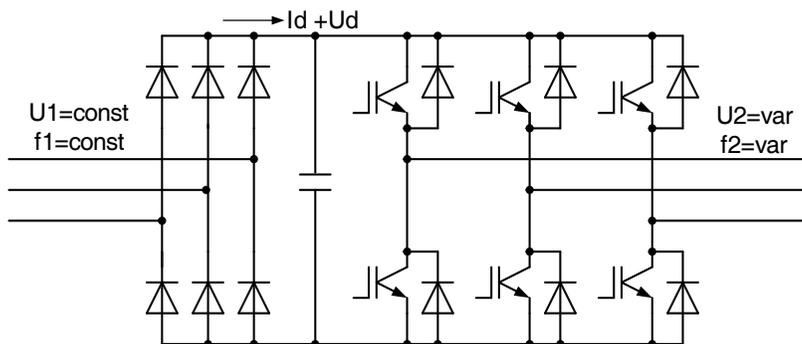


Рис. 2.2. Принципиальная электрическая схема преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения

в высоковольтных электроприводах в связи с отсутствием высоковольтных транзисторов в модульном исполнении типа IGBT, на базе которых выполняются автономные инверторы напряжения.

Наибольшее распространение для насосных и вентиляторных установок получили низковольтные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения, позволяющие формировать любые законы частотного регулирования в соответствии с данными табл. 2.1, а также позволяющие подключать к одному преобразователю, соответствующей мощности, несколько насосных или вентиляторных агрегатов.

Вариантом использования преобразователей частоты с инвертором напряжения в высоковольтных асинхронных электроприводах с короткозамкнутым ротором является схема двухтрансформаторного высоковольтного частотно-регулируемого электропривода, представленная на рис. 2.3. Преобразовательная часть этого устройства выполнена на низковольтных полупроводниковых элементах. Напряжение к преобразователю UZ со стороны питающей сети подается через понижающий трансформатор $T1$. Выходное напряжение с преобразованной частотой подается к высоковольтному асинхронному электродвигателю M через повышающий трансформатор $T2$. Существенным элементом двухтрансформаторной схемы является синусоидальный фильтр (синус-фильтр), включаемый между преобразовательной частью и повышающим трансформатором.

Меньшее распространение в электроприводах насосных и вентиляторных установок получила система с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ). Трехфазная система электропривода с НПЧ содержит три реверсивных тиристорных преобразователя постоянного тока, управление которыми осуществляется

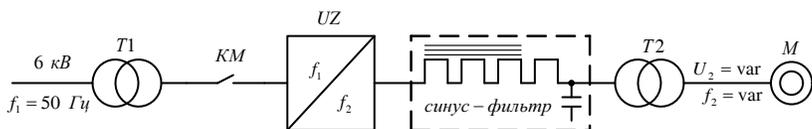


Рис. 2.3. Схема двухтрансформаторного высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода

модулирующим напряжением. Частота и амплитуда этого напряжения определяет частоту и напряжение на выходе НПЧ. С помощью реверсивного тиристорного преобразователя формируются положительный полупериод выходного напряжения (режим «вперед») и отрицательный полупериод выходного напряжения (режим «назад»). На рис. 2.4 показана схема простейшего НПЧ, в котором тиристорные преобразователи постоянного напряжения в каждой фазе (+ A, - A; + B, - B; + C, - C) выполнены по трехфазной нулевой схеме.

Основные достоинства НПЧ: естественная коммутация тока сетевым переменным напряжением, благодаря чему используются простые однооперационные тиристоры; полная реверсивность схемы; минимальное количество вентилях, одновременно включенных между сетью и двигателем. Основной недостаток НПЧ — ухудшение формы выходного напряжения при увеличении частоты. Для схемы, представленной на рис. 2.4, максимальную выходную частоту ограничивают обычно частотой 12,5 Гц. Переход от нулевой трехфазной схемы к мостовой шести- или двенадцатипульсовой расширяет рабочий диапазон выходных частот до 25 Гц.

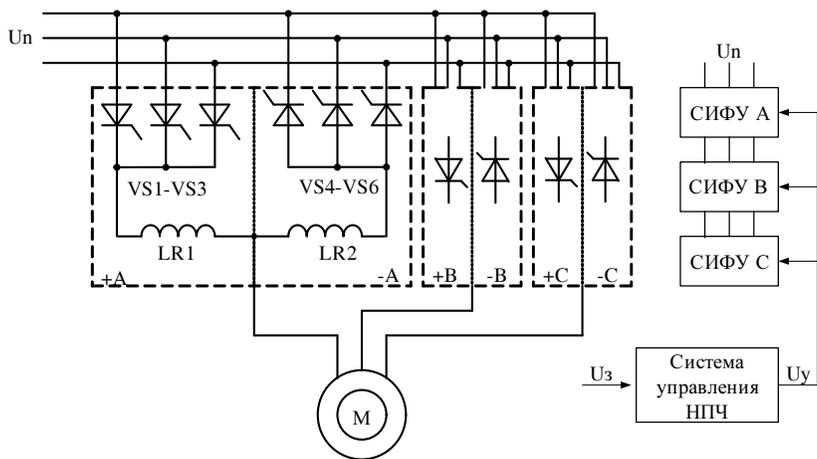


Рис. 2.4. Частотно-регулируемый электропривод с непосредственным преобразователем частоты

Так как НПЧ по схемному решению соответствует системе УВ-Д, то энергетические показатели и постоянная времени такие же, как у тиристорного преобразователя.

Ограничение верхнего диапазона частот сдерживает применение синхронного и асинхронного электропривода с НПЧ для насосных и вентиляторных установок, так как требуется специальный электродвигатель переменного тока с пониженной частотой по отношению к промышленной частоте. Вместе с тем необходимо отметить, что в отдельных случаях НПЧ применяется в составе высоковольтного электропривода по схеме «машина двойного питания» для насосных установок (серия АРД).

2.3. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Наряду с традиционным частотным управлением, когда электродвигатель получает питание от инвертора с независимым заданием частоты, для насосных и вентиляторных установок начали применять, пока в единичном случае, систему управления электроприводом, зависимую от угла поворота ротора, когда частота выходного напряжения или тока автономного инвертора задается с помощью датчика угла положения ротора. В качестве приводного двигателя, при этом, применяется синхронный электродвигатель. По принципу действия такая система аналогична электродвигателю постоянного тока, у которого функции механического коллектора и щеточного аппарата выполняет электронный коммутатор в виде автономного инвертора и датчик положения ротора в пространстве. Синхронный двигатель с автономным инвертором представляет собой обращенный двигатель постоянного тока, в котором неподвижный статор является якорем, а вращающийся ротор — источником магнитного поля. Электродвигатель по данной схеме включения называется вентиляльным двигателем (ВД).

Существующие системы электропривода на базе вентиляльных двигателей подразделяют на маломощные и мощные. Мощные системы электропривода на базе вентиляльных двигателей являются высоковольтными, поэтому они присущи рудничным

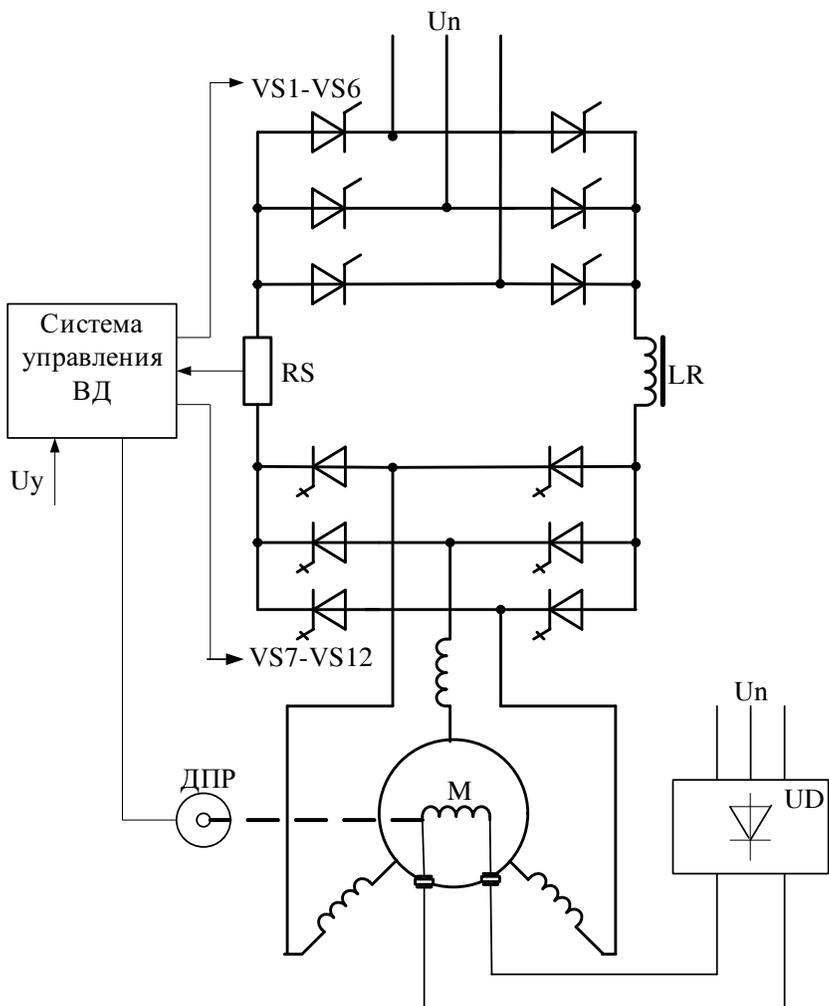


Рис. 2.5. Система электропривода по схеме с вентильным двигателем

подъемным установкам, мельницам, мощным турбомашинам и по схемным решениям отличаются от маломощных систем. Построение таких систем обычно осуществляется с применением автономных инверторов тока, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.5.

Преобразователь выполнен двухзвенным и состоит из управляемого выпрямителя и автономного инвертора тока. Коммутации тиристоров автономного инвертора в зоне малых частот осуществляется с помощью датчика положения ротора ДПР. В зоне частот 3—5 Гц и более коммутация осуществляется с помощью коммутирующей сверхпереходной ЭДС, получаемой из напряжения на статоре электродвигателя. Вторым обязательным элементом электропривода является датчик тока ДТ, с помощью которого осуществляется контроль выходных токов.

Электропривод на базе вентильного двигателя является достаточно сложным, крупногабаритным и не самым дешевым при малых мощностях. Использование этого вида привода в высоковольтных (6—10 кВ) установках сравнительно большой мощности (800—3500 кВт) позволяет снизить удельную стоимость. По сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока регулируемый электропривод по схеме ВД обладает лучшими динамическими и статическими свойствами. При этом могут быть использованы простые структуры управления электропривода постоянного тока, обеспечивающие высокие регулировочные свойства и динамические показатели.

2.4. ЭЛЕКТРОПРИВОД ПО СХЕМЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

Эта система электропривода относится к классу регулируемых электроприводов, изменяющих скольжение асинхронного электродвигателя за счет включения противо-ЭДС в роторную цепь.

Из электроприводов переменного тока для насосов и вентиляторов одним из наиболее экономичных и относительно простых является асинхронно-вентильный каскад (АВК), с помощью которого можно получить одноквадрантные механические характеристики. Электропривод этой системы содержит в роторной

цепи асинхронного двигателя с фазным ротором неуправляемый выпрямитель на диодах, собранный по мостовой трехфазной схеме. В выпрямленную роторную цепь постоянного тока включается ведомый сетью инвертор на тиристорах, собранный по мостовой трехфазной схеме. Ведомый сетью инвертор позволяет генерировать энергию скольжения в сеть, из-за чего электропривод по схеме АВК является высокоэкономичным. Для согласования ЭДС инвертора с напряжением питающей сети используется согласующий (вентильный) трансформатор. Суммарный КПД трансформатора и инвертора составляет 0,96—0,97. Постоянная времени инвертора около 0,01 секунды. Принципиальная электрическая схема электропривода по схеме АВК приведена на рис. 2.6.

Изменяя значение противо-ЭДС от нуля до номинального напряжения ротора, регулируется частота вращения электродвигателя в полном диапазоне от номинального значения до нуля. Для этого номинальные значения противо-ЭДС и ротора должны быть равны. Таким образом, для получения полного

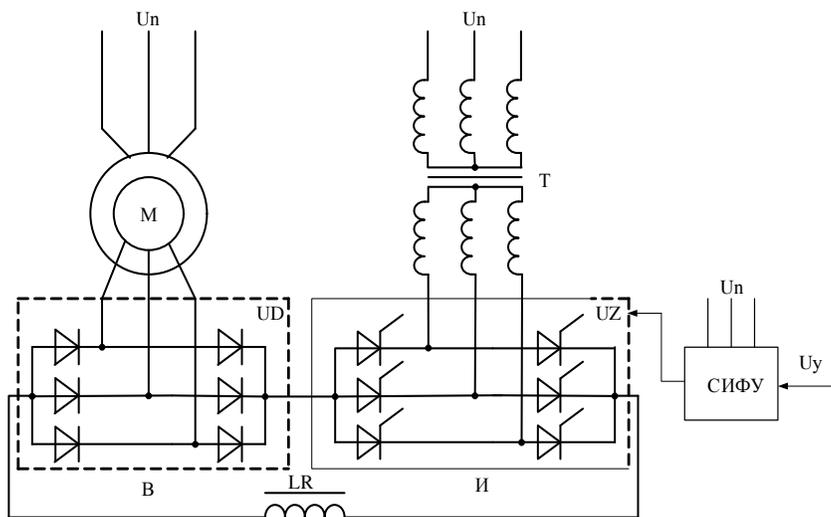


Рис. 2.6. Регулируемый электропривод по схеме асинхронно-вентильного каскада

диапазона регулирования, необходимо обеспечение мощности инвертора на номинальную мощность электродвигателя. Это требует применения довольно сложных и мощных тиристорных преобразователей. Однако требуемый диапазон регулирования частоты вращения центробежных насосов и вентиляторов для большинства систем относительно невелик и составляет 20—30 %. Для таких систем целесообразно регулирование частоты вращения в требуемом диапазоне осуществлять по схеме АВК, а разгон ротора до рабочего диапазона регулирования осуществлять с помощью пусковых резисторов. После того, как ротор наберет требуемую частоту вращения и его напряжение станет меньше, чем номинальная противо-ЭДС инвертора, контакторы станции управления отключают пусковые резисторы и подключают инвертор к роторной цепи двигателя. Затем регулирование осуществляется путем изменения противо-ЭДС, создаваемого инвертором.

Электропривод по схеме АВК имеет ряд особенностей, определяющих целесообразность его применения для насосов и вентиляторов:

- в каскаде преобразуется не вся мощность, подводимая к насосу или вентилятору, а только рекуперлируемая мощность скольжения, которая для данных установок не превышает 20 % номинальной мощности агрегатов;
- мощность преобразовательных устройств (выпрямитель и инвертор, ведомый сетью) АВК зависит от глубины регулирования частоты вращения. Ограниченный диапазон регулирования скорости насосов и вентиляторов позволяет использовать менее мощные преобразователи;
- зависимость вращающего момента в турбомашинах от частоты вращения позволяет осуществлять резисторный пуск по более простой схеме в одну или две ступени.

Существенным недостатком электропривода по схеме АВК является его некомплектность и невысокое значение коэффициента мощности.

2.5. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА ПАР ПОЛЮСОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Параметрическим регулированием называется способ регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей путем изменения напряжения на его статорной обмотке. Электромагнитный момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения, подводимого к статору. По этой причине изменение напряжения на статорной обмотке изменяет форму механической характеристики электродвигателя. 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. Это определяет сравнительно узкий диапазон регулирования по частоте вращения, который может обеспечить этот способ регулирования. Регулирование напряжения на статоре осуществляется с помощью тиристорного регулятора напряжения, силовая схема которого представлена на рис. 2.7.

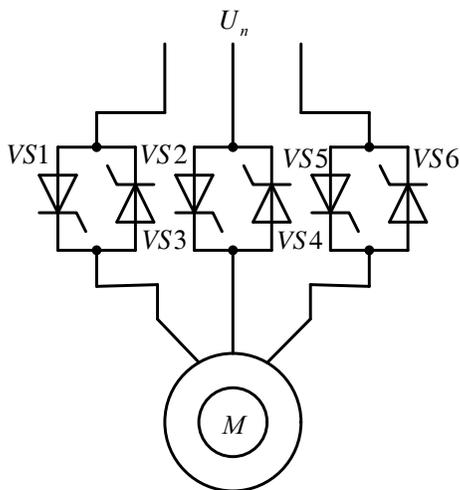


Рис. 2.7. Электропривод с тиристорным регулятором напряжения

Для расширения диапазона регулирования используется замкнутая система управления с отрицательной обратной связью по скорости электродвигателя или в роторную цепь вводится дополнительный резистор.

Параметрический способ регулирования частоты вращения насосных и вентиляторных установок не получил широкого распространения из-за узкого диапазона регулирования. Однако такой способ используется в ряде случаев в системе теплоснабжения.

Регулирование частоты вращения путем изменения числа пар полюсов используется в приводе насосов и вентиляторов при применении 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 статора в определенном сочетании, изменяется число пар полюсов электродвигателя. При этом в соответствии с уравнением (2.1) угловая скорость электродвигателя изменяется ступенчато.

На рис. 2.8, *а*, *б* представлена принципиальная схема соединения обмоток статора, позволяющая изменить число пар полюсов в отношении 2:1.

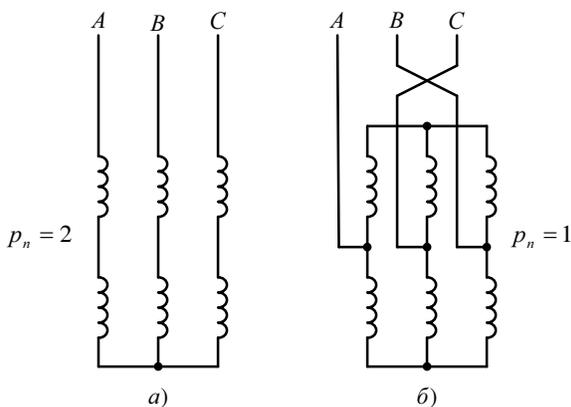


Рис. 2.8. Схема соединений обмоток двухскоростного электродвигателя: *а*) схема соединений, соответствующая нижней скорости при $p_n = 2$; *б*) схема соединений, соответствующая высшей скорости при $p_n = 1$.

Переключение обмоток и их частей осуществляется высоковольтными или низковольтными контакторами с блокировкой, исключающей возможность включения нескольких пар полюсов 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.

При ступенчатом изменении частоты вращения электродвигателя можно дискретно менять положение напорной характеристики насоса или вентилятора. Благодаря этому существенно изменяется превышение напоров в насосах или давление вентиляторов в режиме минимальных подач. Хотя этот способ регулирования не полностью ликвидирует превышение напора или давления, но несколько их уменьшает, обеспечивая более экономичный режим работы установок.

2.6. РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Насосы и вентиляторы имеют механическую характеристику, описываемую уравнением квадратичной параболы. Поэтому, в соответствии с законом частотного регулирования М.П. Костенко (табл. 2.1), частотно-регулируемый электропривод должен регулироваться по вентиляторному закону в соответствии с соотношением

$$\frac{U}{f^2} = \text{const} \text{ или } \frac{E}{f^2} = \text{const}, \quad (2.3)$$

где U — напряжение статорной цепи; f — частота тока в статорной цепи; E — ЭДС статорной цепи.

Этот закон частотного регулирования возможен для реализации в преобразователях частоты с автономным инвертором напряжения.

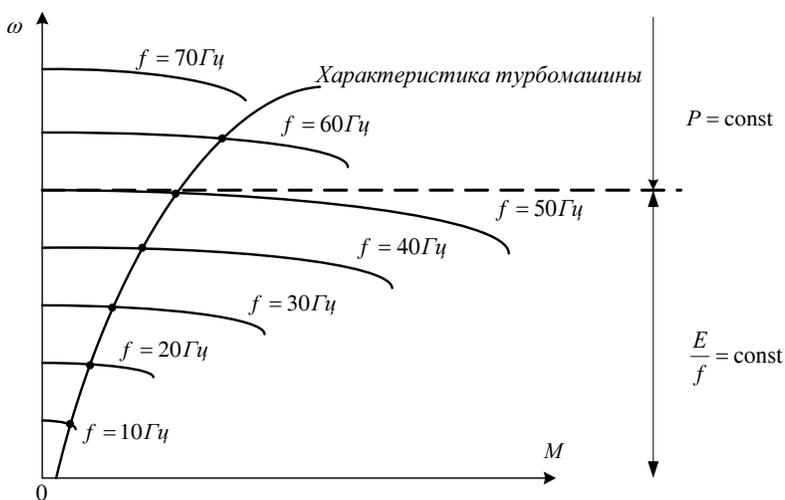


Рис. 2.9. Механические характеристики частотно-регулируемого электропривода по схеме ПЧ-АД с АИН и турбомашины

Механические характеристики асинхронного электродвигателя при вентиляторном законе частотного регулирования имеют вид, представленный на рис. 2.9.

На рис. 2.9 представлена также механическая характеристика турбомашин, а семейство механических характеристик асинхронного электродвигателя при различных частотах тока статора представлена в виде рабочей части характеристик. Моменты и угловые скорости электропривода определяются рабочими точками на пересечении механических характеристик электродвигателя и турбомашин.

При работе на частотах 0—50 Гц применяется закон частотного регулирования в соответствии с (2.3). При работе на частотах свыше 50 Гц необходимо использовать другой закон частотного регулирования. Это связано с тем, что приводной электродвигатель имеет ограниченную мощность, определяемую его номинальной величиной. Реализация повышенных значений угловой скорости и электромагнитного момента по мере увеличения частоты тока в статорной цепи становится невозможной, поэтому необходимо на частотах свыше 50 Гц ограничивать

момент. Это становится возможным при законе частотного регулирования с постоянным значением мощности ($P = \text{const}$). Этот закон частотного регулирования реализуется системой управления преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения и тока путем ослабления магнитного поля двигателя. Так как максимальный момент асинхронного электродвигателя уменьшается по мере роста частоты (свыше 50 Гц), то наступает предел регулирования по угловой скорости, как это показано на рис. 2.9. Верхнее ограничение угловой скорости определяет предельный диапазон регулирования по скорости и зависит от механической характеристики турбомашин. Однако большинство насосов и вентиляторов работают с угловой скоростью, меньше чем его номинальное значение, поэтому ограничение верхнего предела по регулированию скорости не является препятствием для использования в этих установках частотно-регулируемого электропривода.

В преобразователях частоты с автономным инвертором тока невозможно реализовать закон частотного регулирования (2.3) для частот до 50 Гц. В силу физических особенностей коммутации тока силовыми полупроводниковыми приборами в АИТ для таких преобразователей частоты реализуем закон частотного регулирования с постоянством магнитного потока $\Phi = \text{const}$ (табл. 2.1). В современной теории силовых преобразовательных устройств этот закон называется законом частотного регулирования с постоянством результирующего вектора потокосцепления ротора $\Psi_r = \text{const}$. При реализации такого закона частотного регулирования сохраняется постоянство максимального момента на всем диапазоне изменения частоты до 50 Гц. На частотах свыше 50 Гц реализуется закон сохранения постоянства мощности $P = \text{const}$ за счет ослабления магнитного потока асинхронной машины таким же образом как и в преобразователях частоты с автономным инвертором напряжения. Механические характеристики (рабочая ветвь) асинхронного электродвигателя при законе частотного регулирования $\Psi_r = \text{const}$ имеют вид, представленный на рис. 2.10. Здесь же представлена механическая характеристика турбомашин. Особенностью

применения частотно-регулируемого электропривода по схеме ПЧ-АД с АИТ является большая перегрузочная способность электродвигателя на малых частотах, что является излишним для насосных и вентиляторных установок. Однако часто в высоковольтных электроприводах, особенно большой мощности, другие варианты, кроме как связанные с применением ПЧ-Д с АИТ, отсутствуют.

Особенностью электромеханических свойств асинхронно-вентильного каскада является возможность работы на частотах вращения электродвигателя ниже основной скорости. Для большинства насосных и вентиляторных установок не требуется регулирование частоты вращения рабочего колеса выше номинальной скорости, поэтому АВК является для этих установок, если они оборудованы асинхронным электродвигателем с фазным ротором, наиболее целесообразной системой электропривода. Это связано с тем, что АВК по стоимостным параметрам является самой дешевой системой электропривода по сравнению с высоковольтными частотно-регулируемыми электроприводами, включая вентильный двигатель, а по регулировочным свойствам не уступает этим системам. Другой особенностью электромеханических свойств АВК является пониженное

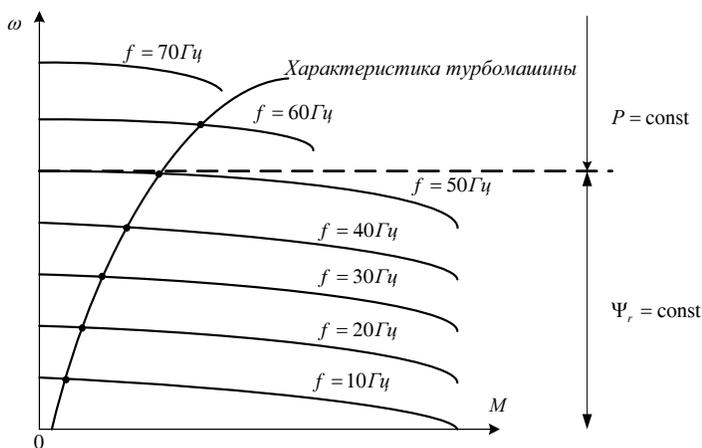


Рис. 2.10. Механические характеристики частотно-регулируемого электропривода по схеме ПЧ-АД с АИТ и турбомашин

значение перегрузочной способности электропривода при регулировании скольжения. Максимальный момент на искусственных механических характеристиках меньше примерно на 17 % по сравнению с естественной механической характеристикой. Кроме этого необходимо отметить, что в системе АВК механические характеристики являются более мягкими по сравнению с естественными механическими характеристиками. Это связано с тем, что в роторную цепь асинхронного электродвигателя включено достаточно много дополнительных элементов, обладающих активным сопротивлением, и которые влияют на жесткость механических характеристик (элементы выпрямителя и инвертора, согласующий трансформатор, сглаживающий дроссель, провода соединительных цепей). Механические характеристики электропривода по схеме АВК и турбомашин представлены на рис. 2.11, где β_u — угол опережения инвертора.

Недостатками системы АВК являются некомплектность поставки элементов электропривода, пониженный коэффициент

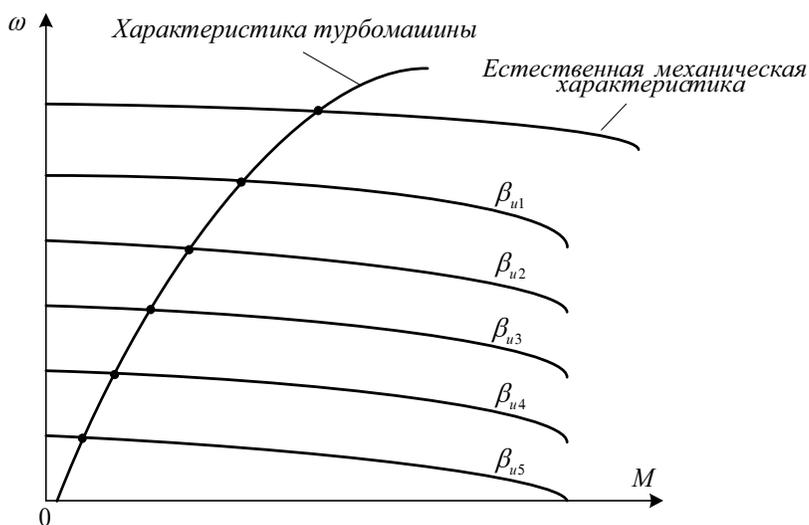


Рис. 2.11. Механические характеристики электропривода по схеме АВК и турбомашин

мощности. При проектировании следует обратить внимание, что нельзя использовать систему АВК для насосов и вентиляторов вертикального расположения, так как электротехническая промышленность не выпускает асинхронные электродвигатели с фазным ротором в вертикальном исполнении.

ГЛАВА 3

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
НАСОСНЫХ
УСТАНОВОК**

3.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Основными критериями выбора регулируемого электропривода конкретной установки является обеспечение оптимальных технологических процессов и энергоэффективность принятых технических решений. На выбор системы регулируемого электропривода влияют различные факторы: тип установленных насосов и электродвигателей, число насосных агрегатов и их мощность, условия эксплуатации, соотношение стоимости оборудования и электроэнергии. Различен подход к выбору регулируемого электропривода для действующих, реконструируемых, вновь проектируемых объектов, в состав которых входят насосные агрегаты. Вследствие этого не существует какого-либо одного вида регулируемого электропривода, который должен применяться во всех насосных установках при любых условиях эксплуатации.

Применение регулируемого электропривода целесообразно, когда:

- насосная установка подает жидкость непосредственно в сеть (насосные станции II и III подъемов, станции подкачки и т.п.);
- диапазон колебания водопотребления или притока достаточно большой и составляет не менее 15—20 % максимальной подачи;
- динамическая составляющая водоподдачи достаточно большая и составляет не менее 20—30 % общей высоты подъема жидкости;
- технологические особенности требуют подачу жидкости в определенном объеме, при котором обеспечивается необходимое качество продукции.

Применение регулируемого электропривода обычно экономически целесообразно при мощности насосных агрегатов 55—75 кВт и выше.

Для агрегатов мощностью 55—320 кВт, оснащенных низковольтными асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, наиболее целесообразно применение частотно-регулируемого электропривода с низковольтными преобразователями частоты.

Для насосных агрегатов мощностью 250—1600 кВт, оснащенных низковольтными и высоковольтными асинхронными электродвигателями с фазным ротором, следует применять электропривод по схеме АВК. При этом необходимо предусмотреть технические решения, обеспечивающие работу электропривода с достаточно высоким значением коэффициента мощности.

Для агрегатов мощностью 1600—6000 кВт, оснащенных асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором и синхронными высоковольтными электродвигателями, наиболее целесообразно применение бестрансформаторного частотно-регулируемого электропривода или по системе вентильного двигателя.

Для агрегатов мощностью 400—1600 кВт, оснащенных высоковольтными асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором, применяются двухтрансформаторные частотно-регулируемые электроприводы. Хотя это решение достаточно громоздко из-за применения двух трансформаторов, существуют условия, в которых применение этого вида электропривода эффективно.

Приведенные рекомендации носят общий характер и справедливы при существующем соотношении цен на электроэнергию и преобразовательную технику, а также при действующих нормах амортизации (8—10 %) и сроках окупаемости, обычно до трех лет. Отсюда вытекает вывод, что выбор системы регулируемого электропривода должен делаться не из общих соображений, а на основе технико-экономических расчетов и сравнения сопоставимых вариантов.

Кроме вышеперечисленных технических решений часто приходится решать вопрос о количестве регулируемых электроприводов для многоагрегатных насосных установок, работающих параллельно на один коллектор. Регулируемым

электроприводом рекомендуется оборудовать два-три насосных агрегата, если на станции установлено четыре-шесть агрегатов, и три-четыре, если на станции установлено семь-восемь насосных агрегатов. Для ориентировочной оценки следует считать, что $1/3$ — $1/2$ часть установленных на станции агрегатов необходимо оборудовать регулируемым электроприводом. Для точной оценки следует учесть необходимую глубину регулирования частоты вращения насосного агрегата с регулируемым электроприводом, работающим параллельно в составе других агрегатов с нерегулируемым электроприводом. Глубина регулирования определяется максимальным коэффициентом неравномерности K_{\max} (1.3) и ограничивается статическим напором и свойствами рабочей характеристики насоса, так как они определяют нерабочую зону насоса. Нерабочая зона характеризуется холостой ветвью механической характеристики насоса, при которой насос работает с низкой подачей и КПД, близкой к нулю.

При установке регулируемых и нерегулируемых насосных агрегатов, работающих параллельно, система управления 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 величины, соответствующей вхождению в нерабочую зону.

3.2. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ НАСОСА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

Изменение угловой скорости рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров. При этом изменяется и рабочая характеристика насоса. Перерасчет характеристик насоса на другую угловую скорость осуществляется с помощью так называемых формул приведения [7]:

- для подачи

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (3.1)$$

- для напора

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2; \quad (3.2)$$

- для мощности

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^3; \quad (3.3)$$

- для момента статического сопротивления

$$\frac{M_1}{M_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2. \quad (3.4)$$

Равенство в формулах (3.3) и (3.4) приблизительно, так как при изменении подачи Q и напора H одновременно изменяется КПД.

Напорная характеристика насоса, работающая с переменной угловой скоростью рабочего колеса, описывается согласно [2] уравнением квадратичной параболы:

$$H = H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - S_\phi \cdot Q^2, \quad (3.5)$$

где H_ϕ — фиктивный напор, соответствующий нулевой подаче насоса, в расчетах следует принимать: для насосов чистой воды $H_\phi = 1,25 \cdot H_{ном}$; для динамических и грунтовых насосов $H_\phi = 1,45 \cdot H_{ном}$; $H_{ном}$ — номинальный (паспортный) напор насоса; ω , $\omega_{ном}$ — переменная и номинальная угловая скорость насоса, соответственно; S_ϕ — гидравлическое фиктивное сопротивление насоса.

Из (3.5) видно, что гидравлическое сопротивление насоса при одной и той же подаче не зависит от угловой скорости. Это означает, что при изменении угловой скорости напорные характеристики насоса остаются подобными и только изменяют свое положение по вертикали в координатах Q и H на графике совместной работы насоса и трубопровода (рис. 3.1).

Характеристика трубопровода описывается зависимостью (1.2). Пересечение напорных характеристик 1, 2, 3 насоса, последовательно изменяющего свою угловую скорость $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ с характеристикой 4 трубопровода определяет положение рабочих точек 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 угловой скорости рабочего колеса располагаются на характеристике трубопровода.

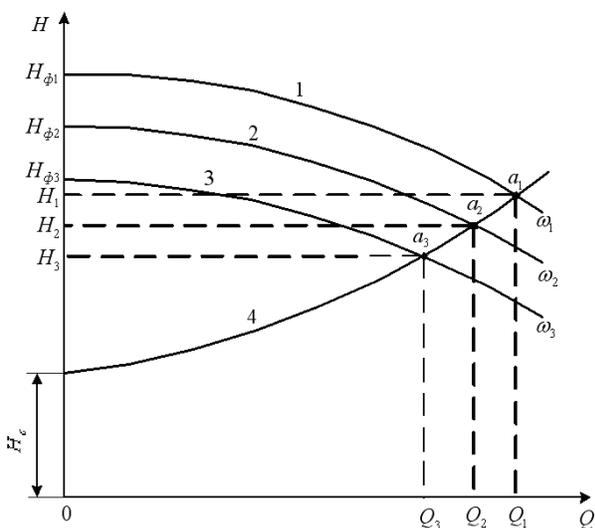


Рис. 3.1. Напорные характеристики насоса и трубопровода с переменной угловой скоростью рабочего колеса

Совместное решение уравнений характеристик насоса (3.5) и трубопровода (1.2) относительно подачи Q , получена зависимость изменения подачи насоса от его угловой скорости:

$$Q = Q_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - H_c}{H_{\phi} - H_c}}, \quad (3.6)$$

где $Q_{ном}$ — номинальная (паспортная) подача насоса; H_c — статический напор насоса, определяется как разность геодезических отметок наивысшей точки подачи жидкости и места установки насоса.

Зависимость (3.6) справедлива в том случае, если насос выбран правильно, а трубопровод спроектирован так, что при номинальной скорости обеспечивается номинальная подача и напор.

Из (3.6) видно, что подача насоса зависит не только от частоты вращения, но и от фиктивного H_{ϕ} и статического H_c напоров. От соотношения этих напоров зависит допустимый диапазон регулирования скорости рабочего колеса насоса. Рабочая зона насоса определяется зависимостью (3.6) при действительном значении корня, если же корень мнимый, что можно получить при снижении угловой скорости до определенного значения, можно получить нерабочую зону функционирования насоса. Действительное значение корня в выражении (3.6) получается при соблюдении условия

$$\omega \geq \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_{\phi}}}, \quad (3.7)$$

откуда можно установить минимальную допустимую угловую скорость, обеспечивающую нормальное функционирование насоса в пределах рабочей зоны.

Совместное решение уравнений характеристик насоса (3.5) и трубопровода (1.2) относительно напора H , позволяет получить

зависимость изменения напора насоса от его угловой скорости:

$$H = H_c + (H_{ном} - H_c) \cdot \frac{H_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - H_c}{H_\phi - H_c}. \quad (3.8)$$

Зависимость (3.8) справедлива в том случае, если насос выбран правильно, а трубопровод спроектирован так, что при номинальной скорости обеспечивается номинальная подача и напор.

Важнейшим параметром насоса является его КПД. Изменение КПД в зависимости от угловой скорости насоса определяется с помощью формулы Муди, преобразованной для насосов [4]:

$$\eta_n = 1 - \frac{1 - \eta_{ном}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^{0,36}}, \quad (3.9)$$

где $\eta_{ном}$ номинальный (паспортный) КПД насоса.

Мощность, потребляемая насосом, определяется выражением

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot H}{102 \cdot \eta_n}, \text{ кВт}, \quad (3.10)$$

где ρ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м^3 (для чистой воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$); Q — секундная подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; H — напор насоса, м (метров водного столба); η_n — КПД насоса, отн. ед.

Анализ выражения (3.10) для потребляемой мощности насоса, показывает, что реальная зависимость мощности от угловой скорости тем больше отличается от кубической параболы, описываемой формулой приведения (3.3), чем больше значение статического напора, и только при $H_c = 0$ мощность, потребляемая насосом, пропорциональна угловой скорости в кубе.

Очень важным параметром насоса является его механическая характеристика, т.е. зависимость момента статического сопротивления от угловой скорости рабочего колеса. От вида механической характеристики зависят энергетические показатели насоса (потери и КПД). Момент статического сопротивления любого механизма, в том числе и насоса, определяется выражением $M_c = N/\omega$, или

$$M_{н.с} = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot 10^3}{102 \cdot \omega \cdot \eta_n}, \text{ Нм.} \quad (3.11)$$

Анализ выражения (3.11) для момента статического сопротивления, показывает, что реальная зависимость момента статического сопротивления от угловой скорости тем больше отличается от кубической параболы, описываемой формулой приведения (3.4), чем больше значение статического напора, и только при $H_c = 0$ момент статического сопротивления пропорционален угловой скорости в квадрате.

Уравнение (3.11) справедливо до тех пор, пока развиваемый насосом напор не сравняется со статическим напором. С этого времени подача насоса и его КПД становятся равным нулю, что соответствует граничной угловой скорости согласно (3.7):

$$\omega_{сп} = \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_\phi}}. \quad (3.12)$$

Граничная угловая скорость определяет границу между рабочим и нерабочим режимами насоса. После уменьшения угловой скорости рабочего колеса насоса ниже граничной момент сопротивления изменяется в соответствии с уравнением

$$M_{н.с} = (M_0 - M_m) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M_m, \quad (3.13)$$

где M_0 — момент холостого хода насоса; M_m — момент сопротивления насоса, обусловленный трением в его сальниках и подшипниках.

Момент холостого хода определяется по формуле

$$M_0 = \frac{M_{\text{зр}} - M_m}{\left(\frac{\omega_{\text{зр}}}{\omega_{\text{ном}}}\right)^2} + M_m, \quad (3.14)$$

где $M_{\text{зр}}$ — граничный момент, соответствующий граничной угловой скорости, определяется при расчете по (3.11), где $\omega = \omega_{\text{зр}}$.

Момент трения M_m согласно опытным данным составляет 5—10 % от номинального момента насоса, т.е.

$$M_m = (0,05 - 0,1) \cdot M_{\text{н.ном}}, \quad (3.15)$$

где $M_{\text{н.ном}}$ — номинальный момент насоса, определяется по (3.11) при номинальных значениях подачи, напора, КПД и угловой скорости.

Таким образом, механическая характеристика насоса при статическом напоре состоит из двух ветвей, одна из которых рассчитывается и строится в соответствии с (3.11), а другая согласно (3.13).

Аналогичным способом, как были получены зависимости подачи и напора от угловой скорости при совместном решении уравнений характеристик насоса (3.5) и трубопровода (1.2), можно получить зависимость угловой скорости насоса от его подачи:

$$\omega = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_\phi} + \left(1 - \frac{H_c}{H_\phi}\right) \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\text{ном}}}\right)^2}. \quad (3.16)$$

Превышение напора является одной из причин возникновения дополнительных потерь электроэнергии в насосных установках. Целесообразно поддерживать такую угловую скорость насоса, при которой в координатах $Q - H$ рабочие точки лежали бы на рабочей характеристике трубопровода. Работа насоса с угловой скоростью, определяемой уравнением (3.16), обеспечивает поддержание минимальных значений напора на

выходе насосной установки во всем диапазоне изменения ее подачи. За счет ликвидации превышения напора электропотребление насоса уменьшается до возможного минимума.

3.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ НАСОСА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

3.3.1. Расчет рабочих параметров насоса

Требуется рассчитать рабочие параметры насоса 1Д1250-125А при изменении угловой скорости рабочего колеса. Насосный агрегат оснащен асинхронным высоковольтным электродвигателем (6 кВ) типа ДАЗО4-400У-4МУ1.

Паспортные данные насоса:

- номинальная подача $Q_{ном} = 1150 \text{ м}^3/\text{час}$ ($0,3194 \text{ м}^3/\text{с}$);
- номинальный напор $H_{ном} = 100 \text{ м}$;
- номинальный КПД $\eta_{н.ном} = 0,76$;
- номинальная частота вращения $n_{ном} = 1480 \text{ об/мин}$ ($\omega_{ном} = 154,9 \text{ с}^{-1}$).

Паспортные данные электродвигателя:

- номинальная мощность приводного электродвигателя $P_{ном} = 500 \text{ кВт}$;
- номинальная частота вращения соответствует номинальной частоте вращения насоса;
- номинальный КПД электродвигателя $\eta_{ов.ном} = 0,948$.
- номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном} = 0,87$;
- номинальный ток статора $I_{1ном} = 58,5 \text{ А}$;
- перегрузочная способность двигателя $\lambda = M_{max} / M_{ном} = 2,8$;
- момент инерции ротора $J_{об} = 14 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Насос перекачивает чистую воду с $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ и работает в системе трубопроводов со статическим напором $H_c = 26 \text{ м}$, что соответствует разности геодезических отметок между

наивысшей точкой подъема воды и местом установки насоса ($Z_2 - Z_1$).

Месячный график водопотребления представлен в виде таблицы 3.1.

Таблица 3.1

Посуточный график водопотребления в течении месяца

Дата	1.04	2.04	3.04	4.04	5.04	6.04	7.04	8.04	9.04	10.04
Q , тыс.м ³ /сут	21,7	22,1	20,7	18,8	23,1	24,4	22,4	20,4	22,2	20,6
Дата	11.04	12.04	13.04	14.04	15.04	16.04	17.04	18.04	19.04	20.04
Q , тыс.м ³ /сут	18,8	20,4	20,4	20,8	21,3	21,5	19,7	19,8	19,6	20,0
Дата	21.04	22.04	23.04	24.04	25.04	26.04	27.04	28.04	29.04	30.04
Q , тыс.м ³ /сут	20,2	19,5	20,0	21,1	20,5	19,1	19,7	21,0	21,6	19,9

Всего за месяц водопотребление составило $Q_{мес} = 621,3$ тыс. м³/мес. Насос работает круглосуточно, что в годовом выражении составляет $T_p = 8760$ час/год.

Решение

1. Определяется фиктивный напор насоса

$$H_{\phi} = 1,25 \cdot H_{ном} = 1,25 \cdot 100 = 125 \text{ м,}$$

где коэффициент 1,25 — величина, рекомендуемая для определения фиктивного напора насосов чистой воды.

2. Определяется граничная угловая скорость для рабочей зоны насоса

$$\omega_{\text{зп}} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_{\phi}}} = 154,9 \cdot \sqrt{\frac{26}{125}} = 70,6 \text{ с}^{-1}.$$

Принимается $\omega_{\text{зп}} = 70 \text{ с}^{-1}$.

3. По данным табл. 3.1 определяется минимальное водопотребление $Q_{\min} = 18,8$ тыс. м³/сут. В соответствии с этим часовое водопотребление, при работе насоса 24 час/сут, составляет $Q_{\min} = 783,3$ м³/час.

4. Определяется минимальная угловая скорость рабочего колеса насоса при минимальном водопотреблении в соответствии с (3.16)

$$\omega_{\min} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_\phi} + \left(1 - \frac{H_c}{H_\phi}\right) \cdot \left(\frac{Q_{\min}}{Q_{\text{ном}}}\right)^2} =$$

$$= 154,9 \cdot \sqrt{\frac{26}{125} + \left(1 - \frac{26}{125}\right) \cdot \left(\frac{783,3}{1150}\right)^2} = 117,5 \text{ с}^{-1}.$$

Так как $\omega_{\min} = 117,5 \text{ с}^{-1} > \omega_{\text{ep}} = 70 \text{ с}^{-1}$, то насос, в соответствии с данными табл. 3.1, функционирует в рабочей зоне.

5. Задаваясь угловой скоростью в пределах рабочей зоны, определяются по формулам (3.6), (3.8), (3.9), (3.10) подача, напор, КПД и мощность насоса при переменной угловой скорости. Данные заносятся в табл. 3.2. При расчете мощности насоса необходимо в формулу (3.10) подставлять секундную подачу, которая получается при делении часовой подачи на 3600.

Таблица 3.2

Расчетные величины подачи, напора, КПД и мощности

ω , с ⁻¹	70	85	100	115	130	145	160
Q , м ³ /час	88,1	419,8	614,3	781,7	936,7	1084,5	1227,9
H , м	26,4	35,9	47,1	60,2	75,0	91,8	110,4
$\eta_{\text{нас}}$	0,683	0,704	0,721	0,735	0,746	0,756	0,7645
N , кВт	9,27	58,3	109,3	174,4	256,5	358,6	482,9

6. Для сопоставимости результатов расчета, представим данные табл. 3.2 в относительных единицах, для этого разделим величины угловой скорости, подачи, напора и мощности на их номинальные значения.

Номинальная мощность насоса определяется по (3.10) при номинальных значениях подачи, напора и КПД

$$N_{ном} = \frac{\rho \cdot Q_{ном} \cdot H_{ном}}{102 \cdot \eta_{ном}} = \frac{1000 \cdot 0,3194 \cdot 100}{102 \cdot 0,76} = 412 \text{ кВт.}$$

Полученные результаты представим в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Расчетные величины угловой скорости, подачи, напора, и мощности в относительных величинах

ω^*	0,452	0,549	0,646	0,742	0,839	0,936	1,033
Q^*	0,077	0,365	0,534	0,680	0,815	0,943	1,068
H^*	0,264	0,359	0,471	0,602	0,750	0,918	1,104
N^*	0,0225	0,1415	0,265	0,423	0,623	0,870	1,172

7. По данным табл. 3.3 на рис. 3.2 представлены графические зависимости параметров насоса от угловой скорости в относительных единицах

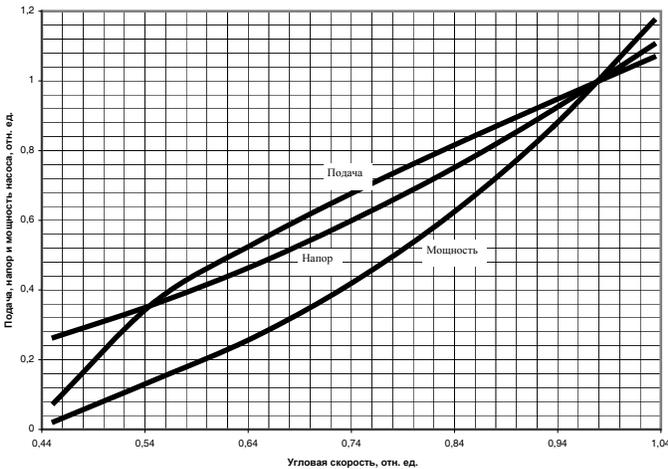


Рис. 3.2. Графические зависимости подачи, напора и мощности от угловой скорости насоса 1Д1250-125А

3.3.2. Расчет потребления электроэнергии насосным агрегатом

Используется графо-аналитический метод расчета потребленной электроэнергии при регулировании угловой скорости насосного агрегата. Расчет осуществляется с помощью графических зависимостей рис. 3.2.

Решение

1. Преобразуем табл. 3.1 из суточного водопотребления в часовое, для этого каждое значение подачи разделим на 24 часа, так как насос работает круглосуточно. Кроме того, подачу представим в относительных единицах, для чего каждое значение подачи в абсолютных единицах разделим на номинальную величину подачи насоса. Полученные данные представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Почасовой график водопотребления в течение месяца

Дата	1.04	2.04	3.04	4.04	5.04	6.04	7.04	8.04	9.04	10.04
Q , м ³ /час	904	921	863	783	962	1017	933	850	925	858
Q^*	0,786	0,801	0,750	0,681	0,837	0,884	0,811	0,739	0,804	0,746
Дата	11.04	12.04	13.04	14.04	15.04	16.04	17.04	18.04	19.04	20.04
Q , м ³ /час	783	850	850	867	887	896	821	825	817	833
Q^*	0,681	0,739	0,739	0,754	0,771	0,779	0,714	0,717	0,710	0,724
Дата	21.04	22.04	23.04	24.04	25.04	26.04	27.04	28.04	29.04	30.04
Q , м ³ /час	842	812	833	879	854	796	821	875	900	829
Q^*	0,732	0,706	0,724	0,764	0,743	0,692	0,714	0,761	0,783	0,721

2. По рис. 3.2 графическим способом определяется относительное значение мощности, соответствующее относительной величине подачи, как это показано на рис. 3.3. Индекс i обозначает принадлежность подачи и мощности к каждой из дат,

приводимых в табл. 3.4. Относительное значение мощности пересчитывается в абсолютную величину путем умножения относительной величины на номинальную мощность. При расчете потребленной мощности насосным агрегатом необходимо учесть КПД электродвигателя и КПД преобразовательного устройства, обеспечивающего регулирование угловой скорости. Так как КПД электродвигателя практически не зависит от угловой скорости, то в расчетах можно принять номинальное значение КПД двигателя. КПД большинства преобразовательных устройств, таких как преобразователь частоты или асинхронно-вентильный каскад, имеют величину $\eta_{np} = 0,96$.

Расчетная формула для определения потребленной мощности при регулировании угловой скорости насоса для каждой из дат имеет следующий вид

$$P_i = \frac{N_i^* \cdot N_{ном}}{\eta_{дв} \cdot \eta_{np}}$$

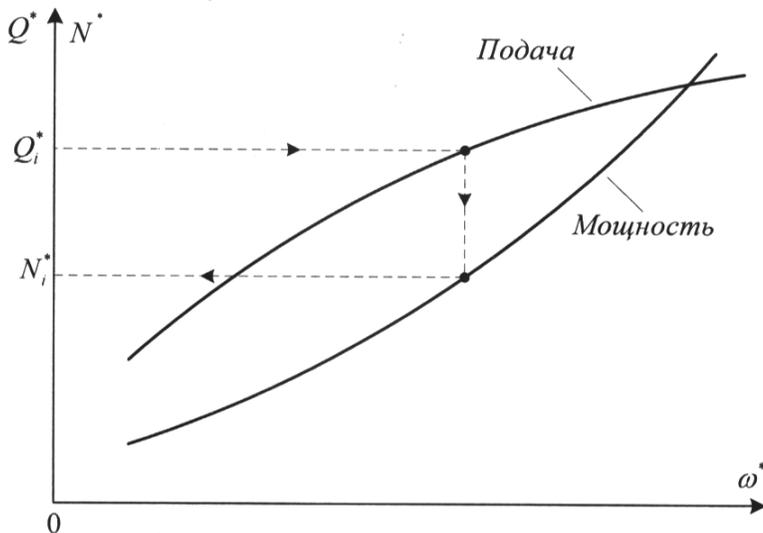


Рис. 3.3. Схема определения мощности через подачу

Полученные данные приводятся в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Расчет потребляемой мощности насосным агрегатом при регулировании угловой скорости

Дата	1.04	2.04	3.04	4.04	5.04	6.04	7.04	8.04	9.04	10.04
N^*	0,574	0,596	0,520	0,422	0,660	0,750	0,615	0,504	0,604	0,516
P , кВт	259,9	269,8	235,4	191,0	298,8	339,5	278,4	228,2	273,4	233,6
Дата	11.04	12.04	13.04	14.04	15.04	16.04	17.04	18.04	19.04	20.04
N^*	0,422	0,504	0,504	0,468	0,552	0,564	0,466	0,472	0,462	0,482
P , кВт	191,0	228,2	228,2	211,9	249,9	255,3	211,0	213,7	209,2	218,2
Дата	21.04	22.04	23.04	24.04	25.04	26.04	27.04	28.04	29.04	30.04
N^*	0,492	0,460	0,482	0,540	0,512	0,438	0,466	0,536	0,568	0,480
P , кВт	222,7	208,2	218,2	244,5	231,8	198,3	211,0	242,6	257,1	217,3

$$\text{Суммарная мощность } \sum_1^{30} P = 7076,3 \text{ кВт.}$$

3. Средняя потребляемая мощность

$$P_{cp} = \frac{\sum_1^{30} P}{i} = \frac{7076,3}{30} = 235,9 \text{ кВт,}$$

где $i = 30$ — число дат измерения водопотребления.

4. Годовое потребление электроэнергии при регулировании угловой скорости насоса

$$W_2 = P_{cp} \cdot T_p = 235,9 \cdot 8760 = 2066484 \text{ кВт} \cdot \text{час/год,}$$

где $T_p = 8760$ час/год – количество часов работы насоса в год.

5. Для определения экономии электроэнергии определяется потребление электроэнергии при нерегулируемом варианте электропривода насосного агрегата

$$W_1 = \frac{N_{ном} \cdot T_p}{\eta_{об}} = \frac{412 \cdot 8760}{0,948} = 3807089 \text{ кВт} \cdot \text{час/год.}$$

6. Годовая экономия электроэнергии при применении регулируемого электропривода

$$\Delta W_{эл} = W_1 - W_2 = 3807089 - 2066484 = 1740605 \text{ кВт} \cdot \text{час/год,}$$

что составляет 45,7 % экономии электроэнергии.

7. Годовая подача насоса при нерегулируемом варианте

$$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p = 1150 \cdot 8760 = 10074 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год.}$$

8. Годовое водопотребление при регулируемом варианте в соответствии с данными табл. 3.1

$$Q_2 = n_{мес} \cdot Q_{мес} = 12 \cdot 621,3 \cdot 10^3 = 7455,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год,}$$

где $n_{мес} = 12$ — количество месяцев в году.

9. Удельное потребление электроэнергии при нерегулируемом варианте электропривода

$$q_1 = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{3807089}{10074 \cdot 10^3} = 377,9 \text{ кВт} \cdot \text{час}/1000 \text{ м}^3.$$

10. Удельное потребление электроэнергии при регулируемом варианте электропривода

$$q_2 = \frac{W_2}{Q_2} = \frac{2066484}{7455,6 \cdot 10^3} = 277,2 \text{ кВт} \cdot \text{час}/1000 \text{ м}^3.$$

3.3.3. Расчет механической характеристики насоса

При расчете механической характеристики насоса используются вычисленные значения в п. 3.3.1.

Решение

1. Определяется номинальный момент насоса в соответствии с (3.11)

$$M_{н.ном} = \frac{N_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{412 \cdot 10^3}{154,9} = 2660 \text{ Нм.}$$

2. Определяется момент трения в соответствии с (3.15)

$$M_m = (0,05 \div 0,1) \cdot M_{н.ном} = 0,05 \cdot 2660 = 133 \text{ Нм.}$$

3. Граничная скорость определяется по (3.7) в п. 3.3.1,
 $\omega_{zp} = 70 \text{ с}^{-1}$.

4. Для расчета рабочей ветви механической характеристики насоса, задаются угловой скоростью насоса от $\omega_{zp} = 70 \text{ с}^{-1}$ до величины, большей номинальной угловой скорости на 20—25 %. При расчете механической характеристики используются данные табл. 3.2. Расчет механической характеристики насоса ведется по формуле (3.11). Результаты расчета приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Расчетные параметры рабочей ветви механической характеристики насоса

$\omega, \text{с}^{-1}$	70	85	100	115	130	145	160	175	190
$Q, \text{м}^3/\text{ч}$	88,1	419,8	614,3	781,7	936,7	1084,5	1227,9	1368,2	1506,2
$H, \text{м}$	26,4	35,9	47,1	60,2	75,0	91,8	110,4	130,7	152,9
η_n	0,683	0,704	0,721	0,735	0,746	0,756	0,7645	0,772	0,779
$N, \text{Вт}$	9274	58300	109287	174361	256462	358634	482898	630825	805107
$M_c, \text{Нм}$	132	686	1093	1516	1973	2473	3018	3605	4237

5. Из данных таблицы 3.6 видно, что граничной скорости $\omega_{zp} = 70 \text{ с}^{-1}$ соответствует граничный момент $M_{zp} = 132 \text{ Нм}$, тогда момент холостого хода

$$M_0 = \frac{M_{zp} - M_m}{\left(\frac{\omega_{zp}}{\omega_{ном}}\right)^2} + M_m = \frac{132 - 133}{\left(\frac{70}{154,9}\right)^2} + 133 = 128 \text{ Нм,}$$

6. Для расчета нерабочей ветви механической характеристики насоса используется зависимость (3.13). Задаемся

угловой скоростью насоса от $\omega = 0$ до $\omega_{zp} = 70 \text{ с}^{-1}$. Результаты расчетов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Расчетные параметры нерабочей ветви механической характеристики насоса

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	10	25	40	55	70
$M_c, \text{Нм}$	133	133	132,9	132,7	132,4	132

Графический вид механической характеристики представлен на рис. 3.4.

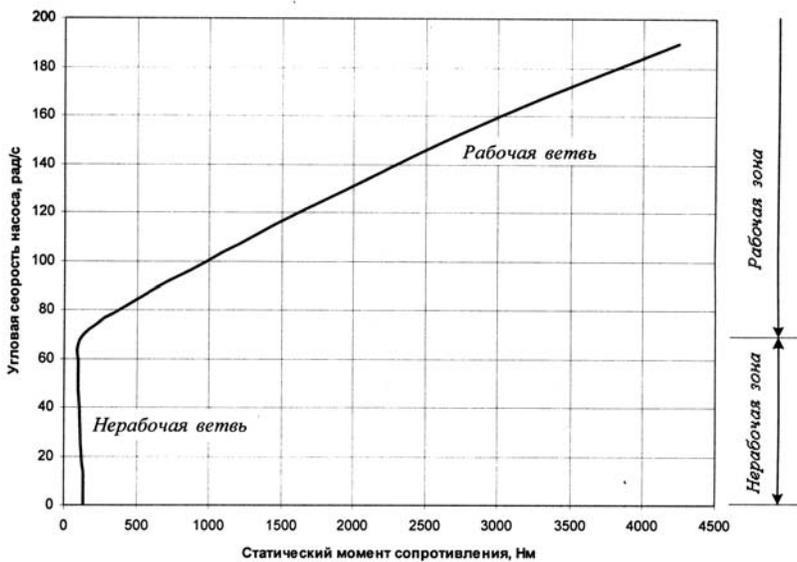


Рис. 3.4. Механическая характеристика насоса 1Д1250-125А

3.4. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ ЧАСТОТНОМ УПРАВЛЕНИИ

3.4.1. Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя

Для расчета статических характеристик асинхронного двигателя необходимо знание следующих параметров:

- r_1 — активное сопротивление обмотки фазы статора;
- r'_2 — приведенное к статорной цепи активное сопротивление обмотки фазы ротора;
- x_1 — индуктивное сопротивление обмотки фазы статора;
- x'_2 — приведенное к статорной цепи индуктивное сопротивление обмотки фазы ротора;
- x_0 — индуктивное сопротивление намагничивающей цепи.

При частотном управлении в соответствии с общепринятыми допущениями [11], которые обуславливают постоянство сопротивлений схемы замещения при данной частоте, принята Т-образная схема замещения асинхронного двигателя, приведенная на рис. 3.5.

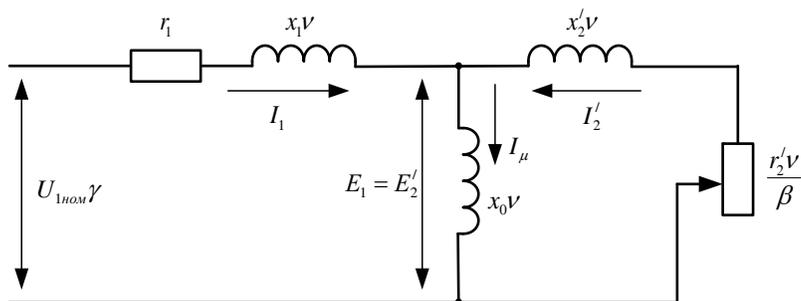


Рис. 3.5. Схема замещения фазы асинхронного двигателя при частотном управлении

Необходимо обратить особое внимание на то, что схема замещения приведена для *фазы* асинхронного двигателя, соответственно токи и напряжения являются *фазными*.

На схеме замещения приняты следующие обозначения:

$U_{1ном}$ — номинальное напряжение фазы статора;

E_1 — фазное значение ЭДС статора;

E'_2 — фазное значение ЭДС ротора, приведенное к статорной обмотке;

I_1 — фазный ток статора;

I'_2 — фазный ток ротора, приведенный к статорной обмотке;

I_μ — ток намагничивания фазы;

$\gamma = U_1 / U_{1ном}$ — относительное напряжение статора;

$\nu = f_1 / f_{1ном}$ — относительная частота тока статора;

$\beta = f_2 / f_{1ном}$ — параметр абсолютного скольжения или относительная частота тока ротора,

где f_1 , f_2 — текущие значения частот статора и ротора; $f_{1ном}$ — номинальная частота тока статора.

Активное сопротивление фазы статора можно определить из выражения

$$r_1 \approx \frac{U_{1ном} \cdot s_{ном}}{I_{1ном}}, \quad (3.17)$$

где $s_{ном}$ — номинальное скольжение двигателя;

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}}{3 \cdot U_{1ном} \cdot \eta_{ном} \cdot \cos \varphi_{ном}} \quad \text{— номинальный фазный ток ста-}$$

тора; $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя, Вт; $\eta_{ном}$ — номинальный КПД двигателя; $\cos \varphi_{ном}$ — номинальный коэффициент мощности двигателя.

Номинальное скольжение двигателя определяется по паспортным данным двигателя или по формуле

$$s_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0}, \quad (3.18)$$

где n_0 — синхронная частота вращения магнитного поля статора, об/мин; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин.

Синхронная частота вращения магнитного поля статора зависит от числа пар полюсов p_n и определяется по формуле

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_{1ном}}{p_n}, \quad (3.19)$$

где p_n — число пар полюсов двигателя.

Параметры схемы замещения можно определить тремя способами в зависимости от приводимых в литературе паспортных данных.

Первый способ: известны относительные значения параметров схемы замещения r_1^* ; $r_2'^*$; x_1^* ; $x_2'^*$; x_0^* . Перевод в абсолютные величины производится по формуле [1]:

$$r_1 = r_1^* \cdot \frac{U_{1ном}}{I_{1ном}}. \quad (3.20)$$

Вычисление абсолютных величин r_2' ; x_1 ; x_2' ; x_0 производят аналогично, также как по формуле (3.20), подставляя соответствующие величины относительных значений параметров схемы замещения. Значение r_1 определяется по (3.20) вместо (3.17). Этот способ является наиболее точным по сравнению со вторым и третьим способами.

Второй способ: известны по каталогам данные опытов короткого замыкания и холостого хода. Необходимые для расчетов данные опыта короткого замыкания:

- мощность короткого замыкания $P_{кз}$, Вт;
- линейное напряжение короткого замыкания $U_{кз}$, В;

- ток короткого замыкания I_{K3} , А;
- коэффициент мощности короткого замыкания $\cos \varphi_{K3}$.

Необходимые для расчетов данные опыта холостого хода:

- суммарные потери в режиме холостого хода P_{XX} , которые складываются из потерь в меди P_m , потерь в стали $P_{ст}$ и механических потерь $P_{мех}$, Вт;
- линейное напряжение холостого хода U_{XX} , В;
- ток холостого хода I_{XX} , А;
- коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_{XX}$.

Расчет параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя ведется в следующем порядке.

Активное сопротивление фазы статора r_1 определяется по (3.17).

Из уравнения мощности короткого замыкания

$$P_{K3} = 3 \cdot I_{K3}^2 \cdot (r_1 + r_2')$$

получаем

$$r_2' = \frac{P_{K3}}{3 \cdot I_{K3}^2} - r_1. \quad (3.21)$$

На основании уравнения

$$U_{K3} = I_{K3} \cdot z_{\kappa} = I_{K3} \cdot \sqrt{(r_1 + r_2')^2 + x_{\kappa}^2}$$

определяется выражение для индуктивного сопротивления короткого замыкания

$$x_{\kappa} = \sqrt{\frac{U_{K3}^2}{I_{K3}^2} - (r_1 + r_2')^2}. \quad (3.22)$$

Значение x_{κ} можно определить также по формуле

$$x_{\kappa} = \sqrt{z_{\kappa}^2 - r_{\kappa}^2}, \quad (3.23)$$

где $z_k = \frac{U_{K3}}{I_{K3}}$; $r_k = z_k \cdot \cos \Phi_{K3}$.

Известно, что $x_1 \approx x_2'$, поэтому можно принять

$$x_1 = x_2' = x_k / 2. \quad (3.24)$$

Так как при холостом ходе у асинхронного двигателя ток ротора почти равен нулю, то уравнение для мощности потерь в этом случае будет иметь вид

$$P_{XX} = 3 \cdot I_{XX}^2 \cdot (r_1 + r_0).$$

Отсюда получаем выражение для активного сопротивления намагничивающей цепи

$$r_0 = \frac{P_{XX}}{3 \cdot I_{XX}^2} - r_1.$$

Индуктивное сопротивление намагничивающей цепи можно определить на основании следующего известного уравнения:

$$U_{XX} = I_{XX} \cdot \sqrt{(r_1 + r_0)^2 + (x_1 + x_0)^2}.$$

После преобразования имеем следующее квадратное уравнение:

$$x_0^2 + 2 \cdot x_1 \cdot x_0 + x_1^2 + (r_1 + r_0)^2 - \left(\frac{U_{XX}}{I_{XX}} \right)^2 = 0.$$

Решение этого квадратного уравнения дает значение x_0 :

$$x_0 = \sqrt{\left(\frac{U_{XX}}{I_{XX}} \right)^2 - (r_1 + r_0)^2} - x_1. \quad (3.25)$$

Полученные параметры схемы замещения вторым способом являются менее точными по сравнению с первым способом.

Третий способ является наименее точным, однако, наиболее распространенным, т.к. в этом случае используются паспортные данные двигателей, приводимые в большинстве каталогов. Расчет выполняется с помощью следующих зависимостей.

Активное сопротивление фазы статора r_1 определяется по (3.17).

Индуктивное сопротивление короткого замыкания x_k можно определить по формуле:

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{ном} \cdot M_{max}} - r_1\right)^2 - r_1^2}, \quad (3.26)$$

где $\omega_{ном} = 2 \cdot \pi \cdot n_0 / 60$ — номинальная угловая скорость магнитного поля статора; $M_{max} = \lambda \cdot M_{ном}$ — максимальный (критический) момент двигателя; λ — перегрузочная способность двигателя, определяется по каталогу на двигатель;

$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном}$ — номинальный момент двигателя, Нм; $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя, Вт; $\omega_{ном} = 2 \cdot \pi \cdot n_{ном} / 60$ — номинальная угловая скорость вала двигателя.

С достаточной точностью считается, что индуктивные сопротивления статора и приведенное ротора примерно равны, тогда

$$x_1 \approx x_2' = \frac{x_k}{2}. \quad (3.27)$$

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным двигателем

$$M = \frac{3 \cdot U_{ном} \cdot r_2'}{\omega_{ном} \cdot s \cdot [(r_1 + r_2' / s)^2 + x_k^2]},$$

откуда, при $M_{ном}$ и $s_{ном}$, получаем величину приведенного активного сопротивления фазы ротора

$$r_2' = s_{ном} \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{1ном}^2}{2 \cdot M_{ном} \cdot \omega_{1ном}} - r_1 \right) + s_{ном} \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{1ном}^2}{2 \cdot M_{ном} \cdot \omega_{1ном}} - r_1 \right)^2 - r_1^2 - x_k^2}. \quad (3.28)$$

В соответствии с векторной диаграммой токов асинхронной машины, баланс токов имеет вид

$$I_1^2 = I_\mu^2 + 2 \cdot I_\mu \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2 + (I_2')^2,$$

откуда при номинальных токах статора $I_{1ном}$ и приведенного ротора $I_{2ном}'$ можно решить уравнение относительно номинального тока намагничивающего контура

$$I_{1ном} = \sqrt{\left(I_{2ном}' \cdot \sin \varphi_{2ном} \right)^2 + I_{1ном}^2 - \left(I_{2ном}' \right)^2} - I_{2ном}' \cdot \sin \varphi_{2ном}, \quad (3.29)$$

где $\sin \varphi_{2ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2ном}}$; $\cos \varphi_{2ном} = r_2' / \sqrt{\left(r_2' \right)^2 + \left(x_2' \cdot s_{ном} \right)^2}$ — номинальный коэффициент мощности роторной обмотки.

Номинальный приведенный ток ротора определяется по известному выражению

$$I_{2ном}' = \sqrt{\frac{M_{ном} \cdot \omega_{1ном} s_{ном}}{3 r_2'}}. \quad (3.30)$$

Номинальная ЭДС статора [14]

$$E_{1ном} = U_{1ном} \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot p_n). \quad (3.31)$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивающей цепи

$$x_0 = \frac{E_{1ном}}{I_\mu}. \quad (3.32)$$

На основании рассчитанных параметров схемы замещения асинхронного двигателя определяются коэффициенты рассеяния статора, ротора и общий коэффициент рассеяния [11]:

$$\tau_1 = x_1 / x_0; \quad \tau_2 = x_2' / x_0; \quad \tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2. \quad (3.33)$$

В соответствии с рекомендациями [11] введем обозначения:

$$b = \tau_1 \cdot (1 + \tau_2); \quad c = x_0 \cdot \tau; \quad d = r_1 / x_0; \quad e = 1 + \tau_1. \quad (3.34)$$

С помощью полученных параметров двигателя, коэффициентов рассеяния и принятых обозначений (3.34) определяются значения $A(v, \beta)$, $B(\beta)$, $C(\beta)$, $D(\beta)$ [11], необходимые для расчета статических характеристик асинхронного двигателя при частотном управлении:

$$A(v, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot v^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_1 \cdot r_2' \cdot v \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot v^2) \cdot (r_2')^2; \quad (3.35)$$

$$B(\beta) = (r_2')^2 + (x_2')^2 \cdot \beta^2; \quad (3.36)$$

$$C(\beta) = (r_2' / x_0)^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2; \quad (3.37)$$

$$D(\beta) = (r_2' / x_0)^2 + \tau_2^2 \cdot \beta^2. \quad (3.38)$$

3.4.2. Расчет статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором напряжения при вентиляторном характере момента статической нагрузки

Расчет статических характеристик асинхронного электродвигателя при управлении от ПЧ с АИН выполняется с помощью следующих уравнений, представленных в [11]:

$$E_1 = U_{ном} \cdot \gamma \cdot v \cdot \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(v, \beta)}}; \quad (3.39)$$

$$I_1 = U_{1ном} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(v, \beta)}}; \quad (3.40)$$

$$I_2' = U_{1ном} \cdot \gamma \cdot \frac{\beta}{\sqrt{A(v, \beta)}}; \quad (3.41)$$

$$I_\mu = U_{1ном} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(v, \beta)}}; \quad (3.42)$$

$$M = \frac{3U_{1н}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{r_2' \cdot \beta}{A(v, \beta)}, \quad (3.43)$$

где $\gamma = U_1 / U_{1ном}$ — относительное напряжение статорной цепи, определяется законом частотного регулирования; $v = f_1 / f_{1ном}$ — относительная частота тока статора;

Современные преобразователи частоты позволяют реализовать несколько законов частотного регулирования, из которых получили наибольшее распространение:

- основной закон — для электроприводов машин и установок с постоянным моментом статической нагрузки

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{const}. \quad (3.44)$$

- вентиляторный закон — для электроприводов турбомашин с вентиляторным характером момента статической нагрузки

$$\frac{E_1}{f_1^2} = \text{const}. \quad (3.45)$$

Оба закона применяются для диапазона частот $f_1 = 0 \div 50$ Гц, т.е. справедливы для $v \leq 1,0$. Для частот $f_1 > 50$ Гц система управления обеспечивает регулирование скорости с постоянством мощности, при котором задается закон в виде

$$\frac{U_1^2}{f_1} = \text{const}. \quad (3.46)$$

В данном разделе рассмотрены статические характеристики для вентиляторного закона частотного регулирования, характерного для насосных и вентиляторных установок.

Вентиляторный закон частотного регулирования (3.45) можно представить в виде

$$\frac{U_1 - I_1 \cdot r_1}{f_1^2} = \text{const},$$

для которого относительное напряжение статора γ должно изменяться по следующему закону

$$\gamma = v^2 + \frac{I_1 \cdot r_1}{U_{1ном}}. \quad (3.47)$$

Если заменить значение I_1 в уравнении (3.47) на выражение (3.40), то, после ряда преобразований, получим

$$\gamma = \frac{k_e \cdot v^2}{1 - r_1 \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(v, \beta)}}} = \frac{k_e \cdot v^2 \cdot \sqrt{A(v, \beta)}}{\sqrt{A(v, \beta)} - r_1 \cdot \sqrt{C(\beta)}}, \quad (3.48)$$

где $k_e = \frac{E_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,985 - 0,00373 \cdot p_n$ в соответствии с (3.31).

Для относительной частоты $v \leq 1,0$ уравнения электро-механической и механической характеристик с вентиляторным законом частотного регулирования, учитывая (3.40), (3.43) и (3.48),

$$I_1 = \frac{E_{1ном} \cdot v^2 \cdot \sqrt{C(\beta)}}{\sqrt{A(v, \beta)} - r_1 \cdot \sqrt{C(\beta)}}; \quad (3.49)$$

$$M = \frac{3 \cdot E_{1ном}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{r_2' \cdot v^4 \cdot \beta}{\left[\sqrt{A(v, \beta)} - r_1 \cdot \sqrt{C(\beta)} \right]^2}. \quad (3.50)$$

Уравнения электромеханической и механической характеристик для $v > 1,0$, учитывая $\gamma^2 = v$ в соответствии с (3.46),

$$I_1 = U_{\text{ном}} \sqrt{\frac{v \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}}; \quad (3.51)$$

$$M = \frac{3U_{\text{ном}}^2 \cdot r_2' \cdot v \cdot \beta}{\omega_{\text{ном}} A(v, \beta)} \quad (3.52)$$

Параметр критического абсолютного скольжения двигателя находится как экстремум функции момента, т.е. когда $\partial M / \partial \beta = 0$, где M определяется на основании (3.43). Тогда параметр абсолютного критического скольжения

$$\beta_{\text{кр}} = r_2' \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 v^2}{b^2 + c^2 v^2}}. \quad (3.53)$$

Угловая скорость вала двигателя вычисляется по формуле:

$$\omega = \omega_{\text{ном}} \cdot (v - \beta). \quad (3.54)$$

Расчет координат семейства электромеханических $I_1 = f(\beta)$ и механических $M = f(\beta)$ характеристик асинхронного двигателя при вентиляторном законе частотного управления производится в следующей последовательности:

- задаются несколько значений относительных частот v , обычно в диапазоне $v = 0,1 \div 1,2$;
- для каждой заданной частоты задаются несколько значений параметра абсолютного скольжения β , обычно в диапазоне $\beta = 0 \div \beta_{\text{кр}}$ с промежуточной величиной $\beta_{\text{ном}} = s_{\text{ном}}$, для контроля правильности проведенных вычислений, значения $\beta_{\text{кр}}$ для каждой из частот вычисляются по (3.53);
- по уравнениям (3.49) и (3.50) вычисляются значения токов I_1 и моментов M для относительных частот $v \leq 1,0$;

- по уравнениям (3.51) и (3.52) вычисляются значения токов I_1 и моментов M для относительных частот $\nu > 1,0$;
- от значений параметра абсолютного скольжения β переходят к угловой скорости ω двигателя по формуле (3.54) и приводятся графические зависимости $I_1 = f(\nu, \omega)$ и $M = f(\nu, \omega)$ для семейства электромеханических и механических характеристик.

3.4.3. Расчет статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором тока

При питании асинхронного двигателя от источника тока, которым является ПЧ с АИТ, в [11] выведен ряд соотношений, которые описываются формулами:

$$E_1 = E_2' = \nu \cdot I_1 \cdot \sqrt{\frac{B(\beta)}{C(\beta)}}; \quad (3.55)$$

$$\Phi = \frac{1}{c_1 \cdot f_{ном}} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\frac{B(\beta)}{C(\beta)}}; \quad (3.56)$$

$$I_2' = I_1 \cdot \frac{\beta}{\sqrt{C(\beta)}}; \quad (3.57)$$

$$I_\mu = I_1 \cdot \sqrt{\frac{D(\beta)}{C(\beta)}}; \quad (3.58)$$

$$M = \frac{3 \cdot I_1^2 \cdot r_2'}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{\beta}{C(\beta)}. \quad (3.59)$$

Данные формулы следует уточнить для выбранного закона частотного регулирования. Большинство современных частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами тока оснащаются системой управления, обеспечивающей

постоянство потокосцепления ротора, т.е. $\Psi_r = \text{const}$. В этих электроприводах обеспечивается стабилизация магнитного потока в воздушном зазоре двигателя. Поддержание магнитного потока Φ на неизменном уровне осуществляется регулированием тока статора I_1 в функции параметра абсолютного скольжения β по определенному закону, что вытекает из соотношения (3.56). Закон изменения тока I_1 в функции параметра абсолютного скольжения, при котором обеспечивается постоянство магнитного потока двигателя, имеет вид [3]:

$$I_1 = x_0 \cdot I_{\text{нном}} \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{B(\beta)}}. \quad (3.60)$$

Формулы (3.55) ÷ (3.59) с учетом (3.60) имеют вид:

$$E_1 = E_2' = v \cdot x_0 \cdot I_{\text{нном}};$$

$$\Phi = \frac{x_0 \cdot I_{\text{нном}}}{c_1 \cdot f_{\text{нном}}};$$

$$I_2' = x_0 \cdot I_{\text{м.ном}} \cdot \frac{\beta}{\sqrt{B(\beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot r_2' \cdot (x_0 \cdot I_{\text{нном}})^2}{\omega_{\text{нном}}} \cdot \frac{\beta}{B(\beta)}. \quad (3.61)$$

С помощью формул (3.60) и (3.61) рассчитываются электромеханические и механические характеристики частотно-регулируемых электроприводов с автономным инвертором тока, имеющим закон частотного регулирования $\Psi_r = \text{const}$.

Для частот 50 Гц и менее жесткость электромеханических и механических характеристик в соответствии с (3.60) и (3.61) не зависят от частоты тока, а зависят только от параметра абсолютного скольжения β . Следовательно, на этом диапазоне изменения частот характеристики параллельны друг другу.

При работе на частотах свыше 50 Гц с ослаблением магнитного поля двигателя статические характеристики рассчитываются с учетом закона частотного регулирования постоянства мощности.

Расчет координат семейства электромеханических $I_1 = f(\beta)$ и механических $M = f(\beta)$ характеристик асинхронного двигателя при законе частотного управления с постоянством результирующего вектора потокосцепления ротора $\Psi_r = \text{const}$ производится в следующей последовательности:

- задаются несколько значений параметра абсолютного скольжения β , обычно в диапазоне $\beta = 0 \div \beta_{кр}$ с промежуточной величиной $\beta_{ном} = s_{ном}$, для контроля правильности проведенных вычислений. Значение $\beta_{кр}$ не зависит от частоты для диапазона $v = 0 \div 1,0$ и определяется по формуле $\beta_{кр} = r'_2 / E'_2$ [3], для частот свыше 50 Гц $\beta_{кр}$ вычисляются по (3.53);
- по уравнениям (3.60) и (3.61) вычисляются значения токов I_1 и моментов M для относительных частот $v \leq 1,0$;
- по уравнениям (3.51) и (3.52) вычисляются значения токов I_1 и моментов M для относительных частот $v > 1,0$;
- от значений параметра абсолютного скольжения β переходят к угловой скорости ω двигателя по формуле (3.54) и приводятся графические зависимости $I_1 = f(v, \omega)$ и $M = f(v, \omega)$ для семейства электромеханических и механических характеристик.

3.5. РАСЧЕТ И ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ «АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНЫЙ КАСКАД»

Основными элементами силовой схемы АВК (рис. 2.6) являются ведомый инвертор UZ для создания противо-ЭДС в роторной цепи, асинхронный двигатель M с фазным ротором и неуправляемый выпрямитель UD , включенный в роторную

цепь асинхронного двигателя. Для обеспечения соответствия противо-ЭДС в роторной цепи U_{di} инвертора и напряжения питающей сети U_c служит согласующий (вентильный) трансформатор T . С целью уменьшения пульсаций выпрямленного тока в роторную цепь постоянного тока включают сглаживающий дроссель LR .

Принцип действия АВК заключается в следующем. Ток ротора $I_{2об}$ асинхронного двигателя выпрямляется с помощью вентилей UD . В цепь выпрямленного тока I_d ротора введена добавочная ЭДС E_u ведомого сетью инвертора (противо-ЭДС инвертора). Выпрямленное напряжение E_g ротора должно компенсировать противо-ЭДС E_u инвертора, падение напряжения на активных сопротивлениях $I_d R_{p.ц}$ роторной цепи и падение напряжения, обусловленное процессом коммутации вентилей.

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален выпрямленному току ротора. Поэтому, регулирование выпрямленного тока ротора, посредством изменения величины противо-ЭДС, позволяет регулировать величину момента и скорость вращения. Величина противо-ЭДС инвертора регулируется за счет изменения угла открывания (опережения в инверторном режиме) управляемых вентилей (тиристоров) UZ .

При равенстве противо-ЭДС инвертора и выпрямленного напряжения ротора асинхронного двигателя ток в цепи ротора и момент, развиваемый двигателем, будут равны нулю. При уменьшении противо-ЭДС инвертора ток в цепи ротора возрастает, момент двигателя увеличивается и скорость его начинает повышаться. Увеличение скорости двигателя приводит к уменьшению выпрямленного напряжения ротора. Ускорение двигателя происходит до тех пор, пока не будет достигнуто равенство противо-ЭДС инвертора и выпрямленного напряжения ротора. Аналогичные процессы происходят при увеличении противо-ЭДС инвертора, в этом случае скорость уменьшается до достижения баланса между противо-ЭДС инвертора и выпрямленного напряжения ротора.

Выбор элементов силовой схемы обусловлен некомплектностью поставок электропривода системы АВК. Расчет представлен по методике, изложенной в [9]. Учитывая, что для неуправляемого выпрямителя UD и ведомого сетью инвертора UZ в современных системах электроприводов используется трехфазная мостовая схема, во всех представленных расчетах используются соответствующие коэффициенты.

3.5.1. Расчет и выбор согласующего трансформатора

Согласующий трансформатор выбирается по току I_{2mp} и напряжению U_{2mp} вторичной обмотки. Расчетная мощность трансформатора определяется по формуле

$$S_{mp} = \frac{P_{ном} \cdot s_{max}}{0,965 \cdot \eta_{дв.ном}}, \quad (3.62)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя; s_{max} — максимальное скольжение, обусловленное диапазоном регулирования; $\eta_{дв.ном}$ — номинальный КПД двигателя.

Необходимое значение фазного напряжения вторичной обмотки согласующего трансформатора при трехфазной мостовой схеме

$$U_{2ф.мп} = \frac{E_{e0} \cdot s_{max}}{\kappa_u \cdot \cos \beta_{u \min}} = 0,4545 \cdot E_{e0} \cdot s_{max}, \quad (3.63)$$

где $E_{e0} = 1,35 \cdot E_{2ном}$ — среднее значение ЭДС выпрямителя при $s = 1$ для трехфазной мостовой схемы; $\kappa_u = 2,34$ — коэффициент фазного напряжения для трехфазной схемы; $\beta_{u \min} = 20^\circ$ — минимальный угол опережения, обусловленный условием опрокидывания инвертора;

Линейное напряжение вторичной обмотки

$$U_{2л.мп} = \sqrt{3} \cdot U_{2ф.мп}.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора при трехфазной мостовой схеме выпрямителя и инвертора

$$I_{2тр} = I_{2дв.ном} \quad (3.64)$$

где $I_{2дв.ном}$ — номинальный ток ротора.

По полученным данным выбирается трансформатор (табл. 3.8) при выполнении условий:

$$S_{тр.ном} \geq S_{тр}; U_{2ном} \geq U_{2л.тр}; I_{2ном} \geq I_{2тр}. \quad (3.65)$$

Таблица 3.8

Технические характеристики трансформаторов

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Напряжение первичной обмотки, В	Напряжение вторичной обмотки, В	Потери, Вт		Напр. КЗ, %
				холодного хода	короткого замыкания	
ТСЗ-160/10	160	6000; 10000	230/400; 400/690	700	2700	5,5
ТСЗ-250/10	250	6000; 10000	230/400; 400/690	1000	3800	5,5
ТСЗ-400/10	400	6000; 10000	230/400; 400/690	1300	5400	5,5
ТСЗ-630/10	630	6000; 10000	400/690	2000	7300	5,5
ТСЗ-1000/10	1000	6000; 10000	400/690	3000	11200	5,5
ТСЗ-1600/10	1600	6000; 10000	400/690	4200	16000	5,5

Для дальнейших расчетов необходимо знание параметров обмоток трансформатора. Активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке, определяется по формуле

$$r_{тр} = \frac{\Delta P_{КЗ}}{3 \cdot I_{2ном}^2}, \quad (3.66)$$

где $\Delta P_{КЗ}$ — потери короткого замыкания трансформатора, определяются по паспортным данным трансформатора.

Индуктивное сопротивление трансформатора

$$x_{mp} = \frac{u_k \% \cdot U_{1ном}}{100 \cdot I_{1ном} \cdot k_{mp}^2} \quad (3.67)$$

где $U_{1ном}$ — номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора; $I_{1ном}$ — номинальный ток первичной обмотки трансформатора; $k_{mp} \approx \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}}$ — коэффициент трансформации.

3.5.2. Расчет параметров обмоток асинхронного двигателя с фазным ротором

Часто при проектировании не располагают обмоточными данными электродвигателей. Необходимые для расчета параметры могут быть ориентировочно определены по паспортным данным двигателя, пользуясь приближенными и эмпирическими формулами. При этом активные и индуктивные сопротивления двигателя приводятся к роторной обмотке.

Активное сопротивление фазы статорной обмотки асинхронного двигателя, приведенное к роторной обмотке

$$r_1' = \frac{U_{1ф.дв} \cdot s_{ном}}{k_{mp.дв}^2 \cdot I_{1дв.ном}}, \quad (3.68)$$

где $U_{1ф.дв}$ — номинальное фазное напряжение статорной обмотки двигателя; $s_{ном}$ — номинальное скольжение двигателя; $k_{mp.дв}$ — коэффициент трансформации двигателя; $I_{1дв.ном}$ — номинальный ток статорной обмотки двигателя.

Номинальное скольжение двигателя определяется по паспортным данным двигателя или по формуле

$$s_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0}, \quad (3.69)$$

где n_0 — синхронная частота вращения магнитного поля статора,

об/мин; $n_{ном}$ — номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин.

Синхронная частота вращения магнитного поля статора зависит от числа пар полюсов p_n и определяется по формуле

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_c}{p_n}, \quad (3.70)$$

где f_c — частота тока статорной обмотки, Гц.

Коэффициент трансформации асинхронного двигателя может быть определен по формуле

$$k_{тр.дв} \approx \frac{U_{1ф.ном}}{U_{2ф.ном}} = \frac{U_{1дв}}{E_{2дв}}, \quad (3.71)$$

где $U_{1дв}$; $E_{2дв}$ — номинальные линейные напряжения статорной и роторной обмоток асинхронного двигателя.

Активное сопротивление фазы роторной обмотки

$$r_2 = \frac{105 \cdot M_{ном} \cdot s_{ном}}{I_{2дв.ном}^2 \cdot p_n}, \quad (3.72)$$

где $M_{ном} = P_{дв.ном} / \omega_{ном}$ — номинальный электромагнитный момент двигателя, Нм; $P_{дв.ном}$ — номинальная мощность двигателя, Вт; $\omega_{ном} = 2 \cdot \pi \cdot n_{ном} / 60$ — номинальная угловая скорость вала двигателя, рад/с.

Индуктивное сопротивление фазы двигателя, приведенное к роторной обмотке

$$x_d = \frac{E_{2дв}^2}{2\omega_0 \cdot \lambda \cdot M_{ном}}, \quad (3.73)$$

где $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot n_0 / 60$ — синхронная угловая скорость двигателя; $\lambda = M_{max} / M_{ном}$ — перегрузочная способность двигателя, определяется по паспортным данным двигателя; M_{max} — максимальный (критический) момент двигателя.

3.5.3. Расчет и выбор диодов неуправляемого выпрямителя и тиристорov инвертора

Вентили (диоды и тиристоры) неуправляемого выпрямителя и инвертора выбираются по пусковому среднему току через вентиль и максимальному обратному напряжению (рабочему напряжению). Ток через вентиль при трехфазной мостовой схеме выпрямления

$$I_{ср.в} = \kappa_{\epsilon} \cdot I_{d.\max} = 0,33 \cdot I_{d.\max}, \quad (3.74)$$

где $I_{d.\max} = 2 \cdot I_{d.\text{ном}}$ — максимальный пусковой ток, обычно принимается как двукратное значение номинального тока;

$I_{d.\text{ном}} = \frac{I_{2\text{дв.ном}}}{0,817}$ — номинальный выпрямленный ток для трехфазной мостовой схемы.

Максимальное обратное напряжение на вентиле при трехфазной мостовой схеме

$$U_{обр} = \kappa_{обр} \cdot E_{\epsilon 0} = 1,05 \cdot E_{\epsilon 0}. \quad (3.75)$$

Найденные значения $I_{ср.в}$ и $U_{обр}$ используются для выбора диодов (UD) и тиристорov (UZ) преобразовательных устройств. При этом должны выполняться следующие условия:

- средний ток через вентиль не должен превышать предельный ток выбираемого вентиля при заданных условиях охлаждения, т.е. $I_{ср.в} \leq I_{нр.в}$;
- максимальное обратное напряжение на вентиле не должно превышать рекомендуемого рабочего напряжения U_p , величина которого приводится в табл. 3.9 для соответствующего класса по напряжению диодов и тиристорov, т.е. $U_{обр} \leq U_p$.

Выбор типа диодов производится по табл. 3.10, а тиристорov по табл. 3.11.

Таблица 3.9

Рекомендуемое рабочее напряжение вентиляей

Класс	U_p , В		
	Диоды	Тиристоры	Симисторы
1	65	80	90
2	135	160	175
3	200	240	255
4	270	320	350
5	335	400	440
6	400	480	530
7	470	560	615
8	530	640	725
9	600	720	795
10	670	800	880
11	740	880	—
12	800	960	—
13	870	1040	—
14	940	1120	—
16	1070	1280	—
18	1200	1440	—
20	1340	1600	—
22	1470	1760	—
24	1600	1920	—
26	2000	2080	—

Таблица 3.10

Технические данные низкочастотных диодов

Параметры	Типы диодов						
	B10	B25	B50	B200	B320	B500	B800
Предельный ток, А, при температуре корпуса 100 ⁰ С	10	25	50	200	320	500	800
Ударный ток, А, при длительности 10 мс	600	990	2200	6000	7200	9900	16500
Классы по напряжению	1—10	1—10	1—12	1—16	1—18	1—25	1—16
Прямое падение напряжения, не более, В	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,75

Таблица 3.11

Технические данные низкочастотных тиристоров

Параметры	Типы тиристоров										
	T 25	T 50	T 100	T 160	T 9-250	T 2-320	T 123-400	T 133-500	T 133-630	T 243-800	T 243-1000
Предельный ток, <i>A</i>	25	50	100	160	250	320	400	500	630	800	1000
Температура корпуса, °C	85	85	85	85	125	125	125	125	125	125	125
Классы по напряжению	1÷12	1÷12	1÷12	1÷12	4÷16	1÷14	4÷16	4÷16	4÷12	8÷24	10÷18
Прямое падение напряжения, не более, <i>B</i>	1,9	1,75	1,95	1,75	1,85	2,1	1,75	1,8	1,75	2,1	1,8
Отпирающий ток управления, не более, <i>A</i>	0,15	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,25	0,25	0,3	0,3
Отпирающее напряжение, не более, <i>B</i>	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	6,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Ударный ток, не менее, <i>кA</i>	0,8	1,5	3,0	3,5	5,5	6,5	7,0	10,0	12,0	16,0	20,0

3.5.4. Расчет и выбор сглаживающего дросселя (реактора)

Необходимую индуктивность роторной цепи определяют из условия ограничения пульсаций тока величиной $I_{nm} = (0,03 \div 0,05) \cdot I_{d,ном}$, т.е. ограничивая пульсации мгновенного значения выпрямленного тока до 3—5 % от номинального тока. Тогда необходимая индуктивность роторной цепи при трехфазной мостовой схеме выпрямления

$$L = \frac{0,178 \cdot E_{\epsilon 0}}{p \cdot \omega_c \cdot I_{nm}} = 9,44 \cdot 10^{-5} \frac{E_{\epsilon 0}}{I_{nm}}. \quad (3.76)$$

Индуктивность сглаживающего дросселя $L_{\partial p}$ выбирается с учетом индуктивности двигателя и согласующего трансформатора, которые определяются по формулам

$$L_{\partial} = \frac{x_{\partial}}{\omega_c} = \frac{x_{\partial}}{314}, \quad L_{mp} = \frac{x_{mp}}{\omega_c} = \frac{x_{mp}}{314}, \quad (3.77)$$

тогда индуктивность сглаживающего дросселя для трехфазной мостовой схемы

$$L_{\partial p} = L - 2 \cdot (L_{\partial} + L_{mp}). \quad (3.78)$$

Дроссель выбирается по данным табл. 3.12 из условия:

$$I_{\partial p,ном} \geq L_{\partial p}; \quad I_{\partial p,ном} \geq I_{d,ном}.$$

Таблица 3.12

Технические характеристики реакторов серии ФРОС на силу тока 250—1000 А

Тип реактора	Номинальная сила тока, А	Индуктивность, мГн	Потери в обмотке реактора, Вт	Масса, кг
ФРОС – 65/0,5	250	1,5	110	200
ФРОС – 65/0,5	320	1,0	120	200
ФРОС – 125/0,5	500	0,75	150	260

Тип реактора	Номинальная сила тока, A	Индуктивность, $мГн$	Потери в обмотке реактора, $Вт$	Масса, $кг$
ФРОС – 250/0,5	800	0,6	420	430
ФРОС – 250/0,5	1000	0,35	510	430
ФРОС – 500/0,5	500	3,25	900	710
ФРОС – 1000/0,5	800	2,3	1650	1220
ФРОС – 1000/0,5	1000	1,6	2650	1220

Величина активного сопротивления дросселя $r_{др}$ вычисляется по формуле

$$r_{др} = \frac{\Delta P_{др}}{I_{др.ном}^2}, \quad (3.79)$$

где $\Delta P_{др}$ — потери в обмотке дросселя (реактора).

3.6. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

Методика расчета статических характеристик АВК приведена по упрощенной схеме, рекомендованной в [8].

Добавочная ЭДС $E_{доб}$ создается вентильным преобразователем, работающим в режиме ведомого сетью инвертора, и вводится в цепь выпрямленного тока I_d ротора встречно по отношению к ЭДС E_g выпрямителя (рис. 2.6). Среднее значение выпрямленного напряжения зависит от величины линейной ЭДС $E_{2ном}$ ротора и скольжения двигателя s и определяется выражением

$$U_g = E_{g0} \cdot s - I_d (R'_s + R_r), \quad (3.80)$$

где $E_{g0} = 1,35 \cdot E_{2дв.ном}$ — среднее значение ЭДС выпрямителя

при скольжении $s = 1$ для трехфазной мостовой схемы выпрямителя;

Эквивалентное сопротивление R'_3 учитывает падение напряжения, обусловленное коммутацией вентилей выпрямителя

$$R'_3 = \frac{3 \cdot x_\delta \cdot s}{2 \cdot \pi} = R_3 \cdot s,$$

где $x_\delta = x_2 + x_1 / k^2$ — приведенное к цепи ротора индуктивное сопротивление фазы двигателя, которое пропорционально скольжению двигателя.

Сопротивление R_δ определяет падение напряжения, создаваемое активным сопротивлением двигателя, и зависит от приведенного к цепи ротора активного сопротивления фаз $r_\delta = r_2 + r_1 / k^2$ и схемы выпрямления. Для трехфазной мостовой схемы $R_\delta = 2 \cdot r_\delta$.

Уравнение (3.80), с учетом полученных выражений, можно представить в виде

$$U_a = E_{a0} \cdot s - I_d \cdot \frac{3 \cdot x_\delta \cdot s}{2 \cdot \pi} - I_d \cdot R_\delta. \quad (3.81)$$

Мощность потерь скольжения можно определить как сумму потерь в активных сопротивлениях двигателя и мощности на выходе выпрямителя, т.е.

$$\Delta P = M \cdot \omega_0 \cdot s = I_d^2 R_\delta + U_a \cdot I_d.$$

Тогда с учетом (3.80) для вращающего момента двигателя в схеме асинхронно-вентильного каскада можно получить выражение

$$M = \frac{1,35 \cdot E_{2ном} \cdot s - R_3 \cdot I_d}{\omega_0} \cdot I_d. \quad (3.82)$$

Величина выпрямленного тока I_d зависит от добавочной ЭДС, создаваемой инвертором, напряжение на выходе которого определяется выражением

$$U_u = E_{u0} \cos \beta_u + R_{u\varepsilon} \cdot I_d \quad (3.83)$$

где $E_{u0} = 1,35 \cdot U_{2mp}$ — максимальное значение средней ЭДС инвертора при угле опережения $\beta_u = 0$ и зависящее от линейного напряжения U_{2mp} вторичной обмотки трансформатора;

$$R_{u\varepsilon} = \frac{3 \cdot x_{mp}}{2 \cdot \pi} + 2 \cdot r_{mp} \quad \text{— эквивалентное сопротивление инвертора;}$$

x_{mp} — индуктивное сопротивление трансформатора; r_{mp} — активное сопротивление трансформатора.

В установившемся режиме средние значения напряжения выпрямителя и инвертора равны, т.е. $U_\varepsilon = U_u$. Приравнявая (3.80) и (3.83), определим выпрямленный ток ротора:

$$I_d = \frac{E_{\varepsilon 0} \cdot s - E_{u0} \cdot \cos \beta_u}{R'_s + R_\delta + R_{u\varepsilon}}. \quad (3.84)$$

Из (3.84) видно, что при работе инвертора с неизменным углом опережения $\beta_u = \text{const}$ по мере уменьшения скольжения s ток I_d снижается и может быть равным нулю при

$$s = s_0 = \frac{E_{u0}}{E_{\varepsilon 0}} \cdot \cos \beta_u. \quad (3.85)$$

Подставляя (3.85) в (3.84), получим

$$I_d = \frac{E_{\varepsilon 0}}{R_{s\varepsilon}} \cdot (s - s_0), \quad (3.86)$$

где $R_{s\varepsilon} = R'_s + R_\delta + R_{u\varepsilon}$ — эквивалентное сопротивление в цепи выпрямителя для скольжения s .

Для определения зависимости вращающего момента двигателя от скольжения подставим значение тока I_d из (3.86) в (3.82):

$$M = \frac{E_{a0}^2 \cdot R_{\gamma s0}}{\omega_0 \cdot R_{\gamma s}^2} \cdot (s - s_0), \quad (3.87)$$

где $R_{\gamma s0} = R_0 + R_{\gamma u} + R_{\gamma} \cdot s_0$.

Полученные уравнения для I_d (3.86) и M (3.87) позволяют построить электромеханические и механические характеристики двигателя в схеме асинхронно-вентильного каскада при различных углах опережения β_u инвертора.

Минимальная скорость двигателя в режиме холостого хода согласно (3.85) может быть получена при $\beta_u = 0$:

$$s_{0\min} = \frac{E_{2mp}}{E_{2ном}}. \quad (3.88)$$

Во избежание опрокидывания инвертора минимальный угол опережения ограничивается значением $\beta_{u\min} = \delta = 20^\circ$, при котором $E_{2mp} > E_{2ном}$.

Максимальный момент двигателя можно найти из (3.87), определив максимум функции

$$M_{\max} = 0,955 \cdot \frac{E_{2ном}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot x_0}. \quad (3.89)$$

При расчетах механических характеристик по (3.87) необходимо учитывать, что для режима работы с нагрузками, превышающими $0,75 \cdot M_{\max}$ (3.89), выпрямитель в схеме асинхронно-вентильного каскада переходит в иной режим работы. В этом случае внешняя характеристика выпрямителя нелинейно зависит от тока нагрузки I_d . Поэтому полученные выражения электромеханической и механической характеристик непригодны для этого режима.

Кроме того, для повышения устойчивости работы инвертора с уменьшением угла опережения инвертора β_u снижают предельный ток I_d . Поэтому перегрузочная способность двигателя

уменьшается при снижении скорости. Вследствие этого наиболее целесообразной областью применения асинхронно-вентильного каскада является электропривод турбомашин с вентиляторной нагрузкой.

Обычно насосные установки работают в диапазоне 2:1, 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 системы управления с частичным диапазоном регулирования. Наиболее распространенной схемой управления АВК в данном случае является следующий порядок:

- вначале к роторной цепи подключается релейно-контакторная станция и производится пуск с добавочными резисторами в роторной цепи асинхронного двигателя до скольжения s_{\max} , соответствующей необходимому диапазону регулирования;
- при достижении необходимого скольжения s_{\max} посредством пусковых резисторов, от роторной цепи отключается релейно-контакторная станция и подключается силовая цепь АВК;
- дальнейшее регулирование скорости в пределах $s_{\max} \div s_{\text{ном}}$ производится в режиме асинхронно-вентильного каскада.

Расчет пусковых резисторов производится одним из методов, изложенных в [8].

3.7. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

3.7.1. Пример расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя при частотном управлении

Пример расчета выполнен для насосного агрегата с насосом 1Д1250-125А и асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором ДАЗО4-400У-4МУ1. Исходные данные и рас-

четные параметры приведены в п.3.3. Расчет выполнен по методике с использованием паспортных данных электродвигателя.

При расчете параметров схемы замещения необходимо обратить особое внимание на то, что схема замещения приведена для фазы асинхронного двигателя, поэтому, расчетные значения токов и напряжений являются фазными.

Решение

1. Номинальный ток фазы статора

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{\text{ном.ф}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta_{\text{ном}}} = \frac{500 \cdot 10^3}{3 \cdot 3464 \cdot 0,87 \cdot 0,948} = 58,5 \text{ А},$$

где $U_{\text{ном.ф}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ В}$ — номинальное фазное напряжение статорной цепи.

2. Активное сопротивление фазы статора в соответствии с (3.17)

$$r_1 = \frac{U_{\text{ном.ф}} \cdot s_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{3464 \cdot 0,0133}{58,5} = 0,7895 \text{ Ом},$$

где $s_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,0133$ — номинальное скольжение двигателя;

$n_0 = \frac{60 \cdot f_c}{p_n} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$ — синхронная частота вращения магнитного поля статора; $f_c = 50 \text{ Гц}$ — частота тока питающей сети; $p_n = 2$ — число пар полюсов двигателя.

3. Номинальная угловая скорость магнитного поля статора двигателя

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

4. Номинальная угловая скорость вала двигателя

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1480}{30} = 154,9 \text{ с}^{-1}.$$

5. Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}} = \frac{500 \cdot 10^3}{154,9} = 3228 \text{ Нм}.$$

6. Максимальный момент двигателя

$$M_{max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,8 \cdot 3228 = 9038 \text{ Нм}.$$

7. Индуктивное сопротивление короткого замыкания в соответствии с (3.26)

$$x_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном.ф}^2}{2 \omega_{Iном} \cdot M_{max}} - r_1 \right)^2 - r_1^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 3456^2}{2 \cdot 157 \cdot 9038} - 0,7895 \right)^2 - 0,7895^2} = 11,81 \text{ Ом}.$$

8. Индуктивные сопротивления статора и приведенное ротора в соответствии с (3.27)

$$x_1 \approx x_2' = \frac{x_{\kappa}}{2} = \frac{11,81}{2} = 5,905 \text{ Ом}.$$

9. Приведенное к обмотке статора активное сопротивление фазы ротора в соответствии с (3.28)

$$r_2' = s_{ном} \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{ном.ф}^2}{2 \cdot \omega_{Iном} \cdot M_{ном}} - r_1 \right) +$$

$$+ s_{ном} \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном.ф}^2}{2 \cdot \omega_{Iном} \cdot M_{ном}} - r_1 \right)^2 - (r_1^2 + x_{\kappa}^2)} =$$

$$= 0,0133 \cdot \left(\frac{3 \cdot 3464^2}{2 \cdot 157 \cdot 3228} - 0,7895 \right) +$$

$$+0,0133 \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 3464^2}{2 \cdot 157 \cdot 3228} - 0,7895\right)^2 - (0,7895^2 + 11,81^2)} =$$

$$= 0,8983 \text{ Ом.}$$

10. Номинальный приведенный ток ротора в соответствии с (3.30)

$$I'_{2ном} = \sqrt{\frac{M_{ном} \cdot \omega_{1ном} \cdot s_{ном}}{3 \cdot r_2'}} = \sqrt{\frac{3228 \cdot 157 \cdot 0,0133}{3 \cdot 0,8983}} = 50,1 \text{ А.}$$

11. Номинальный коэффициент мощности роторной цепи

$$\cos \varphi_{2ном} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + (x_2' \cdot s_{ном})^2}} =$$

$$= \frac{0,8983}{\sqrt{0,8983^2 + (5,905 \cdot 0,0133)^2}} = 0,9962 ,$$

$$\text{тогда } \sin \varphi_{2ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2ном}} = \sqrt{1 - 0,9962^2} = 0,0873 .$$

12. Номинальный ток намагничивающей цепи в соответствии с (3.29)

$$I_{\mu,ном} = \sqrt{(I'_{2ном} \cdot \sin \varphi_{2ном})^2 + I_{1ном}^2 - I_{2ном}^{I/2} - I'_{2ном} \cdot \sin \varphi_{2ном}} =$$

$$= \sqrt{(50,1 \cdot 0,0873)^2 + 58,5^2 - 50,1^2 - 50,1 \cdot 0,0873} = 26,1 \text{ А.}$$

13. Номинальная ЭДС фазы статора в соответствии с (3.31)

$$E_{1ном} = U_{ном,ф} \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot p_n) =$$

$$= 3464 \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot 2) = 3386 \text{ В.}$$

14. Индуктивное сопротивление намагничивающей цепи в соответствии с (3.32)

$$x_0 = \frac{E_{1ном}}{I_{\mu,ном}} = \frac{3386}{26,1} = 130 \text{ Ом.}$$

15. Коэффициенты рассеяния обмоток статора и ротора в соответствии с (3.33)

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{x_1}{x_0} = \frac{5,905}{130} = 0,0454.$$

16. Общий коэффициент рассеяния

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,0454 + 0,0454 + 0,0454 \cdot 0,0454 = 0,09286.$$

17. В соответствии с (3.34) определяются коэффициенты:

$$b = \tau_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,0454 \cdot (1 + 0,0454) = 0,04746;$$

$$c = x_0 \cdot \tau = 130 \cdot 0,09286 = 12,0718 \text{ Ом};$$

$$d = \frac{r_1}{x_0} = \frac{0,7895}{130} = 0,00607;$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,0454 = 1,0454;$$

3.7.2. Пример расчета статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором напряжения при вентиляторном характере момента статической нагрузки

Выбор преобразователя частоты осуществляется по номинальной мощности приводного электродвигателя насоса. В примере рассматривается высоковольтный двигатель ДАЗО4-400У-4МУ1 мощностью 500 кВт для насоса 1Д1250-125А. Высоковольтный вариант может быть двухтрансформаторным с низковольтным преобразователем частоты на базе инвертора напряжения (рис. 2.3) или бестрансформаторным с высоковольтным преобразователем частоты на базе инвертора тока.

Рассмотрим вариант двухтрансформаторной системы с низковольтным преобразователем частоты на базе инвертора напряжения, позволяющий формировать вентиляторный закон частотного регулирования.

Решение

1. Электромеханические и механические характеристики частотно-регулируемого электропривода зависят от относительной частоты тока ν и параметра абсолютного скольжения β . Так как насосные установки очень редко работают со скоростями выше номинального значения, а если и работают, то не намного выше номинальной величины, то принимаем верхний предел регулирования частоты 60 Гц, т.е. $\nu = 1,2$. Поэтому для расчета семейства статических характеристик задаемся $\nu = 0,2 \div 1,2$.

2. Для расчета статических характеристик необходимо задаваться параметром абсолютного скольжения. Расчет производится для рабочей части механической характеристики. Поэтому задаемся $\beta = 0 \div \beta_{кр}$, причем необходимо задавать номинальное значение параметра абсолютного скольжения $\beta_{ном} = s_{ном} = 0,0133$ для контроля номинальных значений тока и напряжения статора в процессе вычисления, а также ряд промежуточных значений параметра.

3. Параметр критического абсолютного скольжения в соответствии с (3.53)

$$\beta_{кр} = r_2' \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \nu^2}{b^2 + c^2 \nu^2}} = 0,8983 \cdot \sqrt{\frac{0,00607^2 + 1,0454^2 \cdot \nu^2}{0,04746^2 + 12,0718^2 \cdot \nu^2}}.$$

Задаемся относительной величиной частоты тока ν и вычисленные значения параметра критического абсолютного скольжения $\beta_{кр}$ приводим в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Зависимость параметра критического абсолютного скольжения от относительной частоты тока

ν	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\beta_{кр}$	0,07781	0,0778	0,07779	0,07779	0,07779	0,07779

По данным табл. 3.13 видно, что параметр критического абсолютного скольжения практически не зависит от относительной частоты тока, поэтому в дальнейших расчетах принимается $\beta_{кр} = 0,0778$

4. В соответствии с (3.35) и (3.37) определяются коэффициенты:

$$A(v, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot v^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_1' \cdot r_2' \cdot v \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot v^2) \cdot (r_2')^2 =$$

$$= (0,04746^2 + 12,0718^2 \cdot v^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot 0,7895 \cdot 0,8983 \times$$

$$\times v \cdot \beta + (0,00607^2 + 1,0454^2 \cdot v^2) \cdot 0,8983^2;$$

$$C(\beta) = (r_2' / x_0)^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2 = (0,8983/130)^2 + 1,0454^2 \cdot \beta^2.$$

Задаемся значением параметра абсолютного скольжения для разных частот тока и вычисленные значения коэффициентов приводим в табл. 3.14.

5. Расчет электромеханических и механических характеристик для частот 50 Гц и меньше ($v \leq 1,0$) ведется в соответствии с (3.49) и (3.50)

$$I_1 = \frac{E_{\text{ном}} \cdot v^2 \cdot \sqrt{C(\beta)}}{\sqrt{A(v, \beta)} - r_1' \cdot \sqrt{C(\beta)}} = \frac{3386 \cdot v^2 \cdot \sqrt{C(\beta)}}{\sqrt{A(v, \beta)} - 0,7895 \cdot \sqrt{C(\beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot E_{\text{ном}}^2 \cdot r_2' \cdot v^4 \cdot \beta}{\omega_{\text{ном}} \left[\sqrt{A(v, \beta)} - r_1' \cdot \sqrt{C(\beta)} \right]^2} =$$

$$= \frac{196796,3 \cdot v^4 \cdot \beta}{\left[\sqrt{A(v, \beta)} - 0,7895 \cdot \sqrt{C(\beta)} \right]^2}.$$

Расчет электромеханических и механических характеристик для частот свыше 50 Гц ($v > 1,0$) ведется в соответствии с (3.51) и (3.52),

$$I_1 = U_{\text{ном}} \sqrt{\frac{v \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}} = 3464 \cdot \sqrt{\frac{v \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot U_{ном}^2}{\omega_{ном}} \cdot \frac{r_2' \cdot v \cdot \beta}{A(v, \beta)} = \frac{205967,5 \cdot v \cdot \beta}{A(v, \beta)}.$$

Таблица 3.14

Зависимости коэффициентов $C(\beta)$ и $A(v, \beta)$ от параметра абсолютного скольжения

β	0	0,007	$\beta_{ном}$	0,03	0,045	0,065	$\beta_{кр}$
$C(\beta)$	0,00005	0,0001	0,00024	0,00103	0,00226	0,00466	0,00666
$A(v, \beta)$	$v = 0,2$	0,03527	0,03755	0,04009	0,04903	0,05985	0,07835
	$v = 0,4$	0,14113	0,14624	0,15284	0,17914	0,21388	0,27653
	$v = 0,6$	0,31751	0,32603	0,33818	0,39025	0,46204	0,59449
	$v = 0,8$	0,56443	0,57694	0,59613	0,68241	0,80436	1,03225
	$v = 1,0$	0,88191	0,89898	0,92671	1,05562	1,24084	1,58981
	$v = 1,2$	1,26993	1,29213	1,32992	1,50986	1,77147	2,26719

Для расчета задаемся такими же значениями параметра абсолютного скольжения, как и в табл. 3.14, используя данные этой таблицы по величинам $C(\beta)$ и $A(v, \beta)$. Переход от параметра абсолютного скольжения к угловой скорости производится в соответствии с (3.54) $\omega = \omega_{ном} \cdot (v - \beta) = 157 \cdot (v - \beta)$. Данные расчетов приведены в табл. 3.15.

6. Проверка выполненных вычислений производится по контрольным точкам естественной характеристики ($v = 1,0$):

- номинальному параметру абсолютному скольжению $\beta_{ном}$ должны соответствовать номинальные значения тока статора $I_{ном}$ и момента $M_{ном}$;
- критическому параметру абсолютного скольжения $\beta_{кр}$ должен соответствовать максимальный момент M_{max} .

Анализ данных табл. 3.15 показывает, что погрешность вычислений составляет: тока статора — 5,6 %; момента по номинальному значению — 10,0 %; момента по максимальной величине — 0,5 %. Для инженерных расчетов данные показатели являются удовлетворительными. Погрешность вычислений даже по одному из показателей свыше 15 % свидетельст-

ует о допущенных ошибках. Обычно ошибки возникают при вычислении параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Типичная ошибка заключается в том, что вместо фазных величин напряжений и токов используют их линейные значения.

Таблица 3.15

Расчетные данные электромеханических и механических характеристик частотно-регулируемого электропривода насосной установки

β	0	0,007	0,0133	0,03	0,045	0,065	0,0778
$v = 0,2$							
I_1 , А	5,3	7,3	11,2	22,2	31,1	40,9	46,1
M , НМ	0	63,8	118,8	245,7	330,3	400,6	425,5
ω , с ⁻¹	31,4	30,3	29,3	26,7	24,3	21,2	19,2
$v = 0,4$							
I_1 , А	10,4	14,5	22,2	43,7	60,6	78,4	87,2
M , НМ	0	251,4	468,3	954,6	1255,5	1470,1	1525,5
ω , с ⁻¹	62,8	61,7	60,7	58,1	55,7	52,6	50,6
$v = 0,6$							
I_1 , А	15,4	21,6	33,2	65,3	90,2	116,0	128,7
M , НМ	0	563,1	1049,2	2129,9	2782,8	3223,5	3321,4
ω , с ⁻¹	94,2	93,1	92,1	89,5	87,1	84,0	82,0
$v = 0,8$							
I_1 , А	20,5	28,8	44,2	86,9	119,9	153,8	170,2
M , НМ	0	998,7	1861,4	3771,5	4912,1	5660,4	5811,7
ω , с ⁻¹	125,6	124,5	123,5	120,9	118,5	115,4	113,4

Окончание таблицы 3.15

β	0	0,007	0,0133	0,03	0,045	0,065	0,0778
$\nu = 1,0$							
I_1, A	25,6	36,0	55,2	108,4	149,5	191,5	211,8
M, H_m	0	1558,2	2904,8	5879,2	7643,4	8780,7	8996,6
ω, c^{-1}	157,0	155,9	154,9	152,3	149,9	146,8	144,8
$\nu = 1,2$							
I_1, A	23,8	33,4	51,0	99,1	135,5	172,0	189,4
M, H_m	0	1339,0	2477,9	4910,9	6278,5	7086,1	7196,0
ω, c^{-1}	188,4	187,3	186,3	183,7	181,3	178,2	176,2

7. При графическом представлении механической характеристики электропривода совместно с ней представляется механическая характеристика механизма, в данном случае — механическая характеристика насоса. Расчетные данные механической характеристики насоса 1Д1250-125А представлены в табл. 3.6 и 3.7.

На рис. 3.6 и 3.7 представлены электромеханические и механические характеристики частотно-регулируемого электропривода насоса 1Д1250-125А с двигателем ДАЗО4-400У-4МУ1. При расчете статических характеристик электропривода использован закон частотного регулирования $E_1 / f_1^2 = \text{const}$.

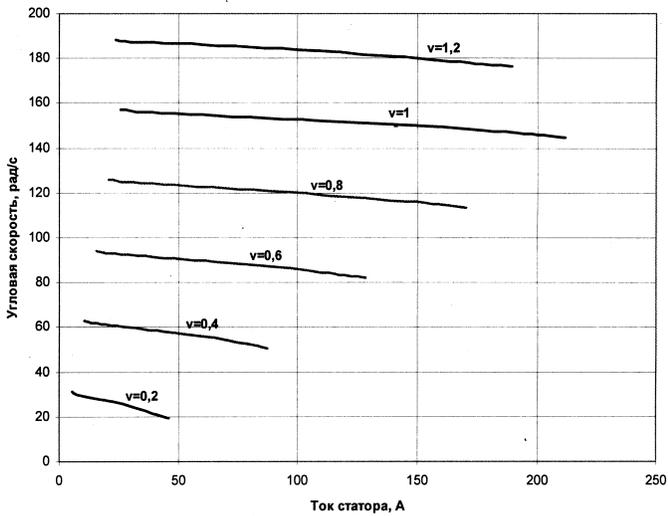


Рис. 3.6. Электромеханические характеристики частотно-регулируемого электропривода насоса 1Д1250-125А с вентиляторным законом частотного регулирования

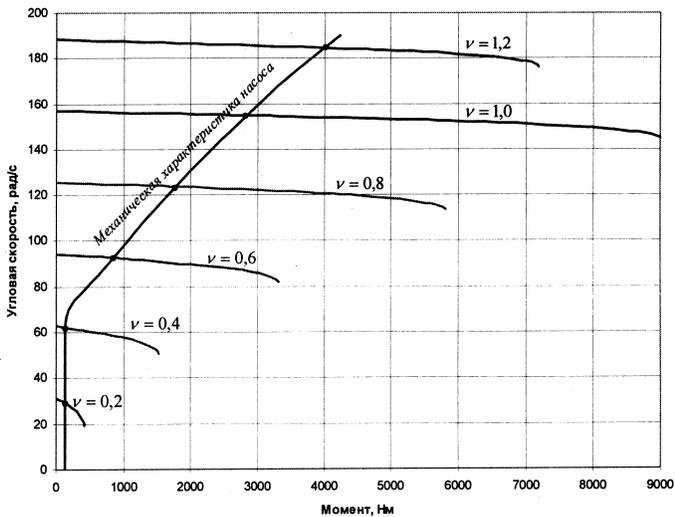


Рис. 3.7. Механические характеристики частотно-регулируемого электропривода насоса 1Д1250-125А с вентиляторным законом частотного регулирования

3.7.3. Пример расчета статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором тока

В примере рассматривается высоковольтный двигатель ДАЗО4-400У-4МУ1 мощностью 500 кВт для насоса 1Д1250-125А. Рассмотрим вариант безтрансформаторной системы с высоковольтным преобразователем частоты на базе инвертора тока, позволяющий формировать закон частотного регулирования $\Psi_r = \text{const}$ со стабилизацией магнитного потока в зазоре двигателя (закон постоянства результирующего вектора потокосцепления ротора). Далее такую систему электропривода будем называть частотно-токовой. Принимаем верхний предел регулирования частоты 60 Гц.

В данном примере расчета используются вычисленные в п. 3.7.2 параметры схемы замещения асинхронного двигателя.

Решение

1. В диапазоне частот от 0 до 50 Гц электромеханические и механические характеристики частотно-токового электропривода имеют постоянную жесткость, т.е. зависят только от параметра абсолютного скольжения β . Рабочие ветви статических характеристик в данном диапазоне частот параллельны друг другу. Поэтому расчет в основном сводится к определению зависимостей тока и момента от параметра абсолютного скольжения.

2. Параметр критического абсолютного скольжения для относительной частоты $\nu = 1,2$ (60 Гц) в соответствии с (3.53)

$$\beta'_{кр} = r'_2 \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 \nu^2}{b^2 + c^2 \nu^2}} = 0,8983 \cdot \sqrt{\frac{0,00607^2 + 1,0454^2 \cdot 1,2^2}{0,04746^2 + 12,0718^2 \cdot 1,2^2}} = 0,0778.$$

3. Параметр критического абсолютного скольжения для относительных частот $\nu = 0 \div 1,0$

$$\beta_{кр} = \frac{r'_2}{x'_2} = \frac{0,8983}{5,905} = 0,152.$$

4. В соответствии с (3.35), (3.36) и (3.37) определяются коэффициенты:

$$A(v, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot v^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_1' \cdot r_2' \cdot v \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot v^2) \cdot (r_2')^2 = \\ = 209,851 \cdot \beta^2 + 1,7021 \cdot \beta + 1,2699;$$

$$B(\beta) = (r_2')^2 + (x_2')^2 \cdot \beta^2 = 0,8983^2 + 5,905^2 \cdot \beta^2;$$

$$C(\beta) = (r_2' / x_0)^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2 = (0,8983/130)^2 + 1,0454^2 \cdot \beta^2,$$

где коэффициент $A(v, \beta)$ определен для относительной частоты $v = 1, 2$.

Задаемся абсолютным значением параметра абсолютного скольжения для разных частот тока и вычисленные значения коэффициентов приводим в табл. 3.16.

5. Расчет электромеханических и механических характеристик для частот 50 Гц и меньше ($v \leq 1,0$) ведется в соответствии с (3.60) и (3.61)

$$I_1 = x_0 \cdot I_{\mu, ном} \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{B(\beta)}} = 130 \cdot 26,1 \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{B(\beta)}} = 3393 \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{B(\beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot r_2' \cdot (x_0 \cdot I_{\mu, ном})^2}{\omega_{1 ном}} \cdot \frac{\beta}{B(\beta)} = \frac{3 \cdot 0,8983 \cdot (130 \cdot 26,1)^2}{157} \cdot \frac{\beta}{B(\beta)} = \\ = 197610,8 \cdot \frac{\beta}{B(\beta)}.$$

Задаемся абсолютным значением параметра абсолютного скольжения до $\beta_{кр}$ и вычисленные значения токов и моментов приводим в табл. 3.16.

6. Расчет электромеханической и механической характеристик для относительной частоты $v = 1, 2$ ведется в соответствии с (3.51) и (3.52)

$$I_1 = U_{1ном} \sqrt{\frac{v \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}} = 3464 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot U_{1ном}^2 \cdot r_2' \cdot v \cdot \beta}{\omega_{1ном} \cdot A(v, \beta)} = \frac{3 \cdot 3464^2 \cdot 0,8983 \cdot 1,2}{157} \cdot \frac{\beta}{A(v, \beta)} =$$

$$= 247161 \cdot \frac{\beta}{A(v, \beta)}.$$

Задаемся абсолютным значением параметра абсолютно-го скольжения до $\beta'_{кр}$ и вычисленные значения токов и моментов приводим в табл. 3.16. Переход от параметра абсолютно-го скольжения к угловой скорости производится в соответствии с (3.54) $\omega = \omega_{1ном} \cdot (v - \beta) = 157 \cdot (v - \beta)$. Данные расчетов приведены в табл. 3.16.

7. Проверка выполненных вычислений производится по контрольным точкам естественной характеристики ($v = 1,0$): номинальному параметру абсолютно-му скольжению $\beta_{ном}$ должны соответствовать номинальные значения тока статора $I_{1ном}$ и момента $M_{ном}$.

Анализ данных табл. 3.16 показывает, что погрешность вычислений составляет: тока статора — 0,34 %; момента — 0,37 %. Для инженерных расчетов данные показатели являются удовлетворительными. Погрешность вычислений даже по одному из показателей свыше 15 % свидетельствует о допущенных ошибках. Обычно ошибки возникают при вычислении параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Типичная ошибка заключается в том, что вместо фазных величин напряжений и токов используют их линейные значения.

8. При графическом представлении механической характеристики электропривода совместно с ней представляется механическая характеристика механизма, в данном случае — механическая характеристика насоса. Расчетные данные механической характеристики насоса 1Д1250-125А представлены в табл. 3.6 и 3.7.

Таблица 3.16

**Расчет статических характеристик двигателя ДАЗО4-400У-4МУ1
в системе преобразователя частоты с автономным инвертором тока**

β	0	0,007	$\beta_{ном}$	0,035	0,06	$\beta'_{кр}$	0,1	0,13	$\beta_{кр}$
$v = 0 \div 1,0$									
$B(\beta)$	0,8069	0,8087	0,8131	0,8497	0,9325	1,018	1,1556	1,3962	1,6126
$C(\beta)$	0,00005	0,0001	0,00024	0,0014	0,004	0,0067	0,011	0,0185	0,0253
I_1, A	26,7	37,7	58,3	137,7	222,2	275,3	331,0	390,6	425,0
$M, Нм$	0	1710	3240	8140	12715	15102	17000	18400	18626
$\omega(v=0,2), c^{-1}$	31,4	30,3	29,3	25,9	22,0	19,2	15,7	11,0	7,5
$\omega(v=0,4), c^{-1}$	62,8	61,7	60,7	57,3	53,4	50,6	47,1	42,4	38,9
$\omega(v=0,6), c^{-1}$	94,2	93,1	92,1	88,7	84,8	82,0	78,5	73,8	70,3
$\omega(v=0,8), c^{-1}$	125,6	124,5	123,5	120,1	116,2	113,4	109,9	105,2	101,7
$\omega(v=1,0), c^{-1}$	157	155,9	154,9	151,5	147,6	144,8	141,3	136,6	133,1
$v > 1,0$									
$A(v,\beta)$	1,2799	1,2921	1,3299	1,5866	2,1275	2,6725	–	–	–
I_1, A	23,7	33,4	51,0	112,7	164,5	190,0	–	–	–
$M, Нм$	0	1339	2478	5452	6970	7195	–	–	–
$\omega(v=1,2), c^{-1}$	188,4	187,3	186,3	182,9	179,0	176,2	–	–	–

На рис. 3.8 и 3.9 представлены электромеханические и механические характеристики частотно-регулируемого электропривода насоса 1Д1250-125А с двигателем ДАЗО4-400У-4МУ1. При расчете статических характеристик электропривода использован закон частотного регулирования $\Psi_r = \text{const}$.

Графическое представление механических характеристик частотно-токового электропривода и насоса показывает, что электропривод обладает значительной перегрузочной способностью, намного превышающую необходимую перегрузку по отношению к механической характеристике насоса. Большая перегрузочная способность обусловлена стабилизацией магнитного потока в воздушном зазоре двигателя и является одной из особенностей электроприводов с частотно-токовым управлением.

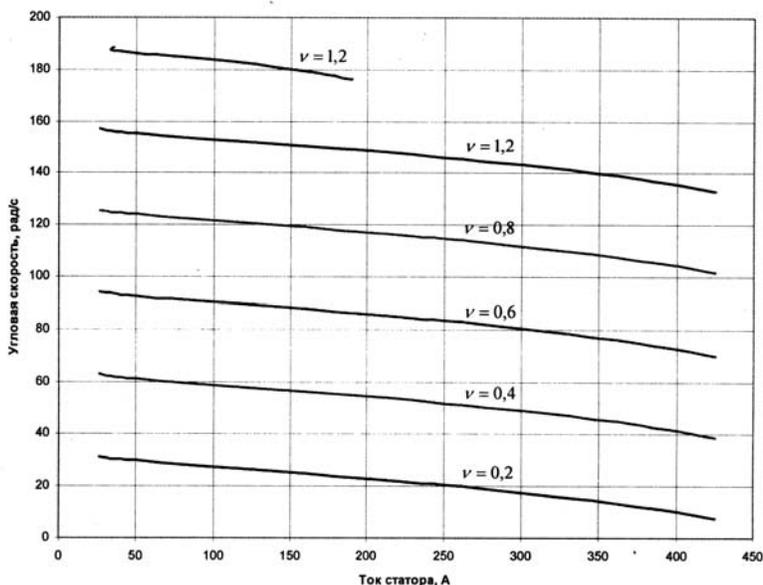


Рис. 3.8. Электромеханические характеристики частотно-регулируемого электропривода насоса 1Д1250-125А с законом частотного регулирования $\Psi_r = \text{const}$

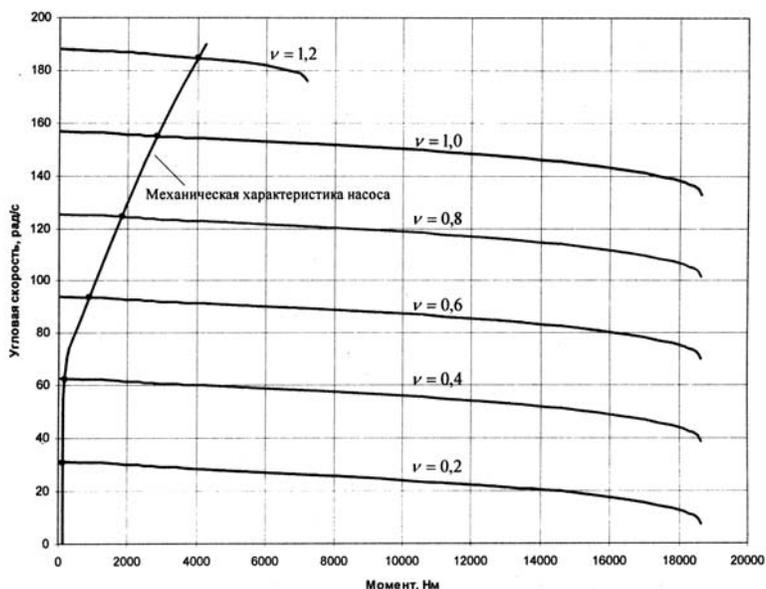


Рис. 3.9. Механические характеристики частотно-регулируемого электропривода насоса 1Д1250-125А с законом частотного регулирования $\Psi_r = \text{const}$

Примеры расчета статических характеристик электропривода по схеме АВК рассмотрены в разделе, посвященном регулируемому электроприводу вентиляторных установок. Однако принципы расчета могут быть применены и для насосных установок.

ГЛАВА 4

**ЧАСТОТНО-
РЕГУЛИРУЕМЫЙ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
НАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Опыт использования регулируемого электропривода насосных и вентиляторных установок показал, что без создания автоматизированных систем управления сложно обеспечить энергетический эффект, присущий этим установкам. Вручную невозможно обеспечить ежеминутное отслеживание изменяющегося режима работы водо- и воздухопотребления. Задача еще более усложняется, если несколько агрегатов обеспечивают единый технологический процесс. В этом случае возникает необходимость создания системы автоматического управления, которая энергетически выгодно осуществляет распределение нагрузки между установками.

На горных предприятиях наиболее характерными объектами управления являются: системы водоснабжения цехов обогатительных фабрик и отдельных производств; системы водоснабжения населения градообразующих предприятий; системы оборотного водоснабжения; системы подачи пульпы или концентрата средствами гидротранспорта.

В системах водоснабжения обычно регулируемым параметром является давление в напорном коллекторе или в диктующей точке. В отдельных случаях регулируемым параметром может быть уровень воды в приемных или подающих резервуарах.

В системах оборотного водоснабжения могут применяться как технологии осветления воды, так и различные контуры водяного охлаждения производственных машин и механизмов, например, обжиговых машин в технологии производства окатышей. В качестве регулируемых параметров системы оборотного водоснабжения приходится использовать одновременно давление в магистрали и уровень жидкости в зумпфах. В отдельных случаях могут использоваться значение температуры или расхода охлаждающей воды.

В системах подачи пульпы или концентрата средствами гидротранспорта, обычно регулируемые параметрами являются давление в гидросистеме и уровень жидкости в зумпфах.

При разработке системы автоматического управления режимами работы насосной установки необходимо учитывать технологический режим работы предприятия, квалификацию персонала, иметь достоверную информацию о режимах работы турбомашин, а также технико-экономические показатели их функционирования (затраты на электроэнергию, стоимость обслуживания и т.п.).

С помощью системы автоматического управления насосными установками обычно решаются следующие основные задачи:

- обеспечение наименьшего потребления электроэнергии насосными агрегатами;
- обеспечение наиболее полного устранения избыточных напоров;
- поддержание заданного давления в диктующих точках сети или в напорном коллекторе станции;
- стабилизация температуры в заданной точке технологического процесса;
- поддержание определенного уровня в резервуарах, зумпфах, технологических скважинах;
- предотвращение неконтролируемых перетоков перемещаемых жидкостей в трубопроводных системах и резервуарах (перелив, опорожнение и т.д.);
- предотвращение неэкономичных и опасных режимов работы насосных агрегатов (кавитации, гидравлических ударов и т.п.).

4.2. СТАБИЛИЗАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ (НАПОРА) В СИСТЕМЕ ПОДАЧИ ЖИДКОСТИ

Стабилизация напоров производится в диктующих точках гидросистемы. Обычно в качестве диктующей точки выбирается участок гидросистемы, расположенный на наиболее высоких геодезических отметках и наиболее удаленный от насосной

станции в гидравлическом отношении, т.е. тот, до которого потери напора в трубопроводе имеют наибольшие значения.

Рассмотрим процесс стабилизации напора в диктующей точке гидросистемы на примере простой неразветвленной сети (рис. 4.1). Такая система является характерной для гидротранспорта, подающего концентрат или пульпу из зумпфа на определенную высоту, откуда самотеком поступает на процессы обогащения полезного ископаемого.

Для нормальной подачи жидкости на процессы обогащения или просто водоснабжения в диктующей точке A должен поддерживаться так называемый свободный напор $H_{св}$. Точка A расположена на отметке Z_2 выше уровня жидкости в резервуаре. Потери напоров в гидросистеме зависят от значений расхода жидкости во второй степени. Следовательно, насос, чтобы поднять жидкость с отметки Z_1 на отметку Z_2 , преодолеть гидравлическое сопротивление в трубопроводе и обеспечить заданный свободный напор, должен развить напор

$$H = (Z_2 - Z_1) + H_{св} + SQ^2. \quad (4.1)$$

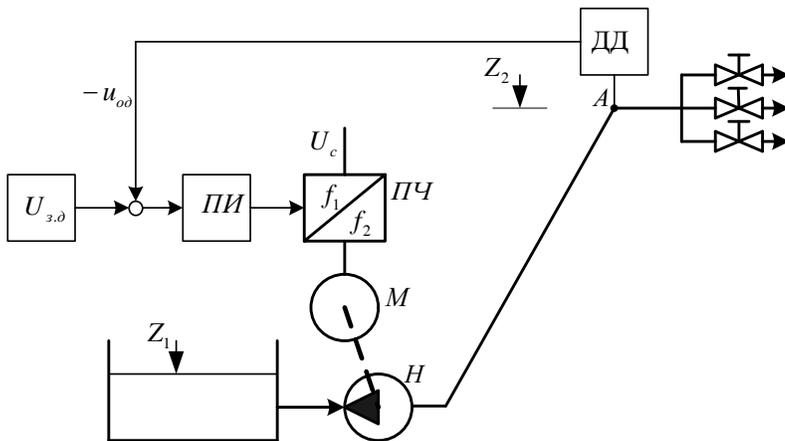


Рис. 4.1. Схема стабилизации напора в диктующей точке гидросистемы: H — насос; M — электродвигатель; $ПЧ$ — преобразователь частоты

Чтобы насосная установка работала без превышения напора при любом водопотреблении, необходимо ее оснастить регулируемым электроприводом с соответствующей системой автоматического регулирования. Система автоматического управления имеет в своем составе датчик давления (ДД), пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор и задающее устройство, которое определяет требуемое значение напора в диктующей точке гидросистемы.

Сигналы от датчика давления $u_{од}$ и задающего устройства $U_{зд}$ поступают в ПИ-регулятор, где они сравниваются между собой, соответствующим образом обрабатываются и передаются в систему управления частотно-регулируемого электропривода насоса. Если напор в диктующей точке выше заданного значения, в электропривод поступает команда на уменьшение угловой скорости двигателя насоса, и наоборот. При соответствии напора заданному значению изменение угловой скорости прекращается.

Процесс регулирования осуществляется следующим образом. В некоторый момент времени насос работает с угловой скоростью ω_1 , подачей Q_1 и напором H_1 (рис. 4.2). Этому режиму соответствуют потери напора $h_{дин1}$. Тогда напор в диктующей точке A равен $H_{A1} = H_1 - h_{дин1}$. Будем считать, что этот напор в начале процесса соответствует заданному значению напора в диктующей точке $H_{зад}$.

Предположим, что в следующий момент времени потребитель, закрывая один из кранов, уменьшает отбор жидкости из системы. Уменьшенной подаче насоса Q_1 соответствует возросший напор H_2 и пониженные потери напора $h_{дин2}$. Вследствие происшедших изменений в режиме работы системы напор в точке A становится равным $H_{A2} = H_2 - h_{дин2}$. Как видно из рис. 4.2, H_{A2} больше заданного значения напора $H_{зад} = H_{A1}$. Сигнал датчика давления, установленного в точке A , сравнивается с сигналом задающего устройства. Преобразованный сигнал

рассогласования поступает в систему управления частотно-регулируемого электропривода. Под его воздействием угловая скорость начнет уменьшаться до тех пор, пока напор в диктующей точке не примет заданного значения $H_{зад} = H_{A1}$.

При изменении угловой скорости напорная характеристика займет положение, соответствующее угловой скорости ω_2 , а на трубопроводе установится новое значение напора $H_{2'}$. Таким образом, рабочая точка насоса на графике последовательно занимает положение 1, затем 2 и, наконец 2' (рис. 4.2).

Для вычисления подачи, напора, КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии насосным агрегатом используются зависимости (3.6), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11) уточненные для структуры управления со стабилизацией напора в гидросистеме:

- зависимость подачи насоса от угловой скорости насоса

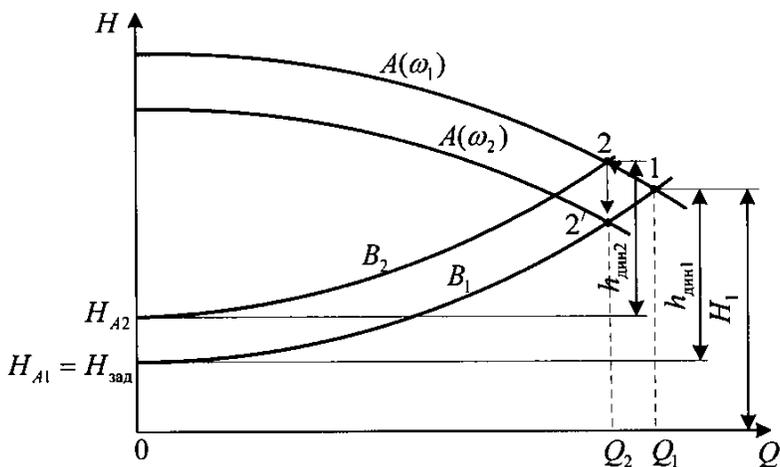


Рис. 4.2. Процесс стабилизации напора в диктующей точке A :

$A(\omega_1)$, $A(\omega_2)$ — характеристики насоса при ω_1 , ω_2 соответственно; B_1 , B_2 — характеристики трубопровода в разные моменты времени

$$Q = Q_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - [(Z_2 - Z_1) + H_{св}]}{H_{\phi} - [(Z_2 - Z_1) + H_{св}]}}}, \quad (4.2)$$

где $Q_{ном}$ — номинальная (паспортная) подача насоса; H_{ϕ} — фиктивное значение напора при нулевой подаче, определяется по напорной характеристике, а при отсутствии такой характеристики принимается: для насосов чистой воды $H_{\phi} = 1,25 \cdot H_{ном}$; для грунтовых, канализационных насосов и насосов для перекачки жидкостей, содержащих примеси, $H_{\phi} = 1,45 \cdot H_{ном}$; ω — текущее значение угловой скорости насоса; $(Z_2 - Z_1)$ — разность геодезических отметок от места установки датчика давления до нижнего уровня жидкости (рис. 4.1); $H_{св}$ — свободный напор;

- зависимость напора насоса от угловой скорости насоса определяется по формуле

$$H = \left\{ [(Z_2 - Z_1) + H_{св}] + [H_{ном} - (Z_2 - Z_1) - H_{св}] \times \frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - [(Z_2 - Z_1) + H_{св}]}{H_{\phi} - [(Z_2 - Z_1) + H_{св}]} \right\}; \quad (4.3)$$

- вычисление суммы напоров $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$, в соответствии с характеристикой трубопровода, производится по формуле

$$(Z_2 - Z_1) + H_{св} = \frac{H - H_{ном} \cdot \left(\frac{Q_{расч}}{Q_{ном}}\right)^2}{1 - \left(\frac{Q_{расч}}{Q_{ном}}\right)^2}, \quad (4.4)$$

где H — напор, создаваемый насосом; $Q_{расх}$ — расход жидкости в гидросистеме;

- вычисление КПД, мощности и момента статического сопротивления производится по формулам (3.9), (3.10) и (3.11) для полученных значений подачи и напора по (4.2) и (4.3) для системы стабилизации давления.

Формула (4.4) используется для выбора датчика давления. Для этого вычисляется сумма напоров $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$ для конкретных условий с максимальным расходом $Q_{расх}$ и напором насоса H при этой подаче. Полученное значение свободного напора в метрах водного столба (м) переводятся в килопаскали (кПа) с помощью данных табл. 1.1. Для выбора датчика давления можно воспользоваться данными табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные технические характеристики и параметры датчиков абсолютного давления Метран-100-ДА

Модель	Ряд верхних пределов измерения	Выходной сигнал, В	Выходной токовый сигнал, мА
1020	10; 6; 4; 2,5 кПа	0—10	0—5; 0—20; 4—20
1030	40; 25; 16; 10; 6; 4 кПа	0—10	0—5; 0—20; 4—20
1040	250; 160; 100; 60; 40; 25 кПа	0—10	0—5; 0—20; 4—20
1050	2,5; 1,6; 1,0; 0,60; 0,4; 0,25 МПа	0—10	0—5; 0—20; 4—20
1060	16; 10; 6; 4; 2,5; 1,6 МПа	0—10	0—5; 0—20; 4—20

4.3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА НАСОСНОГО АГРЕГАТА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОСИСТЕМЕ

4.3.1. Общие положения формирования структурной схемы насосного агрегата

Структурную схему насосного агрегата условно можно представить в виде электромеханической и механической частей. К электромеханической части относится приводной электродвигатель, а к механической — насос.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод имеет рабочую ветвь механических характеристик в зоне расположения рабочих точек (рис. 3.7 и 3.9) (пересечение механических характеристик электропривода и насоса), обладающей практически линейным характером. Жесткость механических характеристик электропривода при изменении угловой скорости не меняется. Поэтому, для исследования энергетических свойств насосного агрегата в статическом режиме, математическое описание частотно-регулируемого электропривода можно линеаризовать. Следовательно, асинхронный электродвигатель в системе частотного управления можно представить в упрощенном виде, как апериодическое звено второго порядка. Преобразователь частоты, как с инвертором напряжения, так и с инвертором тока имеет линейную внешнюю характеристику, поэтому его можно представить в виде апериодического звена первого порядка.

При построении замкнутых систем управления используют различного типа регуляторы. Современные преобразователи частоты по заказу комплектно поставляются с ПИД-регулятором, который можно также использовать как П-регулятор или ПИ-регулятор. Одноконтурная система стабилизации давления строится в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 4.1.

Структурная схема насоса представляется в виде функциональных блоков, реализующих различного вида зависимости по подаче, напору, мощности и моменту статического сопротивления.

Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией давления в гидросистеме представлена на рис. 4.3.

4.3.2. Расчет параметров структурной схемы частотно-регулируемого электропривода со стабилизацией давления

Расчету параметров структурной схемы частотно-регулируемого электропривода должен предшествовать расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя при частотном

управлении, методика которого приведена в п. 3.4, а пример расчета — в п. 3.7.

Передаточная функция преобразователя частоты в структурной схеме представлена аperiodическим звеном первого порядка

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{pT_{пч} + 1}, \text{ параметры которого определяются по следующим зависимостям:}$$

- статический коэффициент передачи преобразователя частоты

$$K_{пч} = \frac{E_{пч}}{U_{у.ном}}, \quad (4.5)$$

где $E_{пч} = \frac{U_{ном}}{0,985 - 0,00375 \cdot p_n}$; $U_{ном} = 10 \text{ В}$ — номинальное напряжение управления в соответствии с Государственным Стандартом Приборов (ГСП);

• электромагнитная постоянная времени преобразователя частоты может быть принята в пределах $T_{пч} = (0,003 \div 0,005) \text{ с}$.

Передаточная функция звена внутренней обратной связи по ЭДС двигателя в структурной схеме представлена безынерционным звеном

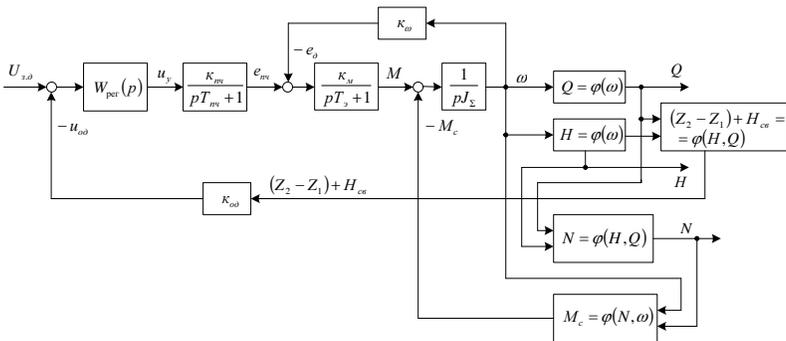


Рис. 4.3. Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией давления в гидросистеме

$$W_{в.з}(p) = \kappa_{\omega} = \frac{I_{\mu.ном} \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1ном}}, \quad (4.6)$$

где $I_{\mu.ном}$ — номинальный ток намагничивающего контура; x_0, x_1 — индуктивные сопротивления соответственно намагничивающего контура и статорной цепи двигателя; $\omega_{1ном}$ — номинальная угловая скорость магнитного поля статора при частоте 50 Гц.

Передачная функция звена момента двигателя в структурной схеме представлена аperiодическим звеном первого порядка

$$W_M(p) = \frac{\kappa_M}{pT_3 + 1}, \text{ для которого:}$$

- коэффициент передачи звена момента

$$\kappa_M = \frac{M_{ном}}{\kappa_{\omega} \cdot (\omega_{1ном} - \omega_{ном})}, \quad (4.7)$$

где $M_{ном}$ — номинальный момент двигателя; $\omega_{ном}$ — номинальная угловая скорость вала двигателя;

- электромагнитная постоянная времени частотно-регулируемого электропривода

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3}, \quad (4.8)$$

где L_3 — эквивалентная индуктивность частотно-регулируемого электропривода; R_3 — эквивалентное активное сопротивление частотно-регулируемого электропривода.

Для определения электромагнитной постоянной времени необходимо предварительно определить следующие параметры:

- индуктивность рассеяния обмоток статора и ротора

$$L_1 = L_2' = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2'}{314}, \quad (4.9)$$

где x_2' — индуктивное сопротивление роторной цепи двигателя;

- индуктивность контура намагничивания

$$L_{\mu} = \frac{x_0}{314}; \quad (4.10)$$

- полная индуктивность обмоток статора и ротора

$$L_s = L_r = L_{\mu} + L_1 = L_{\mu} + L_2'; \quad (4.11)$$

Эквивалентная индуктивность частотно-регулируемого электропривода

$$L_s = L_{op} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(L_s - \frac{L_{\mu}^2}{L_r} \right), \quad (4.12)$$

где L_{op} — индуктивность дросселя в звене постоянного тока преобразователя частоты; $\kappa_i = 2 \cdot \sqrt{3} / \pi$ — модуль коммутационной функции.

Эквивалентное активное сопротивление частотно-регулируемого электропривода

$$R_s = r_{op} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(r_1 + r_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_r} \right), \quad (4.13)$$

где r_{op} — активное сопротивление дросселя в звене постоянного тока преобразователя частоты; r_1 — активное сопротивление статорной цепи двигателя; r_2' — активное сопротивление ротора, приведенное к статорной цепи.

Данные по дросселю в звене постоянного тока преобразователя частоты обычно в справочной литературе и каталогах не приводятся, в этом случае значениями индуктивности L_{op} и активного сопротивления r_{op} можно пренебречь.

Передающая функция звена скорости в структурной схеме представлена интегрирующим звеном

$$W_c(p) = \frac{1}{pJ_\Sigma},$$

где J_Σ — момент инерции насосного агрегата.

Момент инерции насосного агрегата состоит из суммы моментов инерции двигателя и насоса. Момент инерции двигателя находится по паспортным данным двигателя, а момент инерции насоса можно принять в размере 20 % от момента инерции двигателя, тогда

$$J_\Sigma = 1,2 \cdot J_{дв}. \quad (4.14)$$

4.3.3. Расчет параметров структурной схемы насоса и настройка контура стабилизации давления

Блоки структурной схемы насоса на рис. 4.3 представляют собой функциональные зависимости подачи $Q = \varphi(\omega)$ (4.2), напора $H = \varphi(\omega)$ (4.3), мощности $N = \varphi(Q, H)$ (3.10) и момента статического сопротивления $M_c = \varphi(N, \omega)$ (3.11) от угловой скорости насоса. Эти зависимости являются нелинейными и их анализ и синтез возможен только средствами имитационного моделирования. Задача упрощается вследствие того, что исследование энергетических процессов в насосном агрегате необходимо проводить в установившихся (стационарных) режимах, являющихся частным случаем динамических процессов. Вследствие решения энергетической задачи при стационарных условиях, блоки структурной схемы выполняют функции алгебраического вычислителя, результаты вычисления которого используются для анализа электромеханических и энергетических процессов в насосной установке.

Следствием такого подхода является использование при имитационном моделировании возможность применения простого ПИ-регулятора вместо ПИД-регулятора в одноконтурной системе стабилизации давления или уровня. Это обусловлено отсутствием второй компенсируемой гидравлической постоянной времени из-за применения алгебраических вычислителей.

Вследствие отсутствия в модели гидравлической постоянной времени исключается возможность исследования гидравлических ударов и кавитационных процессов.

Синтез одноконтурной системы стабилизации давления выполняется в следующей последовательности.

1. По графику водопотребления определяется наибольший расход жидкости $Q_{расх}$ за фиксируемый период времени.

2. Для наибольшего расхода жидкости определяется необходимая угловая скорость насоса ω в соответствии с (3.16).

3. Определяется напор насоса H при найденном значении угловой скорости в соответствии с (3.8).

4. Определяется максимальная сумма напоров $(Z_2 - Z_1) + H_{св}$ по формуле (4.4) для обеспечения наибольшего расхода жидкости.

5. При определении коэффициент передачи обратной связи по давлению (напору) руководствуются следующими соображениями. Сигнал управления уменьшается вдвое по сравнению с номинальным значением для возможности создания стабилизируемого давления как выше, так и ниже относительно требуемой оптимальной настройки. На практике это обеспечивает более гибкую наладку системы автоматической стабилизации. С учетом этого

$$K_{од} = \frac{U_{у.ном} / 2}{(Z_2 - Z_1) + H_{св.маx}} . \quad (4.15)$$

6. Определяется коэффициент передачи насоса по давлению (напору)

$$K_{нас} = \frac{H_{ном}}{\omega_{ном}} . \quad (4.16)$$

7. Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W_{ПИ}(p) = \frac{(T_p p + 1)}{T_p p} ,$$

где T_s — электромагнитная постоянная времени частотно-регулируемого электропривода; T_p — постоянная времени ПИ-регулятора.

8. Определяется постоянная времени ПИ-регулятора

$$T_p = \frac{2T_{нч}K_{тч}K_M K_{нас}K_{од}}{J_\Sigma}. \quad (4.17)$$

9. Для задания параметров ПИ-регулятора в современных преобразователях частоты используется PID-контроллер. Вычисляются его составляющие:

- коэффициент передачи пропорциональной части

$$P = \frac{T_2}{T_p}; \quad (4.18)$$

- коэффициент передачи интегральной части

$$I = \frac{1}{T_p}; \quad (4.19)$$

- коэффициент передачи дифференциальной части

$$D = 0.$$

4.4. СТАБИЛИЗАЦИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ И СКВАЖИНАХ

Функционирование резервуаров характеризуется переменным притоком, а скважины переменным дебетом, сопровождающимся изменением статического напора H_c . Переменный уровень жидкости в резервуаре или скважине связан с потерями электроэнергии. Таким образом возникает необходимость стабилизации уровня жидкости на высоких отметках.

На горном производстве такими резервуарами являются зумпфы различного назначения, а скважины используются при подземном выщелачивании полезного ископаемого.

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 резервуарах или скважине, 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, при этом, следует учитывать величину притока в резервуар или дебет скважины, так как высоко заявленный уровень может не соответствовать притоку жидкости. Это может привести к сбою системы автоматической стабилизации уровня жидкости.

Схема стабилизации уровня жидкости в резервуаре и скважине рассмотрен на примере системы, изображенной на рис. 4.4, а процесс стабилизации — на рис. 4.5.

Процесс стабилизации уровня в скважине рассмотрен на напорных характеристиках насоса и трубопровода. Предположим, что в некоторый момент времени насос работает с угловой скоростью ω_1 и обеспечивает подачу Q_1 и напор H_1 . Этому режиму соответствует уровень жидкости в резервуаре или скважине $h_{зад}$ и приток q_1 .

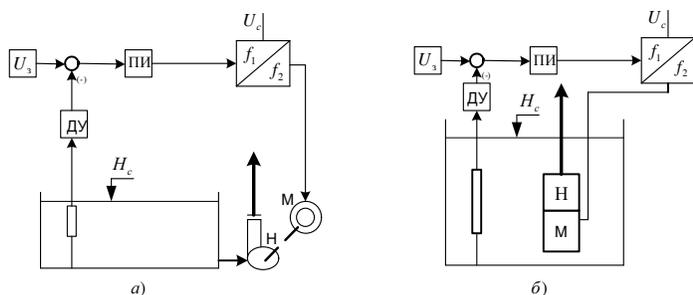


Рис. 4.4. Схема стабилизации уровня в резервуаре и скважине:

а) стабилизация уровня в резервуаре; б) стабилизация уровня в скважине; U_3 — сигнал задания по уровню жидкости; ПИ — пропорционально-интегральный регулятор; ДУ — преобразователь датчика уровня; Н — насосная часть агрегата; М — двигательная часть агрегата

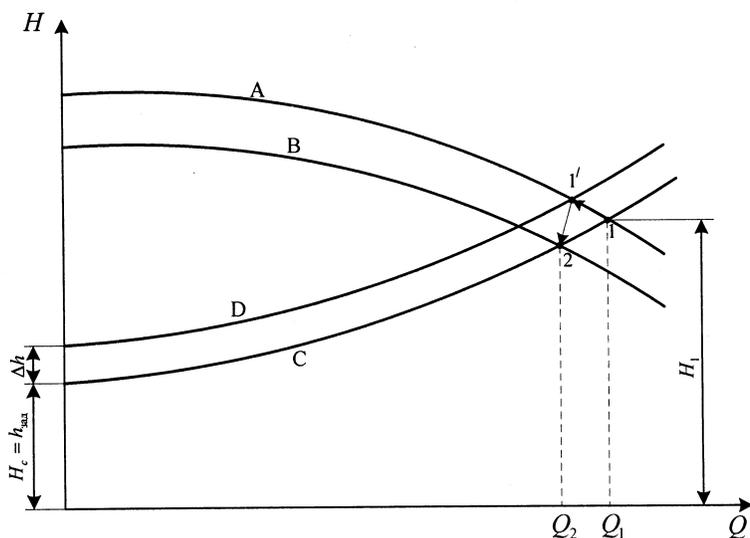


Рис. 4.5. Процесс стабилизации уровня жидкости в резервуаре или скважине: А – напорная характеристика насоса при ω_1 ; В — то же при ω_2 ; С — характеристика трубопровода при заданном уровне; D — характеристика трубопровода же при пониженном уровне

Предположим, что в следующий момент времени приток изменится в сторону уменьшения и станет равным q_2 . Тогда из-за несоответствия притока и откачки $q_2 < Q_1$, уровень воды в скважине снизится на некоторое значение Δh . Следовательно, возрастет статическая составляющая напора, и характеристика трубопровода займет положение D. При этом подача насоса также несколько уменьшится до точки 1'. Однако это не компенсирует уменьшение притока. Подача насоса за счет того, что характеристики насоса и трубопровода криволинейны, снижается в гораздо меньшей степени, чем уменьшится приток. При этом произойдет рассогласование задающего сигнала системы регулирования и сигнала, поступающего от датчика уровня. В результате этого регулятор выдает обработанный по ПИ-закону сигнал в систему управления частотно-регулируемого электроприводу, снижающий угловую скорость насосного агрегата.

При снижении угловой скорости характеристика насоса сместится в положение В, соответствующей угловой скорости ω_2 , новому значению притока q_2 и заданному уровню жидкости в скважине, рабочая точка насоса переместится в точку 2. В этой рабочей точке обеспечивается $q_2 = Q_2$.

При увеличении притока система регулирования действует аналогично, но в противоположном направлении. В результате система регулирования поддерживает заданный уровень жидкости в скважине, обеспечивая равенство подачи насоса и притока $Q = q$ и стабильность заданного уровня. Таким образом, обеспечивается работа насосного агрегата в экономичном режиме, без превышения статических напоров.

Для вычисления подачи, напора, КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии насосным агрегатом в режиме стабилизации уровня используются зависимости (3.6), (3.8), (3.9), (3.10) и (3.11). При этом стабилизируемым параметром является статический напор H_c , являющийся составной частью этих зависимостей.

Вычисление статического напора H_c (стабилизируемая величина), в соответствии с характеристикой трубопровода, производится по формуле

$$H_c = \frac{H - H_{ном} \cdot \left(\frac{Q_{пр}}{Q_{ном}} \right)^2}{1 - \left(\frac{Q_{пр}}{Q_{ном}} \right)^2}, \quad (4.20)$$

где $Q_{пр}$ — приток жидкости в резервуар или скважину.

Вычисление уровня жидкости в резервуаре или скважине производится по формуле

$$H_{ур} = H_{под} - H_c, \quad (4.21)$$

где $H_{под}$ — высота подъема жидкости.

Высота подъема жидкости определяется разностью геодезических отметок между наивысшей точкой подъема жидкости и местом установки насоса, а статический напор определяется разностью геодезических отметок между наивысшей точкой подъема жидкости и уровнем жидкости в резервуаре или скважине.

Формула (4.21) используется для выбора датчика уровня. При этом учитывается степень агрессивности среды. Учитывая, что на горном производстве наиболее часто транспортируемой жидкостью является кислотные и щелочные растворы (концентрат для процессов обогащения, подземное выщелачивание полезного ископаемого и т.п.), можно рекомендовать погружной зонд для измерения уровня жидкости типа «Метран-55-ЛМК 858», имеющего следующие технические характеристики и параметры:

- измеряемая среда — агрессивные жидкости и вязкие среды;
- диапазон измеряемых давлений (уровня):
 - минимальный 4 кПа (0,4 м вод.ст);
 - максимальный 1 МПа (100 м вод.ст);
- диаметр зонда 45 мм;
- выходной сигнал 4—20 мА, 0—10 В;
- температура измеряемой среды от 0 до 70 °С.

4.5. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА НАСОСНОГО АГРЕГАТА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРАХ И СКВАЖИНАХ

Структурную схему электродвигателя в составе насосного агрегата при частотном управлении со стабилизацией уровня представляем в виде типовых динамических звеньев, как это было сделано в структуре управления со стабилизацией давления в гидросистеме. Структурную схему насоса представляем в виде функциональных блоков, реализующих различного вида зависимости по подаче, напору, мощности и моменту статического сопротивления.

Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре или скважине представлена на рис. 4.6.

Расчет параметров структурной схемы частотно-регулируемого электропривода производится по формулам (4.5) ÷ (4.14). Блоки структурной схемы насоса на рис. 4.6 представляют собой функциональные зависимости подачи $Q = \varphi(\omega)$ (3.6), напора $H = \varphi(\omega)$ (3.8), мощности $N = \varphi(Q, H)$ (3.10) и момента статического сопротивления $M_c = \varphi(N, \omega)$ (3.11) от угловой скорости насоса.

Синтез одноконтурной системы стабилизации уровня жидкости выполняется в следующей последовательности.

1. По данным предприятия определяется наименьший приток жидкости Q_{np} в резервуар или скважину за фиксируемый период времени.

2. Для наименьшего притока жидкости определяется необходимая угловая скорость насоса ω в соответствии с (3.16).

3. По зависимости (3.7) производится проверка возможности функционирования насоса в рабочей зоне.

4. По данным насосной установки определяется минимальный статический напор $H_{c.min}$, задающий максимально возможный уровень жидкости $H_{ур.max}$ в резервуаре или скважине.

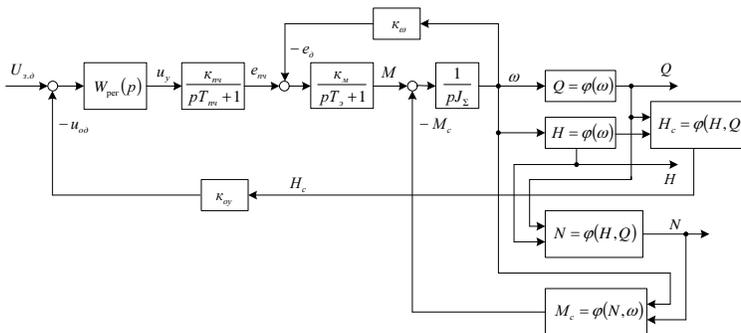


Рис. 4.6. Структурная схема частотно-регулируемого насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре или скважине

5. При определении коэффициент передачи обратной связи по уровню руководствуются следующими соображениями. Сигнал управления уменьшается вдвое по сравнению с номинальным значением для возможности создания стабилизируемого уровня как выше, так и ниже относительно требуемой оптимальной настройки. На практике это обеспечивает более гибкую наладку системы автоматической стабилизации. С учетом этого

$$K_{oy} = \frac{U_{y.ном}}{H_{c.min}} = \frac{U_{y.ном} / 2}{H_{под} - H_{ур.max}}. \quad (4.22)$$

6. Определяется коэффициент передачи насоса по давлению (напору) по формуле (4.16)

7. Определяется постоянная времени ПИ-регулятора

$$T_p = \frac{2T_{пч} K_{пч} K_M K_{нас} K_{oy}}{J_{\Sigma}}. \quad (4.23)$$

8. Для задания параметров ПИ-регулятора в современных преобразователях частоты используется PID-контроллер. Вычисление его составляющих производится по формулам (4.18) и (4.19).

4.6. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

4.6.1. Пример расчета автоматизированного электропривода со стабилизацией давления (напора) в гидросистеме

Рассматривается автоматизированный частотно-регулируемый электропривод для насоса 1Д1250-125А с приводным электродвигателем ДАЗО4-400У-4МУ1. В качестве исходных данных используются расчетные величины, полученные в п. 3.3 и п. 3.7.

Расчет

1. Рассчитываются параметры структурной схемы, представленной на рис. 4.3.

1.1. Передаточная функция преобразователя частоты в структурной схеме представлена аperiodическим звеном первого порядка

$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{pT_{пч} + 1}$, параметры которого определяются по следующим формулам:

- статический коэффициент передачи преобразователя частоты в соответствии с (4.5)

$$K_{пч} = \frac{E_{пч}}{U_{у.ном}} = \frac{3544}{10} = 354,4,$$

где $E_{пч} = \frac{U_{ном}}{0,985 - 0,00375 \cdot p_n} = \frac{3464}{0,985 - 0,00375 \cdot 2} = 3544$ В;

$U_{у.ном} = 10$ В — номинальное напряжение управления в соответствии с Государственным Стандартом Приборов (ГСП);

- электромагнитная постоянная времени преобразователя частоты может быть принята в пределах $T_{пч} = (0,003 \div 0,005)$ с.

Принимаем $T_{пч} = 0,005$ с.

1.2. Коэффициент передачи звена внутренней обратной связи по ЭДС двигателя в соответствии с (4.6)

$$K_{\omega} = \frac{I_{\mu.ном} \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1ном}} = \frac{26,1 \cdot (130 + 5,905)}{157} = 22,59 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

1.3. Коэффициент передачи звена момента в соответствии с (4.7)

$$K_M = \frac{M_{ном}}{K_{\omega} \cdot (\omega_{1ном} - \omega_{ном})} = \frac{3228}{22,59 \cdot (157 - 154,9)} = 68,04 \text{ Нм/В}.$$

1.4. Индуктивность рассеяния обмоток статора и ротора в соответствии с (4.9)

$$L_1 = L_2' = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2'}{314} = \frac{5,905}{314} = 0,0188 \text{ Гн.}$$

1.5. Индуктивность контура намагничивания в соответствии с (4.10)

$$L_\mu = \frac{x_0}{314} = \frac{130}{314} = 0,414 \text{ Гн.}$$

1.6. Полная индуктивность обмоток статора и ротора в соответствии с (4.11)

$$L_s = L_r = L_\mu + L_1 = L_\mu + L_2' = 0,414 + 0,0188 = 0,4328 \text{ Гн.}$$

1.7. Эквивалентная индуктивность частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.12)

$$L_\sigma = L_{op} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(L_s - \frac{L_\mu^2}{L_r} \right) = 0 + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \right)^2 \times \\ \times \left(0,4328 - \frac{0,414^2}{0,4328} \right) = 0,067 \text{ Гн.}$$

где $L_{op} = 0$ в связи с отсутствием данных о дросселе в цепи постоянного тока преобразователя частоты; $\kappa_i = 2 \cdot \sqrt{3} / \pi$ — модуль коммутационной функции.

1.8. Эквивалентное активное сопротивление частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.13)

$$R_\sigma = r_{op} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(r_1 + r_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_r^2} \right) = 0 + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \right)^2 \times \\ \times \left(0,7895 + 0,8983 \cdot \frac{0,414^2}{0,4328^2} \right) = 2,942 \text{ Ом,}$$

где $r_{dp} = 0$ в связи с отсутствием данных о дросселе в цепи постоянного тока преобразователя частоты;

1.9. Электромагнитная постоянная времени частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.8)

$$T_{\vartheta} = \frac{L_{\vartheta}}{R_{\vartheta}} = \frac{0,067}{2,942} = 0,0228 \text{ с.}$$

1.10. Момент инерции насосного агрегата в соответствии с (4.14)

$$J_{\Sigma} = 1,2 \cdot J_{db} = 1,2 \cdot 14 = 16,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

2. Синтез одноконтурной системы стабилизации давления.

2.1. По графику водопотребления (табл. 3.1) определяем наибольший расход жидкости за фиксируемый период времени $Q_{расх.маx} = 24,4$ тыс. м³/сут. от 6 апреля. При переводе на часовое водопотребление получаем, $Q_{расх.маx} = 1017$ м³/час.

2.2. Определяется необходимая угловая скорость насоса при наибольшем расходе жидкости в соответствии с (3.16)

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_{\phi}} + \left(1 - \frac{H_c}{H_{\phi}}\right) \cdot \left(\frac{Q_{расх.маx}}{Q_{ном}}\right)^2} = \\ &= 154,9 \cdot \sqrt{\frac{26}{125} + \left(1 - \frac{26}{125}\right) \cdot \left(\frac{1017}{1150}\right)^2} = 140,9 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

2.3. Определяется напор, развиваемый насосом при угловой скорости $\omega = 140,9 \text{ с}^{-1}$, в соответствии с (3.8)

$$H = H_c + (H_{ном} - H_c) \cdot \frac{H_{\phi} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^2 - H_c}{H_{\phi} - H_c} =$$

$$= 26 + (100 - 26) \cdot \frac{125 \cdot \left(\frac{140,9}{154,9}\right)^2 - 26}{125 - 26} = 83,9.$$

2.4. Для обеспечения наибольшего расхода жидкости определяется стабилизируемый напор (давление) в соответствии с (4.4)

$$(Z_2 - Z_1) + H_{св} = \frac{H - H_{ном} \cdot \left(\frac{Q_{расх.макс}}{Q_{ном}}\right)^2}{1 - \left(\frac{Q_{расх.макс}}{Q_{ном}}\right)^2} =$$

$$= \frac{83,9 - 100 \cdot \left(\frac{1017}{1150}\right)^2}{1 - \left(\frac{1017}{1150}\right)^2} = 26,123,$$

Для измерения стабилизируемого напора принимаем датчик давления Метран-100-ДА, модель 1050 (табл. 4.1) с пределом измерения давления 0,4 МПа (40,8 м вод.ст).

2.5. Определяется коэффициент передачи обратной связи по давлению (напору) в соответствии с (4.15)

$$K_{од} = \frac{U_{у.ном} / 2}{(Z_2 - Z_1) + H_{св.макс}} = \frac{10 / 2}{26,123} = 0,1914 \text{ В/м.}$$

2.6. Определяется коэффициент передачи насоса по давлению (напору) в соответствии с (4.16)

$$K_{нас} = \frac{H_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{100}{154,9} = 0,6456 \text{ мс.}$$

2.7. Определяется постоянная времени ПИ-регулятора в соответствии с (4.17)

$$T_p = \frac{2T_{m1}K_{m1}K_mK_{нас}K_{од}}{J_\Sigma} =$$

$$= \frac{2 \cdot 0,005 \cdot 354,4 \cdot 68,04 \cdot 0,6456 \cdot 0,1914}{16,8} = 1,7736 \text{ с.}$$

2.8. Для задания параметров ПИ-регулятора в современных преобразователях частоты используется PID-контроллер. Вычисляем его составляющие:

- коэффициент передачи пропорциональной части в соответствии с (4.18)

$$P = \frac{T_i}{T_p} = \frac{0,0228}{1,7736} = 0,012855;$$

- коэффициент передачи интегральной части в соответствии с (4.19)

$$I = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{1,7736} = 0,5638 \text{ с}^{-1};$$

- коэффициент передачи дифференциальной части

$$D = 0.$$

4.6.2. Пример расчета автоматизированного электропривода со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре

Рассмотрим данный пример расчета как вариант использования низковольтного электродвигателя в системе гидротранспорта для подачи концентрата из зумпфа на процессы обогащения. Для подачи концентрата из зумпфа применяется грунтовый насос ГрАТ-170/40. Для обеспечения оптимальных технологических процессов обогащения используется частотно-регулируемый электропривод с приводным электродвигателем типа 4АН225М4У3 и преобразователем частоты типа ATV61HD75N4 фирмы «Шнейдер Электрик».

Исходные данные приведены в виде паспортных данных по насосу, приводному электродвигателю и дополнительных данных, необходимых для расчета.

Паспортные данные по грунтовому насосу:

- паспортная подача — $Q_{ном} = 170 \text{ м}^3/\text{час.};$
- паспортный напор — $H_{ном} = 40 \text{ м.};$
- паспортный КПД — $\eta_{п.ном} = 0,67.$

Паспортные данные по приводному электродвигателю:

- номинальная мощность — $P_{ном} = 75 \text{ кВт};$
- номинальное напряжение — $U_{ном} = 380/660 \text{ В};$
- номинальное скольжение — $s_{ном} = 0,016;$
- номинальная частота вращения — $n_{ном} = 1475 \text{ об./мин.};$
- номинальный КПД — $\eta_{дв.ном} = 0,925;$
- номинальный коэффициент мощности — $\cos \varphi_{ном} = 0,89;$
- перегрузочная способность двигателя — $\lambda = M_{пик} / M_{ном} = 2,2;$
- момент инерции двигателя — $J_{дв} = 0,6 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$

Дополнительные данные, необходимые для расчета:

- плотность перекачиваемой жидкости — $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3;$
- разность геодезических отметок между наивысшей точкой подачи концентрата и местом установки насоса (высота подъема жидкости) — $H_{под} = 27 \text{ м};$
- высота зумпфа — $H_z = 3,5 \text{ м};$
- по данным предприятия приток жидкости в зумпф колеблется от 107 до 163 $\text{м}^3/\text{час}$, а средний приток составляет около $Q_{пр.ср.} = 140 \text{ м}^3/\text{час};$
- время работы насоса в год $T_p = 8050 \text{ час/год}.$

Решение

1. Расчет параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя. При расчете необходимо обратить особое внимание на то, что схема замещения на рис. 3.5 приведена для фазы

асинхронного двигателя, поэтому, расчетные значения токов и напряжений являются фазными.

1.1. Номинальный ток фазы статора

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{ном.ф} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{75 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,925} = 79,9 \text{ А.}$$

1.2. Активное сопротивление фазы статора в соответствии с (3.17)

$$r_1 = \frac{U_{ном.ф} \cdot s_{ном}}{I_{1ном}} = \frac{380 \cdot 0,016}{79,9} = 0,076 \text{ Ом.}$$

1.3. Номинальная угловая скорость магнитного поля статора двигателя

$$\omega_{1ном} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

1.4. Номинальная угловая скорость вала двигателя

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1475}{30} = 154,4 \text{ с}^{-1}.$$

1.5. Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}} = \frac{75 \cdot 10^3}{154,4} = 485,8 \text{ Нм.}$$

1.6. Максимальный момент двигателя

$$M_{max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,2 \cdot 485,8 = 1068,8 \text{ Нм.}$$

1.7. Индуктивное сопротивление короткого замыкания в соответствии с (3.26)

$$x_k = \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{max}} - r_1 \right)^2 - r_1^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 157 \cdot 1068,8} - 0,076\right)^2 - 0,076^2} = 1,212 \text{ Ом.}$$

1.8. Индуктивные сопротивления статора и приведенное сопротивление ротора в соответствии с (3.27)

$$x_1 \approx x_2' = \frac{x_\kappa}{2} = \frac{1,212}{2} = 0,606 \text{ Ом.}$$

1.9. Приведенное к обмотке статора активное сопротивление фазы ротора в соответствии с (3.28)

$$\begin{aligned} r_2' &= s_{ном} \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{ном}} - r_1 \right) + \\ &+ s_{ном} \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{ном}} - r_1 \right)^2 - (r_1^2 + x_\kappa^2)} = \\ &= 0,016 \cdot \left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 157 \cdot 485,8} - 0,076 \right) + \\ &+ 0,016 \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 157 \cdot 485,8} - 0,076 \right)^2 - (0,076^2 + 1,212^2)} = 0,084 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

1.10. Номинальный приведенный ток ротора в соответствии с (3.30)

$$I_{2ном}' = \sqrt{\frac{M_{ном} \cdot \omega_{1ном} \cdot s_{ном}}{3 \cdot r_2'}} = \sqrt{\frac{485,8 \cdot 157 \cdot 0,016}{3 \cdot 0,084}} = 69,6 \text{ А.}$$

1.11. Номинальный коэффициент мощности роторной цепи

$$\cos \varphi_{2ном} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + (x_2' \cdot s_{ном})^2}} = \frac{0,084}{\sqrt{0,084^2 + (0,606 \cdot 0,016)^2}} = 0,9934,$$

$$\text{тогда } \sin \varphi_{2ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2ном}} = \sqrt{1 - 0,9934^2} = 0,1147.$$

1.12. Номинальный ток намагничивающей цепи в соответствии с (3.29)

$$I_{\mu,ном} = \sqrt{\left(I'_{2ном} \cdot \sin \varphi_{2ном}\right)^2 + I_{1ном}^2 - I_{2ном}^{I/2} - I'_{2ном} \cdot \sin \varphi_{2ном}} = \\ = \sqrt{(69,6 \cdot 0,1147)^2 + 79,9^2 - 69,6^2 - 69,6 \cdot 0,1147} = 32,1 \text{ А.}$$

1.13. Номинальная ЭДС фазы статора в соответствии с (3.31)

$$E_{1ном} = U_{ном.ф} \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot p_n) = \\ = 380 \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot 2) = 371,5 \text{ В.}$$

1.14. Индуктивное сопротивление намагничивающей цепи в соответствии с (3.32)

$$x_0 = \frac{E_{1ном}}{I_{\mu,ном}} = \frac{371,5}{32,1} = 11,573 \text{ Ом.}$$

2. Расчет параметров структурной схемы, представленной на рис. 4.6.

2.1. Статический коэффициент передачи преобразователя частоты в соответствии с (4.5)

$$K_{пч} = \frac{E_{пч}}{U_{у.ном}} = \frac{387}{10} = 38,7,$$

$$\text{где } E_{пч} = \frac{U_{ном.ф}}{0,985 - 0,00375 \cdot p_n} = \frac{380}{0,985 - 0,00375 \cdot 2} = 387 \text{ В;}$$

$U_{у.ном} = 10 \text{ В}$ — номинальное напряжение управления в соответствии с Государственным Стандартом Приборов (ГСП).

2.2. Электромагнитная постоянная времени преобразователя может быть принята в пределах $T_{пч} = (0,003 \div 0,005) \text{ с}$. Принимается $T_{пч} = 0,005 \text{ с}$.

2.3. Коэффициент внутренней обратной связи по ЭДС двигателя в соответствии с (4.6)

$$\kappa_{\omega} = \frac{I_{\mu,ном} \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1ном}} = \frac{32,1 \cdot (11,573 + 0,606)}{157} = 2,49 \text{ В·с.}$$

2.4. Коэффициент передачи звена момента в соответствии с (4.7)

$$\kappa_M = \frac{M_{ном}}{\kappa_{\omega} \cdot (\omega_{1ном} - \omega_{ном})} = \frac{485,8}{2,49 \cdot (157 - 154,4)} = 75,04 \text{ Нм/В.}$$

2.5. Индуктивность рассеяния обмоток статора и ротора в соответствии с (4.9)

$$L_1 = L_2' = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2'}{314} = \frac{0,606}{314} = 0,00193 \text{ Гн.}$$

2.6. Индуктивность намагничивания в соответствии с (4.10)

$$L_{\mu} = \frac{x_0}{314} = \frac{11,573}{314} = 0,03686 \text{ Гн.}$$

2.7. Полная индуктивность обмоток статора и ротора в соответствии с (4.11)

$$L_s = L_r = L_{\mu} + L_1 = L_{\mu} + L_2' = 0,03686 + 0,00193 = 0,0388 \text{ Гн.}$$

2.8. Эквивалентная индуктивность частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.12)

$$L_s = L_{оп} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(L_s - \frac{L_{\mu}^2}{L_r} \right) = 2,3 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ \frac{3}{2} \cdot 1,103^2 \cdot \left(0,0388 - \frac{0,03686^2}{0,0388} \right) = 0,0092 \text{ Гн,}$$

где $L_{оп} = 2,3 \cdot 10^{-3}$ Гн – индуктивность дросселя в цепи постоянного

тока преобразователя частоты ATV61HD75N4; $\kappa_i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$ —

модуль коммутационной функции.

2.9. Эквивалентное активное сопротивление частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.13)

$$R_3 = r_{dp} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(r_1 + r_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_r^2} \right) = 0,0047 + \\ + \frac{3}{2} \cdot 1,103^2 \cdot \left(0,076 + 0,084 \cdot \frac{0,03686^2}{0,0388^2} \right) = 0,2817 \text{ Ом},$$

где $r_{dp} = 0,0047$ Ом — активное сопротивление дросселя в цепи постоянного тока преобразователя частоты ATV61HD75N4.

2.10. Электромагнитная постоянная времени частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.8)

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{0,0092}{0,2817} = 0,033 \text{ с}.$$

2.11. Момент инерции насосного агрегата в соответствии с (4.14)

$$J_\Sigma = 1,2 \cdot J_{os} = 1,2 \cdot 0,6 = 0,72 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

3. Синтез одноконтурной системы стабилизации уровня жидкости

3.1. По экспертной оценке предприятия наименьший приток жидкости в зумпф составляет $Q_{np.min} = 107 \text{ м}^3/\text{час}$.

3.2. Определяется минимальный статический напор $H_{c.min}$. Для этого задаемся уровнем жидкости в зумпфе. При высоте зумпфа 3,5 м, принимаем максимальный уровень $H_{yp.max} = 3 \text{ м}$ с запасом 0,5 м, чтобы иметь время для включения резервного насоса при отказе системы автоматической стабилизации уровня или повышенного притока. При таких условиях, в соответствии с (4.21)

$$H_{c.min} = H_{nod} - H_{yp.max} = 27 - 3 = 24 \text{ м}.$$

Минимальный статический напор является стабилизируемой величиной в системе стабилизации уровня жидкости.

В качестве датчика уровня принимается к установке погружной зонд для измерения уровня жидкости типа «Метран-55-ЛМК 858», имеющего следующие основные технические характеристики и параметры:

- измеряемая среда — агрессивные жидкости и вязкие среды;
- диапазон измеряемых давлений (уровня):
 минимальный 4 кПа (0,4 м вод.ст);
 максимальный 1 МПа (100 м вод.ст).

3.3. Фиктивный напор грунтового насоса

$$H_{\phi} = 1,45 \cdot H_{ном} = 1,45 \cdot 40 = 58 \text{ м.}$$

3.4. Для наименьшего притока жидкости определяется необходимая угловая скорость насоса в соответствии с (3.16)

$$\begin{aligned} \omega_{\min} &= \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_{\phi}} + \left(1 - \frac{H_c}{H_{\phi}}\right) \cdot \left(\frac{Q_{np.\min}}{Q_{ном}}\right)^2} = \\ &= 154,4 \cdot \sqrt{\frac{24}{58} + \left(1 - \frac{24}{58}\right) \cdot \left(\frac{107}{170}\right)^2} = 124,1 \text{ с}^{-1}. \end{aligned}$$

3.5. Производится проверка возможности функционирования насоса в рабочей зоне в соответствии с (3.7)

$$\omega_{ep} = \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{H_c}{H_{\phi}}} = 154,4 \cdot \sqrt{\frac{24}{58}} = 99,3 \text{ с}^{-1}.$$

Так как $\omega_{\min} = 124,1 \text{ с}^{-1} > \omega_{ep} = 99,3 \text{ с}^{-1}$, то рабочая точка насоса находится в рабочей зоне.

3.6. Определяется коэффициент передачи обратной связи по уровню жидкости в соответствии с (4.22)

$$K_{oy} = \frac{U_{у.ном} / 2}{H_{c.\min}} = \frac{U_{у.ном} / 2}{H_{под} - H_{ур.\max}} = \frac{10/2}{24} = 0,2083 \text{ В/м.}$$

3.7. Определяется коэффициент передачи насоса по давлению (напору) в соответствии с (4.16)

$$K_{нас} = \frac{H_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{40}{154,4} = 0,2591 \text{ м.с.}$$

3.8. Определяется постоянная времени ПИ-регулятора в соответствии с (4.23)

$$T_p = \frac{2T_{пч} K_{пч} K_m K_{нас} K_{оу}}{J_{\Sigma}} = \\ = \frac{2 \cdot 0,005 \cdot 38,7 \cdot 75,04 \cdot 0,2591 \cdot 0,2083}{0,72} = 2,177 \text{ с.}$$

3.9. Для задания параметров ПИ-регулятора в современных преобразователях частоты используется PID-контроллер. Вычисляем его составляющие:

- коэффициент передачи пропорциональной части в соответствии с (4.18)

$$P = \frac{T_o}{T_p} = \frac{0,033}{2,177} = 0,01516;$$

- коэффициент передачи интегральной части в соответствии с (4.19)

$$I = \frac{1}{T_p} = \frac{1}{2,177} = 0,4593 \text{ с}^{-1};$$

- коэффициент передачи дифференциальной части

$$D = 0.$$

4.7. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Электрические схемы автоматизированного частотно-регулируемого электропривода содержат силовую цепь и цепи управления. В зависимости от напряжения и мощности двигателя силовая цепь частотно-регулируемого электропривода строится по различным схемам. Для низковольтных электродвигателей используются низковольтные преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения.

Для высоковольтных электродвигателей силовая схема может строиться по двум вариантам. При мощности приводных электродвигателей насосов от 400 до 1600 кВт рекомендуется использовать двухтрансформаторную систему, которая содержит низковольтный преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения и два трансформатора для понижения и повышения напряжения. При мощности приводного высоковольтного электродвигателя насоса свыше 1600 кВт используется бестрансформаторная схема с высоковольтным преобразователем частоты.

На рис. 4.7 представлен двухтрансформаторный частотно-регулируемый электропривод с высоковольтным электродвигателем.

Силовая цепь содержит понижающий трансформатор $T1$; низковольтный преобразователь частоты UZ с автономным инвертором тока; синус-фильтр, обеспечивающий фильтрацию высших гармоник на выходе преобразователя частоты; повышающий трансформатор $T2$ для согласования выходного напряжения преобразователя частоты с напряжением высоковольтного приводного электродвигателя M .

Основным элементом замкнутой цепи управления в системе стабилизации давления является датчик давления $ДД$, устанавливаемый на нагнетательном трубопроводе на наивысшей точке подачи жидкости или на наиболее удаленной точке (диктующая точка сети) в зависимости от технологических условий.

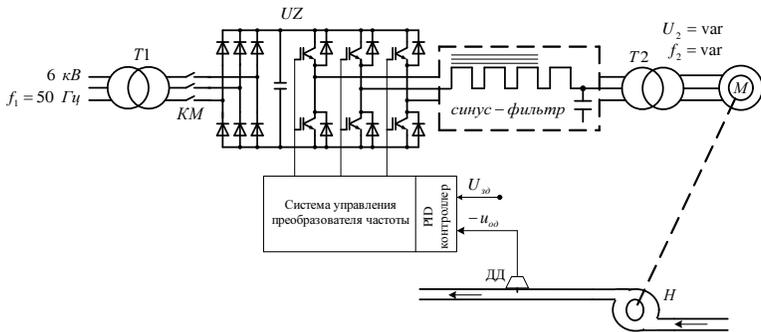


Рис. 4.7. Двухтрансформаторный частотно-регулируемый электропривод в системе автоматической стабилизации давления в гидросистеме

Для связи сигнала давления, пропорционального давлению в нагнетательном трубопроводе, с системой управления преобразователя частоты, используется специальный кабель с защитой от электромагнитных помех. Система управления преобразователя частоты имеет встроенный ПИД-регулятор с функциями формирования сигнала задания по давлению U_{30} и обработки сигнала обратной связи по давлению u_{00} .

Аналогично строятся цепи управления для стабилизации давления и в системе бестрансформаторного частотно-регулируемого электропривода с высоковольтным преобразователем частоты (рис. 4.8). В данном случае используется преобразователь частоты с автономным инвертором тока. В отличие от преобразователя частоты с автономным инвертором напряжения, где система управления работает в основном на инверторную группу вентилях, формируя широтно-импульсную модуляцию, преобразователь частоты с автономным инвертором тока в составе системы управления имеет блоки управления выпрямителем *БУВ* и управления автономным инвертором тока *БУАИТ*.

Сигналы от датчика давления, установленного в диктующей точке сети, и от задающего устройства поступают в ПИД или ПИ-регулятор, где они сравниваются между собой, соответствующим образом обрабатываются и передаются в систему управления преобразователя частоты. Если напор в диктующей

точке выше заданного значения, в электропривод поступает команда на уменьшение угловой скорости электродвигателя насоса, и наоборот. При соответствии напора в диктующей точке заданному значению, изменение угловой скорости насоса прекращается.

Аналогично строятся схемы частотно-регулируемого электропривода с автоматической стабилизацией уровня жидкости в резервуарах и скважинах. На рис. 4.9 представлена схема низковольтного частотно-регулируемого электропривода со стабилизацией уровня жидкости в зумпфе. Вместо низковольтного электропривода при мощностях приводного электродвигателя более 400 кВт возможно использование высоковольтной двухтрансформаторной схемы или бестрансформаторной с высоковольтным преобразователем частоты.

Основным элементом замкнутой цепи управления в системе стабилизации уровня жидкости является датчик уровня, который формируется из погружного зонда и преобразователя уровня ПУ. Для связи погружного зонда с преобразователем уровня используется специальный кабель с защитными свойствами от агрессивной среды, а связь сигнала по уровню, пропорционального уровню жидкости в резервуаре, с системой управления преобразователя частоты используется специальный кабель с защитой от электромагнитных помех. Система управления преобразователя

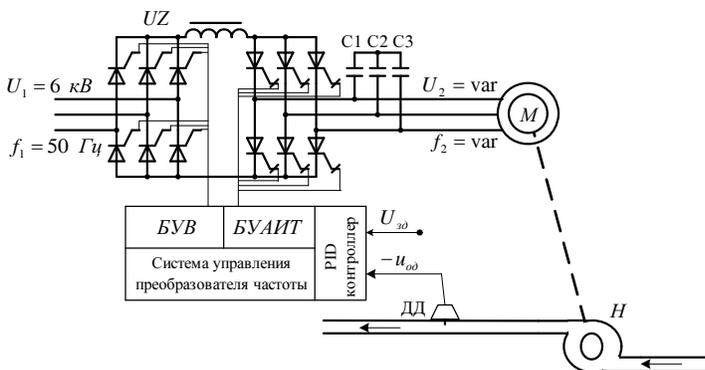


Рис. 4.8. Бестрансформаторный высоковольтный частотно-регулируемый электропривод в системе автоматической стабилизации давления в гидро-системе

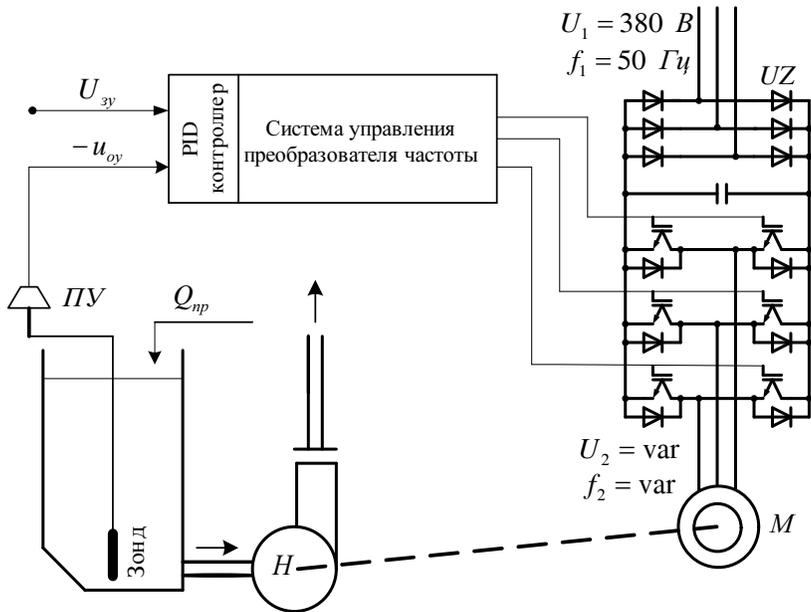


Рис. 4.9. Низковольтный частотно-регулируемый электропривод в системе автоматической стабилизации уровня жидкости

частоты имеет встроенный ПИД-регулятор с функциями формирования сигнала задания по уровню $U_{зy}$ и обработки сигнала обратной связи по уровню u_{oy} . Сигналы от датчика уровня и от задающего устройства поступают в ПИД или ПИ-регулятор, где они сравниваются между собой, соответствующим образом обрабатываются и передаются в систему управления преобразователя частоты. Если уровень в резервуаре выше заданного значения, в электропривод поступает команда на увеличение угловой скорости электродвигателя насоса, и наоборот. При соответствии уровня жидкости заданному значению, изменение угловой скорости насоса прекращается.

ГЛАВА 5

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
ВЕНТИЛЯТОРНЫХ
УСТАНОВОК**

5.1. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК

При разработке энергосберегающих систем регулируемого электропривода вентиляторных установок следует иметь в виду, что технологический процесс воздухоподачи имеет большее разнообразие, чем процесс подачи жидкости насосными установками.

Регулирование режима работы вентиляторных установок обусловлено, главным образом, сезонными и суточными изменениями температуры, влажностью и плотностью воздуха, его запыленностью и загазованностью, которая преимущественно зависит от характера производств вентилируемого помещения. Для горного производства наиболее характерно именно запыленность и загазованность выработок, а для процессов обогащения — запыленность цехов и помещений обогатительных фабрик.

Регулирование угловой скорости вентиляторов главного проветривания шахт и рудников практически не встречается в связи с тем, что используются в основном осевые вентиляторы, подача которых регулируется посредством изменения угла лопаток. В случае использования центробежных вентиляторов главного проветривания необходимость регулирования подачи связана, в основном, из-за изменения эквивалентного отверстия выработок в процессе развития шахты или рудника.

Для вентиляторов местного проветривания рекомендуется изменять подачу воздуха из следующих соображений:

- начало проходки тупиковых выработок характеризуется малым значением аэродинамического сопротивления, в этот период времени необходима небольшая подача воздуха для проветривания;
- по мере удлинения выработки аэродинамическое сопротивление увеличивается и требуется подача воздуха в возрастающих количествах;
- кроме увеличения аэродинамического сопротивления, важным фактором является газовыделение из окружающих

пород, для удаления которого в отдельные периоды времени может потребоваться большее количество воздуха, чем обусловленное аэродинамическим сопротивлением;

- ведение проходческих работ буровзрывным способом сопровождается выделением большого количества продуктов взрыва и пыли, для их быстрого удаления из выработки необходима кратковременная подача повышенного количества воздуха.

Разнообразие ситуаций и факторов не позволяет сформировать автоматическое управление регулируемым электроприводом вентиляторных установок. Здесь возможен вариант регулирования в ручном режиме управления.

Большие возможности автоматического управления возникают в технологиях применения дымососов, например, для процессов производства окатышей, где дымососы используются для создания разрежения в зоне обжига окатышей.

Существуют большие перспективы использования систем автоматического управления угловой скоростью воздуходувок в калориферных системах отопления. Такие системы обычно работают в сочетании воздуходувок с теплоносителями. Калориферы могут быть электрическими или водяными. Оптимальное сочетание количества подогретого воздуха с объемом его подачи требует управлять как воздуходувной установкой, так и теплоносителем. Эта задача требует регулировать угловые скорости воздуходувки и теплофикационного насоса в контуре водяного отопления или электрического нагревателя. Задача осложняется тем, что требуется учитывать температуру атмосферного воздуха. Алгоритм управления необходимо строить таким образом, чтобы обеспечить температурный комфорт отапливаемых помещений, цехов, стволов шахт и рудников в холодный период времени при минимальных затратах на теплоносители.

Небольшие вентиляторы главного проветривания с мощностью электродвигателя до 160 кВт, обычно используют низковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. При мощности от 160 до 400 кВт находят применение низковольтные и высоковольтные асинхронные двигатели с фазным ротором, а при больших мощностях используются высоковольт-

ные синхронные двигатели [6]. В вентиляторах местного проветривания используются низковольтные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Выбор регулируемого электропривода для вентиляторных установок принципиально не отличается от выбора привода для насосов. Для вентиляторов, оснащенных асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором мощностью до 160 кВт, используется преимущественно низковольтный частотно-регулируемый электропривод. Для мощных вентиляторов с высоковольтными синхронными электродвигателями мощностью до 4000 кВт используются бестрансформаторные высоковольтные частотно-регулируемые электроприводы с автономным инвертором тока. Особо следует отметить возможность применения асинхронно-вентильного каскада как низковольтного, так и высоковольтного для регулирования угловой скорости вентиляторов, так как такая система электропривода значительно дешевле частотно-регулируемого. Однако применение АВК возможно, если вентиляторный агрегат имеет в своем составе асинхронный электродвигатель с фазным ротором. В некоторых случаях возможна замена асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на асинхронный электродвигатель с фазным ротором. В горной промышленности имеется пример использования электропривода мощностью 6000 кВт по схеме асинхронно-вентильного каскада. Недостатком АВК является некомплектность поставки оборудования, и необходимость применения специальных мер для фильтрации высших гармоник, возникающих вследствие коммутации вентилей ведомого сетью инвертора.

Для электроприводов вентиляторных установок мощностью свыше 2000 кВт, оснащенных синхронными электродвигателями возможно применение вентильного двигателя. Следует отметить, что в горной промышленности отсутствуют примеры использования электропривода вентиляторных установок по системе вентильного двигателя. Однако синхронный частотно-регулируемый электропривод оказывается значительно сложнее и дороже, чем электропривод по системе вентильного двигателя. Поэтому имеются значительные перспективы использования такой системы для вентиляторных установок.

Энергетический эффект в вентиляторных установках можно получить, если требуется обеспечение переменной подачи для оптимизации технологического процесса. В этом случае экономически оправдано применение регулируемого электропривода, который в большинстве случаев является дорогостоящим и требует квалифицированного персонала.

Анализ режимов работы вентиляторных установок выполняется для определения основных технологических параметров, необходимых для проектирования систем автоматического управления этих установок. К числу этих параметров относятся:

- наибольшая подача вентилятора за расчетный период (сутки, месяц или год);
- наименьшая подача за расчетный период;
- необходимое давление, соответствующее наибольшей подаче;
- необходимое давление, соответствующее наименьшей подаче;
- средний диапазон колебаний подачи или давления.

Определяемые технологические параметры и другие исходные данные, используемые для построения системы автоматического управления вентиляторным агрегатом, должны в наибольшей степени соответствовать их фактическим значениям. Значительная часть исходных данных определяется путем построения графиков совместной работы вентиляторов и сети. При этом используются напорные характеристики вентиляторов, характеристики воздухопроводов или сети. При работе вентиляторов на воздухопроводы или сеть пользуются понятием эквивалентного отверстия.

Результаты построения графиков совместной работы вентилятора и воздухопроводов во многом зависят от степени соответствия этих характеристик фактическому состоянию вентиляторов и воздухопроводов, что особенно важно для вентиляторных агрегатов большой мощности.

При выполнении анализа режимов работы вентиляторных установок систематизируются данные о годовом потреблении электроэнергии и годовой производительности, об удельных расходах электроэнергии, затрачиваемой на подачу воздуха. Эти данные

позволяют подготовить технико-экономическое обоснование на выполнение энергосберегающих проектов.

На горных предприятиях нашли применение вентиляторы главного проветривания центробежного и осевого типа. Так как регулирование подачи у осевых вентиляторов производится посредством изменения угла лопаток рабочего колеса, то их управление с помощью регулируемого электропривода в данном случае не рассматривается. Технические данные центробежных вентиляторов [6] представлены в табл. 5.1.

Для проветривания тупиковых выработок используются вентиляторы местного проветривания. Наибольшее распространение получили вентиляторы типа ВМ, технические данные [6] которых приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.1

Технические данные центробежных вентиляторов главного проветривания

Параметр	Типоразмер вентилятора				
	ВЦ-11М	ВЦ-11М	ВЩЦ-16	ВЩЦ-16	ВЦП-16
Частота вращения рабочего колеса, об/мин	1500	1000	1000	750	1500
Номинальная подача, м ³ /с	14	9,5	29	21,5	29
Номинальное статическое давление, Па	2710	1200	2580	1430	7060
Максимальный статический КПД	0,85	0,85	0,85	0,85	0,87

Продолжение табл. 5.1

Параметр	Типоразмер вентилятора			
	ВЦ-25М	ВЦ-25М	ВЦ-31,5М	ВЦ-31,5М
Частота вращения рабочего колеса, об/мин	750	600	600	500
Номинальная подача, м ³ /с	62	50	108	90
Номинальное статическое давление, Па	3870	2450	4200	2950
Максимальный статический КПД	0,86	0,86	0,84	0,84

Параметр	Типоразмер вентилятора			
	ВЦД-31,5М	ВЦД-47,5У	ВЦД-47,5У	ВЦД-47,5У-Р
Частота вращения рабочего колеса, об/мин	600	500	375	500
Номинальная подача, м ³ /с	200	400	300	400
Номинальное статическое давление, Па	5000	6300	3800	6300
Максимальный статический КПД	0,84	0,85	0,85	0,85

5.2. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯТОРА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

Изменение угловой скорости рабочего колеса вентилятора ведет к изменению всех его рабочих параметров. При этом изменяется и рабочая характеристика вентилятора. Перерасчет характеристик вентилятора на другую угловую скорость осуществляется с помощью формул приведения [7]:

- для подачи

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad (5.1)$$

- для статического давления

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2; \quad (5.2)$$

- для мощности

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^3; \quad (5.3)$$

Таблица 5.2

Технические данные вентиляторов местного проветривания типа ВМ

Параметры	ВМ-3М	ВМ-4М	ВМ-5М	ВМ-6М	ВМ-8М	ВМ-12М
Номинальная подача, м ³ /с	1,0	2,0	3,17	5,67	10,0	20,0
Номинальное полное давление, Па	950	1300	2100	2600	2800	2500
Максимальный полный КПД	0,70	0,72	0,75	0,76	0,80	0,76
Электродвигатель, тип	ВРМ80В2	ВРМ100S2	ВРМ132М2	ВРМ160М2	ВРМ200L2	ВРМ280S4
Номинальная мощность, кВт	2,2	4,0	13,0	24,0	50,0	110,0
Номинальное напряжение, В	380/660	380/660	380/660	380/660	380/660	380/660
Номинальная частота вращения, об/мин	2820	2870	2920	2920	2930	1480
Номинальный КПД	0,83	0,85	0,897	0,91	0,91	0,935
Номинальный коэффициент мощности	0,91	0,87	0,85	0,87	0,88	0,89
Перегрузочная способность	2,6	2,8	2,9	2,5	2,2	2,8
Момент инерции ротора, кг·м ²	0,0028	0,00725	0,034	0,085	0,295	2,675

- для момента статического сопротивления

$$\frac{M_1}{M_2} \approx \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2. \quad (5.4)$$

Равенство в формулах (5.3) и (5.4) приблизительно, так как при изменении подачи Q и статического давления p одновременно изменяется КПД.

Напорная характеристика вентилятора, работающая с переменной угловой скоростью рабочего колеса, описывается уравнением квадратичной параболы:

$$p = p_\phi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - S \cdot Q^2, \quad (5.5)$$

где p_ϕ — фиктивное статическое давление, соответствующее нулевой подаче вентилятора, в расчетах следует принимать: для вентиляторов $p_\phi = 2 \cdot p_{ном}$; для воздуходувок и дымососов $p_\phi = 3 \cdot p_{ном}$; $p_{ном}$ — номинальное (паспортное) статическое давление вентилятора; ω , $\omega_{ном}$ — переменная и номинальная угловые скорости вентилятора, соответственно; S — аэродинамическое сопротивление вентилятора.

Из (5.5) видно, что аэродинамическое сопротивление вентилятора при одной и той же подаче не зависит от угловой скорости. Это означает, что при изменении угловой скорости напорные характеристики вентилятора остаются подобными и только изменяют свое положение по вертикали в координатах Q и p на графике совместной работы вентилятора и воздуховода (рис. 5.1).

Характеристика воздуховода описывается зависимостью

$$p = S_s \cdot Q^2, \quad (5.6)$$

где p — статическое давление в начале воздуховода, фактически на выходе вентилятора; S_s — аэродинамическое сопротивление воздуховода; Q — расход воздуха через воздуховод.

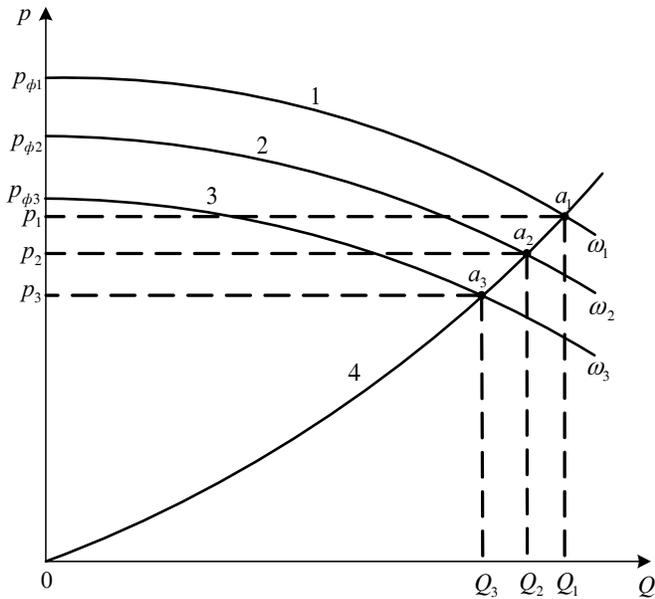


Рис. 5.1. Напорные характеристики вентилятора и воздуховода с переменной угловой скоростью рабочего колеса

Пересечение напорных характеристик 1, 2, 3 вентилятора, последовательно изменяющего свою угловую скорость $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ с характеристикой 4 воздуховода, определяет положение рабочих точек a_1, a_2, a_3 . Этим точкам соответствуют значения рабочих параметров вентилятора: давления p_1, p_2, p_3 и подачи Q_1, Q_2, Q_3 . Таким образом, рабочие точки характеристики вентилятора при изменении угловой скорости рабочего колеса располагаются на характеристике воздуховода.

В отличие от характеристик насосных установок, вентиляторные установки не испытывают противодействия, обусловленного статическим напором, если вентилятор не работает в группе с другими вентиляторами или на ресивер. Поэтому для одиночного вентилятора в соответствии с формулами приведения (5.1) и (5.2) имеем следующие зависимости подачи и статического давления от его угловой скорости:

- для подачи

$$Q = Q_{ном} \cdot \frac{\omega}{\omega_{ном}}; \quad (5.7)$$

- для статического давления

$$p = p_{ном} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2, \quad (5.8)$$

где $Q_{ном}$ — номинальная (паспортная) подача вентилятора.

Важнейшим параметром вентилятора является его КПД. Изменение КПД в зависимости от угловой скорости вентилятора, так же как и насосов, определяется с помощью формулы Муди [4]:

$$\eta_в = 1 - \frac{1 - \eta_{в.ном}}{\left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{0,36}}, \quad (5.9)$$

где $\eta_{в.ном}$ номинальный (паспортный) КПД вентилятора.

Мощность, потребляемая вентилятором, определяется выражением

$$N = \frac{Q \cdot p}{1000 \cdot \eta_в}, \text{ кВт}, \quad (5.10)$$

где Q — секундная подача вентилятора, м³/с; p — полное статическое давление, создаваемое вентилятором, Па.

Очень важным параметром вентилятора является его механическая характеристика, т.е. зависимость момента статического сопротивления от угловой скорости рабочего колеса. От вида механической характеристики зависят энергетические показатели вентилятора (потери и КПД). Момент статического сопротивления любого механизма, в том числе и вентилятора, определяется выражением $M_c = N / \omega$, или

$$M_c = \frac{Q \cdot p}{\omega \cdot \eta_6}, \text{ Нм.} \quad (5.11)$$

Момент статического сопротивления вентилятора можно определить в соответствии с уравнением

$$M_c = (M_{\text{в.ном}} - M_m) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^2 + M_m, \quad (5.12)$$

где $M_{\text{в.ном}}$ — номинальный момент статического сопротивления вентилятора; M_m — момент сопротивления вентилятора, обусловленный трением в его подшипниках и кинематических цепях.

Номинальный момент статического сопротивления вентилятора определяется по (5.11) при номинальных значениях подачи, давления и КПД.

Момент трения M_m согласно опытными данным составляет около 5 % от номинального момента статического сопротивления вентилятора, т.е.

$$M_m = 0,05 \cdot M_{\text{в.ном}}. \quad (5.13)$$

Таким образом, механическая характеристика вентилятора представляет собой уравнение участка квадратичной параболы, рассчитываемой по (5.12).

Потребляемая мощность вентиляторного агрегата, работающего в составе регулируемого электропривода определяется выражением

$$P_6 = \frac{N_6}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{пр}}}, \quad (5.14)$$

где $\eta_{\text{дв}}$ — КПД приводного электродвигателя; $\eta_{\text{пр}}$ — КПД преобразовательного устройства.

КПД приводного электродвигателя практически не зависит от угловой скорости двигателя, поэтому в расчетах можно принимать номинальный КПД, приводимый в справочной литера-

туре. В качестве преобразовательных устройств, для вентиляторных агрегатов, могут использоваться преобразователи частоты или инверторы, ведомые сетью, с неуправляемыми выпрямителями в системе АВК. Для этих преобразовательных устройств в расчетах можно применять $\eta_{np} = 0,96$.

5.3. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ВЕНТИЛЯТОРНОГО АГРЕГАТА

5.3.1. Структурная схема вентиляторного агрегата с частотно-регулируемым электроприводом

Структурную схему вентиляторного агрегата условно можно представить в виде электромеханической и механической частей. К электромеханической части относится приводной электродвигатель, а к механической — вентилятор.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод имеет рабочую ветвь механических характеристик в зоне расположения рабочих точек (пересечение механических характеристик электропривода и вентилятора), обладающей практически линейным характером. Жесткость механических характеристик электропривода при изменении угловой скорости практически не меняется. Поэтому, для исследования энергетических свойств вентиляторного агрегата в статическом режиме, математическое описание частотно-регулируемого электропривода можно линеаризовать. Следовательно, асинхронный электродвигатель в системе частотного управления можно представить в упрощенном виде, как апериодическое звено второго порядка. Преобразователь частоты, как с инвертором напряжения, так и с инвертором тока имеет линейную внешнюю характеристику, поэтому его можно представить в виде апериодического звена первого порядка.

Структурную схему вентилятора представляем в виде функциональных блоков, реализовывающих различного вида зависимости по подаче, давлению, мощности и моменту статического сопротивления.

Структурная схема частотно-регулируемого вентиляторного агрегата представлена на рис. 5.2.

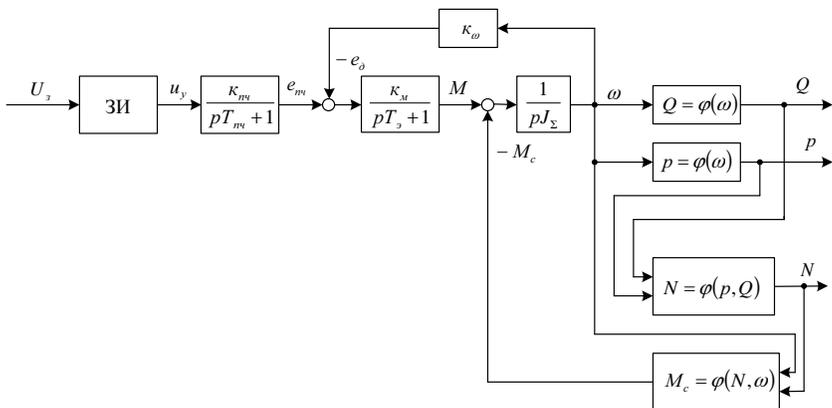


Рис. 5.2. Структурная схема частотно-регулируемого вентиляторного агрегата

Передаточные коэффициенты и постоянные времени структурной схемы электропривода определяются в соответствии с (4.5) ÷ (4.14). Задатчик интенсивности $ZИ$ на входе системы управления позволяет задавать ускорение при пуске вентиляторного агрегата.

Блоки структурной схемы вентилятора на рис. 5.2 представляют собой функциональные зависимости подачи $Q = \varphi(\omega)$ (5.7), давления $p = \varphi(\omega)$ (5.8), мощности $N = \varphi(Q, H)$ (5.10) и момента статического сопротивления $M_c = \varphi(N, \omega)$ (5.11) от угловой скорости вентилятора. Эти зависимости являются нелинейными и их анализ и синтез возможен только средствами имитационного моделирования. Задача упрощается вследствие того, что исследование энергетических процессов в вентиляторном агрегате необходимо проводить в установившихся (стационарных) режимах, являющихся частным случаем динамических процессов. Вследствие решения энергетической задачи при стационарных условиях, блоки структурной схемы выполняют функции алгебраического вычислителя, результаты вычисления которого используются для анализа электромеханических и энергетических процессов в вентиляторной установке.

5.3.2. Структурная схема вентиляторного агрегата с электроприводом по схеме асинхронно-вентильного каскада

Электропривод по схеме асинхронно-вентильного каскада является предпочтительным, по сравнению с частотно-регулируемым электроприводом, в связи с низкими стоимостными показателями при одинаковых регулировочных свойствах. Поэтому там, где есть возможность использования асинхронно-вентильного каскада, следует использовать эту систему электропривода. Как показывает опыт применения электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада в вентиляторных и насосных установках, капитальные затраты по сравнению с частотно-регулируемым электроприводом в 1,5—2 раза меньше, а срок окупаемости составляет до 2-х лет.

Линеаризованная структурная схема электропривода системы АВК состоит из последовательно соединенных инерционных и интегрирующего звеньев с внутренней обратной связью по цепи выпрямителя [12] (рис. 5.3).

Передаточную функцию инвертора, как и управляемого выпрямителя, можно представить аperiодическим звеном первого порядка

$$W_u(p) = \frac{\kappa_n}{T_n p + 1}.$$

Статический коэффициент передачи инвертора, ведомого сетью, определяется выражением

$$\kappa_n = \frac{\Delta E_u}{\Delta U_y} \cong \frac{U_{di0}}{U_{y.\max}}, \quad (5.15)$$

где $U_{di0} = \kappa_u \cdot U_{2\phi.\text{тр.ном}}$ — максимальная величина противо-ЭДС инвертора, зависящая от схемы выпрямительного устройства (инвертора) и вторичного фазного напряжения трансформатора, при $\beta = 0^\circ$ эл; $U_{y.\max}$ — максимальное напряжение сигнала управ-

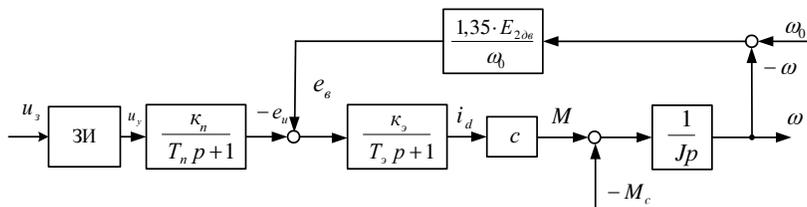


Рис. 5.3. Структурная схема электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада

ления, подаваемого на вход СИФУ инвертора; рекомендуемая величина, в соответствии с Государственным Стандартом Приборов (ГСП), $U_{y,max} = 10 \text{ В}$.

Постоянная времени T_n , характеризующая электромагнитную инерционность инвертора, выбирается в диапазоне от 0,005 с до 0,01 с.

Роторная цепь постоянного тока представлена апериодическим звеном первого порядка (рис. 5.3) с передаточной функцией

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}, \quad (5.16)$$

где k_3 — статический коэффициент передачи роторной цепи; T_3 — эквивалентная электромагнитная постоянная времени роторной цепи.

Статический коэффициент передачи роторной цепи определяется выражением

$$k_3 = \frac{1}{R_3}, \quad (5.17)$$

где R_3 — эквивалентное активное сопротивление роторной цепи.

Эквивалентное активное сопротивление роторной цепи для трехфазной мостовой схемы вычисляется из соотношения

$$R_{3s} = \left(2 \cdot r_1' + \frac{3 \cdot x_d}{2 \cdot \pi} \right) \cdot s + 2 \cdot (r_2 + r_{mp}) + r_{dp} + \frac{3 \cdot x_{mp}}{2 \cdot \pi}. \quad (5.18)$$

Формула (5.18) показывает, что система АВК, как объект регулирования, содержит нелинейность, обусловленную зависимостью эквивалентного активного сопротивления от скольжения. Поэтому, для линеаризации объекта управления при построении замкнутой системы регулирования, скольжение в (5.18) выбирается как средняя величина при заданном диапазоне регулирования. Например, если задан диапазон регулирования Д2:1, максимальное скольжение равно $s_{\max} = 0,5$, следовательно, выбирается среднее скольжение, которое равно $s_{\text{cp}} = 0,25$.

Электромагнитная постоянная времени роторной цепи определяется по формуле

$$T_{\sigma} = \frac{L_{\sigma}}{R_{\sigma}},$$

где L_{σ} — эквивалентная индуктивность роторной цепи.

Эквивалентная индуктивность роторной цепи определяется как сумма индуктивностей роторной цепи

$$L_{\sigma} = 2 \cdot L_{\sigma} + L_{\text{др.ном}} + 2 \cdot L_{\text{мп}}. \quad (5.20)$$

Передаточная функция звена момента (рис. 5.3) представлена пропорциональным звеном с коэффициентом передачи c . Для определения коэффициента c , рассмотрим зависимость электромагнитного момента M в системе АВК от выпрямленного тока I_d ротора

$$M = \frac{1,35}{\omega_0} (I_d \cdot E_{2\text{дв}} - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot I_d^2 \cdot x_p). \quad (5.21)$$

Определение момента по (5.21) означает, что при постоянном напряжении статора пренебрегают электромагнитными переходными процессами в АВК, как более быстрыми по сравнению с процессами, связанными с индуктивностью роторной цепи.

При построении систем управления нелинейной зависимостью между моментом и выпрямленным током пренебрегают,

а коэффициент пропорциональности между током роторной цепи и моментом определяют по средней для данного электропривода нагрузке $I_{d.cp}$ при среднем скольжении s_{cp} [12] по механической характеристике вентилятора или насоса

$$M = c \cdot I_d = \frac{1,35}{\omega_0} \cdot (E_{2\delta\delta} - \sqrt{2} \cdot I_{d.cp} \cdot x_p) I_d, \text{ т.е.}$$

$$c = \frac{1,35}{\omega_0} (E_{2\delta\delta} - \sqrt{2} \cdot I_{d.cp} \cdot x_p). \quad (5.22)$$

Передаточная функция звена скорости (рис. 5.3) представлена интегрирующим звеном

$$W_c(p) = \frac{1}{J_\Sigma p}, \quad (5.23)$$

где J_Σ — момент инерции вентиляторного агрегата, определяется как сумма моментов инерции электродвигателя и вентилятора. Момент инерции вентилятора составляет около 50 % от момента инерции электродвигателя, поэтому в расчетах можно принимать

$$J_\Sigma = 1,5 \cdot J_{\delta\delta}. \quad (5.24)$$

Внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя представлена безынерционным звеном с передаточной функцией

$$W_c(p) = \frac{1,35 \cdot E_{2\delta\delta}}{\omega_0}. \quad (5.25)$$

Для получения структурной схемы вентиляторного агрегата необходимо структурную схему электропривода на рис. 5.3 дополнить структурной схемой вентилятора, как это представлено на рис. 5.2 для частотно-регулируемого электропривода.

5.4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОПРИВОДА СИСТЕМЫ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА ДЛЯ ВЕНТИЛЯТОРА ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Вентилятор главного проветривания типа ВЦ-25М обеспечивает проветривание подземных горных выработок угольной шахты. Разветвленная сеть выработок и технология ведения горных работ требует поддержание режима работы вентиляторной установки с депрессией от 1600 Па до 3800 Па в течение года с учетом сезонных колебаний температуры атмосферного воздуха. Средневзвешенная депрессия в году по экспертной оценке составляет 2950 Па. Вентиляторный агрегат оснащен асинхронным высоковольтным электродвигателем с фазным ротором типа АКЗ-12-52-8.

Паспортные данные вентилятора главного проветривания типа ВЦ-25М:

- номинальная подача $Q_{ном} = 62 \text{ м}^3/\text{с}$;
- номинальное статическое давление $p_{ном} = 3870 \text{ Па}$;
- номинальный КПД $\eta_{в.ном} = 0,86$.

Паспортные данные электродвигателя типа АКЗ-12-52-8:

- номинальная мощность $P_{ном} = 320 \text{ кВт}$;
- номинальное напряжение статора $U_{1ном.дв} = 6000 \text{ В}$;
- номинальный ток статора $I_{1ном.дв} = 40,2 \text{ А}$;
- номинальная частота вращения $n_{ном} = 740 \text{ об/мин}$
($\omega_{ном} = 77,5 \text{ с}^{-1}$);
- номинальный КПД $\eta_{дв.ном} = 0,925$;
- число пар полюсов $p_n = 4$;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,83$;
- номинальное напряжение ротора $E_{2ном} = 595 \text{ В}$;
- номинальный ток ротора $I_{2дв.ном} = 335 \text{ А}$;
- перегрузочная способность двигателя $\lambda = M_{max} / M_{ном} = 2,1$;
- момент инерции ротора $J_{дв} = 47,8 \text{ кгм}^2$.

Для обеспечения режима работы вентиляторной установки с переменной депрессией принимается решение об оснащении агрегата регулируемым электроприводом системы «асинхронно-вентильный каскад».

5.4.1. Пример расчета параметров электропривода и выбора элементов силовой схемы

Решение

1. Для определения максимального скольжения вычисляется необходимая угловая скорость рабочего колеса при минимальной депрессии в соответствии с формулой (5.8)

$$\omega_{\min} = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{p_{\min}}{p_{\text{ном}}}} = 77,5 \cdot \sqrt{\frac{1600}{3870}} = 49,8 \text{ с}^{-1},$$

где $p_{\min} = 1600$ Па — минимальная депрессия в соответствии с исходными данными.

Максимальное скольжение двигателя при минимальной депрессии

$$s_{\max} = \frac{\omega_0 - \omega_{\min}}{\omega_0} = \frac{78,5 - 49,8}{78,5} = 0,3656.$$

2. Расчетная мощность вентильного трансформатора в соответствии с (3.62)

$$S_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot s_{\max}}{0,965 \cdot \eta_{\text{дв.ном}}} = \frac{320 \cdot 0,3656}{0,965 \cdot 0,925} = 131 \text{ кВА}.$$

3. Необходимое значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора для трехфазной мостовой схемы в соответствии с (3.63)

$$U_{2\text{ф.тр}} = 0,4545 \cdot E_{\text{е0}} \cdot s_{\max} = 0,4545 \cdot 803 \cdot 0,3656 = 133,4 \text{ В},$$

где $E_{\text{е0}} = 1,35 \cdot E_{2\text{ном}} = 1,35 \cdot 595 = 803$ В — среднее значение ЭДС выпрямителя при $s = 1$ для трехфазной мостовой схемы.

Линейное напряжение вторичной обмотки трансформатора

$$U_{2л.тр} = \sqrt{3} \cdot U_{2ф.тр} = 1,73 \cdot 133,4 = 231 \text{ В.}$$

По полученным данным выбирается трансформатор при выполнении условий:

$$S_{тр.ном} \geq S_{тр}; U_{2ном} \geq U_{2л.тр}.$$

Принимается к установке вентильный трансформатор ТСЗП-160/0,7 со следующими техническими характеристиками:

- номинальная мощность $S_{тр.ном} = 142 \text{ кВА}$;
- напряжение первичной обмотки $U_{1ном} = 380 \text{ В}$;
- напряжение вторичной обмотки $U_{2ном} = 315 \text{ В}$;
- потери холостого хода $\Delta P_{xx} = 795 \text{ Вт}$;
- потери короткого замыкания $\Delta P_{кз} = 2400 \text{ Вт}$;
- напряжение короткого замыкания $u_k \% = 4,5 \%$.

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора

$$I_{1ном} = \frac{S_{тр.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{142 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380} = 216 \text{ А.}$$

Номинальный ток вторичной обмотки трансформатора

$$I_{2ном} = \frac{S_{тр.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{2ном}} = \frac{142 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 315} = 260 \text{ А.}$$

Коэффициент трансформации

$$K_{тр} \approx \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{380}{315} = 1,206.$$

4. Активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке в соответствии с (3.66)

$$r_{тр} = \frac{\Delta P_{кз}}{3 \cdot I_{2ном}^2} = \frac{2400}{3 \cdot 260^2} = 0,0118 \text{ Ом.}$$

5. Индуктивное сопротивление трансформатора в соответствии с (3.67)

$$x_{mp} = \frac{u_k \% \cdot U_{1ном}}{100 \cdot I_{1ном} \cdot k_{mp}^2} = \frac{4,5 \cdot 380}{100 \cdot 216 \cdot 1,206^2} = 0,0544 \text{ Ом.}$$

6. Фазное напряжение статора асинхронного двигателя

$$U_{1ф.дв} = \frac{U_{1ном.дв}}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{1,73} = 3464 \text{ В.}$$

7. Коэффициент трансформации двигателя

$$k_{mp.дв} \approx \frac{U_{1ном.дв}}{E_{2ном}} = \frac{6000}{595} = 10,1.$$

8. Активное сопротивление фазы статорной обмотки асинхронного двигателя, приведенное к роторной обмотке в соответствии с (3.68)

$$r_1' = \frac{U_{1ф.дв} \cdot s_{ном}}{k_{mp.дв}^2 \cdot I_{1дв.ном}} = \frac{3464 \cdot 0,0133}{10,1^2 \cdot 40,2} = 0,0113 \text{ Ом,}$$

где $s_{ном} = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_0} = \frac{750 - 740}{750} = 0,0133$ — номинальное скольжение двигателя; $n_0 = 750$ об/мин — синхронная частота вращения двигателя.

9. Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{320 \cdot 10^3}{77,5} = 4129 \text{ Нм.}$$

10. Активное сопротивление фазы роторной обмотки в соответствии с (3.72)

$$r_2 = \frac{105 \cdot M_{ном} \cdot s_{ном}}{I_{2дв.ном}^2 \cdot p_n} = \frac{105 \cdot 4129 \cdot 0,0133}{335^2 \cdot 4} = 0,013 \text{ Ом}$$

11. Индуктивное сопротивление фазы двигателя, приведенное к роторной обмотке в соответствии с (3.73)

$$x_{\delta} = \frac{E_{2ном}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \lambda \cdot M_{ном}} = \frac{595^2}{2 \cdot 78,5 \cdot 2,1 \cdot 4129} = 0,26 \text{ Ом},$$

где $\omega_0 = \pi \cdot n_0 / 30 = 3,14 \cdot 750 / 30 = 78,5 \text{ с}^{-1}$ — синхронная угловая скорость двигателя.

12. Номинальный выпрямленный ток для трехфазной мостовой схемы

$$I_{d.ном} = \frac{I_{2об.ном}}{0,817} = \frac{335}{0,817} = 410 \text{ А}.$$

13. Ток через вентиль при трехфазной мостовой схеме выпрямления в соответствии с (3.74)

$$I_{ср.в} = \kappa_v \cdot I_{d.маx} = 0,33 \cdot I_{d.маx} = 0,33 \cdot 820 = 270,6 \text{ А},$$

где $I_{d.маx} = 2 \cdot I_{d.ном} = 2 \cdot 410 = 820 \text{ А}$ — максимальный пусковой ток, обычно принимается как двукратное значение номинального тока.

14. Максимальное обратное напряжение на вентиле при трехфазной мостовой схеме в соответствии с (3.75)

$$U_{обр} = \kappa_{обр} \cdot E_{в0} = 1,05 \cdot E_{в0} = 1,05 \cdot 803 = 843 \text{ В}.$$

15. Найденные значения $I_{ср.в}$ и $U_{обр}$ используются для выбора диодов выпрямителя и тиристорov инвертора.

Для выпрямителя принимаются диоды типа В320 с предельным током $I_{пр} = 320 \text{ А} > I_{ср.в} = 270,6 \text{ А}$. Для диода В320 принимается 13 класс по напряжению с рабочим напряжением $U_p = 870 \text{ В} > U_{обр} = 843 \text{ В}$.

Для инвертора принимаются тиристоры типа Т2-320 с предельным током $I_{пр} = 320 \text{ А} > I_{ср.в} = 270,6 \text{ А}$. Для тиристора Т2-320 принимается 11 класс по напряжению с рабочим напряжением $U_p = 880 \text{ В} > U_{обр} = 843 \text{ В}$.

16. Индуктивность двигателя

$$L_{\partial} = \frac{x_{\partial}}{314} = \frac{0,26}{314} = 0,000828 \text{ Гн.}$$

17. Индуктивность трансформатора

$$L_{mp} = \frac{x_{mp}}{314} = \frac{0,0544}{314} = 0,000173 \text{ Гн.}$$

18. При ограничении пульсаций тока величиной

$I_{nt} = 0,05 \cdot I_{d.ном} = 0,05 \cdot 410 = 20,5 \text{ А}$, необходимая индуктивность роторной цепи в соответствии с (3.76)

$$L = 9,44 \cdot 10^{-5} \frac{E_{a0}}{I_{nt}} = 9,44 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{803}{20,5} = 0,0037 \text{ Гн.}$$

19. Индуктивность сглаживающего дросселя в соответствии с (3.78)

$$L_{\partial p} = L - 2 \cdot (L_{\partial} + L_{mp}) = 0,0037 - \\ - 2 \cdot (0,000828 + 0,000173) = 0,0017 \text{ Гн (1,7 мГн).}$$

20. Сглаживающий дроссель в роторной цепи выбирается из условия:

$$L_{\partial p.ном} \geq L_{\partial p}; I_{\partial p.ном} \geq I_{d.ном}.$$

Принимается к установке дроссель типа ФРОС — 500/0,5 со следующими техническими характеристиками:

- номинальная сила тока $I_{\partial p.ном} = 500 \text{ А} > I_{d.ном} = 410 \text{ А}$;
- индуктивность $L_{\partial p.ном} = 3,25 \text{ мГ} > L_{\partial p} = 1,7 \text{ мГн}$;
- потери в обмотке дросселя $\Delta P_{\partial p} = 900 \text{ Вт}$.

21. Величина активного сопротивления дросселя в соответствии с (3.79)

$$r_{\partial p} = \frac{\Delta P_{\partial p}}{I_{\partial p.ном}^2} = \frac{900}{500^2} = 0,0036 \text{ Ом.}$$

5.4.2. Пример расчета статических характеристик электропривода и вентилятора

Пример расчета выполнен для вентиляторного агрегата с вентилятором ВЦ-25М и двигателем АК3-12-52-8. В расчете используются параметры электропривода, полученные расчетным путем в п.5.4.1.

Расчет

1. Электромеханические и механические характеристики электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада в соответствии с (3.86) и (3.87) имеют аналитическое выражение:

$$I_d = \frac{E_{\epsilon 0}}{R_{\gamma s}} \cdot (s - s_0);$$

$$M = \frac{E_{\epsilon 0}^2 \cdot R_{\gamma s 0}}{\omega_0 \cdot R_{\gamma s}^2} \cdot (s - s_0).$$

2. Эквивалентные сопротивления, приведенные к роторной цепи выпрямленного тока, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} R_{\gamma s} &= \left(2 \cdot r_1' + \frac{3 \cdot x_d}{2 \cdot \pi} \right) \cdot s + 2 \cdot (r_2 + r_{mp}) + r_{op} + \\ &+ \frac{3 \cdot x_{mp}}{2 \cdot \pi} = \left(2 \cdot 0,0113 + \frac{3 \cdot 0,26}{2 \cdot 3,14} \right) \cdot s + 2 \cdot (0,013 + 0,0118) + \\ &+ 0,0036 + \frac{3 \cdot 0,0544}{2 \cdot 3,14} = 0,1468 \cdot s + 0,0792; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\gamma s 0} &= 2 \cdot r_1' \cdot s + \frac{3 \cdot x_d}{2 \cdot \pi} \cdot s_0 + 2 \cdot (r_2 + r_{mp}) + r_{op} + \frac{3 \cdot x_{mp}}{2 \cdot \pi} = \\ &= 2 \cdot 0,0113 \cdot s + \frac{3 \cdot 0,26}{2 \cdot 3,14} \cdot s_0 + 2 \cdot (0,013 + 0,0118) + \\ &+ 0,0036 + \frac{3 \cdot 0,0544}{2 \cdot 3,14} = 0,0226 \cdot s + 0,1242 \cdot s_0 + 0,0792. \end{aligned}$$

Как видно из полученных выражений, эквивалентные сопротивления зависят от скольжения.

3. Составляется таблица расчета электромеханических и механических характеристик с учетом изменения эквивалентных сопротивлений в зависимости от скольжения. В расчете необходимо учесть, что предельное значение момента нагрузки для I -й области построения механических характеристик в соответствии с (3.89) не должен превышать $0,75 \cdot M_{\max}$, тогда

$$M_{np} = 0,955 \cdot 0,75 \cdot \frac{E_{2ном}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot x_{\partial}} = 0,955 \cdot 0,75 \cdot \frac{595^2}{2 \cdot 78,5 \cdot 0,26} = 6212 \text{ Нм.}$$

В таблице расчета характеристик задаются несколькими значениями угла опережения β_u в пределах от $s = 0$ до $s = s_{\max}$. Для заданного угла опережения β_u определяется величина s_0 в соответствии с (3.85) и задаются рядом значений скольжения, наибольшая величина которого должна соответствовать M_{np} . Переход от скольжения к угловой скорости осуществляется по формуле $\omega = \omega_0 (1 - s)$.

4. Для расчета механических характеристик вентилятора определяется номинальный момент вентилятора в соответствии с (5.11)

$$M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot p_{ном}}{\omega_{ном} \cdot \eta_{в.ном}} = \frac{62 \cdot 3870}{77,5 \cdot 0,86} = 3600 \text{ Нм.}$$

Момент трения принимаем в размере 5 % от номинального момента вентилятора в соответствии с (5.13)

$$M_m = 0,05 \cdot M_{в.ном} = 0,05 \cdot 3600 = 180 \text{ Нм.}$$

Расчет механической характеристики вентилятора производится в соответствии с (5.12)

$$M_c = (M_{в.ном} - M_m) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M_m = (3600 - 180) \cdot \left(\frac{\omega}{77,5} \right)^2 + 180, \text{ Нм.}$$

5. При графическом представлении механической характеристики электропривода совместно с ней представляется механическая характеристика механизма, в данном случае — механическая характеристика вентилятора. Расчетные данные механических характеристик вентиляторного агрегата представлены в табл. 5.3 и 5.4. Для расчета пусковых резисторов графоаналитическим методом семейство механических характеристик необходимо дополнить естественной механической характеристикой двигателя. Для этого достаточно построить отрезок прямой с координатами $\omega = \omega_0 = 78,5 \text{ с}^{-1}$ и $M = M_{ном} = 4129 \text{ Нм}$.

Таблица 5.3

Расчетные данные статических характеристик электропривода по схеме АВК

β_u , град	s_0	s	$R_{\text{эс}}$, Ом	$R_{\text{эс0}}$, Ом	ω , с^{-1}	I_d , А	M , Нм
90	0	0	0,0792	0,0792	78,5	0	0
		0,019	0,082	0,0796	77,0	186	1848
		0,038	0,0848	0,0801	75,5	360	3477
		0,057	0,0876	0,0805	74,0	523	4912
		0,0764	0,0904	0,0809	72,5	679	6212
80	0,092	0,092	0,0927	0,0927	71,3	0	0
		0,114	0,0959	0,0932	69,6	184	1831
		0,136	0,0992	0,0937	67,8	356	3441
		0,158	0,1024	0,0942	66,1	518	4870
		0,1814	0,1058	0,0947	64,3	679	6212
70	0,181	0,181	0,1058	0,1058	64,3	0	0
		0,206	0,1094	0,1063	62,3	184	1824
		0,231	0,1131	0,1069	60,4	355	3432
		0,256	0,1168	0,1075	58,4	516	4854
		0,2829	0,1207	0,1081	56,3	678	6211
60	0,265	0,265	0,1181	0,1181	57,7	0	0
		0,293	0,1222	0,1187	55,5	184	1824
		0,322	0,1265	0,1194	53,2	362	3493
		0,350	0,1306	0,1200	51,0	523	4912
		0,3789	0,1348	0,1207	48,8	678	6212
49	0,347	0,347	0,1301	0,1301	51,3	0	0
		0,378	0,1347	0,1308	48,8	185	1836
		0,410	0,1394	0,1316	46,3	363	3504
		0,442	0,1441	0,1323	43,8	529	4972
		0,4725	0,1486	0,1330	41,4	678	6209

Таблица 5.4

Расчетные данные механической характеристики вентилятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	12,5	25	37,5	50	62,5	75	87,5
$M_c, \text{Нм}$	180	269	536	981	1604	2404	3383	4540

На рис. 5.4 и 5.5 представлены электромеханические и механические характеристики электропривода по схеме АВК вентилятора ВЦ-25М с двигателем АКЗ-12-52-8. На механических характеристиках приняты обозначения: *EX* — естественная механическая характеристика двигателя; *МХВ* — механическая характеристика вентилятора.

6. Разгон двигателя до рабочего диапазона регулирования угловой скорости посредством АВК осуществляется с помощью пусковых резисторов. Особенность механических характеристик насосов и вентиляторов позволяет осуществлять разгон до рабочего диапазона в одну или две ступени с помощью пусковых резисторов. Для этого используется методика, приведенная в [10].

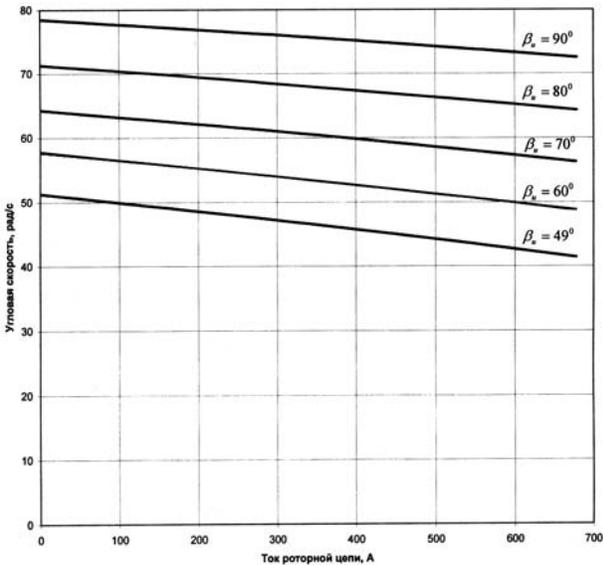


Рис. 5.4. Электромеханические характеристики электропривода по схеме АВК

Строится линия переключающих моментов. Для этого вычисляются значения переключающих моментов:

- для ω_0 $M_2' = 1,1 \cdot M_{ном} = 1,1 \cdot 4129 = 4542$ Нм;
- для $\omega = 0$ $M_2'' = 1,1 \cdot M_m = 1,1 \cdot 180 = 198$ Нм.

Откладываем эти моменты на перпендикулярах, восстановленные из точек, соответствующие $\omega = \omega_0$ и $\omega = 0$. Концы этих отрезков соединяем прямой « $M_2' - M_2''$ », которая и будет линией переключающих моментов.

Строится линия пиковых моментов. Согласно рекомендациям [8] пиковые моменты не должны превышать 0,8—0,85 максимального момента двигателя. Значение пикового момента при ω_0 принимаем в соответствии с этими рекомендациями

$$M_1' = 0,8 \cdot M_{max} = 0,8 \cdot 8671 = 6937 \text{ Нм,}$$

где $M_{max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,1 \cdot 4129 = 8671$ Нм — максимальный момент двигателя.

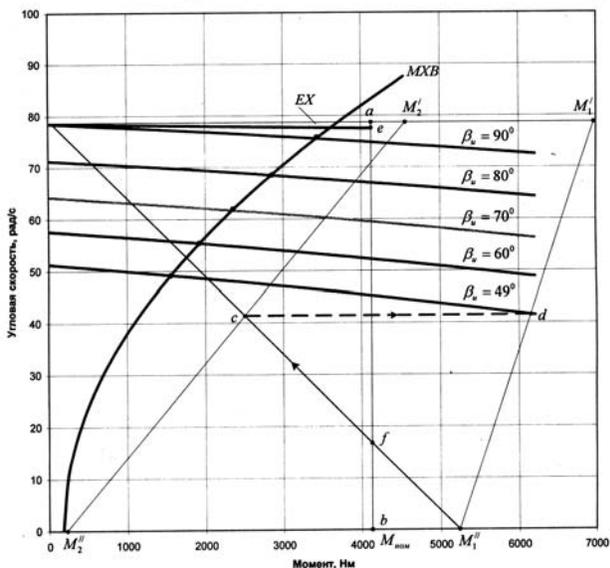


Рис. 5.5. Механические характеристики электропривода по схеме АВК

Вторая точка линии пикового момента при $\omega = 0$ должна выбираться из следующих соображений:

- M_1'' должна быть выбрана в диапазоне от $1,2M_{ном}$ до $0,8M_{max}$;
- линия пикового момента должна пересекать искусственную механическую характеристику электропривода, полученную для s_{max} (для нашего примера — механическая характеристика, построенная при $\beta_u = 49^\circ$);
- необходимо, чтобы точка пересечения линии пикового момента соответствовала моменту переключения ступени (точка d в рассматриваемом примере).

Выполнение этих условий позволило получить $M_1'' = 5230$ Нм. Откладываем значения моментов на перпендикулярах, восстановленные из точек, соответствующие $\omega = \omega_0$ и $\omega = 0$. Концы этих отрезков соединяем прямой « $M_1' - M_1''$ », которая и будет линией пиковых моментов.

Соединяем точку, соответствующую ω_0 с точкой M_2'' . Эта прямая будет искусственной механической характеристикой двигателя на первой пусковой ступени резисторов. Пересечение этой характеристики с линией переключающих моментов (точка c) определяет значения угловой скорости и момента, соответствующие переключению с первой ступени на вторую. Проводим через эту точку перпендикуляр до пересечения с линией пиковых моментов (точка d). Далее процесс повторяется. Для рассматриваемого примера оказалось, что достаточно одной ступени, так как точка d оказалась на пересечении линии пикового момента и искусственной характеристики электропривода по схеме АВК.

7. Определяется номинальное сопротивление роторной цепи двигателя

$$R_{ном} = \frac{E_{2ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{2дв.ном}} = \frac{595}{1,73 \cdot 335} = 1,026 \text{ Ом.}$$

Этому сопротивлению соответствует отрезок ab на рис. 5.5, который получен путем восстановления перпендикуляра из точки номинального момента двигателя $M_{ном}$, равный 108 мм (построение следует производить на миллиметровой бумаге). Тогда масштаб сопротивления для графика:

$$r = \frac{R_{ном}}{ab} = \frac{1,026}{108} = 0,0095 \text{ Ом/мм.}$$

8. Вычисляется значение сопротивления ступени пускового резистора:

$$R_{пуск} = [ef] \cdot r = 83 \cdot 0,0095 = 0,7885 \text{ Ом,}$$

где $[ef] = 83$ мм — отрезок на рис. 5.5, определяется графическим путем.

Таким образом, при работе системы вначале осуществляется пуск двигателя на пусковых резисторах. После того, как двигатель наберет требуемую угловую скорость до рабочего диапазона АВК, контакторы станции управления отключают пусковые резисторы и подключают систему АВК к роторной цепи электродвигателя. Далее регулирование угловой скорости осуществляется путем изменения противо-ЭДС инвертора.

5.4.3. Пример расчета параметров структурной схемы электропривода вентиляторной установки

Рассчитываются параметры структурной схемы электропривода по схеме АВК, представленной на рис. 5.3. В расчете используются параметры электропривода, полученные расчетным путем в п.п. 5.4.1, 5.4.2.

Расчет

1. Максимальная величина противо-ЭДС инвертора

$$U_{di0} = 1,35 \cdot U_{2тр.ном} = 1,35 \cdot 315 = 425,25 \text{ В.}$$

2. Статический коэффициент передачи инвертора в соответствии с (5.15)

$$\kappa_n = \frac{U_{di0}}{U_{y.\max}} = \frac{425,25}{10} = 42,53.$$

3. Постоянная времени, характеризующая электромагнитную инерционность инвертора, выбирается в диапазоне от 0,005 с до 0,01 с. Принимается $T_n = 0,01$ с.

4. Эквивалентное активное сопротивление роторной цепи в соответствии с (5.18)

$$\begin{aligned} R_3 &= \left(2 \cdot r_1' + \frac{3 \cdot x_\delta}{2 \cdot \pi} \right) \cdot s_{cp} + 2 \cdot (r_2 + r_{mp}) + \\ &+ r_{dp} + \frac{3 \cdot x_{mp}}{2 \cdot \pi} = \left(2 \cdot 0,0113 + \frac{3 \cdot 0,26}{2 \cdot 3,14} \right) \cdot 0,1828 + \\ &+ 2 \cdot (0,013 + 0,0118) + 0,0036 + \frac{3 \cdot 0,0544}{2 \cdot 3,14} = 0,106 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

где $s_{cp} = s_{\max} / 2 = 0,3656 / 2 = 0,1828$ — среднее скольжение в заданном диапазоне регулирования скорости.

5. Статический коэффициент передачи роторной цепи в соответствии с (5.17)

$$\kappa_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{0,106} = 9,434 \text{ А/В}.$$

6. Эквивалентная индуктивность роторной цепи в соответствии с (5.20)

$$\begin{aligned} L_3 &= 2 \cdot L_\delta + L_{dp,\text{ном}} + 2 \cdot L_{mp} = 2 \cdot 0,000828 + \\ &+ 0,00325 + 2 \cdot 0,000173 = 0,005252 \text{ Гн}. \end{aligned}$$

7. Электромагнитная постоянная времени роторной цепи в соответствии с (5.19)

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{0,005252}{0,106} = 0,05 \text{ с}.$$

8. Коэффициент пропорциональности между током роторной цепи и моментом определяется по (5.22). Упрощенно коэффициент пропорциональности можно определить по данным табл. 5.3 и рис. 5.5. Графические зависимости рис. 5.5 показывают, что момент нагрузки в пределах диапазона регулирования изменяется от 1500 Нм до 3400 Нм. По данным табл. 5.3 видно, что этим моментам соответствуют токи примерно от 160 А до 350 А. В этих пределах коэффициент пропорциональности в среднем составляет

$$c = \frac{M}{I_d} = 9,8 \text{ Нм/А.}$$

9. Момент инерции вентиляторного агрегата в соответствии с (5.24)

$$J_{\Sigma} = 1,5 \cdot J_{\text{дв}} = 1,5 \cdot 47,8 = 71,7 \text{ кгм}^2.$$

10. Коэффициент передачи внутренней обратной связи по ЭДС двигателя в соответствии с (5.25)

$$k_e = \frac{1,35 \cdot E_{2\text{дв}}}{\omega_0} = \frac{1,35 \cdot 595}{78,5} = 10,23 \text{ Вс.}$$

5.4.4. Расчет потребления электроэнергии вентиляторным агрегатом

Исходные данные для расчета потребления электроэнергии:

- средняя депрессия за год по экспертной оценке
 $p_{cp} = 2950 \text{ Па};$
- время работы вентилятора главного проветривания
 $T_p = 8760 \text{ час/год.}$

Расчет

1. В соответствии с (5.8) определяется средняя угловая скорость насосного агрегата при средней депрессии

$$\omega_{cp} = \omega_{ном} \cdot \sqrt{\frac{P_{cp}}{P_{ном}}} = 77,5 \cdot \sqrt{\frac{2950}{3870}} = 67,7 \text{ с}^{-1}.$$

2. Определяется средняя подача вентилятора для создания средней депрессии в соответствии с (5.7)

$$Q_{cp} = Q_{ном} \cdot \frac{\omega_{cp}}{\omega_{ном}} = 62 \cdot \frac{67,7}{77,5} = 54,16 \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Определяется КПД вентилятора со средней угловой скоростью в соответствии с (5.9)

$$\eta_6 = 1 - \frac{1 - \eta_{6,ном}}{\left(\frac{\omega_{cp}}{\omega_{ном}}\right)^{0,36}} = 1 - \frac{1 - 0,86}{\left(\frac{67,7}{77,5}\right)^{0,36}} = 0,853.$$

4. Определяется мощность, потребляемая вентиляторным агрегатом при регулировании режимов работы в соответствии с (5.10) и (5.14)

$$P_{cp} = \frac{Q_{cp} \cdot P_{cp}}{1000 \cdot \eta_6 \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{пр}} = \frac{54,16 \cdot 2950}{1000 \cdot 0,853 \cdot 0,925 \cdot 0,96} = 211 \text{ кВт}.$$

5. Определяется мощность, потребляемая вентиляторным агрегатом при нерегулируемом варианте

$$P_{ном} = \frac{Q_{ном} \cdot P_{ном}}{1000 \cdot \eta_{6,ном} \cdot \eta_{дв}} = \frac{62 \cdot 3870}{1000 \cdot 0,86 \cdot 0,925} = 301,6 \text{ кВт}.$$

6. Годовая экономия электроэнергии

$$\Delta W_{эл} = (P_{ном} - P_{cp}) \cdot T_p = (301,6 - 211) \cdot 8760 = 793656 \text{ кВт} \cdot \text{час}/\text{год}.$$

7. Годовая выработка воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p \cdot 3600 = 62 \cdot 8760 \cdot 3600 = 1955232 \text{ тыс. м}^3/\text{год};$$

- при регулируемом варианте

$$Q_2 = Q_{cp} \cdot T_p \cdot 3600 = 54,16 \cdot 8760 \cdot 3600 = 1707990 \text{ тыс. м}^3/\text{год.}$$

8. Удельное потребление электроэнергии на выработку воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$q_1 = \frac{P_{ном} \cdot T_p}{Q_1} = \frac{301,6 \cdot 8760}{1955232} = 1,35 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3;$$

- при регулируемом варианте

$$q_2 = \frac{P_{cp} \cdot T_p}{Q_2} = \frac{211 \cdot 8760}{1707990} = 1,08 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3.$$

Рассмотренные методики и примеры расчета электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада могут быть использованы не только для вентиляторных установок, но и для насосных установок с соответствующими исходными данными.

5.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРА МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Вентилятор местного проветривания типа ВМ-12М обеспечивает проветривание тупиковой горной выработки. Особенности технологии ведения горных работ требуют поддержание режима работы вентиляторной установки с цикличностью по четыре часа на протяжении суток. Требуемое давление получено на основании хронометража в течение месяца и усреднено для одних суток. Данные хронометража представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

Требуемое давление вентиляторной установки местного проветривания в течение суток

Время суток, час	0—4	4—8	8—12	12—16	16—20	20—24
Полное давление, Па	1500	900	2200	2300	1800	1600

Время работы вентилятора в год составляет 7500 час/год.

Вентиляторный агрегат оснащен асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором типа ВРМ280S4.

Паспортные данные вентилятора местного проветривания типа ВМ-12М:

- номинальная подача $Q_{ном} = 20 \text{ м}^3/\text{с}$;
- номинальное полное давление $p_{ном} = 2500 \text{ Па}$;
- номинальный КПД $\eta_{в.ном} = 0,76$.

Паспортные данные электродвигателя типа ВРМ280S4:

- номинальная мощность $P_{ном} = 110 \text{ кВт}$;
- номинальное напряжение статора $U_{1ном} = 380/660 \text{ В}$;
- номинальная частота вращения $n_{ном} = 1480 \text{ об/мин}$
($s_{ном} = 0,0133$);
- номинальный КПД $\eta_{дв.ном} = 0,935$;
- число пар полюсов $p_n = 2$;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,89$;
- перегрузочная способность двигателя
 $\lambda = M_{max} / M_{ном} = 2,8$;
- момент инерции ротора $J_{дв} = 2,675 \text{ кгм}^2$.

Для обеспечения режима работы вентиляторной установки с переменным давлением принимается решение об оснащении вентиляторного агрегата частотно-регулируемым электроприводом. Для питания приводного электродвигателя вентилятора местного проветривания принимается преобразователь частоты типа АТВ61НС11N4 фирмы «Шнейдер электрик» мощностью 110 кВт.

5.5.1. Пример расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя

При расчете необходимо обратить особое внимание на то, что схема замещения на рис. 3.5 приведена для фазы асинхронного двигателя, поэтому расчетные значения токов и напряжений являются фазными.

Решение

1. Номинальный ток фазы статора

$$I_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{3 \cdot U_{ном.ф} \cdot \cos \varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}} = \frac{110 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,935} = 116 \text{ А.}$$

2. Активное сопротивление фазы статора в соответствии с (3.17)

$$r_1 = \frac{U_{ном.ф} \cdot s_{ном}}{I_{ном}} = \frac{380 \cdot 0,0133}{116} = 0,0437 \text{ Ом,}$$

3. Номинальная угловая скорость магнитного поля статора двигателя

$$\omega_{1ном} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}.$$

4. Номинальная угловая скорость вала двигателя

$$\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30} = \frac{3,14 \cdot 1480}{30} = 154,9 \text{ с}^{-1}.$$

5. Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = \frac{P_{ном} \cdot 10^3}{\omega_{ном}} = \frac{110 \cdot 10^3}{154,9} = 710 \text{ Нм.}$$

6. Максимальный момент двигателя

$$M_{max} = \lambda \cdot M_{ном} = 2,8 \cdot 710 = 1988 \text{ Нм.}$$

7. Индуктивное сопротивление короткого замыкания в соответствии с (3.26)

$$\begin{aligned} x_K &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{max}} - r_1 \right)^2 - r_1^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 157 \cdot 1988} - 0,0437 \right)^2 - 0,0437^2} = 0,6488 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

8. Индуктивные сопротивления статора и приведенное сопротивление в соответствии с (3.27)

$$x_1 \approx x_2' = \frac{x_k}{2} = \frac{0,6488}{2} = 0,3244 \text{ Ом.}$$

9. Приведенное к обмотке статора активное сопротивление фазы ротора в соответствии с (3.28)

$$\begin{aligned} r_2' &= s_{ном} \cdot \left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{ном}} - r_1 \right) + \\ &+ s_{ном} \cdot \sqrt{\left(\frac{3 \cdot U_{ном}^2}{2 \cdot \omega_{1ном} \cdot M_{ном}} - r_1 \right)^2 - (r_1^2 + x_2^2)} = \\ &= 0,0133 \cdot \left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 157 \cdot 710} - 0,0437 \right) + 0,0133 \times \\ &\times \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 380^2}{2 \cdot 157 \cdot 710} - 0,0437 \right)^2 - (0,0437^2 + 0,6488^2)} = 0,0491 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

10. Номинальный приведенный ток ротора в соответствии с (3.30)

$$I_{2ном}' = \sqrt{\frac{M_{ном} \cdot \omega_{1ном} \cdot s_{ном}}{3 \cdot r_2'}} = \sqrt{\frac{710 \cdot 157 \cdot 0,0133}{3 \cdot 0,0491}} = 100,4 \text{ А.}$$

11. Номинальный коэффициент мощности роторной цепи

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{2ном} &= \frac{r_2'}{\sqrt{r_2'^2 + (x_2' \cdot s_{ном})^2}} = \\ &= \frac{0,0491}{\sqrt{0,0491^2 + (0,3244 \cdot 0,0133)^2}} = 0,9961, \end{aligned}$$

$$\text{тогда } \sin \varphi_{2ном} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{2ном}} = \sqrt{1 - 0,9961^2} = 0,0877.$$

12. Номинальный ток намагничивающей цепи в соответствии с (3.29)

$$I_{\mu,ном} = \sqrt{(I_{2ном}^I \cdot \sin \varphi_{2ном})^2 + I_{1ном}^2 - I_{2ном}^{I/2} - I_{2ном}^I \cdot \sin \varphi_{2ном}} =$$

$$= \sqrt{(100,4 \cdot 0,0877)^2 + 116^2 - 100,4^2 - 100,4 \cdot 0,0877} = 50 \text{ А.}$$

13. Номинальная ЭДС фазы статора в соответствии с (3.31)

$$E_{1ном} = U_{ном,ф} \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot p_n) =$$

$$= 380 \cdot (0,985 - 0,00375 \cdot 2) = 371,5 \text{ В.}$$

14. Индуктивное сопротивление намагничивающей цепи в соответствии с (3.32)

$$x_0 = \frac{E_{1ном}}{I_{\muном}} = \frac{371,5}{50} = 7,43 \text{ Ом.}$$

15. Коэффициенты рассеяния обмоток статора и ротора в соответствии с (3.33)

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{x_1}{x_0} = \frac{0,3244}{7,43} = 0,04366.$$

16. Общий коэффициент рассеяния

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2 = 0,04366 + 0,04366 +$$

$$+ 0,04366 \cdot 0,04366 = 0,08923.$$

17. В соответствии с (3.34) определяются коэффициенты:

$$b = \tau_1 \cdot (1 + \tau_2) = 0,04366 \cdot (1 + 0,04366) = 0,04557;$$

$$c = x_0 \cdot \tau = 7,43 \cdot 0,08923 = 0,663 \text{ Ом;}$$

$$d = \frac{r_1}{x_0} = \frac{0,0437}{7,43} = 0,00588;$$

$$e = 1 + \tau_1 = 1 + 0,04366 = 1,04366.$$

5.5.2. Пример расчета параметров структурной схемы частотно-регулируемого электропривода

Рассчитываются параметры структурной схемы, представленной на рис. 4.6.

Решение

1. Статический коэффициент передачи преобразователя частоты в соответствии с (4.5)

$$K_{пч} = \frac{E_{пч}}{U_{у.ном}} = \frac{387}{10} = 38,7,$$

$$\text{где } E_{пч} = \frac{U_{ном}}{0,985 - 0,00375 \cdot p_n} = \frac{380}{0,985 - 0,00375 \cdot 2} = 387 \text{ В};$$

$U_{у.ном} = 10 \text{ В}$ — номинальное напряжение управления в соответствии с Государственным Стандартом Приборов (ГСП).

2. Электромагнитная постоянная времени преобразователя может быть принята в пределах $T_{пч} = (0,003 \div 0,005) \text{ с}$. Принимается $T_{пч} = 0,005 \text{ с}$.

3. Коэффициент внутренней обратной связи по скорости в соответствии с (4.6)

$$K_{\omega} = \frac{I_{\mu.ном} \cdot (x_0 + x_1)}{\omega_{1ном}} = \frac{50 \cdot (7,43 + 0,3244)}{157} = 2,47 \text{ В}\cdot\text{с}.$$

4. Коэффициент передачи звена момента в соответствии с (4.7)

$$K_M = \frac{M_{ном}}{K_{\omega} \cdot (\omega_{1ном} - \omega_{ном})} = \frac{710}{2,47 \cdot (157 - 154,9)} = 136,88 \text{ Нм/В}.$$

5. Индуктивность рассеяния обмоток статора и ротора в соответствии с (4.9)

$$L_1 = L_2' = \frac{x_1}{314} = \frac{x_2'}{314} = \frac{0,3244}{314} = 0,00103 \text{ Гн}.$$

6. Индуктивность намагничивания в соответствии с (4.10)

$$L_{\mu} = \frac{x_0}{314} = \frac{7,43}{314} = 0,02366 \text{ Гн.}$$

7. Полная индуктивность обмоток статора и ротора в соответствии с (4.11)

$$L_s = L_r = L_{\mu} + L_1 = L_{\mu} + L_2' = 0,02366 + 0,00103 = 0,02469 \text{ Гн.}$$

8. Эквивалентная индуктивность частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.12)

$$L_s = L_{op} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(L_s - \frac{L_{\mu}^2}{L_r} \right) = 1,6 \cdot 10^{-3} + \\ + \frac{3}{2} \cdot 1,103^2 \cdot \left(0,02469 - \frac{0,02366^2}{0,02469} \right) = 0,0053 \text{ Гн,}$$

где $L_{op} = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Гн — индуктивность дросселя в цепи постоянного тока преобразователя частоты ATV61HD75N4; $\kappa_i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$ — модуль коммутационной функции.

9. Эквивалентное активное сопротивление частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.13)

$$R_s = r_{op} + \frac{3}{2} \cdot \kappa_i^2 \cdot \left(r_1 + r_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_r} \right) = 0,0036 + \frac{3}{2} \cdot 1,103^2 \times \\ \times \left(0,0437 + 0,0491 \cdot \frac{0,02366^2}{0,02469^2} \right) = 0,1656 \text{ Ом,}$$

где $r_{op} = 0,0036$ Ом — активное сопротивление дросселя в цепи постоянного тока преобразователя частоты ATV61HD75N4.

10. Электромагнитная постоянная времени частотно-регулируемого электропривода в соответствии с (4.8)

$$T_3 = \frac{L_3}{R_3} = \frac{0,0053}{0,1656} = 0,032 \text{ с.}$$

11. Момент инерции вентиляторного агрегата в соответствии с (4.24)

$$J_{\Sigma} = 1,5 \cdot J_{\text{дв}} = 1,5 \cdot 2,675 = 4,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

5.5.3. Пример расчета статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода вентиляторного агрегата

В примере рассматривается электродвигатель ВРМ280S4 мощностью 110 кВт для вентилятора местного проветривания ВМ-12М. Вентиляторный агрегат оснащен преобразователем частоты с автономным инвертором напряжения. Для вентиляторного характера статической нагрузки в расчетах используется закон частотного регулирования $E_1 / f_1^2 = \text{const}$.

Решение

1. Электромеханические и механические характеристики частотно-регулируемого электропривода зависят от относительной частоты тока ν и параметра абсолютного скольжения β . Так как вентиляторные установки могут работать с подачами выше номинального значения до $Q_{\text{max}} = 1,5 \cdot Q_{\text{ном}}$, то принимаем верхний предел регулирования частоты 75 Гц, т.е. $\nu = 1,5$. Поэтому для расчета семейства статических характеристик задаемся $\nu = 0,25 \div 1,5$.

2. Для расчета статических характеристик необходимо задаваться параметром абсолютного скольжения. Расчет производится для рабочей части механической характеристики. Поэтому задаемся $\beta = 0 \div \beta_{\text{кр}}$, при этом необходимо задавать $\beta_{\text{ном}} = s_{\text{ном}} = 0,0133$ для контроля номинальных значений тока и напряжения статора в процессе вычисления, а также ряд промежуточных значений параметра абсолютного скольжения.

3. Параметр критического абсолютного скольжения в соответствии с (3.53)

$$\beta_{кр} = r_2' \cdot \sqrt{\frac{d^2 + e^2 v^2}{b^2 + c^2 v^2}} = 0,0491 \cdot \sqrt{\frac{0,00588^2 + 1,04366^2 \cdot v^2}{0,04557^2 + 0,663^2 \cdot v^2}}.$$

Задаемся относительной величиной частоты тока v и вычисленные значения параметра критического абсолютного скольжения $\beta_{кр}$ приводим в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Зависимость параметра критического абсолютного скольжения от относительной частоты тока

v	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
$\beta_{кр}$	0,07454	0,07658	0,07697	0,07711	0,07717	0,07721

4. В соответствии с (3.35) и (3.37) определяются коэффициенты:

$$\begin{aligned} A(v, \beta) &= (b^2 + c^2 \cdot v^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot r_1' \cdot r_2' \cdot v \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot v^2) \cdot (r_2')^2 = \\ &= (0,04557^2 + 0,663^2 \cdot v^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot 0,0437 \cdot 0,0491 \cdot v \cdot \beta + \\ &+ (0,00588^2 + 1,04366^2 \cdot v^2) \cdot 0,0491^2; \end{aligned}$$

$$C(\beta) = (r_2' / x_0)^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2 = (0,0491 / 7,43)^2 + 1,04366^2 \cdot \beta^2.$$

Задаемся значением параметра абсолютного скольжения для разных частот тока и вычисленные значения коэффициентов приводим в табл. 5.7.

5. Расчет электромеханических и механических характеристик для частот 50 Гц и меньше ($v \leq 1,0$) ведется в соответствии с (3.49) и (3.50)

$$I_1 = \frac{E_{\text{люм}} \cdot v^2 \cdot \sqrt{C(\beta)}}{\sqrt{A(v, \beta)} - r_1' \cdot \sqrt{C(\beta)}} = \frac{371,5 \cdot v^2 \cdot \sqrt{C(\beta)}}{\sqrt{A(v, \beta)} - 0,0437 \cdot \sqrt{C(\beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot E_{1ном}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{r_2' \cdot v^4 \cdot \beta}{\left[\sqrt{A(v, \beta)} - r_1 \cdot \sqrt{C(\beta)} \right]^2} =$$

$$= \frac{129,485 \cdot v^4 \cdot \beta}{\left[\sqrt{A(v, \beta)} - 0,0437 \cdot \sqrt{C(\beta)} \right]^2}.$$

Расчет электромеханических и механических характеристик для частот свыше 50 Гц ($v > 1,0$) ведется в соответствии с (3.51) и (3.52),

$$I_1 = U_{1ном} \sqrt{\frac{v \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}} = 380 \cdot \sqrt{\frac{v \cdot C(\beta)}{A(v, \beta)}};$$

$$M = \frac{3 \cdot U_{1ном}^2}{\omega_{1ном}} \cdot \frac{r_2' \cdot v \cdot \beta}{A(v, \beta)} = \frac{135,478 \cdot v \cdot \beta}{A(v, \beta)}.$$

Для расчета задаемся такими же значениями параметра абсолютного скольжения, как и в табл. 5.7, используя данные этой таблицы по величинам $C(\beta)$ и $A(v, \beta)$. Переход от параметра абсолютного скольжения к угловой скорости производится в соответствии с (3.54) $\omega = \omega_{1ном} \cdot (v - \beta) = 157 \cdot (v - \beta)$. Данные расчетов приведены в табл. 5.8.

б. Проверка выполненных вычислений производится по контрольным точкам естественной характеристики ($v = 1,0$):

- номинальному параметру абсолютному скольжению $\beta_{ном}$ должны соответствовать номинальные значения тока статора $I_{1ном}$ и момента $M_{ном}$;
- критическому параметру абсолютного скольжения $\beta_{кр}$ должен соответствовать максимальный момент M_{max} .

Анализ данных табл. 5.8 показывает, что погрешность вычислений составляет: тока статора — 5,0 %; момента по номинальному значению — 9,7 %; момента по максимальной величине — 0,9 %. Для инженерных расчетов данные показатели

Зависимости коэффициентов $C(\beta)$ и $A(v, \beta)$ от параметра абсолютного скольжения

β		0	0,007	$\beta_{ном}$	0,03	0,045	0,065	$\beta_{кр}$
$C(\beta)$	$v = 0,25$	0,000044	0,000093	0,000237	0,001024	0,002249	0,004646	0,006096
	$v = 0,5$							0,006431
	$v = 0,75$							0,006497
	$v = 1,0$							0,00652
	$v = 1,25$							0,00653
	$v = 1,5$							0,006537
$A(v, \beta)$	$v = 0,25$	0,000164	0,000173	0,000184	0,000223	0,000272	0,000359	0,000408
	$v = 0,5$	0,000657	0,000677	0,000705	0,000822	0,00098	0,001269	0,001477
	$v = 0,75$	0,001477	0,001512	0,001564	0,001798	0,002127	0,00274	0,003202
	$v = 1,0$	0,002626	0,002678	0,002762	0,003152	0,003713	0,004771	0,005583
	$v = 1,25$	0,004103	0,004174	0,004297	0,004884	0,005739	0,007362	0,00862
	$v = 1,5$	0,005909	0,006002	0,00617	0,006994	0,008205	0,010514	0,012314

являются удовлетворительными. Погрешность вычислений даже по одному из показателей свыше 15 % свидетельствует о допущенных ошибках. Обычно ошибки возникают при вычислении параметров схемы замещения асинхронного двигателя. Типичная ошибка заключается в том, что вместо фазных величин напряжений и токов используют их линейные значения.

Таблица 5.8

Расчетные данные электромеханических и механических характеристик частотно-регулируемого электропривода вентиляторной установки

β	0	0,007	$\beta_{ном}$	0,03	0,045	0,065	$\beta_{кр}$
$v = 0,25$							
I_1, A	12,3	17,6	27,7	54,9	76,4	99,1	108,0
$M, НМ$	0	21,8	40,6	82,8	109,5	128,9	133,8
ω, c^{-1}	39,3	38,2	37,2	34,5	32,2	29,0	27,5
$v = 0,5$							
I_1, A	24,3	35,0	55,2	109,0	150,7	193,9	213,2
$M, НМ$	0	86,5	161,1	326,4	426,2	493,6	508,0
ω, c^{-1}	78,5	77,4	76,4	73,8	71,4	68,3	66,5
$v = 0,75$							
I_1, A	36,3	52,4	82,8	163,1	225,0	288,5	317,4
$M, НМ$	0	193,9	361,5	731,0	950,3	1092,7	1119,9
ω, c^{-1}	117,8	116,7	115,7	113,0	110,7	107,5	105,7
$v = 1,0$							
I_1, A	48,4	69,8	110,2	217,2	299,3	383,1	421,4
$M, НМ$	0	344,0	641,4	1296,2	1681,8	1926,7	1970,1
ω, c^{-1}	157,0	155,9	154,9	152,3	149,9	146,8	144,9
$v = 1,25$							
I_1, A	44,0	63,4	99,8	194,5	266,0	337,5	369,8
$M, НМ$	0	284,0	525,5	1040,2	1327,9	1495,2	1516,1
ω, c^{-1}	196,3	195,2	194,2	191,5	189,2	186,0	184,1
$v = 1,5$							
I_1, A	40,2	57,9	91,2	178,1	243,7	309,4	339,1
$M, НМ$	0	237,0	439,1	871,7	1114,5	1256,3	1274,2
ω, c^{-1}	235,5	234,4	233,4	230,8	228,4	225,3	223,4

7. Для расчета механических характеристик вентилятора определяется номинальный момент вентилятора в соответствии с (5.11)

$$M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot p_{ном}}{\omega_{ном} \cdot \eta_{в.ном}} = \frac{20 \cdot 2500}{154,9 \cdot 0,76} = 424,7 \text{ Нм.}$$

Момент трения принимаем в размере 5 % от номинального момента вентилятора в соответствии с (5.13)

$$M_t = 0,05 \cdot M_{в.ном} = 0,05 \cdot 424,7 = 21,2 \text{ Нм.}$$

Расчет механической характеристики вентилятора производится в соответствии с (5.12)

$$M_c = (M_{в.ном} - M_t) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + M_t =$$

$$= (424,7 - 21,2) \cdot \left(\frac{\omega}{154,9} \right)^2 + 21,2, \text{ Нм.}$$

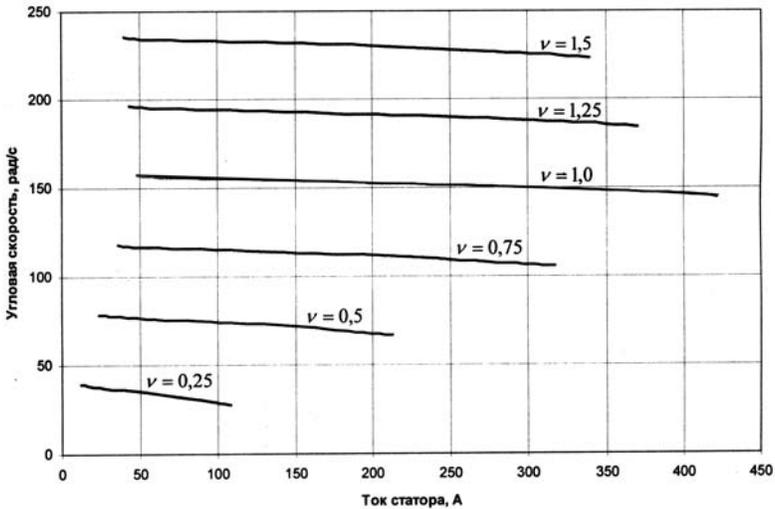


Рис. 5.6. Электромеханические характеристики частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания ВМ-12М

Задаемся угловой скоростью вентилятора и вычисляем момент статического сопротивления. Расчетные данные приводятся в табл. 5.9.

Таблица 5.9

Расчетные данные механической характеристики вентилятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	40	80	120	160	200	240
$M, \text{Нм}$	21,2	48,1	128,8	263,4	451,7	693,9	989,8

8. При графическом представлении механической характеристики электропривода совместно с ней представляется механическая характеристика механизма, в данном случае — механическая характеристика вентилятора. Расчетные данные механических характеристик вентиляторного агрегата представлены в табл. 5.8 и 5.9.

На рис. 5.6 и 5.7 представлены электромеханические и механические характеристики частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания ВМ-12М с двигателем ВРМ280S4. При расчете статических характеристик электропривода использован закон частотного регулирования $E_1 / f_1^2 = \text{const}$.

5.5.4. Расчет потребления электроэнергии вентиляторным агрегатом

Исходные данные для расчета потребления электроэнергии определяются по данным табл. 5.5 при годовой работе вентилятора $T_p = 7500$ час/год.

Расчет

1. В соответствии с (5.8) определяется угловая скорость вентиляторного агрегата при требуемом давлении на i -м интервале суток

$$\omega_i = \omega_{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{P_i}{P_{\text{ном}}}} \text{ с}^{-1}.$$

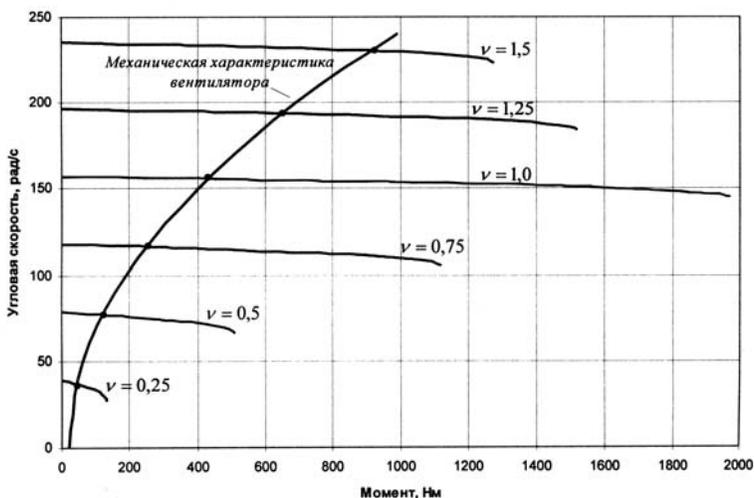


Рис. 5.7. Механические характеристики частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания ВМ-12М

2. Определяется подача вентилятора для создания требуемого давления в соответствии с (5.7) на i – м интервале суток

$$Q_i = Q_{ном} \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{ном}} \text{ м}^3/\text{с}.$$

3. Определяется КПД вентилятора с i -ой угловой скоростью в соответствии с (5.9)

$$\eta_{в.i} = 1 - \frac{1 - \eta_{в.ном}}{\left(\frac{\omega_i}{\omega_{ном}}\right)^{0,36}}.$$

4. Определяется мощность, потребляемая вентиляторным агрегатом при регулировании режимов работы в соответствии с (5.10) и (5.14)

$$P_i = \frac{Q_i \cdot p_i}{1000 \cdot \eta_{в.i} \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{пр}} \text{ кВт}.$$

5. Определяется потребляемая электроэнергия на i - м интервале суток

$$W_i = P_i \cdot T_i,$$

где $T_i = 4$ час — интервал времени по данным табл. 5.5.

Интервал времени, когда проводится хронометраж по определению необходимого давления, может быть неравномерным, в отличие от того, как это представлено в табл. 5.5. В этом случае необходимо использовать соответствующее время T_i на каждом из интервалов.

6. Результаты расчетов приводятся в табл. 5.10

Таблица 5.10

Расчет суточного электропотребления насосным агрегатом

Время суток, час	0—4	4—8	8—12	12—16	16—20	20—24
Полное давление, Па	1500	900	2200	2300	1800	1600
Угловая скорость, с ⁻¹	120	92,9	145,3	148,6	131,4	123,9
Подача, м ³ /с	15,5	12,0	18,8	19,2	17,0	16,0
КПД вентилятора	0,737	0,712	0,754	0,756	0,745	0,740
Мощность, кВт	35,1	16,9	61,1	65,1	45,8	38,5
Потребляемая электроэнергия, кВтчас	140,4	67,6	244,4	260,4	183,2	154,0

7. Просуммировав потребляемую электроэнергию по каждому интервалу времени, получаем суточное электропотребление $W_{сут} = 1050$ кВтчас/сут, тогда годовое потребление

$$W_2 = \frac{W_{сут} \cdot T_p}{24} = \frac{1050 \cdot 7500}{24} = 328125 \text{ кВтчас/год.}$$

8. Определяем мощность вентиляторного агрегата при нерегулируемом варианте

$$P_{ном} = \frac{Q_{ном} \cdot p_{ном}}{1000 \cdot \eta_{в.ном} \cdot \eta_{дв}} = \frac{20 \cdot 2500}{1000 \cdot 0,76 \cdot 0,935} = 70,4 \text{ кВт.}$$

9. Годовое потребление электроэнергии при нерегулируемом варианте

$$W_1 = P_{ном} \cdot T_p = 70,4 \cdot 7500 = 528000 \text{ кВтчас/год.}$$

10. Годовая экономия электроэнергии

$$\Delta W_{эл} = W_1 - W_2 = 528000 - 328125 = 199875 \text{ кВтчас/год.}$$

11. Годовая выработка воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p \cdot 3600 = 20 \cdot 7500 \cdot 3600 = 540000 \text{ тыс. м}^3/\text{год};$$

- при регулируемом варианте

$$Q_2 = Q_{cp} \cdot T_p \cdot 3600 = 16,4 \cdot 7500 \cdot 3600 = 442800 \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где $Q_{cp} = \frac{\sum Q_i}{i} = \frac{98,5}{6} = 16,4 \text{ м}^3/\text{с}$; $\sum Q_i = 98,5 \text{ м}^3/\text{с}$ — суммарная подача по каждому интервалу времени; $i = 6$ — количество интервалов времени за сутки по данным табл. 5.10.

12. Удельное потребление электроэнергии на выработку воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$q_1 = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{528000}{540000} = 0,978 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3;$$

- при регулируемом варианте

$$q_2 = \frac{W_2}{Q_2} = \frac{328125}{442800} = 0,741 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3.$$

5.6. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК

Системы регулируемого электропривода вентиляторных установок могут быть по схеме асинхронно-вентильного каскада или с частотным регулированием. В большинстве случаев асинхронно-вентильным каскадом оснащаются вентиляторы главного проветривания, если они содержат асинхронный электродвигатель с фазным ротором. Обычно асинхронный электропривод с фазным ротором вентилятора главного проветривания оснащается релейно-контакторной станцией управления для резисторного пуска. При модернизации такой системы, когда возникает необходимость управлять режимами работы вентиляторной установки, целесообразно реализовывать регулируемый электропривод по схеме АВК.

На рис. 5.8 представлена упрощенная схема регулируемого электропривода системы асинхронно-вентильного каскада.

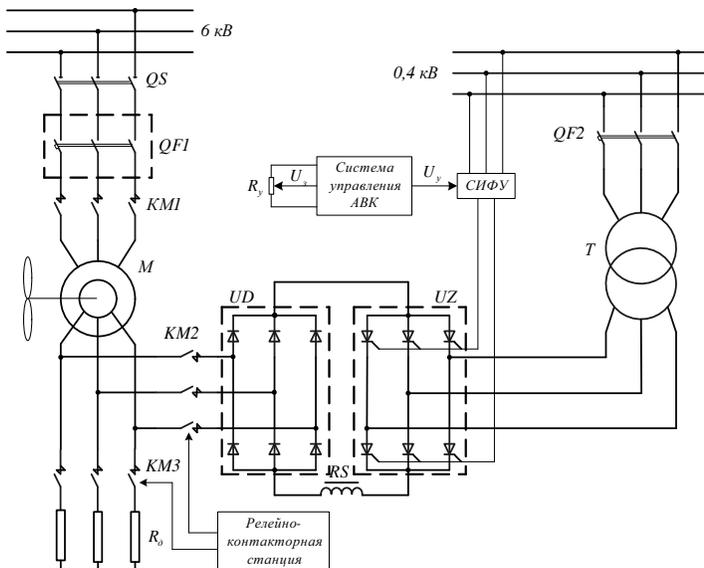


Рис. 5.8. Схема электропривода системы асинхронно-вентильный каскад вентилятора главного проветривания

Силовая схема содержит приводной электродвигатель M вентилятора главного проветривания, в роторную цепь которого включены неуправляемый выпрямитель UD и ведомый сетью инвертор UZ , а также дополнительные резисторы R_0 . Ускорение двигателя до рабочего диапазона регулирования вентилятора главного проветривания осуществляется посредством резисторного пуска. На период ускорения контактор $KM3$ включает дополнительные резисторы R_0 в роторную цепь асинхронного двигателя M . При достижении скорости рабочего диапазона регулирования, контактор $KM3$ отключается и включается контактор $KM2$, подключая цепи асинхронно-вентильного каскада. Далее система работает в режиме регулирования скорости за счет изменения противо-ЭДС с помощью ведомого сетью инвертора. Вентильный трансформатор T предназначен для согласования противо-ЭДС инвертора с сетевым напряжением.

Система управления содержит релейно-контакторную станцию управления, обеспечивающую процессы реостатного пуска вентиляторного агрегата в автоматическом режиме в функции времени или тока, и режимы «включение-отключение» контакторов $KM2$ и $KM3$ на периоды пусковых процессов и рабочих режимов с регулированием скорости средствами АВК.

В большинстве случаев регулирование рабочих режимов вентилятора главного проветривания осуществляется в ручном режиме, так как процессы изменения параметров регулирования (статическое давление, подача) являются медленно меняющимися. Поэтому обычно такие системы не содержат замкнутые цепи управления по какой-либо координате. Сигнал задания U_3 в этом случае формируется с помощью потенциометра R_p . Однако типовая система управления АВК должна предусматривать возможность формирования замкнутых систем управления, например, для дымососов, где обеспечивается стабилизация разрежения в зоне вытяжки газов.

Регулирование рабочих режимов вентилятора местного проветривания осуществляется с помощью частотно-регулируемого электропривода, так как в этом случае используется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. При этом

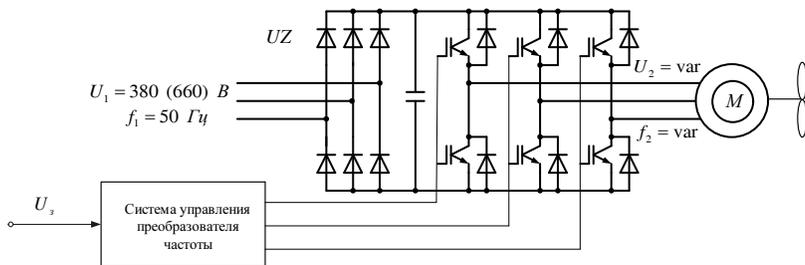


Рис. 5.9. Схема частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания

используется преобразователь частоты с автономным инвертором напряжения. Типовая упрощенная схема электропривода представлена на рис. 5.9.

Так же как и у вентиляторов главного проветривания, регулирование рабочих режимов вентилятора местного проветривания осуществляется в ручном режиме, так как процессы изменения параметров регулирования (полное давление, подача) являются медленно изменяющимися. Поэтому такая система не содержит замкнутых цепей управления по какой-либо координате. Для создания замкнутых систем управления, обычно преобразователи частоты поставляются в комплекте с ПИД-регулятором, на который замыкаются обратные связи. Поэтому переход от разомкнутой системы управления к замкнутой не представляет трудностей.

ГЛАВА 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСОСНЫХ И ВЕНТИЛЯТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАКЕТЕ MATLAB

История существования пакета MatLab, название которого происходит от словосочетания Matrix Laboratory (Матричная лаборатория), насчитывает около тридцати лет. В результате к настоящему времени MatLab представляет собой весьма удачное сочетание возможностей математики с последними достижениями в области вычислительной техники. Одно из основных достоинств пакета состоит в том, что для работы пользователю достаточно знать о нем ровно столько, сколько требует решаемая задача. MatLab представляет широкие возможности от обыкновенного калькулятора до объектно-ориентированного программирования в сочетании с интерактивными средствами отладки создаваемых программ.

В первую очередь MatLab — это средство математического моделирования, обеспечивающее проведение исследований практически во всех известных областях науки и техники. При этом структура пакета позволяет эффективно сочетать оба основных подхода к созданию модели: аналитический и имитационный.

С точки зрения пользователя MatLab представляет собой богатейшую библиотеку функций (в MatLab 6.0 их более 800), единственная проблема работы с которой заключается в умении быстро отыскать те из них, которые нужны для решения данной задачи.

Полная комплектация пакета MatLab 6.0 содержит около 30 инструментальных приложений. В их число входят как достаточно стандартные для математических пакетов средства (решения дифференциальных и алгебраических уравнений, интегрального исчисления, символьных вычислений и т.д.), так и нетрадиционные: средства цифровой обработки изображений, поиска решений на основе нечеткой логики и целый ряд других.

Особое место среди инструментальных приложений занимает система визуального моделирования Simulink. В опреде-

ленном смысле Simulink можно рассматривать как самостоятельный пакет, однако, он работает только при наличии ядра MatLab и использует многие функции, входящие в его состав.

Разработка моделей средствами Simulink основана на использовании технологии *Drag-and-Drop* (*Перетаски и оставь*). В качестве «кирпичиков» для построения моделей используются модули (или блоки), хранящиеся в библиотеке Simulink.

Simulink хорош тем, что, с одной стороны, обеспечивает пользователю доступ ко всем основным возможностям пакета MatLab, а с другой — является достаточно самостоятельной его компонентой, в том смысле, что при работе с ним не обязательно иметь навыки в использовании других инструментов, входящих в состав пакета.

Блоки, включаемые в создаваемую модель, могут быть связаны друг с другом, как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и логики работы модели. Данные, которыми обмениваются блоки, могут быть скалярными величинами, векторами или матрицами произвольной размерности.

Любая модель может иметь иерархическую структуру, т.е. состоять из моделей более низкого уровня, причем число уровней иерархии практически не ограничено.

Наряду с другими параметрами моделирования пользователь может задавать способ изменения модельного времени с постоянным или переменным шагом, а также условия окончания моделирования. В ходе моделирования имеется возможность наблюдать за процессами, происходящими в системе. Интересующие пользователя характеристики системы могут быть представлены как в числовой, так и в графической форме.

Еще одно важное достоинство Simulink заключается в том, что он является открытой системой, так как состав библиотеки может быть пополнен за счет разработки собственных блоков.

Изучение работы непосредственно в системе MatLab с его расширением Simulink не является настоящей задачей, поэтому для интересующихся можно порекомендовать литературу [5]. Самый простой и доступный способ познакомиться с возможностями данной системы — просмотр демонстрационных файлов, входящих в состав пакета.

6.2. ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА В СТРУКТУРЕ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ДАВЛЕНИЯ В ГИДРОСИСТЕМЕ

На основании структурной схемы рис. 4.3 составляется функциональная схема модели насосного агрегата с использованием программного продукта MatLab в среде Simulink.

Для вычисления подачи, напора, КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии насосным агрегатом используются зависимости, полученные для структуры управления со стабилизацией напора в гидросистеме. При этом модель строится таким образом, чтобы обеспечить задание различных исходных данных для возможности моделирования разных насосов с различной плотностью перекачиваемой жидкости и разной высотой подъема жидкости. Для визуального восприятия модели удобно вычислять каждый из параметров с помощью подсистем (блоки Subsystem).

Функциональная схема модели насосного агрегата с численными значениями для насоса 1Д1250-125А и двигателем ДАЗО4-400У-4МУ1 приведена на рис. 6.1. Модель может быть использована для любого насосного агрегата при соответствующих исходных данных, вносимых в модель.

Все параметры системы стабилизации для данной модели рассчитаны в примере расчета п. 4.6.1.

Модель насосного агрегата состоит из модели частотно-регулируемого электропривода и модели насоса. Модель электропривода содержит: входное устройство задания по давлению (Constant1); сумматор сигналов задания по давлению и отрицательной обратной связи по давлению; пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор (PID Controller), у которого используются пропорциональная и интегральная части для реализации пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора; модель преобразователя частоты, реализованный на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn); сумматор ЭДС преобразователя частоты и отрицательной внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; передаточная функция звена момента, реализованная на апериодическом звене первого

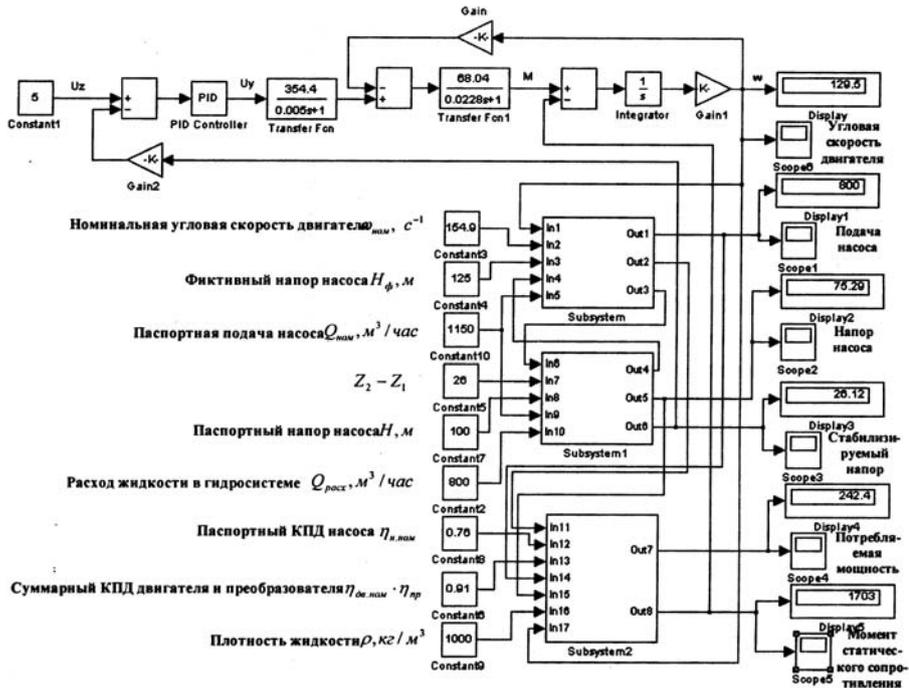


Рис. 6.1. Функциональная схема модели насосного агрегата со стабилизацией давления в гидросистеме

порядка (Transfer Fcn1); сумматор электромагнитного момента двигателя и отрицательного момента статического сопротивления, создаваемого насосом; звено скорости двигателя, реализованное с помощью интегратора (Integrator) и усилителя (Gain1); внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя реализована с использованием усилителя (Gain).

Выходная координата модели частотно-регулируемого электропривода — угловая скорость, регистрируется с помощью дисплея (Display) и осциллографа (Scope6).

Модель насоса представлена тремя подсистемами (Subsystem, Subsystem1 и Subsystem2). Входные (исходные) параметры насоса реализованы на девяти источниках постоянного воздействия (Constant). Отображение численных значений величин, вычисленных в модели, осуществляется с помощью блоков Display, а динамику изменения координат с помощью осциллографов Scope:

- подача насоса, м³/час — Display1 и Scope1;
- напор насоса, м — Display2 и Scope2;
- стабилизируемый напор, м — Display3 и Scope3;
- потребляемая мощность насоса, кВт — Display4 и Scope4;
- момент статического сопротивления насоса, Нм — Display5 и Scope5.

С помощью подсистемы Subsystem реализована зависимость подачи насоса от угловой скорости насоса по формуле (4.2)

Подсистема представлена на рис. 6.2.

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem:

- вход 1 (In 1) — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- вход 2 (In 2) — задается номинальная угловая скорость $\omega_{ном}$ электродвигателя;
- вход 3 (In 3) — задается фиктивный напор H_{ϕ} ;
- вход 4 (In 4) — задается вычисленная величина от Out 4 в виде суммы свободного напора и разности геодезических отметок между местом установки датчика давления и насоса $(Z_2 - Z_1) + H_{ca}$;

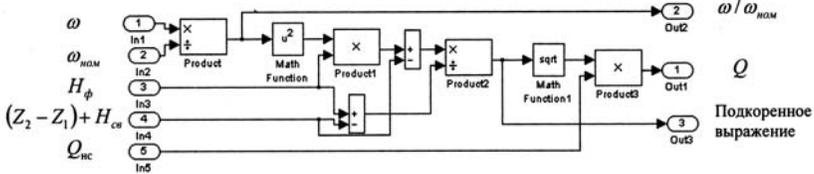


Рис. 6.2. Функциональная схема модели по формуле (4.2) (Subsystem)

- вход 5 (In 5) — задается паспортная (номинальная) величина подачи насоса $Q_{ном}$;
- выход 1 (Out 1) — вычисленная величина подачи насоса Q ;
- выход 2 (Out 2) — вычисленное относительное значение угловой скорости двигателя $\omega/\omega_{ном}$, используется в дальнейших расчетах с помощью модели;
- выход 3 (Out 3) — вычисленное подкоренное выражение в формуле (4.2), используется в дальнейших расчетах с помощью модели;

С помощью подсистемы Subsystem 1 реализованы зависимости напора насоса от угловой скорости насоса и свободного напора от расхода жидкости.

Вычисление напора насоса в зависимости от угловой скорости насоса производится по формуле (4.3), а свободного напора $H_{св}$, в соответствии с характеристикой трубопровода и расхода жидкости, по формуле (4.4).

Подсистема Subsystem1 реализации зависимостей (4.3) и (4.4) представлена на рис. 6.3.

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem1:

- вход 1 (In 6) — подается вычисленное подкоренное выражение формулы (4.2) с выхода Out 3;
- вход 2 (In 7) — задается разность геодезических отметок между местом установки датчика давления и насоса;
- вход 3 (In 8) — задается паспортный (номинальный) напор насоса $H_{ном}$;

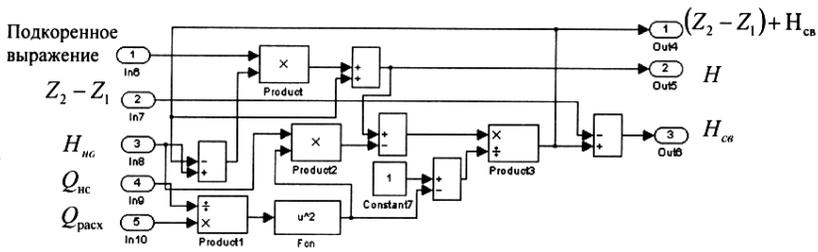


Рис. 6.3. Функциональная схема модели по формулам (4.3) и (4.4) (Subsystem 1)

- вход 4 (In 9) — задается паспортная (номинальная) подача насоса $Q_{ном}$;
- вход 5 (In 10) — задается расход жидкости в гидросистеме $Q_{расх}$;
- выход 1 (Out 4) — вычисленная величина суммы свободного напора и разности геодезических отметок между местом установки датчика давления и насоса $(Z_2 - Z_1) + H_{cs}$;
- выход 2 (Out 5) — вычисленная величина напора насоса H ;
- выход 3 (Out 6) — вычисленная величина свободного напора $H_{св}$;

С помощью подсистемы Subsystem 2 реализованы зависимости КПД, активной мощности насоса, потребляемой мощности насосным агрегатом и статического момента сопротивления насоса от угловой скорости.

Вычисление КПД насоса производится по формуле (3.9), активной мощности насоса по формуле (3.10), статического момента сопротивления насоса по формуле (3.11). Вычисление потребляемой мощности насосным агрегатом производится путем деления активной мощности насоса на произведение КПД двигателя и преобразователя.

Подсистема Subsystem2 зависимостей (3.9), (3.10), (3.11) и потребляемой мощности представлена на рис. 6.4.

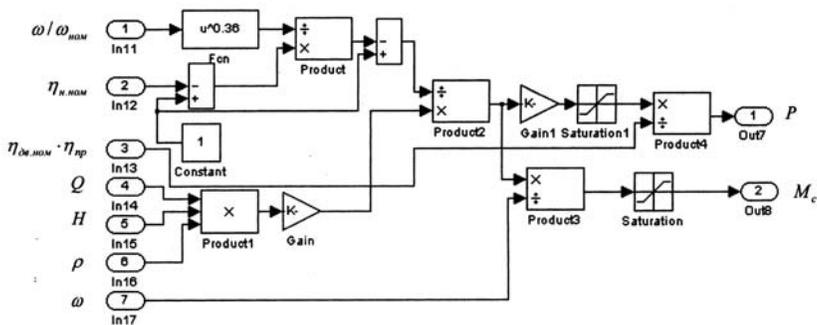


Рис. 6.4. Функциональная схема модели по формулам (3.9), (3.10), (3.11) и потребленной мощности (Subsystem2)

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem2:

- вход 1 (In 11) — подается вычисленная относительная угловая скорость с выхода Out 2;
- вход 2 (In 12) — задается паспортный (номинальный) КПД насоса $\eta_{н.ном}$;
- вход 3 (In 13) — задается произведение номинального КПД двигателя и преобразователя $\eta = \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}$;
- вход 4 (In 14) — подается вычисленная подача насоса Q с выхода Out 1;
- вход 5 (In 15) — подается вычисленный напор насоса H с выхода Out 5;
- вход 6 (In 16) — задается плотность жидкости ρ ;
- вход 7 (In 17) — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- выход 1 (Out 7) — вычисленная величина потребляемой активной мощности P ;
- выход 2 (Out 8) — вычисленная величина момента статического сопротивления насоса M_c .

Для настройки ряда параметров в подсистеме Subsystem 2 необходимо руководствоваться следующими соображениями:

- коэффициент передачи усилителя Gain выбирается из условия перевода почасовой подачи ($\text{м}^3/\text{час}$) в секундную подачу ($\text{м}^3/\text{с}$) в выражении (3.10), т.е.

$$K_{Gain} = \frac{9,81}{3600} = 0,002725;$$

- коэффициент передачи усилителя Gain1 выбирается из условия перевода единицы измерения мощности из Ватт в килоВатты, т.е.

$$K_{Gain1} = 0,001;$$

- настройка блока ограничения координат момента статического сопротивления Saturation производится в следующей последовательности:

- вычисляется номинальный момент статического сопротивления для рассматриваемого примера

$$M_{с.ном} = \frac{9,81 \cdot \rho \cdot Q_{с.ном} \cdot H_{ном}}{\eta_{н.ном} \cdot \omega_{ном}} = \frac{9,81 \cdot 1000 \cdot 0,3194 \cdot 100}{0,76 \cdot 154,9} = 2661,6 \text{ Нм},$$

где $Q_{с.ном} = \frac{Q_{ном}}{3600} = \frac{1150}{3600} = 0,3194 \text{ м}^3/\text{с}$ — секундная подача насоса; $3600 \text{ с}/\text{час}$ — количество секунд в 1-м часе;

- верхний предел ограничения в Saturation устанавливается несколько больше вычисленной величины $M_{с.ном}$, т.е. 3000 Нм , а нижний предел равен нулю.
- настройка блока ограничения координат мощности Saturation1 производится по номинальной мощности двигателя, т.е. верхний предел ограничения Saturation1 устанавливается 500 кВт для рассматриваемого примера, а нижний предел равен нулю.

С помощью модели можно решать различные задачи, связанные с режимами регулирования насосной установки, энергопотребления и т.п.

Рассмотрим вопросы режима работы насосной установки при стабилизации давления в гидросистеме. В соответствии с

данными, приведенными в примере п. 4.6.1, рассмотрим, как изменяются параметры насосной установки при регулировании угловой скорости насосного агрегата. Для этого, изменяя сигнал задания по давлению (Constant1), фиксируем численные значения параметров на Display. Полученные данные приведены в табл. 6.1. Для сопоставления параметров, их данные приведены в относительных единицах, где в качестве базовых параметров используются номинальные величины по угловой скорости, подаче и напору. Базовая величина потребляемой мощности определяется по формуле

$$P_b = \frac{\rho \cdot Q_{ном} \cdot H_{ном}}{102 \cdot \eta_{н.ном} \cdot \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}}$$

Более наглядное представление о режимах регулирования можно получить в графическом виде. Графические зависимости подачи, напора, стабилизируемого напора и потребляемой мощности от угловой скорости насоса по данным табл. 6.1 представлены на рис. 6.5.

Таблица 6.1

Результаты моделирования в системе стабилизации давления при постоянном водопотреблении 800 м³/час

$U_{з.д}$, В	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
ω , с ⁻¹	119,0	122,3	125,5	128,5	131,5	134,4	137,3
Q , м ³ /ч	800	800	800	800	800	800	800
H , м	61,81	65,86	69,9	73,94	77,99	82,03	86,08
$H_{ст}$, м	0	7,837	15,67	23,51	31,35	39,18	47,02
P , кВт	201,1	213,6	226,0	238,3	250,6	262,9	275,2
ω^*	0,768	0,79	0,81	0,83	0,849	0,868	0,886
Q^*	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696
H^*	0,618	0,659	0,699	0,739	0,78	0,82	0,861
$H_{ст}^*$	0	0,08	0,157	0,235	0,314	0,392	0,47
P^*	0,443	0,47	0,498	0,525	0,552	0,579	0,606

Как видно из графических зависимостей, с увеличением угловой скорости насоса увеличиваются напор насоса, потреб-

ляемая мощность насосного агрегата и стабилизируемый напор при постоянном водопотреблении. Эти зависимости практически линейны. Это объясняется влиянием противодействия, обусловленное статическим напором, который вносит значительные поправки в формулы приведения (3.1) ÷ (3.4) для насосных установок. Синтез системы управления со стабилизацией давления в гидросистеме производился в предположении пропорциональной зависимости между напором и угловой скоростью (4.16), что подтверждается полученными графическими зависимостями.

Рассмотрим, как изменяются параметры насосной установки при изменении водопотребления. Параметры стабилизирующего напора заданы сигналом задания по давлению (Constant1) величиной 5 В, в соответствии с примером расчета, приведенным в п. 4.6.1. Изменяя расход жидкости в гидросистеме (Constant 2) фиксируются численные значения параметров на Display. Полученные данные приведены в табл. 6.2. Для сопоставления параметров, их данные приведены в относительных единицах, как это сделано в предыдущем примере.

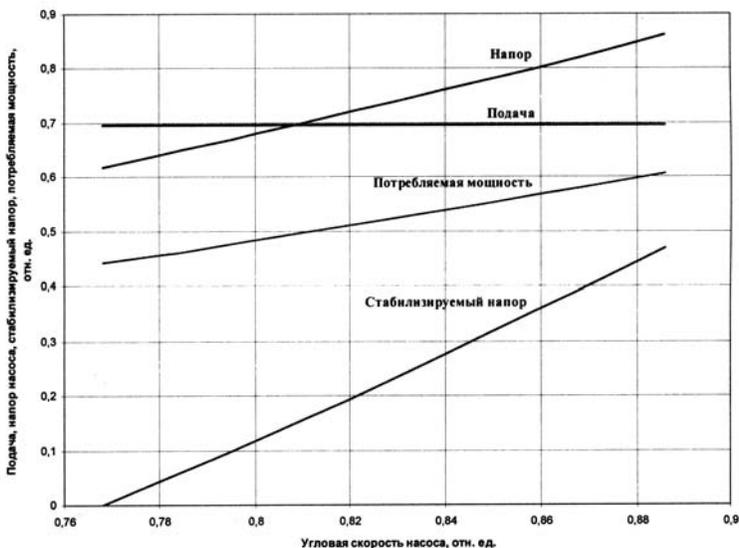


Рис. 6.5. Графические зависимости подачи, напора, потребляемой мощности и стабилизируемого напора от угловой скорости насоса

Таблица 6.2

Результаты моделирования при стабилизации давления в гидросистеме

$Q_{расх}$, $м^3/ч$	150	300	450	600	750	900	1050
ω , $с^{-1}$	101,2	104,7	110,2	117,5	126,3	136,3	147,2
Q , $м^3/ч$	150	300	450	600	750	900	1050
H , м	52,94	55,38	59,45	65,16	72,49	81,45	92,03
$H_{ст}$, м	26,12	26,12	26,12	26,12	26,12	26,12	26,12
P , кВт	33,01	68,75	109,9	159,3	219,5	293,2	383,0
$Q_{расх}^*$	0,130	0,261	0,391	0,522	0,652	0,783	0,913
ω^*	0,653	0,676	0,711	0,759	0,815	0,880	0,950
Q^*	0,130	0,261	0,391	0,522	0,652	0,783	0,913
H^*	0,529	0,554	0,595	0,652	0,725	0,815	0,920
$H_{ст}^*$	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261	0,261
P^*	0,073	0,151	0,242	0,351	0,483	0,646	0,844

Графические зависимости угловой скорости, подачи, напора, стабилизируемого напора и потребляемой мощности от расхода жидкости в гидросистеме по данным табл. 6.2 представлены на рис. 6.б.

Как видно из графических зависимостей рис. 6.б, с увеличением расхода жидкости в гидросистеме, электропривод насоса увеличивает угловую скорость с увеличением напора, подачи и потребляемой активной мощности насосного агрегата при стабилизации давления. Система стабилизации напора обеспечивает подачу насоса в строгом соответствии с расходом жидкости. Верхний предел по расходу жидкости в гидросистеме ограничен паспортным напором насоса, когда насос не способен обеспечивать заданную стабилизацию напора.

Для расчета потребления электроэнергии насосным агрегатом с помощью модели необходимо, в качестве примера, воспользоваться данными почасового графика водопотребления в течение месяца, приводимыми в табл. 3.4. Изменяя расход жидкости в гидросистеме (Constant1) фиксируются численные значения потребляемой мощности на Display4. Полученные данные приведены в табл. 6.3.

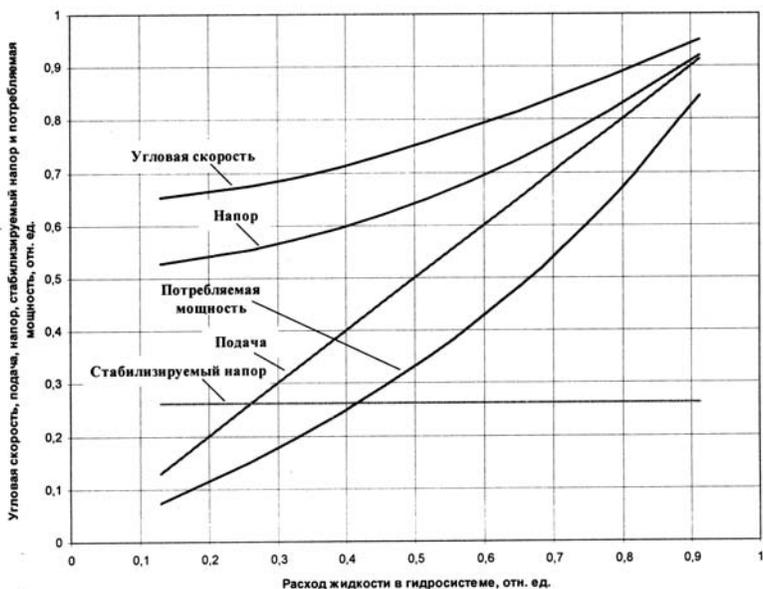


Рис. 6.6. Графические зависимости угловой скорости, напора, подачи, потребляемой мощности и стабилизируемого напора от расхода жидкости в гидросистеме

Суммарная мощность по данным табл. 6.3 $\sum_1^{30} P = 8230,5$ кВт.

Средняя потребляемая мощность

$$P_{cp} = \frac{\sum_1^{30} P}{i} = \frac{8230,5}{30} = 274,35 \text{ кВт,}$$

где $i = 30$ — число дат измерения водопотребления.

Годовое потребление электроэнергии при стабилизации давления в гидросистеме

$$W_{год} = P_{cp} \cdot T_p = 274,35 \cdot 8760 = 2403306 \text{ кВт·час/год,}$$

где $T_p = 8760$ час/год — количество часов работы насоса в год.

Данные моделирования потребляемой мощности насосным агрегатом при переменном водопотреблении

Дата	1.04	2.04	3.04	4.04	5.04	6.04	7.04	8.04	9.04	10.04
Q , м ³ /час	904	921	863	783	962	1017	933	850	925	858
P , кВт	295,1	304,7	273,6	234,4	328,2	361,7	311,5	267,0	307,0	271,0
Дата	11.04	12.04	13.04	14.04	15.04	16.04	17.04	18.04	19.04	20.04
Q , м ³ /час	783	850	850	867	887	896	821	825	817	833
P , кВт	234,4	267,0	267,0	275,7	286,2	291,0	252,5	254,5	250,6	258,4
Дата	21.04	22.04	23.04	24.04	25.04	26.04	27.04	28.04	29.04	30.04
Q , м ³ /час	842	812	833	879	854	796	821	875	900	829
P , кВт	262,9	248,2	258,4	282,0	269,0	240,5	252,5	279,9	293,2	256,4

Для определения экономии электроэнергии определяется потребление электроэнергии при нерегулируемом варианте электропривода насосного агрегата

$$W'_{zod} = \frac{N_{ном} \cdot T_p}{\eta_{дв}} = \frac{412 \cdot 8760}{0,948} = 3807089 \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{год}.$$

Годовая экономия электроэнергии при стабилизации напора в гидросистеме

$$W_{эж,zod} = W'_{zod} - W_{zod} = 3807089 - 2403306 = 1403783 \text{ кВт}\cdot\text{час}/\text{год},$$

что составляет 36,9 % экономии электроэнергии.

Годовое водопотребление в соответствии с данными табл. 3.1 составляет

$$Q_{zod} = 7455,6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год},$$

Удельное потребление электроэнергии при нерегулируемом варианте электропривода

$$q'_{эл} = \frac{W'_{zod}}{Q_{zod}} = \frac{3807089}{7455,6 \cdot 10^3} = 510,6 \text{ кВт}\cdot\text{час}/1000 \text{ м}^3.$$

Удельное потребление электроэнергии при регулируемом варианте электропривода

$$q_{эл} = \frac{W_{zod}}{Q_{zod}} = \frac{2403306}{7455,6 \cdot 10^3} = 322,3 \text{ кВт}\cdot\text{час}/1000 \text{ м}^3.$$

Полученные данные по экономии электроэнергии отличаются от данных, полученных в п. 3.3.1 на 19 %. Это связано с тем, что графо-аналитический метод расчета является неточным и, кроме того, не учитывалось влияние переменного момента статического сопротивления, зависящего от угловой скорости электропривода.

6.3. ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСОСНОГО АГРЕГАТА В СТРУКТУРЕ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ

На основании структурной схемы рис. 4.6 составляется функциональная схема модели насосного агрегата с использованием программного продукта MatLab в среде Simulink.

Для вычисления подачи, напора, КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии насосным агрегатом используются зависимости, полученные для структуры управления со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре или скважине. При этом модель строится таким образом, чтобы обеспечить задание различных исходных данных для возможности моделирования разных насосов с различной плотностью перекачиваемой жидкости и разной высотой подъема жидкости. Для визуального восприятия модели удобно вычислять каждый из параметров с помощью подсистем (блоки Subsystem).

Функциональная схема модели насосного агрегата с численными значениями для насоса GrAT-170/40 и двигателем 4АН225М4У3 приведена на рис. 6.7. Модель может быть использована для любого насосного агрегата при соответствующих исходных данных, вносимых в модель.

Все параметры системы стабилизации уровня жидкости для данной модели рассчитаны в примере расчета п. 4.6.2.

Модель насосного агрегата состоит из модели частотно-регулируемого электропривода и модели насоса. Модель электропривода содержит: входное устройство задания по уровню жидкости (Constant1); сумматор сигналов задания по уровню жидкости и отрицательной обратной связи по уровню жидкости; пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор (PID Controller), у которого используются пропорциональная и интегральная части для реализации пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора; модель преобразователя частоты, реализованный на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn); сумматор ЭДС преобразователя частоты и отрицательной внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; передаточная функция звена момента, реализованная на апериоди-

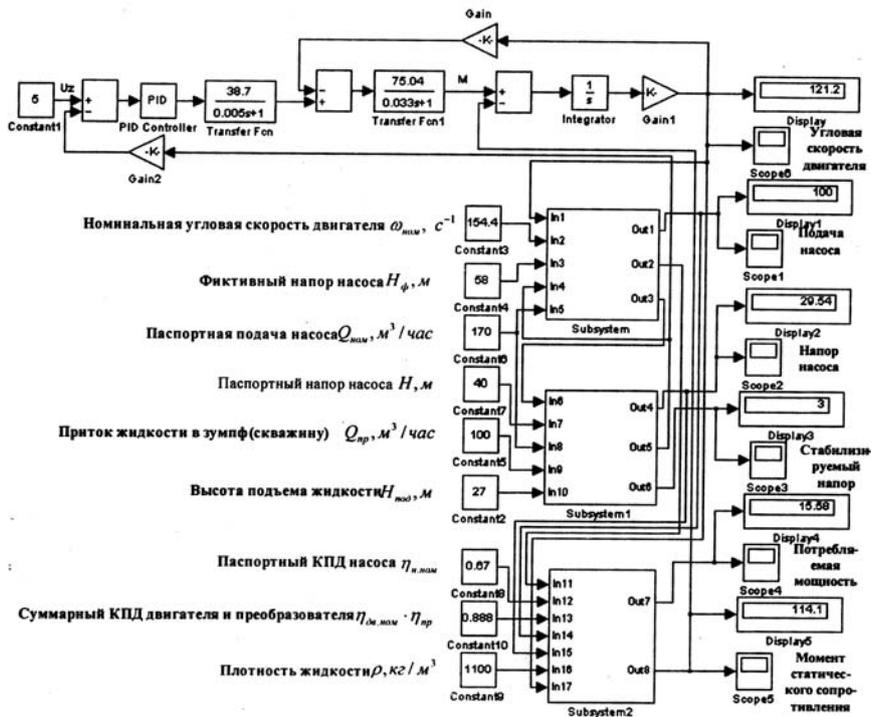


Рис. 6.7. Функциональная схема модели насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре (скважине)

ческом звене первого порядка (Transfer Fcn1); сумматор электромагнитного момента двигателя и отрицательного момента статического сопротивления, создаваемого насосом; звено скорости двигателя, реализованное с помощью интегратора (Integrator) и усилителя (Gain1); внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя реализована с использованием усилителя (Gain).

Выходная координата модели частотно-регулируемого электропривода — угловая скорость, регистрируется с помощью дисплея (Display) и осциллографа (Scope6).

Модель насоса представлена тремя подсистемами (Subsystem, Subsystem1 и Subsystem2). Входные (исходные) параметры насоса реализованы на девяти источниках постоянного воздействия (Constant). Отображение численных значений величин, вычисленных в модели, осуществляется с помощью блоков Display, а динамику изменения координат с помощью осциллографов Scope:

- подача насоса, м³/час — Display1 и Scope1;
- напор насоса, м — Display2 и Scope2;
- стабилизируемый напор, м — Display3 и Scope3;
- потребляемая мощность насоса, кВт — Display4 и Scope4;
- момент статического сопротивления насоса, Нм — Display5 и Scope5.

С помощью подсистемы Subsystem реализована зависимость подачи насоса от угловой скорости насоса по формуле (3.6).

Подсистема представлена на рис. 6.8.

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem:

- вход 1 (In 1) — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- вход 2 (In 2) — задается номинальная угловая скорость $\omega_{ном}$ электродвигателя;
- вход 3 (In 3) — задается фиктивный напор H_{ϕ} ;
- вход 4 (In 4) — задается вычисленный статический напор H_c с Out 5;

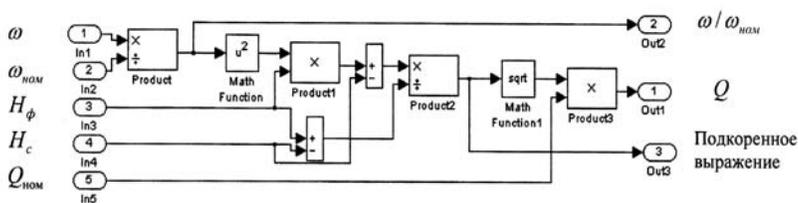


Рис. 6.8. Функциональная схема модели по выражению (3.6) (Subsystem)

- вход 5 (In 5) — задается паспортная (номинальная) величина подачи насоса $Q_{ном}$;
- выход 1 (Out 1) — вычисленная величина подачи насоса Q ;
- выход 2 (Out 2) — относительное значение угловой скорости двигателя $\omega/\omega_{ном}$, используется в дальнейших расчетах модели;
- выход 3 (Out 3) — вычисленное подкоренное выражение (3.6), используется в дальнейших расчетах модели.

С помощью подсистемы Subsystem 1 реализованы зависимости напора насоса от угловой скорости насоса и статического напора от расхода жидкости.

Вычисление напора насоса в зависимости от угловой скорости насоса производится по формуле (3.8), а статического напора H_c , в соответствии с характеристикой трубопровода и расхода жидкости, по формуле (4.20). При этом стабилизируемым параметром является статический напор H_c . Вычисление уровня жидкости в зумпфе или скважине производится по формуле (4.21).

Подсистема Subsystem1 зависимостей (3.8), (4.20) и (4.21) представлена на рис. 6.9.

На схеме набора блоков подсистемы (Subsystem1):

- вход 1 (In 6) — подается вычисленное подкоренное выражение (3.6) с выхода Out 3;
- вход 2 (In 7) — задается паспортный (номинальный) напор насоса $H_{ном}$;

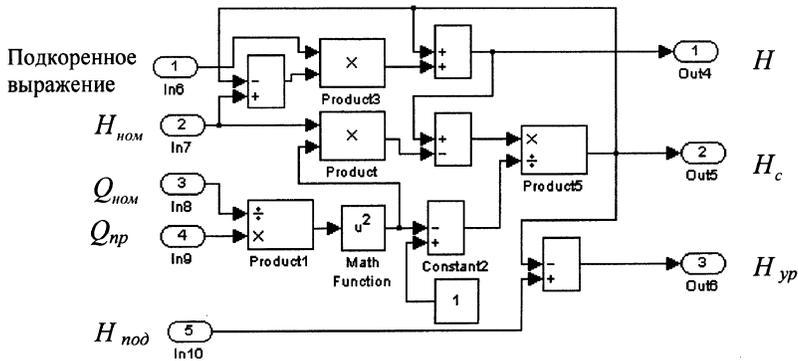


Рис. 6.9. Функциональная схема модели по выражениям (3.2), (3.3) и (3.4) (Subsystem1)

- вход 3 (In 8) — задается паспортная (номинальная) подача насоса $Q_{ном}$;
- вход 4 (In 9) — задается приток в скважину $Q_{пр}$;
- вход 5 (In 10) — задается высота подъема жидкости $H_{под}$;
- выход 1 (Out 4) — вычисленная величина напора насоса H ;
- выход 2 (Out 5) — вычисленная величина статического напора H_c ;
- выход 3 (Out 6) — вычисленная величина уровня жидкости в зумпфе или скважине $H_{ур}$;

С помощью подсистемы Subsystem2 реализованы зависимости КПД, активной мощности насоса, потребляемой мощности насосным агрегатом и статического момента сопротивления насоса от угловой скорости.

Для вычисления КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии насосным агрегатом в режиме стабилизации уровня жидкости используются зависимости (3.9), (3.10) и (3.11). Вычисление потребляемой мощности насосным агрегатом производится путем деления активной мощности насоса на произведение КПД двигателя и преобразователя.

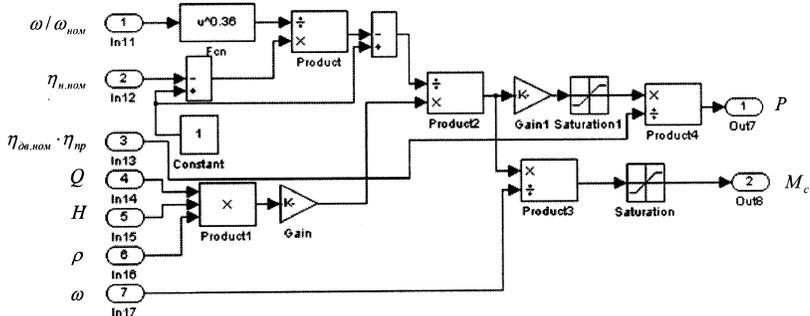


Рис. 6.10. Функциональная схема модели по формулам (3.9), (3.10), (3.11) и потребляемой мощности (Subsystem2)

Подсистема Subsystem2 зависимостей (3.9), (3.10), (3.11) и потребляемой мощности представлена на рис. 6.10.

На схеме набора блоков подсистемы (Subsystem2):

- вход 1 (In 11) — подается вычисленная относительная угловая скорость с выхода Out 2;
- вход 2 (In 12) — задается паспортный (номинальный) КПД насоса $\eta_{н.ном}$;
- вход 3 (In 13) — задается произведение номинального КПД двигателя и преобразователя $\eta = \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}$;
- вход 4 (In 14) — подается вычисленная подача насоса Q с выхода Out 1;
- вход 5 (In 15) — подается вычисленный напор насоса H с выхода Out 5;
- вход 6 (In 16) — задается плотность жидкости ρ ;
- вход 7 (In 17) — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- выход 1 (Out 7) — вычисленная величина потребляемой активной мощности P ;
- выход 2 (Out 8) — вычисленная величина момента статического сопротивления насоса M_c .

Для настройки ряда параметров в подсистеме Subsystem 2 необходимо руководствоваться следующими соображениями:

- коэффициент передачи усилителя Gain выбирается из условия перевода почасовой подачи ($\text{м}^3/\text{час}$) в секундную подачу ($\text{м}^3/\text{с}$) в выражении (3.10), т.е.

$$K_{\text{Gain}} = \frac{9,81}{3600} = 0,002725 ;$$

- коэффициент передачи усилителя Gain1 выбирается из условия перевода единицы измерения мощности из Ватт в килоВатты, т.е.

$$K_{\text{Gain1}} = 0,001 ;$$

- настройка блока ограничения координат момента статического сопротивления Saturation производится в следующей последовательности:

- вычисляется номинальный момент статического сопротивления для рассматриваемого примера

$$M_{\text{с.ном}} = \frac{9,81 \cdot \rho \cdot Q_{\text{с.ном}} \cdot H_{\text{ном}}}{\eta_{\text{н.ном}} \cdot \omega_{\text{ном}}} = \frac{9,81 \cdot 1100 \cdot 0,0472 \cdot 40}{0,67 \cdot 154,4} = 197 \text{ Нм},$$

где $Q_{\text{с.ном}} = \frac{Q_{\text{ном}}}{3600} = \frac{170}{3600} = 0,0472 \text{ м}^3/\text{с}$ — секундная подача насоса; $3600 \text{ с}/\text{час}$ — количество секунд в 1 часе;

- верхний предел ограничения в Saturation устанавливается несколько больше вычисленной величины $M_{\text{с.ном}}$, т.е. 200 Нм, а нижний предел равен нулю.
- настройка блока ограничения координат мощности Saturation1 производится по номинальной мощности двигателя, т.е. верхний предел ограничения Saturation1 устанавливается 75 кВт для рассматриваемого примера, а нижний предел равен нулю.

С помощью модели можно решать различные задачи, связанные с режимами регулирования насосной установки, энергопотребления и т.п.

Рассмотрим вопросы режима работы насосной установки при стабилизации уровня жидкости в резервуаре. В соответствии

с данными, приведенными в примере п. 4.6.2, рассмотрим как изменяются параметры насосной установки при изменении притока жидкости. Параметры стабилизируемого уровня определены сигналом задания по уровню (Constant1), который равен 5 В, в соответствии с примером расчета, приведенным в п. 4.6.2. Изменяя приток жидкости в резервуар (Constant5) фиксируются численные значения параметров на Display. Полученные данные приведены в табл. 6.4. Для сопоставления параметров, их данные приведены в относительных единицах, где в качестве базовых параметров используются номинальные величины по угловой скорости, подаче и напору. Базовая величина потребляемой мощности определяется по формуле

$$P_6 = \frac{\rho \cdot Q_{ном} \cdot H_{ном}}{102 \cdot \eta_{н.ном} \cdot \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}}$$

Графические зависимости угловой скорости, подачи, напора, стабилизируемого уровня жидкости и потребляемой мощности от притока жидкости в резервуар по данным табл. 6.4 представлены на рис. 6.11.

При стабилизации уровня жидкости в резервуаре, в частности на отметке 3 метра, потребляемая мощность зависит только от количества притока жидкости. С увеличением притока увеличивается угловая скорость насосного агрегата, напор, развиваемый насосом и потребляемая мощность. Подача насоса строго соответствует притоку жидкости, поэтому потребляемая мощность и затраченная электроэнергия соответствуют минимально необходимым величинам. В этом факторе состоит эффект энергосбережения.

Как и в системе стабилизации давления в гидросистеме, на модели удобно определять параметры энергоэффективности при стабилизации уровня жидкости в резервуаре, если известен суточный или месячный график притока жидкости в резервуар. Возможен вариант экспертной оценки среднего притока жидкости. В исходных данных п. 4.4 определено, что средний приток жидкости в резервуар составляет $Q_{ср.пр} = 140 \text{ м}^3/\text{час}$ при времени работы насоса 8050 час/год. С помощью модели определяем потребляемую мощность насосного агрегата $P_2 = 25,06 \text{ кВт}$

Таблица 6.4

Результаты моделирования при стабилизации уровня жидкости в резервуаре

Q_{np} , м ³ /ч	20	40	60	80	100	120	140	160
ω , с ⁻¹	100,3	103,1	107,7	113,8	121,2	129,7	139,1	149,1
Q , м ³ /ч	20	40	60	80	100	120	140	160
H , м	24,22	24,89	25,99	27,54	29,54	31,97	34,85	38,17
H_{yp} , м	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
P , кВт	2,661	5,433	8,432	11,77	15,58	19,97	25,06	30,96
Q_{np}^*	0,118	0,235	0,353	0,471	0,588	0,706	0,824	0,941
ω^*	0,650	0,668	0,698	0,737	0,785	0,840	0,901	0,966
Q^*	0,118	0,235	0,353	0,471	0,588	0,706	0,824	0,941
H^*	0,606	0,622	0,650	0,689	0,739	0,799	0,871	0,954
H_{yp}^*	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
P^*	0,078	0,159	0,246	0,344	0,455	0,583	0,732	0,904

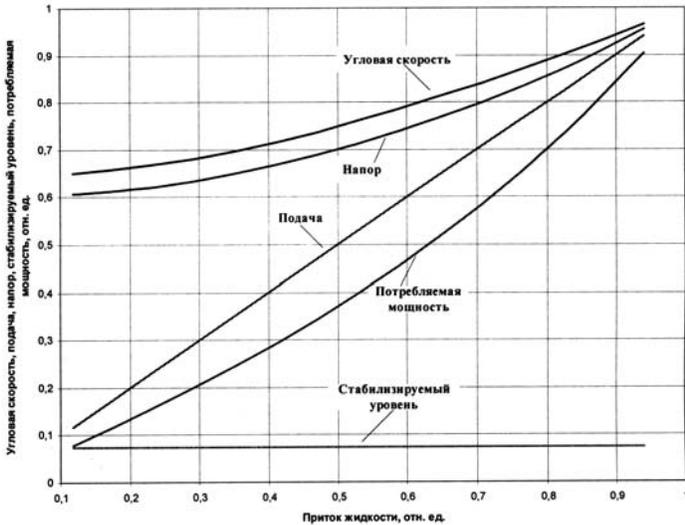


Рис. 6.11. Графические зависимости угловой скорости, напора и подачи насоса, стабилизируемого уровня и потребляемой мощности насосного агрегата от притока жидкости в резервуар

при стабилизации уровня жидкости в зумпфе $H_{ур} = 3,0$ м. Величина потребляемой электроэнергии в системе частотно-регулируемого электропривода со стабилизацией уровня жидкости в зумпфе

$$W_2 = P_2 \cdot T_p = 25,06 \cdot 8050 = 201733 \text{ кВтчас/год.}$$

Для случая, когда используется нерегулируемый электропривод, процессы поддержания уровня жидкости в зумпфе осуществляются ручным способом посредством дросселирования на трубопроводах с помощью задвижек. В этом случае можно считать, что насос работает с номинальными значениями напора и подачи, а потребляемая мощность составляет:

$$P_1 = \frac{\rho \cdot Q_{ном} \cdot H_{ном}}{102 \cdot \eta_{н.ном} \cdot \eta_{дв.ном}} = \frac{1100 \cdot 0,0472 \cdot 40}{102 \cdot 0,67 \cdot 0,925} = 32,87 \text{ кВт.}$$

Потребление электроэнергии при использовании нерегулируемого электропривода насоса

$$W_1 = P_1 \cdot T_p = 32,87 \cdot 8050 = 264603 \text{ кВтчас/год.}$$

Экономия электроэнергии при использовании частотно-регулируемого электропривода в системе стабилизации уровня жидкости в зумпфе

$$\Delta W_{эл} = W_1 - W_2 = 264603 - 201733 = 62870 \text{ кВтчас/год.}$$

6.4. ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯТОРНОГО АГРЕГАТА С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО СХЕМЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

На основании структурной схемы рис. 5.3 составляется функциональная схема модели вентиляторного агрегата с использованием программного продукта MatLab в среде Simulink.

Вычисление подачи, статического давления, КПД, мощности, статического момента сопротивления вентилятора и потребляемой электроэнергии вентиляторным агрегатом производится с помощью зависимостей, полученных для расчета рабочих

параметров вентилятора при переменной угловой скорости рабочего колеса. Модель строится таким образом, чтобы обеспечить задание различных исходных данных для возможности моделирования различных вентиляторов. Для визуального восприятия модели удобно вычислять каждый из параметров с помощью подсистем (блоки Subsystem).

Функциональная схема модели вентиляторного агрегата с численными значениями для вентилятора ВЦ-25М и двигателем АКЗ-12-52-8 приведена на рис. 6.12. Модель может быть использована для любого вентиляторного агрегата при соответствующих исходных данных, вносимых в модель.

Все параметры для данной модели рассчитаны в примере расчета п. 5.4.

Модель вентиляторного агрегата состоит из модели электропривода по схеме АВК и модели вентилятора. Модель электропривода содержит: входное устройство задания скорости (Constant2); модель ведомого сетью инвертора, реализованный на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn1); сумматор противо-ЭДС инвертора и внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; передаточная функция звена момента, реализованная на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn); сумматор электромагнитного момента двигателя и отрицательного момента статического сопротивления, создаваемого вентилятором; звено скорости двигателя, реализованное с помощью интегратора (Integrator) и усилителя (Gain); сумматор угловых скоростей двигателя и магнитного поля статора; устройство задания угловой скорости магнитного поля статора (Constant1); внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя реализована с использованием усилителя (Gain1).

Выходная координата модели электропривода по схеме АВК — угловая скорость, регистрируется с помощью дисплея (Display) и осциллографа (Scope).

Модель вентилятора представлена двумя подсистемами (Subsystem и Subsystem1). Входные (исходные) параметры вентилятора реализованы на пяти источниках постоянного воздействия (Constant). Отображение численных значений величин,

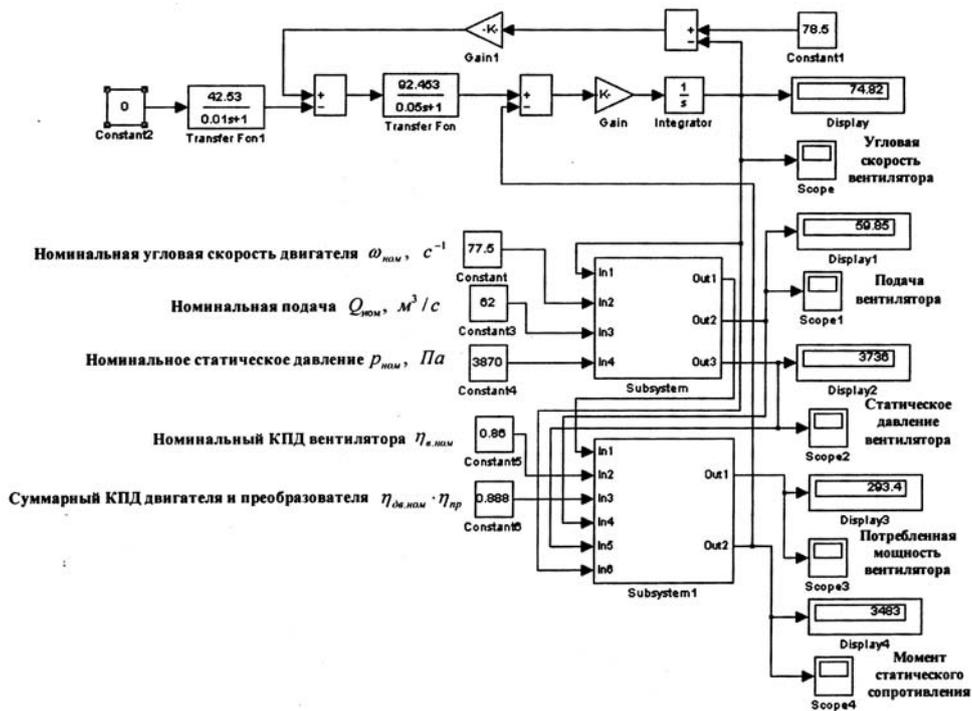


Рис. 6.12. Функциональная схема модели вентиляторного агрегата с электроприводом системы асинхронно-вентильного каскада

вычисленных в модели, осуществляется с помощью блоков Display, а динамика изменения координат с помощью осциллографов Scope:

- подача вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$ — Display1 и Scope1;
- статическое давление вентилятора, Па — Display2 и Scope2;
- потребляемая мощность вентилятора, кВт — Display3 и Scope3;
- момент статического сопротивления вентилятора, Нм — Display4 и Scope4.

С помощью подсистемы Subsystem реализованы зависимости подачи и статического давления вентилятора от угловой скорости вентилятора по формулам (5.7) и (5.8).

Подсистема представлена на рис. 6.13.

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem:

- вход In 1 — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- вход In 2 — задается номинальная угловая скорость $\omega_{\text{ном}}$ электродвигателя;
- вход In 3 — задается номинальная подача вентилятора $Q_{\text{ном}}$;
- вход In 4 — задается номинальное статическое давление вентилятора $p_{\text{ном}}$;

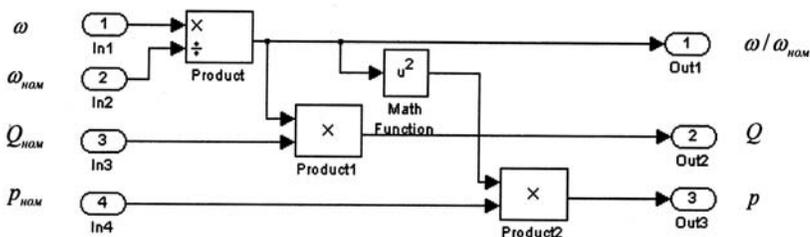


Рис. 6.13. Функциональная схема модели по формулам (5.7) и (5.8) (Subsystem)

- выход Out 1 — вычисленное относительное значение угловой скорости двигателя $\omega/\omega_{ном}$, используется в дальнейших расчетах модели;
- выход Out 2 — вычисленная величина подачи вентилятора Q ;
- выход Out 3 — вычисленная величина статического давления вентилятора p .

С помощью подсистемы Subsystem 1 реализованы зависимости КПД, активной мощности вентилятора, потребляемой мощности вентиляторным агрегатом и статического момента сопротивления вентилятора от угловой скорости.

Для вычисления КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии вентиляторным агрегатом используются зависимости (5.9), (5.10), (5.11) и (5.14).

Подсистема Subsystem1 вычисления зависимостей представлена на рис. 6.14.

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem1:

- вход In 1 — подается вычисленная относительная угловая скорость с выхода Out 1 Subsystem;
- вход In 2 — задается паспортный (номинальный) КПД вентилятора $\eta_{в.ном}$;
- вход In 3 — задается произведение номинального КПД двигателя и преобразователя $\eta = \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}$;
- вход In 4 — подается вычисленная подача вентилятора Q с выхода Out 1 Subsystem;
- вход In 5 — подается вычисленное статическое давление вентилятора p с выхода Out 3 Subsystem;
- вход In 6 — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- выход Out 1 — вычисленная величина потребляемой активной мощности P ;
- выход Out 2 — вычисленная величина момента статического сопротивления вентилятора M_c .

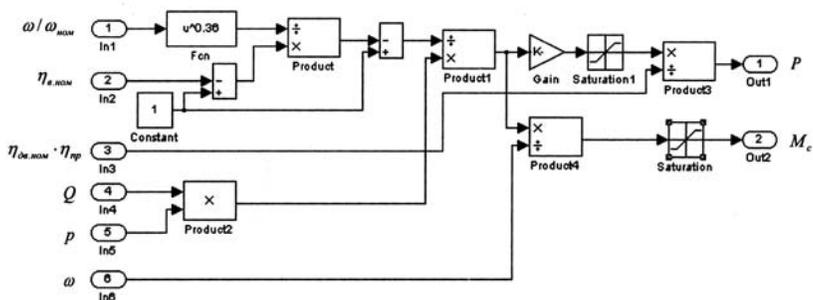


Рис. 6.14. Функциональная схема модели по формулам (5.9), (5.10), (5.11) и (5.14) (Subsystem 1)

Для настройки ряда параметров в подсистеме Subsystem1 необходимо руководствоваться следующими соображениями:

- коэффициент передачи усилителя Gain выбирается из условия перевода единицы измерения мощности из Ватт в килоВатты, т.е.

$$K_{Gain} = 0,001;$$

- настройка блока ограничения координат момента статического сопротивления Saturation производится в следующей последовательности:

- вычисляется номинальный момент статического сопротивления для рассматриваемого примера

$$M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot P_{ном}}{\eta_{в.ном} \cdot \omega_{ном}} = \frac{62 \cdot 3870}{0,86 \cdot 77,5} = 3600 \text{ Нм.}$$

- верхний предел ограничения в Saturation устанавливается несколько больше вычисленной величины $M_{в.ном}$, т.е. 4000 Нм, а нижний предел равен нулю.
- настройка блока ограничения координат мощности Saturation1 производится по номинальной мощности двигателя, т.е. верхний предел ограничения Saturation1 устанавливается 320 кВт для рассматриваемого примера, а нижний предел равен нулю.

С помощью модели можно решать различные задачи, связанные с режимами регулирования вентиляторной установки, энергопотребления и т.п.

Рассмотрим вопросы режима работы вентиляторной установки. В соответствии с данными, приведенными в примере п.5.4, рассмотрим, как изменяются параметры вентиляторной установки при регулировании угловой скорости вентиляторного агрегата в пределах рабочей области ($p_{\min} = 1600$ Па, $\omega_{\min} = 49,8$ с⁻¹). Для этого, изменяя сигнал задания по скорости (Constant2), фиксируем численные значения параметров на Display. Полученные данные приведены в табл. 6.5. Для сопоставления параметров, их данные приведены в относительных единицах, где в качестве базовых параметров используются номинальные величины по угловой скорости, подаче и статическому давлению. Базовая величина потребляемой мощности для рассматриваемого примера

$$P_b = \frac{Q_{\text{ном}} \cdot p_{\text{ном}}}{1000 \cdot \eta_{\text{в.ном}} \cdot \eta_{\text{дв.ном}} \cdot \eta_{\text{пр}}} = \frac{62 \cdot 3670}{1000 \cdot 0,86 \cdot 0,925 \cdot 0,96} = 314,2 \text{ кВт.}$$

Более наглядное представление о режимах регулирования можно получить в графическом виде. Графические зависимости подачи, статического давления и потребляемой мощности от угловой скорости насоса по данным табл. 6.5 представлены на рис. 6.15.

Особенностью электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада является более мягкая механическая характеристика по сравнению с естественной. Поэтому такая система, при максимальном угле опережения инвертора $\beta_{u,\max}$, не достигает номинальной угловой скорости двигателя. Это видно по графическим зависимостям рис. 6.15, где параметры регулирования (подача и статическое давление) в относительных единицах не достигают единицы. Для достижения номинальных параметров регулирования следует выбирать электродвигатель на повышенное число оборотов по сравнению с паспортным числом оборотов вентиляторной установки. Например, вентилятор главного проветривания ВЦ-25М имеет номинальную частоту

Результаты моделирования вентиляторного агрегата

$U_3, В$	0	1	2	3	4	5	6,5
$\omega, с^{-1}$	74,92	71,12	67,29	63,45	59,58	55,71	49,86
$Q, м^3/с$	59,93	56,9	53,83	50,78	47,67	44,56	39,89
$p, Па$	3616	3259	2918	2594	2288	1999	1602
$P, кВт$	284,4	244,1	207,4	174,5	145,1	119,1	86,06
ω^*	0,967	0,918	0,868	0,819	0,769	0,719	0,643
Q^*	0,967	0,918	0,868	0,819	0,769	0,719	0,643
p^*	0,934	0,842	0,754	0,670	0,591	0,517	0,414
P^*	0,905	0,777	0,660	0,555	0,462	0,379	0,274

вращения рабочего колеса 750 об/мин. В системе АВК приводной двигатель для него может быть выбран на синхронное число оборотов 1000 об/мин. При этом возникает возможность создания режима работы вентиляторной установки сверх номинальных параметров.

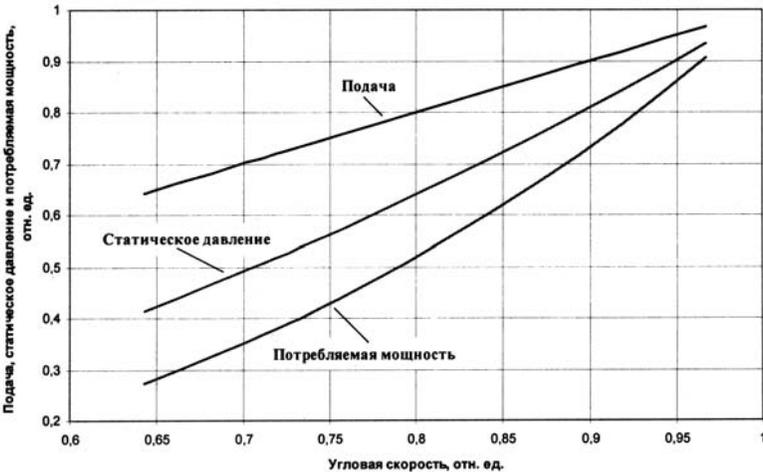


Рис. 6.15. Графические зависимости подачи, статического давления и потребляемой мощности вентиляторного агрегата от угловой скорости рабочего колеса

На модели удобно определять параметры энергоэффективности при регулировании режимов работы вентиляторной установки, если известен месячный или годовой график изменения депрессии. Возможен вариант экспертной оценки среднего статического давления за год. В исходных данных п. 5.4 определено, что среднее статическое давление составляет $p_{cp} = 2950$ Па при времени работы вентилятора главного проветривания 8760 час/год. С помощью модели определяем величину сигнала управления инвертора $U_3 = 1,904$ В (Constant2), обеспечивающего среднее статическое давление. Потребляемая мощность вентиляторного агрегата при этом составляет $P_2 = 210,8$ кВт, а средняя подача вентилятора $Q_{cp} = 54,13$ м³/с. Величина потребляемой электроэнергии в системе электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада

$$W_2 = P_2 \cdot T_p = 210,8 \cdot 8760 = 1846608 \text{ кВтчас/год.}$$

Для случая, когда используется нерегулируемый электропривод, отсутствуют процессы регулирования режимов работы вентиляторной установки. В этом случае можно считать, что вентилятор работает с номинальными значениями подачи и статического давления, а потребляемая мощность составляет:

$$P_1 = \frac{Q_{ном} \cdot p_{ном}}{1000 \cdot \eta_{в.ном} \cdot \eta_{об.ном}} = \frac{62 \cdot 3870}{1000 \cdot 0,86 \cdot 0,925} = 301,6 \text{ кВт.}$$

Потребление электроэнергии при использовании нерегулируемого электропривода вентилятора главного проветривания

$$W_1 = P_1 \cdot T_p = 301,6 \cdot 8760 = 2642016 \text{ кВтчас/год.}$$

Экономия электроэнергии при использовании электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада

$$\Delta W_{эл} = W_1 - W_2 = 2642016 - 1846608 = 795408 \text{ кВтчас/год.}$$

Годовая выработка воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p \cdot 3600 = 62 \cdot 8760 \cdot 3600 = 1955232 \text{ тыс. м}^3/\text{год};$$

- при регулируемом варианте

$$Q_2 = Q_{ср} \cdot T_p \cdot 3600 = 54,13 \cdot 8760 \cdot 3600 = 1707043,6 \text{ тыс. м}^3/\text{год}.$$

Определяется удельное потребление электроэнергии на выработку воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$q_1 = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{2642016}{1955232} = 1,351 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3;$$

- при регулируемом варианте

$$q_2 = \frac{W_2}{Q_2} = \frac{1846608}{1707043,6} = 1,082 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3.$$

Результаты энергетических расчетов, выполненные с помощью модели электропривода по схеме асинхронно-вентильного каскада насосного агрегата, являются более точными по сравнению с расчетами п. 5.4, так как учитывается переменный характер момента статического сопротивления вентилятора в зависимости от угловой скорости вентилятора.

6.5. ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЯТОРНОГО АГРЕГАТА С ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

На основании структурной схемы рис. 5.2 составляется функциональная схема модели вентиляторного агрегата с использованием программного продукта MatLab в среде Simulink.

Вычисление подачи, статического давления, КПД, мощности, статического момента сопротивления вентилятора и потребляемой электроэнергии вентиляторным агрегатом производится с помощью зависимостей, полученных для расчета рабочих параметров вентилятора при переменной угловой скорости ра-

бочего колеса. Модель строится таким образом, чтобы обеспечить задание различных исходных данных для возможности моделирования различных вентиляторов. Для визуального восприятия модели удобно вычислять каждый из параметров с помощью подсистем (блоки Subsystem).

Функциональная схема модели вентиляторного агрегата с численными значениями для вентилятора ВМ-12М и двигателем ВРМ280S4 приведена на рис. 6.16. Модель может быть использована для любого вентиляторного агрегата при соответствующих исходных данных, вносимых в модель.

Все параметры для данной модели рассчитаны в примере расчета п. 5.5.

Модель вентиляторного агрегата состоит из модели частотно-регулируемого электропривода и модели вентилятора. Модель электропривода содержит: входное устройство задания скорости (Constant2); модель преобразователя частоты, реализованный на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn1); сумматор ЭДС преобразователя частоты и внутренней обратной связи по ЭДС двигателя; передаточная функция звена момента, реализованная на апериодическом звене первого порядка (Transfer Fcn); сумматор электромагнитного момента двигателя и отрицательного момента статического сопротивления, создаваемого вентилятором; звено скорости двигателя, реализованное с помощью интегратора (Integrator) и усилителя (Gain); внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя реализована с использованием усилителя (Gain1).

Выходная координата модели частотно-регулируемого электропривода — угловая скорость, которая регистрируется с помощью дисплея (Display) и осциллографа (Scope).

Модель вентилятора представлена двумя подсистемами (Subsystem и Subsystem1). Входные (исходные) параметры вентилятора реализованы на пяти источниках постоянного воздействия (Constant). Отображение численных значений величин, вычисленных в модели, осуществляется с помощью блоков Display, а динамику изменения координат с помощью осциллографов Scope:

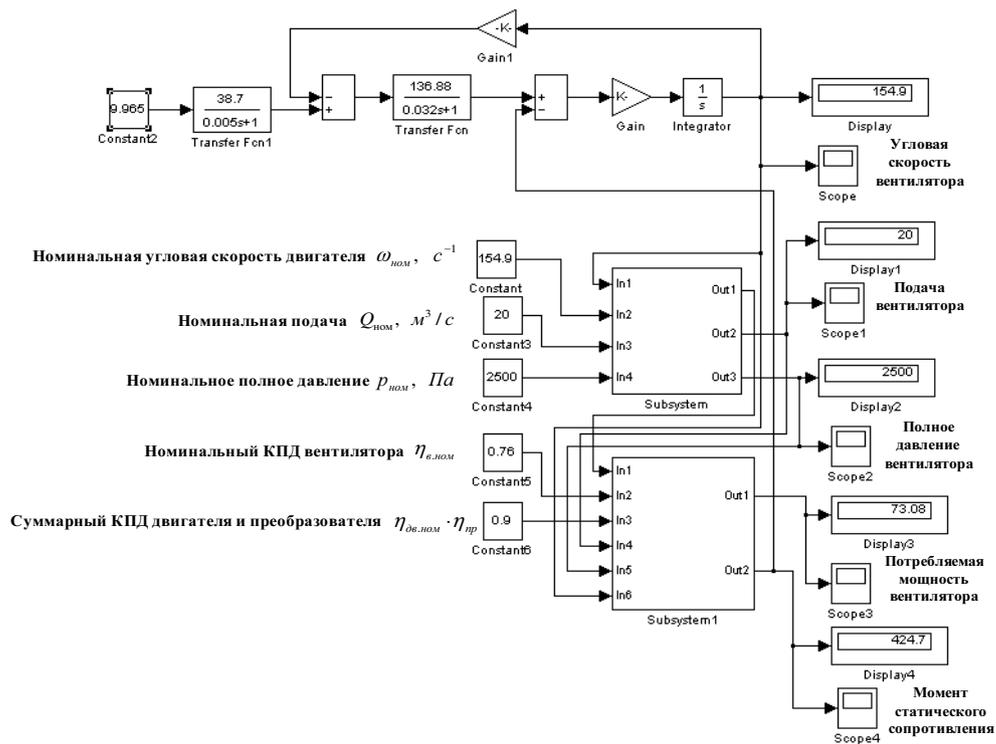


Рис. 6.16. Функциональная схема модели вентиляторного агрегата с частотно-регулируемым электроприводом

- подача вентилятора, м³/с — Display1 и Scope1;
- полное давление вентилятора, Па — Display2 и Scope2;
- потребляемая мощность вентилятора, кВт — Display3 и Scope3;
- момент статического сопротивления вентилятора, Нм — Display4 и Scope4.

С помощью подсистемы Subsystem реализованы зависимости подачи и статического давления вентилятора от угловой скорости вентилятора по формулам (5.7) и (5.8).

Подсистема представлена на рис. 6.17.

На схеме набора блоков подсистемы Subsystem:

- вход In 1 — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;
- вход In 2 — задается номинальная угловая скорость $\omega_{ном}$ электродвигателя;
- вход In 3 — задается номинальная подача вентилятора $Q_{ном}$;
- вход In 4 — задается номинальное полное давление вентилятора $p_{ном}$;
- выход Out 1 — вычисленное относительное значение угловой скорости двигателя $\omega/\omega_{ном}$, используется в дальнейших расчетах модели;
- выход Out 2 — вычисленная величина подачи вентилятора Q ;
- выход Out 3 — вычисленная величина полного давления вентилятора p .

С помощью подсистемы Subsystem 1 реализованы зависимости КПД, активной мощности вентилятора, потребляемой мощности вентиляторным агрегатом и статического момента сопротивления вентилятора от угловой скорости.

Для вычисления КПД, мощности, статического момента насоса и потребляемой электроэнергии вентиляторным агрегатом используются зависимости (5.9), (5.10), (5.11) и (5.14).

Подсистема Subsystem1 вычисления зависимостей представлена на рис. 6.18.

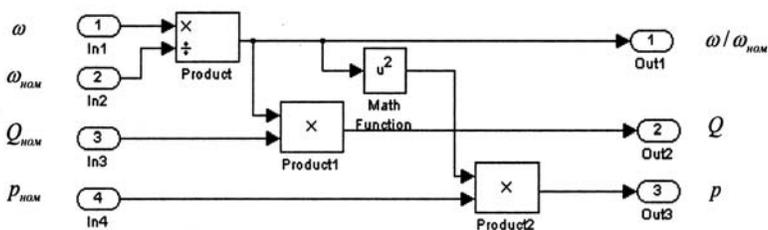


Рис. 6.17. Функциональная схема модели по формулам (5.7) и (5.8) (Subsystem)

На схеме набора блоков подсистемы (Subsystem1):

- вход In 1 — подается вычисленная относительная угловая скорость с выхода Out 1 Subsystem — вход In 2 — задается паспортный (номинальный) КПД вентилятора $\eta_{в.ном}$;
- вход In 3 — задается произведение номинального КПД двигателя и преобразователя $\eta = \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}$;
- вход In 4 — подается вычисленная подача вентилятора Q с выхода Out 1 Subsystem;
- вход In 5 — подается вычисленное полное давление вентилятора p с выхода Out 3 Subsystem;
- вход In 6 — подается угловая скорость ω с выхода модели электропривода;

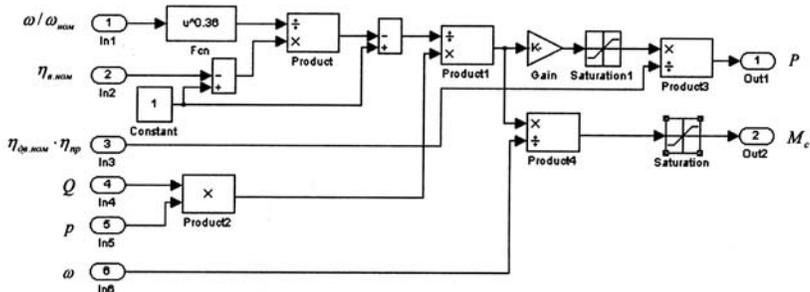


Рис. 6.18. Функциональная схема модели по формулам (5.9), (5.10), (5.11) и (5.14) (Subsystem1)

- выход Out 1 — вычисленная величина потребляемой активной мощности P ;
- выход Out 2 — вычисленная величина момента статического сопротивления вентилятора M_c .

Для настройки ряда параметров в подсистеме Subsystem 1 необходимо руководствоваться следующими соображениями:

- коэффициент передачи усилителя Gain выбирается из условия перевода единицы измерения мощности из Ватт в килоВатты, т.е.

$$K_{Gain} = 0,001 ;$$

- настройка блока ограничения координат момента статического сопротивления Saturation производится в следующей последовательности:

- вычисляется номинальный момент статического сопротивления для рассматриваемого примера

$$M_{в.ном} = \frac{Q_{ном} \cdot P_{ном}}{\eta_{в.ном} \cdot \omega_{ном}} = \frac{20 \cdot 2500}{0,76 \cdot 154,9} = 425 \text{ Нм.}$$

- верхний предел ограничения в Saturation устанавливается несколько больше вычисленной величины $M_{в.ном}$, т.е. 450 Нм, а нижний предел равен нулю.
- настройка блока ограничения координат мощности Saturation1 производится по номинальной мощности двигателя, т.е. верхний предел ограничения Saturation1 устанавливается 110 кВт для рассматриваемого примера, а нижний предел равен нулю.

С помощью модели можно решать различные задачи, связанные с режимами регулирования вентиляторной установки, энергопотребления и т.п.

Рассмотрим вопросы режима работы вентилятора местного проветривания. В соответствии с данными, приведенными в примере п. 5.5, рассмотрим, как изменяются параметры вентиляторной установки при регулировании угловой скорости вентиляторного агрегата. Для этого, изменяя сигнал задания по ско-

рости (Constant2), фиксируем численные значения параметров на Display. Полученные данные приведены в табл. 6.6. Для сопоставления параметров, их данные приведены в относительных единицах, где в качестве базовых параметров используются номинальные величины по угловой скорости, подаче и полному давлению. Базовая величина потребляемой мощности для рассматриваемого примера

$$P_{\sigma} = \frac{Q_{ном} \cdot P_{ном}}{1000 \cdot \eta_{в.ном} \cdot \eta_{дв.ном} \cdot \eta_{пр}} = \frac{20 \cdot 2500}{1000 \cdot 0,76 \cdot 0,935 \cdot 0,96} = 73,3 \text{ кВт.}$$

Более наглядное представление о режимах регулирования можно получить в графическом виде. Графические зависимости подачи, статического давления и потребляемой мощности от угловой скорости насоса по данным табл. 6.6 представлены на рис. 6.19.

Особенностью частотно-регулируемого электропривода является возможность обеспечения параметров регулирования сверх номинальных значений. Это видно по графическим зависимостям рис. 6.19, где параметры регулирования (подача и полное давление) в относительных единицах превышают единицу.

Таблица 6.6

Результаты моделирования вентиляторного агрегата

$U, \text{ В}$	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5
$\omega, \text{ с}^{-1}$	23,46	46,87	70,22	93,52	116,3	140,0	163,1
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	3,029	6,051	9,066	12,07	15,08	18,07	21,06
$p, \text{ Па}$	57,35	228,8	513,7	911,3	1421	2041	2773
$P, \text{ кВт}$	0,3666	2,439	7,6	17,17	32,41	54,58	84,88
ω^*	0,151	0,303	0,453	0,604	0,751	0,904	1,053
Q^*	0,151	0,303	0,453	0,604	0,751	0,904	1,053
p^*	0,023	0,092	0,205	0,365	0,568	0,816	1,109
P^*	0,005	0,033	0,104	0,234	0,442	0,745	1,158

На модели удобно определять параметры энергоэффективности при регулировании режимов работы вентиляторной ус-

тановки, если известен суточный или месячный график изменения депрессии. В исходных данных п. 5.5 определено требуемое давление вентиляторной установки местного проветривания в течение суток (табл. 5.5) при времени работы вентиляторного агрегата 7500 час/год. С помощью модели определяем величину сигнала управления (Constant2), обеспечивающего полное давление в соответствии с данными табл. 5.5. Определяются подача вентилятора на мониторе Display1, потребляемая мощность вентиляторного агрегата на мониторе Display3. Вычисляется потребляемая электроэнергия на i -м интервале времени по формуле $W_i = P_i \cdot T_i$. Результаты по данным моделирования и вычисления приведены в табл. 6.7.

Просуммировав потребленную электроэнергию по каждому интервалу времени, получаем суточное электропотребление $W_{сут} = 1046$ кВтчас/сут, тогда годовое потребление

$$W_2 = \frac{W_{сут} \cdot T_p}{24} = \frac{1046 \cdot 7500}{24} = 326875 \text{ кВтчас/год.}$$

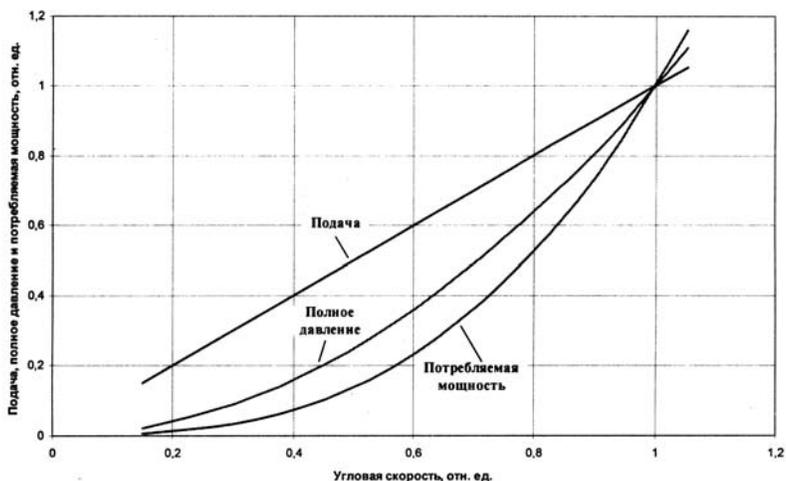


Рис. 6.19. Графические зависимости подачи, полного давления и потребляемой мощности вентиляторного агрегата от угловой скорости рабочего колеса

**Результаты моделирования вентиляторного агрегата
и вычисления потребляемой электроэнергии**

Время суток, час	0—4	4—8	8—12	12—16	16—20	20—24
Полное давление, Па	1500	900	2200	2300	1800	1600
Необходимый сигнал задания ПЧ, В	7,708	5,963	9,346	9,557	8,448	7,961
Подача, м ³ /с	15,49	12,0	18,76	19,18	16,97	16,0
Потребляемая мощность, кВт	35,04	16,87	60,8	64,82	45,54	38,43
Потребляемая электроэнергия, кВтчас	140,16	67,48	243,2	259,28	182,16	153,72

Для случая, когда используется нерегулируемый электропривод, процессы регулирования режимов работы вентиляторной установки отсутствуют. В этом случае можно считать, что вентилятор работает с номинальными значениями подачи и полного давления, а потребляемая мощность составляет:

$$P_{ном} = \frac{Q_{ном} \cdot p_{ном}}{1000 \cdot \eta_{в.ном} \cdot \eta_{дв}} = \frac{20 \cdot 2500}{1000 \cdot 0,76 \cdot 0,935} = 70,4 \text{ кВт.}$$

Годовое потребление электроэнергии при нерегулируемом варианте

$$W_1 = P_{ном} \cdot T_p = 70,4 \cdot 7500 = 528000 \text{ кВтчас/год.}$$

Годовая экономия электроэнергии

$$\Delta W_{эл} = W_1 - W_2 = 528000 - 326875 = 201125 \text{ кВтчас/год.}$$

Годовая выработка воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$Q_1 = Q_{ном} \cdot T_p \cdot 3600 = 20 \cdot 7500 \cdot 3600 = 540000 \text{ тыс. м}^3/\text{год};$$

- при регулируемом варианте

$$Q_2 = Q_{ср} \cdot T_p \cdot 3600 = 16,4 \cdot 7500 \cdot 3600 = 442800 \text{ тыс. м}^3/\text{год},$$

где $Q_{cp} = \frac{\sum Q_i}{i} = \frac{98,4}{6} = 16,4 \text{ м}^3/\text{с}$; $\sum Q_i = 98,4 \text{ м}^3/\text{с}$ — суммарная подача по каждому интервалу времени (табл. 6.7); $i = 6$ — количество интервалов времени за сутки по данным табл. 6.7.

Определяется удельное потребление электроэнергии на выработку воздуха вентиляторной установкой:

- при нерегулируемом варианте

$$q_1 = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{528000}{540000} = 0,978 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3;$$

- при регулируемом варианте

$$q_2 = \frac{W_2}{Q_2} = \frac{326875}{442800} = 0,738 \text{ кВтчас}/1000 \text{ м}^3.$$

Результаты энергетических расчетов, выполненные с помощью модели частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата, являются более точными по сравнению с расчетами п. 5.5, так как учитывается переменный характер момента статического сопротивления вентилятора в зависимости от угловой скорости вентилятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асинхронные* двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. — М.: Энергоиздат, 1982.
2. *Белозоров В.Я., Луговской М.В.* Расчет систем водоснабжения с применением вычислительной техники. — М.: Колос, 1973.
3. *Борисов Б.Д., Костюк В.С., Фащиленко В.Н.* Частотнотоковое управление асинхронным электроприводом привода добычных машин. — Известия вузов. Горный журнал, — № 8, 1981, с. 95—97.
4. *Вахвахов Г.Г.* Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. — М.: Стройиздат, 1989.
5. *Герман-Галкин С.Г.* Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. — СПб.: КОРОНА принт, 2001.
6. *Гришко А.П., Шелоганов В.И.* Стационарные машины и установки: Учебное пособие для вузов. — М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004.
7. *Карелин В.Я., Минаев А.В.* Насосы и насосные станции. — М.: Стройиздат, 1986.
8. *Мартынов М.В., Переслегин Н.Г.* Автоматизированный электропривод в горной промышленности. — М.: Недра, 1977.
9. *Онищенко Г.Б.* Асинхронный вентильный каскад. — М.: Энергия, 1967.
10. *Рекомендации* по применению регулируемого электропривода в системах автоматического управления водопроводных и канализационных насосных установках. — М.: ВНИИ ВОДГЭО, 1987.
11. *Сандлер А.С., Сарбатов Р.С.* Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. — М.: Энергия, 1974.
12. *Справочник* по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. *Струве Э.Э., Дик И.П., Старцев Г.С.* Вентиляторы и насосы. — М.: Машгиз, 1955.
14. *Товстолес Ф.П.* Гидравлика и насосы. Часть III. — М.: ОНТИ, 1938.
15. *Электротехнический* справочник. Т1. / Под общ. ред. П.Г. Грудинского и др. — М.: Энергия, 1974.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
<i>Глава 1.</i>	
Режимы работы турбомашин	7
1.1. Общие сведения о насосных, вентиляторных и компрессорных установках	9
1.1.1. Насосные установки	9
1.1.2. Воздуходувные машины	11
1.2. Рабочие характеристики турбомашин и трубопроводов (воздуховодов)	12
1.3. Режимы работы турбомашин	15
1.3.1. Режимы работы насосных установок	15
1.3.2. Режимы работы воздуходувных машин	17
1.3.3. Способы управления режимами работы насосных установок	18
1.3.4. Способы управления режимами работы вентиляторных установок	23
<i>Глава 2.</i>	
Регулируемый электропривод турбомашин	25
2.1. Общие сведения	27
2.2. Частотно-регулируемый электропривод	29
2.3. Электропривод с вентильным двигателем	36
2.4. Электропривод по схеме асинхронно-вентильного каскада	38
2.5. Параметрическое регулирование и регулирование частоты вращения путем изменения числа пар полюсов электродвигателя ...	41
2.6. Регулируемые свойства систем электроприводов	43
<i>Глава 3.</i>	
Регулируемый электропривод насосных установок	49
3.1. Обоснование выбора регулируемого электропривода насосных установок	51
3.2. Расчет рабочих параметров насоса при переменной угловой скорости рабочего колеса	53
3.3. Примеры расчета рабочих параметров насоса при изменении угловой скорости	60
3.3.1. Расчет рабочих параметров насоса	60
3.3.2. Расчет потребления электроэнергии насосным агрегатом	64
3.3.3. Расчет механической характеристики насоса	67

3.4. Расчет статических характеристик асинхронного электродвигателя при частотном управлении	70
3.4.1. Расчет параметров схемы замещения асинхронного двигателя	70
3.4.2. Расчет статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором напряжения при вентиляторном характере момента статической нагрузки	77
3.4.3. Расчет статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором тока	81
3.5. Расчет и выбор элементов силовой схемы электропривода системы «асинхронно-вентильный каскад»	83
3.5.1. Расчет и выбор согласующего трансформатора	85
3.5.2. Расчет параметров обмоток асинхронного двигателя с фазным ротором	87
3.5.3. Расчет и выбор диодов неуправляемого выпрямителя и тиристоров инвертора	89
3.5.4. Расчет и выбор сглаживающего дросселя (реактора)	92
3.6. Расчет статических характеристик асинхронно-вентильного каскада	93
3.7. Примеры расчета статических характеристик регулируемых электроприводов насосных установок	97
3.7.1. Пример расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя при частотном управлении	97
3.7.2. Пример расчета статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором напряжения при вентиляторном характере момента статической нагрузки	101
3.7.3. Пример расчета статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода с автономным инвертором тока	108

Глава 4.

Частотно-регулируемый автоматизированный электропривод насосных установок	115
4.1. Общие положения	117
4.2. Стабилизация давления (напора) в системе подачи жидкости ..	118
4.3. Структурная схема насосного агрегата со стабилизацией давления в гидросистеме	123
4.3.1. Общие положения формирования структурной схемы насосного агрегата	123
4.3.2. Расчет параметров структурной схемы частотно-регулируемого электропривода со стабилизацией давления	124
4.3.3. Расчет параметров структурной схемы насоса и настройка контура стабилизации давления	128

4.4. Стабилизация уровня жидкости в резервуарах и скважинах	130
4.5. Структурная схема насосного агрегата со стабилизацией уровня жидкости в резервуарах и скважинах	134
4.6. Примеры расчета частотно-регулируемого автоматизированного электропривода насосных установок	136
4.6.1. Пример расчета автоматизированного электропривода со стабилизацией давления (напора) в гидросистеме.....	136
4.6.2. Пример расчета автоматизированного электропривода со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре	141
4.7. Разработка принципиальных электрических схем автоматизированного частотно-регулируемого электропривода насосных установок	150

Глава 5.

Регулируемый электропривод вентиляторных установок	155
5.1. Обоснование выбора регулируемого электропривода вентиляторных установок	157
5.2. Расчет рабочих параметров вентилятора при переменной угловой скорости рабочего колеса	162
5.3. Структурная схема вентиляторного агрегата	168
5.3.1. Структурная схема вентиляторного агрегата с частотно- регулируемым электроприводом	168
5.3.2. Структурная схема вентиляторного агрегата с электроприводом по схеме асинхронно-вентильного каскада .	170
5.4. Примеры расчета электропривода системы асинхронно-вентильного каскада для вентилятора главного проветривания	174
5.4.1. Пример расчета параметров электропривода и выбора элементов силовой схемы	175
5.4.2. Пример расчета статических характеристик электропривода и вентилятора	180
5.4.3. Пример расчета параметров структурной схемы электропривода вентиляторной установки	186
5.4.4. Расчет потребления электроэнергии вентиляторным агрегатом	188
5.5. Примеры расчета частотно-регулируемого электропривода вентилятора местного проветривания	190
5.5.1. Пример расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя	191
5.5.2. Пример расчета параметров структурной схемы частотно-регулируемого электропривода	195
5.5.3. Пример расчета статических характеристик асинхронного частотно-регулируемого электропривода вентиляторного агрегата	197

5.5.4. Расчет потребления электроэнергии вентиляторным агрегатом	203
5.6. Разработка принципиальных электрических схем регулируемого электропривода вентиляторных установок	207
Глава 6.	
Моделирование насосных и вентиляторных агрегатов	211
6.1. Общие сведения о пакете MatLab	213
6.2. Визуальное моделирование насосного агрегата в структуре со стабилизацией давления в гидросистеме	215
6.3. Визуальное моделирование насосного агрегата в структуре со стабилизацией уровня жидкости в резервуаре	228
6.4. Визуальное моделирование вентиляторного агрегата с электроприводом по схеме асинхронно-вентильного каскада	237
6.5. Визуальное моделирование вентиляторного агрегата с частотно-регулируемым электроприводом	246
Список литературы	256

Валерий Николаевич **Фащиленко**

**РЕГУЛИРУЕМЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД
НАСОСНЫХ
И ВЕНТИЛЯТОРНЫХ
УСТАНОВОК
ГОРНЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

Режим выпуска «стандартный»

Выпущено в авторской редакции

Компьютерная верстка
и подготовка оригинал-макета *Е.В. Коробова*
Дизайн серии *Е.Б. Капралова*
Зав. производством *Н.Д. Урбушуккина*

Подписано в печать 12.11.2010. Формат 60x90/16.
Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Times». Печать
офсетная. Усл. печ. л. 16,5. Тираж 1000 экз.
Изд. № 2089. Заказ 1056

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»

Отпечатано в ордена Трудового Красного Знамени
типографии им. И.И. Скворцова-Степанова
ФГУП Издательство «Известия» Управления делами
Президента Российской Федерации
Генеральный директор *Э.А. Галумов*
127994, ГСП-4, г. Москва, К-6, Пушкинская пл., д. 5
e-mail: izd.izv@ru.net



119991 Москва,
ГСП-1, Ленинский проспект, 6,
издательство «Горная книга»;
тел. (499) 230-27-80; факс (495) 956-90-40;
тел./факс (495) 737-32-65



К ♦ Н ♦ И ♦ Г ♦ И

**ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА
И ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»**

можно приобрести

- ◆ в киоске Издательства МГГУ (м. «Октябрьская»-кольцевая, Ленинский просп., 6, главный корпус, 2-й этаж);

заказать

- ◆ через систему «Книга—почтой»; заказы в произвольной форме направляйте:

по адресу: **119991 Москва, ГСП-1, Ленинский
проспект, 6, Издательство МГГУ;**

по телефонам: **(499) 230-27-80,
(495) 737-32-65;**

по факсам: **(495) 956-90-40,
(495) 737-32-65;**

по e-mail: **info@gornaya-kniga.ru**

**Распространение книг осуществляют
Издательство МГГУ, издательство «Горная книга»**

**Подробная информация размещена
на сайте www.gornaya-kniga.ru**

СТРУКТУРА АССОЦИАЦИИ «МИР ГОРНОЙ КНИГИ»



*ГИАБ является
ведущим
научно-практическим
журналом
в области горных наук,
геологии, экономики
добывающих отраслей,
высшего горного
образования
и смежных наук*

ГОРНЫЙ

Индекс Роспечати 46466
Индекс Прессы России 20983

ИНФОРМАЦИОННО- АНАЛИТИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ (ГИАБ)

*ГИАБ внесен в список
периодических научных изданий,
рекомендуемых ВАК Минобрания
и науки России для публикации
научных работ соискателей ученой
степени кандидата и доктора наук*

Публикуемые в ГИАБ материалы содержат:

- ◆ статьи ученых высшей школы, НИИ, зарубежных специалистов, руководителей горных предприятий и инженеров;
- ◆ полные тексты докладов ученых на симпозиумах, конференциях, совещаниях;
- ◆ обзоры по защищенным диссертациям в области горного дела и смежных наук;
- ◆ аннотации и рецензии на новые книги в области горного дела;
- ◆ публицистические, исторические и литературные материалы.

ГИАБ освещает работу семинаров ежегодного симпозиума «Неделя горняка».

Периодичность издания 12 номеров в год. Объем каждого номера 424 страницы.

С 2004 г. ГИАБ выпускается в книжном формате, в твердом переплете.

Распространение ГИАБ — преимущественно по подписке.

Возможен предварительный заказ отдельных номеров ГИАБ, выпускаемых в текущем году, а также заказ номеров прошлых лет (с 1992 г.).

По заявкам организаций издаются тематические и региональные выпуски ГИАБ, препринты (брошюры), являющиеся официальным приложением к бюллетеню.

**ПОДПИСКУ И ПРОДАЖУ
ОТДЕЛЬНЫХ НОМЕРОВ
ОСУЩЕСТВЛЯЕТ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»**

*Заявки
с обратным адресом
направляйте по адресу:
119991 Москва,
ГСП-1, Ленинский пр., д. 6,
«Горная книга»*



*Организована подписка
на отдельные выпуски ГИАБ*

Индекс Роспечати 32777

*По вопросам подписки,
получения экземпляров ГИАБ
и издания отдельных выпусков можно также
обращаться по телефонам (499) 230-27-80,
(495) 737-32-65; по факсу (495) 956-90-40
или по e-mail: info@gornaya-kniga.ru*