Г. Б. ОНИЩЕНКО, М. Г. ЮНЬКОВ

ЭЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1972

6П2.1.081
О 58
УДК 621-135-83

Онищенко Г. Б. и Юньков М. Г.

О 58 Электропривод турбомеханизмов. М., «Энергия», 1972.

240 с. с ил.

В книге рассмотрены особенности турбомеханизмов вентиляторов, насосов и турбокомпрессоров — как отдельного класса рабочих машин и определены требования, предъявляемые к их электроприводу Даны анализ систем регулируемого и нерегулируемого электропривода и методические указания по проектированию наиболее перспективных систем Особое внимание обращено на обоснование целесообразности применения регулируемых электроприводов для мощных турбомеханизмов Изложены методы технико-экономического анализа систем электропривода применительно к условиям работы турбомеханизмов

Книга предназначена для инженерно-технических работников проектных и научно-исследовательских организаций, а также для студентов старших курсов электротехнических и электромеханических специальностей

3-30-10
194-72

6П2.1.081

Георгий Борисович Онищенко,
Михаил Григорьевич Юньков

Электропривод турбомеханизмов

Редактор Р. С. Сарбатов
Редактор издательства В И Мучкина
Переплет художника В. И Карпова
Технические редакторы: Г. Г Хацкевич,
Н. А. Галанчева
Корректор Н. В. Лобанова

Сдано в набор 30/VIII 1971 г. Подписано к печати 10/II 1972 г Т-00661
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 12,6 Уч-изд л. 13,61
Тираж 4 000 экз. Цена 84 коп. Зак. 341

Издательство „Энергия". Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР Шлюзовая наб, 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Турбомеханизмы: центробежные насосы, вентиляторы, турбокомпрессоры и другие — отличаются по своим нагрузочным характеристикам и режимам работы от других механизмов, вследствие чего их можно рассматривать с точки зрения условий работы электропривода как специфический класс нагрузочных машин — механизмы с вентиляторной характеристикой. Эти механизмы используются во многих отраслях промышленности в большом количестве.

Это обстоятельство, а также большая энергоемкость определяют необходимость применения для турбомеханизмов наиболее технически целесообразных и экономичных систем электропривода. Разнообразие турбомеханизмов по мощности и условиям их использования вынуждает применять для этих машин различные системы электропривода.

В настоящее время актуальной стала задача создания регулируемых электроприводов для турбомеханизмов, в особенности большой мощности.

Настоящая книга имеет целью привлечь внимание специалистов к практическому решению вопросов, связанных с выбором и проектированием наиболее рациональных систем электропривода для турбомеханизмов.

В первых разделах даются некоторые сведения по теории работы турбомеханизмов, необходимые инженеру-электроприводчику для понимания физических основ работы турбомеханизмов, особенностей их характеристик, режимов эксплуатации, а также для возможности

анализа работы агрегата турбомеханизм—электропривод в целом.

В последующих разделах рассматриваются наиболее перспективные системы электроприводов, оцениваются их достоинства и недостатки применительно к условиям работы турбомеханизмов и даются методические указания по проектированию отдельных систем электропривода. Особое внимание обращено на применение регулируемого электропривода для мощных турбомеханизмов В работе широко использован опыт ВНИИЭлектропривод по проектированию электроприводов различных турбомеханизмов.

Основные энергетические и электромеханические соотношения даны в книге в двух системах единиц СИ и технической (МКГСС).

Главы 1, 2, 3, 6, 7 написаны Г. Б. Онищенко, главы 4, 5 — М. Г. Юньковым.

Авторы весьма признательны рецензенту З. Я. Рабиновичу и редактору Р. С. Сарбатову за сделанные ими ценные замечания и помощь в работе над книгой.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Турбомеханизмы являются машинами массового применения. Достаточно сказать, что около 25% всей электроэнергии, вырабатываемой в стране, расходуется на электропривод насосов, вентиляторов и компрессоров. Техническое совершенство и экономичность электроприводов турбомеханизмов в значительной степени определяют рациональность использования электроэнергии в народном хозяйстве. Под экономичностью электропривода следует понимать не только его минимальную стоимость и высокие энергетические показатели, но и такое качество электропривода, как регулируемость. Высокая экономичность электропривода позволяет турбомеханизмам производить работу, необходимую по технологическим условиям, с наименьшими энергетическими затратами.

Мощность турбомеханизмов лежит в весьма широких пределах — от единиц до десятков тысяч киловатт. Крупнейший насос, используемый в гидротехнических сооружениях ФРГ, имеет синхронный привод мощностью 73 000 *квт* Мощность современных турбокомпрессоров с электромашинным приводом доходит до 18 000 *квт*, а вентиляторов — до 5 000 *квт*. Скорость вращения рабочего колеса турбомеханизмов также совершенно различна: от сравнительно тихоходных (около 100 *об/мин*) вентиляторов крупных градирен до сверхбыстроходных турбокомпрессоров, скорость вращения рабочего колеса которых достигает 20 000 *об/мин*. Однако, несмотря на различие турбомеханизмов по назначению, условиям работы и основным параметрам, их характеристики с точки зрения требований и условий работы электропривода имеют много общего, что позволяет рассматривать турбомеханизмы как отдельный класс нагрузочных механизмов для электропривода.

К основным особенностям турбомеханизмов, с точки зрения условий работы электропривода, относятся:

1) зависимость момента нагрузки и мощности на валу от скорости вращения;

2) длительный режим работы;

3) отсутствие реверсов и торможений;

4) ограниченный диапазон регулирования скорости вращения;

5) отсутствие перегрузок.

Указанные особенности характерны для большинства турбомеханизмов; в отдельных случаях и для турбомеханизмов может потребоваться реверсирование, торможение или глубокое регулирование, но эти требования являются скорее исключением, чем правилом для механизмов этого класса.

До недавнего времени как в нашей стране, так и в зарубежной практике для привода турбомеханизмов применялись почти исключительно нерегулируемые электроприводы на базе синхронного либо асинхронного двигателей. Отказ от регулируемых приводов объясняется главным образом отсутствием в те годы технических средств для создания экономичных, достаточно мощных регулируемых электроприводов с двигателями переменного тока. Конструкторы турбомеханизмов вынуждены были решать при этом задачи регулирования с помощью традиционных аэро- или гидромеханических средств; однако эти способы отличаются большой сложностью либо неэкономичностью. Только для привода испытательных установок в авиационной промышленности (аэродинамические трубы и др.) создавались сложные системы регулируемого электропривода большой мощности, такие, как электромашинные каскады, системы асинхронного привода с частотным управлением от электромашинных преобразователей и др. Следует попутно отметить, что рост требований к испытательным средствам в авиационной промышленности сыграл положительную роль в создании регулируемого электропривода переменного тока большой мощности.

С начала 60-х годов регулируемый привод привлекает все большее внимание конструкторов как средство повышения эксплуатационного к. п. д. установок, т. е. экономии электроэнергии, и как средство регулирования тех производственных процессов, в которых турбомеханизм используется как звено технологической цепи.

Совершенствование и разработка новых средств электропривода: электродвигателей, тиристорных преобразовательных устройств, полупроводниковых регуляторов и др.— создали материальные предпосылки для массового применения регулируемых электроприводов турбомеханизмов различного назначения.

Можно указать на следующие основные причины, обусловливающие необходимость использования регулируемых электроприводов для турбомашин:

1) стремление повысить эксплуатационный к. п. д. установок;

2) стремление улучшить качество продукции за счет регулирования и оптимизации технологического процесса;

3) переход от частичной к полной или комплексной автоматизации производственных процессов;

4) рост единичных мощностей турбомеханизмов.

Эти объективные причины, соответствующие общим направлениям технического прогресса, вызывают все более широкое использование автоматизированного регулируемого электропривода для всех разновидностей рабочих машин, в том числе и для турбомеханизмов. У многих специалистов продолжает оставаться традиционный подход к электроприводу турбомеханизмов как к приводу нерегулируемому. Вопрос о замене неуправляемого привода регулируемым и о выборе его системы для турбомеханизмов вызывает серьезную полемику.

Решение этого вопроса лежит в области технико-экономического анализа целесообразности затрат капиталовложений на создание систем регулирования скорости вращения. Примеры такого анализа приведены в гл. 7.

Однако имеются предпосылки общего характера, достаточно аргументирующие техническую и экономическую целесообразность применения регулируемого привода для турбомеханизмов. Одно из важных обстоятельств связано с тем, что режим работы многих турбомеханизмов (насосов коммунального и промышленного водоснабжения, шахтных вентиляторов, энергетических турбокомпрессоров и др.) в большинстве случаев является принципиально неопределенным. Эта неопределенность часто не позволяет на стадии проектирования выбрать рабочую машину, оптимально удовлетворяющую режиму работы системы; более того, как правило, в процессе эксплуатации режим работы установки су-

щественно изменяется, причем эти изменения носят характер, не поддающийся предварительному достаточно достоверному прогнозированию. В этих условиях оптимизация работы турбомашины(как по технологическим требованиям, так и по условиям сохранения высокого к. п. д.) возможна только при регулировании скорости вращения рабочего колеса машины Представляется также, что такое регулирование должно быть автоматическим. Комплексная автоматизация турбомашин, по существу, возможна только при наличии регулируемого электропривода

Подход к вопросу о выборе типа привода для мощных турбомашин должен быть принципиально пересмотрен таким образом, чтобы при проектировании установок обосновывалось бы не применение регулируемого привода, а отказ от него.

Достижения последних лет в области электропривода турбомеханизмов показывают, что в практике все больше вырисовывается тенденция перехода к регулируемому приводу. Передовые в техническом отношении фирмы ФРГ, США, Японии все чаще применяют такие регулируемые приводы и его элементы, как вентильные каскады, коллекторные электродвигатели, индукторные муфты скольжения. Так, в 1969 г. фирмой Сименс (ФРГ) были изготовлены регулируемые приводы по схеме тиристорного асинхронного вентильного каскада для питательных насосов тепловых электростанций мощностью 8 200 *квт* с регулированием скорости в диапазоне 100—50%. В Японии фирмой Тосиба изготовлен вентильный каскад для привода насоса мощностью 5 500 *квт*. В ФРГ фирмой Броун-Бовери для привода мощного турбокомпрессора использован каскад Шербиуса, мощность привода 4 300 *квт*, диапазон регулирования 1 578—1 414 *об/мин*. Большие успехи достигнуты в конструировании регулируемого электропривода испытательных установок, в частности аэродинамических труб, мощность которых еще в годы войны достигла 30 000 *квт* Крупнейшие авиастроительные компании обладают испытательными установками, снабженными регулируемым электроприводом мощностью несколько десятков тысяч киловатт.

В нашей стране начиная с 60-х годов для турбомеханизмов также начал применяться регулируемый электропривод Шахтные вентиляторы типа ВРЦД-4,5 мощностью 3 500 *квт* оснащены электроприводом, обеспечи-

вающим ступенчатое регулирование скорости. На шахте «Мушкетовская-Вертикальная» (Донбасс) вентиляторы главного проветривания типа ВЦД-32 оборудованы регулируемым приводом мощностью 1 000 *квт* по схеме вентильно-машинного каскада и вентильного со ртутными выпрямителями В Криворожском бассейне работает шахтный вентилятор мощностью 600 *квт* с регулированием по схеме асинхронного вентильного тиристорного каскада Для насосов систем городского водоснабжения используются электроприводы с индукторными муфтами скольжения мощностью до 200 *квт*. Ведутся работы по созданию регулируемого электропривода для турбокомпрессоров и насосов большой мощности.

Приведенные примеры не единичны и показывают технический уровень развития регулируемого электропривода турбомеханизмов, достигнутый к 1969 г. К этому времени мировая практика уже насчитывала сотни примеров использования регулируемого электропривода турбомеханизмов средней и большой мощности, что позволяет расценивать эти примеры не как случайные, а как определенную сложившуюся техническую тенденцию.

Технический уровень электропривода и его соответствие режимам работы турбомеханизма в значительной степени определяют технико-экономические показатели установки в целом. Совершенствование электропривода ведет не только к повышению таких показателей работы установки, как производительность, качество продукции, к. п. д., надежность, но может и должно оказывать влияние на конструкцию самих турбомашин. Например, применение регулируемого электропривода для вентилятора типа ВЦД-32 позволило исключить из конструкции последнего регулируемый направляющий аппарат. Применение для турбомашин высокоскоростных электродвигателей с питанием от источника повышенной частоты позволяет создать безредукторные турбокомпрессоры.

Взаимная связь конструкции турбомеханизма с техническими решениями по электроприводу определяет необходимость разработки и выбора рационального электропривода для турбомеханизма непосредственно в процессе его конструирования. В настоящей работе основное внимание уделено рассмотрению совместной работы агрегата турбомеханизм — электропривод и определению экономически целесоообразных областей применения отдельных систем электроприводов.

Глава первая

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Турбомеханизмы служат для увеличения кинетической и потенциальной энергии потока жидкости или газа путем воздействия лопаток рабочего колеса турбомеханизма на поток.

Рассмотрим закон сохранения энергии, лежащий в основе гидродинамики непрерывного потока идеальных жидкости или газа.

Полная удельная энергия потока, приходящаяся на единицу веса перемещаемого вещества, является совокупностью четырех составляющих:

1) потенциальной энергии $\frac{mgH_{геод}}{mg} = H_{геод}$, *кгс·м / кгс*, определяемой положением данной массы потока m на высоте $H_{геод}$, *м*, над некоторым уровнем, принятым за нулевой;

2) потенциальной энергии, p/γ, *кгс·м/кгс*, которой обладает указанная масса, находящаяся под давлением p, *кгс/м²*;

3) кинетической энергии $\frac{mv^2}{2mg} = \frac{v^2}{2g}$, *кгс·м/кгс*, присущей данной массе потока, движущегося со скоростью v;

4) тепловой энергии $c_pT/gA_э$, *кгс·м/кгс*, которой обладает данная масса, имеющая температуру T.

Полная удельная энергия потока

$$\varepsilon = H_{геод} + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + \frac{c_pT}{gA_э}, \text{ кгс·м/кгс}.$$

Здесь γ — удельный вес вещества потока при данных условиях, *кгс/м³*; c_p — удельная теплоемкость вещества, *ккал·м/(кгс·сек²·°C)*; $A_э = 1/427$ *ккал/кгс·м* — тепловой эквивалент работы; T — абсолютная температура жидкости или газа.

Соотношение между потенциальной и кинетической энергиями потока на участке гидравлической сети, не содержащем источников энергии, определяется уравнением Бернулли

$$\frac{p}{\gamma}+\frac{v^2}{2g}=\text{const}. \qquad (1)$$

Для того чтобы изменить состояние данной массы потока: поднять ее на некоторую высоту (насосы), увеличить скорость потока (вентиляторы), увеличить давление газа (компрессоры) — необходимо затратить некоторую полезную работу ($H_п$) и совершить работу по преодолению вредных сопротивлений в турбомеханизме и трубопроводе (H_R).

Закон сохранения энергии при работе турбомеханизма будет выражаться следующим образом:

$$\left(H_{геод_1}+\frac{p_1}{\gamma_1}+\frac{v_1^2}{2g}+\frac{c_pT_1}{A_э}\right)+H_п=\left(H_{геод_2}+\frac{p_2}{\gamma_2}+\frac{v_2^2}{2g}+\frac{c_pT}{A_э}\right). \qquad (2)$$

Так как жидкость практически несжимаема, то при работе насоса не происходит существенного изменения ее термодинамического состояния.

При работе вентиляторов или воздуходувок, где изменение давления воздуха хотя и имеет место, но незначительно ($p_2/p_1<1{,}15$), также можно считать плотность и температуру воздуха неизменными. Для вентиляторов можно также считать несущественным изменение геодезической высоты. Приняв указанные допущения, из (2) получим:

для насосов

$$H_п=\Delta H_{геод}+\frac{\Delta p}{\gamma}+\frac{v_2^2-v_1^2}{2g}; \qquad (3)$$

для вентиляторов

$$H_п=\frac{\Delta p}{\gamma}+\frac{v_2^2-v_1^2}{2g}. \qquad (3а)$$

Нетрудно заметить, что все члены, входящие в (3), имеют размерность метры и выражают некоторую высоту: первый член $\Delta H_{геод}$ — высоту, на которую нужно поднять жидкость; второй $\Delta p/\gamma$ — высоту, на которую частица жидкости может быть поднята под действием давления Δp; третий — приращение кинетической энергии,

или же высоту, падая с которой частица жидкости приобретает кинетическую энергию, равную $\frac{v_2^2-v_1^2}{2g}$.

Первые два члена составляют статический напор, третий — скоростной напор.

Полный напор H, развиваемый турбомеханизмом, например насосом (рис. 1), должен быть достаточен для преодоления: 1) высоты всасывания и нагнетания $\Delta H_{геод}$; 2) разности внешних давлений $\Delta p = p_2 - p_1$ в первичном и вторичном резервуарах; 3) вредных сопротивлений в трубопроводе H_R, которые могут быть представлены как некоторая дополнительная высота подъема, зависящая от конструктивных параметров и количества перекачиваемой жидкости; 4) инерции массы перемещаемой жидкости, т. е. для создания скоростного напора (ускорения массы жидкости).

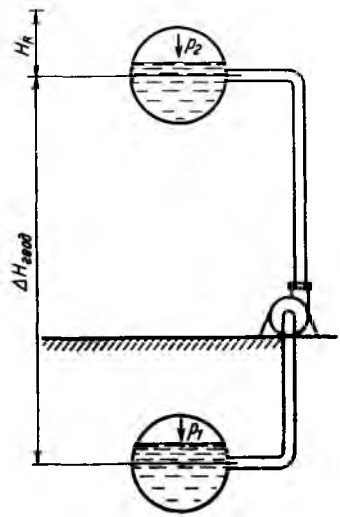

Рис. 1. Схема насосной установки

Скоростной напор может расходоваться и бесполезно (потери на выброс). Поэтому стремятся в ряде случаев к уменьшению скоростного напора посредством диффузоров у вентиляторов, спиральных кожухов у насосов и других технических средств. В этом случае давление в потоке увеличивается за счет сокращения скорости движения при увеличении площади сечения потока (трубопровода). Такое увеличение давления в потоке происходит без дополнительного подвода энергии, что ясно следует из (1), если принять $v_2 < v_1$.

При анализе режимов работы собственно турбомеханизмов и их электроприводов следует принимать во внимание полный напор.

Конечная разность давлений в начале и конце потока $\Delta p = p_2 - p_1$ для вентиляторов и насосов обычно равна нулю, в то время как для турбокомпрессоров на ее преодоление идет основная часть напора. Кроме того, в тур-

бокомпрессорах, где происходит сжатие газа, сопровождающееся повышением его температуры, необходимо учитывать и изменение тепловой энергии потока. Для нагнетателей, не имеющих промежуточных холодильников, баланс энергии будет описываться уравнением

$$H=\left(\frac{p_2}{\gamma_2}-\frac{p_1}{\gamma_1}\right)+\frac{v_2^2-v_1^2}{2g}+\frac{c_p\Delta T}{A_э}, \qquad (3б)$$

а для турбокомпрессоров, являющихся машинами охлаждаемыми, уравнением

$$H=\left(\frac{p_2}{\gamma_2}-\frac{p_1}{\gamma_1}\right)+\frac{v_2^2-v_1^2}{2g}+\frac{c_p\Delta T}{A_э}+q, \qquad (3в)$$

где q — количество тепла, отводимого от турбокомпрессора, на единицу массы сжимаемого газа.

Указанная особенность турбокомпрессоров, связанная с имеющими в них место термодинамическими процессами, требует сложного анализа. Однако с точки зрения условий работы привода режимы работы и характеристики турбокомпрессоров и нагнетателей подобны характеристикам центробежных насосов и вентиляторов. Читателей, более подробно интересующихся особенностями работы турбокомпрессоров, отсылаем к специальной литературе [Л. 29 и 39].

Развиваемая турбомеханизмом полезная мощность

$$P_{пол}=\gamma QH,\ кгс\cdot м/сек=\frac{\gamma QH}{102},\ квт. \qquad (4)$$

Здесь Q — производительность (расход) турбомеханизма, $м^3/сек$; H — напор, $м$.

Мощность, развиваемая приводным двигателем турбомеханизма, соответственно будет:

$$P_{мех}=\frac{\gamma QH}{102\eta_{тм}}, \qquad (5)$$

где $\eta_{тм}$ — к. п. д. турбомеханизма при данном режиме его работы.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Рабочим органом всякого турбомеханизма является рабочее колесо (одно или несколько). В центробежных машинах поток жидкости или газа, попадая в рабочее колесо, под действием центробежных сил выбрасывается

из него в направлении, перпендикулярном направлению потока при входе в колесо. При прохождении потока через рабочее колесо происходит увеличение энергии потока, возрастают давление и скорость его движения; одновременно на выходе рабочего колеса имеет место преобразование скоростного напора в статический в соответствии с уравнением Бернулли.

Рассмотрим движение элементарной частицы (элементарную струйку) жидкости или газа в пределах ра-

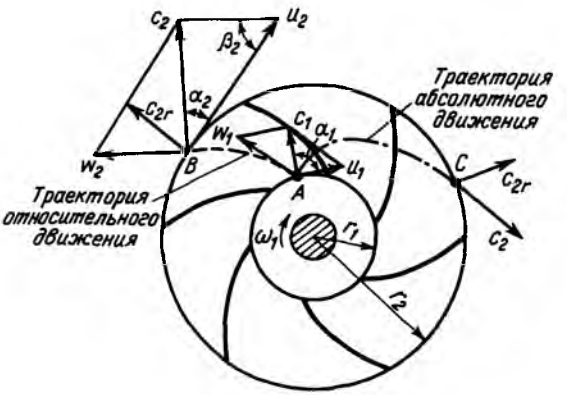

Рис. 2. Поперечный разрез рабочего колеса центробежной машины.

бочего колеса центробежной машины (рис. 2). Движение жидкости или газа будем полагать ламинарным и непрерывным. Элементарная частица, войдя в колесо в точке A, будет совершать поступательное движение от центра к периферии рабочего колеса под действием центробежных сил со скоростью w и в то же время совершать вращательное движение вместе с рабочим колесом с угловой скоростью ω и линейной скоростью u, увеличивающейся по мере удаления от центра рабочего колеса. Дойдя до края рабочего колеса (точка C), частица жидкости или газа будет выбрасываться в нагнетательный трубопровод со скоростью c_2. Траектория абсолютного движения элементарной частицы в пространстве определяется кривой AC; траектория же относительного движения элементарной частицы (относительно лопаток рабочего колеса) определяется кривой AB.

Воспользовавшись вторым законом Ньютона, согласно которому момент импульсов сил равен изменению момента количества движения, получим уравнение:

$$mc_2r_2\cos\alpha_2 - mc_1r_1\cos\alpha_1 = Mt, \qquad (6)$$

где $Mt = \frac{P}{\omega}t = A/\omega$ — момент импульсов внешних сил; A — работа внешних сил.

Очевидно, что работа A идет на увеличение кинетической энергии элементарной частицы жидкости или газа, которая затем преобразуется в потенциальную энергию напора. Тогда теоретический напор $H_{теор}$ (без учета потерь в турбомеханизме) оказывается связанным с работой соотношением

$$A = mgH_{теор}$$

или

$$Mt = \frac{mgH_{теор}}{\omega}. \qquad (7)$$

Пользуясь (6) и (7), учитывая, что $\omega r = u$, найдем выражение для теоретического напора:

$$H_{теор} = \frac{u_2c_2\cos\alpha_2 - u_1c_1\cos\alpha_1}{g}.$$

Практически жидкость или газ поступает в рабочее колесо под углом α_1, близким к 90°, поэтому без особой погрешности можно принять:

$$H_{теор} = \frac{u_2c_2\cos\alpha_2}{g}. \qquad (8)$$

Из-за наличия в насосе гидравлических потерь, а также неравномерного распределения скоростей по обеим сторонам лопатки рабочего колеса (явление циркуляции) действительный напор будет меньше теоретического, что учитывается коэффициентом напора

$$k_h = \eta_h k_ц \frac{c_2\cos\alpha_2}{u_2},$$

где η_h — гидравлический к. п. д. насоса; $k_ц$ — коэффициент циркуляции.

Коэффициент напора определяется конструктивными параметрами турбомеханизма: геометрией рабочего ко-

леса, числом лопаток и т д. С учетом этого коэффициента, который всегда меньше единицы, из (8) найдем следующее значение напора

$$H = k_h \frac{u_2^2}{g} = \frac{k_h r_2^2}{g} \omega^2. \qquad (9)$$

Из (9) следует, что напор, развиваемый турбомеханизмом, пропорционален квадрату угловой скорости вращения его рабочего колеса, что, как мы увидим в дальнейшем, определяет своеобразие нагрузочных характеристик турбомеханизмов.

Основнои характеристикой турбомеханизма является его расходно-напорная характеристика, или Q—H-характеристика, т. е. зависимость между расходом и напором механизма. Определим эту зависимость, пользуясь теоретическим уравнением турбомеханизма (8).

Теоретический расход турбомеханизма определим как произведение площади выходного сечения рабочего колеса (для центробежного механизма) на радиальную составляющую c_{2r} скорости выхода струи из рабочего колеса (см рис 2):

$$Q_{теор} = \pi D_2 b c_{2r}, \qquad (10)$$

где b — ширина рабочего колеса, *м*

Из треугольника выходных скоростей (рис. 2) определим, что

$$c_2 \cos \alpha_2 = u_2 - c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2$$

Подставим это выражение в (8) и, введя туда c_{2r}, определенное по (10), получим идеализированную зависимость напора механизма от его расхода

$$H_{теор} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2}{g} \frac{\operatorname{ctg} \beta_2}{\pi D_2 b} Q_{теор}.$$

Выражая линейную скорость через скорость вращения n, *об/мин*,

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}$$

и обозначая

$$A_1 = \frac{\pi^2 D_2^2}{3\,600 g}; \; B_1 = \frac{\operatorname{ctg} \beta_2}{60 g b},$$

получим:

$$H_{теор} = A_1 n^2 - B_1 n Q_{теор}. \qquad (11)$$

Для многоступенчатого турбомеханизма, когда напор создается последовательно рядом рабочих колес, уравнение (11) изменяется

$$\frac{1}{i} H_{\text{теор}} = A_1 n^2 - B_1 n Q_{\text{теор}}. \qquad (11а)$$

Для многоколесного турбомеханизма, когда колеса работают параллельно, а потоки, проходящие через них, складываются, уравнение (11) примет вид

$$H_{\text{теор}} = A_1 n^2 - B_1 n \frac{Q_{\text{теор}}}{i}, \qquad (11б)$$

где i — число ступеней турбомеханизма или число параллельно работающих колес

Найденная линейная зависимость напора от расхода носит идеализированный характер, поскольку она, как и формула (8), не учитывает потерь напора в механизме, являющихся нелинейной функцией Q

Для уточнения характеристик прежде всего следует учесть потери напора на циркуляцию, которые по существу не зависят от величины расхода Q, измеренного в напорном трубопроводе Потери на циркуляцию могут быть учтены некоторой составляющей $C_1 n^2$, т. е.

$$H'_{\text{теор}} = A_1 n^2 - B_1 n Q - C_1 n^2 = (A_1 - C_1) n^2 - B_1 n Q.$$

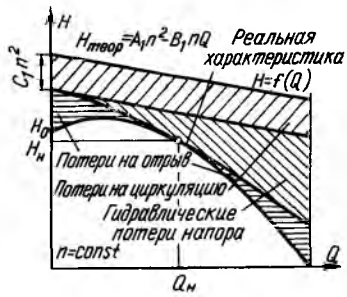

Рис 3 Построение характеристики турбомеханизма

Кроме того, следует иметь в виду, что (8) выводилось для оптимального режима, соответствующего некоторому значению $Q_н$. Если $Q < Q_н$, то происходит отрыв струй от задней стенки лопаток; если $Q > Q_н$, то происходит отрыв струй от передней стенки лопаток. Потери напора на отрыв струй оказывают существенное влияние на характеристики турбомеханизмов.

На рис. 3 показано построение примерной реальной Q—H характеристики турбомеханизма, которая находится вычитанием отдельных составляющих потерь напора из теоретической характеристики (11). Реальная харак-

теристика в общем случае описывается трехчленом второй степени:

$$H = A_2 n^2 + B_2 n Q + C_2 Q^2. \qquad (12)$$

Найдем мощность, затрачиваемую турбомеханизмом, умножив обе части уравнения вида (11) для внешнего расхода на $\gamma Q/102$. Получим:

$$P'_{мех} = A_3 n^2 Q - B_3 n Q^2.$$

Однако мощность, определяемая этим выражением, не учитывает потерь на циркуляцию и механических по-

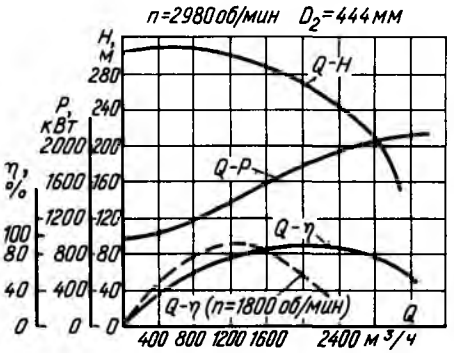

Рис. 4. Характеристики насоса 16НД-10×1.

терь, не зависящих от величины внешнего расхода. Циркулярные потери возникают вследствие паразитной циркуляции части потока вокруг рабочего колеса благодаря наличию зазора между рабочим колесом и корпусом механизма. Механические потери связаны с трением диска рабочего колеса о жидкость и трением в подшипниках и сальниках. Добавим эти потери, считая их пропорциональными кубу скорости, и найдем мощность, подведенную к валу:

$$P_{мех} = A_3 n^2 Q - B_3 n Q^2 + D_3 n^3. \qquad (13)$$

При $n = \text{const}$ мощность, подводимая к валу турбомеханизма,

$$P_{мех} = A'_3 Q - B'_3 Q^2 + D'_3. \qquad (13а)$$

Полезная мощность, развиваемая турбомеханизмом, соответственно (12) будет

$$P_{пол} = A'_2 n^2 Q + B'_2 n Q^2 + C'_2 Q^3; \qquad (13б)$$

при $n = \text{const}$

$$P_{пол} = A''_2 Q + B''_2 Q^2 + C''_2 Q^3. \qquad (13в)$$

На рис. 4 показаны реальные характеристики для насоса 16НД-10×1.

Коэффициент полезного действия собственно турбомеханизма $\eta_{тм}$ определим как отношение полезной мощности $P_{пол}$ к подводимой со стороны вала турбомеханизма $P_{мех}$. Выражая полезную мощность формулой (4), получим:

$$\eta_{тм} = \frac{\gamma Q H}{102 P_{мех}}. \qquad (14)$$

Подводимая к турбомеханизму мощность $P_{мех}$ определяется выражением (13). Тогда

$$\eta_{тм} = \frac{\gamma}{102} \frac{Q H}{A_3 n^2 Q - B_3 n Q^2 + D_3 n^3}, \qquad (15)$$

или с учетом (12)

$$\eta_{тм} = \frac{\gamma}{102} \frac{A_2 n^2 Q + B_2 n Q^2 + C_2 Q^3}{A_3 n^2 Q - B_3 n Q^2 + D_3 n^3}; \qquad (15а)$$

при $n = \text{const}$

$$\eta_{тм} = \frac{A''_2 Q + B''_2 Q^2 + C''_2 Q^3}{A'_3 Q - B'_3 Q^2 + D'_3}. \qquad (15б)$$

Как следует из (15б) и соответствующего ей графика (рис. 4), кривая к. п. д. турбомеханизма имеет явно выраженный максимум, который определяет область наиболее рационального использования турбомеханизма, т. е. область тех значений Q и H, при работе с которыми при $n = \text{const}$ к. п. д. турбомеханизма оставался бы достаточно высоким (рис. 5).

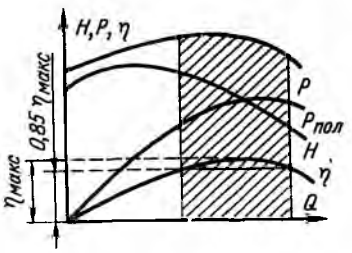

Рис. 5. Область рационального использования центробежного насоса при постоянной скорости вращения.

Для того чтобы получить характеристики конкретных турбомеханизмов, выраженные с некоторым приближе-

нием в аналитической форме, коэффициенты A, B, C и D можно определить по паспортным характеристикам этих машин (например, рис. 4) по трем точкам.

Пример 1. Выразить приближенно в аналитической форме характеристики $H=f(Q)$, $P_{мех}=f(Q)$ насоса 16НД-10 × 1 при $n_н=2\,980$ *об/мин* (см. рис. 4) и построить расчетную зависимость $\eta=f(Q)$ при скорости вращения рабочего колеса $n=0{,}6n_н=1\,800$ *об/мин*.

а) Q—H-характеристика описывается уравнением (12). Коэффициенты A_2, B_2, C_2 находим по трем точкам

1) $Q=0$, $H=300$ *м*, $P_{мех}=1\,000$ *квт*;
2) $Q=600$ *м³/ч*; $H=310$ *м*, $P_{мех}=1\,100$ *квт*;
3) $Q=2\,200$ *м³/ч*, $H=260$ *м*, $P_{мех}=1\,880$ *квт*,

$$A_2n^2=300;\quad A_2=\frac{300}{2\,980^2}=33{,}6\cdot10^{-6}.$$

Подставляя в (12) значение A_2 и значения Q и H для двух других точек, найдем:

$$C_2=-22\cdot10^{-6};\quad B_2n=0{,}03;\quad B_2=10\cdot10^{-6}.$$

Таким образом, $H=(33{,}6n^2+10nQ-26Q^2)\cdot10^{-6}$;
при $n=2\,980$ *об/мин* $H=300+30\cdot10^{-3}Q-22\cdot10^{-6}Q^2$;
при $n=1\,800$ *об/мин* $H=110+18\cdot10^{-3}Q-22\cdot10^{-6}Q^2$.

б) Зависимость $P_{мех}=f(Q)$ описывается уравнением (13). Коэффициенты A_3 B_3, D_3 находятся по тем же трем точкам:

$$D_3n^3=1\,000;\qquad D_3=\frac{1\,000}{2\,980^3}=38\cdot10^{-9};$$

$$B_3n=145\cdot10^{-6};\quad B_3=-48{,}5\cdot10^{-9};$$

$$A_3n^2=0{,}1;\quad A_3=11\cdot10^{-9}.$$

Таким образом,

$$P=(11n^2Q+48{,}5nQ^2+38n^3)\,10^{-9};$$

при $n=2\,980$ *об/мин* $P=0{,}1Q+145\cdot10^{-6}Q^2+1\,000$;
при $n=1\,800$ *об/мин* $P=0{,}036Q+87\cdot10^{-6}Q^2+220$.

в) Кривую $\eta=f(Q)$ рассчитываем по (15а), где $\gamma=1\,000$ *кг/м³*. Учитывая, что размерность Q по графику (рис. 4) принята в *м³/ч*, следует ввести коэффициент 3 600

$$\eta_{тм}=\frac{\gamma}{102\cdot3\,600}\;\frac{A_2n^2Q+B_2nQ^2+C_2Q^3}{A_3n^2Q-B_3nQ^2+D_3n^3}.$$

Расчетная формула при $n=1\,800$ *об/мин*

$$\eta_{тм}=\frac{1}{102\cdot3{,}6}\cdot\frac{110Q+18\cdot10^{-3}Q^2-22\cdot10^{-6}Q^3}{0{,}036Q+87\cdot10^{-6}Q^2+220}.$$

Зависимость $\eta_{тм}=f(Q)$ при $n=1\ 800$ *об/мин* показана на рис. 4 пунктиром.

Обратим внимание, что максимум к. п. д. при скорости $0{,}6n_н$ равен 0,87 и имеет место при $Q=1\ 200$ *м³/ч*. При работе в номинальном режиме максимум к. п. д. также равен 0,87 и соответствует производительности 2 000 *м³/ч*.

Таким образом, можно сделать вывод, что при изменении скорости турбомеханизма его максимальный к. п. д. не изменяется, а соответствующий ему расход изменяется пропорционально изменению скорости.

Анализ формулы (15а) также показывает, что если расход изменяется пропорционально скорости вращения, то к. п. д. турбомеханизма остается неизменным.

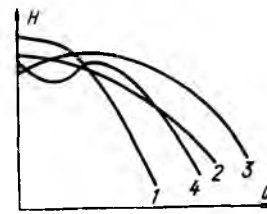

Рис. 6. Разновидности Q—H-характеристик турбомеханизмов.

Q—H-характеристики турбомеханизмов зависят от их конструктивных особенностей, определяющих значение коэффициентов A, B, C, D, и могут быть четырех видов: крутопадающая (кривая *1* на рис. 6), пологая (кривая *2*), имеющая максимум (кривая *3*) и имеющая провалы (кривая *4*). Последняя характерна для осевых механизмов, в частности осевых вентиляторов. Основной причиной, вызывающей отличие характеристик осевых турбомеханизмов от центробежных является возникновение в каналах осевых машин паразитных потоков.

В настоящем параграфе приведено краткое изложение струйной теории работы турбомеханизмов, которая дает достаточно точную для инженерных целей картину работы центробежных турбомеханизмов. Более точную физическую картину явлений в рабочем колесе турбомашины, дает вихревая теория аэродинамики, основоположником которой является Н. Е. Жуковский.

Для осевых турбомеханизмов струйная теория дает еще большую неточность, чем для центробежных; поэтому при анализе работы осевых вентиляторов, пропеллерных механизмов, гребных винтов и т. п. обычно пользуются методами вихревой теории. В настоящей книге основные положения этой теории не излагаются, так как для целей правильного выбора и эксплуатации

турбомеханизмов и их приводов приведенные выше сведения о принципах и физических основах работы как центробежных, так и осевых машин вполне достаточны.

3. РАБОТА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ НА СЕТЬ

Реальные эксплуатационные характеристики турбомеханизма могут быть получены только при совместном анализе характеристик турбомеханизма и сети, на которую он работает (трубопроводы, вентиляционная сеть и т. д.).

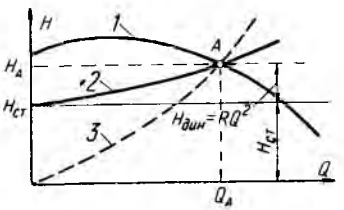

Рис 7 Работа турбомеханизма на сеть с постоянными параметрами.

1 — характеристика турбомеханизма, *2* — характеристика сети при наличии противодавления $H=H_{ст}+RQ^2$, *3* — характеристика сети без противодавления $H=RQ^2$.

Характеристика сети $H=f(Q)$ показывает, какой напор должен быть создан турбомеханизмом в начале сети для перемещения по ней определенного количества жидкости или газа. Этот напор складывается из двух составляющих: статического напора $H_{ст}$, идущего на подъем жидкости на определенную высоту (геодезический напор) или на преодоление противодавления в воздухосборнике, и динамического напора, необходимого для преодоления гидродинамического сопротивления сети.

Потери напора на внутреннее трение, трение потока о стенки рабочей сети и на преодоление местных сопротивлений пропорциональны квадрату скорости потока, т. е. пропорциональны квадрату производительности турбомеханизма.

Таким образом, характеристика сети с постоянными параметрами имеет вид:

$$H=H_{ст}+RQ^2, \qquad (16)$$

где R — коэффициент сопротивления сети, *сек*²/*м*⁵, зависящий от протяженности сети, величины поперечного сечения каналов, вязкости жидкости, шероховатости стенок каналов, наличия местных сопротивлений (колен, обратных клапанов, задвижек и т. п.). Значения R при расчетах берутся из справочников.

При отсутствии противодавления уравнение характеристики сети имеет вид:

$$H=RQ^2. \qquad (17)$$

Точка пересечения A (рис. 7) характеристики турбомеханизма (12) с характеристикой сети определяет режим работы турбомеханизма, т. е. те значения Q, H и $\eta_{тм}$, с которыми будет работать установка.

Если турбомеханизм работает на неизменную сеть $R=\text{const}$ с номинальной (максимальной) скоростью вращения и гидродинамические средства регулирования производительности не используются (например, задвижка на напорном трубопроводе полностью открыта), то величина Q_A будет наибольшей возможной при работе данного турбомеханизма на сеть с данными параметрами. Точка A называется предельной рабочей точкой. Снижение производительности может осуществляться воздействием на сеть (например, дросселирование), на сам турбомеханизм (например, поворот лопаток рабочего колеса) и на привод турбомеханизма (регулирование скорости вращения). Первые два способа в технической литературе часто называют количественным регулированием, третий — качественным регулированием.

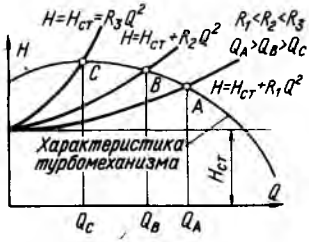

Рис. 8. Регулирование производительности изменением сопротивления сети (дросселированием).

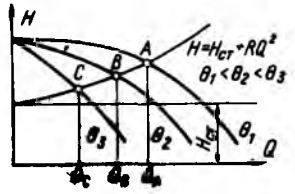

Рис. 9. Регулирование производительности воздействием на турбомеханизм.

При регулировании производительности воздействием на сеть характеристика турбомеханизма остается неизменной, а характеристика сети поворачивается против часовой стрелки (рис. 8). Полностью закрытая задвижка соответствует вертикальному положению характеристики сети, т. е. $Q=0$. При воздействии на турбомеханизм (поворот лопаток рабочего колеса либо направляющего аппарата) характеристика сети остается неизменной, а характеристика турбомеханизма поворачивается по часовой стрелке (рис. 9).

При регулировании производительности снижением скорости вращения характеристики турбомеханизма смещаются вниз, как это следует из (12), а положение ха-

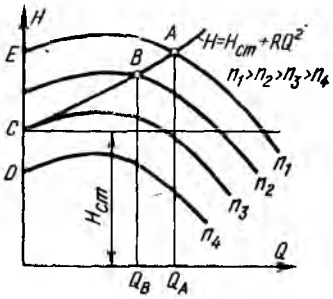

Рис. 10. Регулирование производительности изменением скорости вращения.

рактеристики сети остается неизменным (рис. 10).

Очевидно, что уменьшение скорости вращения с целью регулирования производительности имеет смысл только до определенной величины, при которой напор турбомеханизма становится равен статическому напору (точка C). Производительность турбомеханизма падает при этом до нуля $Q_C=0$. При дальнейшем снижении производительности напор, развиваемый турбомеханизмом, будет недостаточен, чтобы преодолеть статический напор в сети (точка D).

Определим необходимую степень снижения скорости (диапазон регулирования) для изменения производительности от максимальной (точка A) до нуля (точка C).

Положим, что производительность Q_A достигается при номинальной скорости $n_н$. Требуемую глубину регулирования по скорости обозначим $k_{р.с}$, под которой будем понимать отношение

$$k_{р\,с}=\frac{n_н-n_{мин}}{n_н}. \quad (18)$$

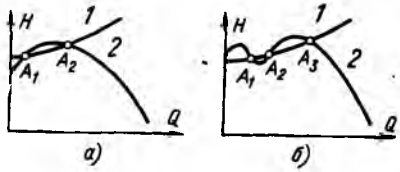

Рис. 11. Примеры неустойчивой работы турбомеханизма.

1 — характеристика сети, 2 — характеристика турбомеханизма

Условиям работы турбомеханизма в точке C удовлетворяет равенство $H=H_{ст}$ при $Q=0$. Пользуясь (12), получим:

$$H_{ст}=A_2n^2_{мин}. \quad (19)$$

Обозначим величину напора, соответствующую $Q=0$ и $n=n_н$ (точка E), как H_0:

$$H_0=A_2n^2_н. \quad (20)$$

Из (19) и (20) легко получить:

$$n_{мин}=n_н\sqrt{\frac{H_{ст}}{H_0}} \quad (21)$$

и

$$k_{\text{р с}} = 1 - \sqrt{\frac{H_{\text{ст}}}{H_0}}. \qquad (22)$$

От сочетания формы характеристик турбомеханизмов и сети зависит также устойчивость системы. На рис. 11 приведены два примера. В указанных случаях режим работы турбомеханизма либо неоднозначен, либо неустойчив, например, в точке A_2.

Таковы общие характеристики работы турбомеханизмов. Некоторые особенности режимов работы конкретных механизмов изложены в следующей главе.

Глава вторая

ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБОМЕХАНИЗМОВ КАК НАГРУЗОЧНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Одну из основных особенностей турбомеханизмов как нагрузочных машин для электропривода составляет зависимость статического момента сопротивления на валу турбомеханизма от скорости его вращения. Эту зависимость $M_c = f(n)$ обычно называют механической характеристикой.

На характер рассматриваемой зависимости существенным образом влияет вид характеристики сети, на которую работает турбомеханизм, а именно, соотношение между статической и динамической составляющими требуемого напора.

Рассмотрим сначала работу турбомеханизма на сеть без противодавления $H_{\text{ст}} = 0$. Характеристика сети в этом случае определяется формулой (17).

Для нахождения параметров рабочей точки $Q_A = f(n)$ и $H_A = f(n)$ решим совместно (12) и (17)

$$\begin{cases} H = A_2 n^2 + B_2 nQ + C_2 Q^2; \\ H = RQ^2. \end{cases} \qquad (23)$$

Получим:

$$(R - C_2) Q^2 + B_2 nQ + A_2^2 n = 0;$$

откуда

$$Q = n\left[\frac{-B_2 + \sqrt{B_2^2 - 4A_2(R - C_2)}}{2(R - C_2)}\right],$$

т. е. производительность турбомеханизма при работе на сеть без статической составляющей напора пропорциональна скорости вращения турбомеханизма

$$\frac{Q_1}{Q_i} = \frac{n_1}{n_i}, \tag{24}$$

или

$$Q = k_Q n. \tag{24а}$$

Решая (23) относительно H, получим:

$$\left(1 - \frac{C_2}{R}\right)H + \frac{B_2}{\sqrt{R}} n\sqrt{H} - A_2 n^2 = 0,$$

откуда

$$H = \left[\frac{-\frac{B_2}{\sqrt{R}} + \sqrt{\frac{B_2^2}{R} + 4A_2\left(1 - \frac{C_2}{R}\right)}}{2\left(1 - \frac{C_2}{R}\right)}\right]^2 n^2,$$

т. е. напор, развиваемый турбомеханизмом, пропорционален квадрату скорости вращения

$$\frac{H_1}{H_i} = \left(\frac{n_1}{n_i}\right)^2, \tag{25}$$

или

$$H = k_H n^2. \tag{25а}$$

Из (24) и (25) очевидно, что полезная мощность, развиваемая турбомеханизмом, пропорциональна кубу скорости

$$\frac{P_{\text{пол}1}}{P_{\text{пол}i}} = \left(\frac{n_1}{n_i}\right)^3, \tag{26}$$

или

$$P_{\text{пол}} = k_P n^3. \tag{26а}$$

Рассмотрим далее, как изменяется к. п. д. турбомеханизма при изменении скорости вращения и работе на сеть, имеющую характеристику (17).

Пользуясь (15а) и учитывая (24а), получим:

$$\eta_{\text{тм}} = \frac{\gamma}{102} \frac{A_2 n^2 k_Q n + B_2 n k_Q^2 n^2 + C_2 k_Q^3 n^3}{A_3 n^2 k_Q n + B_3 n k_Q^2 n^2 + D_3^2 n^3} =$$

$$= \frac{\gamma}{102} \frac{(A_2 k_Q + B_2 k_Q^2 + C_2 k_Q^3)}{(A_3 k_Q - B_3 k_Q^2 + D_3)}; \qquad (27)$$

т. е. при работе на сеть без противодавления к. п. д. турбомеханизма не зависит от скорости

$$\eta_{\text{тм}} = \text{const}. \qquad (28)$$

Обратим внимание, что этот вывод был уже сделан при решении примера 1.

Решая совместно (24) и (25), получим уравнение так называемых характеристик пропорциональности:

$$H_i = \frac{H_1}{Q_1^2} Q_i^2, \qquad (29)$$

или

$$H_i = RQ_i^2, \qquad (29а)$$

где H_1 и Q_1 — напор и расход для данной сети при номинальной скорости вращения турбомеханизма.

Характеристики пропорциональности, представляющие собой квадратичные параболы, показывают, как изменяются расход и напор при регулировании скорости вращения турбомеханизма и работе на сеть с постоянными параметрами. Сравнив выражение (29а) с (16), видим, что характеристики пропорциональности совпадают с характеристиками сети. Из (28) следует, что во всех точках этих характеристик при регулировании скорости вращения к. п. д. турбомеханизма остается постоянным, поэтому характеристики пропорциональности являются также кривыми равных к. п. д.

Этим обстоятельством пользуются для определения к. п. д. и мощности на валу турбомеханизма при его работе со скоростью, отличной от номинальной.

Пример 2. На рис. 12 даны характеристики турбомеханизма при работе с номинальной скоростью $H=f(Q)$; $\eta=f(Q)$; $P=f(Q)$. Турбомеханизм работает со сниженной скоростью в режиме, определяемом параметрами точки *B*. Требуется определить мощность на валу турбомеханизма.

Мощность, потребляемая насосом в любой точке, например в точке B, может быть определена следующим образом

а) через начало координат в рабочую точку (точка B) проводится кривая $H=cQ^2$ до пересечения с кривой $Q-H$ (точка C) насоса при номинальной скорости вращения;

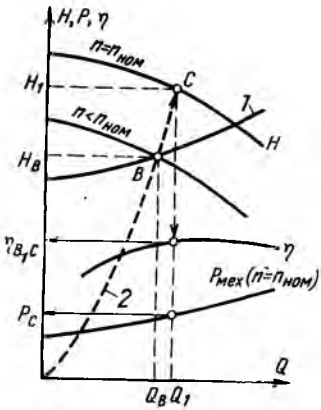

Рис. 12. Определение мощности и к. п. д. турбомеханизма.

1 — характеристика сети, *2* — кривая равных к. п. д. (квадратичная парабола).

б) по формуле приведения находится скорость вращения механизма n_B, соответствующая рабочей точке B,

$$n_B = n_н \frac{Q_B}{Q_C};$$

в) проведя из точки C вертикальную прямую до пересечения с кривой к. п. д., найдем к. п. д. механизма при работе в точках B и C (к. п. д. в этих точках равны);

г) по формуле (5) определим мощность $P_{мех\,B}$ на валу механизма в точке B;

д) по формуле $M=975\dfrac{P_{мех\,B}}{n_B}$ найдем момент сопротивления на валу турбомеханизма;

е) мощность $P_{мех\,B}$ может быть найдена и другим путем: по кривой $P_{мех}=f(Q)$ определяется мощность, соответствующая работе в точке C, и далее по формуле приведения находится мощность в точке B

$$P_{мех\,B} = P_{мех\,C}\left(\frac{n_B}{n_н}\right)^3.$$

Рассмотренный метод определения к. п. д. турбомеханизма при работе со скоростью, отличной от номинальной, действителен во всех случаях независимо от вида характеристики сети, так как к. п. д. механизма определяется только соотношением Q и H и скоростью вращения.

Поскольку полезная мощность турбомеханизма пропорциональна кубу скорости, а к. п. д. его неизменен, то и подводимая к турбомеханизму мощность пропорциональна кубу скорости

$$\frac{P_{мех1}}{P_{мех2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \qquad (30)$$

или

$$P_{мех} = k_P n^3. \qquad (30а)$$

Следовательно, момент аэродинамического сопротивления турбомеханизма пропорционален квадрату скорости

$$\frac{M_1}{M_2}=\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2, \tag{31}$$

или

$$M=k_M n^2. \tag{31a}$$

Формулы (24), (25), (26), (28), (30) называются формулами приведения (к новому значению скорости). Эти формулы действительны только для случая, когда турбомеханизм работает на сеть, не имеющую статической составляющей напора.

Для этого случая момент сопротивления турбомеханизма, приведенный к валу двигателя, имеет вид:

$$M=M_{тр}+k_M n^2. \tag{32}$$

Момент сопротивления турбомеханизма складывается из момента аэродинамического (или гидравлического) сопротивления, определяемого формулой (31а), и момента, обусловленного механическими сопротивлениями (трением в подшипниках, редукторе и др.). Момент трения $M_{тр}$ для большинства турбомеханизмов не превышает 5% номинального момента. С учетом последнего механическая характеристика турбомеханизма в относительных единицах имеет вид:

$$\frac{M}{M_н}=0{,}05+0{,}95\left(\frac{n}{n_н}\right)^2, \tag{33}$$

где $M_н=975\frac{P_{мех.н}}{n_н}$ — номинальный момент турбомеханизма, *кгс·м*; $n_н$ — номинальная скорость, *об/мин*; $P_{мех.н}$ — номинальная мощность на валу турбомеханизма при скорости $n_н$, *квт*.

Рассмотрим теперь работу турбомеханизма на сеть со статической составляющей напора. Характеристика такой сети определяется формулой (16).

Рабочие точки B_1, B_2, B_3 и т. д. находятся как точки пересечения (рис. 13) характеристики сети с характеристиками механизма, соответствующими различным скоростям вращения. Рабочая область регулирования скорости лежит в пределах от n_4 до $n_н$.

Как следует из рассмотрения рис. 13, расход Q со снижением скорости вращения падает более интенсивно,

чем это имело место при работе на сеть без статического напора. Коэффициент полезного действия турбомеханизма в этом случае не остается постоянным, а несколько снижается по мере уменьшения скорости вращения.

Зависимость между расходом, напором и скоростью вращения найдем, решая совместно уравнения турбомеханизма (12) и сети (16):

$$Q=\frac{B_2n-\sqrt{B_2^2n^2+4(R-C_2)(A_2n^2-H_{ст})}}{2(R-C_2)}. \qquad (34)$$

Очевидно, что при $H_{ст}=H_0$ расход будет равен нулю:

$$H=H_{ст}+\frac{R}{2(R-C_2)^2}\left[B_2^2n^2+2(R-C_2)(A_2n^2-H_{ст})-\right.$$
$$\left.-B_2n\sqrt{B_2^2n^2+4(R-C_2)(A_2n^2-H_{ст})}\right]. \qquad (35)$$

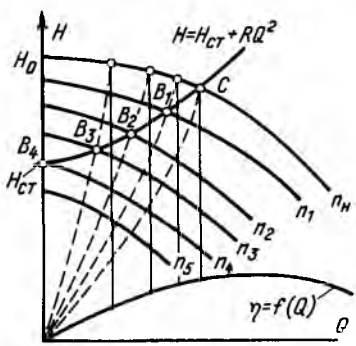

Рис. 13. Работа турбомеханизма на сеть со статической составляющей напора.

Зависимость момента сопротивления на валу турбомеханизма от скорости вращения имеет вид:

$$M=M_{тр}+f(n).$$

Из-за сложности выражений для Q и H, а также вследствие того, что к. п. д. турбомеханизма не остается постоянным при регулировании скорости вращения, не удается, пользуясь выражениями (34) и (35), получить достаточно простую аналитическую зависимость мощности и момента на валу от скорости при работе турбомеханизма на сеть со статическим напором. Такие зависимости более просто определять графо-аналитическим путем, пользуясь методом, показанным на рис. 12 и 13, либо применяя упрощенные выражения, вывод которых приводится в последующем изложении.

Пример 3. Построить механические характеристики насоса 20НДС при работе на сети с параметрами: 1) $H_{ст}=0$, $R=87$ *сек²/м⁵*; 2) $H_{ст}=25$ *м*, $R=36$ *сек²/м⁵*; 3) $H_{ст}=30$ *м*; $R=25{,}5$ *сек²/м⁵*.

Порядок расчета:

а) Из каталога берем характеристики насоса $H=f(Q)$ и $\eta=f(Q)$ при номинальной скорости вращения $n=730$ *об/мин*. Характеристики показаны на рис. 14; $Q_н=0{,}7$ *м³/сек*; $H_н=42{,}5$ *м*.

б) По формуле подобия (25) строим характеристики насоса при значениях n, указанных на рисунке.

в) По (16) и (17) строим характеристики сети для трех заданных значений $H_{ст}$ и R. Точки пересечения характеристик сети с характеристиками насоса определяют рабочие точки насоса.

г) Для каждой рабочей точки определяем к. п. д. насоса. Определение к. п. д. производится методом, указанным в примере 2. Например, для точки B расход равен 0,38 $м^3/сек$. Находим сопряженную с ней точку C на характеристике номинального режима. По формуле подобия

$$Q_C = Q_B \frac{n_н}{n} = \frac{0,38}{0,9} = 0,42$$

$м^3/сек$. Из точки C проводим вертикальную прямую до пересечения с линией к. п. д. и определяем к. п. д. точки B $\eta_B = \eta_C = 0,77$.

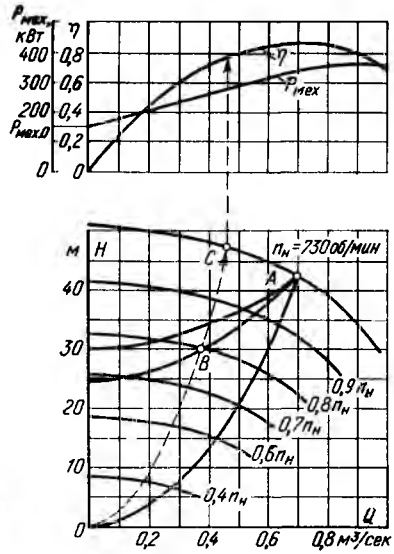

Рис. 14. Определение параметров рабочих точек насоса (к примеру 3).

д) По (5) находим мощность на валу насоса во всех рабочих точках. Для точки B

$$P_{мех\,B} = \frac{\gamma Q_B H_B}{102\eta} = \frac{1\,000 \cdot 0,38 \cdot 30}{102 \cdot 0,77} = 145 \text{ квт}.$$

е) По формуле $M = 975 \frac{P_{мех}}{n}$ находим моменты сопротивления на валу турбомеханизма, соответствующие рабочим точкам. Для точки B получим $M = \frac{975 \cdot 145}{0,8 \cdot 730} = 242$ $кгс \cdot м$.

На рис. 15 приведены механические характеристики $M = f(n)$, рассчитанные для трех характеристик по данным примера 3. Анализ этих механических характеристик показывает, что по мере роста статической составляющей напора: а) сокращается диапазон регулирования по скорости $k_{р.с}$, б) при снижении скорости момент уменьшается интенсивнее, чем это определялось квадратичной зависимостью (31а).

В технической литературе по электроприводу турбомашины обычно называют механизмами с вентилятор-

ным характером нагрузки. Это определение не вполне правильно распространять на все турбомеханизмы, так как если для вентиляторов характерна квадратичная зависимость момента от скорости, то для других турбомеханизмов, работающих на противодавление, эта зависимость, как было показано выше, оказывается более сложной. Поэтому под вентиляторной характеристикой нагрузки применительно ко всем турбомеханизмам следует понимать некоторую характеристику, особенностью которой является существенное снижение момента сопротивления по мере уменьшения скорости вращения.

Последнее дает основание ряду авторов [Л. 11, 31] представлять зависимость момента от скорости турбомеханизмов в виде

$$M = k_M n^k, \tag{36}$$

где показатель степени $k \geqslant 2$ является функцией параметров сети ($H_{ст}$ и R) и характеристик QH собственно турбомеханизма.

Однако детальный анализ работы турбомашин при различных величинах статической составляющей напора [Л. 12] показывает, что закономерность (36) соблюдается лишь при $H_{ст}=0$, а в остальных случаях наблюдаются значительные отклонения от нее.

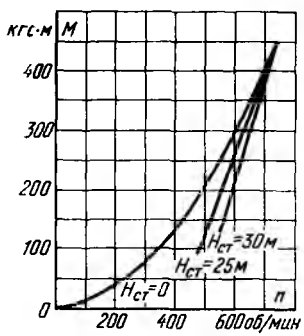

Рис. 15. Механические характеристики насоса 20НДС при различной величине статического напора в сети.

На наш взгляд, представление механической характеристики турбомеханизма в виде степенной зависимости с $k>2$ не соответствует физической картине описываемых процессов. Кроме того, такое представление не дает преимуществ при анализе влияния отдельных параметров и практических расчетах, так как пользоваться при этом дробными степенями неудобно. Следует также иметь в виду, что (36) относится лишь к рабочему диапазону изменения скорости от $n_н$ до $n_{мин}$, соответствующему изменению расхода от $Q_{макс}$ до нуля. При скорости ниже $n_{мин}$ момент на валу турбомеханизма, как будет показано в дальнейшем, определяется иной зависимостью.

Приближенную, но достаточно точную аналитическую зависимость момента сопротивления на валу турбомеханизма от скорости, соответствующую физическим принципам его работы, можно получить, используя характеристики турбомеханизмов $H=f(Q)$ и $P_{мех}=f(Q)$ в аппроксимированной форме.

В отличие от методов аппроксимации, приведенных в примере 1, примем некоторые допущения. С достаточной степенью точности в пределах рабочей зоны напорная характеристика турбомеханизма $H=f(Q)$ может быть представлена параболой [сравните с (12)] вида

$$H=H_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-C_4Q^2. \qquad (37)$$

Зависимость мощности на валу от расхода, как следует из рассмотрения большинства характеристик (например, рис. 14), можно аппроксимировать прямой линией [сравните с (13)]

$$P_{мех}=P_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^3+A_4Q\left(\frac{n}{n_н}\right)^2. \qquad (38)$$

Коэффициенты C_4 и A_4 легко определяются по номинальным данным турбомеханизма

$$C_4=\frac{H_0-H_н}{Q_н^2};\ A_4=\frac{P_{мех\,н}-P_0}{Q_н}.$$

В этих формулах H_0 и P_0 — напор и мощность на валу турбомеханизма, соответствующие $Q=0$ (закрытой задвижке) и $n=n_н$; $H_н$, $Q_н$, $P_{мех.н}$, $n_н$ — номинальные напор, расход, мощность на валу и скорость вращения турбомеханизма.

Рабочий режим турбомеханизма определяется характеристикой механизма (37) и характеристикой сети (16). Решая совместно эти уравнения относительно Q, получим:

$$Q=\sqrt{\frac{H_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-H_{ст}}{R+C_4}}. \qquad (39)$$

Подстановка (39) в (38) дает

$$P_{мех}=P_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^3+A_4\left(\frac{n}{n_н}\right)^2\sqrt{\frac{H_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-H_{ст}}{R+C_4}}. \qquad (40)$$

Таково выражение для мощности на валу турбомеханизма при работе его на сеть с постоянными параметрами в рабочей зоне скорости вращения. Из (40) момент

$$M=\frac{975P_0}{n_н}\left(\frac{n}{n_н}\right)^2+\frac{975A_4}{n_н}\,\frac{n}{n_н}\sqrt{\frac{H_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-H_{ст}}{R+C_4}},$$

или

$$M=M_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2+(M_н-M_0)\,\frac{n}{n_н}\sqrt{\frac{H_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-H_{ст}}{RQ_н^2+H_0-H_н}}, \qquad (40а)$$

где

$$M_0=975\,\frac{P_0}{n_н};\ M_н=975\,\frac{P_{мех\ н}}{n_н}.$$

Таково аналитическое выражение механических характеристик турбомеханизма при работе на сеть с постоянными параметрами в рабочей зоне скоростей вращения.

Положив $H_{ст}$ равным нулю в (40а), придем к уравнению обычной вентиляторной характеристики (31а).

Если предварительно определить минимальную скорость рабочего диапазона по формуле (21), то уравнение (40а) можно представить:

$$M=M_0\left(\frac{n}{n_н}\right)^2+(M_н-M_0)\,\frac{n}{n_н}\sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-\left(\frac{n_{мин}}{n_н}\right)^2}{1-\frac{H_н}{H_0}+\frac{RQ_н^2}{H_0}}}. \qquad (40б)$$

Пример 3а. Задачу примера 3 можно решать, пользуясь (40а) или (40б). Например, для сети с $H_{ст}=25$ *м* уравнение механической характеристики по (40а) будет:

$$M_0=975\,\frac{150}{730}=200\ кгс\cdot м;$$

$$M_н=975\,\frac{350}{730}=466\ кгс\cdot м;$$

$$M=200\left(\frac{n}{n_н}\right)^2+266\,\frac{n}{n_н}\sqrt{1{,}95\left(\frac{n}{n_н}\right)^2-0{,}95}.$$

Этому уравнению с достаточной степенью точности соответствует средняя кривая на рис. 15.

8. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ ПРИ ПУСКЕ

Во многих случаях для облегчения условий пуска турбомеханизмов принимаются меры по разгрузке механизма. Для мощных вентиляторов разгрузка заключается, например, в том, что полностью закрывается направляющий аппарат, для турбокомпрессоров разгрузка производится соединением полости нагнетания компрессора со всасом либо с атмосферой. Однако и разгруженная турбомашина обладает значительным аэродинамическим сопротивлением, вследствие чего момент на валу турбомеханизма при разгрузке составляет при номинальной скорости около 40% номинального.

Начальный момент, развиваемый приводом $M_{нач}$, при нуле скорости должен превышать момент трогания турбомеханизма из состояния покоя $M_{трог}$, который существенно больше $M_{тр}$ [см. формулу (32)], определяемого сопротивлением в подшипниках и редукторе (если он имеется) при вращении турбомеханизма. По данным, приводимым И. М. Местером [Л. 15], момент трогания для вентиляторов не превышает 15—20%. При расчетах пусковых характеристик привода не рекомендуется начальный момент $M_{нач}$ принимать меньшим, чем 25% номинального статического момента сопротивления турбомеханизма.

Рассмотрим характеристику турбомеханизма при закрытой задвижке. Насосы обычно пускаются в ход при закрытой задвижке, т. е. во время пуска $Q=0$. Такой способ пуска в большинстве случаев вызван желанием исключить удары и пульсации давления в гидравлической сети. Пуск при закрытой задвижке, как правило, облегчает и условия работы приводного двигателя в этом процессе.

Энергия, подводимая к турбомеханизму при закрытой задвижке, расходуется на перемешивание и нагрев жидкости.

Поскольку напор, развиваемый насосом, и в этом случае пропорционален квадрату скорости вращения, как это следует из (12), а расход равен нулю, то определить механическую характеристику турбомеханизма можно, пользуясь формулами подобия. Зависимость момента от скорости при закрытой задвижке, по аналогии с (32), может быть представлена в виде

$$M = M_{тр} + M_0 \left(\frac{n}{n_н}\right)^2, \qquad (41)$$

где M_0 — момент сопротивления при работе турбомеханизма с номинальной скоростью на закрытую задвижку, равный

$$M_0 = 975 \frac{P_0}{n_н}, \qquad (42)$$

где P_0 — мощность, потребляемая турбомеханизмом при $n = n_н$ и $Q = 0$ (берется из характеристик турбомеханизма).

Величина M_0 зависит от конструкции турбомашин. Конструктивные особенности турбомеханизмов, в частности насосов, характеризуются так называемым коэффициентом быстроходности n_s, определяемым формулой

$$n_s = \frac{3{,}65 n_н \sqrt{Q_н}}{H_н^{3/4}},$$

где $Q_н$, $H_н$ и $n_н$ — номинальные данные механизма, соответствующие его максимальному к. п. д.

По данным, приведенным А. Степановым [Л. 32], на рис. 16 построены характеристики $P_{мех} = f(Q)$ насосов с различными коэффициентами быстроходности. Как видно из этого графика, для большинства насосов P_0, а следовательно, и момент M_0 меньше 50% номинального; поэтому пуск двигателей этих турбомеханизмов при закрытой задвижке облегчается. Только некоторые насосы пропеллерного типа с крутопадающими характеристиками вида 4—7 (рис. 16) имеют высокие значения P_0.

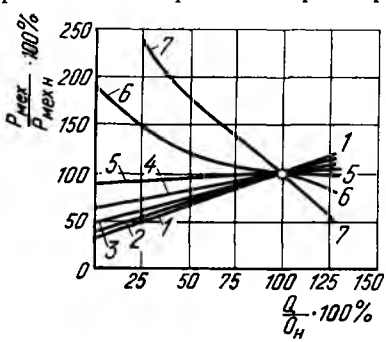

Рис. 16 Зависимость $P_{мех} = f(Q)$ для насосов различного типа.

1 — $n_s = 64$ (двусторонний вход); 2 — $n_s = 106$; 3 — $n_s = 155$; 4 — $n_s = 212$; 5 — $n_s = 282$, 6 — $n_s = 402$ (двусторонний вход); 7 — $n_s = 650$

Турбокомпрессоры при работе с закрытой задвижкой вследствие малой плотности нагнетаемого вещества потребляют меньшую мощность P_0. Момент M_0 для турбокомпрессоров можно считать не превышающим 40% номинального.

Рассмотрим теперь характеристику насоса с открытой задвижкой при работе в зоне малых скоростей вращения на сеть, характеристика которой имеет статическую составляющую напора. В этом случае насос соединяется с сетью через обратный клапан, который удерживает столб жидкости, пока насос стоит. При включении насоса последний по мере увеличения скорости вращения развивает все больший напор, однако обратный клапан будет закрыт до тех пор, пока напор насоса не станет равным $H_{ст}$.

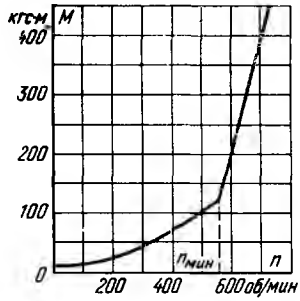

Рис. 17. Зависимость момента сопротивления на валу насоса от скорости при пуске.

Очевидно, что это произойдет при скорости $n_{мин}$, величина которой определяется равенством (21). Ниже этой скорости насос будет работать так же, как и при закрытой задвижке. Выше скорости $n_{мин}$ обратный клапан откроется и насос будет работать на сеть с расходом и напором, определяемыми (34) и (35).

Пример 4. Построить зависимость момента сопротивления от скорости вращения для насоса 20НДС при разгоне от $n=0$ до $n=n_1$. Нагнетательный патрубок насоса соединен с сетью, имеющей параметры $H_{ст}=30$ *м*, $R=25{,}5$ *сек*^{2}/*м*^{5} (первое условие примера 3), через обратный клапан. Задвижка при пуске открыта. Характеристика насоса дана на рис. 14.

Решение.

а) По формуле (21) находим минимальную скорость вращения, при которой откроется обратный клапан.

$$n_{мин}=n_н\sqrt{\frac{H_{ст}}{H_0}}=730\sqrt{\frac{30}{51}}=560\ об/мин.$$

б) Зависимость момента от скорости в диапазоне от $n_{мин}$ до $n_н$ определена при решении в примере 3 и дана на рис. 15.

в) Зависимость момента от скорости в диапазоне от нуля до $n_{мин}$ определяется формулой (41), в которой

$$M_0=\frac{975P_0}{n_н}=\frac{975\cdot 150}{730}=200\ кгс\cdot м.$$

Полагая $M_{тр}=0{,}02$, $M_н=9$ *кгс·м*, после подстановки в (41) получим:

$$M=9+200\frac{n^2}{730^2}=9+\frac{n^2}{2\,660}\ кгс\cdot м.$$

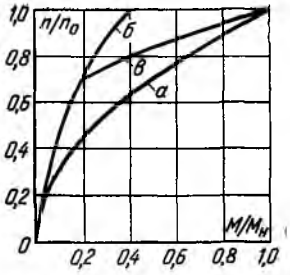

Рис. 18. Характеристики турбомеханизмов при пуске и работе на сеть.
а — без противодавления с открытой задвижкой, *б* — без противодавления с закрытой задвижкой, *в* — с противодавлением с открытой задвижкой

Рассчитанная по этой формуле и по данным рис 15 зависимость момента сопротивления от скорости вращения построена на рис. 17.

Уравнениями (40а, б) механической характеристики турбомеханизма можно пользоваться и при работе его с закрытыми задвижкой или обратным клапаном, если $n < n_{мин}$. В этих случаях в уравнениях (40а, б) следует сопротивление сети R принимать бесконечно большим, т. е. $R = \infty$.

На рис. 18 предствлены три возможных типа характеристик турбомеханизмов при пуске.

6. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

Центробежные насосы являются массовыми и энергоемкими механизмами. На привод этих турбомеханизмов расходуется колоссальное количество энергии, составляющее около 20% всей электроэнергии, вырабатываемой в стране. Мощность промышленных насосов лежит в пределах от единиц до нескольких десятков тысяч киловатт. Мощности питательных насосов тепловых электростанций и насосов гидротехнических сооружений доходят сегодня до 25 000 *квт* и более.

Основные группы насосных установок по их назначению следующие:

а) насосы коммунального и промышленного водоснабжения;

б) насосы погружные для подачи воды или нефти из скважин;

в) насосы циркуляционные;

г) насосы питательные;

д) насосы водоотлива;

е) насосы для транспорта нефти, угля и других продуктов.

Насосы, как правило, работают на сеть с противодавлением, причем статический напор в сети составляет обычно не менее 20% полного напора.

Исключением являются лишь циркуляционные насосы, которые могут работать на сеть, практически не имеющую статического напора.

Сегодня почти все насосы оснащаются нерегулируемым электроприводом. Регулирование производительности осуществляется при этом практически единственным способом — дросселированием на стороне нагнетания.

Необходимость регулирования производительности насосов может иметь место в двух случаях:

а) При необходимости регулирования количества жидкости, подаваемой насосом, в связи с требованиями технологического процесса или в связи со случайным изменением потребности в жидкости. Например, производительность циркуляционного насоса системы охлаждения нужно регулировать в зависимости от количества тепла, подлежащего отводу, или производительность насоса водоснабжения должна изменяться соответственно режиму водопотребления.

б) Если даже и не требуется регулирование производительности насоса во время работы, то обеспечение требуемого расхода связано с его первоначальной подрегулировкой. Например, если требуется для подачи жидкости на определенную высоту при постоянстве расхода и сопротивления гидросети насос с параметрами Q_1 и $H_1 = H_{ст} + RQ_1^2$, то выбирается по каталогу насос с ближайшим номинальным напором при данном расходе, т. е. $H_н > H_1$; для работы с заданными параметрами напор насоса должен быть снижен с $H_н$ до H_1.

Если насос работает при неизменной скорости вращения, то простейшим и всеместно применяемым способом регулирования его производительности является дросселирование, т. е. неполное открытие задвижки на напорном трубопроводе насоса. Это соответствует увеличению вредного сопротивления сети.

Если задвижка открыта полностью, то рабочей точкой является точка A (рис. 19), которой соответствуют максимальный расход Q_1 и напор H_1. Прикрывая задвижку, т. е. вводя дополнительное вредное сопротивление R_3, вызывающее потерю напора Δh_3, можно снизить расход и перейти к работе в новой точке B с параметрами Q_2 и H_2. Этот способ регулирования производительности весьма прост, однако он крайне невыгоден с энергетической точки зрения, поскольку ведет к существенному сни-

жению к. п. д. агрегата и бесполезному расходованию электроэнергии.

Это происходит по двум причинам: а) главным образом из-за дополнительной потери мощности в задвижке

$$\Delta P = \frac{\gamma \Delta h_з Q}{102 \cdot 3,6};$$

б) вследствие ухудшения к. п. д. самого насосного агрегата, поскольку переход от работы в точке A к работе в точке B сопровождается ухудшением его к. п. д. (см. рис. 19).

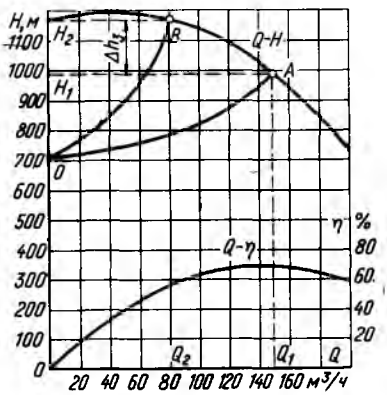

Рис. 19. Регулирование режима работы насоса дросселированием.

Пример 5. Определить к. п. д. насоса ЦН150-100, работающего на сеть, имеющую характеристику OA (рис. 19) при регулировании его производительности задвижкой. Сравнить с к. п. д., который был бы при регулировании изменением скорости вращения.

При регулировании дросселированием полный к. п. д. насоса находим по формуле

$$\eta_{гидр} = \eta_{нас} \frac{H_{пол}}{H},$$

где $\eta_{нас}$ — к. п. д. собственно насоса, определяемый при данном Q по характеристике Q—η (рис. 19); $H_{пол}$ — полезный напор, определяемый по характеристике сети OA для данного значения Q; H — напор, развиваемый насосами и определяемый по характеристике Q—H насоса для данного значения Q

Расчет сводим в таблицу.

Таблица 1

Q, м³/ч	150	120	80	40
$\eta_{нас}$	0,68	0,66	0,56	0,34
$\frac{H_{пол}}{H}$	1,0	0,81	0,67	0,61
$\eta_{гидр}$	0,68	0,54	0,37	0,21

Коэффициент полезного действия насоса при регулировании скоростью вращения при полностью открытой задвижке рассчитывается по методике, изложенной в примере 2.

Рассчитанные зависимости к. п. д. от расхода при обоих способах регулирования приведены на рис. 20. Сравнение рассмотренных способов по к. п. д. показывает

чрезвычайную неэкономичность регулирования с помощью задвижек.

По данным [Л. 20] потери из-за неэкономичного регулирования составляют для городских водопроводных станций 10—15% суммарного потребления электроэнергии.

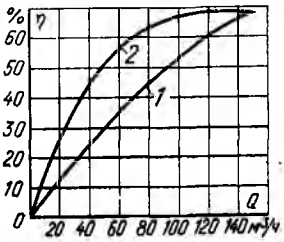

Рис. 20. К. п. д. насоса при регулировании производительности задвижкой и изменением скорости вращения.

1 — при регулировании задвижкой; *2* — при регулировании изменением скорости вращения.

Насосные агрегаты обычно объединяются в насосные станции, при этом несколько насосов работают параллельно на одну сеть. Рассмотрим совместную работу двух насосов на общую сеть. Если они работают с постоянной скоростью, то рабочая точка A (рис. 21) определяется пересечением их суммарной характеристики с характеристикой сети. Насосы работают при этом с производительностью Q_1 и Q_2. Регулирование расхода может быть достигнуто дросселированием одного или обоих насосов. На рис. 21 показан случай дросселирования насоса I. При анализе совместной работы насосов падение напора в задвижке удобнее рассматривать как внутренние потери напора в насосе. Тогда при дросселировании насоса наклон его характеристики будет возрастать Если прикрыть задвижку так, что характеристика первого насоса займет положение I', то результирующая производительность снизится до Q'_A.

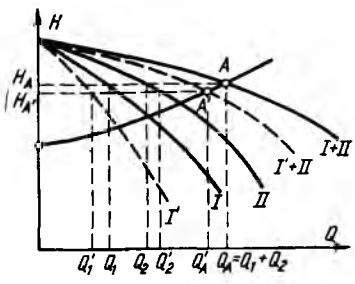

Рис. 21. Совместная работа двух насосов на общую сеть и регулирование дросселированием одного из насосов.

Регулирование производительности насосной станции изменением скорости вращения насосов иллюстрируется рис. 22. Если два насоса с суммарной характеристикой $(I+II)$ работают на сеть в точке A с производительностью Q_A и необходимо уменьшить их производительность до Q'_A, то это можно сделать двумя способами: либо

уменьшить скорость вращения обоих насосов (их характеристики *I* и *II* для этого случая показаны на рис. 22 пунктиром), или снизить, но более значительно, скорость одного из насосов (например, насоса II, характеристика которого II″ при сниженной скорости показана штрихпунктиром на рис 22). Регулирование производительности изменением скорости вращения одновременно двух насосов по своим показателям равноценно регулированию скорости насоса при его одиночной работе.

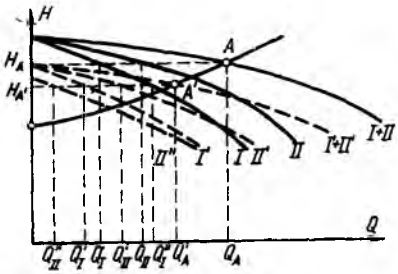

Рис. 22. Совместная работа двух насосов на общую сеть при регулировании изменением скорости вращения.

С точки зрения экономичности регулирования несколько более выгодным является одновременное изменение скорости всех параллельно работающих насосов. Однако это связано с увеличением капитальных затрат на оборудование всех агрегатов регулируемым электроприводом. Поэтому для большинства насосных станций достаточно иметь только один регулируемый агрегат, осуществляя более глубокое регулирование отключением отдельных насосов. Такое техническое решение было принято, например, при проектировании системы водоснабжения большого химического комбината в ФРГ [Л. 47]. Насосная станция была оборудована тремя насосами, два из которых имеют нерегулируемый привод от асинхронных короткозамкнутых двигателей (500 *квт*, 1 500 *об/мин*), а один из насосов оснащен двигателем такой же мощности, но с фазным ротором и регулируется по схеме вентильного каскада от 1 100 до 1 465 *об/мин*.

Обобщая рассмотренные выше особенности работы центробежных насосов и требования к их электроприводу, можно сказать:

насосы являются механизмами с длительными режимами работы, поэтому электроприводы насосов должны быть рассчитаны на длительную работу с большим числом часов работы в году; нагрузка на валу приводного двигателя спокойная, перегрузок не возникает;

центробежные насосы являются быстроходными механизмами, номинальная скорость приводного двигателя обычно не менее 600 *об/мин;* верхний предел скорости для насосов ограничен величиной 3 000 *об/мин*; в редких случаях требуется более высокая номинальная скорость вращения;

наиболее совершенным способом регулирования производительности насосов является изменение скорости их вращения; диапазон регулирования скорости невелик, обычно не более чем $k_{р\,с}=0{,}3$; более глубокое регулирование требуется лишь в отдельных случаях;

для насосов характерна существенная зависимость момента сопротивления на валу от скорости; поскольку насосы обычно работают на противодавление, то эта зависимость более резкая, чем квадратичная (вентиляторная), характер такой зависимости для различных сетей показан на рис. 23. При регулировании скорости от нуля до минимальной сначала зависимость носит квадратичный характер (кривая *ОВ);* затем, когда насос разовьет напор, достаточный для преодоления статического напора, характер зависимости $M=f(n)$ изменяется и зависит от величины статической составляющей напора;

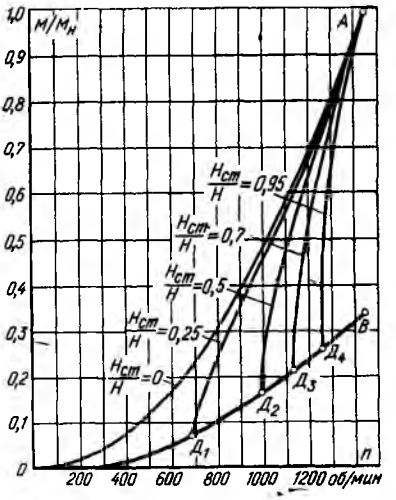

Рис 23. Механические характеристики насоса 14Д-6.

пуск насосов обычно производится на закрытую задвижку, зависимость момента на валу от скорости при пуске носит вентиляторный характер (квадратичная зависимость) с максимальным моментом, для большинства насосов лежащим в пределах 0,4—0,8 номинального.

7. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВЕНТИЛЯТОРОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

Вентиляторы занимают среди турбомеханизмов второе место после насосов по распространению в промышленности. Основное их количество приходится на венти-

ляторы сантехнического назначения, осуществляющие кондиционирование воздуха в производственных и других помещениях. Несмотря на относительно малую мощность сантехнических вентиляторов (до 100 *квт*), на их долю приходится значительная потребляемая мощность. По данным, опубликованным Всесоюзной конференцией по вентиляторам общепромышленного и специального назначения (февраль 1965 г), на привод вентиляторов различного назначения расходуется около 8% электроэнергии, вырабатываемой в СССР. Например, на Горьковском автомобильном заводе расход электроэнергии на вентиляцию составляет 12,5% общего расхода электроэнергии по заводу [Л. 23].

Разнообразное применение находят в промышленности и вентиляторы большой мощности. Здесь в первую очередь следует упомянуть наиболее крупные машины— шахтные вентиляторы главного проветривания, мощность которых достигает в настоящее время 5 000 *квт*. Вследствие круглосуточного режима работы и большой мощности эти турбомашины являются крупным потребителем электроэнергии. На проветривание шахт и рудников расходуется около 1,5% электроэнергии, вырабатываемой в стране.

Крупные вентиляторы используются в качестве дымососов на тепловых электростанциях, а также применяются для увеличения интенсивности охлаждения воды в градирнях химических комбинатов. Мощные вентиляторы имеют невысокую скорость вращения рабочего колеса, обычно не выше 600 *об/мин*.

Ограничение допустимой величины скорости концов лопаток рабочего колеса вынуждает с увеличением диаметра колеса снижать номинальную скорость его вращения. Крупнейшие вентиляторы градирен с диаметром лопастей до 20 *м* имеют скорость вращения не выше 110 *об/мин*.

Для таких вентиляторов применяются как тихоходный безредукторный привод, так и соединение вала двигателя с рабочим колесом вентилятора через редуктор.

Мощные вентиляторы обладают большими маховыми массами, что затрудняет их пуск и в некоторых случаях требует применения электрического торможения для быстрой остановки рабочего колеса.

Кроме вентиляторов промышленного назначения, имеются вентиляторные установки испытательного характе-

ра. Это аэродинамические трубы, установки для испытания винтов летательных аппаратов и т. д.

Для этих механизмов наиболее мощные электроприводы требуются в несколько десятков тысяч киловатт. По всем характеристикам к вентиляторам близки винтовые гребные установки для электродвижения судов,

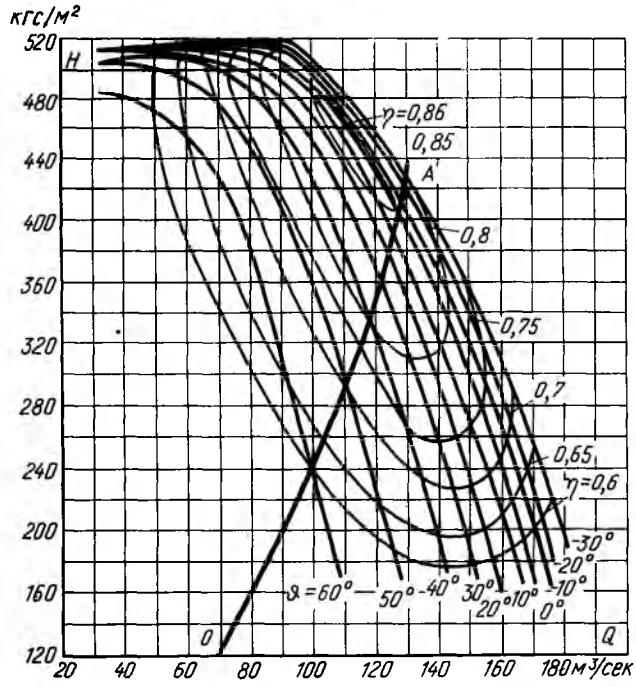

Рис. 24. Характеристики вентилятора ВЦ-32 при 600 *об/мин*
OA — характеристика вентиляционной сети, ϑ — угол установки лопаток направляющего аппарата

однако ввиду специфичности этой отрасли электропривод гребных винтов здесь не рассматривается, читателей, интересующихся этим вопросам, отсылаем к специальной литературе (например, [Л. 35]).

Вентиляторы, в отличие от других турбомеханизмов, всегда работают на сеть без противодавления, вследствие чего зависимость момента статического сопротивления на валу приводного двигателя от скорости носит квадратичный характер: подводимая к вентилятору мощ-

ность, без учета потерь на трение в подшипниках, пропорциональна кубу скорости.

Вентиляторы разделяются на центробежные и осевые. Характеристики центробежных вентиляторов показаны на рис. 24. Они подобны характеристикам центробежных насосов.

Из аэродинамических средств регулирования для центробежных вентиляторов наиболее широко используется регулирование поворотом лопаток направляющего аппарата. Регулирующий эффект при этом достигается за счет двух факторов: уменьшения сечения входного канала (что аналогично дросселированию) и закручивания потока на входе в рабочее колесо [изменение угла α_1 в (6)]. Характеристики вентилятора ВЦ-32 при регулировании направляющим аппаратом показаны на рис. 24. Если характеристика вентиляционной сети имеет вид кривой *OA*, то очевидно, что при регулировании производительности к. п. д. вентилятора будет существенно падать.

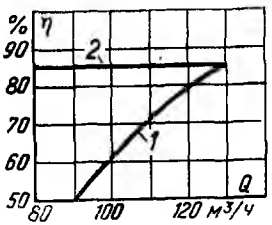

Рис 25 Изменение к. п. д. вентилятора при регулировании производительности.

1 — направляющим аппаратом; *2* — изменением скорости вращения

Если же производительность вентилятора регулировать изменением скорости вращения, то характеристика сети совпадает, в соответствии с формулами пропорциональности (28), (29), с кривой равных к. п. д., и к. п. д. вентилятора во всем диапазоне регулирования останется постоянным. Сравнение к. п. д. при двух способах регулирования производительности дано на рис. 25.

Поворот лопастей направляющего аппарата может осуществляться как вручную, так и с помощью серводвигателя дистанционно. Однако на практике из-за сложности эксплуатации и малой надежности устройства изменение угла установки направляющего аппарата производится чрезвычайно редко (обычно 1 раз в 6 мес.), т. е. такой способ регулирования практически затруднителен для реализации в схемах автоматического регулирования.

Осевые вентиляторы имеют характеристики (рис. 26), по форме существенно отличающиеся от характеристик центробежных машин. Отличие состоит в том, что левая

часть характеристик (на рис. 26 не показана) имеет провалы и является неустойчивой. Такой тип характеристик показан на рис. 6 (кривая 4). Вследствие этого работа осевого вентилятора возможна только в области ниже кривой граничного напора. Правая, рабочая, часть характеристики осевых машин крутопадающая.

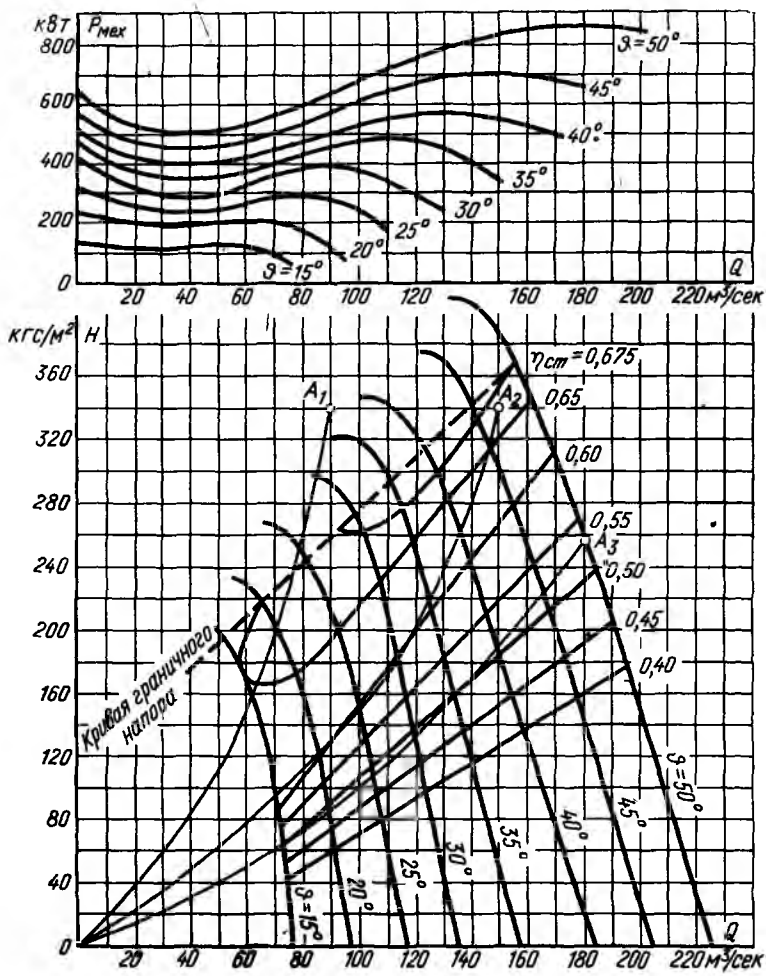

Рис. 26. Характеристики шахтного осевого вентилятора серии «В». $\eta_{ст}$ — статический к. п. д. вентиляторной установки, ϑ — угол установки лопаток рабочих колес.

Регулирование производительности осевых вентиляторов осуществляется изменением угла установки лопаток рабочего колеса. Поворот лопаток производится при остановленном вентиляторе и занимает относительно большое время. В таких случаях рассматриваемый способ регулирования оказывается практически непригодным для систем автоматического управления. Разработанные конструкции поворота лопаток на ходу существенно усложняют конструкцию вентилятора и снижают его надежность За рубежом построено лишь несколько крупных осевых вентиляторов, в которых возможен поворот лопаток на ходу. В отечественной практике этот способ регулирования практически не используется.

Кривые равных к. п. д. осевого вентилятора при регулировании поворотом лопаток располагаются перпендикулярно характеристикам $Q—H$, причем с уменьшением напора к. п. д. заметно падает, в то время как у центробежных машин кривые равных к. п. д. при регулировании направляющим аппаратом располагаются параллельно $Q—H$-характеристикам.

Регулирование производительности осевого вентилятора изменением скорости вращения связано с определенными затруднениями, которые не имели места в центробежных машинах.

Если установить угол поворота лопаток равным, например, 47°, то работа на сеть с характеристикой, такой как OA_1 (рис. 26), т. е. с любой характеристикой, проходящей левее OA_2, окажется невозможной, так как вентилятор попадает в зону неустойчивой работы.

Работа же на сеть с характеристикой, лежащей правее OA_2 (например, OA_3), неэкономична, так как несмотря на регулирование скорости, к. п. д. вентилятора не превысит 0,53. Поэтому зона рациональной работы осевого вентилятора с одним только регулированием скорости довольно узка и в ряде случаев требуется комбинированное регулирование: редкое при значительных изменениях характеристики сети посредством поворота лопаток с одновременным изменением скорости вращения и частое или непрерывное, но в небольшом диапазоне изменением только скорости вращения. Учитывая сказанное, к вопросам регулирования осевых машин нужно подходить с большей осторожностью, чем для центробежных, проводя предварительный анализ возможных

режимов работы. Следует, однако, подчеркнуть, что вопрос о применении регулируемого электропривода для крупных осевых вентиляторов недостаточно изучен, и возможно, что при наличии регулируемого электропривода с хорошими динамическими качествами работа вентилятора, стабилизированного обратными связями по расходу или напору, окажется возможной и в зоне неустойчивых характеристик вентилятора.

В настоящее время для привода крупных вентиляторов применяются в основном синхронные двигатели общепромышленного исполнения или специального исполнения СДВ (для вентиляторов с большим маховым моментом). Вентиляторы малой мощности (ниже 250 *квт*) оснащаются, как правило, асинхронными короткозамкнутыми двигателями.

Рассмотрим теперь на примере шахтных вентиляторов главного проветривания необходимость и условия регулирования их производительности. Подчеркнем еще раз при этом, что шахтные вентиляторы являются весьма крупным потребителем электроэнергии.

Вентиляционная сеть шахты (как и всякая другая) характеризуется эквивалентным отверстием A, под которым понимается такое условное круглое отверстие в тонкой стенке, сопротивление которого эквивалентно сопротивлению сети (при отсутствии противодавления). Величина A определяется формулой

$$A = 0{,}38 \frac{Q}{\sqrt{H}}, \ м^2.$$

Характеристика сети при использовании понятия эквивалентного отверстия выражается как

$$H = \frac{0{,}144}{A^2} Q^2.$$

Величина эквивалентного отверстия связана с коэффициентом аэродинамического сопротивления соотношением

$$R = 0{,}144 \frac{1}{A^2}, \ сек^2/м^5.$$

Необходимость изменения производительности шахтного вентилятора может быть связана со многими обстоятельствами:

1) развитием системы горных выработок, что приводит к уменьшению эквивалентного отверстия шахты, т е

к увеличению сопротивления шахтной вентиляционной сети и необходимости увеличения напора вентилятора для сохранения прежнего расхода;

2) переходом на новый горизонт разработки; в этом случае возможно резкое увеличение эквивалентного отверстия; такие изменения чрезвычайно редки, но значительны, особенно в начальный период (первые 10 лет) работы шахты (В. Б. Уманским [Л. 38] приводится типичная кривая изменения эквивалентного отверстия шахты в результате развития горных выработок; она показана на рис. 27),

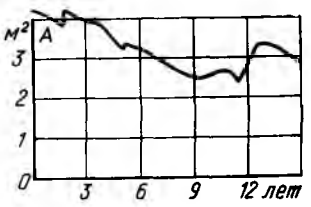

Рис 27 Изменение эквивалентного отверстия шахты в течение срока службы вентилятора.

3) случайным изменением эквивалентного отверстия, вызванным открыванием шахтных дверей и т. п.;

4) изменением газовыделения в шахте, что может иметь место по следующим причинам: геологического характера, изменении объема добычи полезного ископаемого, технологии очистных работ (взрывные работы) и т. д. (если причины, связанные с изменением эквивалентного отверстия, требовали изменения напора вентилятора, то последние причины обусловливают необходимость регулирования количества воздуха, подаваемого в шахту);

5) распорядком работы шахты: в перерыв между сменами, в ремонтные смены и т. п. количество воздуха, подаваемого в шахту, может заметно снижаться.

Столь большое количество обстоятельств, определяющих необходимость и характер изменения режима работы, чрезвычайно затрудняет рациональный выбор вентилятора и делает практически невозможным оптимальное его регулирование в процессе эксплуатации аэродинамическими средствами.

При проектировании вентиляторов для какой-либо шахты обычно исходят из необходимости обеспечения наиболее тяжелого режима, который может возникнуть за весь срок службы шахты, т. е. выбирают вентилятор по максимальным Q и H, которые могут иметь место. Но так как прогнозирование газового режима шахты весьма приближенно и проектировщики, учитывая это,

завышают требуемый расход и напор, то на практике оказывается, что вентиляторы работают при расходах и напорах, существенно меньших расчетных, т. е. работают

Таблица 2

К. п. д. вентилятора	0,20—0,25	0,25—0,30	0,30—0,35	0,35—0,40	0,40—0,45	0,45—0,50	0,50—0,55	0,55—0,60	0,60—0,65	0,65—0,70	0,70—0,75
Количество установок, %	2	4	4	6	8	10	12	14	18	12	10

в режимах, зарегулированных с помощью направляющего аппарата. Поскольку вентиляторы главного проветривания оборудовались исключительно нерегулируемыми электроприводами, то работа со сниженными против расчетных параметрами всегда приводила к снижению к. п. д. В табл. 2 приведены результаты обследования 50 вентиляторных установок Донбасса с центробежными вентиляторами, показывающие распределение установок по значениям их эксплуатационного к. п. д. [Л. 18].

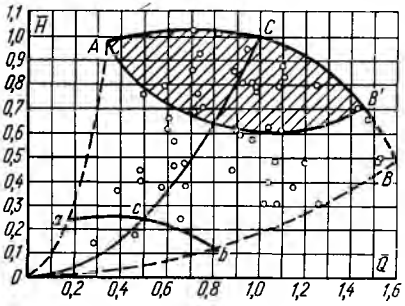

Рис. 28. Режимы работы шахтных центробежных вентиляторов

Режимы работы этих вентиляторов указаны на рис. 28. На этом же рисунке заштрихованная область показывает поле экономичных ремимов работы центробежных вентиляторов (с к. п. д. не ниже 0,6). Как следует из приведенных данных, большинство установок работают с недопустимо низкими к. п. д. и только 10% вентиляторов работают в оптимальном режиме. Такое нерациональное расходование электроэнергии имеет место вследствие того, что вентиляторы не оборудованы регулируемым электроприводом. Как было показано выше (см. рис. 25), если бы вентиляторы регулировались изменением скорости вращения, то сокращение производительности не сопровождалось бы уменьшением к. п. д. Для сравнения на рис. 29 показаны: функция распределения вентиляторов по величинам их к. п. д. при

регулировании направляющим аппаратом, построенная по статистическим данным табл. 2, и функция распределения вентиляторов по величинам их к. п. д. при регулировании с помощью электропривода. Сравнение показывает, что к. п. д. вентиляторов при регулируемом электроприводе должен быть больше, чем при нерегулируемом, в среднем на 12%.

Кроме повышения к. п. д., применение регулируемого привода для мощных вентиляторов позволит в ряде случаев упростить конструкцию турбомашин, исключив направляющий аппарат, а также обеспечить параллельную работу двух или нескольких вентиляторов.

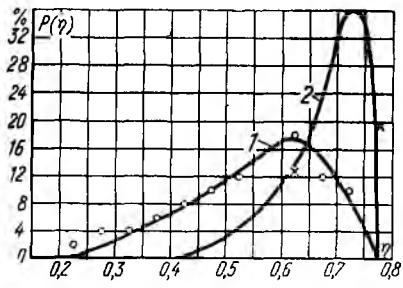

Рис 29 Функция распределения шахтных центробежных вентиляторов по величинам их к п. д.

1 — нерегулируемый привод, 2 — регулируемый привод

В настоящее время тенденции перехода к регулируемому приводу для крупных вентиляторов стали более очевидными. В Советском Союзе пущена первая установка, оборудованная вентиляторами ВЦД-32 с регулируемым приводом по схеме асинхронного вентильного и вентильно-машинного каскадов мощностью 1 000 *квт*. Испытания этой установки показали, что средневзвешенный к. п. д. вентилятора в нормальной области с регулированием посредством машинно-вентильного каскада составляет 0,78, а во всей рабочей области — 0,734. Проектируется ряд новых установок большой мощности с этой же системой привода. Для вентиляторов меньшей мощности в установках кондиционирования воздуха применяются регулируемые электроприводы с индукторными либо гидравлическими муфтами скольжения.

Характеризуя в целом особенности работы вентиляторов и требования к их электроприводу, можно сказать.

вентиляторы являются, как правило, механизмами с длительным режимом работы с большим числом часов работы в году; нагрузка на валу приводного двигателя спокойная, перегрузок не возникает;

скорость вращения рабочего колеса вентиляторов для крупных машин не превышает 600 *об/мин*; с уменьшением мощности вентиляторов их номинальная скорость возрастает до 1 500—3 000 *об/мин*;

вентиляторы являются механизмами, обладающими большими маховыми массами, что необходимо учитывать при расчете пусковых характеристик электроприводов;

для крупных вентиляторов достаточно очевидна целесообразность применения регулируемого электропривода; необходимый диапазон регулирования скорости для вентиляторов не превышает 1 : 2 ($k_{рс}=0,5$); более глубокое регулирование нецелесообразно, учитывая кубическую зависимость потребляемой мощности от скорости;

нагрузка на валу механизма носит чисто вентиляторный характер, т. е. статический момент сопротивления на валу вентилятора пропорционален квадрату скорости;

пуск вентиляторов может производиться как при разгруженной машине (закрыт направляющий аппарат), так и при нормальной работе на сеть; в первом случае максимальный момент при пуске равен примерно 0,4 номинального, во втором — номинальному; при пуске мощных вентиляторов с большим диаметром рабочего колеса обычно требуется ограничение ускорений при пуске во избежание появления чрезмерных динамических напряжений в лопатках рабочего колеса.

8. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДУ

Турбокомпрессоры являются наиболее мощными турбомашинами. В настоящее время мощность турбокомпрессоров достигает 18 000 *квт*, имеется перспектива увеличения мощности до 25 000 *квт* и выше. Эти машины предназначены для повышения давления газа и транспорта газа по магистральным трубопроводам. По характеру своей работы турбокомпрессоры наиболее близки к центробежным насосам и имеют характеристики, подобные этим машинам. Отличие в характеристиках турбокомпрессоров от других центробежных машин заключается в том, что при изменении скорости вращения изменяется наклон напорных характеристик. Это объясняется тем, что при более высоких скоростях вращения повышаются степень сжатия газов и их плотность.

Турбокомпрессоры разделяются в зависимости от степени сжатия газа на: воздуходувки со степенью сжатия меньше 1,15; нагнетатели, степень сжатия которых более 1,15, и компрессоры, представляющие собой охлаждаемые машины с высокой степенью сжатия газа. Наиболее типичные области применения турбокомпрессоров — это: генерирование пневматической энергии (энергетические турбокомпрессоры); транспорт газа по магистральным газопроводам; компремирование воздуха для получения кислорода методом разделения; подача воздуха и кислорода в доменную печь; холодильная техника.

Все турбокомпрессорные машины являются быстроходными. Скорость вращения рабочего колеса их лежит в пределах от 3 000 до 20 000 *об/мин*. Поэтому для турбокомпрессоров применяются, как правило, быстроходные электродвигатели с номинальной скоростью вращения 3 000 *об/мин*. В тех случаях, когда требуется бо́льшая скорость вращения колеса, между двигателями и компрессором устанавливается повышающий редуктор.

Регулирование производительности турбокомпрессоров в настоящее время осуществляется в основном дросселированием на стороне нагнетания. Такое регулирование по своим качественным показателям аналогично регулированию центробежных насосов с помощью задвижки. Как уже отмечалось выше, к. п. д. турбомеханизма при этом снижается пропорционально регулированию производительности. В последние годы Невским машиностроительным заводом для компрессора К-905 разработана система регулирования путем поворота лопаток направляющего аппарата. Коэффициент полезного действия при регулировании направляющим аппаратом будет заметно выше, чем при дросселировании. Однако применение направляющего аппарата существенно усложняет конструкцию турбокомпрессора и снижает его надежность. Поэтому указанный метод не получил широкого распространения в мировой практике. Совершенным способом регулирования производительности турбокомпрессоров является изменение скорости их вращения.

Характеристики турбокомпрессоров К-3250 при различной скорости вращения показаны на рис. 30.

Особенность работы турбокомпрессоров состоит также в том, что каждой скорости вращения соответствует определенная критическая производительность машины, ниже которой работа становится неустойчивой. Причи-

ной возникновения неустойчивой работы турбокомпрессоров является повторяющийся срыв потока с рабочих и направляющих лопаток, что приводит к сильным пульсациям давления, открыванию и закрыванию обратного клапана и возникновению аварийных колебаний в системе. Такой режим называется помпажным. Работа турбокомпрессоров в режимах левее границы помпажа недопустима. Следует, однако, отметить, что с уменьшением скорости область помпажных режимов сокращается,

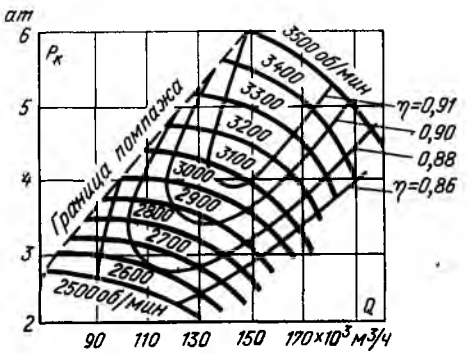

Рис 30. Характеристики компрессора К-3250-41-1 при условиях всасывания $p_н = 1{,}0$ *ат*, $t_н = 20$ °С.

вследствие чего при регулировании путем изменения скорости вращения работа турбокомпрессора с пониженной производительностью становится возможной.

Технологическая необходимость регулирования производительности турбокомпрессорных машин связана с их назначением. Так, режим работы нагнетателей магистральных газопроводов определяется графиком потребления газа на конце газопровода. Задачей регулирования производительности компрессоров является в данном случае обеспечение транспортировки требуемого количества газа при минимальных энергетических затратах. При сокращении потребления газа необходимо снижение производительности во избежание излишнего повышения давления в турбопроводах. Поскольку турбокомпрессоры на магистральных газопроводах объединяются в станции, состоящие из нескольких последовательно и параллельно работающих компрессоров, то в настоящее время регулирование производительности про-

изводится ступенчато изменением числа работающих машин Для плавного регулирования этот метод дополняется дросселированием на стороне нагнетания. Исследования, проведенные институтом Укргипрогаз, показали, что применение электропривода, обеспечивающего плавное экономичное регулирование скорости, дает увеличение к п. д. установки на 25% по сравнению с регулированием посредством дросселирования и на 12% по сравнению с регулированием при помощи направляющего аппарата.

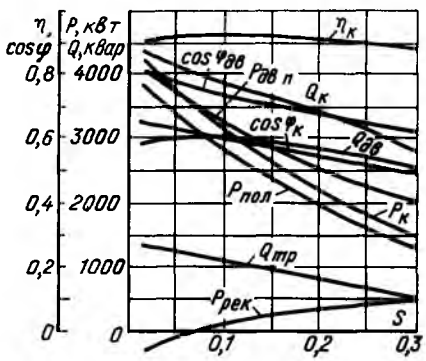

Рис 31 Рабочие характеристики привода турбонагнетателей (экспериментальные данные)

$\eta_к$ — к п д. каскада, $\cos\varphi_к$, $\cos\varphi_{дв}$ — коэффициенты мощности каскада и двигателя, $Q_к$, $Q_{дв}$, $Q_{тр}$ — реактивная мощность каскада, двигателя и трансформатора, $P_{дв\ п}$ — мощность, потребляемая со стороны статора двигателя $P_к$ — мощность, потребляемая приводом, $P_{рек}$ — мощность, отдаваемая инвертором

В СССР проводились промышленные эксперименты по применению регулируемого электропривода для мощных турбонагнетателей магистральных газопроводов. Турбонагнетатель типа 280-11-1 был оборудован регулируемым электроприводом переменного тока мощностью 4 500 *квт* по схеме асинхронного вентильного каскада Опытная эксплуатация этих приводов показала их хорошие регулировочные качества, экономичность и возможность работы параллельно и последовательно соединенных турбокомпрессоров Экспериментальные характеристики этой системы привода показаны на рис. 31.

Обобщая рассмотренные выше особенности работы турбокомпрессорных машин, можно сказать:

турбокомпрессоры, нагнетатели и воздуходувки, как правило, являются машинами с длительными режимами работы, вследствие чего их электроприводы должны быть рассчитаны на длительную работу с большим числом часов работы в год (до 8 400);

турбокомпрессоры являются быстроходными механизмами со скоростью вращения рабочего колеса 3 000—

20 000 *об/мин*, что определяет целесообразность применения для их приводов высокоскоростных двигателей двухполюсных при частоте 50 *гц* либо высокоскоростных двигателей с питанием напряжением повышенной частоты,

все турбокомпрессоры, за исключением турбовоздуходувок, работают на сеть с противодавлением, что определяет существенную зависимость момента сопротивления на валу от скорости;

наиболее совершенным способом регулирования производительности турбокомпрессоров является изменение скорости вращения рабочего колеса, требуемый диапазон регулирования скорости не превышает $k_{р\,с}=0{,}3$;

пуск турбокомпрессоров производится обычно при разгрузке машины соединением полости нагнетания с атмосферной либо с полостью всасывания, вследствие чего максимальный момент при пуске не превышает 0,4 номинального

9. ПОНЯТИЕ О ПОЛНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

С конца 50-х годов в нашей стране стала широко проводиться автоматизация насосных, вентиляторных, турбокомпрессорных и других установок, использующих турбомеханизмы К настоящему времени почти все установки такого рода оборудованы устройствами автоматического управления Однако аппаратура автоматики, применяемая в настоящее время, рассчитана на выполнение лишь ограниченных функций автоматизация операций при пуске и остановке машин, автоматическое управление задвижками, лядами и другими устройствами гидравлического или воздушного тракта, а также контроль за исправностью отдельных элементов установки

Под полной (или комплексной) автоматизацией турбомеханизма будем понимать такое его участие в производственном процессе, при котором работа механизма наиболее полно и экономично отвечает изменяющимся условиям протекания рабочего процесса Параметрами автоматического контроля и регулирования в этом случае являются величины, в конечном счете характеризующие данный рабочий процесс Для насосных установок водоснабжения таким параметром может быть напор у потребителя, для циркуляционных насосов системы охлаждения — температура охлаждаемого объекта; для шахтных вентиляторов — состав атмосферы в подземных выработках, для турбокомпрессоров — давление воздуха или газа у потребителя, для нагнетательных газопроводов и нефтепроводов — соответствие количества транспортируемого продукта расходу его у потребителя Если система автоматического управления турбомеханизмом включена в общую систему управления производством, то параметрами регулирования могут быть такие технико экономические показатели, как производительность, себестоимость, а также параметры, характеризующие качество продукции

Таким образом, отличительными особенностями систем комплексной автоматизации являются взаимосвязь работы турбомеханизма

с работой других механизмов или устройств, входящих в данный технологический комплекс, автоматическое регулирование режима работы (расхода и напора) турбомеханизма с целью оптимизации технологического процесса.

Осуществление подобных систем регулирования во многих случаях связано с необходимостью применения управляющих вычислительных машин, в том числе самонастраивающихся систем.

Рассмотрим несколько примеров структурного построения системы полной автоматизации турбомеханизмов.

1. Вентиляторы крупных градирен, применяемых на химических комбинатах для охлаждения воды, циркулирующей через реакторы, служат для повышения интенсивности теплоотвода. Задачей авто-

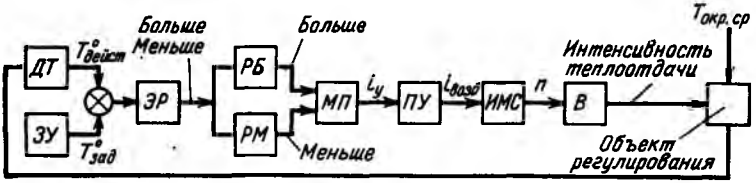

Рис. 32. Структурная схема автоматического регулирования температуры воды, охлаждаемой в градирне.

ДТ — датчик температуры, *ЗУ* — задающее устройство, *РБ*, *РМ* — реле «больше—меньше»; *МП* — моторный потенциометр, *ПУ* — промежуточный усилитель, *ИМС* — электропривод с индукторной муфтой скольжения, *В* — вентилятор, *ЭР* — электронный регулятор

матического регулирования производительности этих вентиляторов является поддержание температуры охлажденной воды с высокой степенью точности. Постоянство температуры воды позволяет стабилизировать технологический процесс в реакторах и повысить качество продукции. Структурная схема системы автоматического регулирования производительности вентиляторов градирен показана на рис. 32.

Сигнал от датчиков температуры *ДТ* циркуляционной воды сравнивается с сигналом задающего устройства *ЗУ*, определяющим требуемую величину температуры воды. Сравнение этих сигналов осуществляется в электронном регуляторе *ЭР*, который определяет необходимость увеличения или уменьшения интенсивности охлаждения воды.

Поскольку постоянная времени охлаждения воды относительно велика, то в подобных системах применяются регуляторы прерывного действия с изодромным звеном, причем зона нечувствительности регулятора, а также постоянная времени изодрома регулируются таким образом, чтобы процесс носил апериодический характер На выходе электронного регулятора включены реле *РБ* и *РМ*, которые включаются при необходимости увеличения или уменьшения интенсивности охлаждения. Эти реле управляют моторным потенциометром *МП*, включенным на вход промежуточного усилителя *ПУ*, питающего обмотку возбуждения индукторной муфты скольжения *ИМС*. Изменение тока возбуждения приводит к изменению скорости вращения вентилятора Последнее вызывает изменение интенсивности охлаждения циркуляционной воды, что позволяет поддерживать постоянной температуру объекта. Характеристики привода

с индукторной муфтой скольжения мягкие, но в данном случае и не требуется повышения их жесткости, поскольку регулирование производится непосредственно по конечному параметру — температуре объекта регулирования.

2. Насосные установки городского или промышленного водоснабжения работают на развернутую гидравлическую сеть с большим количеством параллельных линий. Задачей регулирования производительности насосных установок является поддержание заданной величины напора у каждого из потребителей, что не может быть выполнено только путем регулирования производительности насосной

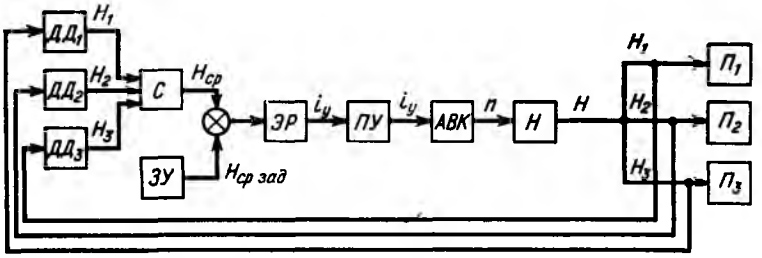

Рис. 33. Структурная схема автоматического регулирования в системе водоснабжения.

*ДД*₁, *ДД*₂, *ДД*₃ — датчики напора; *С* — сумматор, *ЗУ* — задающее устройство, *ЭР* — электронный регулятор, *ПУ* — промежуточный усилитель; *АВК* — электропривод по схеме асинхронного вентильного каскада; *Н* — насос, *П*₁, *П*₂, *П*₃ — потребители.

установки. Поскольку контролируемые параметры (напор у каждого потребителя) являются величинами взаимосвязанными, то выполнение указанной задачи требует применения автоматически управляемых средств распределения напора между параллельно подключенными потребителями.

В системах городского и промышленного водоснабжения обычно не требуется поддержание напора с большой точностью; поэтому регулирование производится более простым способом — по средней величине напора у потребителя. В гидравлической системе определяют точки, величины напора в которых характеризуют этот средний напор у группы потребителей. В этих точках (их называют диктующими) устанавливаются датчики напора, показания которых дистанционно передаются на электронный регулирующий прибор (рис. 33). В этом приборе величины, пропорциональные напору в диктующих точках, усредняются посредством сумматора *С* и сравниваются с заданной средней величиной напора. Дальнейшая работа системы регулирования аналогична описанной выше.

3. Более сложные требования возникают при автоматизации проветривания шахт или рудников. Целью автоматического регулирования здесь должно быть поддержание в безопасных пределах концентрации вредных и взрывоопасных газов в атмосфере добычных лав и горных выработок. Шахтная вентиляционная сеть представляет собой разветвленную систему (рис. 34). Воздух поступает в шахту через вентиляционный ствол и, пройдя по основным вентиляционным выработкам, распределяется по отдельным добычным участкам,

Вентилятор, установленный в конце воздушного тракта, обеспечивает прохождение нужного количества воздуха по выработкам и выбрасывает его в атмосферу

Система автоматического регулирования проветривания должна строиться с применением в качестве датчиков приборов газового анализа атмосферы, устанавливаемых непосредственно в добычных лавах ($КУ_1$, $КУ_2$) Для распределения воздуха по отдельным добычным участкам и выработкам необходимо использование дистанционно управляемых дросселирующих устройств ($ДУ_1$, $ДУ_2$).

Система автоматического регулирования должна быть построена таким образом, чтобы обеспечивать прохождение необходимого количества воздуха через каждую выработку. Указанная задача может быть решена только совместным регулированием производительности посредством вентиляторов главного проветривания и системы дистанционно управляемых устройств распределения воздуха. При этом должны решаться три основные задачи:

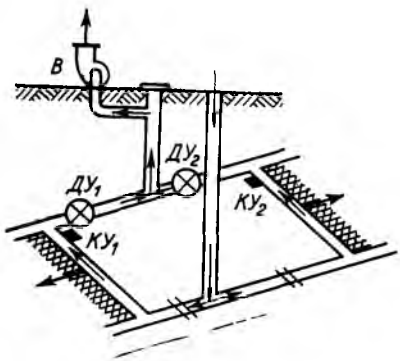

Рис. 34. Схема шахтной вентиляционной сети.

В — вентилятор, *КУ* — газоанализирующие устройства, *ДУ* — дроссельные устройства с дистанционным управлением

а) обеспечение необходимого состава атмосферы в горных выработках,

б) ограничение скорости движения воздуха в допустимых пределах,

в) минимальный расход электроэнергии на проветривание.

Рассматриваемая система регулирования относится ко взаимосвязанным, т е отличается тем, что изменение состояния одного регулирующего органа оказывает влияние на параметры других контуров Другая особенность рассматриваемой системы состоит в том, что она должна обеспечивать осуществление поиска оптимального с точки зрения расхода электроэнергии варианта режима проветривания, т е такая система должна быть самонастраивающейся Реализация подобной системы представляется возможной на базе управляющих вычислительных машин, которые производят сбор данных о состоянии атмосферы в отдельных выработках и на основе этих данных определяют. количество воздуха, проходящего по отдельным выработкам, необходимое положение дистанционно управляемых дроссельных устройств, а также параметры расхода и напора главного вентилятора. Выходные сигналы поступают из управляющей машины на устройства регулирования скорости вентилятора главного проветривания, а также дроссельные устройства

Мы рассмотрели несколько примеров автоматизации собственно турбомашин. Следующим шагом развития систем автоматизации является включение автоматически управляемой турбомашины в общую схему автоматического управления производством. Примером таких систем могут служить циркуляционные насосы атомных элек-

ростанций, производительность которых автоматически регулируется в зависимости от режима работы реактора, который в свою очередь определяется нагрузкой электростанции в данный момент. В такой системе управление всем производством осуществляется общим регулятором мощности, а система управления турбомашиной является одним из объектов регулирования для этого регулятора.

10. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

Разнообразие условий применения турбомеханизмов, их конструкций, режимов эксплуатации определяет возможность и определенную экономическую целесообразность использования различных систем электропривода. Кроме того, развитие техники самого электропривода обусловливает смену одних систем регулируемого электропривода другими, что также приводит к разнообразию возможных технических решений. Приведенная в табл. 3 классификация охватывает те системы привода, которые нашли или могут в ближайшие годы найти применение для различного типа турбомеханизмов.

Как уже говорилось, для привода насосов, вентиляторов и компрессоров до настоящего времени применялись почти исключительно нерегулируемые электроприводы. Несмотря на очевидные тенденции к более широкому использованию регулируемых электроприводов турбомеханизмов, особенно для больших мощностей (свыше 500 *квт*), нерегулируемый привод будет оставаться основным видом электропривода в тех случаях, когда режим работы турбомеханизма по технологическим условиям постоянен или мощность турбомеханизмов невелика и регулирование их производительности может без больших по абсолютной величине потерь энергии быть осуществлено воздействием на сам турбомеханизм или его гидравлическую сеть.

Наиболее распространенным видом привода вследствие своей простоты и наименьшей величины капитальных затрат является короткозамкнутый асинхронный двигатель. Этот вид привода применяется от самых малых мощностей до нескольких тысяч киловатт. При мощностях свыше 300 *квт* наряду с асинхронным короткозамкнутым двигателем все шире применяются синхронные двигатели. В тех случаях, когда по условиям пуска необходимо ограничение ускорений или пусковых токов, используются асинхронные электродвигатели с фазным ротором, регулируемые с помощью сопротивлений.

Регулируемый электропривод должен использоваться в следующих случаях:

1) когда по условиям работы производительность турбомеханизма необходимо часто изменять в широких пределах (например, насосы систем водоснабжения, энергетические и газовые турбокомпрессоры);

2) когда по условиям работы механизм длительно работает с производительностью, существенно меньшей номинальной (например, шахтные вентиляторы);

3) для турбомеханизмов, нуждающихся в автоматическом регулировании производительности с повышенными требованиями к качеству регулирования (например, холодильные турбокомпрессоры, некоторые циркуляционные и питательные насосы);

4) для электропривода испытательных и экспериментальных установок (например, аэродинамические трубы).

Простейшие системы регулируемого электропривода обеспечивают ступенчатое регулирование скорости Обычно используются схемы, дающие возможность получать две скорости вращения. Для турбомеханизмов малой мощности применяются многоскоростные асинхронные двигатели; для двигателей большей мощности получили применение схемы с питанием асинхронного или синхронного двигателей от источников различной частоты. Известный интерес для привода крупных вентиляторов представляет схема синхронно-асинхронного привода, обеспечивающая двухступенчатое регулирование скорости.

Системы ступенчатого регулирования скорости привода, а следовательно, и производительности не обеспечивают задач автоматического регулирования турбомеханизмов и применяются, как правило, в сочетании с гидро- или аэродинамическими средствами регулирования. Использование таких систем носит ограниченный характер.

Регулируемый электропривод с плавным изменением скорости в широком диапазоне наилучшим образом удовлетворяет условиям автоматического и экономичного регулирования производительности турбомеханизмов Классификация регулируемых электроприводов, представленная в табл. 3, включает в себя приводы с двигателем постоянного тока с питанием последнего по системе генератор — двигатель или от полупроводникового преобразователя.

Развитие преобразовательной тиристорной техники привело к тому, что основным видом привода с двигателем постоянного тока стала система с питанием якоря двигателя от тиристорного преобразователя. Этот тип преобразователей полностью вытеснил за рубежом ртутные преобразователи; в нашей стране ртутные преобразователи используются в приводах только для питания двигателей большой мощности (свыше 3—5 тыс. *квт*), но и здесь, однако, ртутные преобразователи уступают место тиристорным.

Следует отметить, что приводы с двигателем постоянного тока, несмотря на отличные регулировочные качества, в большинстве случаев нерациональны для турбомеханизмов. Приводы постоянного тока содержат дорогой электродвигатель постоянного тока и преобразователь на полную мощность, что определяет высокую стоимость привода. Кроме того, двигатель постоянного тока нуждается в квалифицированной эксплуатации, а его применение в тяжелых условиях окружающей среды связано с серьезными конструктивными затруднениями.

Второй группой регулируемых электроприводов, перспективы применения которых постоянно расширяются, являются частотноуправляемые двигатели переменного тока: асинхронные короткозамкнутые либо синхронные. Основной недостаток системы — сложность создания и высокая стоимость преобразователя частоты на полную мощность привода. Привод с двигателями переменного тока с частотным управлением по стоимости дороже даже приводов постоянного тока, однако он обладает преимуществами, определяемыми конструктивными достоинствами короткозамкнутого асинхронного двигателя, что определяет рациональные области использования частотноуправляемых приводов, а именно:

1) для приводов турбомеханизмов, расположенных во взрывоопасных цехах;

2) в тех случаях, когда по конструктивным особенностям турбомеханизма или по условиям окружающей среды приводной двигатель должен быть принят асинхронным короткозамкнутым и в то же время требуется регулирование скорости его вращения (например, для погружных электронасосов);

3) для безредукторного электропривода сверхбыстроходных турбомеханизмов (свыше 3 000 *об/мин*);

4) для сверхмощных электроприводов, для которых машины постоянного тока или асинхронные электродвигатели с фазным ротором построены быть не могут (свыше 20 *Мвт*).

Приводы с частотным управлением разделяются по виду преобразователей частоты, которые могут быть электромашинные либо тиристорные.

Третьей группой перспективных систем привода являются асинхронные каскады. Достоинство этих приводов применительно к турбомашинам определяется тем, что стоимость и другие технико-экономические показатели каскадов зависят от глубины регулирования, поскольку преобразованию в этих схемах подвергается не полная энергия, потребляемая приводом, а лишь часть ее, пропорциональная диапазону регулирования. Поскольку турбомеханизмы в большинстве своем нуждаются в неглубоком регулировании, то каскадные схемы асинхронного привода оказываются в большинстве случаев, в особенности для приводов средней и большой мощности, наиболее предпочтительными для регулирования скорости турбомеханизмов.

Вентильные каскады различаются по виду преобразователей, включаемых в роторную цепь приводного асинхронного двигателя. Различают каскады электромашинные, вентильно-машинные и вентильные. К этому же типу привода относятся некоторые коллекторные двигатели переменного тока, работающие по принципу электромашинных каскадов.

Наибольший интерес среди каскадных приводов представляют вентильные (тиристорные) и вентильно-машинные каскады, которые в настоящее время уже получают промышленное применение для привода турбомеханизмов мощностью от десятков киловатт до нескольких тысяч киловатт. Каскадные приводы и машины двойного питания в будущем должны остаться наиболее рациональной системой регулируемого электропривода для турбомеханизмов большой и средней мощности.

Коллекторные двигатели переменного тока и электромашинные каскады, относительно широко ранее применявшиеся за рубежом для привода турбомеханизмов, в настоящее время применяются реже, уступая место вентильным каскадам.

Для турбомеханизмов возможно применение и таких систем регулируемого асинхронного привода, в которых

энергия скольжения теряется бесполезно, а к. п. д. привода существенно снижается при уменьшении скорости. К таким системам относятся приводы с нерегулируемым двигателем и индукторной муфтой скольжения, асинхронные приводы с реостатным или дроссельным регулированием или другим регулятором напряжения, подводимого к статору приводного электродвигателя; привод с поворотным статором.

Указанные системы регулируемого электропривода обладают удовлетворительными регулировочными качествами, однако снижение к. п. д. привода при регулировании ограничивает область их применения (в случаях длительной работы с пониженными скоростями) установками малой мощности (примерно до 100 *квт*).

Системы привода, перечисленные в табл. 3, и условия их применения для турбомеханизмов подробно рассмотрены в последующих главах.

Таблица 3

Классификация систем электропривода турбомеханизмов

I. Нерегулируемый электропривод:

а) электропривод с асинхронным короткозамкнутым двигателем;
б) электропривод с синхронным двигателем;
в) электропривод с асинхронным двигателем с фазным ротором.

II. Регулируемый электропривод:

А. Электропривод со ступенчатым регулированием

а) электропривод с многоскоростным асинхронным двигателем;
б) синхронно-асинхронный привод;
в) двухскоростной электропривод с частотным преобразователем.

Б. Электропривод с плавным регулированием

1. Электропривод с двигателем постоянного тока:
   а) электропривод с коллекторным двигателем постоянного тока с питанием от электромашинных и статических преобразователей;
   б) электропривод с бесколлекторным (вентильным) двигателем постоянного тока.
2. Асинхронный частотноуправляемый электропривод:
   а) с питанием от машинного преобразователя частоты;
   б) с питанием от тиристорного преобразователя частоты с непосредственной связью;
   в) с питанием от тиристорного преобразователя частоты инверторного типа.
3. Электропривод с индукторной муфтой скольжения.

4. Асинхронный электропривод с регулированием напряжения на статоре двигателя:
   а) дроссельный электропривод;
   б) с тиристорным регулятором напряжения.
5. Двухдвигательный асинхронный привод с поворотным статором.
6. Электропривод с коллекторными двигателями переменного тока
7. Асинхронный каскадный электропривод:
   а) электромашинные каскады,
   б) вентильный каскад,
   в) вентильно-машинный каскад;
   г) вентильно-машинный электромеханический каскад,
   д) машина двойного питания.

Глава третья

НЕРЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

11. ЭЛЕКТРОПРИВОД С АСИНХРОННЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Электропривод с короткозамкнутым асинхронным двигателем является наиболее распространенным благодаря простоте и малой стоимости. Такой электропривод наиболее прост в эксплуатации, не требует постоянного наблюдения и обеспечивает длительную надежную работу. Он является основным видом нерегулируемого электропривода для турбомеханизмов. Для нерегулируемых по скорости турбомеханизмов мощностью до 320 *квт* в подавляющем большинстве случаев применяются асинхронные короткозамкнутые двигатели. При больших мощностях применяются как асинхронные короткозамкнутые, так и синхронные двигатели. Вопрос о целесообразности использования синхронных машин вместо асинхронных рассмотрен ниже. Следует отметить, что в отечественной практике стремятся к большему использованию синхронных двигателей. В странах Западной Европы предпочтение отдается асинхронным короткозамкнутым двигателям даже при значительной мощности электропривода. Крупнейшие короткозамкнутые электродвигатели, выпускаемые в нашей стране, имеют мощность до 8 000 *квт*. За рубежом применяются и более мощные двигатели. В США для привода питательных насосов тепловых электростанций были изготовлены

асинхронные электродвигатели мощностью 22 500 *квт* при скорости вращения 1 500 *об/мин*.

Определенные трудности применения короткозамкнутых двигателей возникают в двух случаях: когда необходим плавный разгон турбомеханизма (например, вентиляторы крупных градирен); когда механизм обладает большими маховыми массами, в результате чего энергия скольжения при разгоне двигателя оказывается настолько большой, что происходит чрезмерный нагрев клетки ротора при пуске.

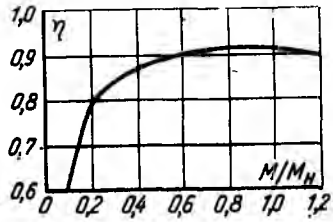

Рис. 35. Зависимость к. п. д. асинхронных короткозамкнутых двигателей серии А от нагрузки.

В первом случае ограничение ускорений может быть достигнуто снижением напряжения на статоре двигателя с помощью автотрансформатора, пускового трансформатора или пускового сопротивления, включенного в цепь статора.

При использовании короткозамкнутых двигателей для привода турбомеханизмов со значительными маховыми массами необходимо производить поверочный расчет на нагрев обмотки статора и клетки ротора при пуске. Методы такого расчета изложены в следующем разделе.

При использовании нерегулируемого электропривода регулирование производительности осуществляется аэродинамическими средствами. При расчете к. п. д. агрегата турбомашина — двигатель необходимо в этом случае учитывать снижение к. п. д. самого двигателя при уменьшении нагрузки на его валу.

На рис. 35 показана типичная зависимость к. п. д. асинхронного короткозамкнутого двигателя от нагрузки. Выразим эту зависимость аналитически, приняв, что оптимальный к. п. д. двигателя соответствует номинальному режиму. Потери в нерегулируемом двигателе складываются из постоянных K и переменных потерь, пропорциональных примерно квадрату нагрузки $v = BP^{*2}_{\text{пол}}$.

Коэффициент полезного действия может быть выражен как

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P^*_{\text{пол}}}{P^*_{\text{пол}} + K + BP^{*2}_{\text{пол}}}, \qquad (43)$$

где $P^*_{пол}$ — мощность на валу двигателя в относительных единицах $P^*_{пол} = P/P_{ном}$.

Известно, что максимум к. п. д. двигателя имеет место при равенстве постоянных и переменных потерь, т. е. при $K = BP^{*2}_{пол}$. Полагая, что это условие соответствует номинальному к. п. д. двигателя, когда $\eta = \eta_н$ и $P^*_{пол} = 1$, найдем значения коэффициентов K и B:

$$K = B = \frac{1}{2\eta_н} - \frac{1}{2}.$$

Подставляя найденные значения в (43), получим аналитическое выражение для к. п. д. двигателя при неполных нагрузках:

$$\eta = \frac{P^*_{пол}}{P^*_{пол} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\eta_н} - 1\right)(1 + P^{*2}_{пол})}. \qquad (44)$$

12 ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

а) Сравнение синхронных и асинхронных электроприводов

Синхронные машины обладают рядом известных достоинств, которые обеспечили их широкое применение для приводов механизмов большой и средней мощности, не требующих регулирования скорости вращения. Достоинства и недостатки синхронных машин достаточно проанализированы в литературе [Л. 33], поэтому ограничимся лишь перечислением основных преимуществ и недостатков синхронных двигателей по сравнению с асинхронными для случаев нерегулируемого электропривода.

Преимущества синхронных двигателей следующие.

1. Главное преимущество синхронных двигателей заключается в возможности регулирования величины и изменении знака реактивной мощности. Синхронные машины обычно выполняются для работы с опережающим коэффициентом мощности, что позволяет компенсировать в определенных пределах реактивную мощность в питающей энергосистеме. В тех случаях, когда не требуется генерирование реактивной мощности, синхронные машины могут работать с коэффициентом мощности, равным единице.

2. Синхронные машины имеют наиболее высокий к. п. д. из всех вращающихся электрических машин. Коэффициент полезного действия синхронных машин всегда выше, чем асинхронных того же габарита. Это объясняется тем, что потери в стали синхронных машин всегда меньше, чем у асинхронных; потери в меди статора также меньше для синхронных машин вследствие лучшего коэффициента мощности, а остальные потери примерно равны.

3. Синхронные двигатели обеспечивают строгое постоянство скорости вращения независимо от величины нагрузки.

4. Больший, чем у асинхронных машин, зазор между ротором и статором делает синхронную машину более надежной с точки зрения конструкции.

5. Синхронные машины оказывают определенное положительное влияние на работу энергосистемы в целом (повышение устойчивости энергосистемы, поддержание уровня напряжения и др.).

Стоимость и вес синхронных машин (без учета системы возбуждения) примерно такие же, как и для асинхронных машин с фазным ротором, и незначительно (не более чем на 15%) превосходят аналогичные показатели для короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Синхронные машины по сравнению с асинхронными имеют и ряд недостатков, основные из которых следующие.

1. Бо́льшая стоимость синхронного привода, главным образом, за счет системы возбуждения; переход к схемам с глухоподключенным возбудителем позволил существенно снизить стоимость системы возбуждения.

2. Меньшая надежность синхронного привода за счет меньшей надежности элементов системы возбуждения; этот недостаток существенно уменьшается при переходе к статическим возбудителям и бесщеточным возбудителям с вращающимися выпрямителями.

3. Синхронные двигатели из-за наличия контактных колец и коллектора машинного возбудителя менее асинхронных короткозамкнутых двигателей приспособлены для работы в помещениях с агрессивной средой или повышенной влажностью и требуют более квалифицированного обслуживания. Переход к статическим или бесщеточным возбудителям будет, безусловно способствовать устранению этого недостатка.

4. Синхронные машины оказывают не только полезное, но и вредное влияние на энергосистему в случае аварийных режимов, вызванных короткими замыканиями в системе. В этих случаях подпитывающее действие синхронных машин увеличивает токи короткого замыкания, что вынуждает во многих случаях устанавливать токоограничивающие реакторы и увеличивать разрывную мощность масляных выключателей.

Резюмируя сравнительные свойства нерегулируемых синхронного и асинхронного приводов, можно сказать, что нерегулируемый синхронный привод имеет лучшие энергетические показатели, но требует больших капитальных затрат и более высокого уровня обслуживания. Естественно, что достоинства синхронных машин ярче проявляются при больших мощностях привода, поэтому синхронные двигатели применяются сейчас для приводов выше 320 *квт*. Однако развитие и совершенствование синхронных машин определяют тенденцию применения этих машин и при меньших мощностях. Для нерегулируемых приводов турбомеханизмов мощностью свыше 1 000 *квт* в нашей стране применяются почти всегда синхронные приводы. Исключения составляют лишь предприятия химической промышленности, где вследствие большого числа крупных синхронных машин возможно применение и асинхронных без опасности снижения общего коэффициента мощности предприятия.

Вопрос о том, в каких случаях для нерегулируемых приводов мощностью 320—1 000 *квт* применять синхронные двигатели, должен решаться на основе конкретного технико-экономического анализа, методические основы которого даны в гл. 7. Общие рекомендации сводятся к тому, что синхронный привод предпочтительнее для установок большой мощности с хорошими условиями окружающей среды и высоким уровнем обслуживания (большие насосные и турбокомпрессорные станции, крупные вентиляторные установки и т. п.). Для привода отдельных насосных агрегатов может допускаться применение асинхронных короткозамкнутых двигателей.

На наш взгляд, задача рационального использования синхронных двигателей должна решаться на основе составления оптимального баланса потребления активной и реактивной мощности для всего предприятия (энергосистемы) в целом. При этом суть задачи состоит не в максимальном использовании синхронных двигателей,

а в нахождении правильного соотношения между синхронными и асинхронными машинами на данном предприятии.

Прогрессивное направление совершенствования электропривода турбомеханизмов состоит в использовании регулируемого электропривода. Однако большинство систем регулируемого электропривода имеет весьма низкий коэффициент мощности, что вынуждает применять какие-либо средства компенсации реактивной мощности. Использование синхронных двигателей наряду с регулируемыми приводами является лучшим решением вопроса. Поэтому наиболее правильным, там где это позволяет технология работы самих турбомеханизмов, является разделение агрегатов насосной, компрессорной и других станций на регулируемые агрегаты и нерегулируемые, причем последние в этом случае должны оборудоваться синхронными двигателями.

Важным преимуществом синхронных машин является то, что они могут быть изготовлены практически на любую мощность. Из сверхмощных двигателей следует отметить синхронные двигатели, изготовленные фирмой АСЕА (Швеция) для привода насосов станции «Дос Амигос» в Калифорнии. Мощность двигателей 32 000 *ква* Интересно отметить, что пуск двигателей производится без снижения напряжения на статоре.

б) Пуск синхронных и асинхронных короткозамкнутых двигателей турбомеханизмов

Разгон турбомеханизмов с приводом от синхронных или асинхронных короткозамкнутых двигателей имеет ряд особенностей, которые следует учитывать при проектировании таких электроприводов.

Некоторые особенности облегчают условия работы привода, некоторые создают дополнительные трудности. К ним относятся:

1) редкие пуски, поскольку наиболее характерным режимом работы турбомеханизмов является длительный;

2) малая величина момента трогания, обычно не превышающая 25—30% номинального;

3) большая величина маховых масс, характерная для многих турбомеханизмов (особенно вентиляторов); при разгоне таких механизмов использование синхронных или асинхронных короткозамкнутых двигателей связано

со значительными трудностями вследствие большого времени пуска;

4) квадратичная зависимость статического момента от скорости обусловливает увеличение момента сопротивления механизма при подходе к синхронной скорости, что затрудняет вхождение синхронных двигателей в синхронизм. Поэтому при пуске турбомеханизма под нагрузкой (тяжелый пуск) входной момент выбранного синхронного двигателя должен превышать номинальный статический момент турбомеханизма;

5) некоторые турбомеханизмы (в частности, турбокомпрессоры и вентиляторы) требуют ограничения величины ускорений в процессе пуска.

Рассмотрим, как указанные особенности разгона турбомеханизмов должны учитываться при проектировании электропривода с синхронными или асинхронными короткозамкнутыми двигателями.

Выведем соотношение, позволяющее приближенно определить время разгона машины до определенной скорости при работе на сеть, имеющую характеристику вида (17).

Уравнение движения привода

$$M - M_{ст} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt},$$

где GD^2 — маховый момент турбомеханизма и привода, приведенный к валу двигателя, *кгс · м*²; $M_{ст}$ — момент сопротивления на валу турбомеханизма, определяемый выражением (32); M — момент, развиваемый приводом, *кгс · м*.

Пусковые характеристики синхронных и асинхронных короткозамкнутых двигателей могут быть аппроксимированы в виде

$$M = M_{нач} + kn,$$

где $M_{нач}$ — начальный пусковой момент привода при $n = 0$.

Коэффициент k в этой формуле определяется:

для синхронных машин

$$k = \frac{M_{вх} - M_{нач}}{n_0};$$

для асинхронных короткозамкнутых

$$k = \frac{M_{макс} - M_{нач}}{n_н},$$

т. е. принимается, что момент привода в зависимости от скорости изменяется линейно ($k=\text{const}$).

В большинстве случаев это допущение не дает больших погрешностей. В тех случаях, когда пусковой момент изменяется по закону, заметно отличающемуся от линейного, действительную кривую $M=f(n)$ можно разбить на ряд прямолинейных участков и находить время разгона и ускорение на каждом участке отдельно.

Если разгон происходит под действием момента привода, изменяющегося при $k=\text{const}$, то время разгона от нуля до скорости n составит:

$$t_{\text{р}}=\frac{GD^2}{375}\frac{1}{\sqrt{k^2+4k_M(M_{\text{нач}}-M_{\text{тр}})}}\times$$

$$\times\ln\frac{n\left[k+\sqrt{k^2+4k_M(M_{\text{нач}}-M_{\text{тр}})}\right]+2(M_{\text{нач}}-M_{\text{тр}})}{n\left[k-\sqrt{k^2+4k_M(M_{\text{нач}}-M_{\text{тр}})}\right]+2(M_{\text{нач}}-M_{\text{тр}})}.$$

Если разгон происходит с постоянным ускорением, т. е. средний момент, развиваемый приводом, изменяется по закону $M=M_{\text{нач}}+k_1n^2$, а турбомеханизм разгружен, то время разгона до скорости n будет:

$$t_{\text{р}}=\frac{GD^2}{375}\frac{n}{(M_{\text{нач}}-M_{\text{тр}})}. \qquad (45)$$

Полученные формулы дают возможность приближенно определить время разгона турбомеханизма и построить кривую переходного процесса $n=f(t)$ при пуске.

Регулировать время разгона в сторону его увеличения можно, уменьшая при пуске величину напряжения, подводимого к статору синхронного или асинхронного короткозамкнутого двигателя.

При этом $M_{\text{нач}}=M_{\text{нач.н}}(u_1^{\text{д}})^2$ и $k=k_{\text{н}}(u_1^{\text{д}})^2$.

Здесь $u_1^{\text{д}}$ — долевое значение напряжения на статоре во время пуска.

Снижение напряжения может осуществляться включением в цепь статора пускового понижающего трансформатора или автотрансформатора (автотрансформаторный пуск) или пусковых реакторов (реакторный пуск). Все выпускаемые асинхронные короткозамкнутые и синхронные двигатели (за исключением двухполюсных синхронных машин серии СТМ) допускают прямой пуск, и снижение напряжения на статоре следует производить

только с целью уменьшения ускорений и пусковых токов. Применение реакторного и особенно автотрансформаторного пуска существенно усложняет схему привода.

Для целей пуска у современных синхронных двигателей большинства типов в роторе имеется специальная пусковая обмотка, посредством которой производится асинхронный пуск двигателей. Эта обмотка аналогична обмотке (клетке) ротора асинхронного короткозамкнутого двигателя.

При разгоне турбомеханизмов с большими маховыми массами потери в пусковой обмотке или в роторе могут достигать весьма большой величины и вызывать нагрев клетки сверх допустимой температуры. В некоторых случаях эти потери настолько велики, что применение синхронных или асинхронных короткозамкнутых машин в обычной схеме их включения может оказаться принципиально невозможным.

Поэтому при использовании синхронных или асинхронных короткозамкнутых машин для привода турбомеханизмов с большими маховыми массами необходимо делать поверочный расчет по условиям нагрева. Для синхронных явнополюсных двигателей проверку следует производить по нагреву пусковой клетки; у асинхронных же двигателей нормальной конструкции лимитирующей по условиям нагрева при пуске является обычно температура статорной обмотки.

Энергия, выделяющаяся в клетке за период пуска, определяется как энергия скольжения

$$A = \int_{t=0}^{t=t_p} P_{эм} s \, dt, \qquad (45а)$$

где A — энергия, выделяющаяся в клетке за время пуска, *кдж*; $P_{эм}$ — электромагнитная мощность двигателя, равная

$$P_{эм} = \frac{Mn_0}{975}, \ квт; \qquad (46)$$

$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$ — скольжение.

Подставляя (46) в (45а), получим:

$$A = \frac{n_0}{975} \int_{t=0}^{t=t_p} Ms \, dt = \frac{n_0}{975} \int_{t=0}^{t=t_p} M \, dt - \frac{1}{975} \int_{t=0}^{t=t_p} Mn \, dt. \qquad (47)$$

Воспользовавшись (37), учитывая в соответствии с (31а) зависимость момента сопротивления от скорости $M_{ст} = k_M\left(\frac{n}{n_0}\right)^2$, получим:

$$M = k_M\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 + \frac{GD^2}{375}\frac{dn}{dt}.$$

Подставляя это выражение момента в (47) и преобразовывая, получим:

$$A = \frac{GD^2 n_0^2}{2\cdot 975\cdot 375} + \frac{k_M}{975 n_0}\left(\int_{t=0}^{t=t_p} n^2\,dt - \frac{1}{n_0}\int_{t=0}^{t=t_p} n^3\,dt\right). \qquad (48)$$

Как видно из (48), потери в клетке при разгоне синхронного двигателя состоят из двух слагаемых: первое определяется работой, идущей на увеличение кинетической энергии разгоняемых маховых масс, второе пропорционально работе по преодолению сил сопротивления при пуске.

Основным по величине при пуске механизмов с большими маховыми массами является первое слагаемое, поэтому часто пользуются упрощенной формулой

$$A = \frac{GD^2 n_0^2}{2\cdot 365\,000},\ кдж. \qquad (49)$$

Нужно заметить, что при пуске эта составляющая потерь в клетке не зависит ни от способа пуска, ни от величины ускорения, а численно равна запасу кинетической энергии, которую приобретают при разгоне маховые массы. При более тщательных расчетах представляется необходимым учитывать и второе слагаемое, значение которого зависит от величины ускорения. Для упрощения расчета положим, что разгон совершается с постоянным ускорением за время $t_р$, определяемое (45). Тогда

$$n = \frac{n_0}{t_р}t. \qquad (50)$$

Подставляя (40) и (50) в (48) и интегрируя, найдем полную величину потерь энергии в клетке за время пуска:

$$A = GD^2 n_0^2\left(1{,}36 + 0{,}226\,\frac{k_M}{M_{нач} - M_{тр}}\right)10^{-6},\ кдж. \qquad (51)$$

Если допустить, что за время пуска тепло, выделяющееся в клетке двигателя, не передается стали ротора и

окружающей среде, то величина нагрева клетки может быть определена из следующего выражения:

$$\Delta T = \frac{An_{п}}{9{,}81G\lambda}, \qquad (52)$$

где ΔT — перегрев клетки, °С (допустимая для двигателей температура перегрева клетки составляет около 300 °С; допустимая величина перегрева статорной обмотки около 60 °С); λ — удельная теплоемкость металла клетки *кдж/(кг·град)* (для меди $\lambda = 0{,}39$ *кдж/кг·град*, для латуни — $\lambda = 0{,}38$ *кдж/кг·град*; G — масса клетки *кгс·сек²/м*; $n_п$ — число возможных пусков подряд (для ответственных механизмов, например, таких, как шахтные вентиляторы, расчет ведут из условия двух пусков подряд, полагая, что первый пуск может быть по каким-либо причинам прерван; таким образом, $n_п$ принимают равным либо 1, либо 2).

Для асинхронных короткозамкнутых двигателей, производя проверку по условиям нагрева обмотки статора, можно положить, что потери в статорной обмотке равны потерям в клетке ротора; в этом случае в (52) G — масса статорных обмоток, *кгс·сек²/м*.

Пользуясь (51) и (52), можно вычислить допустимую величину маховых масс, разгон которых приводит к предельно допустимому нагреву пусковой обмотки

В табл. 1П (см. приложение) приведены ориентировочные данные по допустимым маховым массам, которые можно разгонять синхронными электродвигателями серии СДН (СДНЗ).

Для привода шахтных вентиляторов, обладающих значительными маховыми массами, была разработана специальная серия синхронных двигателей СДВ, обладающих усиленной пусковой клеткой. Ориентировочные данные по допустимым маховым массам для этих двигателей приведены в табл. 2П.

Для привода питательных насосов тепловых электростанций, турбокомпрессоров, турбовоздуходувок и других турбомеханизмов с номинальной скоростью вращения 3 000 *об/мин* широко используются синхронные электродвигатели серии СТМ (СТМП). Конструктивной особенностью этих двигателей является массивная конструкция ротора Пусковая короткозамкнутая обмотка в этих машинах отсутствует. Момент при асинхронном пуске со-

здается за счет взаимодействия вращающегося потока статора с вихревыми токами, наводимыми в массивной «бочке» ротора. Выпускаются две модификации электродвигателей: серии СТМ в закрытом исполнении и серии СТМП в исполнении закрытом, продуваемом под избыточным давлением для работы во взрывоопасных помещениях.

Электродвигатели типа СТМ (СТМП) мощностью свыше 1 500 *квт* не рассчитаны на прямой пуск и подключаются к сети на время пуска через реактор либо автотрансформатор. Вследствие того что энергия скольжения выделяется при пуске в массивной бочке ротора, пользоваться при расчете теплового режима пуска вышеприведенной методикой нельзя. Пусковые характеристики этих двигателей должны согласовываться с заводом-изготовителем при их заказе.

Для синхронных машин, кроме ограничений, связанных с нагревом пусковой клетки, существуют еще ограничения по условиям вхождения двигателя в синхронизм, выполнение которых существенно усложняется по мере возрастания маховых масс механизма.

Проверку вхождения в синхронизм можно производить, пользуясь критерием, предложенным Р. А. Лютером [Л. 14]:

$$s_{вх} \leqslant \frac{254}{n_0} \sqrt{\frac{P_н k_M}{50GD^2}}, \qquad (53)$$

где $s_{вх}$ — скольжение, до которого разгоняется двигатель в процессе асинхронного пуска; k_M — перегрузочная способность синхронного двигателя; $P_н$ — номинальная мощность синхронного двигателя, *квт*.

Пример проверочного расчета пуска синхронного двигателя приведен в § 17.

в) Возбуждение синхронных машин

Известны три схемы подключения возбудителя к индуктору синхронного двигателя: схема с глухоподключенным возбудителем (рис. 36,*а*); с возбудителем, подключенным последовательно с разрядным сопротивлением (рис. 36,*б*), и схема с включением обмотки возбуждения на время пуска на разрядное сопротивление (рис 36,*в*). В быстроходных электроприводах возбуди-

тель устанавливается обычно на валу двигателя; при тихоходных механизмах возбудитель приводится во вращение от отдельного двигателя.

Наибольшее распространение получила схема с глухоподключенным возбудителем (рис. 36,*а*) благодаря своей максимальной простоте, надежности и малой стоимости. Эта схема может рекомендоваться для большинства синхронных электроприводов турбомеханизмов. Разрядное сопротивление, включенное в схемах по рис. 36,*б*, *в*, улучшает условия пуска и обеспечивает ускоренное гашение поля двигателя после отключения от сети. Эти схемы целесообразны для применения в приводе турбомеханизмов лишь в исключительных случаях (при тяжелом пуске, необходимости ресинхронизации мощных приводов при АПВ или АВР).

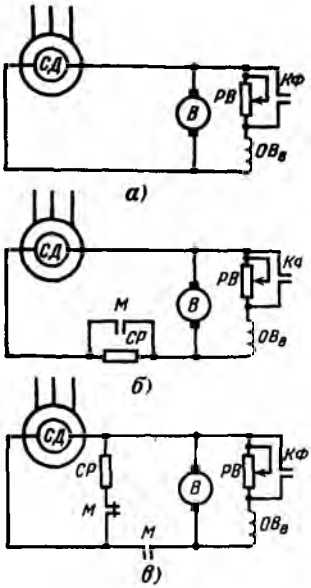

Рис. 36. Схема возбуждения синхронных электродвигателей от электромашинного возбудителя.

Основные направления совершенствования систем возбуждения синхронных машин состоят в замене машинного возбудителя статическим тиристорным с быстродействующей автоматической системой регулирования величины тока возбуждения. Применение систем автоматического регулирования возбуждения, имеющее особенно важное значение для двигателей большой мощности, повышает устойчивость синхронных двигателей и позволяет наиболее полно использовать их преимущества, связанные с возможностью регулирования величины и изменения знака реактивной мощности.

В зависимости от условий работы конкретной установки система регулирования может обеспечивать либо постоянство потребления реактивной мощности, либо максимальную отдачу реактивной мощности, либо поддержание оптимального коэффициента мощности (см. [Л. 19]).

Разработано несколько серий комплектных тиристорных возбудителей для синхронных машин. На рис. 37 показана структурная схема тиристорного возбудителя, разработанного во ВНИИЭлектропривод. Возбудитель рассчитан для механизмов, работающих в длительном режиме со спокойным характером нагрузки, и отличается простотой и надежностью.

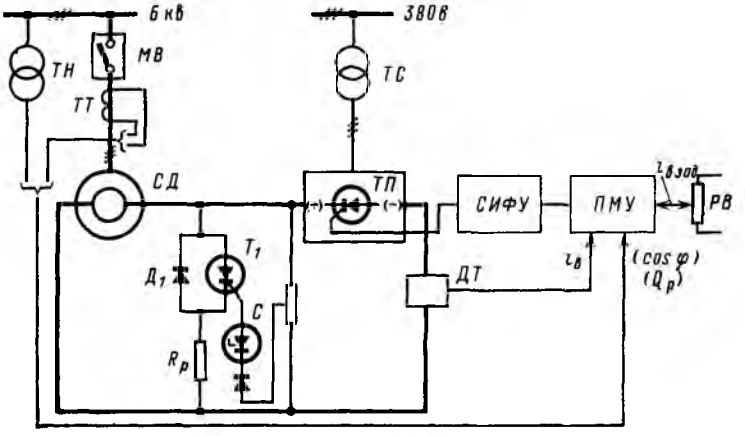

Рис. 37. Структурная схема устройства тиристорного возбуждения синхронного двигателя.

СД — синхронный двигатель; *ТП* — тиристорный преобразователь (по трехфазной мостовой схеме); *ТС* — согласующий трансформатор; *СИФУ* — система импульсного фазового управления тиристорным преобразователем, *РВ* — регулятор тока возбуждения ручной, *ПМУ* — промежуточный магнитный усилитель, *ДТ* — датчик тока возбуждения

Питание тиристорного преобразователя осуществляется от сети 380 *в* через согласующий трансформатор *ТС*. Со стороны выпрямленного тока преобразователь подключен к обмотке возбуждения синхронного двигателя. Несмотря на глухое подключение без коммутирующих контактных аппаратов, обмотка возбуждения включается на разрядное сопротивление $R_р$. Введение разрядного сопротивления производится с помощью вспомогательного тиристора T_1. При подключении двигателя к сети в обмотке возбуждения индуктируется значительная по величине переменная э. д. с. скольжения. Под действием этой э. д. с. открывается стабилитрон *С*, управляющий тиристором T_1, в результате чего обмотка возбуждения включается на разрядное сопротивление. Тиристорный преоб-

разователь при этом заперт. Это позволяет улучшить пусковые характеристики и избежать перенапряжений в цепи возбуждения. Когда двигатель достигает подсинхронной скорости, э. д. с. скольжения в обмотке возбуждения снижается настолько, что становится недостаточной для открывания стабилитрона *С*. Тиристор T_1 закрывается, и подается сигнал на открывание тиристорного преобразователя.

Величина тока возбуждения может регулироваться вручную или автоматически в функции поддержания постоянства cos φ либо реактивной мощности, циркулирующей в статорной цепи синхронного двигателя. При ручном регулировании заданная величина тока возбуждения поддерживается постоянной благодаря наличию отрицательной обратной связи по току возбуждения. Предусматривается автоматическая форсировка возбуждения при снижении напряжения в сети, питающей синхронный двигатель.

При автоматическом управлении величина тока возбуждения регулируется таким образом, что независимо от нагрузки величина коэффициента мощности или реактивного тока (мощности) в статорной цепи поддерживается постоянной. Датчиком реактивной мощности служит фазочувствительный выпрямитель, включаемый в цепь трансформатора тока *ТТ*. Суммирование сигналов в рассматриваемой схеме осуществляется в промежуточном магнитном усилителе, включенном на вход электромагнитной системы импульсно-фазового управления тиристорами СИФУ.

Несмотря на более высокую стоимость по сравнению с электромашинным возбудителем тиристорные устройства возбуждения позволяют полнее использовать достоинства синхронного электропривода.

В табл. 3П (см. приложение) приведены технические данные тиристорных возбудительных устройств серии ТВУ, выпускаемых заводом «Электромашина» (г. Харьков). В отличие от рассмотренной выше схемы устройства ТВУ выполнены на основе полупроводниковой системы импульсно-фазового управления и полупроводниковых управляющих устройств.

Для электроприводов большой мощности особо ответственных установок или турбомашин, работающих в неблагоприятных условиях окружающей среды (например, в химической промышленности), весьма перспективны

конструкции синхронных машин с бесщеточными возбудителями (рис 38).

Источником напряжения возбуждения служит в этом случае генератор переменного тока, устанавливаемый на валу синхронного двигателя Кремниевые диоды для выпрямления тока возбуждения также монтируются на валу и являются вращающимися. Регулирование тока воз-

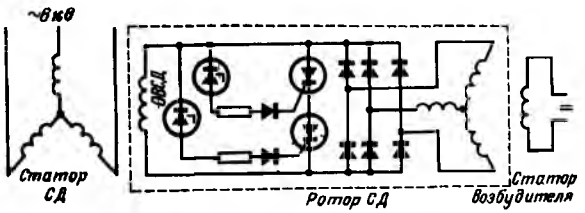

Рис 38 Схема синхронного двигателя с бесщеточным возбудителем

буждения синхронного двигателя осуществляется посредством изменения тока возбуждения генератора переменного тока. Такая конструкция позволяет исключить из цепи возбуждения щеточно-коллекторные контакты, что повышает надежность синхронных машин и делает их конструкцию более пригодной для работы в агрессивных средах. Подобные двигатели начали выпускаться некоторыми фирмами Западной Европы.

В Англии изготовлено несколько синхронных бесщеточных двигателей мощностью 5 000 *квт*, 1 500 *об/мин* [Л. 48]. Фирмой Сименс (ФРГ) выпускаются двигатели со встроенными бесконтактными возбудителями мощностью до 10 000 *квт* [Л. 49].

13. ЭЛЕКТРОПРИВОД С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором находят широкое применение для привода турбомеханизмов, как регулируемых по скорости, так и нерегулируемых. Основные преимущества их определяются простотой и относительно малой стоимостью.

Асинхронные двигатели с фазным ротором могут быть сконструированы на мощности от единиц киловатт до тысяч и десятков тысяч киловатт. Предельная мощность асинхронного двигателя зависит от скорости его враще-

ния. Мощность быстроходных двигателей ограничена рядом конструктивных соображений. Одним из них является трудность крепления стержней и лобовых частей обмотки ротора при больших окружных скоростях на его поверхности. Это обстоятельство вынуждает ограничивать максимально возможную величину диаметра ротора для каждой синхронной скорости вращения. Поскольку мощность двигателя пропорциональна произведению квадрата диаметра ротора на длину его активной части, то рост мощности двигателя при невозможности увеличения диаметра ведет к увеличению длины ротора. Эта величина также ограничена условиями допустимого прогиба вала, который для асинхронных двигателей, имеющих малый воздушный зазор, весьма мал. Значительные трудности для машин большой мощности представляет токосъем с колец ротора.

При современном уровне электромашиностроения можно считать реальным создание асинхронных фазных электродвигателей с воздушным охлаждением на следующие мощности:

при скорости вращения 3 000 *об/мин* — до 7 000—8 000 *квт;*

при скорости вращения 1 500 *об/мин* — до 12 000—15 000 *квт;*

при скорости вращения 1 000 *об/мин* — до 20 000—22 000 *квт;*

В табл. 4П приведены технические данные выпускаемых отечественной промышленностью двухполюсных и наиболее мощного четырехполюсного асинхронных двигателей с фазным ротором.

Конструктивно асинхронный двигатель имеет один серьезный недостаток — малый воздушный зазор, что приводит к необходимости частых ремонтов двигателя даже при небольшом срабатывании подшипников. Увеличение воздушного зазора заметно ухудшает коэффициент мощности двигателя. Однако для ответственных приводов, как показывает зарубежная практика, целесообразно идти на некоторое увеличение воздушного зазора, ухудшая коэффициент мощности двигателя, но значительно повышая его эксплуатационную надежность.

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором, т. е. характеристика при закороченной цепи ротора показана на рис. 39. Характеристика разделяется на две части: рабочую — при

скольжениях от нуля до критического и нерабочую — при скольжениях, больших критического.

Момент асинхронного двигателя определяется произведением потока статора на активную составляющую тока ротора

$$M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2, \tag{54}$$

где φ_2 — угол сдвига между векторами тока I_2 и э. д. с. ротора E_2.

Ток ротора

$$I_2 = \frac{E_{2н} s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}}, \tag{55}$$

где r_2, x_2 — соответственно активное и индуктивное сопротивления обмоток ротора; $E_{2н}$ — фазное напряжение заторможенного (неподвижного) ротора.

Как следует из (55), с уменьшением скорости, т. е. с увеличением скольжения, возрастает полная величина тока, в то время как активная его составляющая сначала возрастает, а затем падает:

$$I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2 = \frac{E_2 r_2 s}{r_2^2 + x_2^2 s^2}.$$

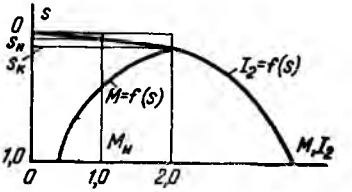

Рис. 39. Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя с фазным ротором.

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором и его работа с пониженными скоростями при закороченном роторе невозможны, поскольку пусковой момент очень мал (0,1—0,15 номинального), а ток очень велик (в 8—10 раз превышает номинальный).

Для создания нужного пускового момента и ограничения тока в цепь ротора двигателя вводят добавочное сопротивление.

Искусственные механические характеристики для различных значений добавочных сопротивлений в цепи ротора приведены на рис. 40.

Естественные и искусственные реостатные механические характеристики упрощено описываются известной формулой Клосса

$$\frac{M}{M_н} = \frac{2k_M}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}, \tag{56}$$

где $M_н$ — номинальный момент двигателя; k_M — перегрузочная способность двигателя, $s_к$ — критическое скольжение, которое для каждой величины добавочного сопротивления определяется как

$$s_к = \frac{r'_2 + R'_{доп}}{x_к},$$

или

$$s_к = s_н (k_M + \sqrt{k_M^2 - 1});$$

$s_н$ — номинальное скольжение; $r'_2 = r_2 k_т^2$ — приведенное к статору активное сопротивление обмотки ротора; $R'_{доп} = R_{доп} k_т^2$ — приведенное к статору добавочное активное сопротивление, включенное в цепь ротора; $k_т \approx (U_1/E_{р\,н})$ — коэффициент трансформации асинхронного двигателя.

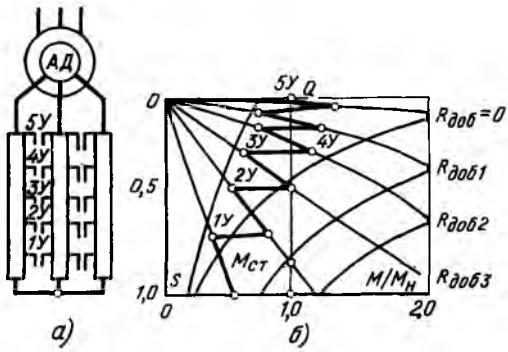

Рис 40 Схема реостатного управления асинхронным двигателем (*а*) и искусственные механические характеристики (*б*).

В большинстве случаев в качестве добавочных роторных сопротивлений применяются ящики сопротивлений с чугунными или фехралевыми элементами. Величина роторного сопротивления регулируется перемыканием ступеней сопротивления при помощи контакторов.

Разгон двигателей турбомеханизмов при реостатно-контакторной схеме включения асинхронного двигателя обычно производится в функции времени, т. е. контакторы (см. рис. 40) автоматически включаются в заданной

последовательности через промежутки времени, определяемые уставками реле времени.

При выборе схемы и расчете величин роторных сопротивлений может решаться одна из трех задач:

1) ограничение ускорений при пуске; при этом целесообразно стремиться к поддержанию постоянства среднего ускорения на ступенях, что требует наибольшего числа контакторов ускорения;

2) обеспечение пуска при минимальном числе контакторов ускорения; величина ускорений при этом не ограничивается, величина пусковых токов ограничивается величиной, соответствующей критическому скольжению (рис. 41);

3) выбор величин сопротивлений по заданному числу ступеней; обычно это случай, промежуточный между двумя первыми.

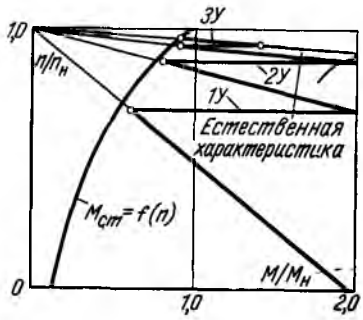

Рис. 41. Пусковые характеристики при минимальном числе пусковых ступеней.

Построение реостатных характеристик производится графическим методом, а расчет пусковых сопротивлений графо-аналитическим. Это наиболее простой способ, особенно удобный для расчета привода турбомеханизмов, где значения пусковых моментов обычно невелики. Поэтому без особых погрешностей рабочие участки механических характеристик могут быть заменены прямыми линиями. Рассмотрим построение характеристик этим методом на примере. Подробно различные методы расчета пусковых характеристик изложены в [Л. 4].

Пример 6 Построить пусковые характеристики турбомеханизма с приводом от двигателя АКН-15 44 8, $P_н = 1\,250$ *квт*, $E_р = 1\,130$ *в*, $I_{2н} = 670$ *а*, $n_н = 740$ *об/мин*, $s_н = 0{,}0133$, $k_т = 5{,}3$, $k_м = 2{,}2$, $M_н = 1\,650$ *кгс·м*, маховый момент рабочего колеса турбомеханизма и ротора двигателя $GD^2 = 6\,800$ *кгс·м²*; требуется обеспечить пуск с ускорением не более 80 *об/мин* за секунду. Кривая статического момента сопротивления показана на рис 42

Порядок графо-аналитического расчета (см рис 42).

1. По формуле (56) строим естественную характеристику двигателя

2 Проводим линию моментов переключения параллельно на расстоянии примерно $0{,}1M_н$.

3. Определяем максимальный динамический момент для обеспечения заданного ускорения

$$M_д = \frac{GD^2}{375}\frac{dn}{dt} = \frac{6\,800}{975}80 = 1\,450 \text{ кгс м} = 0{,}88\ M_н$$

4. Проводим линию пиковых моментов параллельно кривой статического момента на расстоянии от нее на $0{,}88M_н$.

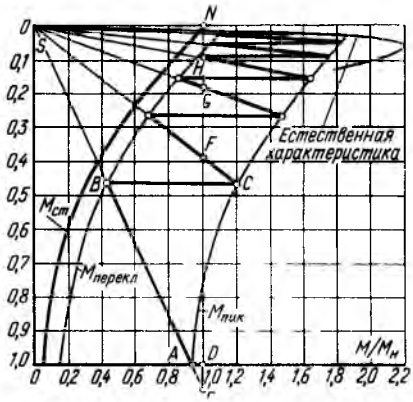

Рис 42 К примеру 6. Построение пусковых характеристик.

5 Проводим прямую OA, которая и будет первой реостатной характеристикой, соответствующей полностью введенному сопротивлению

6. Точка пересечения прямой OA с линией моментов переключения (точка B) дает скорость, при которой первая ступень сопротивления должна быть закорочена.

Проводя из точки B горизонтальную прямую до пересечения с линией пиковых моментов, найдем точку C.

7. Прямая OC будет являться второй реостатной характеристикой и т. д. Получили шесть пусковых ступеней.

8. Найдем номинальное сопротивление роторной цепи данного асинхронного двигателя

$$R_н = \frac{E_р}{1{,}73 I_{2н}} = \frac{1\,130}{1{,}73\ 670} = 0{,}97 \text{ ом}$$

Этой величине графически соответствует отрезок DN.

9. Найдем точки E, F, G и т. д. пересечения реостатных характеристик с линией номинального момента.

Сопротивления отдельных ступеней найдутся как

$$R_1 = R_н \frac{EF}{DN};$$

$$R_2 = R_н \frac{FG}{DN};$$

$$R_3 = R_н \frac{GH}{DN}.$$

Вычисленные значения сопротивлений заносим в табл. 4.

10. Среднеквадратичный ток нагрева сопротивлений каждой ступени находим следующим образом:

$$I_{ср\ кв\ г} = \sqrt{\frac{I^2_{пер\,г} + I^2_{пик\,г}}{2}},$$

где

$$I_{\text{перекл } i} = I_{2н} \frac{M_{\text{пер } i}}{M_н};$$

$$I_{\text{пик}} = I_{2н} \frac{M_{\text{пик } i}}{M_н} —$$

токи, соответствующие моментам переключения и пиковому для каждой ступени.

11. Для турбомеханизмов характерны редкие пуски, поэтому пусковые сопротивления работают по условиям нагрева в кратковременном режиме

Исходя из этого, ящики сопротивления выбирают по длительному току, величина которого находится по формуле

$$I_{\text{дл } i} = I'_{\text{ср кв } i} \sqrt{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}},$$

где t_p — время нахождения данной ступени под током; T — постоянная времени нагрева сопротивлений; $I'_{\text{ср кв}i}$ — находится с учетом длительности и величины тока данной ступени сопротивления:

для 1-й ступени $I'_{\text{ср кв}1} = I_{\text{ср кв}1}$, $t_p = t_1$;

для 2-й ступени $I'_{\text{ср кв}2} = \sqrt{\frac{I^2_{\text{эф}1} t_1 + I^2_{\text{эф}} t_2}{t_1 + t_2}}$; $t_p = t_1 + t_2$

и т. д.

В наихудших условиях находится последняя ступень, через которую протекает ток всех предыдущих. Время работы на каждой ступени определяется по формуле

$$t_i = \frac{GD^2}{375} \frac{n_0 (s_{\text{пик } i} - s_{\text{пер } i})}{\frac{M_{\text{пик } i} - M_{\text{пер } i}}{2} - M_{\text{ст.ср } i}},$$

где $s_{\text{пик } i}$ и $s_{\text{перек } i}$ — скольжения, соответствующие началу и концу работы ступени;

$M_{\text{ст ср } i}$ — средний статический момент на ступени.

Все найденные значения сведены в табл. 4. Постоянная времени нагрева ящиков сопротивлений принята 200 *сек*.

Таблица 4

№ ступени	R_i, *ом*	$I_{\text{ср кв } i}$, *а*	t_i, *сек*	$I'_{\text{ср.кв } i}$, *а*	t_{pi}, *сек*	$I_{\text{дл } i}$, *а*
1	0,660	485	4,9	485	4,9	78
2	0,204	655	1,9	540	6,8	101
3	0,087	815	1,4	616	8,2	123
4	0,039	905	0,8	650	9,0	138
5	0,024	960	0,5	668	9,5	146
6	0,010	1000	0,3	680	9,8	152
Всего	1,024	—	9,8	—	—	—

По данным R_i и $I_{\text{дл } i}$ по каталогу выбираются ящики сопротивлений.

Реостатное управление применяется в настоящее время почти исключительно для целей пуска мощных турбомашин. Можно указать три случая, когда применение реостатного пуска является оправданным:

1) в случае, если привод питается от недостаточно мощной сети и необходимо ограничение пусковых токов;

2) в случае, если требуется ограничение ускорений в период пуска по условиям механической прочности механизма или по другим причинам;

3) в случае привода механизма с большими маховыми массами, когда невозможен прямой пуск синхронных или асинхронных короткозамкнутых двигателей.

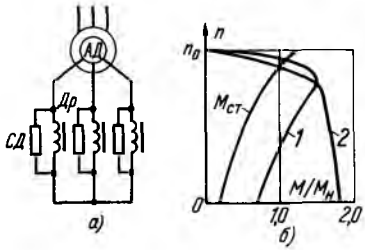

Рис. 43. Схема и характеристика пуска асинхронного двигателя с дросселем в цепи ротора.

Недостатками реостатно-контакторного управления являются ступенчатость регулирования и наличие большого числа силовых контакторных аппаратов.

Для пуска и регулирования скорости вращения применяются также жидкостные реостаты (жидкостные регуляторы скольжения), которые обеспечивают плавность изменения момента и не требуют силовых контакторов. Однако жидкостные реостаты не получили в нашей стране большого распространения из-за сложности их эксплуатации (хотя и имеется еще ряд действующих установок) и в настоящее время промышленностью не выпускаются. За рубежом жидкостные реостаты также почти уже не применяются. Единственной областью, где они еще используются, являются испытательные установки. Например, аэродинамические трубы фирмы «Кливленд» (США) мощностью 13 000 *квт* и «Картис-Райт» (Франция) мощностью 6 000 *квт* имеют асинхронный привод с жидкостным реостатом.

Для пуска турбомеханизмов определенный интерес представляет схема, показанная на рис. 43,*а*. В этой схеме в цепь ротора асинхронного двигателя вводятся параллельно включенные активное и индуктивное сопротивления. В зависимости от соотношения параметров схема может обеспечить одну из пусковых характеристик (*1* или *2*), показанных на рис. 43,*б*. Принцип действия этой

схемы состоит в том, что индуктивное сопротивление, величина которого пропорциональна частоте тока ротора $f_2 = f_1 s$, по мере разгона все в большей степени шунтирует активное сопротивление, автоматически уменьшая полное сопротивление ротора.

На практике эта схема применяется для пуска вентиляторов, причем вместо отдельных активного и индуктивного сопротивлений используется трехфазный дроссель, намотанный на массивном нешихтованном магнитопроводе (стальной болванке); схема замещения такого дросселя соответствует параллельно включенным активному и индуктивному сопротивлениям, причем роль активного сопротивления играют контуры, по которым замыкаются вихревые токи в массивном магнитопроводе.

Достоинство схемы состоит в том, что можно получить нужную пусковую характеристику двигателя и ограничить его ток с помощью бесконтактного весьма надежного и дешевого аппарата — дросселя с массивным сердечником; габариты такого дросселя, работающего только в течение пуска, относительно невелики, так как можно допустить значительный его перегрев.

14. ПОТЕРИ СКОЛЬЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Для целей регулирования скорости вращения реостатное управление почти не применяется. Основными недостатками такого управления являются мягкость характеристик и относительная неэкономичность регулирования, вытекающая из особенностей работы асинхронного двигателя. Следует отметить, что реостатное регулирование существенно более экономично, чем регулирование производительности турбомеханизмов посредством задвижек и направляющего аппарата. Поэтому его можно использовать для турбомеханизмов малой мощности.

Мощность двигателя, передаваемая от статора к ротору, пропорциональна моменту на его валу и синхронной скорости вращения, в то время как отдаваемая мощность пропорциональна моменту и скорости вращения ротора. Разность передаваемой (электромагнитной) и отдаваемой мощностей

$$P_s = P_{эм} - P_{мех} = \frac{Mn_0}{975} - \frac{Mn}{975} = \frac{M}{975}(n_0 - n) = \frac{Mn_0}{975} s \quad (57)$$

пропорциональна скольжению s. Эта мощность, называемая мощностью скольжения P_s, расходуется в ротор-

ной цепи двигателя, что и определяет экономическую нецелесообразность длительной работы двигателя с пониженной скоростью. В схемах реостатного управления энергия скольжения выделяется в виде тепла в основном в добавочных роторных сопротивлениях вне машины, что позволяет при вентиляторном характере нагрузки длительно работать асинхронному двигателю с пониженными скоростями при допустимом нагреве. Определим величину потерь скольжения в зависимости от скорости и нагрузки, характерной для турбомеханизмов. Подставляя в (57) значение момента, определяемое формулой (32), получим:

$$P_s = \frac{(M_{тр} + k_M n^2)\, n_0 s}{975},$$

или, выражая скольжение через скорость,

$$P_s = \frac{1}{975}(M_{тр} n_0 + k_M n_0 n^2 - k_M n^3 - M_{тр} n). \qquad (58)$$

Полагая $k_M n_0^2 \approx M_н$ и обозначая $\mu_{тр} = M_{тр}/M_н$ (здесь $M_н$ — номинальный момент турбомеханизма), найдем:

$$P_s = \frac{M_н}{975}\left(\mu_{тр} n_0 + \frac{n^2}{n_0} - \frac{n^3}{n_0^2} - \mu_{тр} n\right),$$

или

$$P_s = \frac{M_н n_0}{975}\left(\mu_{тр} + \frac{n^2}{n_0^2} - \frac{n^3}{n_0^3} - \mu_{тр}\frac{n}{n_0}\right).$$

Принимая $\frac{M_н n_0}{975} \approx P_н$, получим:

$$P_s = P_н\left[\mu_{тр} + \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 - \mu_{тр}\frac{n}{n_0}\right]. \qquad (59)$$

Зависимость мощности скольжения от скорости при характере нагрузки, определяемой формулой (31а), $\mu_{тр} = 0$, показана на рис. 44. Чтобы найти величину скорости, при которой потери скольжения будут максимальны, приравниваем первую производную функции (59) нулю:

$$\frac{dP_s}{dn} = \frac{2n}{n_0^2} - \frac{3n^2}{n_0^3} - \frac{\mu_{тр}}{n_0} = 0,$$

откуда

$$n = \frac{n_0}{3}(1 + \sqrt{1 - 3\mu_{тр}}). \qquad (60)$$

Подставляя (60) в (59), найдем:

$$P_{s\text{макс}} = P_{\text{н}} \frac{2}{27} (2 - \sqrt{1 - 3\mu_{\text{тр}}})(1 + \sqrt{1 - 3\mu_{\text{тр}}} + 3\mu_{\text{тр}}). \quad (61)$$

Если пренебречь моментом трения, положив $\mu_{\text{тр}} = 0$, то $P_{s\text{макс}} = 0{,}15 P_{\text{н}}$ и соответствует скорости $n = \frac{2}{3} n_0$.

Положив в (61) $\mu_{\text{тр}} = 0{,}1$, получим, что $P_{s\text{макс}} = 0{,}185\ P_{\text{н}}$ и соответствует скольжению $s = 0{,}39$.

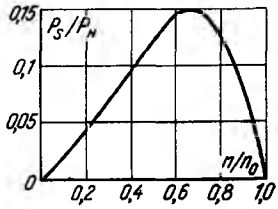

Рис. 44. Зависимость потерь скольжения от скорости при $M = k_M n^2$.

Мы рассмотрели зависимость потерь во вторичной цепи от скорости при вентиляторном характере нагрузки, т. е. когда турбомеханизм работает на сеть без противодавления. При наличии статической составляющей напора зависимость момента от скорости проявляется сильнее, чем при чисто вентиляторном моменте, в соответствии с чем потери в роторной цепи при регулировании скорости уменьшаются.

Аналитическая зависимость потерь скольжения от скорости при наличии $H_{\text{ст}}$ может быть получена совместным решением (40а) и (57). Полагая при решении $n_0 = n_{\text{н}}$, получим:

$$P_s = \frac{n_0 - n}{975} \left[M_0 \left(\frac{n}{n_{\text{н}}} \right)^2 + (M_{\text{н}} - M_0) \frac{n}{n_{\text{н}}} \sqrt{\frac{H_0 \left(\frac{n}{n_{\text{н}}} \right)^2 - H_{\text{ст}}}{RQ_{\text{н}}^2 + H_0 - H_{\text{н}}}} \right].$$

Графики, отражающие зависимость потерь от параметров характеристики сети, на которую работает турбомеханизм, приведены в гл. 7.

Глава четвертая

ЭЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНИЗМОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

15. ЭЛЕКТРОПРИВОД С МНОГОСКОРОСТНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Стремление повысить весьма низкий к. п. д. агрегатов, имеющий место при регулировании производительности аэродинамическими методами (см. пример 5), определяет

тенденции к применению регулируемого электропривода. Простейшим видом регулируемого привода являются многоскоростные асинхронные двигатели.

Синхронная скорость вращения асинхронного двигателя обратно пропорциональна числу пар его полюсов

$$n_0 = \frac{60f_1}{p},$$

что используется для ступенчатого регулирования скорости изменением числа пар полюсов (p) обмотки статора. Этот способ применяется только для асинхронных короткозамкнутых двигателей. Выпускаются двухскоростные, трехскоростные и четырехскоростные двигатели, которые могут иметь скорости (синхронные) 3 000, 1 500 1 000, 750, 500, 375 *об/мин*.

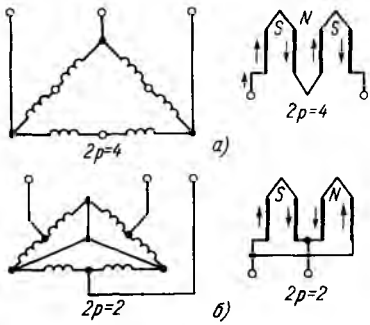

Рис. 45. Схема соединения обмоток двухскоростного двигателя.

Многоскоростные двигатели изготовляются как с одной статорной обмоткой, разделенной на равные части, так и с несколькими независимыми обмотками. Одна из возможных схем соединения обмоток для первого случая показана на рис. 45. Полуобмотки могут быть включены последовательно (рис. 45,*а*) или параллельно (рис. 45,*б*). При переходе к параллельному соединению изменяется направление тока в одной из частей обмоток, чем достигается перераспределение магнитного потока в пространстве, и число пар полюсов вдвое уменьшается, а синхронная скорость соответственно увеличивается.

Наибольшее распространение двухскоростные электроприводы получили для вспомогательных турбомеханизмов на тепловых электростанциях. Эксплуатация таких двигателей мощностью до 500 *квт* показала их удовлетворительные качества. Новая серия ДВДА двухскоростных асинхронных двигателей охватывает мощности от 500 до 1 400 *квт*. Эти машины выполнены с раздельными обмотками статора.

Двухскоростные двигатели малой мощности до 100 *квт* применяются для вентиляторов кондиционирующих устройств. За рубежом двухскоростные электродвигатели применяются, как правило, при небольших мощностях, однако известны случаи их применения и при значительной мощности; наиболее мощные двухскоростные электроприводы были выполнены в ФРГ, где использовались двигатели мощностью 4 000/2 000 *квт* со скоростью вращения 317/162 *об/мин,* напряжением 5 *кв* [Л. 9].

Двухскоростной электропривод, конечно, не решает задачи автоматического регулирования производительности турбомеханизмов. Двухступенчатое регулирование скорости, как правило, приходится сочетать с регулированием при помощи направляющего аппарата.

Такое комбинированное регулирование дает более высокий средневзвешенный к. п. д., чем в случае односкоростного двигателя, однако эта разница незначительна. В то же время схема регулирования усложняется и мало пригодна для автоматизации.

Применение двухскоростного электропривода оправдано в тех случаях, когда:

а) по технологии работы требуются всего два режима по производительности: рабочий и нерабочий (например, если для вентиляции производственных помещений в рабочие часы требуется подача полного количества воздуха, то в ремонтные смены она может быть снижена вдвое);

б) не требуется регулирование производительности, однако применение односкоростного асинхронного двигателя затруднено из-за больших маховых масс привода (потери при пуске асинхронного двигателя в две ступени снижаются почти в 2 раза);

в) двухскоростной двигатель используется в сочетании с устройством для плавного регулирования скорости, например с индукторной муфтой скольжения; этот случай рассмотрен в § 20.

16. ДВУХСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Для приводов вентиляторов большой мощности с синхронным либо асинхронным приводным электродвигателем пониженная скорость может быть получена подключением этих двигателей к автономному источнику напря-

жения низкой частоты. Целесообразность такой схемы объясняется вентиляторным характером нагрузки. Если пониженная скорость принимается равной половине основной, то потребляемая от источника мощность будет составлять примерно 1/8 номинальной мощности привода. Однако габаритная мощность электромашинного источника низкой частоты будет составлять 1/4 мощности приводного двигателя. Низкий к. п. д. машинного преоб-

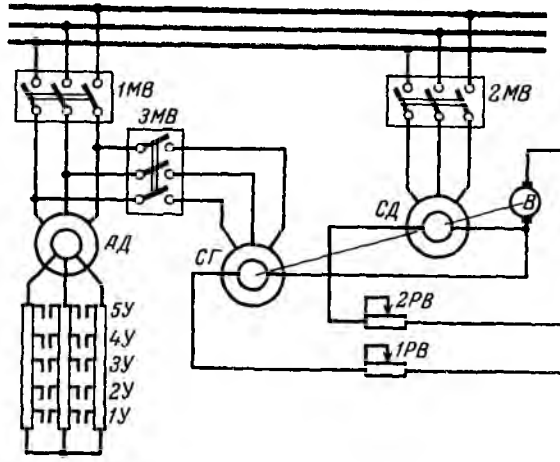

Рис. 46 Схема асинхронного привода с одноступенчатым частотным управлением.

разователя частоты не играет в данном случае решающей роли из-за относительно малой мощности преобразователя.

Схема асинхронного привода с одноступенчатым частотным управлением, разработанная институтом Донгипроуглемаш для привода центробежного вентилятора одного из рудников Криворожского бассейна, показана на рис. 46.

Мощность приводного двигателя *АД* — 3 500 *квт*. При работе с пониженной скоростью вращения двигатель питается от синхронного генератора низкой частоты *СГ*, скорость вращения которого выбрана такой, чтобы обеспечить частоту 25 *гц*. Номинальная мощность генератора 1 000 *квт*, при работе с частотой 25 *гц* он может развивать мощность 500 *квт*. Синхронный двигатель преобразовательного агрегата *СД* мог бы быть выбран на 690 *квт*,

однако его мощность принята большей для использования в качестве компенсатора реактивной мощности основного приводного асинхронного двигателя.

Рассмотренная схема может быть рекомендована для использования при модернизации привода действующих вентиляторных установок, оборудованных синхронными или асинхронными двигателями.

17. СИНХРОННО-АСИНХРОННЫЙ ПРИВОД

Представляет интерес разработанная во ВНИИэлектропривод система привода, обеспечивающая как двухступенчатое регулирование скорости, так и использование синхронных машин для привода крупных вентиляторов, когда прямой пуск таких двигателей оказывается невозможным вследствие недопустимо больших маховых масс рабочего колеса вентилятора.

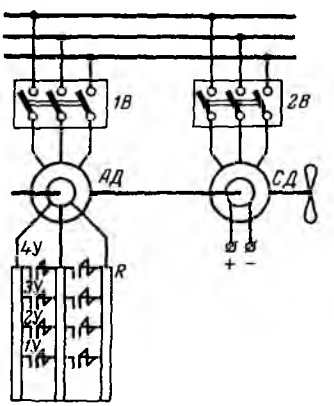

Рис. 47. Схема синхронно-асинхронного привода.

Схема синхронно-асинхронного привода показана на рис. 47. Приводной агрегат состоит из двух двигателей: синхронного, выбранного в соответствии с номинальной мощностью и скоростью вентилятора, и асинхронного с фазным ротором мощностью, равной примерно 15% мощности основного синхронного двигателя, и скоростью, равной половине поминальной. Ротор асинхронного двигателя по механической прочности должен допускать вращение с двойной скоростью при отключенной от сети обмотке статора.

Пуск привода производится следующим образом. Вначале к сети подключается асинхронный двигатель и производится его реостатный пуск. Если требуется работа вентилятора с половинной производительностью, то пуск на этом заканчивается и вентилятор вращается асинхронным двигателем. Поскольку при работе с половинной скоростью мощность на валу вентилятора снижается в 8 раз, то мощность асинхронного двигателя будет до-

статочной для длительной работы вентилятора в этом режиме.

Если требуется достижение полной скорости, то включается синхронный двигатель, а асинхронный отключается от сети. Поскольку основные потери в клетке синхронного двигателя выделяются при больших скольжениях, а в данной схеме синхронный двигатель разгоняется от скольжения 0,5 до нуля, то потери в его клетке снижаются по сравнению с обычным пуском примерно в 4 раза, что позволяет применять синхронные двигатели для приводов механизмов с недопустимо большими для случая прямого пуска маховыми массами.

Покажем на примере целесообразность применения синхронно-асинхронного привода.

Пример 7. Рассмотреть возможность применения синхронного привода для вентилятора ВРЦД-4,5 мощностью 3 500 *квт*, 500 *об/мин*, маховой момент вентилятора 170 $тс \cdot м^2$.

Примем синхронный двигатель СДНЗ-17-76-12, 4 000 *квт*, 500 *об/мин*. Суммарный маховой момент двигателя и вентилятора составляет $GD^2 = 195$ $тс \cdot м^2$.

Воспользовавшись (49), определим количество энергии, выделяющейся в пусковой клетке двигателя за время пуска,

$$A = \frac{GD^2 n_0^2}{2 \cdot 365\,000} = \frac{195\,000 \cdot 500^2}{2 \cdot 365\,000} = 66\,800 \text{ кдж}.$$

Температура нагрева пусковой клетки по (52)

$$\Delta T = \frac{A n_п}{G_{к\,л} \lambda} = \frac{66\,800}{179 \cdot 0{,}385} = 980^\circ \text{ C},$$

т. е. значительно выше допустимой.

Как следует из табл. 1П (см. приложение), синхронных двигателей, обеспечивающих разгон маховых масс величиной 195 $тс \cdot м^2$, не существует.

Рассмотрим нагрев клетки двигателя при пуске по схеме синхронно-асинхронного привода.

Из (47), пренебрегая, как и при выводе (49), величиной статического момента, получим.

$$A = \frac{n_0}{975} \int_{t=0}^{t=t_р} \frac{GD^2}{375}\, dn - \frac{1}{975} \int_{t=0}^{t=t_р} \frac{GD^2}{375}\, n\, dn.$$

Переходя к соответствующим схеме синхронно-асинхронного привода начальным условиям: при $t=0$ $n=0{,}5\,n_0$; при $t=t_р$ $n=n_0$, получим.

$$A = \frac{GD^2 n_0}{375 \cdot 975} \int_{0{,}5 n_0}^{n_0} dn - \frac{GD^2}{975 \cdot 375} \int_{0{,}5 n_0}^{n_0} n\, dn,$$

откуда

$$A = \frac{GD^2 n_0^2}{8 \cdot 365\,000},$$

т. е. потери в клетке двигателя оказываются в 4 раза меньше, чем при прямом пуске. Температура нагрева при этом составит $\Delta T = 235\,^{\circ}C$, что вполне допустимо.

Механические характеристики синхронно-асинхронного привода, рассчитанные для рассмотренного привода вентилятора ВРЦД-4,5, показаны на рис. 48.

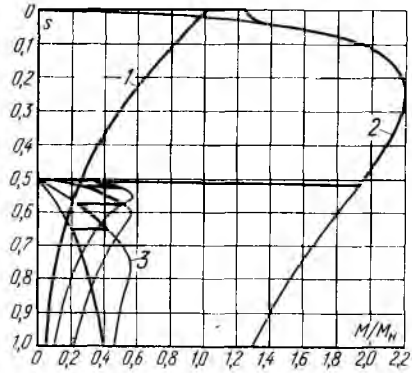

Рис. 48. Пусковые характеристики синхронно-асинхронного привода с разгонным асинхронным двигателем.

1 — момент статического сопротивления вентилятора, *2* — пусковая механическая характеристика синхронного двигателя, *3* — пусковые характеристики асинхронного двигателя.

Проведем также проверку вхождения в синхронизм двигателя для тяжелых условий привода вентилятора ВРЦД-4,5.

Согласно (53) скольжение перед входом в синхронизм должно быть

$$s_{вх} \leqslant \frac{254}{500} \sqrt{\frac{4\,000 \cdot 2,2}{50 \cdot 195\,000}} \leqslant 0,0154.$$

Из характеристик (рис. 48) $s_{вх} = 0,015$, т. е. условия вхождения в синхронизм удовлетворяются.

Таким образом, схема синхронно-асинхронного привода обеспечивает возможность применения синхронного двигателя в качестве основного, даже при весьма большой величине маховых масс механизма. Кроме того, схема позволяет осуществлять работу вентилятора с половинной производительностью, что дает большую экономию электроэнергии на рудниках, где возможно такое

снижение производительности в перерыв между сменами, в выходные дни и в нерабочие смены. Рассмотренный электропривод успешно эксплуатируется на рудниках Криворожского бассейна и Солигорского калийного комбината.

Глава пятая

ЭЛЕКТРОПРИВОД ТУРБОМЕХАНИЗМОВ С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

18. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

а) Электропривод с коллекторным двигателем постоянного тока

Наилучшими регулировочными качествами обладают приводы постоянного тока. Они обеспечивают плавное и достаточно экономичное регулирование скорости в любых заданных пределах, не требуют силовой контакторной аппаратуры. Однако для турбомеханизмов системы привода с двигателем постоянного тока не нашли широкого применения, что объясняется их большой первоначальной стоимостью и большей сложностью эксплуатации. Большая величина капитальных затрат связана с тем, что двигатели постоянного тока дороже машин переменного тока, а для их питания и регулирования скорости требуются преобразователи переменного тока в постоянный (выпрямленный) с регулируемой величиной его напряжения на полную мощность привода. Поскольку турбомеханизмы, как правило, не требуют глубокого регулирования скорости, то применение приводов с двигателями постоянного тока для турбомеханизмов в большинстве случаев нецелесообразно.

Трудность применения двигателей постоянного тока для турбомашин большой мощности состоит также в том, что последние являются быстроходными машинами (исключение составляют лишь вентиляторы с большим диаметром рабочего колеса).

Мощность двигателей постоянного тока ограничена сегодня величиной, не превышающей

$$P_н n_н < 3{,}4 \cdot 10^6 \ квт \cdot об/мин,$$

т. е., например, в одноякорном исполнении мощность двигателя с номинальной скоростью 1 000 *об/мин* не может быть больше 3 400 *квт*.

И, наконец, применение машин постоянного тока встречает трудности, связанные с эксплуатацией их коллектора. Многие турбомеханизмы расположены в пожаро- и взрывоопасных помещениях, где необходима герметизация искрящего коллектора, что накладывает определенные конструктивные трудности при исполнении машин постоянного тока.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока в приводах турбомеханизмов целесообразно производить только изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя, при постоянном его возбуждении. Регулирование скорости ослаблением тока возбуждения двигателя нецелесообразно для механизмов, у которых момент существенно возрастает с увеличением скорости, так как ведет к плохому использованию габаритной мощности двигателя.

По типу преобразователя различают четыре наиболее распространенные системы привода постоянного тока: генератор — двигатель (Г—Д); управляемый ртутный выпрямитель — двигатель (УРВ—Д), тиристорный преобразователь — двигатель (ТП—Д) и магнитный усилитель — выпрямитель — двигатель (МУ — В — Д) (рис. 49,*а—г*).

Система генератор — двигатель в настоящее время для привода турбомеханизмов используется лишь в испытательных установках. Применение ее для промышленных установок нерационально не только из-за большой стоимости и громоздкости электрооборудования, но также из-за невысокого номинального к. п. д., не превышающего 0,85. Для мощных турбомеханизмов с длительным режимом работы эта величина недостаточна и не позволяет реализовать те преимущества энергетического характера, которые дает регулируемый электропривод.

Для испытательных установок применение приводов с двигателем постоянного тока, в частности системы генератор — двигатель, в ряде случаев оказывается целесообразным и встречается как в отечественной практике, так и в зарубежной. Аэродинамическая труба «Фарабор» (Англия) мощностью 3 000 *квт* имеет привод постоянного тока по системе генератор — двигатель, такой же привод имеет труба фирмы «Эммен» (Швейцария).

Для привода испытательных установок средней мощности отечественной промышленностью выпускаются двигатели постоянного тока серии МПБ, рассчитанные на высокие скорости вращения и конструктивно приспособленные для замеров крутящего момента. Технические данные двигателей МПБ даны в табл. 5.

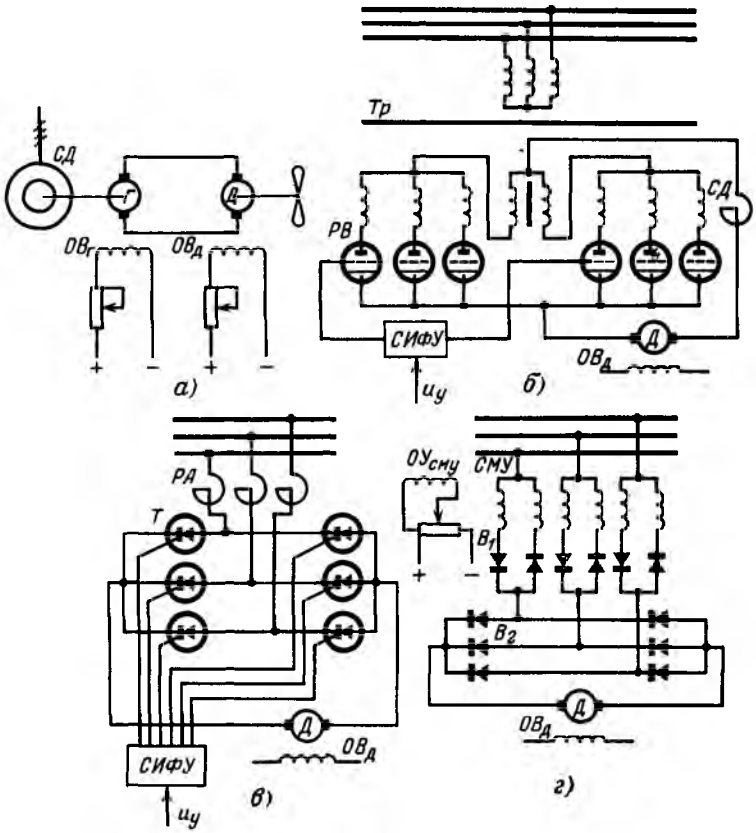

Рис. 49 Схема электропривода с двигателем постоянного тока.
а — система генератор—двигатель (Г—Д), *б* — система управляемый ртутный выпрямитель—двигатель (УРВ—Д); *в* — система тиристорный преобразователь—двигатель (ТП—Д), *г* — система магнитный усилитель—выпрямитель—двигатель (МУ—В—Д).

Система УРВ—Д пришла на смену приводу Г—Д в промышленных установках в конце 50-х — начале 60-х годов. Обладая лучшим к. п. д. (номинальный к. п. д. 0,89—0,91) и лучшими динамическими качествами, эта

система также применялась для привода аэродинамических труб. Привод аэродинамической трубы фирмы DLV (ФРГ) содержит два двигателя постоянного тока мощностью по 4 500 *квт*, питающихся от управляемых ртутных преобразователей Сведений о применении привода УРВ—Д для промышленных турбомеханизмов нет.

Таблица 5

Технические данные двигателей постоянного тока серии МПБ

Тип машины	Номинальные значения			Предельная скорость вращения, *об/мин*
	Мощность, *квт*	Напряжение, *в*	Скорость вращения, *об/мин*	
МПБ24,5/14	21	220	2 700	6 500
МПБ24,5/22	21	220	1 250	4 000
МПБ24,5/22	45	440	2 750	6 500
МПБ28/26	43	220	1 350	3 500
МПБ28/26	89	440	3 100	6 000
МПБ32,7/28	87	440	1 500	3 500
МПБ42,3/30	177	440	1 500	4 500
МПБ49,3/36	364	580	1 850	4 000
МПБ55/34	600	530	2 100	3 000

Дальнейшее развитие систем вентильного электропривода связано с появлением тиристорных преобразователей. Тиристорные приводы постоянного тока могут уже в настоящее время быть выполнены на значительные мощности (5—10 тыс. *квт*); однако, учитывая нецелесообразность применения двигателей постоянного тока для привода турбомеханизмов, по причинам, указанным выше, нельзя рассчитывать что эта современная система привода найдет широкое применение для рассматриваемого типа механизмов. Следует все же указать, что отдельные установки с таким приводом создавались и, видимо, будут строиться. Так, на водопроводной станции в г. Ганновере (ФРГ) для регулирования скорости насосов мощностью 170 *квт* применены двигатели постоянного тока, питающиеся от тиристорных преобразователей [Л. 50]. Для испытательных установок система ТП — Д, безусловно, будет находить применение.

Система привода МУ—В—Д в настоящее время по технико-экономическим показателям уступает тиристорному приводу постоянного тока.

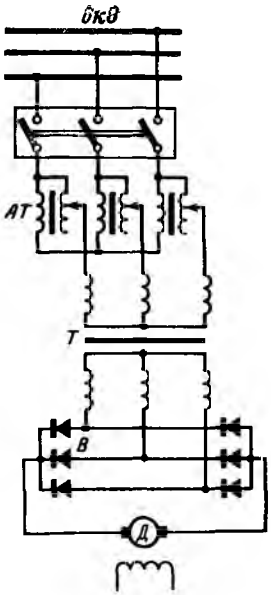

Рис. 50. Схема электропривода с двигателем постоянного тока и регулированием выпрямленного напряжения посредством автотрансформатора.

Некоторый интерес для привода турбомеханизмов представляет более простая и дешевая схема электропривода с двигателем постоянного тока. В этой схеме (рис. 50) применен преобразователь, выполненный на неуправляемых кремниевых выпрямителях. Регулирование выпрямленного напряжения осуществляется автотрансформатором *АТ* с моторным сервоприводом. Трансформатор *Т* служит для согласования напряжения сети и напряжения якоря машины постоянного тока. Достоинствами схемы являются ее простота, хорошие к. п. д. и коэффициент мощности.

Недостатки этой схемы, связанные с плохими динамическими качествами: малым быстродействием, ступенчатостью регулирования, возможностью лишь относительно редкого изменения скорости и др., для турбомеханизмов в большинстве случаев существенного значения не имеют. Схема может найти применение для приводов средней и большой мощности. Подобная схема использована для привода насосов мощностью 570 *квт*, снабжающих питьевой водой г. Прагу [Л. 51].

б) Электропривод с бесколлекторным (вентильным) двигателем постоянного тока

Конструктивно вентильный двигатель представляет собой синхронную машину с возбуждением постоянным током. Статор двигателя присоединен к сети через вентильный преобразователь (рис. 51). Последний состоит из двух групп вентилей и по своей структуре подобен преобразователю частоты инверторного типа (см. § 19в). Первая группа вентилей B_1 служит для преобразования переменного тока частоты сети в постоянный; вторая

группа B_2 работает как вентильный коммутатор. Синхронный двигатель в этой схеме можно уподобить двигателю постоянного тока, в котором статор выполняет роль якоря, а коллекторно-щеточный аппарат заменен вентильным коммутатором. Вентили коммутатора открываются в те моменты, когда э. д. с. в соответствующих обмотках статора направлена встречно питающему напряжению постоянного тока. Коммутация тока между отдельными вентилями происходит под действием э. д. с. вращения синхронного двигателя. Другое принципиальное отличие от автономного инвертора состоит в том, что переключение между вентилями происходит не в функции задающего сигнала, а в зависимости от углового положения ротора; т. е. система управления вентилями коммутатора является зависимой и работает от датчиков положения (угла) ротора *ДУ*. Регулирование скорости производится изменением величины выпрямленного напряжения.

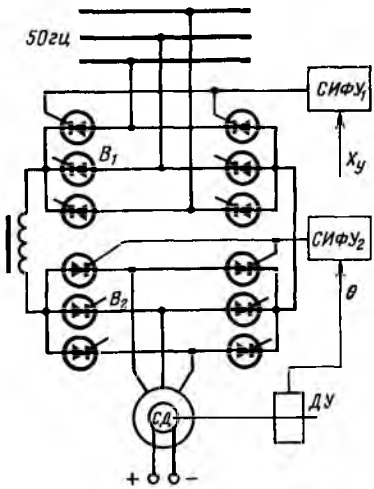

Рис. 51 Схема вентильного двигателя.

Поскольку вентильный двигатель работает как машина постоянного тока и для его работы не требуется циркуляция реактивной мощности, то вентильный преобразователь в этой схеме проще, чем для систем частотного управления. Однако возникают значительные трудности, связанные с пуском двигателя в такой системе. Коэффициент полезного действия вентильного двигателя достаточно высок, но коэффициент мощности низкий (пропорционален скорости вращения), как и в обычных вентильных приводах постоянного тока.

В случае создания мощных и высоковольтных вентильных преобразователей схема вентильного двигателя может стать перспективной для приводов большой мощности, особенно быстроходных. Для регулируемых приводов с номинальной скоростью вращения 3 000 *об/мин*

и мощностью свыше 8 000 *квт* вентильный двигатель по существу является единственно возможным техническим решением, поскольку в этом случае в качестве приводного электродвигателя могут быть использованы только синхронные машины.

19. АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Скорость вращения электромагнитного поля статора трехфазных электродвигателей переменного тока (синхронных или асинхронных) пропорциональна частоте питающей сети, что позволяет регулировать их скорость плавным изменением частоты напряжения статора. Это наиболее экономичный способ плавного регулирования скорости асинхронных короткозамкнутых двигателей, поскольку двигатель во всем диапазоне регулирования работает с малой величиной скольжения ротора (малыми потерями скольжения).

Так как величина индуктивного сопротивления двигателя пропорциональна частоте, то для сохранения тока и других переменных двигателя такими же, как и при номинальной частоте, необходимо одновременно с изменением частоты изменять и напряжение питающей сети. Академиком М П. Костенко сформулирован закон, устанавливающий соотношение между частотой и напряжением питания асинхронного двигателя:

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M}{M_н}}. \qquad (62)$$

При выполнении этого соотношения двигатель будет сохранять номинальную перегрузочную способность, если диапазон регулирования скорости вращения вниз от номинальной не превышает 2 : 1.

Приняв для турбомеханизмов, что момент пропорционален квадрату скорости вращения, которая в свою очередь пропорциональна частоте, можно для турбомеханизмов из условия постоянства перегрузочной способности установить соотношение между частотой и напряжением

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \left(\frac{f_1}{f_{1н}}\right)^2. \qquad (63)$$

Это соотношение является приближенным, так как оно не учитывает падения напряжения на активном со-

противлении обмоток статора Для синхронных двигателей турбомеханизмов более целесообразно пропорциональное соотношение между частотой и напряжением

$$\frac{U_1}{U_{1н}} = \frac{f_1}{f_{1н}} \text{ или } \frac{U_1}{f_1} = \text{const} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}}. \qquad (63а)$$

На рис 52 показаны характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании с изменением напряжения по закону (63) и (63а).

Частотное управление двигателями переменного тока является экономичным, поскольку оно позволяет сохранить высокий к. п. д. двигателя, обеспечивает как двигательные, так и тормозные режимы работы, хорошую жесткость характеристик и, что самое главное, позволяет использовать в качестве приводного асинхронный короткозамкнутый двигатель

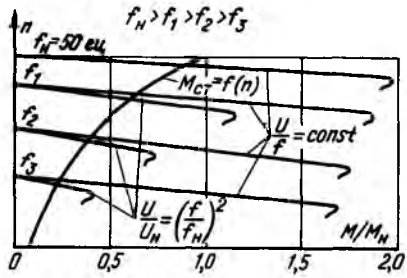

Рис 52 Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании.

Несмотря на отмеченные преимущества, частотное управление пока применяется в исключительных случаях. Причинами тому являются сложность и большая стоимость преобразователей частоты.

В системах частотного управления используются следующие типы преобразователей частоты:

а) машинные преобразователи;

б) вентильные преобразователи с непосредственной связью;

в) вентильные преобразователи инверторного типа.

Вследствие сложности преобразователей частоты и их большой стоимости область применения систем частотного управления ограничивается применительно к приводу турбомеханизмов тремя случаями.

1). Когда требуется достижение скорости приводного двигателя выше 3 000 *об/мин* (например, для безредукторного электропривода турбокомпрессоров). Применение частотного управления для безредукторных приводов с номинальной скоростью выше 3 000 *об/мин* яв-

ляется практически единственно возможным техническим решением.

2) Когда по конструктивным соображениям допускается использование лишь асинхронного короткозамкнутого двигателя и в то же время требуется регулирование скорости его вращения (например, погружные электронасосы, встроенные электродвигатели; приводы, работающие во взрывоопасных условиях, и т. д.).

3) В случае регулируемого электропривода большой мощности и высокой скорости вращения, когда по конструктивным соображениям возможно только создание синхронного либо асинхронного короткозамкнутого двигателя.

а) Система с электромашинным преобразователем частоты

На рис. 53 показана схема привода с электромашинным преобразователем частоты, обеспечивающая любые возможные режимы работы электропривода. Такая си-

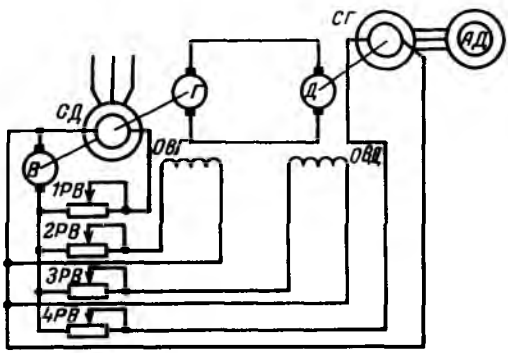

Рис. 53. Схема асинхронного привода с электромашинным преобразователем частоты.

стема, в частности, была применена для привода аэродинамической трубы фирмы «Ланглей» мощностью 12 000 *квт*. Привод состоит из пяти электрических машин соизмеримой мощности. Рабочий асинхронный двигатель *АД* получает питание от синхронного генератора *СГ*, вращаемого двигателем *Д* с переменной скоростью. Скорость вращения агрегата *Д — СГ* регулируется изменением напряжения генератора *Г*, который приводится

во вращение сетевым синхронным двигателем *СД* с постоянной скоростью. Такая схема позволяет плавно регулировать скорость вращения двигателя *АД* в широком диапазоне. Недостатками схемы являются сложность и высокая стоимость, обусловленная большим числом мощ-

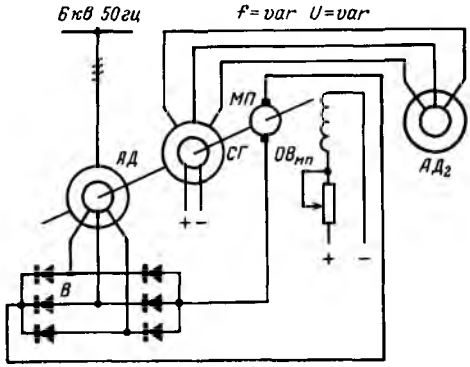

Рис. 54. Электромашинный преобразователь частоты, использующий схему вентильно-машинного каскада.

ных электрических машин; к. п. д. такой схемы не превышает 0,7. Очевидно, что такая система привода может найти применение только для экспериментальных установок.

Более простая система с электромашинным преобразователем показана на рис. 54. В этой схеме синхронный генератор приводится во вращение асинхронным двигателем, включенным в схему вентильно-машинного электромеханического каскада (см. § 27б). Схема насчитывает четыре машины равной мощности. Коэффициент полезного действия системы равен примерно 0,75. Она обеспечивает регулирование частоты только в пределах 100—50%, что для большинства турбомеханизмов является вполне достаточным.

б) Система с вентильным преобразователем частоты с непосредственной связью

Схема привода с вентильным преобразователем частоты с непосредственной связью показана на рис. 55.

Основой силовой части такого преобразователя являются три реверсивных тиристорных преобразователя

постоянного тока B_1, B_2, B_3. Каждая фаза асинхронного короткозамкнутого двигателя *АД* питается от своего преобразователя.

Если сигнал управления на входе вентильного преобразователя циклично изменять таким образом, чтобы выходное напряжение преобразователя изменялось по

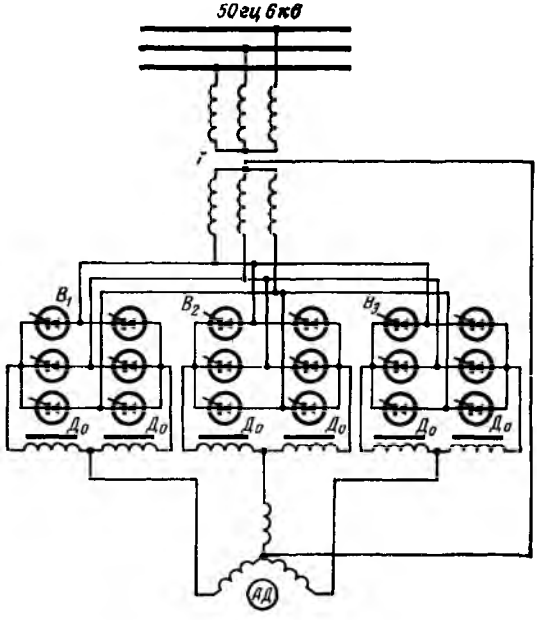

Рис. 55. Преобразователь частоты с непосредственной связью.

синусоидальному закону, то на выходе преобразователя мы получим переменное напряжение пониженной частоты. Преобразователь частоты с трехфазным выходом образуется из трех однофазных, необходимый сдвиг в 120° между векторами выходных напряжений достигается за счет соответствующего сдвига между управляющими сигналами на входе преобразователей.

Кривая выходного напряжения каждой фазы преобразователя, являющаяся по существу кривой средних значений напряжения реверсивного преобразователя, показана на рис. 56. Нетрудно заметить, что чем ниже ча-

стота выходного напряжения по сравнению с частотой питающей сети, тем ближе по форме к синусоиде будет выходное напряжение.

Если положить, что напряжение преобразователя равно:

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha,$$

то очевидно, что для получения E_d в виде синусоидальной функции угол управления α должен изменяться в функции времени по пилообразному закону $\alpha = A\omega_2 t$, где A — величина, характеризующая амплитуду выход-

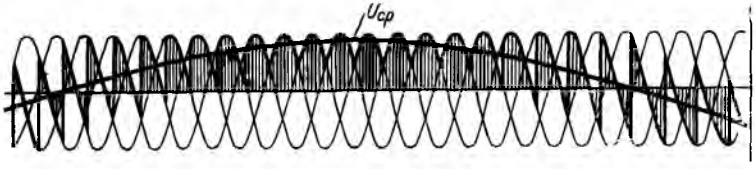

Рис. 56. Формирование кривой напряжения пониженной частоты.

ного напряжения низкой частоты, а ω_2 — величина, соответствующая частоте f_2.

Изменяя частоту входного сигнала ω_2 и его амплитуду A, можно регулировать частоту и величину выходного напряжения преобразователя; эти параметры можно регулировать раздельно, выполняя соотношение (63) или (63а).

Рассмотренная схема преобразователя дает возможность получать частоты лишь значительно меньше сетевой. При частоте питающей сети 50 *гц* выходную частоту можно регулировать в диапазоне 0—20 *гц*. Получение более высоких частот связано с определенными трудностями и недостатками; необходимо увеличить число фаз каждого реверсивного преобразователя с 3 до 6 либо осуществлять питание преобразователя с повышенной частотой; форма кривой вторичного напряжения с увеличением частоты искажается более сильно; требуется более сложная система управления.

Основным достоинством рассмотренной схемы преобразования частоты является естественная коммутация вентилей за счет напряжения сети, что не приводит к необходимости применения коммутирующих емкостей и конденсаторов для компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя.

Для циркуляции реактивной мощности необходима согласованная работа обеих групп вентилей реверсивной мостовой схемы преобразователя: анодной и катодной. Это достигается двумя путями: либо согласованным управлением вентилями по закону $\alpha_а(t)=\pi-\alpha_к(t)$ (в этом случае необходимо применение уравнительных реакторов для ограничения уравнительных токов), либо запиранием (снятием управляющих импульсов) с той группы вентилей, через которую в данный момент не протекает ток нагрузки. Во втором случае снятие и подача импульсов управления производятся логической схемой с частотой f_2. Переключения в логической схеме осуществляются датчиками нуля тока, устанавливаемыми в цепях нагрузки каждой группы вентилей и фиксирующими прохождение тока нагрузки через нуль; таким образом, каждый полупериод одна группа вентилей оказывается запертой.

Установленная мощность оборудования для вентильного преобразователя с непосредственной связью определяется следующими соотношениями [Л. 45]:

мощность тиристоров 5,8 $P_{дв}$ (под мощностью одного тиристора понимается произведение его номинального рабочего напряжения на номинальный средний ток; $P_{дв}$ — номинальная потребляемая двигателем мощность).

мощность трансформатора 1,75 $P_{дв}$.

Рассмотренная система привода до настоящего времени не нашла применения в турбомеханизмах, поскольку она отличается значительной сложностью и позволяет получать только низкие частоты, в то время как турбомеханизмы являются большей частью машинами быстроходными. Однако собственно преобразователь частоты с непосредственной связью с успехом может быть использован в каскадных схемах привода (см. § 28).

в) Система с преобразователем частоты инверторного типа

Принцип работы преобразователя частоты инверторного типа состоит в том, что переменное напряжение частоты сети выпрямляется, а затем преобразуется с помощью автономного инвертора в напряжение нужной частоты. Блок-схема инверторного преобразователя частоты показана на рис. 57.

Регулирование величины выходного напряжения для реализации соотношений (63) или (63а) осуществляется

путем регулирования выпрямленного напряжения на входе инвертора. С этой целью выпрямитель выполняется на управляемых вентилях (тиристорах).

Технические трудности в создании автономных инверторов определяются двумя обстоятельствами.

Первое связано с необходимостью обеспечения коммутации вентилей инвертора. Поскольку тиристоры обладают неполной управляемостью, т. е. с помощью сигналов на управляющем электроде их можно только вклю-

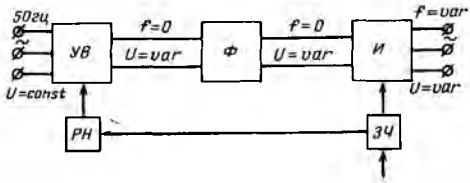

Рис. 57. Схема преобразователя частоты инверторного типа для питания двигателя переменного тока.

УВ — управляемый выпрямитель; *Ф* — фильтр; *И* — инвертор; *ЗЧ* — задатчик частоты, *РН* — регулятор напряжения.

чать, но не отключать, то отключение тиристоров возможно только путем перемены полярности напряжения между анодом и катодом вентиля, что при питании инвертора постоянным (выпрямленным) напряжением требует использования дополнительных коммутирующих средств. Применяются различные способы искусственной коммутации тиристоров инвертора: запирание тиристоров посредством предварительно заряженных коммутирующих конденсаторов, наложением на рабочий ток тока повышенной частоты, источником которого могут служить индуктивности и емкости, входящие в инвертор, и др.

Второе обстоятельство определяется тем, что работа асинхронного двигателя связана с циркуляцией реактивной мощности в его статорной цепи. Поскольку инвертор питается от выпрямителя, то источник реактивной мощности со стороны питания отсутствует и в схеме преобразователя необходимо предусматривать средства для возможности протекания в статоре реактивного (отстающего) тока двигателя. Для этой цели используются специальные схемные решения (обратный мост, ведомый сетью инвертор) и источники реактивной мощности, т. е.

элементы, способные запасать и отдавать электрическую энергию. Такими элементами являются конденсаторы, включаемые параллельно или последовательно с нагрузкой (инверторы тока), или конденсаторы, включаемые на вход инвертора с использованием обратных вентилей (инверторы напряжения). При частотном управлении синхронными двигателями, несмотря на то что последние могут работать с коэффициентом мощности, равным

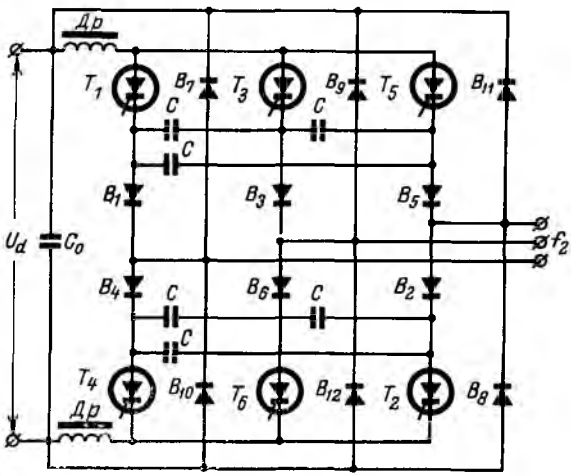

Рис. 58. Инвертор с междуфазной коммутацией с отсекающими неуправляемыми вентилями.

единице, и не нуждаться в источниках реактивной мощности, предусматривать таковые оказывается все же необходимым для обеспечения переходных режимов, но мощность их может быть существенно снижена.

К настоящему времени разработано большое число схем автономных инверторов [Л. 10, 28, 30, 37]. Рассмотрим для примера две возможные схемы.

На рис. 58 показана схема инвертора с междуфазной коммутацией с отсекающими неуправляемыми вентилями. Инвертор собран по трехфазной мостовой схеме на тиристорах T_1—T_6. Коммутация тиристоров осуществляется с помощью конденсаторов C. Обратные вентили B_7—B_{12} служат для циркуляции реактивной мощности между фазами двигателя, а также между нагрузкой и конденсатором C_0. Схема подробно описана в [Л. 30].

Другая возможная схема, разработанная Ю. Г. Толстовым для питания асинхронных электродвигателей мощных турбомеханизмов [Л. 37], показана на рис. 59.

В этой схеме инвертор, состоящий из тиристоров *1ТИ—6ТИ*, питается от управляемого выпрямителя *1ТВ—6ТВ*. Между выпрямителем и инвертором включен дроссель *Др*. Коммутация тока между вентилями инвертора осуществляется с помощью конденсаторов *1С—3С*, подключаемых к вентилям инвертора посредством

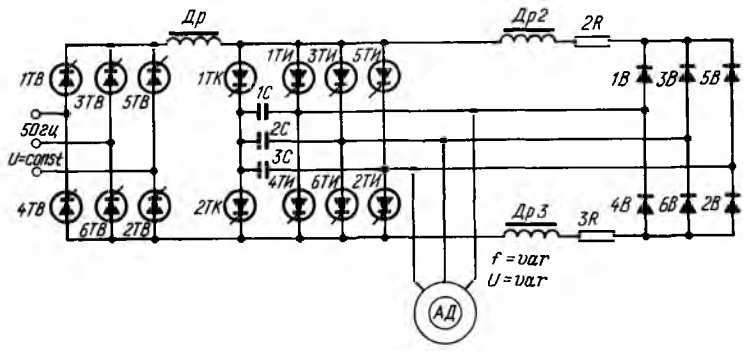

Рис. 59. Схема асинхронного электропривода с тиристорным преобразователем частоты инверторного типа.

вспомогательных тиристоров *1ТК*, *2ТК*. Для циркуляции реактивной мощности между нагрузкой и инвертором служат обратные вентили *1В—6В*. Источником реактивной мощности являются емкости *1С—3С*.

Основное преимущество преобразователей частоты инверторного типа — возможность получать регулируемую частоту примерно от 5 до 400 *гц* (возможно получение и более высоких и менее низких частот). Отсюда возникает возможность создавать преобразователи как с выходной частотой от 5 до 50 *гц* для регулирования скорости двигателя вниз от номинальной, так и высокочастотные с верхним пределом частоты 100, 200 или 400 *гц* для питания высокоскоростных электроприводов с максимальной скоростью вращения до 24 000 *об/мин*.

К настоящему времени стало возможным применение в таких схемах в качестве вентилей высокочастотных тиристорных блоков, рассчитанных на напряжение 10 000 *в* и выше.

На этой основе могут быть сконструированы безредукторные электроприводы мощных высокоскоростных турбомеханизмов.

Схема с преобразователями частоты инверторного типа требует большого количества силовых элементов вентилей, конденсаторов, дросселей. По данным [Л. 45] установленная мощность этих элементов по сравнению с мощностью, потребляемой двигателем, составит: для вентилей 4,35 $P_{дв}$, для конденсаторов (0,3÷0,5) $P_{дв}$, для дросселей (0,3÷0,5) $P_{дв}$. В то же время следует иметь в виду, что система управления вентилями в преобразователях инверторного типа гораздо проще, чем в системах с непосредственной связью.

Электропривод с асинхронным короткозамкнутым или синхронным электродвигателями и преобразователем частоты инверторного типа целесообразно применять для турбомеханизмов в случаях, указанных в начале настоящего параграфа.

20. ЭЛЕКТРОПРИВОД С ИНДУКТОРНОЙ МУФТОЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Электропривод с индукторной муфтой скольжения состоит из нерегулируемого двигателя (асинхронный короткозамкнутый или синхронный) и индукторной муфты скольжения, устанавливаемой между двигателем и механизмом (рис. 60). Скорость входного вала муфты, соединенного с электродвигателем, сохраняется постоянной, а скорость выходного вала меняется в зависимости от величины тока возбуждения индуктора и нагрузки на выходном валу муфты. Изменением тока возбуждения

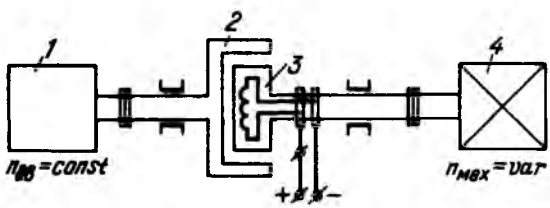

Рис. 60. Электропривод с индукторной муфтой скольжения.

1 — двигатель, *2* — якорь муфты, *3* — индуктор муфты, *4* — рабочий механизм.

муфты можно регулировать скорость вращения ее выходного вала.

Индукторная муфта скольжения представляет собой электрическую машину специальной конструкции, состоящую из двух вращающихся частей, расположенных концентрично. Наружная часть муфты, называемая якорем, выполняется в виде массивного стального цилиндра, соединенного с входным валом. Внутренняя часть — индуктор выполняется в виде зубчатого колеса, несущего на себе обмотку возбуждения. Ток в обмотку возбуждения поступает через контактные кольца и щетки. При отсутствии тока в обмотке возбуждения якорь вращается вхолостую, а индуктор остается неподвижным. При подаче в обмотку постоянного тока возникает магнитный поток, замыкающийся через якорь и индуктор. Вследствие неодинаковых магнитных сопротивлений воздушного зазора над зубцами и впадинами индуктора распределение магнитного поля по окружности якоря будет неравномерным. Поскольку при вращении двигателя якорь перемещается относительно индуктора, то в активной части якоря происходят пульсации магнитного потока, вызывающие вихревые токи. Взаимодействие этих токов с основным магнитным потоком создает крутящий момент, который приводит индуктор и соединенный с ним выходной вал во вращение. Величина крутящего момента тем больше, чем больше ток возбуждения муфты и выше относительная скорость (скольжение) якоря относительно индуктора. Механические характеристики муфты скольжения показаны на рис. 61.

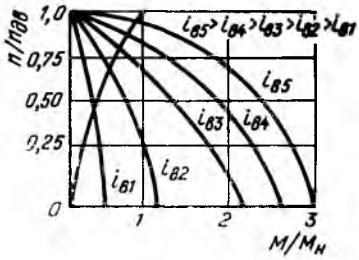

Рис 61. Механические характеристики электромагнитных муфт скольжения.

Принципы действия электромагнитной муфты скольжения и асинхронного двигателя подобны, различие состоит в том, что в муфтах вращающееся электромагнитное поле создается индуктором, возбужденным постоянным током. Появление в якоре вихревых токов и, следовательно, создание крутящего момента возможны только в том случае, если якорь и индуктор вращаются с раз-

ными скоростями, т. е. существует определенное скольжение якоря относительно индуктора. Механические и энергетические характеристики муфт сходны с таковыми для асинхронных двигателей, причем регулирование тока возбуждения индуктора приводит к такому же виду механических характеристик, как и изменение напряжения питания асинхронного двигателя.

Мощность, поступающая на входной вал муфты, пропорциональна моменту, развиваемому муфтой, и скорости вращения электродвигателя:

$$P_{вх} = \frac{Mn_{дв}}{975}.$$

Мощность, снимаемая с выходного вала муфты, пропорциональна моменту, передаваемому муфтой, и скорости вращения выходного вала

$$P_{вых} = \frac{Mn}{975}.$$

Разность между подводимой и отводимой мощностями представляет собой мощность скольжения, которая теряется в муфте:

$$P_s = P_{вх} - P_{вых} = \frac{Mn_{дв}}{975} \frac{n_{дв} - n}{n_{дв}} = \frac{Mn_{дв}}{975} s_м,$$

где $s_м$ — скольжение электромагнитной муфты.

При массивной конструкции якоря энергия скольжения расходуется на нагрев тела якоря, а при наличии в якоре короткозамкнутой обмотки — на нагрев этой обмотки. Поэтому основной трудностью создания муфты, рассчитанной на передачу большой мощности, является проблема теплоотвода. Электромагнитные муфты изготовляются как с воздушным, так и с жидкостным охлаждением. Технические данные электромагнитных муфт завода Киргизкабельмаш приведены в табл. 5П.

Муфты серии ИМС рассчитаны на длительную работу с механизмами, имеющими вентиляторный характер нагрузки. Выбор индукторной муфты скольжения производится по максимальной величине передаваемого момента при номинальном скольжении и по максимально допустимой скорости вращения. Поскольку для каждого типоразмера муфты величина потерь скольжения ограничена, то при выборе муфты необходимо производить

поверочный расчет на допустимую величину потерь скольжения. Как было показано выше (§ 13), максимальная величина этих потерь при вентиляторной нагрузке составляет около 15%.

Достоинствами приводов с электромагнитными муфтами скольжения являются:

а) простота и малая стоимость привода;

б) возможность использования для привода большой мощности синхронных электродвигателей;

в) возможность разгона больших маховых масс без перегрева пусковой клетки двигателя.

Вместе с тем эта система привода имеет ряд существенных недостатков, основные из которых следующие:

а) низкий к. п. д. при регулировании скорости вследствие больших потерь энергии скольжения;

б) снижение максимальной скорости привода, которая не превышает

$$n_{\text{макс}} = n_0 - n_0 s_{\text{н дв}} - n_{\text{дв}} s_{\text{н.м}} = n_0 (1 - s_{\text{н дв}} - s_{\text{н.м}} + s_{\text{н.дв}} s_{\text{н.м}}),$$

где $s_{\text{н дв}}$, $s_{\text{н м}}$ — соответственно номинальное скольжение приводного двигателя (в случае, если он асинхронный) и номинальное скольжение муфты;

в) сложность эксплуатации муфты, как машины, имеющей два вращающихся элемента;

г) мягкость регулировочных характеристик, следствием чего является невозможность сколь-нибудь точной стабилизации скорости без применения обратных связей.

Основным недостатком муфты скольжения является, конечно, неэкономичность регулирования.

Коэффициент полезного действия муфты скольжения (без учета потерь на трение в подшипниках, вентиляционных потерь и потерь на возбуждение, которые составляют в сумме около 2% от номинальной мощности и которые можно принять пропорциональными скорости вращения) запишем как

$$\eta_{\text{имс}} = \frac{n}{n_{\text{дв}}}. \tag{64}$$

Учитывая упомянутые выше потери, получим:

$$\eta_{\text{имс}} = \frac{n}{n_{\text{дв}}} - 0{,}02\,\frac{n}{n_{\text{дв}}} = 0{,}98\,\frac{n}{n_{\text{дв}}}. \tag{65}$$

Общий к. п. д. привода

$$\eta = \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{имс}}. \tag{66}$$

Учитывая, что к. п. д. нерегулируемого электродвигателя зависит от нагрузки на его валу, воспользуемся (44), в которой для данного случая мощность на валу двигателя $P^*_{пол}$ соответствует $P_{вх}$. Эта мощность равна:

$$P^*_{пол} = \frac{P_{пол}}{P_{н\ дв}} \frac{1}{\eta_{имс}}. \qquad (67)$$

где $P_{пол}$ — полезная мощность на выходном валу муфты скольжения; $P_{н\ дв}$ — номинальная мощность электродвигателя.

Подставляя (44) в (66) с учетом (67) и преобразуя, получим формулу для определения к. п. д. привода с муфтой скольжения:

$$\eta = \frac{P^*_{пол}}{P^*_{пол} \frac{n_{дв}}{0{,}98n} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\eta_{дв\ н}} - 1\right)\left[1 + \left(P^*_{пол} \frac{n_{дв}}{0{,}98n}\right)^2\right]}. \qquad (68)$$

Пример 8 Требуется выбрать привод с муфтой скольжения для вентилятора мощностью 38 *квт* при скорости 930 *об/мин*; построить зависимость к. п. д. привода от скорости

Момент на валу вентилятора

$$M_н = 975 \frac{P_н}{n_н} = 975 \frac{38}{930} = 39{,}8\ кгс \cdot м.$$

Выбираем муфту ИМС-40 Произведем ее проверку по величине потерь скольжения Для вентилятора малой мощности зависимость момента от скорости выражается формулой (32), при этом максимальная мощность потерь скольжения в соответствии с (61) составляет 18,5%, т. е

$$P_{s\ макс} = 0{,}185 P_н = 0{,}185 \cdot 38 = 7{,}0\ квт.$$

По табл. 7П определяем, что эти потери являются допустимыми для муфты ИМС-40.

В качестве приводимого двигателя выбираем двигатель АО2-91-6 55 *квт*, 980 *об/мин*, $\eta_н = 0{,}88$ Расчет к п д, произведенный по (68), сводим в таблицу (табл. 6).

При расчетах $P^*_{пол}$ определяется как

$$P^*_{пол} = \frac{M_н \left[0{,}1 + 0{,}9\left(\frac{n}{n_н}\right)^2\right] n}{975 P_{дв\ н}} =$$

$$= \frac{39{,}8 \left[0{,}1 + 0{,}9\left(\frac{n}{n_{дв}}\right)^2\right] n}{975\ 55}.$$

Таблица 6

n, об/мин	$M^* = 0,1 + 0,9\left(\frac{n}{n_н}\right)^2$	$P^*_{пол}$	$\frac{P^*_{пол} n_{дв}}{0,98n}$	η
930	1,0	0,69	0,74	0,82
800	0,77	0,46	0,57	0,70
600	0,48	0,21	0,35	0,50
400	0,27	0,083	0,21	0,30
200	0,14	0,021	0,105	0,12

Найденная зависимость показана на рис. 62.

Расчеты показывают, что к. п. д. приводов с муфтами скольжения при низких скоростях весьма мал.

Коэффициент полезного действия такого привода может быть повышен, если принять в качестве приводного двигателя двухскоростную машину. Тогда при работе в диапазоне от $0,5n_0$ до n_0 двигатель работает с максимальной скоростью и скольжение муфты не превышает 0,5. При скоростях ниже 0,5 двигатель переключается на низкую скорость, скольжение муфты уменьшается и к. п. д. привода возрастает. На рис. 62 показана кривая к. п. д. при использовании двухскоростного двигателя и переключения на низкую скорость, начиная с 465 *об/мин*. Однако переключение усложняет схему привода, вследствие чего такое решение не получило распространения.

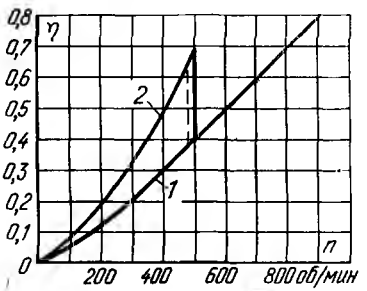

Рис. 62. Зависимость к. п. д. привода с муфтой скольжения от скорости.

1 — при односкоростном двигателе, *2* — при двухскоростном двигателе.

Отмеченные недостатки приводов с индукторными муфтами скольжения ограничивают их применение теми случаями, когда простота этих приводов имеет большее значение, чем их энергетические показатели. Это электроприводы малой мощности (до 100 *квт*), а также электроприводы, находящиеся в работе небольшое число часов в году. Более подробно вопрос о целесообразных областях применения приводов с муфтами скольжения рассмотрен в гл. 7.

В нашей стране электроприводы с индукторными муфтами типа ИМС широко применяются для насосов коммунального водоснабжения мощностью до 100 *квт*. Из зарубежной практики известно применение муфт скольжения и для приводов значительно большей мощности. Фирма «Хинан и Фрауд» (Англия) изготовляет муфты с воздушным охлаждением мощностью рассеяния до 368 *квт* и с водяным охлаждением мощностью рассеяния до 736 *квт*. Для привода аэродинамической трубы фирмы «Боинг» в США применен привод мощностью 13 000 *квт*, состоящий из синхронного двигателя и муфты скольжения.

21. АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С РЕГУЛИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ НА СТАТОРЕ ДВИГАТЕЛЯ

Максимальный момент асинхронного двигателя, а следовательно, и жесткость его характеристики можно регулировать, изменяя по величине напряжение, подводимое к статору, причем момент двигателя изменяется пропорционально квадрату напряжения.

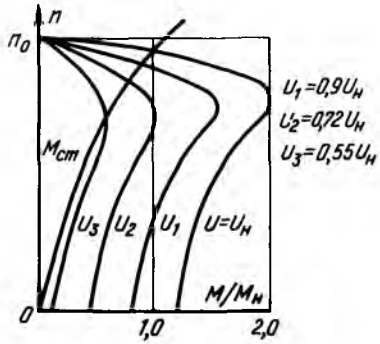

Рис. 63. Механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при регулировании напряжения питания.

На рис. 63 показаны механические характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя при изменении напряжения на его статоре. Поскольку скорость холостого хода и критическое скольжение не зависят от величины напряжения питания, то регулирование скорости возможно только в весьма небольшом диапазоне от n_0 до $n_0(1-s_к)$; при более глубоком регулировании ток двигателя интенсивно возрастает. Кроме того, регулирование путем изменения питающего напряжения связано с потерями скольжения в роторе двигателя. Даже при вентиляторном характере нагрузки, когда максимальная мощность скольжения составляет всего 15% номинальной, во избежание перегрева двигателя установ-

ленную мощность его нужно увеличить примерно в 5 раз (считая, что номинальные потери в роторе составляют 2—3%), что явно нецелесообразно.

Поэтому для приводов с указанным методом регулирования используют либо двигатели с ротором специальной конструкции, либо асинхронные двигатели с фазным ротором при постоянно включенном добавочном сопротивлении в цепи ротора. В последнем случае включение добавочного сопротивления позволяет вынести потери скольжения из двигателя в сопротивление и повысить величину критического скольжения. Такая схема при вентиляторном характере нагрузки допускает достаточно глубокое регулирование.

В качестве регулятора напряжения в статорной цепи асинхронного двигателя обычно используются дроссели насыщения (силовые магнитные усилители). В этом случае рассматриваемый способ регулирования обычно называют дроссельным.

Поскольку механические характеристики асинхронного двигателя с добавочным сопротивлением очень мягкие, особенно при снижении питающего напряжения, то для получения удовлетворительных регулировочных качеств привода необходимо применение замкнутых систем регулирования скорости с обратными связями либо по скорости, либо по току и напряжению. Одна из возможных схем показана на рис. 64 [Л. 42]. Основными недостатками схем дроссельного управления являются:

а) низкий к. п. д. привода (рис. 65), несколько даже худший, чем у приводов с муфтами скольжения;

б) низкий коэффициент мощности;

в) снижение номинальной скорости двигателя на 10—15%.

Схемы с асинхронным двигателем с фазным ротором и дроссельным регулятором напряжения не имеют преимуществ перед электроприводами с индукторными муфтами скольжения. В то же время последние дешевле и имеют некоторые другие лучшие технические показатели. Область применения как дроссельного привода, так и муфт скольжения составляют турбомеханизмы малой мощности, однако предпочтение следует отдавать приводам с муфтами.

Есть, однако, такие области применения электроприводов, где желательно по условиям окружающей среды применение электродвигателей, не имеющих щеточных

контактов и отличающихся повышенной надежностью в тяжелых условиях эксплуатации. Это могут быть установки, работающие во взрывоопасных помещениях, где содержатся химически активные вещества, в подземных условиях и т. д.

В этих случаях использование дроссельных приводов малой мощности представляется вполне оправданным

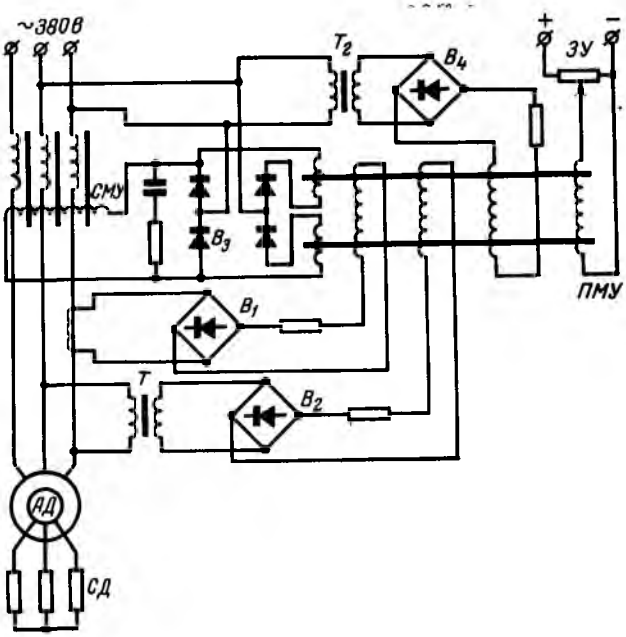

Рис. 64. Схема дроссельного регулирования асинхронного двигателя.

Поскольку использовать асинхронный двигатель с фазным ротором в этих случаях нельзя, то необходимы асинхронные двигатели с ротором специальной конструкции. Наибольший практический интерес представляют в этой связи дроссельные приводы с асинхронным электродвигателем с индукционными дисковыми сопротивлениями.

Двигатель выполняется на базе асинхронного двигателя с фазным ротором, у которого вместо контактных колец на валу машины жестко крепятся составные стальные диски, в тело которых вложены катушки из мед-

ного провода в теплостойкой изоляции. Выводы катушек индукционных дисков подключены непосредственно к выводам обмотки ротора. Индукционные диски имеют комплексное сопротивление, величина которого возрастает с увеличением частоты тока ротора, т. е. с уменьшением скорости вращения. Энергия скольжения, которая расходуется в роторной цепи, в большей своей части выделяется в индукционных дисках, допускающих значительный перегрев и имеющих хорошие условия охлаждения. Благодаря ограничению потерь и распределению их между двигателем и дисками длительно допустимый по нагреву момент двигателя при скорости 0,5 синхронной составляет 60—70%, а при скорости, близкой к нулю, — 35—40% номинального момента двигателя.

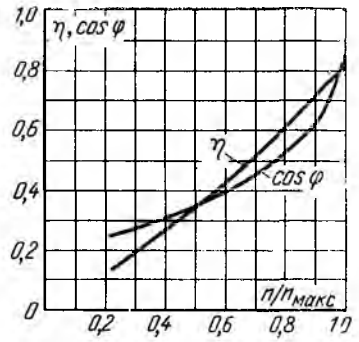

Рис. 65. Зависимость к. п. д. и коэффициента мощности дроссельного привода от скорости вращения при вентиляторной нагрузке.

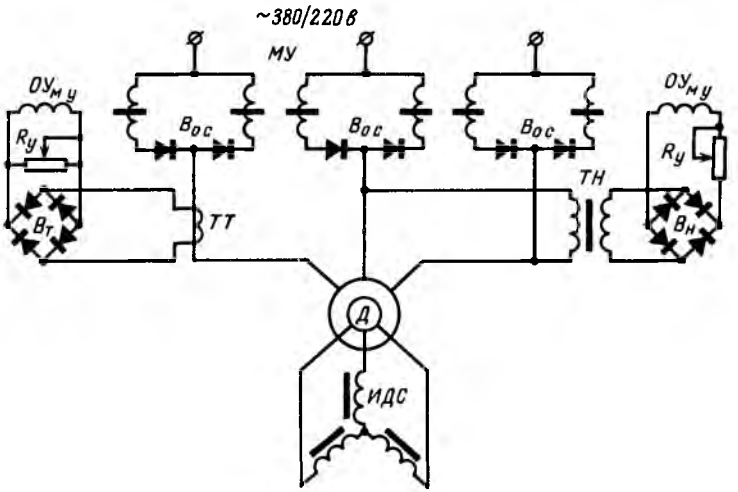

Рис 66 Принципиальная схема дроссельного привода с двигателем с индукционным дисковым сопротивлением.

Скорость такого двигателя регулируется посредством дроссельного регулятора напряжения, охваченного обратными связями по току и напряжению (рис. 66). Механические характеристики привода показаны на рис. 67. Кривая *АВ* на этом рисунке показывает максимально допустимые длительные моменты нагрузки в зависимости от скорости привода.

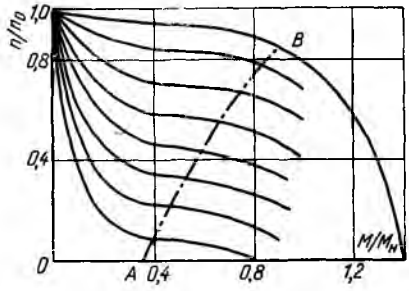

Рис. 67. Механические характеристики привода с двигателем с индукционным дисковым сопротивлением и дроссельным регулятором

В табл. 6П приведены технические данные электроприводов с двигателями с индукционными дисковыми сопротивлениями и дроссельными регуляторами во взрывозащищенном исполнении типа ВАДИ. Эти приводы целесообразны для применения в турбомеханизмах мощностью до 10 *квт*, работающих в тяжелых условиях окружающей среды.

Дальнейшим шагом по совершенствованию подобных схем является замена дроссельных регуляторов напряжения тиристорными. В этих схемах в цепь статора асинхронного двигателя специальной конструкции включаются тиристоры по два встречно-параллельно в каждую фазу (рис. 68). Регулирование угла подачи управляющих импульсов позволяет изменять величину напряжения, подводимого к статору двигателя.

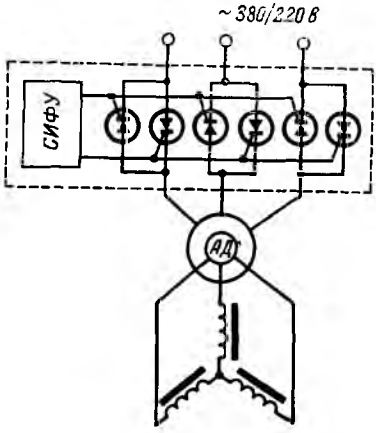

Рис. 68 Схема привода с двигателем с индукционным дисковым сопротивлением и тиристорным регулятором напряжения.

Возможно и импульсное регулирование напряжения. В этом случае напряжение регулируется изменением со-

отношения между временем открытого и закрытого состояния тиристоров. Силовая схема аналогична рис. 68, но система управления вентилями должна строиться таким образом, чтобы открывание тиристоров происходило в момент перехода напряжения соответствующей фазы через нуль, а запирание в момент перехода тока через нуль. Открывание тиристоров только при нулевом напряжении позволяет избежать появления в статорной цепи двигателя свободных составляющих тока, создающих тормозной момент.

22. РЕГУЛИРУЕМЫЙ ДВУХДВИГАТЕЛЬНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ПРИВОД С ПОВОРОТНЫМ СТАТОРОМ

Предложенный проф. А. С. Сандлером [Л 26] регулируемый электропривод с двумя асинхронными двигателями, один из которых выполнен с поворотным статором, по принципу своей работы может быть отнесен к системам с регулированием скорости вращения изменением напряжения, но в данном случае не на статоре, а в роторной цепи. Регулирование скорости здесь связано с потерями энергии скольжения, которая выделяется в добавочном сопротивлении и обмотках роторов двигателей.

Электропривод с поворотным статором состоит из двух расположенных на одном валу асинхронных двигателей с контактными кольцами, каждый половинной мощности. Принципиальная схема привода дана на рис 69. Статорные обмотки обоих двигателей присоединены к сети, а роторные обмотки соединены последовательно через добавочное сопротивление (рис. 69,*а*).

Один из двигателей устанавливается, как обычно, на фундаменте, а статор другого двигателя имеет возможность поворачиваться вокруг оси вала с помощью небольшого электродвигателя и самотормозящейся передачи.

Первоначальная установка статоров такова (угол поворота $\theta = 0$), что э. д. с., наводимые в обмотках ротора, взаимно компенсируются (рис. 70,*а*). Ток в цепи роторов будет равен нулю, и привод не будет развивать момента.

Если повернуть статор двигателя $АД_2$ на некоторый угол, например по вращению магнитного поля статора, то э. д. с ротора этой машины будет отставать от э. д. с. ротора $АД_1$ на угол θ, измеряемый в электрических градусах. Результирующее значение э. д. с. в этом случае будет равно $E'_р$, и в роторной цепи под действием этой э д с потечет ток. Как видно из векторной диаграммы (рис. 70,*б*), проекция вектора тока ротора на вектор э. д. с. первой машины E_2 имеет отрицательный знак, тогда как проекция того же вектора тока на вектор э. д. с. ротора машины $АД_2$ имеет положительный знак. Следовательно, машина $АД_1$ будет развивать тормозной момент, а машина $АД_2$ — двигательный, причем больший, чем тормозной. Появится результирующий двигательный момент. Первый двигатель будет работать в режиме генераторного торможения, в то время как второй — в двигательном режиме

При дальнейшем увеличении угла поворота до величины $90° < \theta < 180°$ (рис. 70,*в*) проекции вектора тока на векторы соответ-

ствующих э. д. с. роторов станут положительными и оба двигателя будут развивать двигательный момент; суммарный момент привода будет равен сумме моментов обоих двигателей. В предельном

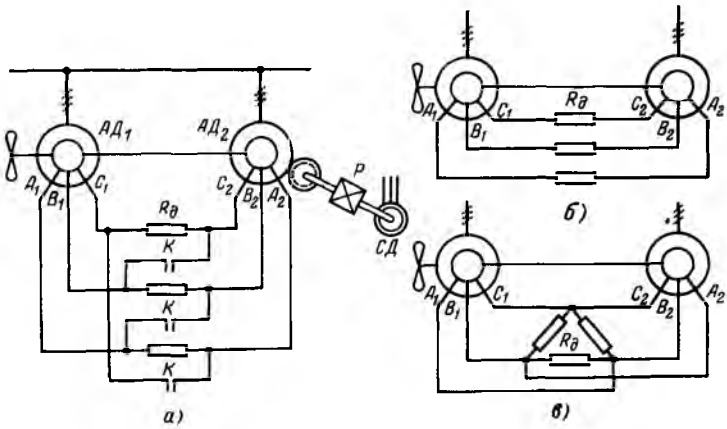

Рис 69 Схема двухдвигательного асинхронного электропривода с поворотным статором

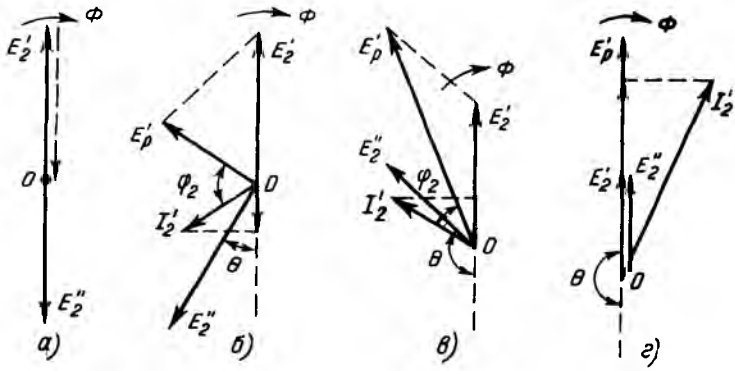

Рис. 70 Векторные диаграммы электропривода с поворотным статором.

случае, когда $\theta=180°$ (рис. 70,*г*), векторы э. д. с роторов совпадают и результирующая э. д. с. равна сумме э. д. с. отдельных машин.

Основные соотношения в приводе характеризуются следующими формулами:

$$M = \frac{2M_к}{\frac{s}{s_к} + \frac{s_к}{s}}(1 - \cos\theta);$$

$$I'_2 = U_1 \sqrt{\frac{1-\cos\theta}{2\left[\left(r_1 + \frac{r'_2 + R'}{s}\right) + x_к^2\right]}};$$

$$s_к = \frac{r'_2 + R'}{x_к},$$

где $M_к$ — максимальный момент каждого из двигателей; θ — угол в электрических градусах, что соответствует θ/p геометрическим градусам; p — число пар полюсов двигателя.

Таким образом, сущность процесса регулирования в этой схеме сводится к тому, что путем изменения угла θ меняется результирующая э. д. с. в роторной цепи двигателей. Это аналогично регулированию асинхронного двигателя путем изменения величины питающего напряжения. Механические характеристики этой системы привода, соответствующие схеме рис. 69,*б*, показаны на рис. 71 сплошными линиями.

Основной недостаток схемы с поворотным статором — потери энергии скольжения, которые выделяются в роторной цепи двигателей.

На первый взгляд кажется, что в случае, когда $\theta < 90°$ и первый из двигателей работает в генераторном режиме, энергия скольжения возвращается через него в сеть. Однако этого не происходит, как будет показано ниже.

В установившемся режиме при вращении со скоростью n суммарный момент обоих двигателей равен моменту сопротивления $M_{ст}$ на валу привода

$$M_2 - M_1 = M_{ст}.$$

Пренебрегая потерями в статорных цепях двигателей, определим, что второй двигатель потребляет из сети мощность, пропорциональную развиваемому им моменту и синхронной скорости вращения n_0:

$$P_2 = \frac{M_2 n_0}{975}.$$

Первый двигатель отдает в сеть мощность, также пропорциональную своему тормозному моменту и синхронной скорости вращения:

$$P_1 = \frac{M_1 n_0}{975}.$$

Полезная мощность, отдаваемая приводом, будет равна:

$$P_{мех} = \frac{M_{ст} n}{975}.$$

Поскольку мы пренебрегли потерями в статоре, то при отсутствии потерь в роторе, т. е. потерь скольжения, баланс мощностей должен был бы быть

$$P_2 - P_1 = P_{мех}.$$

Подставляя значения P, видим, что баланс энергии не сходится — затрачено больше, чем отдано:

$$\frac{M_2 n_0}{975} - \frac{M_1 n_0}{975} \neq \frac{M_{ст} n}{975},$$

так как, учитывая (75),

$$\frac{M_{ст} n_0}{975} \neq \frac{M_{ст} n}{975}.$$

Следовательно, имеют место потери в роторной цепи P_s, равные

$$P_s = \frac{M_{ст} n_0}{975} - \frac{M_{ст} n}{975} = \frac{M_{ст}}{975} n_0 s,$$

т. е. пропорциональные моменту на валу привода и скольжению двигателей; а это есть потери скольжения.

Нетрудно убедиться, что при угле поворота статора $\theta > 90°$, когда обе машины работают в двигательном режиме, потери скольже-

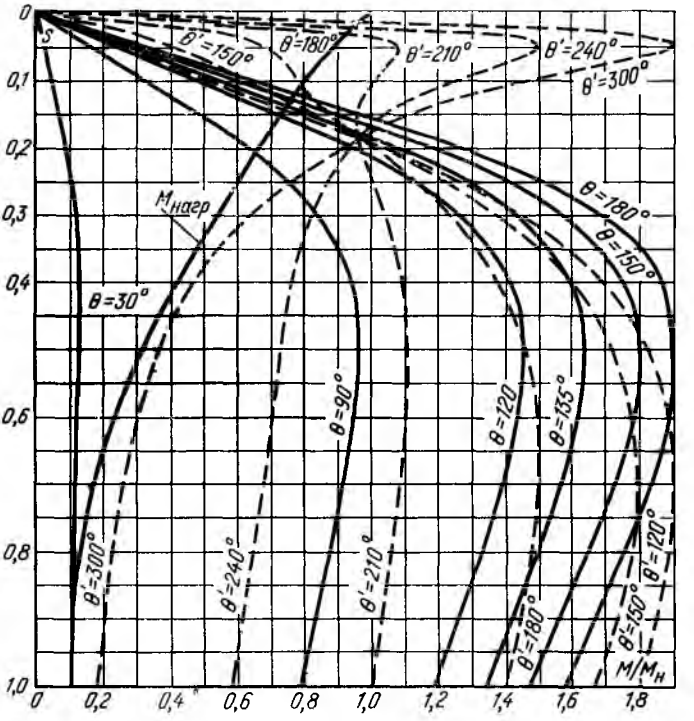

Рис. 71 Механические характеристики электропривода с поворотным статором при различных углах поворота (пунктиром показаны характеристики при соединении роторов по схеме на рис. 69,*в*).

ния также имеют место в рассматриваемой схеме Отметим также, что вывод о том, что регулирование в схеме с поворотным статором связано с потерями энергии скольжения, был сделан независимо от величины напряжения, подводимого к двигателям, и от величины сопротивления, включенного в роторную цепь.

Необходимость включения сопротивления последовательно с обмотками определяется стремлением вынести потери скольжения из конструктивного объема двигателей. Величина сопротивления может быть определена из следующих соображений. Допустимые потери в роторе асинхронного двигателя средней и большой мощности составляют около 1,5% от номинальной мощности двигателя Максимальные потери скольжения для привода турбомеханизмов, как следует из (61), составляют около 15% Следовательно, чтобы не увеличивать потери в двигателе, а следовательно, и его мощность сверх номинальных, сопротивление, вводимое в цепь ротора, должно не менее чем в 10 раз превышать сопротивление обмотки ротора: $R_д=10r_2$

Однако введение столь значительного сопротивления в 10 раз повышает номинальное скольжение двигателя. Как видно из механических характеристик (рис. 71), предельная характеристика при $\theta=180°$ проходит значительно ниже естественной и максимальная скорость привода существенно снижается

Для исключения этого недостатка А Б. Миневичем была разработана схема с параллельным включением добавочного сопротивления (рис 69,*в*). При согласованном положении статоров момент двигателей определяется величиной дополнительного сопротивления и соответствует работе асинхронного электродвигателя с сопротивлением в роторной цепи, равным $2R_д/3$ При угле сдвига 180 *эл. град* работа электродвигателей не отличается от работы с ротором, замкнутым накоротко, поскольку сумма обеих э. д. с. роторов прикладывается к удвоенному сопротивлению обмоток ротора. Механические характеристики привода с поворотным статором при параллельном включении добавочного сопротивления показаны на рис 71 пунктиром.

Переход от схемы с последовательно включенным сопротивлением к схеме с параллельным включением осуществляется с помощью контактора *К*, как показано на рис. 69,*а*. Переключение добавочных сопротивлений в треугольник параллельно обмоткам роторов сопровождается сдвигом угла э. д. с. роторов на 120 *эл град*, т. е. $\theta_{паралл}=\theta-120°$ Таким образом, схема, приведенная на рис 69,*а*, позволяет осуществить плавное регулирование скорости от 0 до номинальной, при этом регулирование до скольжения, равного 15—20%, осуществляется по схеме с последовательно включенным сопротивлением, а выше с параллельно включенным. Суммарный угол поворота статора составляет 300 *эл. град*. Наличие контактора, посредством которого производятся переключения в роторной цепи, несущественно усложняет схему. Переключение может производиться в функции положения статора, причем оно не сопровождается бросками тока и момента.

Рассмотренная схема не получила сколько-нибудь широкого применения ввиду невысокого к. п. д Однако она во многом не уступает приводам с индукторными муфтами скольжения. Схема с поворотным статором может быть также применена для осуществления плавного пуска мощных машин, оснащенных двухдвигательным электроприводом.

23. ЭЛЕКТРОПРИВОД С КОЛЛЕКТОРНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В зарубежной практике в качестве регулируемого электропривода турбомеханизмов малой и средней мощности довольно широко используются коллекторные двигатели переменного тока.

Из многообразия типов трехфазных коллекторных двигателей наиболее широко применяются шунтовые коллекторные двигатели с питанием со стороны ротора (двигатели Шраге) и шунтовые коллекторные двигатели с питанием со стороны статора. По принципам регулирования эти машины подобны электромашинным каскадам (см. гл. 6), так как изменение скорости вращения здесь также осуществляется введением добавочной э. д. с. во вторичную цепь асинхронного двигателя.

а) Двигатель Шраге

Трехфазные коллекторные двигатели с параллельным возбуждением и питанием со стороны ротора выполняются по известной схеме Шраге — Рихтера. Эти машины не требуют дополнительных регулировочных устройств. Регулирование скорости осуществляется сдвигом щеток посредством подвижной траверсы, приводимой в движение небольшим серводвигателем. Первичной обмоткой у двигателя Шраге является обмотка ротора, которая подключается к питающей сети через обычные контактные кольца. На роторе двигателя располагается также вторичная вспомогательная обмотка, витки которой соединены с ламелями коллектора. Вспомогательная обмотка имеет с питающей трансформаторную связь. Величина трехфазного напряжения, снимаемого с вспомогательной обмотки посредством щеток и коллектора, пропорциональна синусу угла сдвига щеток из нейтрального положения, а частота этого напряжения равна разности частоты сети и частоты, определяемой скоростью вращения, т. е. равна частоте скольжения. Обмотка статора подключена к щеткам коллекторного механизма. Таким образом, в двигателях типа Шраге конструктивно объединены обращенный асинхронный двигатель с фазным ротором и коллекторный преобразователь частоты Результирующая э. д. с. в цепи вторичной (статорной) обмотки равна алгебраической сумме э. д. с. скольжения, наводимой в этой обмотке, и напряжения, снимае-

мого с коллектора, причем последнее может регулироваться по величине сдвижением или раздвижением щеток.

Эти двигатели позволяют осуществлять двухзонное регулирование скорости. Особенностью механических характеристик двигателей Шраге является существенное увеличение перегрузочной способности двигателя при скоростях выше синхронной и уменьшение перегрузочной способности при снижении скорости, что связано с тем, что величина добавочной э. д. с. не зависит от скорости вращения. Указанные двигатели обеспечивают регулирование скорости в диапазоне $(3 \div 4) : 1$.

б) Шунтовой коллекторный двигатель с питанием со стороны статора

В этих машинах для регулирования скорости вращения также используется введение в цепь ротора добавочной э. д. с. Статорная обмотка является обычной для машин переменного тока. Обмотка ротора выполнена по типу обмотки якоря машин постоянного тока и выведена на коллектор, к трем щеткам которого подводится добавочная э. д. с. Преобразование частоты добавочной э. д. с. производится с помощью коллектора, а изменение величины добавочной э. д. с.— посредством какого-либо регулятора напряжения, чаще всего трансформатора с регулируемой величиной вторичной э. д. с. (рис. 72). Со стороны статора двигатель потребляет мощность, пропорциональную моменту и синхронной скорости, а через регулировочный трансформатор отдается в сеть избыточная мощность скольжения. При работе со сверхсинхронной скоростью в двигательном режиме недостающая мощность скольжения подводится через трансформатор в ротор двигателя.

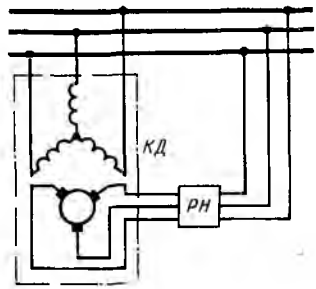

Рис. 72 Шунтовой коллекторный двигатель с питанием со стороны статора.
КД — коллекторный двигатель; *РН* — регулятор напряжения

Характеристики рассматриваемых двигателей подобны характеристикам двигателей Шраге, но имеют несколько худшую жесткость.

Сравнивая оба рассмотренных типа коллекторных машин, мы видим, что двигатели Шраге имеют несколько более сложную конструкцию и большие габариты, но не требуют дополнительных регулировочных устройств. Эксплуатационно ненадежным элементом машин Шраге является узел перемещения щеток, который отсутствует у машин со статорным питанием. Двигатели со статорным питанием могут быть построены на мощность до 1 800 *квт* [Л. 52], в то время как двигатели Шраге изготовляются на мощность, не превышающую 300 *квт* [Л. 21].

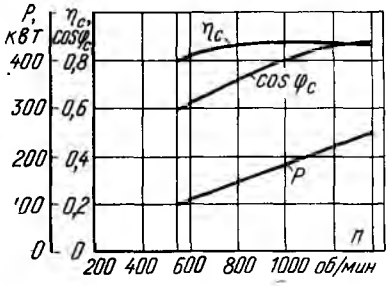

Рис. 73. Характеристики шунтового коллекторного двигателя мощностью 240 *квт* производства завода Всетин (ЧССР)

В европейских странах коллекторные двигатели применяются для привода водопроводных и канализационных насосов небольшой мощности, для тягодутьевых машин котельных агрегатов (фирма АСЕА), для вентиляторов в цементной промышленности (Чехословакия) Крупные коллекторные двигатели мощностью 2 400/1 050 *л. с.* при скорости вращения в диапазоне 450/345 *об/мин* используются для привода центробежных насосов на одной из тепловых электростанций в Англии. Такой же привод нашел применение для шахтного вентилятора главного проветривания мощностью 810 *квт* с регулированием в диапазоне 586—390 *об/мин* [Л. 53].

Коллекторные двигатели как с питанием со стороны ротора, так и со стороны статора производятся предприятием Всетин (ЧССР). Двигатели типа К-901-8, 6 *кв*, 240—96 *квт*, 850—450 *об/мин* производства этого завода были в значительных количествах использованы для приводов дымососов на тепловых электростанциях. Двигатели этого же завода мощностью 240—46,5 *квт* с широким диапазоном регулирования работают в качестве приводов насосов нефтепровода в ВНР. На рис. 73 показаны характеристики шунтового коллекторного двигателя мощностью 240 *квт* производства завода Всетин.

В Советском Союзе коллекторные двигатели в массовых количествах в настоящее время не изготовляются.

Недостатками коллекторных двигателей являются: высокая стоимость, недостаточная эксплуатационная надежность и сложность обслуживания и ремонта.

Глава шестая

КАСКАДНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

24. ПРИНЦИП РАБОТЫ КАСКАДНЫХ СХЕМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Одним из способов регулирования скорости асинхронного двигателя является введение в цепь ротора добавочной э. д. с. от постороннего источника. Таким источником может быть либо электрическая машина, либо вентильный преобразователь.

Указанный принцип регулирования скорости лежит в основе всех каскадных схем асинхронного привода, а также в основе работы ряда регулируемых приводов с коллекторными двигателями переменного тока.

Введение добавочной э. д. с. во вторичную цепь асинхронного двигателя позволяет в общем случае регулировать скорость, динамический момент и величину реактивной мощности в первичной цепи. Принципы регулирования указанных величин удобно пояснить с помощью векторных диаграмм (рис. 74 и 75) для трех случаев: короткого замыкания роторной цепи (диаграммы на рис. 74,*а* и 75,*а*), введения добавочного активного сопротивления (диаграммы на рис. 74,*б* и 75,*б*) и введения добавочной э. д. с. в цепь ротора (диаграммы на рис. 74,*в* и *г* и 75,*в* и *г*).

При коротком замыкании ротора и больших скольжениях коэффициент мощности роторной цепи двигателя будет низким. Следовательно, при большом значении полного тока ротора его активная составляющая будет невелика, а развиваемый двигателем момент мал. При реостатном управлении (рис. 74,*б*) ограничение величины тока ротора и изменение его фазы осуществляются введением добавочного активного сопротивления. При этом, несмотря на уменьшение полного тока ротора, его активная составляющая сохраняет величину, соответствующую нагрузочному моменту. Аналогичный результат может быть достигнут введением в цепь ротора добавочной э. д. с., которая в общем случае может быть

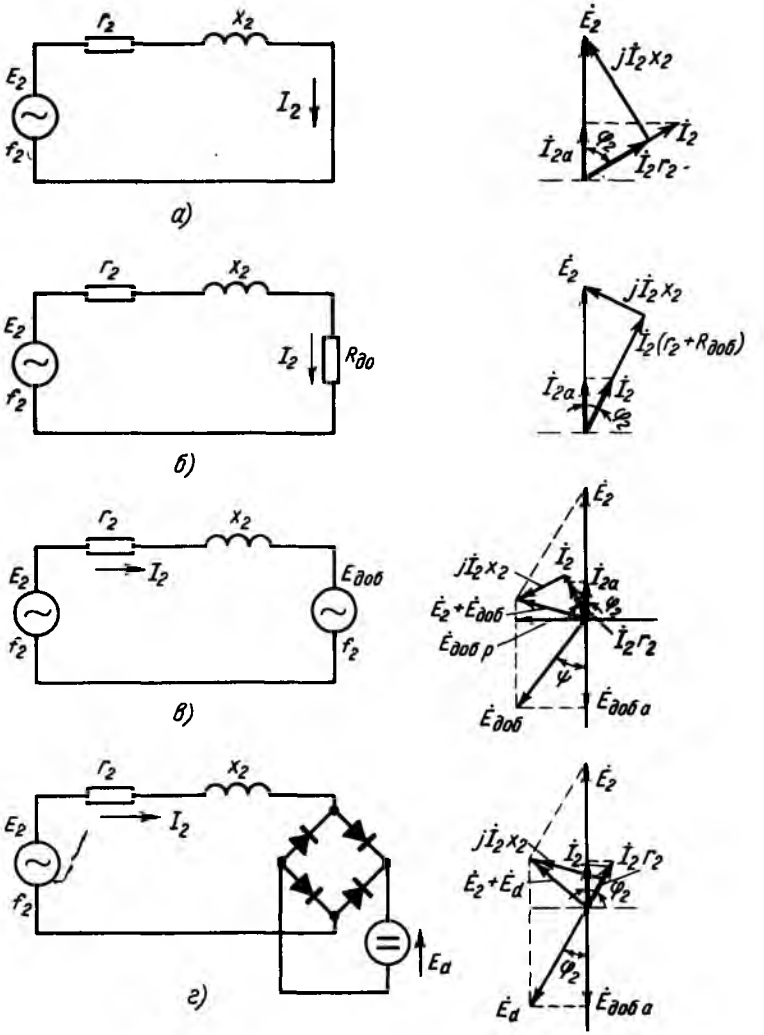

Рис. 74. Векторные диаграммы роторной цепи асинхронного двигателя.

а — при коротком замыкании; *б* — при введении добавочного активного сопротивления; *в* — при введении добавочной э. д. с. частоты скольжения; *г* — при введении добавочной э. д. с. в цепь выпрямленного тока ротора.

сдвинута по отношению к э. д. с. ротора E_2 на некоторый угол (180°—ψ). Добавочная э. д. с. может быть разложена на две составляющие: $E_{доб.а}$, находящуюся в фазе (или в противофазе) с э. д. с. ротора, и $E_{доб.р}$, сдвинутую на 90° относительно э. д. с. ротора. Первая со-

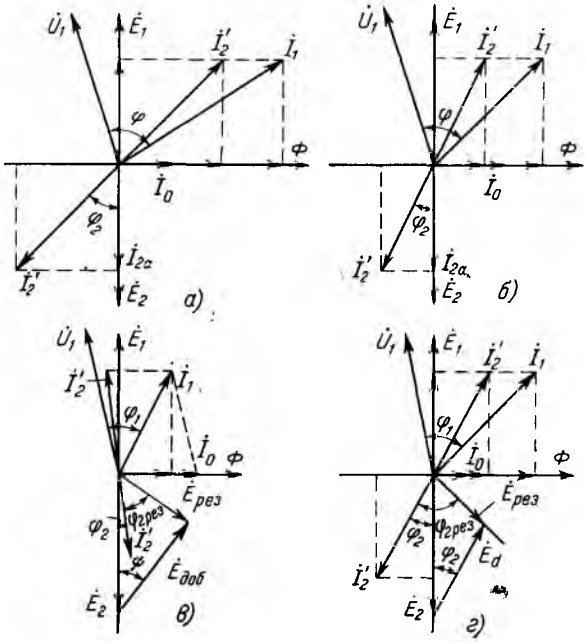

Рис. 75. Векторные диаграммы асинхронного двигателя.

а — при коротком замыкании роторной цепи; *б* — при введении в цепь ротора добавочного сопротивления; *в* — при введении добавочной э. д. с. частоты скольжения; *г* — при введении добавочной э. д. с. в цепь выпрямленного тока ротора.

ставляющая влияет на момент и скорость двигателя, вторая — на угол сдвига фазы вектора тока $\dot{I}_2$, что позволяет регулировать как активную, так и реактивную мощности двигателя.

Если в цепь ротора введена добавочная э. д. с., находящаяся в противофазе с э. д. с. ротора и равная ей по величине,

$$E_{доб.а} = E_2 = E_{2н}s = E_{2н}\left(1 - \frac{n}{n_0}\right), \qquad (69)$$

то ток ротора и момент равны нулю, т. е. двигатель работает в режиме холостого хода при скорости, которая, как следует из (69), определяется соотношением

$$n = \left(1 - \frac{E_{доб\,а}}{E_{2н}}\right) n_0.$$

Регулируя величину $E_{доб\,а}$, можно изменять скорость холостого хода асинхронного двигателя, которая отличается от синхронной скорости двигателя, равной скорости вращения электромагнитного поля статора и зависящей только от частоты сети и числа пар полюсов двигателя.

При уменьшении активной составляющей противо-э. д. с. ток ротора увеличивается и, следовательно, возрастает момент двигателя. Двигатель начинает разгоняться, его скольжение уменьшается и уменьшается э. д. с. ротора $E_2 = E_{2н}s$. Разгон при отсутствии нагрузки на валу будет происходить до скорости, при которой практически сравняются по величине э. д. с. ротора и добавочная противо-э. д. с. С увеличением нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, и э. д. с. ротора превосходит добавочную противо-э. д. с. В роторной цепи появляется ток I_2, определяемый результирующим напряжением $(E_2 + \dot{E}_{доб})$ и полным сопротивлением цепи. По мере роста тока увеличивается момент двигателя, замедление двигателя будет происходить до тех пор, пока развиваемый им момент не сравняется с моментом нагрузки.

С целью компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя целесообразно вводить добавочную э. д. с. под некоторым углом ψ, так чтобы имела место реактивная составляющая добавочной э. д. с. $E_{доб\,р}$. Эта составляющая определяет фазу результирующей э. д. с $E_2 + E_{доб}$ (см. рис. 74,*в*) а, следовательно, фазу тока ротора и величину реактивной мощности двигателя. Как показано на рис. 75,*в*, при достаточной величине $E_{доб\,р}$ ток ротора может даже опережать э. д. с. ротора.

В случае, если $E_{доб\,а} > E_2$, меняется знак активной составляющей тока и режим работы двигателя: он может работать в режиме генераторного торможения при скорости ниже синхронной и в двигательном режиме при скорости, превышающей синхронную.

Таким образом, введение добавочной э. д. с. в цепь ротора асинхронного двигателя позволяет изменять его

скорость, режим работы при данной скорости (двигательный или генераторный) и величину реактивной мощности, циркулирующей в статорной цепи двигателя. Регулирование указанных величин достигается изменением величины и фазы добавочной э. д. с. Этот принцип регулирования лежит в основе действия всех каскадных схем асинхронного двигателя.

Техническая сложность введения добавочной э. д. с. в цепь ротора состоит в том, что э. д. с. ротора имеет переменную частоту, зависящую от скорости (скольжения) двигателя:

$$f_2 = f_1 s, \tag{70}$$

где f_1 и f_2 — частота тока соответственно статора и ротора двигателя.

Добавочная э. д. с. должна также иметь регулируемую частоту, равную частоте f_2. Поэтому добавочную э. д. с. водят в ротор либо посредством преобразователей частоты, либо включением постоянной по знаку э. д. с. в цепь выпрямленного тока ротора (рис. 74,*г*).

Векторные диаграммы, соответствующие последнему случаю, показаны на рис. 74,*г* и 75,*г*. Особенность их состоит в том, что фаза добавочной э. д. с. E_d в этом случае является величиной подчиненной и регулироваться не может. Вектор E_d всегда направлен против вектора тока ротора и сдвинут на некоторый угол φ_2 от э. д. с. ротора. Этот угол примерно равен половине угла коммутации вентилей выпрямителя $\varphi_2 = \gamma/2$. Поскольку угол коммутации определяется величиной тока ротора, то с изменением I_2 будет меняться и угол φ_2. Если ток ротора близок к нулю (режим холостого хода), то угол коммутации также равен нулю и вектор добавочной э. д. с. E_d будет находиться в противофазе с э. д. с. ротора. Поэтому условием холостого хода является соотношение

$$kE_{2н}s = E_d, \tag{71}$$

где k — коэффициент схемы выпрямления.

Скорость холостого хода будет аналогично (69)

$$\frac{n}{n_0} = 1 - \frac{E_d}{kE_{2н}}. \tag{72}$$

В зависимости от типа преобразователя частоты включенного в роторную цепь двигателя, различают:

а) электромашинные каскады, в которых добавочная э. д. с. вводится в цепь ротора асинхронного двигателя посредством машинного преобразователя частоты:

б) вентильные каскады, где добавочная э. д. с. вводится с помощью вентильного преобразователя частоты с промежуточной цепью постоянного тока либо с непосредственной связью;

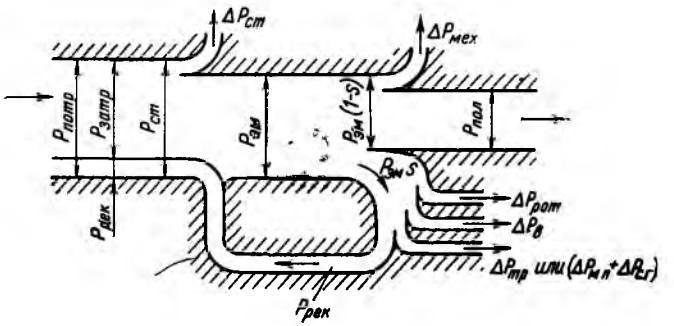

Рис 76 Энергетическая диаграмма асинхронного вентильного и вентильно-машинного каскадов.

в) вентильно-машинные каскады, где ток ротора выпрямляется с помощью вентилей и в цепь выпрямленного тока вводится противо-э. д. с., источником которой является машина постоянного тока.

Вентильно-машинные и особенно вентильные каскады в настоящее время становятся основным видом регулируемого электропривода для турбомеханизмов, что определяется двумя обстоятельствами:

а) высоким к. п. д. каскадов, особенно вентильных, во всем диапазоне регулирования скорости;

б) тем, что установленная мощность преобразователя частоты в каскадных схемах пропорциональна глубине регулирования скорости; поскольку требуемый диапазон регулирования для турбомеханизмов, как правило, невелик, то и мощность машинных либо вентильных преобразователей также будет существенно меньше мощности приводного электродвигателя.

Повышение экономичности регулируемого асинхронного привода в каскадных схемах осуществляется путем полезного использования энергии скольжения.

Указанные особенности каскадных схем и принципы их работы легко уясняются при анализе энергетических диаграмм привода.

Рассмотрим энергетическую диаграмму, представленную на рис 76 и отражающую преобразование энергии в асинхронном двигателе, включенном по схеме электрического каскада и работающем в двигательном режиме со скоростью ниже синхронной.

Как видно из диаграмм, мощность скольжения за вычетом потерь в роторе двигателя и в преобразователе, соединяющем роторную цепь с питающей сетью, возвращается (рекуперируется) в эту сеть, т. е.

$$P_{\text{рек}} = P_{\text{эм}} s - (\Delta P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{преобр}}). \qquad (73)$$

Работая в схеме электрического каскада, асинхронный двигатель потребляет из сети больше энергии, чем необходимо для совершения полезной работы, и этот избыток возвращается обратно в сеть. Включение асинхронного двигателя по схеме такого каскада делает возможным не только экономичное регулирование скорости вниз от синхронной, но и работу его в двигательном режиме при сверхсинхронной скорости.

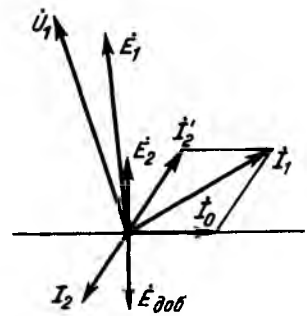

Рис. 77 Векторная диаграмма асинхронного двигателя при работе в двигательном режиме со скоростью выше синхронной.

Двигательный режим при скорости выше синхронной возможен в электрическом каскаде благодаря тому, что ток ротора (рис. 77) под действием добавочной э. д. с., активная составляющая которой направлена против э д. с. ротора и превосходит ее по величине, сохраняет свой знак соответствующим двигательному режиму, несмотря на то, что скольжение двигателя при сверхсинхронной скорости отрицательно.

Асинхронный двигатель работает в этом случае в режиме двойного питания, получая энергию со стороны статора $P_{\text{потр дв}}$ и со стороны ротора от преобразователя $P_{\text{потр пр}}$. Энергетическая диаграмма этого режима дана

на рис. 78. Пренебрегая потерями, можно записать:

$$P_{\text{потр дв}}+P_{\text{потр пр}}=P_{\text{мех}};$$

$$P_{\text{мех}}=M\omega_0+M(\omega-\omega_0)=M\omega.$$

Двигательный режим при скорости выше синхронной возможен в тех схемах вентильных (электрических) каскадов, где преобразователь частоты, включенный в роторную цепь двигателя, допускает передачу энергии как от ротора двигателя в сеть, так и из сети в ротор. Например, в асинхронных вентильных каскадах, содержа-

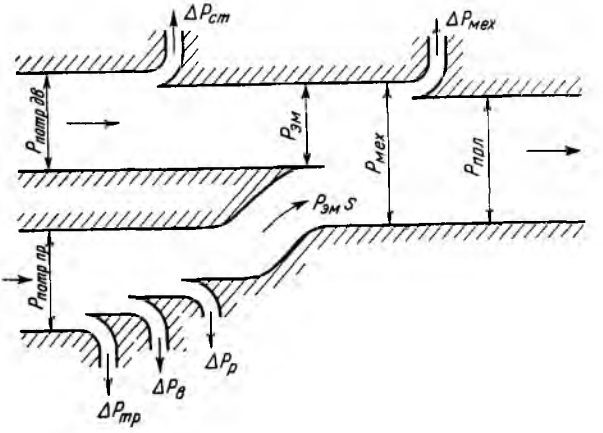

Рис. 78. Энергетическая диаграмма асинхронного вентильного каскада в двигательном режиме при сверхсинхронной скорости вращения.

щих преобразователь с промежуточной цепью постоянного тока, не обладающий двусторонней проводимостью, рассмотренный режим невозможен.

Двухзонное регулирование скорости (вниз и вверх от синхронной) определяет возможность более рационального использования установленной мощности двигателя и преобразователя в цепи ротора. Поясним сказанное на примере электропривода мощностью 1 500 *квт*, скорость вращения которого нужно регулировать в диапазоне примерно 500—1 500 *об/мин*. Если принять однозонное регулирование скорости, т. е. регулирование только вниз от синхронной, то приводной двигатель должен

иметь мощность 1 500 *квт* и синхронную скорость 1 500 *об/мин*. Поскольку привод должен регулироваться в диапазоне 1/3, то мощность роторного преобразователя должна составлять 2/3 мощности приводного двигателя, т. е. 1 000 *квт*.

В случае использования двухзонного регулирования можно принять приводной двигатель мощностью 1 000 *квт* при синхронной скорости 1 000 *об/мин* и регулировать скорость его вращения вниз и вверх от синхронной на 50%. Необходимая для этого мощность роторного преобразователя будет составлять 500 *квт*, т. е. вдвое меньше, чем при однозонном регулировании. При максимальной скорости 1 500 *об/мин* двигатель будет работать в режиме двойного питания, потребляя из сети со стороны статора 1 000 *квт* и со стороны роторного преобразователя еще 500 *квт*. Таким образом, двигатель с номинальными данными 1 000 *квт*, 1 000 *об/мин* будет развивать мощность 1 500 *квт* при 1 500 *об/мин*. При скорости ниже синхронной двигатель будет забирать из сети мощность, пропорциональную моменту и синхронной скорости, и остаток ее через роторный преобразователь возвращать в сеть.

Такова сущность двухзонного регулирования скорости. На первый взгляд этот способ позволяет уменьшить установленную мощность приводного двигателя (в настоящем примере 1 000 *квт* вместо 1 500 *квт*). Однако здесь нужно иметь в виду, что вес, габариты и стоимость электродвигателя определяются главным образом его номинальным моментом, который остается одинаковым для электродвигателей в обоих вариантах. Основные преимущества двухзонного регулирования состоят в уменьшении мощности роторного преобразователя (для рассмотренного примера в 2 раза). С этим же обстоятельством связано некоторое улучшение к. п. д. и коэффициента мощности привода благодаря уменьшению величины преобразуемой мощности. Однако реализация принципа двухзонного регулирования требует более сложного и дорогого роторного преобразователя частоты.

Кроме рассмотренных электрических каскадов применяются схемы каскадов, в которых энергия скольжения не возвращается в сеть, а используется для совершения полезной работы. Таковы электромеханические каскады, энергетическая диаграмма которых имеет вид, показанный на рис. 79. В этих каскадах энергия сколь-

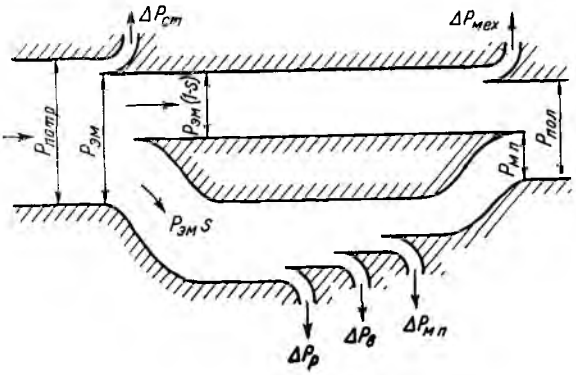

Рис. 79. Энергетическая диаграмма вентильно-машинного электромеханического каскада.

жения преобразуется в механическую и поступает на вал рабочей машины. Асинхронный двигатель потребляет из сети в этом случае мощность, необходимую только для совершения полезной работы и покрытия потерь в роторе.

25. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ КАСКАДЫ

К электромашинным каскадам относятся известные схемы Кремера (электромеханический каскад), Шербиуса (электрический каскад), асинхронно-синхронный каскад и др. В каскадах Кремера и Шербиуса используются в качестве преобразователей энергии скольжения либо одноякорный преобразователь, либо коллекторные машины переменного тока.

Каскад Кремера не получил промышленного применения в нашей стране и нашел весьма ограниченное применение в странах Западной Европы, в частности в ФРГ, где каскады Кремера применялись для привода насосов мощностью до 1 000 *квт* с диапазоном регулирования 100—75%. Основной недостаток этой схемы — наличие одноякорного преобразователя, представляющего собой сложную и дорогую электрическую коллекторную машину с ненадежной коммутацией. Предельная мощность таких преобразователей составляет около 300 *квт*. Мощные одноякорные преобразователи отечественной промышленностью не изготовляются. За рубежом они так-

же почти полностью вытеснены вентильными преобразователями.

Каскады Шербиуса с коллекторными генераторами получили некоторое распространение в ФРГ, их в относительно широких масштабах для насосных установок различного назначения производила фирма Броун — Бовери. Из зарубежных установок с приводом по этой схеме следует упомянуть воздуходувку доменной печи в Везермюнде (ФРГ) производительностью 100 000 *м*³/*ч* при напоре 1,5 *ат* (избыточных). Мощность установки 3 400 *квт*, двигатель, имеющий синхронную скорость вращения 1 500 *об/мин*, допускает регулирование скорости как ниже, так и выше синхронной в диапазоне 1 668—1 296 *об/мин*. В конце 1960 г. был введен в эксплуатацию мощный турбокомпрессор с приводом по этой же схеме, допускающим регулирование в диапазоне 1 578—1 414 *об/мин*. Мощность приводного электродвигателя 4 300 *квт*, синхронная скорость 1 500 *об/мин*. Во всем диапазоне регулирования двигатель работает с $\cos\varphi = 1$. Запуск двигателя осуществляется с помощью автотрансформатора и жидкостного реостата. Французская фирма «Испано-Сюиза» оборудовала аэродинамическую трубу с асинхронным приводом мощностью 2 850 *квт* по схеме каскада Шербиуса [Л. 43].

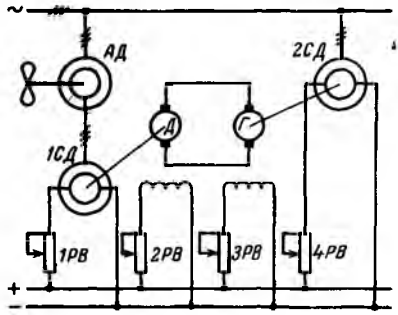

Рис. 80. Схема асинхронно-синхронного каскада.

В настоящее время преобразователи частоты на базе коллекторных машин вытесняются тиристорными преобразователями. В нашей стране коллекторные машины Шербиуса не производятся.

Асинхронно-синхронный каскад. Асинхронно-синхронный каскад относится к группе электрических каскадов. Схема этого каскада, показанная на рис. 80, основана на использовании машинного преобразователя частоты, описанного в § 19. Асинхронный приводной электродвигатель работает в рассматриваемой схеме как двигатель двойного питания, управляемый по синхронному

принципу. Регулирование скорости производится изменением тока возбуждения машины постоянного тока *Г* с помощью регулятора *3РВ*. Агрегат *2СД* вращается с постоянной скоростью.

Энергетическая диаграмма асинхронно-синхронного каскада при работе с подсинхронной скоростью соответствует рис. 76. В этом режиме машина *1СД* работает двигателем, машина *Д* — генератором, машины *Г* — двигателем и *2СД* — генератором.

Рассмотрим, каковы установленные мощности электрических машин, входящих в состав роторного преобразователя.

Несмотря на то, что машина *1СД* осуществляет передачу мощности скольжения, которая для турбомеханизмов, как было показано выше, не превышает 15—18%, габаритная мощность синхронной машины *1СД* будет равна мощности приводного асинхронного двигателя. Объясняется это следующим. Синхронная машина по току статора должна быть рассчитана на номинальный ток ротора приводного асинхронного двигателя

$$I_{1с.д}=I_{2н}.$$

Электродвижущая сила синхронной машины должна уравновешивать э. д. с. ротора асинхронного двигателя при минимальной рабочей скорости вращения (максимальном скольжении $s_{макс}$)

$$E_{1с.д}=E_{р}s_{макс}. \qquad (74)$$

Однако синхронная машина *1СД* должна развивать эту э. д. с. при пониженной по отношению к своей номинальной скорости вращения, так как она должна работать согласно (70) с частотой $f_{1с\,д}=f_1s$. Поэтому конструктивно машина *1СД* должна быть рассчитана таким образом, чтобы при номинальной скорости вращения и частоте развивать э. д. с.

$$E_{н1с.д}=\frac{E_{1с\,д}f_1}{f_{1с.д}}.$$

Учитывая (70) и (74), получим:

$$E_{н1с\,д}=\frac{E_{р}s_{макс}f_1}{f_1s_{макс}}=E_{р}, \qquad (75)$$

т. е. номинальное напряжение статора синхронной машины, а также ток статора должны быть равны но-

минальным напряжению и току ротора асинхронного приводного двигателя. Это означает, что установленные электромагнитные мощности этих машин должны быть равны. Такую же установленную мощность должна иметь и машина *Д*. В действительности машины *1СД* и *Д* передают не более 15—18% мощности приводного двигателя, что указывает на плохое использование этих машин.

Установленные мощности остальных машин, входящих в асинхронно-синхронный каскад, определяются уже той реальной мощностью, с которой они могут работать, и составляют около 20% мощности приводного асинхронного двигателя. При выборе этих машин необходимо учитывать их к. п. д.

Небольшая мощность этих машин составляет основное преимущество асинхронно-синхронного каскада для привода турбомеханизмов по сравнению с аналогичным приводом с частотным управлением и машинным преобразователем частоты, где все машины должны выбираться на полную мощность привода.

Дополнительных пусковых устройств для асинхронно-синхронного каскада не требуется, так как эта схема обеспечивает для турбомеханизмов регулирование скорости от нуля.

Коэффициент полезного действия рассмотренного каскада не превышает 0,85. Коэффициент мощности привода может поддерживаться близким к единице. Очевидным недостатком схемы остается сложность машинного преобразователя частоты.

Рассмотренная схема применялась для привода аэродинамических труб весьма большой мощности. Сложность схемы не позволяет считать ее перспективной для промышленного применения. Однако она может оказаться целесообразной для привода мощных испытательных установок.

26. АСИНХРОННЫЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ КАСКАД

а) Принцип работы асинхронного вентильного каскада

Наиболее простыми и распространенными схемами вентильного каскада являются схемы с промежуточной цепью постоянного тока. В этих схемах ток ротора вы-

прямляется с помощью трехфазного мостового выпрямителя и в цепь выпрямленного тока вводится добавочная э. д. с. В асинхронном вентильном каскаде в качестве источника добавочной э. д. с. используется вентильный преобразователь — инвертор. Схема асинхронного вентильного каскада с промежуточной цепью постоянного тока показана на рис. 81. Эта схема является наиболее распространенной; большинство выполненных до настоящего времени промышленных установок имеют такую схему. Исходя из этого условно будем называть ее основной схемой вентильного каскада.

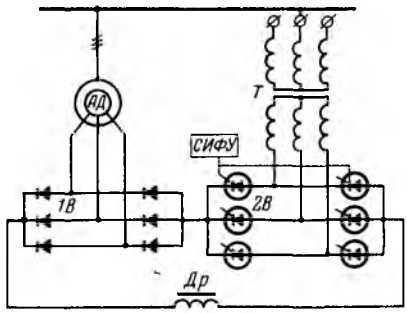

Рис. 81. Схема асинхронного вентильного каскада.

Привод по основной схеме состоит из следующих главных элементов: асинхронного электродвигателя с фазным ротором *АД*; неуправляемого вентильного преобразователя *1В* — для выпрямления тока ротора; управляемого вентильного преобразователя — для инвертирования выпрямленного тока ротора; трансформатора *Т* — для согласования напряжения ротора двигателя с напряжением сети; сглаживающего дросселя *ДС* — для сглаживания пульсаций тока и напряжения в промежуточной цепи постоянного тока. На рис. 81 инверторный преобразователь выполнен по трехфазной мостовой схеме. Это наиболее выгодная схема при использовании тиристоров. Возможны и другие схемы соединения вентилей инверторов: трехфазная нулевая (для приводов небольшой мощности) и двойная трехфазная схема с уравнительным реактором; последняя применяется при использовании управляемых ртутных вентилей.

В рассматриваемой схеме вентильного каскада с промежуточной цепью постоянного тока функции преобразования тока и энергии скольжения четко разграничены между двумя группами вентилей: вентили *1В* работают в выпрямительном режиме, преобразуя переменный ток ротора, имеющий частоту скольжения, в постоянный; вентили *2В* работают в режиме зависимого инвертора, пре-

образуя выпрямленный ток ротора в переменный частоты сети.

Принцип действия асинхронного вентильного каскада можно представить следующим образом. При работе в двигательном режиме ниже синхронной скорости ток ротора асинхронного двигателя выпрямляется с помощью вентилей *1В*. В цепь выпрямленного тока ротора введена

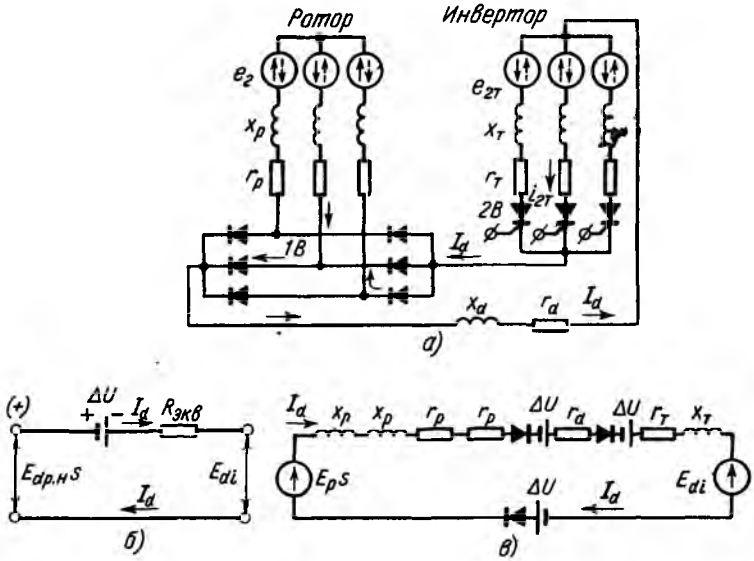

Рис. 82. Схема замещения роторной цепи асинхронного вентильного каскада.

добавочная э. д. с., представляющая собой среднее выпрямленное напряжение инвертора (противо-э. д. с. инвертора). Выпрямленное напряжение ротора $E_{dp\,н}s$ должно уравновешивать противо-э. д. с. инвертора E_{di}, падение напряжения на активных сопротивлениях роторного контура, а также падение напряжения, обусловленное процессами коммутации вентилей, затягиваемыми индуктивными сопротивлениями роторного контура.

На рис. 82,*а* представлена схема замещения роторной цепи асинхронного двигателя, соответствующая основной схеме каскада при трехфазной нулевой схеме соединения вентилей инвертора. Заменяя падение напряжения, обусловленное активным сопротивлением цепи и комму-

тацией вентилей, падением напряжения на эквивалентном сопротивлении $R_{экв}$ (рис. 82,*б*), можно записать:

$$E_{d\text{р н}}s = E_{di} + I_d R_{экв}, \qquad (76)$$

или

$$I_d = \frac{E_{d\text{р н}}s - E_{di}}{R_{экв}},$$

где $E_{d\text{р н}}$ — выпрямленное напряжение ротора при скорости и токе ротора, равных нулю; I_d — выпрямленный ток ротора.

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, как следует из (54) и векторной диаграммы (рис. 75,*г*), примерно пропорционален выпрямленному току ротора. Следовательно, регулирование последнего путем изменения величины противо-э. д. с. инвертора позволяет регулировать величину момента и скорость вращения двигателя. Величина противо-э. д. с. инвертора регулируется посредством изменения угла открывания управляемых вентилей *2В*. Если выпрямленная противо-э. д. с. инвертора будет равна выпрямленному напряжению ротора двигателя, то ток в цепи ротора и момент, развиваемый двигателем, будут равны нулю. При уменьшении противо-э. д. с. инвертора ток в цепи ротора возрастает, момент двигателя увеличивается и скорость его начинает повышаться. Так как с увеличением скорости скольжение и выпрямленное напряжение ротора $E_{d\text{р н}}s$ уменьшаются, то ускорение двигателя будет происходить до тех пор, пока момент двигателя не сравняется с моментом нагрузки. При увеличении противо-э. д. с. инвертора ток ротора и момент уменьшаются и скорость двигателя снижается. По мере уменьшения скорости повышается выпрямленное напряжение ротора. Ток ротора и момент двигателя увеличиваются до тех пор, пока момент, развиваемый двигателем, снова не станет равен статическому моменту сопротивления. При этом двигатель перейдет на работу в установившемся режиме с новым значением скорости (скольжения), соответствующим равенству (76). При постоянстве управляющего воздействия и изменении момента нагрузки на валу привода переходный процесс протекает аналогично изложенному. Например, при увеличении момента на валу двигателя скорость его снижается, вследствие этого возрастает э. д. с. ротора и, следовательно, увеличиваются вы-

прямленный ток и момент двигателя до тех пор, пока момент двигателя не станет равным моменту сопротивления на его валу.

При уменьшении противо-э. д. с. двигателя до нуля скорость двигателя возрастает лишь до 90—95% синхронной. Относительно большое скольжение двигателя при отсутствии противо-э. д. с. объясняется наличием в цепи ротора дополнительных сопротивлений (рис. 82,*в*). Для дальнейшего повышения скорости необходимо изменить знак добавочной э. д. с., т. е. перевести вентили *2В* из инверторного в выпрямительный режим.

При этом уравнение (76) примет вид:

$$I_d = \frac{E_{dp}\,\text{и}s + E_{d1}}{R_{\text{экв}}}.$$

Если E_{d1} в этом случае достигнет значения

$$E_{d1} = I_d(r_d + r_{\text{т}}),$$

то двигатель будет работать со скольжением, приближающимся к номинальному. Дальнейшее увеличение E_{d1} недопустимо, так как приведет к резкому увеличению тока по контуру, образованному вентилями *1В* и *2В*. Как показывает опыт работы вентильных каскадов, минимальное скольжение двигателя при работе с номинальным моментом нагрузки обычно равно $2s_{\text{н}}$.

Основная схема вентильного каскада обеспечивает только те режимы работы асинхронного двигателя, в которых энергия скольжения из ротора направляется в сеть. Такими режимами являются: двигательный режим при скорости ниже синхронной, режим генераторного торможения при сверхсинхронной скорости, торможение противовключением и режим динамического торможения. Для привода турбомеханизмов основное значение имеет двигательный режим при скорости ниже синхронной. В некоторых случаях для быстрой остановки турбомашин, обладающих большим моментом инерции, может использоваться динамическое торможение. Есть турбомеханизмы, например турбодетандеры, для которых нормальным режимом работы является тормозной. Для этих механизмов в случае, если требуется регулирование скорости их вращения, могут применяться вентильные каскады, работающие в режиме генераторного торможения при сверхсинхронной скорости.

Энергетическая диаграмма асинхронного вентильного каскада при работе в двигательном режиме соответствует рис. 76.

б) Электромеханические соотношения в асинхронном вентильном каскаде

Особенность работы асинхронного двигателя при включении в цепь его ротора мостового выпрямителя состоит в том, что ток в цепи ротора при соединении фаз ротора в звезду одновременно протекает лишь по двум фазам (за исключением периодов коммутации). Форма тока в обмотках при соединении их в звезду показана на рис. 83. При соединении в треугольник форма тока в линии будет такой же, как на рис. 83, форма же тока в обмотках ротора будет ступенчатой (рис. 84).

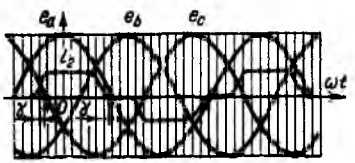

Рис. 83. Ток и напряжение ротора асинхронного двигателя в схеме вентильного каскада.

Форма тока в обмотках ротора, показанная на рис. 83, соответствует достаточно большой индуктивности в цепи выпрямленного тока $L_d \longrightarrow \infty$. В реальных схемах такая форма тока будет при $L_d = (3 \div 5)\, L_р$, где $L_р$ — суммарная индуктивность рассеяния асинхронного двигателя, приведенная к цепи ротора.

Длительность коммутации вентилей (угол коммутации), т. е. время, в течение которого ток проводят два вентиля анодной или катодной группы вентилей мостовой схемы выпрямления, определяется равенством

$$\gamma = \arccos\left(1 - \frac{\sqrt{2}\, x_р I_d}{E_р}\right), \tag{77}$$

или

$$\cos\gamma = 1 - \frac{\sqrt{2}\, x_р I_d}{E_р}. \tag{78}$$

В приведенных формулах: $E_р$ — э. д. с. ротора стоящего двигателя; $x_р$ — индуктивное сопротивление фазы двигателя, приведенное к обмотке ротора.

Выпрямленный ток ротора связан с действующим значением тока ротора (фазным при соединении обмоток

в звезду или линейным при соединении в треугольник) соотношением

$$I_{2\text{действ}} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{\gamma}{3\pi}}\, I_d. \qquad (79)$$

Если мостовая схема работает в так называемой первой рабочей области, когда угол коммутации γ изменяется в пределах от нуля до $\pi/3$, соотношение (79) будет меняться от $I_{2\text{действ}} = 0{,}815\ I_d$ (при $I_d \approx 0$ и $\gamma = 0$) до $I_{2\text{действ}} = 0{,}74\ I_d$ (при $\gamma = \pi/3$).

При токе I_d, соответствующем номинальному моменту двигателя, угол коммутации для большинства серийных асинхронных двигателей составляет обычно 35—40°. Поэтому для значений токов, близких к номинальному, зависимость действующего значения тока ротора от выпрямленного выражается примерным соотношением

$$I_{2\text{н}} = 0{,}78\, I_{d\,\text{н}}. \qquad (80)$$

Уменьшение коэффициента, связывающего действующее значение линейного тока ротора с выпрямленным, объясняется тем, что по мере увеличения тока и зависящей от него величины угла коммутации форма тока, проходящего по обмоткам ротора, приближается к синусоидальной.

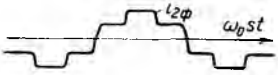

Рис. 84. Форма тока в обмотках ротора при соединении их в треугольник.

В мостовой неуправляемой схеме возможны три режима (области) работы в зависимости от величины нагрузки I_d и связанного с ней угла коммутации [Л. 44]. Рост угла коммутации, определяемый выражением (77), с ростом нагрузки происходит только до значения $\gamma = \pi/3$, которым ограничивается первая рабочая область трехфазной мостовой схемы. Дальнейший рост угла коммутации невозможен, так как это означало бы, что в работу одновременно вступят два вентиля одной фазы моста. Поэтому после достижения углом коммутации предельного значения $\gamma = \pi/3$ при дальнейшем возрастании тока точка естественного открывания вентилей смещается в сторону запаздывания, т. е. появляется некоторый угол $\alpha_р$ естественного запаздывания открывания вентилей (в отличие от искусственного угла запаздывания открывания, создаваемого в управляемом выпрямителе системой управления тиристорами). Наличие естествен-

ного запаздывания открывания вентилей характеризует второй режим работы мостовой схемы выпрямления, для которого справедливо вместо (78) соотношение

$$\cos(\alpha_p + \gamma) = \cos\alpha_p - \frac{\sqrt{2}\, x_p I_d}{E_p}. \qquad (81)$$

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален потоку и активной составляющей тока ротора. Поскольку поток пропорционален э. д. с. неподвижного ротора E_p, то, заменяя в формуле (54) поток на E_2, усредняя произведение тока на поток в течение одной трети периода и учитывая, что ток одновременно проходит лишь по двум фазам, получим:

$$M = \frac{2}{\omega_1 \cdot 9{,}81} \frac{\int\limits_{-\pi/3}^{\pi/3+\gamma} i_2 \cdot \sqrt{2} E_2 \cos\theta \, d\theta}{\frac{2\pi}{3}}, \qquad (82)$$

где i_2 — мгновенное значение фазного тока ротора (по рис. 83); $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ — угловая скорость вращения электромагнитного поля статора; p — число пар полюсов.

Для получения простой и удобной формулы момента допустим, что ток ротора имеет ступенчатую форму. С учетом этого допущения из (82) получим для первого режима работы мостовой схемы:

$$M = \frac{k_1}{9{,}81\omega_1}\left(I_d E_p - \frac{\sqrt{2}}{2} I_d^2 x_p\right). \qquad (83)$$

Выпрямленный ток ротора I_d зависит от разности выпрямленной э. д. с. и противо-э. д. с. инвертора (76).

Для двигательного режима ниже синхронной скорости и генераторного выше синхронной действительно соотношение

$$E_{d\,p} = E_{d\,i} + \Delta E, \qquad (84)$$

где $E_{d\,p}$ — выпрямленное напряжение ротора, которое при мостовой схеме выпрямления равно:

$$E_{d\,p} = k_1 E_p s = 1{,}35\, E_p s; \qquad (85)$$

$E_{d\,i}$ — противо-э. д. с. инвертора на стороне выпрямленного тока ротора, которая равна:

$$E_{d\,i} = k_2 E_{2т} \cos\beta; \qquad (86)$$

$E_{2т}$ — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора инвертора или фазное напряжение сети в случае бестрансформаторной схемы инвертора; k_2 — коэффициент схемы соединения вентилей инвертора; β — угол опережения открывания вентилей инвертора (угол управления).

Выражение (86) справедливо при условии непрерывности выпрямленного тока.

Падение напряжения в роторной цепи

$$\Delta E = I_d R_{экв} \tag{87}$$

состоит из четырех слагаемых: 1) реактивного падения напряжения, обусловленного коммутацией (перекрытием) вентилей роторной группы; 2) реактивного падения напряжения, обусловленного коммутацией вентилей инвертора; 3) падения напряжения на активных сопротивлениях; 4) падения напряжения в вентилях ΔU (при использовании полупроводниковых вентилей этой величиной можно пренебречь).

Формулы для определения указанных величин для различных схем соединения вентилей инвертора указаны в табл. 7.

Таблица 7

Схема соединения вентилей инвертора	$R_{экв}$	ρ
Трехфазная нулевая $k_2 = 1,17$	$\frac{3x_р s}{\pi} + \frac{3x_т}{\pi} + 2r_2 + 2r'_1 s + r_{с\,д} + r_т$	$\frac{x_т}{2x_р} + \frac{2\pi r_2}{3x_р} + \frac{\pi r_{с\,д}}{3x_р} + \frac{\pi r_т}{3x_р}$
Двойная трехфазная с уравнительным реактором $k_2 = 1,17$	$\frac{3x_р s}{\pi} + \frac{3x_т}{4\pi} + 2r_2 + 2r'_1 s + r_{с\,д} + \frac{r_т}{2}$	$\frac{x_т}{4x_р} + \frac{2\pi r_2}{3x_р} + \frac{\pi r_{с\,д}}{3x_р} + \frac{\pi r_т}{6x_р}$
Трехфазная мостовая $k_2 = 2,34$	$\frac{3x_р s}{\pi} + \frac{3x_т}{\pi} + 2r_2 + 2r'_1 s + r_{с\,д} + 2r_т$	$\frac{x_т}{x_р} + \frac{2\pi r_2}{3x_р} + \frac{\pi r_{с\,д}}{3x_р} + \frac{2\pi r_т}{3x_р}$

Обозначив $\frac{k_2 E_{2т}}{k_1 E_р} = \varepsilon$; $\frac{2r'_1\pi}{3x_р} = q$; $\frac{\Delta U}{k_1 E_р} = \lambda$, из (84) — (87) с учетом обозначений табл. 7 можно получить зависимость выпрямленного тока ротора от скольжения и управляющего воздействия β:

$$I_d = \frac{\pi k_1 E_р}{3x_р} \frac{s - (\varepsilon \cos\beta + \lambda)}{s(1+q) + \rho}. \qquad (88)$$

В приведенных выше формулах приняты следующие обозначения: r'_1 — приведенное к ротору активное сопротивление фазы статора двигателя; r_2 — активное сопротивление фазы ротора двигателя; $x_р$ — приведенное к ротору индуктивное сопротивление фазы двигателя; $r_{сд}$ — активное сопротивление сглаживающего дросселя; $r_т$, $x_т$ — соответственно активное и индуктивное сопротивления фазы трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке; ΔU — суммарное падение напряжения в вентилях роторной и инверторной групп; для каждого кремниевого вентиля падение напряжения можно принимать 0,5—1,0 *в*, для каждого ртутного вентиля 18—20 *в*.

Часто при проектировании не располагают обмоточными данными электродвигателей и трансформаторов. Необходимые для расчета параметры могут быть определены по паспортным данным двигателя и трансформатора с использованием следующих приближенных формул:

$$x_р = \frac{E_р^2}{2\omega_1 k_M M_н \cdot 9{,}81}; \quad r'_1 = \frac{U_1 s_н}{\sqrt{3}\, I_{1н} k_т^2}; \quad r_2 = \frac{1\,025 M_н s_н}{I_{2н}^2 p},$$

где $M_н$ — номинальный момент двигателя, *кгс·м*; k_M — перегрузочная способность двигателя; $s_н$ — номинальное скольжение двигателя; p — число пар полюсов двигателя; $U_{1н}$, $I_{1н}$ — номинальные линейное напряжение и ток статора; $k_т$ — коэффициент трансформации асинхронного двигателя.

Параметры обмоток трансформатора также можно приближенно определить по паспортным данным.

Для трансформаторов с одной группой вторичных обмоток

$$r_т = \frac{\Delta P_{н\,т} - \Delta P_{х\,х}}{3I_{2т\,н}^2} = \frac{\Delta P_{к\,з}}{3I_{2т,н}^2};$$

$$z_т = \frac{E_{2т} e_к \%}{100 I_{2т\,н}};$$

$$x_т = \sqrt{z_т^2 - r_т^2}.$$

Для трансформаторов со схемой вторичных обмоток две обратные звезды

$$r_т = \frac{\Delta P_{н\,г} - \Delta P_{х\,х}}{6 I_{2т.н}^2} = \frac{\Delta P_{к\,з}}{6 I_{2т.н}^2}; \quad x_т = 0{,}0244\,\frac{E_{2т} e_к \%}{I_{dн}},$$

где $\Delta P_{н\,г}$, $\Delta P_{х\,х}$, $\Delta P_{к\,з}$ — соответственно нагрузочные потери, потери холостого хода и короткого замыкания трансформатора, *вт*; $I_{2\,т.н}$ — номинальный фазный ток вторичной обмотки трансформатора; $I_{d\,н}$ — номинальный выпрямленный ток трансформатора; $e_к$ — напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Совместное решение уравнений (83) и (88) дает аналитическое выражение механических характеристик вентильного каскада

$$M = \frac{6E_р^2}{\pi\omega_1 x_р \cdot 9{,}81}\left\{\frac{s - s_0}{s(1+q)+\rho} - \left[\frac{s - s_0}{s(1+q)+\rho}\right]^2\right\}, \quad кгс \cdot м, \tag{89}$$

где s_0 — скольжение холостого хода

$$s_0 = \varepsilon \cos\beta + \lambda. \tag{90}$$

Обозначая $A_s = \dfrac{s - s_0}{s(1+q)+\rho}$

и относя момент к номинальному моменту асинхронного двигателя, формулу механических характеристик можно представить также в относительных единицах

$$\frac{M}{M_н} = 3{,}82 k_M (A_s - A_s^2), \tag{91}$$

где k_M — паспортная перегрузочная способность асинхронного двигателя.

Уравнения (89) и (91) позволяют рассчитать механические характеристики вентильного каскада при работе в двигательном режиме при значениях момента до 0,72 максимального момента асинхронного двигателя

Максимальный момент асинхронного двигателя в схеме вентильного каскада снижается на 17%, и относительная величина его равна 0,83 k_M. Механические характеристики вентильного каскада в диапазоне моментов (0,72÷0,83) k_M, т. е. во втором режиме работы выпрямителя описываются уравнением

$$M = \frac{3\sqrt{3}E_{\text{р}}^2}{\pi\omega_1 x_{\text{р}} \cdot 9{,}81} A_s \sqrt{1 - 4A_s^2}\,. \qquad (92)$$

Координаты точки перехода от *I* ко *II* области:

$$\frac{M_{\text{пер}}}{M_{\text{н}}} = 0{,}72k_M;\quad s_{\text{пер}} = \frac{4s_0 + \rho}{3 - q}.$$

Критическое скольжение определяется выражением

$$s_{\text{к}} = \frac{2\sqrt{2}\,s_0 + \rho}{1{,}82 - q}.$$

Механические характеристики вентильного каскада показаны на рис. 85.

Диапазон регулирования скорости $s_{0\text{макс}}$ определяется максимальным вторичным напряжением трансформатора инвертора. Как следует из (90),

$$s_{0\text{макс}} = \frac{k_2 E_{2\text{т}} \cos\beta_{\text{мин}}}{k_1 E_{\text{р}}}. \qquad (93)$$

Во избежание прорыва инвертора $\beta_{\text{мин}}$ принимают не менее 15°. При этом

$$E_{2\text{т}} = \frac{k_1 E_{\text{р}} s_{\text{макс}}}{k_2 \cdot 0{,}965}. \qquad (93')$$

Для турбомеханизмов $s_{0\,\text{макс}}$ обычно не превышает 0,5.

Поскольку работа турбомеханизмов, как правило, не связана с перегрузками и момент двигателя не превышает номинального, то для расчета характеристик вентильных каскадов без регулирования напряжения на статоре асинхронного двигателя достаточно пользоваться формулой (91), не применяя (92).

в) Выбор аппаратуры вентильного каскада

Аппаратура вентильного каскада: выпрямитель, инвертор и трансформатор инвертора — по своей мощности зависит от требуемой глубины регулирования скорости вращения $k_{\text{р.с}}$, т. е. от требуемого максимального скольжения $s_{0\,\text{макс}}$.

Выбор вентилей выпрямителя роторной группы

Вентили выпрямителя выбираются по значению выпрямленного тока, соответствующему максимальному моменту сопротивления на валу двигателя. Для турбомеханизмов этот момент имеет место при номинальной скорости, т. е. номинальный момент двигателя. Ему соответствует

$$I_d = \frac{I_{2н}}{0{,}78}. \qquad (94)$$

Схема соединения вентилей роторной группы всегда принимается трехфазной мостовой. Вентили выбираются по среднему току через вентиль и по максимальному обратному напряжению. Ток через вентиль находится как

$$I_в = \frac{I_d}{3 \cdot 0{,}9 k_r k_в k_к k_п n_{пар}}, \qquad (95)$$

где k_r — коэффициент, учитывающий снижение допустимого тока через вентиль при работе с низкой частотой (для вентильных каскадов можно полагать минимальное скольжение 2%, следовательно, частота тока ротора будет 1 *гц*; при 1 *гц* $k_r = 0{,}92$); $k_в$ — коэффициент, учитывающий снижение допустимого тока через вентиль при скорости движения охлаждающего воздуха меньше 15 *м/сек*; в разработанных в настоящее время конструкциях скорость воздуха лежит в пределах 7,0—10,0 *м/сек*; при этом $k_в$ следует принимать равным 0,9; $k_к$ — коэффициент, учитывающий снижение допустимого тока через вентиль вследствие конструктивного ухудшения условий охлаждения, принимается $k_к = 0{,}9$; $k_п$ — коэффициент, учитывающий снижение допустимого тока через вентили при их параллельном соединении; в предположении, что распределение тока между параллельно

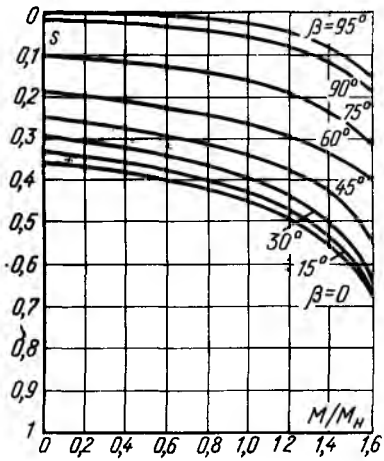

Рис. 85. Механические характеристики асинхронного вентильного каскада.

включенными вентилями будет осуществляться с точностью не ниже 10%, коэффициент следует принимать равным 0,9; $n_{пар}$ — число параллельно включенных вентилей.

Максимальное обратное напряжение на вентиле равно:

$$U_{в\ обр} = \frac{1{,}045 E_{др\ н} s_{макс}}{n_{посл} k_{посл}},$$

где $k_{посл}$ — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения обратного напряжения между последовательно включенными вентилями, принимают $k_{посл} = 0{,}8 \div 0{,}9$; $n_{посл}$ — число последовательно включенных вентилей.

Если пуск привода происходит в схеме каскада, то $s_{макс}$ следует принимать равным единице.

Выбор инвертора

В качестве инверторного преобразователя может приниматься любой тиристорный или ртутный преобразователь из серийно выпускаемых промышленностью. Следует иметь в виду, что все вентили инвертора должны быть управляемыми.

Инвертор выбирается по току I_d, определяемому по (83), и по вторичному выпрямленному напряжению трансформатора инвертора; в случае применения инвертора по мостовой бестрансформаторной схеме — по выпрямленному напряжению питающей сети

$$U_d = k_2 E_{2т},$$

где k_2 — коэффициент, зависящий от схемы соединения вентилей: трехфазная мостовая схема $k_2 = 2{,}34$; трехфазная нулевая и двойная трехфазная с уравнительным реактором схема $k_2 = 1{,}17$; $E_{2т}$ — фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора или питающей сети (для бестрансформаторных схем).

При проектировании новых инверторных преобразователей ток через вентиль определяется по формуле (95), в которой коэффициент $k_r = 1$.

Обратное напряжение на вентиле равно:

$$U_{в\ обр} = 2{,}44 E_{2т} \frac{1}{n_{посл} k_{посл}}.$$

Выбор трансформатора инвертора

Трансформатор инвертора выбирается по току и напряжению вторичных обмоток. Напряжение вторичной обмотки трансформатора зависит от глубины регулирования скорости двигателя, т. е. от $s_{макс}$. Как следует из (93),

$$E_{2т} = \frac{E_{dр\ макс}}{k_2 \cos \beta_{мин}},$$

где k_2 зависит от выбранной схемы соединения вентилей инвертора; $\beta_{мин}$ принимают не менее 15° [см. формулу (93)].

Ток вторичной обмотки трансформатора $I_{2т}$ выбирают исходя из выпрямленного тока ротора I_d, соответствующего длительной или среднеэффективной нагрузке двигателя:

$$I_{2т} = k_{2i} I_d,$$

где k_{2i} — коэффициент, зависящий от схемы соединения вентилей; для трехфазной нулевой схемы $k_{2i} = 0{,}58$; для схемы с уравнительным реактором $k_{2i} = 0{,}288$; для трехфазной мостовой схемы $k_{2i} = 0{,}816$.

Мощность трансформатора, равная

$$S_{тр} = m_т E_{2т} I_{2т} = \frac{m_т k_{2i} E_{dр\ макс} I_d}{k_2 \cdot 0{,}965},$$

где $m_т$ — число фаз вторичной обмотки трансформатора, ориентировочно может быть определена как

$$S_{тр} = \frac{P_{дв\ н} s_{макс}}{\eta_{дв\ н} \cdot 0{,}965},$$

т. е. равной той части мощности двигателя, которая пропорциональна максимальному скольжению (глубине регулирования).

Следует иметь в виду, что габаритная мощность трансформатора превышает найденную по вышеприведенным формулам вследствие того, что схемы трансформаторов должны компенсировать потоки вынужденного намагничивания. Это превышение составляет для схемы звезда — зигзаг — 46%, а для схемы с уравнительным реактором — 26%. Мощность трансформатора для питания вентилей по трехфазной мостовой схеме должна быть выбрана на 4,5% больше.

В случае бестрансформаторных схем инвертор подключается непосредственно к питающей сети через токоограничивающие анодные дроссели.

г) Схемы асинхронных вентильных каскадов

Схема пуска вентильных каскадов

В большинстве случаев вентильные каскады используются для регулирования скорости в ограниченном диапазоне вниз от максимальной скорости: 100—70%; 100—50%; редко — глубже. В этом случае возникает задача разгона привода до нижнего предела рабочего диапазона. Обычно применяют схемы реостатного пуска.

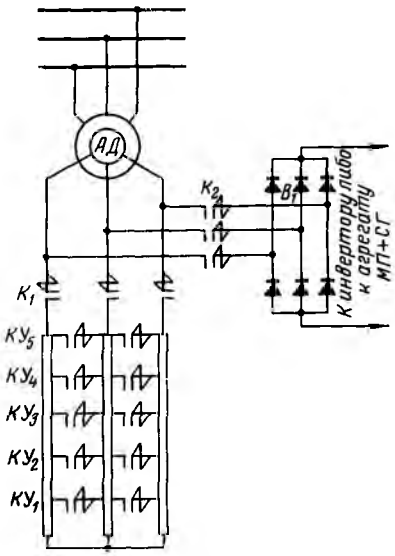

Рис. 86. Схема пуска асинхронного вентильного каскада.

Простейшая схема реостатного пуска показана на рис. 86. В этой схеме двигатель разгоняется до определенной скорости путем регулирования сопротивления, введенного в его роторную цепь. Чаще всего применяют реостатно-контакторное управление; в зарубежной практике применяют и жидкостные реостаты. По достижении нужной скорости ротор двигателя отключается от пусковых сопротивлений и включается в схему вентильного либо вентильно-машинного каскада. Следует обратить внимание на два условия плавного перехода в рабочий режим в этой схеме. Первое заключается в том, что подготовленная к работе цепь каскада должна подключаться к ротору двигателя раньше, чем будет отключено пусковое сопротивление. Второе — целесообразно разгонять двигатель с включенным реостатом до скорости, превышающей уставку скорости при работе в каскадной схеме; в этом случае двигатель, перейдя в схему каскада, плавно снизит свою скорость до заданной, т. е. к за-

данной скорости лучше подходить, снижая скорость, чем повышая. Такая схема применяется в основном для приводов большой мощности.

Возможен пуск привода непосредственно в схеме каскада. В этом случае добавочное сопротивление вводится в цепь ротора двигателя или в цепь выпрямленного тока последовательно с инвертором (рис. 87, 88).

При такой схеме включения выпрямленное напряжение ротора уравновешивается противо-э. д. с. инвертора и падением напряжения на добавочном сопротивлении. В этом случае уравнение (84) следует заменить на

$$E_{d\,рпS} = E_{d\,i} + I_d R_{экв} + I_d R_{доп}.$$

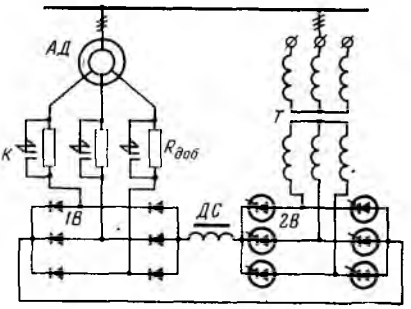

Рис. 87. Схема реостатного пуска вентильного каскада.

Схемы, представленные на рис. 87, 88, имеют ряд преимуществ по сравнению со схемой рис. 86: уменьшаются количество коммутирующих аппаратов и объем добавочных сопротивлений; исключается опасность разрыва цепи ротора; возможен плавный разгон привода.

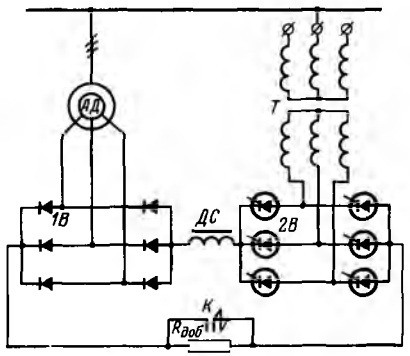

Рис. 88. Схема реостатно-каскадного пуска привода.

Последовательн о е включение добавочных сопротивлений связано и с рядом недостатков по сравнению со схемой рис. 86. Первый заключается в том, что в случае выхода из строя схемы каскада привод вообще не может работать, в то время как в схеме рис. 86 привод всегда может быть разогнан до максимальной скорости и может работать с этой скоростью с короткозамкнутым ро-

тором без регулирования до тех пор, пока не будет отремонтирована аппаратура каскада. Второй недостаток состоит в том, что вентили в схемах рис. 87, 88 подвергаются перенапряжениям, имеющим место при включении асинхронного двигателя в сеть.

Сравнивая между собой схемы, представленные на рис. 87 и 88, видим, что схема по рис. 87 требует большего числа коммутационных аппаратов, но вентили в этой схеме находятся в лучших условиях по напряжению. Возможно применение обеих схем. Однако для более ответственных и более мощных установок предпочтение следует отдавать схеме рис. 86.

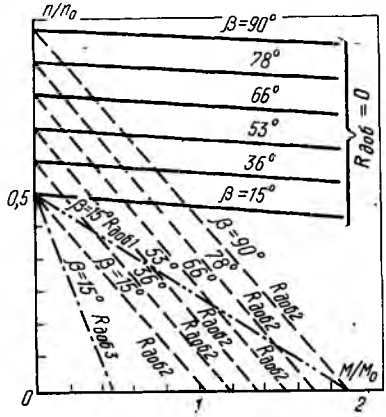

Рис. 89. Механические характеристики вентильного каскада с включенными в цепь ротора добавочными сопротивлениями

$R_{доб1} < R_{доб2} < R_{доб3}$.

Механические характеристики каскада с включенными добавочными сопротивлениями имеют вид, показанный на рис. 89. При введении добавочного сопротивления в цепь ротора жесткость механических характеристик изменяется. Поскольку скорость холостого хода в каскаде плавно регулируется изменением угла β, то даже в том случае, если каскад рассчитан на ограниченный диапазон регулирования, например 2 : 1, введение добавочного сопротивления позволяет расширить этот диапазон и, в частности, осуществлять плавный разгон двигателя. Как видно из рис. 89, приняв неизменным добавочное сопротивление $R_{доб}$ (одна ступень), можно плавно регулировать скорость вращения от нуля до 0,5 $n_{ном}$, после чего, закоротив добавочное сопротивление включением контактора K, работать при скорости от 0,5 $n_{ном}$ до $n_{ном}$. Для предотвращения броска тока при закорачивании сопротивления можно перед включением закорачивающего контактора угол регулирования установить минимальным $\beta_{мин}$ (ввести максимальную про-

гиво-э. д. с.) либо использовать быстродействующую отрицательную обратную связь по току с отсечкой.

При использовании добавочного сопротивления только для целей разгона до рабочей скорости его объемную мощность следует принимать, исходя из времени пуска. Если выбрать добавочное сопротивление из расчета ПВ = 100%, то в указанных схемах можно при половинной мощности инвертора длительно работать и при скоростях ниже $0{,}5\,n_{ном}$. При этом следует иметь в виду, что к. п. д. привода при включении добавочного сопротивления существенно снижается и потери в роторной цепи будут лишь в 2 раза меньше, чем при реостатном управлении.

При расчете реостатных характеристик вентильного каскада следует пользоваться формулами § 25б, в которых для схемы рис. 87 нужно принимать

$$\rho = \frac{x_т}{x_р} + \frac{2\pi(r_2 + R_{доб})}{3x_р} + \frac{\pi r_{с.д}}{3x_р} + \frac{2\pi r_т}{3x_р}$$

и для схемы рис. 88

$$\rho = \frac{x_т}{x_р} + \frac{2\pi r_2}{3x_р} + \frac{\pi(r_{с.д} + R_{доб})}{3x_р} + \frac{2\pi r_т}{3x_т}.$$

Специальные схемы вентильного каскада

Разработан ряд схем вентильного каскада, которые целесообразно использовать в некоторых случаях для привода турбомеханизмов. Смысл специальных технических решений, заключенных в этих схемах, состоит в том, чтобы использовать особенность нагрузочных характеристик турбомеханизмов, т. е. существенное снижение момента при уменьшении скорости вращения.

Если принять для привода турбомеханизма (например, вентилятора) основную схему вентильного каскада, то при диапазоне регулирования скорости 2 : 1 роторный выпрямитель, инверторную группу вентилей и трансформатор инвертора приходится выбирать на мощность, равную половине (пропорционально глубине регулирования) мощности приводного двигателя, а именно: по току — в соответствии с номинальным током ротора двигателя (такой ток будет при максимальной скорости, когда момент наибольший) и по напряжению — на половину номинального напряжения ротора (такое напряжение будет при минимальной рабочей скорости $0{,}5\,n_{ном}$).

Так как в случае вентиляторной нагрузки максимальные значения тока и напряжения ротора не совпадают и максимальная мощность скольжения не превышает 15—18% номинальной, то оборудование схемы вентильного каскада будет недоиспользовано по мощности.

Вследствие этого возможны два направления технических решений, позволяющих улучшить использование оборудования. Первое состоит в том, чтобы иметь два источника противо-э. д. с. в цепи выпрямленного тока и переключать их с последовательного (при низких скоростях) на параллельное (при высоких скоростях) соединение. Этот способ применяется главным образом для вентильно-машинных каскадов и рассмотрен в следующем параграфе. Второй способ заключается в том, чтобы одновременно с увеличением противо-э. д. с. в цепи ротора снижать напряжение на статоре асинхронного двигателя.

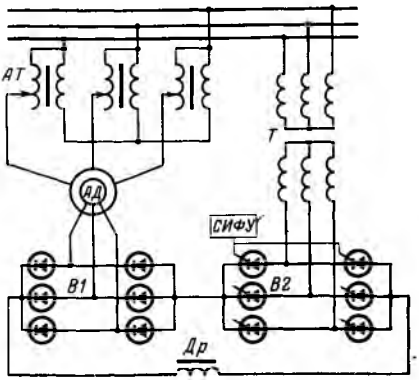

Рис. 90. Схема автотрансформаторного вентильного каскада.

Схема автотрансформаторного вентильного каскада показана на рис. 90. Момент асинхронного двигателя в любой схеме, в том числе и каскадной, пропорционален квадрату напряжения. Но момент нагрузки турбомеханизма пропорционален квадрату скорости. Следовательно, напряжение на статоре двигателя можно снижать пропорционально скорости. Установленная мощность аппаратуры вентильного каскада при этом существенно сокращается; так, при диапазоне регулирования 2 : 1 и регулировании напряжения на статоре в пределах 100—50% мощность элементов каскада составит по 25% мощности двигателя.

Применение автотрансформатора дает следующие преимущества:

1) позволяет уменьшить установленную мощность (снизить напряжение) роторного выпрямителя, инверторного преобразователя и трансформатора инвертора;

2) повышает коэффициент мощности привода за счет уменьшения тока намагничивания двигателя при регулировании напряжения на его статоре, а также за счет сокращения реактивной мощности, циркулирующей через инвертор; к. п. д. привода остается примерно таким же, как и в основной схеме, так как дополнительные потери в автотрансформаторе компенсируются за счет сокращения потерь в двигателе в связи с уменьшением тока намагничивания и сокращения потерь в трансформаторе инвертора;

3) уменьшение рабочего напряжения в статорной и роторной цепях двигателя повышает надежность привода и в ряде случаев облегчает условия работы вентилей роторной и инверторной групп;

4) упрощает схему пуска двигателя; если инвертор рассчитан на половинное номинальное напряжение ротора и автотрансформатор допускает регулирование в диапазоне 100—50%, то привод будет иметь полный диапазон регулирования и пусковые устройства не потребуются; если инвертор рассчитан на меньшее напряжение, то в этом случае целесообразна схема по рис. 87 или 88.

Расчет характеристик привода производится для автотрансформаторной схемы по формулам § 26б, в которых для каждого нового значения напряжения на статоре следует принимать новые значения $E_р$, ε, k_M:

$$E'_р = E_р \frac{U'_1}{U_н}; \quad \varepsilon' = \varepsilon \frac{U_н}{U'_1}; \quad k'_M = k_M \left(\frac{U'_1}{U_{1н}}\right)^2. \qquad (96)$$

Представляет определенный интерес включение автотрансформатора в роторную цепь двигателя, так как в этом случае поток двигателя при изменении напряжения ротора не снижается. Однако при этом следует иметь в виду, что автотрансформатор по своей габаритной мощности должен быть принят всегда, независимо от диапазона регулирования, на полную мощность привода.

Автотрансформаторы в схемах вентильного каскада следует использовать только такой конструкции, которая обеспечивает высокое значение коэффициента мощности самого автотрансформатора.

Схемы управления приводом при использовании автотрансформатора строятся таким образом, чтобы грубое регулирование осуществлялось воздействием на автотрансформатор, а точное регулирование и регулирование, требующее быстродействия, осуществлялось воздействием на систему управления инвертором. Обрат-

ные связи, используемые в системе управления приводом, как правило, воздействуют на систему управления инвертором.

Представляет интерес схема, примененная фирмой Сименс для привода питательных насосов мощностью 8 200 *квт*, скорость которых регулируется в диапазоне 750—1 490 *об/мин* (рис. 91).

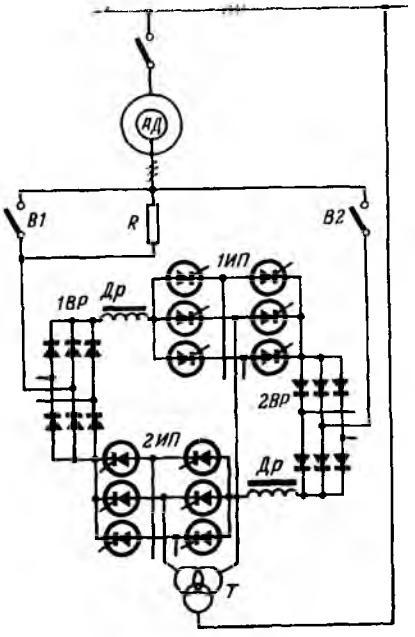

Рис 91 Схема асинхронного вентильного каскада для турбомеханизмов большой мощности

В этой схеме использовано переключение с последовательного на параллельное соединение двух преобразователей в роторной цепи двигателя. При работе в нижней части диапазона регулирования 750—1 125 *об/мин*, когда момент на валу значительно меньше номинального, преобразователи соединяются последовательно (замкнут выключатель *В1*). Это позволяет иметь противоэ д с каждого из них вдвое меньше, чем в обычной схеме. При работе в верхней части рабочего диапазона (1 125—1 490 *об/мин*) напряжение ротора снижается, а ток возрастает. При этом включается выключатель *В2* и преобразователи соединяются параллельно Такая схема позволяет вдвое, по сравнению с обычной схемой включения, снизить мощность преобразователей в роторной цепи каскада Другим возможным способом регулирования выпрямленного напряжения роторного преобразователя является применение управляемых вентилей роторной группы В этом случае выпрямленное напряжение ротора будет равно·

$$E_{dp} = k_1 E_{p\,н} s \cos \alpha_p.$$

Вентили роторной группы должны выбираться при этом на напряжение ротора, соответствующее макси-

мальному скольжению двигателя, вентили же и трансформатор инвертора могут быть выбраны на минимальное напряжение, соответствующее максимальной передаваемой инвертором мощности, т. е. напряжение трансформатора инвертора может составлять около 15% максимального напряжения ротора независимо от диапазона регулирования.

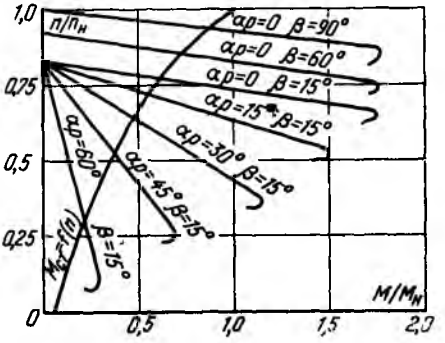

Рис 92 Механические характеристики вентильного каскада при управлении вентилями роторной группы

Управление роторной группой вентилей дает в этом смысле определенное преимущество, однако этот способ не получил практического применения из-за сложности управления вентилями роторной группы, работающими при переменной частоте и амплитуде питающего напряжения Техническая трудность создания схем управления вентилями роторной группы заключается в том, что управляющие импульсы по частоте и фазе должны строго соответствовать частоте и фазе напряжения ротора; амплитуда управляющих импульсов должна оставаться постоянной, в то время как амплитуда питающего напряжения изменяется и при приближении к синхронной скорости стремится к нулю. Схема, удовлетворяющая указанным требованиям, разработана Ю. М. Земляным [Л. 8] и применена для привода испытательной установки мощностью 1 000 *квт*. Недостатком рассматриваемой схемы является также снижение коэффициента мощности асинхронного двигателя при регулировании выпрямленного напряжения ротора с помощью вентилей роторной группы Механические характеристики вентильного каскада для рассмотренной схемы показаны на рис. 92.

д) Энергетические показатели вентильных каскадов

Коэффициент полезного действия вентильного каскада

Одно из основных идей систем асинхронных вентильных каскадов является полезное использование энергии скольжения асин-

хронного двигателя, что определяет сохранение достаточно высокого к. п. д. привода при изменении скорости вращения.

По определению к. п. д. привода в двигательном режиме есть отношение полезной мощности на валу к затраченной. В соответствии с энергетической диаграммой (см. рис. 76):

$$\eta_{\text{к}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{затр}}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{потр}} - P_{\text{рек}}}.$$

Следует, однако, иметь в виду, что рекуперация энергии происходит при работе в двигательном режиме только до определенной, правда, весьма высокой скорости вращения, при которой энергия скольжения $P_{\text{эм}}s$ уменьшается настолько, что достаточна лишь для покрытия потерь в роторе, вентилях и трансформаторе. Это скольжение определяется по формуле

$$s_{\text{рек}} = \frac{3\rho x_{\text{р}} I_d + \pi \Delta U}{\pi k_1 E_{\text{р}} - 3x_{\text{р}}(1+q) I_d}.$$

Для достижения скольжений, меньших, чем $s_{\text{рек}}$, необходимо трансформаторную группу вентилей перевести из инверторного в выпрямительный режим, т. е. при работе со скольжениями в пределах $s_{\text{н}}$—$s_{\text{рек}}$ энергия скольжения идет только на покрытие потерь в роторной цепи, причем из сети при этом со стороны трансформатора забирается часть энергии, недостающая до полного покрытия потерь.

Наиболее простым и достаточно точным методом определения к. п. д. вентильного каскада является метод разделения потерь. Сущность этого метода состоит в определении потерь в элементах и подсчете полных потерь в приводе.

Тогда для двигательного режима

$$\eta_{\text{к}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{пол}} + \Delta P}.$$

Рассмотрим основные положения этого метода применительно к асинхронному приводу с реостатным управлением и в каскадных схемах.

Потери мощности в приводе делятся на постоянные K и переменные V

$$\Delta P = K + V.$$

Под постоянным понимаются потери, не зависящие от тока нагрузки: потери в меди статора от намагничивающего тока I_0, потери в стали статора, в стали ротора, механические и дополнительные. С изменением скорости двигателя при управлении в цепи ротора (реостатные или каскадные схемы) эти потери остаются почти неизменными, так как постоянные потери в статоре не меняются, а потери в стали ротора и механические изменяются в противоположных направлениях.

Под переменными понимаются потери, пропорциональные квадрату тока нагрузки

$$V = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 (r_2 + R_{\text{доб}}).$$

Ток статора I_1, без особой ошибки, можно определять как

$$I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2}.$$

Номинальные переменные потери представляют собой потери в статоре и роторе, пропорциональные номинальному скольжению:

$$V_{н} = M_{н}\omega_1 s_{н}\left(1 + \frac{r'_1}{r_2}\right) 9{,}81.$$

Постоянные потери асинхронного двигателя находятся как

$$K_{а\,д\,н} = P_{н}\frac{1-\eta_{н}}{\eta_{н}} - M_{н}\omega_1 s_{н}\left(1 + \frac{r'_1}{r_2}\right) 9{,}81.$$

В схемах вентильного каскада потери также целесообразно разделять на постоянные и переменные. Постоянные потери в асинхронном двигателе в схеме каскада лишь немногим больше постоянных потерь в обычной схеме включения (примерно на 5%). Это объясняется увеличением потерь в стали за счет высших гармоник в токах статора и ротора. Кроме того, в схеме вентильного каскада имеют место постоянные потери холостого хода трансформатора инвертора. Таким образом, постоянные потери в вентильном каскаде равны

$$K_{к} = 1{,}05K_{а\,д\,н} + \Delta P_{х\,х\,тр}. \qquad (97)$$

Переменные потери удобно определять, приводя все потери к роторной цепи двигателя

$$V_{к} = I_d^2 R'_{экв} + 3I_d\Delta U, \qquad (98)$$

где $R'_{экв}$ в зависимости от схемы соединения вентилей трансформаторной группы равно:

для трехфазной нулевой схемы инвертора

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + r_{с\,д} + r_{т};$$

для схемы с уравнительным реактором

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + r_{с.д} + \frac{r_{т}}{2};$$

для трехфазной мостовой схемы

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + r_{с\,д} + 2r_{т}.$$

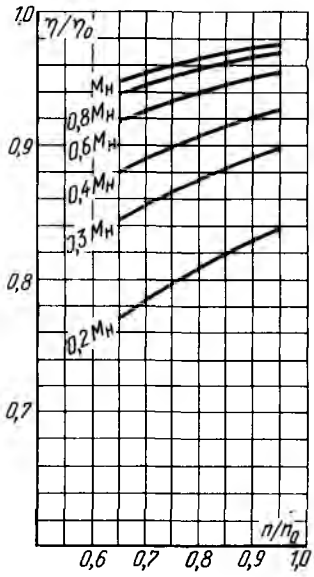

Рис. 93. Коэффициент полезного действия вентильного каскада с двигателем АК13-59-4; 1 000 *квт*; 1 500 *об/мин*; $\eta_{н} = 94{,}7\%$.

Ток I_d в зависимости от момента нагрузки определим, преобразуя выражение (83):

$$I_d = \frac{\sqrt{2}\,E_{р}}{2x_{р}} - \sqrt{\frac{E_{р}^2}{2x_{р}^2} - \frac{\sqrt{2}\cdot 9{,}81\omega_1 M}{k_1 x_{р}}}. \qquad (99)$$

Типичная зависимость к. п. д. вентильного каскада от скорости показана на рис. 93.

В схеме вентильного каскада повышается к п д асинхронного привода при регулировании скорости, но ухудшается его коэффициент мощности Снижение коэффициента мощности происходит по двум причинам

1) вследствие увеличения потребления (циркуляции) реактивной мощности (это вызвано тем, что реактивная мощность потребляется не только двигателем, но и инвертором, в то же время активные мощности двигателя и инвертора вычитаются),

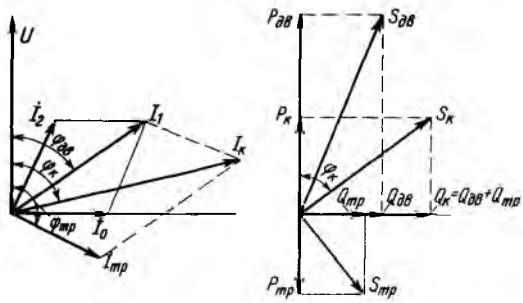

Рис 94 Упрощенные векторные диаграммы асинхронного вентильного каскада

2) за счет появления мощности искажения, обусловленной наличием высших гармонических в кривых тока двигателя и трансформатора

Рассмотрим векторные диаграммы асинхронного вентильного каскада, представленные на рис 94 Из диаграмм следует, что

$$Q_к = Q_{дв} + Q_{тр};$$

$$P_к = P_{дв} - P_{тр},$$

$$\cos\varphi_к = \nu\,\frac{P_{дв} - P_{тр}}{\sqrt{(P_{дв} - P_{тр})^2 + (Q_{дв} + Q_{тр})^2}}, \qquad (100)$$

где $Q_к$ — реактивная мощность вентильного каскада, $P_к$ — активная мощность, потребляемая приводом, $\cos\varphi_к$ — коэффициент мощности привода; ν — коэффициент, учитывающий искажение формы кривых первичных токов двигателя и трансформатора (обычно ν принимают равным 0,955).

Расчет коэффициента мощности вентильного каскада производится следующим образом Коэффициент мощности двигателя определяется по формуле

$$\cos\varphi_{дв} = \cos\varphi_0 \cos\frac{\gamma}{2}, \qquad (101)$$

где

$$\cos\varphi_0 = \frac{0{,}815 I_d}{\sqrt{(0{,}815 I_d)^2 + I_0^2 k_т^2}}.$$

В соответствии с формулой (78)

$$\cos\frac{\gamma}{2}=\sqrt{1-\frac{\sqrt{2}\,x_{\text{р}}I_d}{2E_{\text{р}}}}. \qquad (102)$$

Тогда

$$\cos\varphi_{\text{дв}}=\frac{0{,}815I_d}{\sqrt{2}E_{\text{р}}}\sqrt{\frac{2E_{\text{р}}^2-\sqrt{2}\,x_{\text{р}}E_{\text{р}}I_d}{(0{,}815I_d)^2+I_0^2k_{\text{т}}^2}} \qquad (103)$$

Реактивная мощность двигателя равна

$$Q_{\text{дв}}=P_{\text{дв}}\operatorname{tg}\varphi_{\text{дв}}, \qquad (104)$$

где $P_{\text{дв}}$ — активная мощность, потребляемая со стороны статора двигателя Приближенно

$$P_{\text{дв}}=\frac{Mn_0}{975}. \qquad (105)$$

Мощность, затрачиваемая приводом $P_{\text{к}}$, равна

$$P_{\text{к}}=P_{\text{дв}}-P_{\text{тр}}=\frac{P_{\text{мех}}}{\eta_{\text{к}}}=\frac{Mn}{975\eta_{\text{к}}} \qquad (106)$$

Отсюда активная мощность, передаваемая через трансформатор (инвертор):

$$P_{\text{тр}}=P_{\text{дв}}-\frac{Mn}{975\eta_{\text{к}}}=\frac{M}{975}\left(n_0-\frac{n}{\eta_{\text{к}}}\right). \qquad (107)$$

Коэффициент мощности инвертора

$$\cos\varphi_{\text{тр}}=\nu\cos\beta \qquad (108)$$

Реактивная мощность, циркулирующая в цепи первичной обмотки трансформатора (или в цепи инвертора для бестрансформаторных схем), может быть определена из следующих выражений

$$Q_{\text{тр}}=\sqrt{S_{\text{тр}}^2-P_{\text{тр}}^2};\quad S_{\text{тр}}=m_{\text{т}}E_{2\text{т}}I_dk_{1\text{т}},$$

где $k_{1\text{т}}$ определяется в зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора

Для трехфазной нулевой схемы $k_{1\text{т}}=0{,}47$, для трехфазной мостовой $k_{1\text{т}}=0{,}815$, для схемы с уравнительным реактором $k_{1\text{т}}=0{,}41$ Примерная зависимость коэффициента мощности вентильного каскада от скорости показана на рис 95

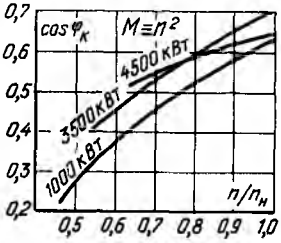

Рис 95 Зависимость коэффициента мощности каскада от скорости

Низкий коэффициент мощности вентильного каскада является основным недостатком этой системы привода Некоторые возможные способы улучшения коэффициента мощности рассмотрены ниже В большинстве же случаев для установок большой мощности при-

ходится применять статические конденсаторы для компенсации реактивной мощности каскада. Мощность потребной конденсаторной батареи определится из выражения

$$Q_{комп} = Q_к - Q'_к,$$

где $Q'_к$ — реактивная мощность, соответствующая требуемому (нормативному) коэффициенту мощности $\cos\varphi_{норм}$,

$$Q'_к = P_к \operatorname{tg} \varphi_{норм}$$

Способы улучшения коэффициента мощности асинхронного вентильного каскада

Рассмотрим несколько способов улучшения коэффициента мощности вентильного каскада. Все эти способы предполагают улучшение коэффициента мощности инвертора.

Первый способ заключается в применении инвертора, выполненного по трехфазной мостовой схеме выпрямления с несимметричным управлением вентилями анодной и катодной групп моста

Сущность этого способа заключается в том, что регулирование угла управления β производится только в одной группе вентилей (рис. 96), в то время как угол управления вентилями другой группы установлен постоянным и минимальным

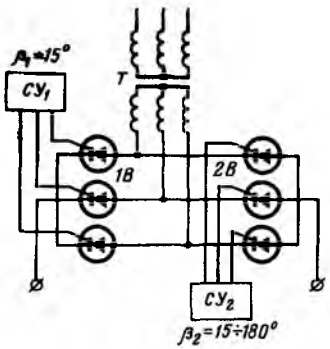

Рис. 96. Схема мостового инвертора с несимметричным регулированием угла открывания вентилей.

При обычном управлении максимальной скорости двигателя соответствует угол $\beta = 90°$, т е вектор тока инвертора перпендикулярен вектору напряжения сети, и коэффициент мощности инвертора имеет минимальное значение (хотя коэффициент мощности каскада максимален). При наименьшей скорости двигателя для данного диапазона регулирования (примем ее за нуль) угол управления вентилями минимален $\beta = 15°$, реактивная мощность минимальна, но вследствие того, что почти вся активная мощность привода возвращается в сеть $\cos\varphi_к$ близок к нулю.

В случае несимметричного управления одна группа вентилей работает все время с углом открывания $\beta_1 = 15°$. Вторая группа вентилей работает либо в инверторном, либо в выпрямительном режиме в нижней половине диапазона регулирования — в инверторном с углом $\beta_2 = 115 \div 90°$, в верхней половине диапазона регулирования — в выпрямительном режиме с углом $\beta_2 = 90 \div 180°$ ($\alpha_2 = 90 \div 0°$). При минимальной скорости $\beta_1 = \beta_2 = 115°$ и коэффициент мощности инвертора будет близок к 1 При максимальной скорости $\beta_1 = 115°$, $\alpha_2 = 0$, т. е. коэффициент мощности инвертора также будет наивысшим

Как видно из сравнения графиков рис. 97, применение раздельного управления вентилями мостовой схемы инвертора дает суще-

ственное улучшение коэффициента мощности при работе в верхней части диапазона регулирования скорости. Вместе с тем такое управление несколько усложняет схему.

Этот же принцип может быть применен и в том случае, если используются два инвертора половинной мощности, соединенные последовательно (рис. 98).

Реактивная мощность обычного инвертора равна

$$Q = \sqrt{3}\, I_1 U_1 \sin\beta,$$

где I_1 — первичный ток трансформатора инвертора

При сдвоенном инверторе выражение это должно быть заменено на

$$Q_{сдв} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_1 U_1 (\sin\beta_1 + \sin\beta_2).$$

Поскольку β_1 всегда равен 15° и $\sin\beta_1 \approx 0{,}25$, то максимальная реактивная мощность сдвоенного инвертора в 2 раза меньше, чем реактивная мощность обычного. Выигрыш в реактивной мощности может быть оценен по графикам рис. 99, рассчитанным для каскадного привода трубокомпрессора мощностью 4 500 *квт*. Дополнительным достоинством сдвоенного инвертора является уменьшение в 2 раза обратного напряжения на вентилях.

К недостаткам схем со сдвоенным инвертором следует отнести увеличение в 2 раза количества вентилей инвертора и аппаратуры управления, а также связанное с этим некоторое увеличение потерь в вентилях. Применение одного трансформатора для питания обоих инверторов возможно, но при этом увеличивается искажение формы кривой первичного тока.

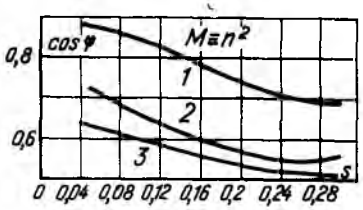

Рис. 97. Коэффициент мощности вентильного каскада при различных схемах соединения инвертора.

1 — компенсационный инвертор; *2* — при раздельном управлении вентилями мостового инвертора и для сдвоенного инвертора, *3* — обычный инвертор

Наиболее радикальным способом улучшения коэффициента мощности является использование компенсационных инверторов, разработанных в Киевском политехническом институте [Л. 40]. В компенсационных преобразователях в контуры коммутации включается уравнительная катушка и коммутирующие конденсаторы (рис. 100). Целесообразность применения компенсационного инвертора вытекает из того, что в этом случае эффективность использования статических конденсаторов повышается в 5—5,5 раз по сравнению с непосредственным включением их в сеть на стороне первичного напряжения параллельно инвертору. Следует, однако, иметь в виду, что применение компенсационных инверторов возможно только для приводов со спокойным характером нагрузки, т. е. там, где нагрузочный момент привода изменяется плавно и не в широких пределах.

Идея компенсационного инвертора состоит в том, что вентили работают не с опережающими, а с отстающими углами управления. В естественной схеме включения такая работа невозможна, так как переход тока с вентиля, заканчивающего свою работу, на новый

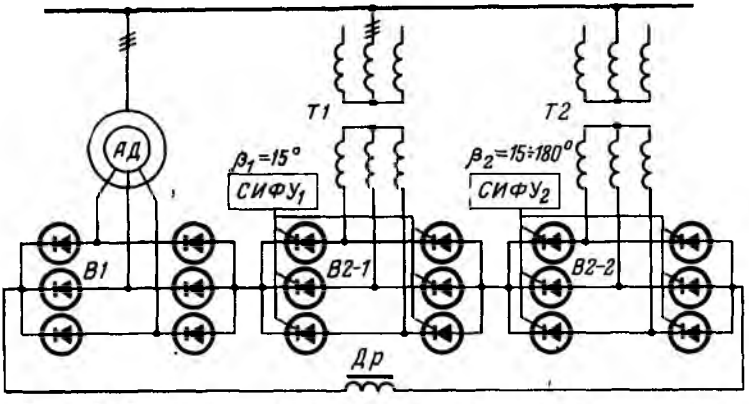

Рис. 98. Схема вентильного каскада со сдвоенным инвертором.

вентиль не может произойти вследствие того, что потенциал анода вступающего в работу вентиля после прохождения точки естественного зажигания становится ниже потенциала вентиля, заканчивающего работу. Поэтому если в обычной схеме инвертора подать управляющий импульс на вентиль по прошествии момента, соответствующего точке естественного зажигания, то этот вентиль не вступит в работу и ток будет пропускать предыдущий вентиль, что приведет к срыву инверторного режима. Для того чтобы этого не происходило, напряжения на вентиле выравниваются за счет напряжения коммутирующих конденсаторов. При этом в момент подачи отпирающего импульса должно иметь место неравенство $e_C < e_A + u_{ca}$, где u_{ca} — напряжение на конденсаторе C_{ca}. Это неравенство должно сохраняться не только на протяжении угла коммутации γ, но также и в течение времени, необходимого для восстановления запирающих свойств вентиля (угол δ).

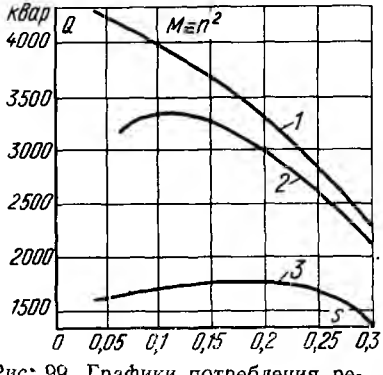

Рис. 99. Графики потребления реактивной мощности вентильным каскадом при различных схемах соединения инвертора (привод турбокомпрессора мощностью 4 500 *квт*).

1 — обычный инвертор, *2* — сдвоенный инвертор, *3* — компенсационный инвертор

При ориентировочных расчетах можно считать коммута-

цию мгновенной, $\gamma=0$. Тогда емкость, требуемая для обеспечения отстающей коммутации, определяется из равенства

$$\frac{I_d}{3\omega C}\left(\frac{2\pi}{9}-\delta\right)=\sqrt{6}\,U_{2т}\sin(\beta+\delta).$$

В процессе работы каскада ток I_d может меняться, однако указанное выше условие должно выполняться. Установленную емкость конденсаторов определяют, подставляя в приведенное выше равенство минимально возможное значение тока I_d. При данной емкости конденсаторов каждому значению угла β соответствует свой минимально допустимый ток I_d. В то же время при больших значениях тока I_d напряжение на конденсаторах будет существенно возрастать, что может вызвать пробой вентилей.

Из этих условий следует, что ток инвертора, следовательно, и момент на валу асинхронного двигателя должны находиться в строго определенных пределах. Если ток инвертора упадет ниже допустимого значения, то снизившееся напряжение на конденсаторах не сможет произвести коммутацию — произойдет срыв инвертирования. Если ток инвертора возрастет выше допустимого, появится перенапряжение на конденсаторах, вентилях и других элементах схемы.

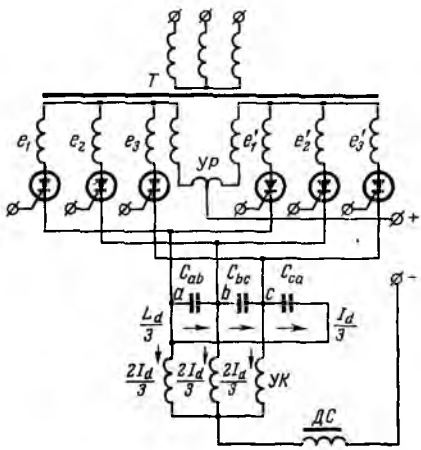

Рис. 100. Схема компенсационного инвертора.

Поскольку величина емкости конденсаторов выбирается по минимальному и максимальному значениям тока I_d, соответствующим статической нагрузке привода, то возникает опасность, что в переходных процессах ток упадет ниже минимального значения или станет выше максимально допустимого, что приведет к нарушению нормальной работы привода. Поэтому применение компенсационных инверторов возможно только в приводах, где динамическая составляющая момента невелика. Это приводы турбокомпрессоров, вентиляторов и центробежных насосов.

Работа инвертора с отстающим углом открывания означает, что реактивная мощность не потребляется инвертором, а генерируется им (имеет емкостный характер). В этом случае

$$Q_к=Q_{дв}-\sqrt{3}\,I_1U_1\sin\beta,$$

т. е. по мере увеличения скорости каскада реактивная мощность в приводе существенно уменьшается (рис. 99), а коэффициент мощности привода соответственно повышается (рис. 97).

Поскольку многие приводы значительную часть времени работают с максимальной скоростью, то для улучшения энергетических показателей в этом случае возможна синхронизация асинхронных двигателей Этот способ не получил распространения в схемах обычного асинхронного привода, в частности, из за того, что он связан с усложнением схемы привода, т е необходимостью иметь источник постоянного тока большой мощности, коммутационную аппаратуру и т д В схеме вентильного каскада возможность синхронизации вытекает из самого построения схемы, поскольку в цепи ротора уже имеется источник постоянного тока Схема синхронизации показана на рис 101 При включении контактора *КС* (после достижения максимальной скорости в асинхронном режиме) в две фазы ротора подается постоянный ток

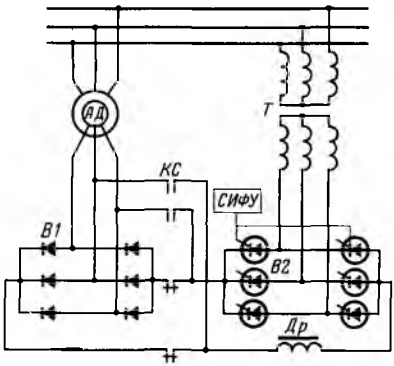

Рис 101 Синхронизация асинхронного двигателя в схеме вентильного каскада

Следует иметь в виду, что синхронизация асинхронного двигателя имеет ряд недостатков примерно на 20% снижается номинальный момент привода, уменьшается его перегрузочная способность, синхронный режим недостаточно устойчив Поэтому к применению этого способа следует относиться с осторожностью

е) Достоинства и недостатки вентильных каскадов

Как система регулируемого электропривода вентильный каскад характеризуется рядом положительных качеств:

1) является приводом переменного тока, т. е. включается непосредственно в промышленную сеть без промежуточных преобразователей (преобразователи в роторной цепи служат лишь для регулирования скорости вращения);

2) основу привода составляет асинхронный двигатель, более простой, надежный и требующий меньше ухода в эксплуатации, чем машина постоянного тока;

3) благодаря применению асинхронных двигателей возможно создание высокоскоростных регулируемых электроприводов большой мощности;

4) при малом диапазоне регулирования является наиболее экономичной системой регулируемого привода, поскольку к. п. д. асинхронного двигателя несколько выше к. п. д машины постоянного тока, а преобразова-

нию подвергается лишь часть энергии, пропорциональная скольжению двигателя,

5) обеспечивает плавное регулирование скорости и момента, не требует большого количества силовой контактной аппаратуры;

6) имеет малую мощность управления, легко поддается автоматизации, обладает хорошими динамическими свойствами.

Недостатки асинхронных вентильных каскадов:

1) высокая стоимость преобразователей, ведущая к удорожанию асинхронного привода;

2) низкий коэффициент мощности;

3) наличие дополнительных потерь в преобразователях, снижение к. п. д. асинхронного привода при работе с максимальной скоростью (если не закорачивать ротор двигателя);

4) снижение перегрузочной способности асинхронного двигателя;

5) ухудшение примерно на 5—7% использования приводного асинхронного двигателя;

6) необходимость специальных средств для обеспечения пусковых характеристик привода (при неглубоком регулировании).

Надежность асинхронного вентильного каскада определяется надежностью его элементов: асинхронного двигателя и вентильного преобразователя Асинхронный двигатель с фазным ротором, уступая двигателю с короткозамкнутым ротором, все же в отношении надежности и простоты эксплуатации обладает перед двигателем постоянного тока рядом преимуществ, обусловленных простотой конструкции и отсутствием коллекторного механизма. Надежность вентильных преобразователей определяется типом применяемых вентилей и принятыми запасами по току и напряжению (разгруженный режим). Развитие преобразовательной техники идет ускоренными темпами, в результате чего управляемые ртутные выпрямители получили самое широкое распространение в электроприводе (особенно в металлургическом). Еще большие перспективы применения вентильных приводов открыло создание полупроводниковых управляемых и неуправляемых вентилей, значительно более простых в обслуживании и при надлежащем выборе более надежных. Если до недавнего времени считалось, что применение ртутных и полупроводниковых вентилей суще-

Таблица 8

Перечень каскадных электроприводов турбомеханизмов

Приводимый механизм	Мощность двигателя, *квт*	Диапазон регулирования скорости, *об/мин*	Напряжение ротора двигателя, *в*	Ток ротора двигателя, *а*	Объем поставки	Страна поставки	Год ввода в эксплуатацию
Насос	500	790—980	770	360	1	ФРГ	XI.1964
Насос	19	0—1 450	270	44	1	ФРГ	IX 1965
Вентилятор	125	750—1 480	430	180	2	ФРГ	V.1966
Вентилятор	60	750—1 470	255	145	1	ФРГ	V.1966
Насос	360	1 175—1 470	750	300	1	ФРГ	XII.1967
Насос	1 030	730—1 460	940	670	1	Швеция	IX.1968
Насос	515	730—1 460	930	345	1	Швеция	IX.1968
Насос	1 100	840—1 460	1 030	660	1	Швеция	IX.1968
Насос	8 200	750—1 490	2 500	1 980	3	ФРГ	II.1969
Вентилятор	540	350—980	970	340	1	Югославия	—
Вентилятор	650	400—1 150	1 160	340	1	Венесуэла	—
Насос	8 200	750—1 490	2 500	1 980	3	ФРГ	—
Вентилятор	1 700	1 000—1 470	1 020	1 010	1	ФРГ	II 1969
Насос	800	500—970	1 320	380	1	ФРГ	—
Насос	750	2 400—2 920	950	520	2	ФРГ	—
Насос	1 250	900—1 450	1 090	690	1	ФРГ	—
Насос	840	1 000—1 480	1 150	540	1	ФРГ	IV.1969
Насос	370	1 200—1 465	660	375	1	ФРГ	—
Насос	320	375—735	660	300	2	ФРГ	—
Насос	3 300	425—595	2 250	1 050	1	ФРГ	—
Насос	720	1 200—1 450	1 150	380	1	ФРГ	—
Вентилятор	90	725—1 450	630	88	1	Греция	—
Вентилятор	3 000	300—1 480	1 000	1 800	1	Испания	—
Вентилятор	560	330—960	850	370	1	Югославия	—
Насос	280	1 150—1 475	430	400	2	ФРГ	—
Насос	500	1 100—1 450	930	335	1	ФРГ	—
Насос	6 600	750—1 490	2 080	1 960	1	ФРГ	—

ственно снижает надежность электроустановок, то сейчас эти опасения лишены оснований.

Положительным свойством вентильного каскада, выгодно отличающим эту систему привода, является то обстоятельство, что объем и стоимость оборудования каскада находятся в прямой зависимости от требуемого диапазона регулирования, поэтому применение каскадов целесообразно для привода механизмов, требуемый диапазон регулирования которых не превышает 2 : 1. К таким механизмам относится большинство вентиляторов, насосов и компрессоров. Исходя из этого, вентильные каскады наряду с вентильно-машинными каскадами и машинами двойного питания следует рассматривать как наиболее перспективную систему регулируемого электропривода для турбомеханизмов средней и большой мощности.

Сказанное подтверждается как отечественной, так и зарубежной практикой. Представляет интерес перечень регулируемых электроприводов турбомеханизмов по схеме асинхронного вентильного каскада, поставленных фирмой Сименс за период 1964—1969 гг. (табл. 8). Все каскады выполнены на базе тиристорных преобразователей.

ж) Пример выбора оборудования вентильного каскада и расчета характеристик привода

Пример 9. Выбрать оборудование для регулируемого электропривода по схеме вентильного каскада для шахтного вентилятора ВЦД-32 мощностью 1 000 *квт*; номинальная скорость вращения — 580 *об/мин*; диапазон регулирования — 2 : 1. Рассчитать механические характеристики и энергетические показатели.

1) Выбор основного оборудования

Принимаем приводной асинхронный двигатель типа АКН15-44-10. Номинальные данные двигателя. $P=1\,000$ *квт*; $U_1=6\,000$ *в*; $I_1=118$ *а*; $I_0=45$ *а*, $E_р=1\,080$ *в*; $I_2=580$ *а*, $n_н=585$ *об/мин*; $s_н=0{,}025$; $k_м=2{,}1$; $M_н=1\,640$ *кгс · м*; $\eta_н=93{,}8$; $\cos\varphi_н=0{,}82$; $r'_1=0{,}024$ *ом*; $r_2=0{,}0256$ *ом*; $x_р=0{,}27$ *ом*; $k_т=5{,}55$.

Максимальное выпрямленное напряжение ротора в заданном диапазоне регулирования

$$E_{dр\,макс}=k_1E_рs_{макс}=1{,}35\cdot 1\,080\cdot 0{,}5=730\ в.$$

Номинальный выпрямленный ток ротора двигателя

$$I_{dн}=\frac{I_{2н}}{0{,}78}=\frac{580}{0{,}78}=745\ а.$$

Схему электропривода принимаем аналогично рис. 81 и 86.

а) Выбор вентилей роторной группы

Принимаем вентили типа ВК2-200-700, номинальный ток которых 200 *а*, обратное напряжение 700 *в*.

Число последовательно соединенных вентилей

$$n_{\text{посл}} = \frac{1{,}045 E_{d\,\text{р.макс}}}{k_{\text{посл}} U_{\text{в.обр}}} = \frac{1{,}045 \cdot 730}{0{,}8 \cdot 700} = 1{,}35.$$

Принимаем по два вентиля последовательно в плече.

Число параллельно соединенных вентилей по (95)

$$n_{\text{пар}} = \frac{745}{3 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 200} = 2{,}0.$$

б) Выбор трансформатора инвертора (при мостовой схеме соединения вентилей)

$$E_{2\text{т}} = \frac{730}{2{,}34 \cdot 0{,}965} = 325 \text{ в};$$

$$I_{2\text{т}} = k_{2i} I_{d\text{н}} = 0{,}815 \cdot 745 = 610 \text{ а}.$$

Мощность трансформатора

$$S_{\text{т}} = 3 E_{2\text{т}} I_{2\text{т}} = 3 \cdot 325 \cdot 610 = 600 \text{ ква}.$$

Принимаем трансформатор ТМ750/6 со схемой соединения звезда — звезда; $U_{1\text{т}} = 6\,000$ *в*; $E_{2\text{т}} = 380$ *в*; $U_{2\text{т}} = 660$ *в*; $r_{\text{т}} = 0{,}027$ *ом*; $x_{\text{т}} = 0{,}087$ *а*; $\Delta P_{\text{х.х}} = 5{,}3$ *квт*.

в) Выбор вентилей инвертора

Принимаем вентили ВКДУ-150-10; 150 *а*; 1 000 *в*;

$$n_{\text{посл}} = \frac{1{,}045 k_2 E_{2\text{т}}}{k_{\text{посл}} u_{\text{в.обр}}} = \frac{2{,}34 \cdot 1{,}045 \cdot 220}{1{,}0 \cdot 1\,000} = 0{,}54,$$

т. е. не требуется последовательного соединения вентилей;

$$n_{\text{пар}} = \frac{745}{3 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 150} = 2{,}5;$$

принимаем три вентиля параллельно в плече.

г) Расчет механических характеристик

Механические характеристики рассчитываем по (91), где

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{2\pi \cdot 600}{60} = 62{,}8 \text{ рад/сек};$$

$$\rho = \frac{x_{\text{т}}}{x_{\text{р}}} + \frac{2\pi r_2}{3 x_{\text{р}}} + \frac{2\pi r_{\text{т}}}{3 x_{\text{р}}} = \frac{0{,}087}{4 \cdot 0{,}27} + \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}0256}{3 \cdot 0{,}27} +$$

$$+ \frac{3{,}14 \cdot 0{,}027}{6 \cdot 0{,}27} = 0{,}33;$$

$$\varepsilon = \frac{k_2 E_{2\text{т}}}{k_1 E_{\text{р}}} = \frac{2{,}34 \cdot 380}{1{,}35 \cdot 1\,080} = 0{,}51;$$

$$q = \frac{2\pi r'_1}{3 x_{\text{р}}} = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}024}{3 \cdot 0{,}27} = 0{,}151;$$

$$\frac{s - s_0}{s(1 + q) + \rho} = A_{\text{в}};$$

$$s_0 = \varepsilon \cos \beta.$$

Расчет сведен в табл. 9. Механические характеристики построены на рис. 102. На этом же графике нанесена заданная характеристика статического момента.

Таблица 9

β^0	s_0	s	A_s	A_s^2	$A_s - A_s^2$	$\frac{M}{M_н}$
$94^1/_3$	0,0	0,02	0,057	0,003	0,054	0,44
$94^1/_3$	0,0	0,04	0,106	0,011	0,095	0,77
$94^1/_3$	0,0	0,08	0,19	0,036	0,154	1,22
90	0,037	0,06	0,056	0,003	0,053	0,43
90	0,037	0,08	0,105	0,011	0,094	0,75
90	0,037	0,15	0,23	0,052	0,178	1,42
75	0,17	0,25	0,13	0,017	0,113	0,91
75	0,17	0,35	0,25	0,062	0,188	1,48
60	0,29	0,4	0,14	0,019	0,121	0,97
60	0,29	0,5	0,23	0,052	0,178	1,42
45	0,4	0,45	0,07	0,005	0,065	0,52
45	0,4	0,55	0,156	0,024	0,132	1,06
15	0,53	0,6	0,067	0,004	0,063	0,5
15	0,53	0,7	0,148	0,022	0,126	1,01

3) Расчет энергетических показателей

Определим зависимости к. п. д. и коэффициента мощности привода от скорости при заданной характеристике статического момента.

Расчет к. п. д. производим по формулам § 26д.

$$P_{пол} = \frac{M \cdot n}{975}.$$

Постоянные потери асинхронного двигателя равны:

$$K_{а.д.н} = P_н \frac{1-\eta_н}{\eta_н} - 9{,}81 M_н \omega_1 s_н \left(1 + \frac{r'_1}{r_2}\right) \cdot 0{,}001 =$$

$$= 1\,000 \cdot \frac{1-0{,}94}{0{,}94} - \frac{9{,}81 \cdot 1\,640 \cdot 62{,}8 \cdot 0{,}025 \left(1 + \frac{0{,}024}{0{,}0256}\right)}{1\,000} = 14 \text{ квт}.$$

Постоянные потери в вентильном каскаде

$$K_к = 1{,}05 K_{а.д.н} + \Delta P_{х.х.тр} = 1{,}05 \cdot 14 + 5{,}3 = 20 \text{ квт}.$$

Переменные потери определяются по (98), где I_d находится по формуле (99) в зависимости от момента нагрузки, а $R'_{экв}$ равно:

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + 2r_т =$$
$$= 2 \cdot 0{,}0256 + 2 \cdot 0{,}024 + 2 \cdot 0{,}027 = 0{,}113 \text{ ом}.$$

Расчет к. п. д. сведен в табл. 10.

Расчет коэффициента мощности производим по (100).

Разность $P_{дв} - P_{тр}$ равна $P_{пол} + \Delta P$, коэффициент ν принимаем равным 0,955.

Реактивная мощность двигателя равна $Q_{дв} = P_{дв} \operatorname{tg} \varphi_{дв}$; $\cos \varphi_{дв}$ находится по (103), $P_{дв}$ — по (105). Потери в статоре двигателя ориентировочно принимаем равными $K_{а.д.н} = 14$ квт.

Таблица 10

n, об/мин	$M/M_н$	$P_{пол}$, квт	$I_д$, а	$U_к$, квт	ΔP, квт	$P_{пол}+\Delta P$, квт	$\eta_к$
575	0,89	875	760	108	128	1 003	0,875
470	0,61	490	500	56	76	566	0,87
400	0,46	315	380	37	57	372	0,85
340	0,34	198	280	24,5	44,5	242,5	0,82
270	0,22	100	180	13,5	33,5	133,5	0,74

Реактивная мощность трансформатора определяется следующим выражением

$$Q_{тр} = \sqrt{(1{,}22 I_д E_{2т})^2 - P_{тр}^2}.$$

Расчеты коэффициента мощности сведены в табл. 11.

Таблица 11

n, об/мин	M, кгс·м	$I_д$, а	$P_{дв}-P_{тр}$, квт	$P_{дв}$, квт	$P_{тр}$, квт	$\cos\varphi_{дв}$	$Q_{дв}$, квар	$Q_{тр}$, квар	$\cos\varphi_к$	$\cos\varphi_{к\ комп}$
575	1 460	760	1 003	935	—68	0,865	540	580	0,64	0,95
470	1 000	500	566	646	80	0,815	460	375	0,53	1,0
400	755	380	372	494	122	0,745	445	265	0,41	0,96
340	558	280	242,5	370	127	0,68	395	225	0,35	0,81
270	361	180	133,5	247	114	0,51	410	80	0,25	0,4

Поскольку коэффициент мощности привода очень низок, необходимо применение компенсирующих устройств.

Определим мощность необходимой конденсаторной батареи

$Q'_к = (P_{дв} - P_{тр})\ \mathrm{tg}\ \arccos\ 0{,}95 = 1\,003 \cdot 0{,}32 = 320$ *квар*;

$Q_{т\ комп} = Q_к - Q'_к = Q_{дв} + Q_{тр} - Q'_к = 540 + 580 - 320 = 800$ *квар*.

Определим коэффициент мощности с учетом компенсирующего устройства

$$\cos\varphi_{к\ комп} = \frac{P_{дв} - P_{тр}}{\sqrt{(P_{дв} - P_{тр})^2 + (Q_{дв} + Q_{тр} - Q_{комп})^2}}.$$

Энергетические показатели привода приведены на рис. 103.

Полученные при решении примера 9 характеристики интересно сравнить с экспериментальными характеристиками регулируемого привода вентилятора ВЦД-32 по схеме вентильного каскада, показанными на рис. 104.

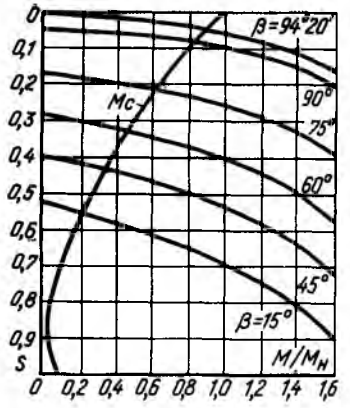

Рис. 102. К примеру 9. Механические характеристики привода вентилятора.

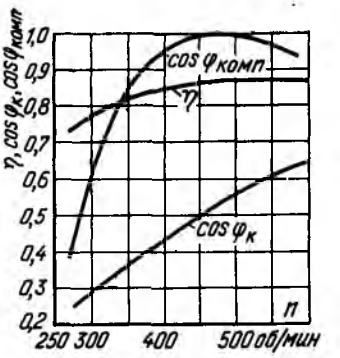

Рис. 103. К примеру 9. Энергетические показатели привода.

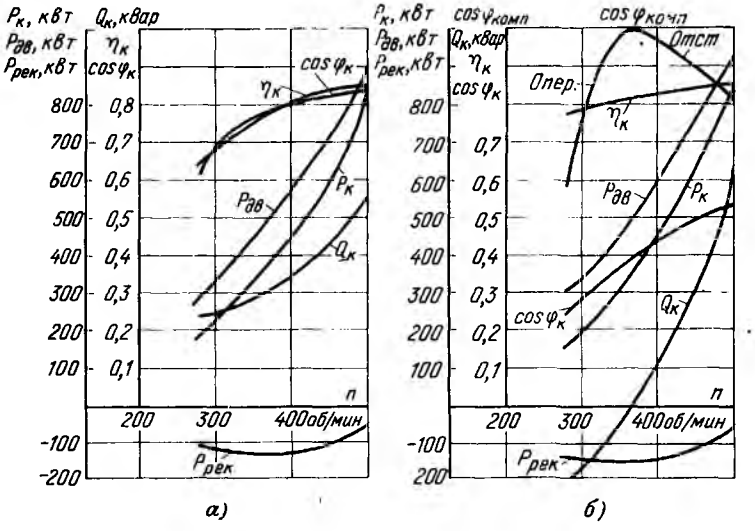

Рис 104. Экспериментальные характеристики регулируемого электропривода вентилятора ВЦД-32.

а — вентильно-машинный каскад; *б* — вентильный каскад, значения $Q_к$ и $\cos\varphi_{комп}$ указаны с учетом компенсирующей мощности батарей статических конденсаторов 830 *квар*

27. АСИНХРОННЫЕ ВЕНТИЛЬНО-МАШИННЫЕ КАСКАДЫ

В основе работы вентильно-машинных каскадов лежат те же принципы, что и в схемах вентильного каскада. Добавочная противо-э. д. с. в цепи выпрямленного тока ротора создается здесь машиной постоянного тока, которая может находиться на одном валу с отдельной машиной переменного тока либо с основным асинхронным двигателем. В первом случае получаем схему вентильно-машинного электрического каскада, во втором — электромеханического каскада.

а) Асинхронный вентильно-машинный электрический каскад

Принцип работы асинхронного вентильно-машинного электрического каскада (рис. 105), в котором противо-э. д. с. в цепи ротора создается машиной постоянного

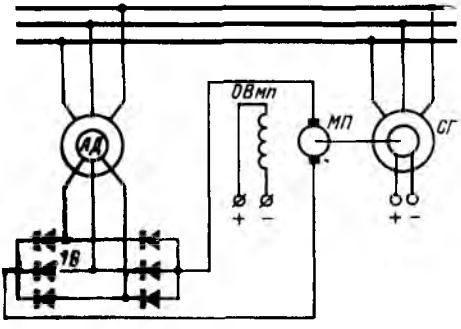

Рис. 105. Принципиальная схема асинхронного вентильно-машинного электрического каскада.

тока, по существу не отличается от изложенных в § 26 принципов работы асинхронного вентильного каскада. Роль инвертора здесь выполняет мотор-генераторный агрегат, причем машина постоянного тока работает в двигательном режиме, приводя во вращение синхронный или асинхронный генератор, возвращающий энергию скольжения в сеть.

Выбор машины постоянного тока производится по выпрямленному току и напряжению ротора

$$I_{d\text{н}} = \frac{I_{2\text{н}}}{0{,}78}; \; E_{d\text{макс}} = k_1 E_{\text{р}} s_{\text{макс}},$$

т. е. мощность машины постоянного тока составляет часть мощности асинхронного двигателя, пропорциональную диапазону регулирования (максимальному скольжению).

Вспомогательная машина переменного тока может быть выбрана для привода турбомеханизмов на меньшую мощность, составляющую 15—18% мощности асинхронного двигателя. В качестве этой машины целесообразнее применять синхронный двигатель для использования его в качестве компенсатора реактивной мощности основного асинхронного двигателя.

Для вентильно-машинных электрических каскадов (рис. 105) действительны принципиально все соотношения, выведенные в § 26 для вентильного каскада. Отличие заключается в том, что в вентильно-машинном каскаде добавочная э. д. с. в цепи ротора создается машиной постоянного тока, в соответствии с чем в формулах $k_2E_{2т}$ должно быть заменено на $E_я$ и, следовательно, вместо ε следует пользоваться

$$\varepsilon_м = \frac{E_{я\,н}}{k_1 E_р}.$$

Формула для определения эквивалентного сопротивления роторной цепи ρ имеет в этом случае вид:

$$\rho_м = \frac{2\pi\left(r_2 + \frac{1}{2} r_я\right)}{3x_р},$$

где $r_я$ — суммарное сопротивление якорной цепи двигателя постоянного тока.

Управляющим воздействием в вентильно-машинном каскаде является изменение тока возбуждения машины постоянного тока, вызывающее изменение потока. Поэтому для вентильно-машинного каскада в формулах § 26 $\cos\beta$ следует заменить на $\Phi_* = \Phi/\Phi_н$. Величина Φ_* определяется по кривой намагничивания машины в зависимости от тока возбуждения.

Следует заметить, что представление э. д. с. машины постоянного тока как $E_я = E_{я\,н}\frac{\Phi}{\Phi_н}$ действительно для компенсированных машин. В некомпенсированных машинах имеет место размагничивающее действие реакции якоря. Реакция якоря играет в вентильно-машинных каскадах

роль положительной обратной связи по току, увеличивающей жесткость механических характеристик каскада.

Для турбомеханизмов целесообразной является схема вентильно-машинного каскада с двумя машинами постоянного тока, переключаемыми с последовательного на параллельное соединение (рис. 106).

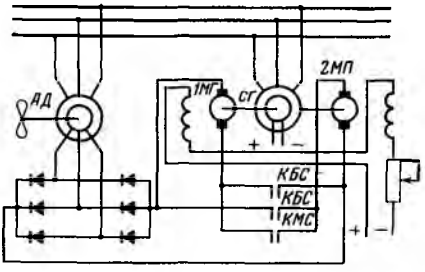

Рис. 106. Схема вентильно-машинного каскада с двумя машинами постоянного тока, переключаемыми с последовательного на параллельное соединение

В нижней части диапазона регулирования при больших скольжениях, когда требуется большая величина противо-э. д. с., а момент на валу двигателя мал вследствие вентиляторного характера нагрузки, якоря соединяются последовательно. В верхней части диапазона регулирования якоря должны быть соединены параллельно, что позволяет увеличить допустимый ток в цепи ротора, а следовательно, момент приводного двигателя (см. пример 10). Указанная схема используется для привода крупных шахтных вентиляторов. Определенную трудность представляет выравнивание тока между двумя параллельно соединенными двигателями постоянного тока.

Представляет интерес разработанная Московским энергетическим институтом схема двухдвигательного асинхронного привода для мощных турбомеханизмов (рис. 107) Регулирование в этой схеме осуществляется по схеме вентильно-машинного каскада Обмотки роторов приводных двигателей включены на два полупроводниковых выпрямителя, соединенных по трехфазной мостовой схеме. Два выпрямительных моста соединены последовательно, так что к якорям двигателей постоянного тока приложено суммарное выпрямленное напряжение двух выпрямителей Противо-э д с в цепи роторов асинхронных двигателей создается двумя машинами постоянного тока, причем якоря двигателей могут соединяться последовательно или параллельно. Пуск двигателей в этой схеме производится с ис-

пользованием методов схемы с поворотным статором (см. § 22). С этой целью на время пуска роторы двигателей соединяются последовательно через добавочное пусковое сопротивление, причем предварительная установка углового положения роторов такова, что между их электрическими осями постоянно имеется некоторый угол θ

Для турбомеханизмов целесообразной может явиться и автотрансформаторная схема вентильно-машинного каскада по аналогии со схемой рис 90.

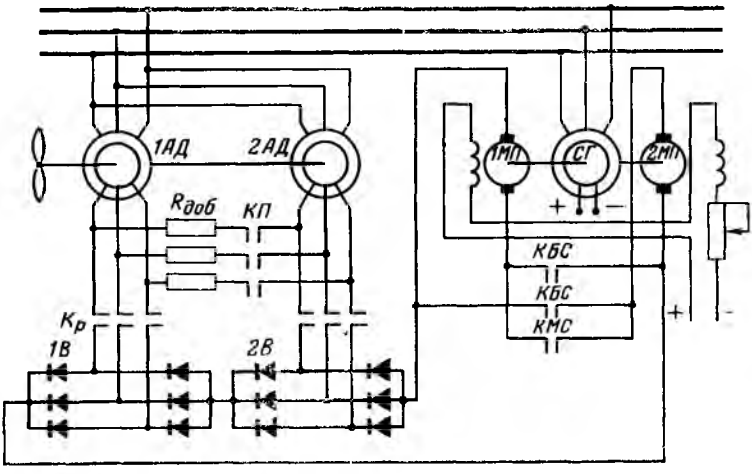

Рис. 107. Схема двухдвигательного асинхронного вентильно-машинного каскада

Коэффициент полезного действия вентильно-машинного электрического каскада определяется тем же методом, что и к. п. д. вентильного каскада. Постоянные потери в каскаде будут складываться из постоянных потерь в асинхронном двигателе $1{,}05K_{а\,д\,н}$, постоянных потерь в синхронной машине $K_{с\,г}$ и постоянных потерь в машине постоянного тока $K_{м\,п}$

$$K_{м\,в\,к}=1{,}05K_{а\,д\,н}+K_{м\,п}+K_{с\,г} \qquad (109)$$

Постоянными потерями в машине постоянного тока являются механические потери $K_{м\,п}=\Delta P_{мех\,м\,п}$, которые приближенно могут быть определены по номинальным данным машины постоянного тока:

$$\Delta P_{мех\,м\,п}=\frac{1}{2}\left(P_{н\,м\,п}\frac{1-\eta_{н\,м\,п}}{\eta_{н\,м\,п}}-I^2_{я.н.м.п}r_я\right).$$

Синхронная машина, работающая в схеме вентильно-машинного каскада, используется обычно по кажущейся мощности полностью с тем, чтобы компенсировать реактивную мощность асинхронного двигателя Поэтому синхронная машина работает постоянно

с номинальным током статора и все потери в ней можно считать постоянными и равными

$$K_{с.д} = P_{н.с.г} \frac{1 - \eta_{н.с.г}}{\eta_{н.с.г}}.$$

Подставляя найденные значения в (109), получим:

$$K_{м.в.к} = 1{,}05 K_{н.а.д} + \frac{1}{2} \left(P_{н.м.п} \frac{1 - \eta_{н.м.п}}{\eta_{н.м.п}} - I^2_{я.н.м.п} r_я \right) + P_{н.с.г} \frac{1 - \eta_{н.с.г}}{\eta_{н.с.г}},$$

где $P_{н.м.п}$, $I_{я.н.м.п}$, $\eta_{н.м.п}$ — соответственно номинальные мощность, ток якоря и к. п. д. машины постоянного тока; $P_{н.с.г}$, $\eta_{н.с.г}$ — соответственно номинальные мощность и к. п. д. синхронной машины.

Переменные потери в вентильно-машинном электрическом каскаде состоят из потерь от тока натрузки I_d и потерь в стали якоря машины постоянного тока

$$V_{м.в.к} = I_d^2 R'_{экв} + \frac{\Phi_*}{2} \left(P_{н.м.п} \frac{1 - \eta_{н.м.п}}{\eta_{н.м.п}} - I^2_{я.н.м.п} r_я \right), \quad (110)$$

где

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + r_я.$$

Определение коэффициента мощности вентильно-машинного электрического каскада производится так же, как и для вентильного каскада (§ 26). Следует иметь в виду, что в этом каскаде для установок средней и большой мощности в качестве машины переменного тока преобразовательного агрегата обычно используется синхронная машина, которая при соответствующем возбуждении обеспечивает генерирование реактивной мощности, частично компенсирующей реактивную мощность асинхронного двигателя. В этом случае выражение (100) для коэффициента мощности должно быть представлено как

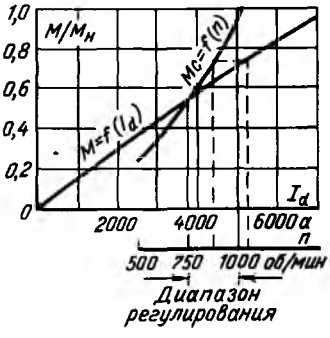

Рис. 108. К примеру 10. Зависимость момента от выпрямленного тока ротора и зависимость статического момента от скорости.

$$\cos\varphi_{м.в.к} = \frac{P_{дв} - P_{с.г}}{\sqrt{(P_{дв} - P_{с.г})^2 + (Q_{дв} - Q_{с.г})^2}}. \quad (111)$$

Выбранную по условиям регулирования синхронную машину целесообразно полностью использовать по кажущейся номинальной мощности, т. е. регулировать возбуждение таким образом, чтобы ток статора оставался номинальным. В этом случае

$$Q^2_{с.г} = S^2_{с.г.н} - P^2_{с.г},$$

где $S_{с.г.н}$ — номинальная мощность синхронной машины, *ква*.

Схема вентильно-машинного электрического каскада наряду со схемой вентильного каскада является одной из основных схем регулируемого электропривода турбомеханизмов. От вентильного каскада она отличается лучшим коэффициентом мощности, но имеет несколько худший к. п. д. Схема вентильно-машинного каскада (рис. 106) была применена для привода вентилятора ВЦД-32 на шахте Мушкетовская в Донбассе. Эксплуатационные характеристики этого привода и их сравнение со схемой вентильного каскада даны на рис. 104.

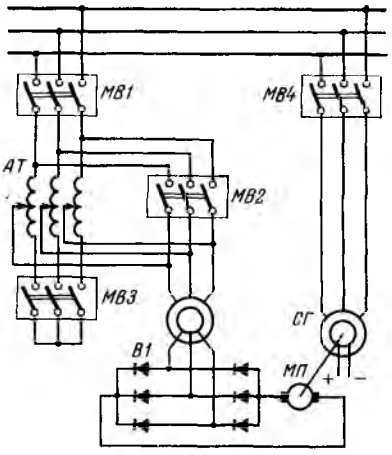

Рис. 109. Схема автотрансформаторного пуска вентильно-машинного каскада.

Пример 10. Требуется разработать регулируемый электропривод турбокомпрессора мощностью 17 000 *квт* по системе асинхронного вентильно-машинного каскада. Номинальная скорость вращения приводного электродвигателя 990 *об/мин*, требуемый диапазон регулирования 100—75%. Характеристика нагрузочного момента приведена на рис. 108. Принимаем схему привода, показанную на рис. 106, 109.

1) Выбор приводного двигателя

Указанным требованиям удовлетворяет асинхронный электродвигатель с фазным ротором типа АФЗ-20-82-6. Необходимые технические данные двигателя следующие (проектные данные):

$P_н = 18\,000$ *квт*; $M_н = 17\,500$ *кгс · м*; $U_1 = 6\,000$ *в*; $I_1 = 2\,070$ *а*; $I_0 = 632$ *а*; $E_р = 2\,110$ *в*; $I_{2н} = 5\,090$ *а*; $n_н = 997$ *об/мин*; $k_M = 2{,}28$; $\eta_н = 96{,}7\%$; $\cos\varphi_н = 0{,}865$; $x_р = 0{,}054$ *ом*; $r_2 = 0{,}0009$ *ом*.

2) Выбор основного оборудования вентильно-машинного каскада

Максимальный выпрямленный ток ротора определяется из условий работы привода в номинальном режиме при мощности 17 *мвт* и моменте 16 400 *кгс · м*. По (99)

$$I_d = \frac{1{,}41 \cdot 2\,110}{2 \cdot 0{,}054} - \sqrt{\frac{2\,110^2}{2 \cdot 0{,}054^2} - \frac{1{,}41 \cdot 104{,}5 \cdot 16\,400 \cdot 9{,}81}{1{,}35 \cdot 0{,}054}} = 6\,800 \text{ а}.$$

Принимаем вентили типа ВК2-200-10. Число параллельно включенных вентилей в плече определяем по формуле

$$n_{пар} = \frac{6\,800}{3 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 200} = 18.$$

Принимаем $n_{пар} = 20$.

Число последовательно включенных вентилей

$$n_{\text{посл}} = \frac{1{,}045 k_1 E_{\text{р н}} s_{\text{макс}}}{U_{\text{в}}} = \frac{1{,}045 \cdot 1{,}35 \cdot 2\,110 \cdot 0{,}25}{1\,000} = 1.$$

Это число уточним по условиям пуска.

Машины постоянного тока выбираются из условия их последовательного соединения при регулировании скорости от $0{,}75\,n_{\text{ном}}$ до $0{,}875\,n_{\text{ном}}$ и параллельного соединения при регулировании в диапазоне $0{,}875\,n_{\text{ном}}$ до $n_{\text{ном}}$ (что возможно вследствие вентиляторного характера нагрузки).

Максимальная противо-э. д. с. машин постоянного тока должна быть

$$E_{\text{я макс}} = k_1 E_{\text{р}} s_{0\text{макс}} = 1{,}35 \cdot 2\,110 \cdot 0{,}25 = 710 \text{ в}.$$

Для выбора машин постоянного тока в схеме каскада при их последовательно-параллельном включении и вентиляторном характере нагрузки определим зависимость между моментом привода и выпрямленным током ротора. Расчет производим по (83) и сводим в табл. 12.

Таблица 12

I_d, а	$I_d E_{\text{р}}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} I_d^2 x_{\text{р}}$	$I_d E_{\text{р}} - \frac{\sqrt{2}}{2} I_d^2 x_{\text{р}}$	M, кгс м	$M/M_{\text{н}}$
1 000	$2{,}11 \cdot 10^6$	$0{,}038 \cdot 10^6$	$2{,}07 \cdot 10^6$	$2{,}69 \cdot 10^3$	0,153
2 000	$4{,}22 \cdot 10^6$	$0{,}15 \cdot 10^6$	$4{,}07 \cdot 10^6$	$5{,}28 \cdot 10^3$	0,30
4 000	$8{,}44 \cdot 10^6$	$0{,}60 \cdot 10^6$	$7{,}84 \cdot 10^6$	$10{,}1 \cdot 10^3$	0,578
5 000	$10{,}55 \cdot 10^6$	$0{,}95 \cdot 10^6$	$9{,}6 \cdot 10^6$	$12{,}4 \cdot 10^3$	0,712
7 000	$14{,}77 \cdot 10^6$	$1{,}87 \cdot 10^6$	$12{,}9 \cdot 10^6$	$16{,}8 \cdot 10^3$	0,96

На графике зависимости $M = f(I_d)$ (см. рис. 108) наносим заданную кривую статического момента в функции скорости.

Находим момент, соответствующий середине диапазона регулирования (875 *об/мин*, $s = 0{,}125$), и по этому моменту определяем выпрямленный ток двигателя. Он равен (из графика рис. 108) 5 250 *а*. На такой ток должна быть выбрана каждая машина постоянного тока.

Указанным условиям удовлетворяют генераторы типа ГП-2000-750, имеющие следующие номинальные данные: $P = 2\,000$ *квт*; $E_{\text{я}} = 350$ *в*, $I_{\text{я}} = 5\,700$ *а*; $n = 750$ *об/мин*; $r_{\text{я}} = 0{,}0006$ *ом*; $r_{\text{д п}} = 0{,}00016$ *ом*; $r_{\text{к о}} = 0{,}0003$ *ом*; $\eta = 92{,}5\%$.

Синхронную машину преобразовательного агрегата выбираем исходя из того условия, что максимальная мощность скольжения асинхронного двигателя при вентиляторном характере нагрузки не превышает 15—18% номинальной мощности привода

$$P_{\text{с г}} = 0{,}18 \cdot 17\,000 = 3\,070 \text{ квт}.$$

Принимаем синхронный двигатель типа СДН-17-59-8 мощностью 5 000 *квт*, 5 730 *ква*, 6 *кв*, $\eta = 96{,}6\%$, $n_{\text{н}} = 750$ *об/мин*.

Из графика рис. 108 видно, что до скорости 875 *об/мин* можно работать при последовательном соединении якорей двигателей, выше этой скорости момент нагрузки возрастает настолько, что необходимо соединять якори параллельно.

3) Расчет механических характеристик

Расчет производим по (91), в которой при последовательном соединении якорей

$$\rho_M = \frac{2\pi r_2}{3x_р} + \frac{2\pi r_я}{3x_р} = \frac{2\pi \cdot 0,0009}{3 \cdot 0,054} +$$

$$+ \frac{2\pi\,(0,0006 + 0,00016 + 0,0003)}{3 \cdot 0,054} = 0,08;$$

$$\varepsilon_M = \frac{2E_{я\ н}}{k_1 E_р} = \frac{2\ 350}{1,35\ 2\ 110} = 0,245;$$

при параллельном соединении якорей

$$\rho_M = \frac{2\pi r_2}{3x_р} + \frac{\pi r_я}{6x_р} = \frac{2\pi \cdot 0,0009}{3\ 0,054} + \frac{\pi 0,00106}{6 \cdot 0,054} = 0,046;$$

$$\varepsilon_M = \frac{E_{я\ н}}{k_1 E_р} = \frac{350}{1,35 \cdot 2\ 110} = 0,122.$$

Расчет механических характеристик сводим в табл. 13.

Таблица 13

Φ_*	$E_н$, в	s_0	s	$s - s_0$	$s + \rho_M$	A_s	A_s^2	$A_s - A_s^2$	$M = 3,82k_M \times (A_s - A_s^2)$
0	0	0	0,005	0,005	0,051	0,098	0,01	0,088	0,77
0	0	0	0,01	0,01	0,056	0,178	0,032	0,146	1,28
0,285	100	0,035	0,04	0,005	0,086	0,058	0,003	0,055	0,48
0,285	100	0,035	0,05	0,015	0,096	0,156	0,025	0,131	1,14
0,57	200	0,07	0,08	0,01	0,126	0,079	0,006	0,073	0,64
0,57	200	0,07	0,09	0,02	0,136	0,147	0,022	0,125	1,09
0,855	300	0,105	0,12	0,015	0,166	0,09	0,008	0,082	0,71
0,855	300	0,105	0,13	0,025	0,176	0,142	0,02	0,122	1,06
0,57	400	0,14	0,16	0,02	0,24	0,084	0,007	0,077	0,67
0,57	400	0,14	0,18	0,04	0,26	0,153	0,023	0,13	1,13
0,715	500	0,175	0,20	0,025	0,28	0,089	0,008	0,081	0,70
0,715	500	0,175	0,22	0,045	0,30	0,15	0,023	0,127	1,10
0,86	600	0,21	0,24	0,03	0,32	0,094	0,009	0,085	0,74
0,86	600	0,21	0,26	0,05	0,34	0,147	0,022	0,125	1,09
1,0	700	0,246	0,28	0,034	0,36	0,095	0,009	0,086	0,75
1,0	700	0,246	0,30	0,054	0,38	1,42	0,02	0,12	1,04

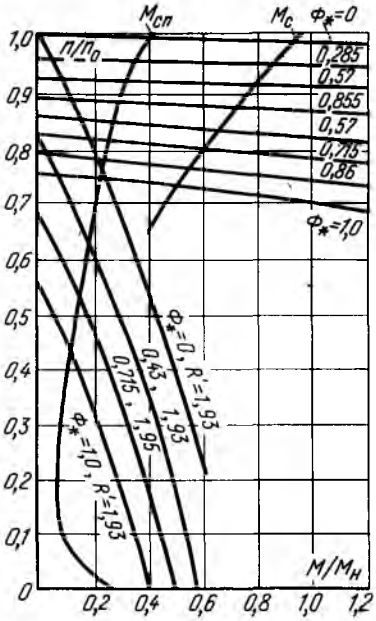

Рис. 110. К примеру 10. Механические характеристики вентильно-машинного каскада.

Скольжение холостого хода

$$s_0=\varepsilon_M\Phi_*.$$

Характеристики построены на рис. 110.

4) Расчет схемы пуска привода

Вследствие того что напряжение ротора весьма велико, целесообразно применить схему автотрансформаторного пуска (см. рис. 109). Поскольку токи ротора также велики, следует свести до минимума число контактных коммутационных аппаратов. Исходя из этих условий, принимаем схему автотрансформаторного пуска с дополнительным пусковым сопротивлением, включаемым в цепь выпрямленного тока (см. рис 88).

Принимаем пусковой автотрансформатор типа ПТМ-16000/6000 с отношением вторичного напряжения к первичному 0,55.

При этом напряжение ротора будет:

$$E'_р=0{,}55E_р=0{,}55\cdot 2\,110=$$
$$=1\,160\ в.$$

Пуск производится при максимальной противо-э. д. с. машин постоянного тока и их последовательном соединении, $E_я=700$ *в*.

Наибольшее скольжение холостого хода при пуске будет:

$$s_{0макс}=\frac{E_я}{k_1E'_р}=\frac{700}{1{,}35\cdot 1\,160}=0{,}445.$$

Величину пускового сопротивления определим из (89) при следующих параметрах (величиной q пренебрегаем):

$$M_{пуск}=0{,}4\,M_я;\ s=1{,}0;\ s_0=0{,}445;$$

$$0{,}4\cdot 17\,500=\frac{6\cdot 1\,160^2}{9{,}81\pi\cdot 104{,}5\cdot 0{,}054}\left[\frac{1-0{,}445}{1+\rho'}-\left(\frac{1-0{,}445}{1+\rho'}\right)^2\right],$$

откуда

$$\rho'=1{,}93;$$

$$\rho_{доб}=\rho'-\rho_M=1{,}93-0{,}08=1{,}85;$$

$$R_{доб}=\frac{3x_р\rho_{доб}}{\pi}=\frac{3\cdot 0{,}054\cdot 1{,}85}{3{,}14}=0{,}095\ ом.$$

Расчет пусковых механических характеристик производим аналогично вышеприведенному расчету, полагая $\rho'_м = 1{,}93$;

$$E'_р = 0{,}55 E_{р\,н};$$

$$M = 3{,}82 k_M \cdot 0{,}55^2 (A_s - A_s^2) = 2{,}63 (A_s - A_s^2).$$

Расчеты сведены в табл. 14.

Таблица 14

Φ_*	$E_н$, *в*	s_0	s	$s-s_0$	$s+\rho$	A_s	A_s^2	$A_s-A_s^2$	$M/M_н$
0	0	0	0,5	0,5	2,43	0,205	0,402	0,163	0,43
0	0	0	1,0	1,0	2,93	0,342	0,116	0,226	0,6
0,43	300	0,192	0,5	0,308	2,43	0,127	0,016	0,111	0,29
0,43	300	0,192	1,0	0,808	2,93	0,276	0,076	0,2	0,57
0,715	500	0,32	0,6	0,28	2,53	0,111	0,012	0,099	0,26
0,715	500	0,32	1,0	0,68	2,93	0,232	0,054	0,178	0,47
1,0	700	0,445	0,7	0,255	2,63	0,097	0,009	0,088	0,23
1,0	700	0,445	1,0	0,555	2,93	0,189	0,036	0,153	0,40

Пусковые характеристики построены на рис. 110. Из рассмотрения этих характеристик видно, что они обеспечивают разгон привода до диапазона рабочих скоростей, поскольку разгон привода производится при разгруженном турбокомпрессоре.

Обратное напряжение на вентилях роторной группы при пуске будет:

$$u_{обр} = 1{,}41 E'_р = 1{,}41 \cdot 1\,160 = 1\,630 \text{ в}.$$

Принимаем в каждом плече последовательно по два вентиля 10-го класса (обратное напряжение вентиля 1 000 *в*). Общее число вентилей роторного преобразователя — $20 \times 2 \times 6 = 240$ шт.

5) Расчет энергетических показателей

Коэффициент полезного действия привода определяем, используя формулы (109) и (110).

Постоянные потери асинхронного двигателя равны:

$$K_{н.а.д} = P_н \frac{1-\eta_н}{\eta_н} - 9{,}81 M_н \omega_1 s_н \left(1 + \frac{r'_1}{r_2}\right);$$

приближенно считаем $r'_1 = r_2$; тогда

$$K_{а.д} = 18\,000 \cdot \frac{1-0{,}967}{0{,}967} - \frac{9{,}81 \cdot 17\,500 \cdot 104{,}5 \cdot 0{,}003 \cdot 2}{1\,000} = 500 \text{ квт}.$$

Постоянные потери в приводе

$$K_{м.в.к} = 1{,}05 K_{а.д} + \left(P_{н.м.п} \frac{1-\eta_{н.м.п}}{\eta_{н.м.п}} - I^2_{я.н} r_н\right) + P_{н.с.г} - \frac{1-\eta_{м.с.г}}{\eta_{м.с.г}} = 1{,}05 \cdot 500 + \left(2\,000 \frac{1-0{,}925}{0{,}925} - \frac{5\,700^2 \cdot 0{,}00106}{1\,000}\right) + 5\,000 \frac{1-0{,}966}{0{,}966} = 828 \text{ квт}.$$

Переменные потери найдем по формуле

$$V_{м.в.к} = \frac{I_д R'_{экв}}{1\,000} + \Phi_* \left(P_{н.м.п} \frac{1 - \eta_{н.м.п}}{\eta_{н.м.п}} - \frac{I^2_{я.н.м.п} r_я}{1\,000} \right).$$

Для последовательного соединения

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + 2r_я =$$

$$= 2 \cdot 0{,}0009 + 2 \cdot 0{,}0009 + 2 \cdot 0{,}00106 = 0{,}00584 \text{ ом}.$$

Для параллельного соединения

$$R'_{экв} = 2r_2 + 2r'_1 + \frac{r_я}{2} = 2 \cdot 0{,}0009 + 2 \cdot 0{,}0009 +$$

$$+ \frac{0{,}00106}{2} = 0{,}00413 \text{ ом};$$

$$P_{пол} = \frac{M \cdot n}{975},$$

где M и n берутся как координаты точек пересечения кривой $M_{с.т} = f(n)$ с механическими характеристиками привода (рис. 110).

Расчет к. п. д. сводим в табл. 15.

Таблица 15

n, об/мин	$M/M_н$	$P_{пол}$, квт	$I_д$, а	Φ_*	$S_{м в к}$, квт	ΔP, квт	$P_{пол}+\Delta P$, квт	η
990	0,94	16 800	6 700	0	312	1 140	17 940	0,94
915	0,80	13 200	5 700	0,57	261	1 090	14 290	0,925
875	0,73	11 500	5 150	0,655	237	1 065	12 570	0,915
800	0,60	8 700	4 200	0,715	233	1 060	9 760	0,89
730	0,50	6 600	3 400	1,0	195	1 020	7 620	0,865

Коэффициент мощности привода определяется по (111), в которой значение $P_{дв} - P_{с.т} = P_{пол} + \Delta P$ берется из расчета к. п. д.

Реактивная мощность, генерируемая синхронным генератором, находится из выражения

$$Q_{с.г} = \sqrt{S^2_{н.с.г} - P^2_{с.г}},$$

где

$$P_{с.г} = P_{пол} \left(\frac{n_0}{n} - 1 \right) - P_{н.с.г} \frac{1 - \eta_{н.с.г}}{\eta_{н.с.г}}.$$

Коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_{дв}$ находится по (103), а реактивная мощность двигателя $Q_{дв}$ — по (104). Расчет коэффициента мощности сведен в табл. 16.

Энергетические характеристики привода построены на рис. 111.

Таблица 16

n, об/мин	$P_{пол}$, квт	$I_д$, а	$P_{пол}+\Delta P$, квт	$P_{с.г}$, квт	$P_{дв}$, квт
990	16 800	6 700	17 940	0,0	17 940
915	13 200	5 700	14 290	1 010	15 300
875	11 500	5 150	12 570	1 430	14 000
800	8 700	4 200	9 760	1 940	11 700
730	6 600	3 400	7 620	2 260	9 880

Продолжение табл. 16

$\cos\varphi_{дв}$	$\operatorname{tg}\varphi_{дв}$	$Q_{дв}$, квар	$Q_{с.г}$, квар	$\cos\varphi_{м.в.к}$
0,9	0,47	8 420	5 730	0,99
0,88	0,53	8 100	5 600	0,985
0,87	0,57	8 000	5 520	0,98
0,85	0,61	7 120	5 380	0,97
0,81	0,72	7 100	5 220	0,96

б) Асинхронный вентильно-машинный электромеханический каскад

Особенностью этой каскадной схемы является то, что электрическая энергия скольжения отдается через преобразователь не в питающую сеть, как в ранее рассмотренных каскадных схемах, а на вал рабочей машины. Электромеханический каскад (рис. 112) состоит из асинхронного двигателя с фазным ротором и машины постоянного тока *МП*, находящихся на одном валу. Якорная цепь машины постоянного тока питается выпрямленным напряжением ротора асинхронного двигателя через неуправляемый выпрямитель *1В*. При работе со скоростью ниже синхронной обе машины работают в двигательном режиме, поэтому момент привода следует рассматривать как сумму моментов, развиваемых асинхронным двигателем и машиной постоянного тока:

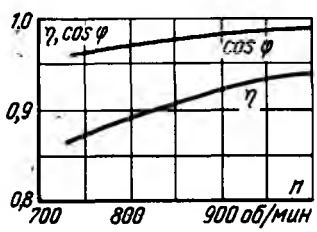

Рис. 111. К примеру 10. Энергетические показатели регулируемого электропривода.

$$M = M_{а.д} + M_{м.п}. \qquad (112)$$

Момент, развиваемый обоими двигателями, пропорционален выпрямленному току ротора I_d, регулирование которого осуществляется изменением величины противо-э. д. с. якоря машины постоянного тока. Если противо-э. д. с $E_я$ будет равна выпрямленному напряжению ротора ($E_{dp\,н}s$), то ток в цепи ротора и момент привода будут равны нулю, т. е. каждому значению $E_я$ соответ-

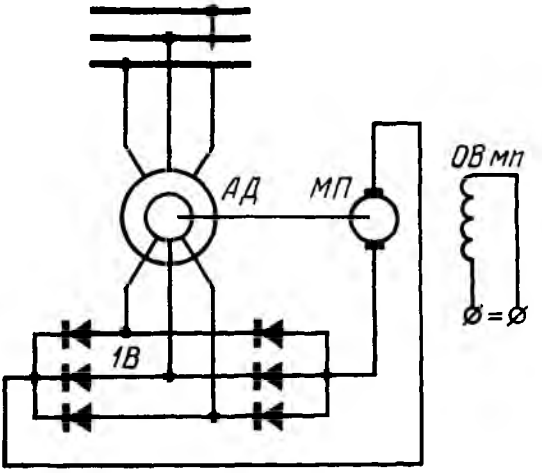

Рис 112 Принципиальная схема вентильно машинного электромеханического каскада

ствует скольжение холостого хода s_0 При приложении нагрузки скорость привода начнет падать, выпрямленное напряжение ротора возрастать, а противо-э. д. с. машины постоянного тока уменьшаться Ток в роторной цепи и момент каждой из двух машин будет увеличиваться, вследствие чего замедление двигателя будет происходить до тех пор, пока момент сопротивления и момент, развиваемый приводом, не сравняются Регулирование скорости производится изменением противо-э. д. с. якоря машины постоянного тока путем изменения тока в обмотке независимого возбуждения.

При уменьшении тока возбуждения скорость привода будет повышаться. Если полностью снять поток возбуждения, то добавочная э. д с. в цепи ротора станет равна нулю и скорость привода будет близка к номинальной. В этом случае момент создается только одним

асинхронным двигателем По мере возрастания потока возбуждения скорость привода будет снижаться, а момент, развиваемый двигателем постоянного тока, возрастать, т. е. машина постоянного тока будет как бы помогать основному асинхронному двигателю преодолевать момент сопротивления на валу привода

Посмотрим, как распределяется нагрузка между двумя машинами в схеме электромеханического каскада. Если пренебречь потерями, то вся мощность, забираемая асинхронным двигателем из сети, идет на совершение полезной работы:

$$P_{\text{потр}} = M_{\text{а д}} n_0 = M_{\text{а д}} n + M_{\text{м п}} n,$$

где n_0 — синхронная скорость асинхронного двигателя.

Учитывая (112) найдем, что

$$\frac{M_{\text{а д}}}{M} = \frac{n}{n_0}; \quad \frac{M_{\text{м п}}}{M} = 1 - \frac{n}{n_0}; \quad \frac{M_{\text{м п}}}{M_{\text{а д}}} = \frac{n_0 - n}{n}.$$

Из приведенных соотношений видно, что при скоростях, близких к синхронной, момент привода создается главным образом асинхронным двигателем, по мере снижения скорости все большую часть нагрузки воспринимает машина постоянного тока. При скорости, равной половине синхронной, нагрузка между машинами распределяется уже поровну, при дальнейшем снижении скорости основную часть момента создает машина постоянного тока.

По мере увеличения глубины регулирования (снижения скорости) существенно возрастает габаритная мощность машины постоянного тока, поэтому для электромеханических каскадов ограничиваются обычно диапазоном регулирования 2 · 1 Указанное ограничение определяется противоречием, присущим этой системе, которое заключается в том, что противо-э. д. с. якоря машины постоянного тока должна уравновешивать выпрямленное напряжение ротора, однако первая по мере снижения скорости падает, в то время как второе возрастает, поэтому для создания большой э. д с на низких скоростях машина постоянного тока должна иметь большой запас электромагнитной мощности

Энергетическая диаграмма электромеханического каскада показана на рис. 79 Энергия $P_{\text{потр}}$, забираемая асинхронным двигателем из сети, за исключением потерь в статоре $\Delta P_{\text{ст}}$, передается ротору двигателя в виде

электромагнитной энергии $P_{эм}$ Часть этой энергии $P_{эм}(1-s)$ идет на совершение механической работы, другая часть $P_{эм}s$ (энергия скольжения), за исключением потерь в роторе, передается двигателю постоянного тока и за вычетом потерь в этой машине также идет на совершение полезной работы. Поскольку энергия скольжения в этой системе привода расходуется полезно, то к. п. д. достаточно высок и со снижением скорости уменьшается незначительно.

Как следует из энергетической диаграммы, нагрузка между машинами будет распределяться следующим образом (пренебрегая потерями):

$$P_{м\,п}=P_{эм}s; \quad P_{а\,д}=P_{эм}(1-s). \qquad (113)$$

При скоростях, близких к синхронной, мощность скольжения становится весьма малой и вся нагрузка ложится на асинхронный двигатель. Поэтому последний должен выбираться на полную мощность привода. Габаритная мощность машины постоянного тока зависит от глубины регулирования и, как следует из (113), определяется соотношением

$$P_{м\,п}=P_{а\,д}\left(\frac{n_0}{n_{мин}}-1\right). \qquad (114)$$

Из (114) следует, что рациональный диапазон регулирования для электромеханического вентильно-машинного каскада не превышает 2 : 1. При такой глубине регулирования габаритные мощности асинхронного двигателя и машины постоянного тока равны. При желании получить больший диапазон регулирования необходимо либо значительно увеличить габариты машины постоянного тока, либо применять дополнительно специальные способы регулирования (снижение напряжения на статоре *АД*, введение активных или индуктивных сопротивлений и т п) Регулирование напряжения может осуществляться с помощью дросселей насыщения, автотрансформаторов либо тиристорных регуляторов. Возможно также переключение обмоток статора с треуголь ника на звезду

Машина постоянного тока выбирается, исходя из заданного диапазона регулирования, по напряжению и току якорной цепи.

Номинальное напряжение якоря машины постоянного тока выбирается таким образом, чтобы при мини

мальной рабочей скорости ее противо-э. д. с. была бы равна выпрямленному напряжению ротора при этой скорости

$$E_{я\ макс} = k_1 E_р \left(1 - \frac{n_{мин}}{n_0}\right).$$

Если номинальная скорость машины постоянного тока $n_{н\ м\ п}$ равна синхронной скорости асинхронного двигателя n_0, то

$$E_{я\ макс} = E_{я\ н} \frac{n_{мин}}{n_0}.$$

Отсюда номинальное напряжение машины постоянного тока должно быть:

$$E_{я\ н} = k_1 E_р \left(\frac{n_0}{n_{мин}} - 1\right).$$

Номинальная паспортная скорость машины *МП* может и не быть равной синхронной скорости асинхронного двигателя. В этом случае номинальное напряжение машины *МП* определяется из соотношения

$$E_{я\ н} = k_1 E_р \frac{n_{н\ м\ п}}{n_0} \left(\frac{n_0}{n_{мин}} - 1\right).$$

При выбранных параметрах машины постоянного тока диапазон регулирования определяется выражением

$$\frac{n_{мин}}{n_0} = \frac{k_1 E_р n_{н\ м\ п}}{k_1 E_р n_{н\ м\ п} + E_{я\ н} n_0}.$$

Номинальный ток якоря машины постоянного тока должен соответствовать выпрямленному току ротора асинхронного двигателя. Как уже указывалось.

$$I_я = \frac{I_{2н}}{0{,}78};$$

Номинальная мощность машины постоянного тока определяется соотношением

$$P_{н\ м\ п} = E_{я\ н} I_{я\ н} = \frac{k_1 E_р I_{2н}}{0{,}78} \left(\frac{n_0}{n_{мин}} - 1\right) = P_{а\ д} \left(\frac{n_0}{n_{мин}} - 1\right),$$

т. е опять приходим к соотношению (114),

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, определяется (83). Момент двигателя постоянного тока пропорционален току якоря и потоку

$$M_{\text{м п}} = C_{\text{м п}} I_d \Phi_*, \qquad (115)$$

где $\Phi_* = \Phi/\Phi_{\text{н}}$ — долевое значение потока возбуждения;

$$C_{\text{м п}} = \frac{M_{\text{н м п}}}{I_{\text{я н}}}, \ кгс \cdot м/а.$$

Подставляя (83) и (115) в (112), получим:

$$M = \frac{k_1}{9{,}81\omega_1}\left(I_d E_{\text{р}} - \frac{\sqrt{2}}{2} I_d^2 x_{\text{р}}\right) + C_{\text{м п}} I_d \Phi_*. \qquad (116)$$

Напряжение якоря $E_{\text{я}}$ зависит от скорости и потока

$$E_{\text{я}} = E_{\text{я н}} \frac{n_0}{n_{\text{н м п}}}(1 - s)\Phi_* = k_1 \varepsilon_M E_{\text{р}} \Phi_* (1 - s), \qquad (117)$$

где

$$\varepsilon_M = \frac{E_{\text{я н}} n_0}{k_1 E_{\text{р}} n_{\text{н м п}}}.$$

Уравнение равновесия э. д. с. в роторной цепи двигателя имеет вид:

$$E_{d\text{р}} s = E_{\text{я}} + I_d\left(2r_2 + 2r'_1 s + r_{\text{я}} + \frac{3x_{\text{р}} s}{\pi}\right).$$

Подставляя в это выражение (117) и учитывая $\rho_{\text{м}}$, найдем формулу для выпрямленного тока в машинно-вентильном электромеханическом каскаде:

$$I_d = \frac{\pi k_1 E_{\text{р}}}{3x_{\text{р}}} \cdot \frac{(1 + \varepsilon_M \Phi_*)(s - s_0)}{s(1 + q) + \rho_M}, \qquad (118)$$

где s_0 — скольжение холостого хода, соответствующее данному значению потока возбуждения Φ_*:

$$s_0 = \frac{E_{\text{я}}}{k_1 E_{\text{р}}} = \frac{\varepsilon_M \Phi_*}{1 + \varepsilon_M \Phi_*}.$$

Совместное решение (116) и (118) дает аналитическое выражение механических характеристик каскада:

$$M = \frac{6E_{\text{р}}^2}{9{,}81\pi\omega x_{\text{р}}}\left\{\frac{(1 + \varepsilon_M \Phi_*)(s - s_0)}{s(1 + q) + \rho_M} - \left[\frac{(1 + \varepsilon_M \Phi_*)(s - s_0)}{s(1 + q) + \rho_M}\right]^2\right\} + \frac{\pi k_1 C_{\text{м п}} E_{\text{р}} \Phi_*}{3x_{\text{р}} \cdot 9{,}81} \cdot \frac{(1 + \varepsilon_M \Phi_*)(s - s_0)}{s(1 + q) + \rho_M}.$$

Эта формула справедлива лишь для таких значений выпрямленного тока, при которых мостовая схема выпрямления не переходит во вторую рабочую область.

Граничный ток равен:

$$I_{d\ \text{пер}} = \frac{E_\text{р}}{2\sqrt{2}\,x_\text{р}}$$

и соответствует моменту каскада, равному

$$M_\text{пер} = \frac{9E_\text{р}^2}{8\pi\omega_1 x_\text{р}\cdot 9{,}81} + \frac{\sqrt{2}\,C_{\text{м п}}E_\text{р}\Phi_*}{9{,}81\cdot 4x_\text{р}}.$$

Механические характеристики каскада приведены на рис. 113. Эти характеристики показывают, что перегрузочная способность и жесткость характеристик возрастают при снижении скорости. В этом смысле электромеханический каскад называют каскадом постоянной мощности. Поскольку у турбомеханизмов мощность не только не остается постоянной в процессе регулирования, но и интенсивно снижается с уменьшением скорости, то это полезное свойство электромеханического каскада не может быть использовано в электроприводе таких механизмов. Зависимость момента каскада, соответствующего номинальному току ротора от скорости (потока машины постоянного тока Φ_*), определяется следующим соотношением:

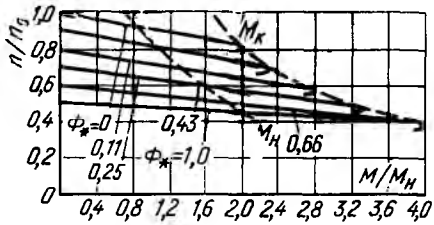

Рис 113. Механические характеристики вентильно-машинного электромеханического каскада.

$$M = \frac{3E_\text{р}^2}{2\pi\omega_1 x_\text{р} k_M\cdot 9{,}81} + \frac{C_{\text{м п}}E_\text{р}\left(1-\sqrt{1-\frac{1}{k_M}}\right)\Phi_*}{\sqrt{2}\,x_\text{р}\cdot 9{,}81},$$

где k_M — перегрузочная способность асинхронного двигателя.

При одновременном регулировании не только потока машины постоянного тока, но и напряжения, подводимого к статору асинхронного двигателя, уменьшается напряжение ротора $E_\text{р}$ при $s=1$.

При расчете каскада со сниженным напряжением следует в вышеприведенные формулы подставлять $E'_р$ вместо $E_р$:

$$E'_р = E_р k_U,$$

где $k_U = U'_1/U_{1н}$ — относительное напряжение на статоре двигателя; U'_1 — величина сниженного напряжения статора.

При снижении напряжения увеличивается относительное значение (ε'_M) противо-э. д. с. в цепи ротора

$$\varepsilon'_M = \frac{\varepsilon_M}{k_U}$$

и расширяется диапазон регулирования

$$\frac{n_{мин}}{n_0} = \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_M}{k_U}}.$$

Однако при снижении напряжения момент, развиваемый асинхронным двигателем, уменьшается пропорционально k^2_U, а момент машины постоянного тока — пропорционально k_U (при данном скольжении).

В случае вентиляторного характера нагрузки возможно снижение напряжения в значительных пределах без опасения перегрузки машин по току ротора.

Для определения к. п д. вентильно-машинного электромеханического каскада также применим метод разделения потерь.

Постоянные потери привода определяются только постоянными потерями асинхронного двигателя Переменные потери электромеханического каскада складываются из потерь, обусловленных током нагрузки, а также механических потерь и потерь в стали ротора машины постоянного тока.

Указанные составляющие потерь в машине постоянного тока могут быть с достаточной для инженерных расчетов точностью определены следующим образом:

$$\Delta P_{мех} = \frac{n}{2n_{н\,м\,п}} \left(P_{н\,м\,п} \frac{1 - \eta_{н\,м\,п}}{\eta_{н\,м\,п}} - I^2_{я\,н\,м\,п} r_я \right);$$

$$\Delta P_{ст} = \frac{n\Phi_*}{2n_{н\,м\,п}} \left(P_{н\,м\,п} \frac{1 - \eta_{н\,м\,п}}{\eta_{н\,м\,п}} - I^2_{я\,н\,м\,п} r_я \right).$$

Тогда переменные потери электромеханического каскада определяются как

$$V_{\text{м в э к}} = I_d^2 R'_{\text{экв}} + \left(P_{\text{н м п}} \frac{1-\eta_{\text{н м п}}}{\eta_{\text{н м п}}} - I^2_{\text{я н м п}} r_{\text{я}}\right)(1+\Phi_*)\frac{n}{2n_{\text{н м п}}},$$

где $R'_{\text{экв}}$ определяется по (110), а ток I_d, соответствующий данному моменту нагрузки, находится из выражения

$$I_d = \frac{E_{\text{р}}}{\sqrt{2}\,x_{\text{р}}} + \frac{C_{\text{м п}}\omega\Phi_*}{\sqrt{2}\,k_1 x_{\text{р}}} - \sqrt{\left(\frac{E_{\text{р}}}{\sqrt{2}\,x_{\text{р}}} + \frac{C_{\text{м п}}\omega\Phi_*}{\sqrt{2}\,k_1 x_{\text{р}}}\right)^2 - \frac{\sqrt{2}\,M\omega_1 \cdot 9{,}81}{k_1 x_{\text{р}}}}.$$

Коэффициент мощности каскада равен:

$$\cos\varphi_{\text{м в э к}} = \cos\varphi_{\text{дв}}$$

и находится из (103) в зависимости от тока I_d.

Вентильно-машинные электромеханические каскады могут быть применены в случае небольшого диапазона регулирования (не глубже 100—70%) и могут использоваться для турбомеханизмов малой, средней и большой мощности.

в) Асинхронный вентильно-машинный комбинированный каскад

Характерным недостатком электромеханического вентильно-машинного каскада в применении для турбомеханизмов является плохое использование конструктивной электромагнитной мощности машины постоянного тока. При работе с номинальной скоростью, когда момент нагрузки наибольший, машина *МП* не развивает момента и вращается вхолостую; по мере снижения скорости машина *МП* берет на себя часть нагрузки, но момент сопротивления при этом и без того становится меньше номинального Плохое использование машины постоянного тока приводит к увеличению ее габаритной мощности.

Отмеченный недостаток устраняется схемой комбинированного вентильно-машинного каскада. Эта схема показана на рис 114 В отличие от схемы электромеханического каскада здесь в цепь выпрямленного тока ротора асинхронного двигателя включены последовательно две машины постоянного тока: одна, *МП1*, рас-

полагается на одном валу с главным асинхронным двигателем, другая, *МП2* — с синхронной машиной *СМ* Таким образом, в этой схеме как бы объединены вентильно-машинные электромеханический и электрический каскады. Дополнительная э. д. с. в цепи ротора асинхронного двигателя создается обеими машинами, причем машина *МП1* имеет неизменный поток возбуждения такой, что э д с этой машины направлена всегда встречно выпрямленной э д. с. ротора. Электродвижущая сила машины *МП2* может регулироваться в пределах от $+E_{\text{м п2макс}}$ до $-E_{\text{м п2макс}}$.

Цепь роторного контура описывается следующим уравнением:

$$E_{d\text{р н}}s = E_{\text{н м п1}}\frac{n}{n_{\text{н}}} \pm E_{\text{н м п2}}\Phi^{\text{x}}_{\text{м п2}} + I_d R_{\text{экв}}. \qquad (119)$$

При работе в нижней части диапазона регулирования ток возбуждения машины *МП2* подается такой полярности, чтобы э. д. с машины *МП2* была направлена против выпрямленной э. д. с. ротора [знак плюс в (119)]. При номинальном потоке возбуждения, $\Phi^*_{\text{м п2}} = 1$, противо-э. д. с. $E_{\text{м п2}}$ будет максимальной и привод будет работать с минимальной скоростью вращения, которая может быть определена из следующего выражения (пренебрегая падением напряжения в роторной цепи)

$$E_{d\text{р н}}\left(1 - \frac{n_{\text{мин}}}{n_0}\right) = E_{\text{н м п1}}\frac{n_{\text{мин}}}{n_0} + E_{\text{н м п1}}. \qquad (120)$$

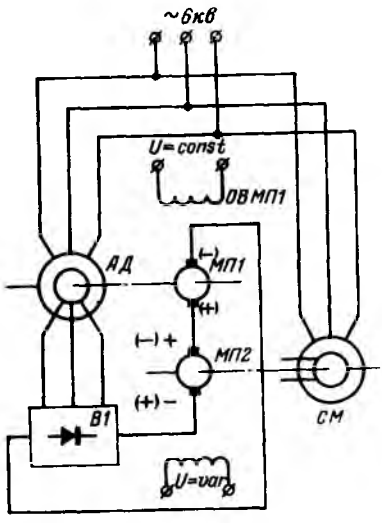

Рис 114 Схема комбинированного вентильно-машинного каскада

Для повышения скорости уменьшают ток возбуждения машины *МП2* и доводят его до нуля. При этом скорость привода будет примерно соответствовать половине диапазона регулирования, противо-э д с в цепи ротора создается при этом одной лишь машиной *МП1* Для

дальнейшего повышения скорости необходимо продолжить уменьшение добавочной противо-э д. с в роторном контуре. Это достигается изменением полярности возбуждения машины *МП2* При этом $E_{м\,п2}$ складывается с выпрямленным напряжением ротора асинхронного двигателя. Результирующая противо э. д. с. в цепи роторного контура равна разности э. д. с. машин *МП1* и *МП2* [знак минус в (119)]. Увеличение э. д. с. машины *МП2* при новой полярности приводит к уменьшению результирующей противо-э д с. и соответствующему увеличению скорости двигателя. Когда $E_{м\,п2}$ сравняется с $E_{м\,п1}$, то результирующая противо-э д. с. снизится до нуля и скорость привода будет близка к номинальной скорости асинхронного двигателя. Для обеспечения этого режима номинальные э. д. с машин *МП1* и *МП2* должны быть равны.

Одной из отличительных особенностей рассматриваемой схемы является то, что при всех скоростях вращения машина *МП1* развивает момент и нагрузка на валу разделяется между машинами *АД* и *МП1* пропорционально их номинальной мощности

Определим для данной схемы габаритные мощности электрических машин, входящих в состав привода. Положим, что заданы номинальная мощность турбомеханизма $P_{нагр}$, номинальная и минимальная скорости его вращения (n_0 и $n_{мин}$). Из изложенного принципа работы комбинированного каскада следует

$$P_{нагр}=P_{а\,д\,н}+P_{н\,м\,п1}. \qquad (121)$$

Через роторные и якорные цепи трех машин каскада протекает один и тот же ток I_d Поэтому, пренебрегая потерями в машинах, их номинальные мощности можно представить как

$$P_{а\,д}=E_{dр\,н}I_{dн};\ P_{н\,м\,п1}=E_{н\,м\,п1}I_{dн};\ P_{н\,м\,п2}=E_{н\,м\,п2}I_{dн},$$

где $P_{н\,м\,п1}$ и $E_{н\,м\,п1}$ — соответственно мощность и э. д. с. машины *МП1* при номинальном возбуждении, приведенные к номинальной скорости асинхронного двигателя.

Из условия достижения номинальной скорости $E_{н\,м\,п1}=E_{н\,м\,п2}$, а следовательно, $P_{н\,м\,п1}=P_{н\,м\,п2}$.

Для получения минимальной скорости вращения должно выполняться соотношение (120), из которого следует:

$$E_{dр\,н}(n_0-n_{мин})-E_{н\,м\,п1}n_{мин}-E_{н\,м\,п2}n_0=0$$

Учитывая, что $E_{\text{н м п1}} = E_{\text{н м п2}}$, получим:

$$E_{\text{н м п1}} = E_{\text{н м п2}} = E_{d\text{р.н}} \frac{n_0 - n_{\text{мин}}}{n_0 + n_{\text{мин}}}.$$

Умножив обе части последнего равенства на $I_{d\text{н}}$, найдем соотношение между номинальными мощностями асинхронного двигателя и машин постоянного тока:

$$P_{\text{н м п1}} = P_{\text{а д н}} \frac{n_0 - n_{\text{мин}}}{n_0 + n_{\text{мин}}}; \quad P_{\text{н м п2}} = P_{\text{а д н}} \frac{n_0 - n_{\text{мин}}}{n_0 + n_{\text{мин}}}.$$

Подставляя найденные соотношения в (121), окончательно получим:

$$\left.\begin{aligned} \frac{P_{\text{н м п1}}}{P_{\text{натр}}} &= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{мин}}}{n_0}\right); \\ \frac{P_{\text{н м п2}}}{P_{\text{натр}}} &= \frac{1}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{мин}}}{n_0}\right); \\ \frac{P_{\text{а д н}}}{P_{\text{натр}}} &= \frac{1}{2}\left(1 + \frac{n_{\text{мин}}}{n_0}\right). \end{aligned}\right\} \qquad (122)$$

Сравним три основные схемы вентильно-машинных каскадов по установленной мощности электрических машин при диапазоне регулирования 2 : 1 ($n_{\text{мин}} = 0{,}5\,n_0$).

Сравнение габаритных мощностей вентильно-машинных каскадов при диапазоне регулирования 2 : 1 (за единицу принята номинальная мощность по валу механизма) дано в табл. 17.

Таблица 17

Электрические машины	Вентильно-машинный электрический каскад	Вентильно-машинный электромеханический каскад	Вентильно-машинный комбинированный каскад
Асинхронный двигатель . .	1,0	1,0	0,75
Хвостовая машина постоянного тока	—	1,0	0,25
Отдельно стоящий агрегат:			
машина постоянного тока	0,5	—	0,25
синхронная машина . .	0,5	—	0,25
Итого . . .	2,0	2,0	1,5

Как показывает сравнение, комбинированный каскад является наиболее экономичным с точки зрения установленной мощности электрических машин.

Второе положительное свойство комбинированного каскада составляет возможность обойтись без пусковых устройств, необходимых при всех других схемах каскада Пуск привода в схеме рис. 114 может осуществляться без включения в сеть асинхронного двигателя по схеме генератор — двигатель. Машина *МП2* работает как генератор, питая двигатель *МП1*. Регулируя ток возбуждения *МП2*, можно разогнать привод до скорости, несколько превышающей $n_{мин}$. По достижении этой рабочей скорости производятся следующие операции: реверсируется поток возбуждения машины *МП2*, и асинхронный двигатель включается в сеть.

Дальнейшим развитием схемы комбинированного каскада является сочетание электромеханического вентильно-машинного и вентильного каскадов, т. е. агрегат *МП2—СМ* в схеме рис. 114 может быть заменен на тиристорный преобразователь, который в нижней половине диапазона регулирования работает как инвертор (его э. д. с. направлена против выпрямленного напряжения ротора), а в верхней части диапазона регулирования и при пуске — как выпрямитель

Схемы комбинированного вентильно-машинного каскада представляют интерес для мощных турбомеханизмов. Такая схема привода запроектирована для крупнейшего шахтного вентилятора типа «Север» мощностью 5 000 *квт*.

28. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В РЕЖИМЕ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

В рассмотренных выше схемах вентильных каскадов преобразователь частоты в роторной цепи асинхронного двигателя имел промежуточную цепь постоянного тока. Такой преобразователь обеспечивал лишь одностороннее преобразование энергии от ротора двигателя в сеть. Если же в цепь ротора включить вентильный преобразователь без промежуточной цепи постоянного тока, т. е. преобразователь с непосредственной связью (см. § 19), который обеспечивает двустороннее преобразование энергии, то возможности асинхронного привода значительно расширяются.

В такой схеме (рис. 115) асинхронный двигатель подключен к двум источникам питания: со стороны статора к сети с постоянными напряжением и частотой 50 *гц*; а со стороны ротора — к источнику пониженной часто-

ты, величина которой, равно как и напряжение источника (по амплитуде и по фазе), могут изменяться Такой двигатель называют машиной переменного тока двойного питания (МДП) [Л 2]. Двигатель в режиме двойного питания может работать как при скорости ниже синхронной, так и выше синхронной в двигательном и тормозном режимах, т е. допускает двухзонное регулирование скорости.

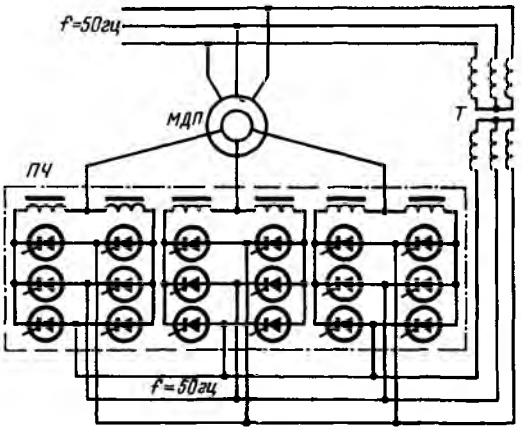

Рис 115 Принципиальная схема машины двойного питания.

По существу все каскадные схемы асинхронного привода являются разновидностью машин двойного питания, так как регулирование в них осуществляется подключением цепи ротора к источнику добавочной э. д. с. Однако ввиду тех или иных свойств этого источника и способа преобразования частоты рассмотренные выше каскадные схемы имеют ограничения по режимам своей работы и виду механических характеристик. Схема, показанная на рис. 115, представляет наиболее общий случай машины двойного питания и поэтому обеспечивает максимальные регулировочные свойства. Подобная по своим свойствам система может быть получена и при электромашинном преобразователе в цепи ротора. Такой схемой является асинхронно-синхронный каскад (§ 25).

Основное свойство систем регулирования машин двойного питания — это возможность независимо изменять параметры э. д. с. питания со стороны ротора, т. е.

изменять амплитуду, фазу и частоту э. д. с. Как было показано в § 24, введение в цепь ротора асинхронного двигателя э. д. с. частоты скольжения позволяет регулировать скорость и реактивную мощность асинхронного двигателя, т. е. асинхронный двигатель приобретает в этом случае некоторые свойства синхронного. Машины двойного питания, сочетающие в себе свойства асинхронных и синхронных машин, получили по предложению М. М. Ботвинника [Л 2] название асинхронизированных синхронных машин. По энергетической структуре эти машины полностью соответствуют каскадным схемам включения асинхронного двигателя и имеют те же энергетические диаграммы для двигательного режима при подсинхронной скорости (см. рис. 76) и для двигательного режима при сверхсинхронной скорости (см. рис. 77).

Для нормальной работы машины переменного тока необходимо, чтобы векторы н. с. статора и ротора были в пространстве неподвижны друг относительно друга. Поскольку н. с. статора вращается в пространстве со скоростью $\omega_0=2\pi f_1$, а ротор двигателя со скоростью $\omega_р$, то н. с. ротора должна вращаться относительно ротора при скорости ниже синхронной в ту же сторону, а при сверхсинхронной — в противоположную со скоростью, равной

$$2\pi f_2=\omega_0-\omega_р=\omega_0 s=2\pi f_1 s,$$

т. е. э. д. с., вводимая в цепь ротора, должна иметь частоту скольжения. В то же время эта частота определяется частотой задающего сигнала, поступающего в схему управления вентильного преобразователя частоты. В зависимости от способа задания частоты преобразователя различают два режима работы машины двойного питания: синхронный и асинхронный.

При синхронном режиме работы частота скольжения задается независимо, вследствие чего при постоянном сигнале управления скорость привода остается строго определенной, не зависящей от нагрузки, т. е. МДП работает как синхронный двигатель. Изменяя задающую частоту, можно изменять скорость двигателя. Вопросы стабилизации синхронного режима работы МДП исследованы пока недостаточно.

Более надежным является асинхронный режим работы МДП, при котором выходная частота преобразователя жестко связана с частотой скольжения. В этом случае машина будет работать как асинхронная и скорость

ее будет изменяться с изменением нагрузки, что будет сопровождаться изменением частоты преобразователя. Поскольку требование соответствия частоты преобразователя частоте скольжения должно выполняться и в переходных режимах, то система управления преобразователями должна обладать достаточным быстродействием. Структурная схема системы управления машиной двойного питания в асинхронном режиме приведена на рис. 116. Эта система разработана в Московском энергетическом институте.

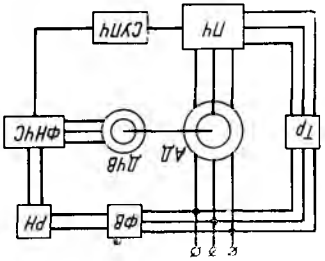

Рис. 116. Структурная схема машины двойного питания, работающей в асинхронном режиме.

ПЧ — силовой преобразователь частоты с непосредственной связью; *Тр* — силовой трансформатор, *ФВ* — фазовращающее устройство, *РН* — регулятор напряжения преобразователя частоты, *ДЧВ* — датчик частоты вращения, *СУПЧ* — система управления преобразователя частоты, *ФНЧС* — формирователь напряжения частоты скольжения.

Машина двойного питания является весьма перспективной системой регулируемого электропривода для турбомеханизмов. По сравнению с основной схемой вентильного каскада эта система привода имеет два основных преимущества: лучший коэффициент мощности и возможность двухзонного регулирования. К недостаткам этой системы следует отнести сложность системы управления и бо́льшую стоимость привода. До последнего времени разработки машины двойного питания не вышли за рамки экспериментальных работ, однако технические достоинства этой системы привода должны обеспечить ее широкое использование в ближайшем будущем для привода мощных турбомеханизмов.

Глава седьмая

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМОВ

29. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Определение рациональной системы регулируемого электропривода для данного механизма или группы механизмов представляет собой конкретную технико-эконо-

мическую задачу. Такие задачи носят сравнительный характер и применительно к электроприводу турбомеханизмов могут иметь следующие разновидности:

1) определение целесообразности применения электрического привода вместо неэлектрического (например, паротурбинного);

2) выбор рационального варианта нерегулируемого электропривода (например, синхронный или асинхронный);

3) сравнение регулируемого электропривода и нерегулируемого и выбор рациональной системы;

4) выбор оптимальной системы регулируемого электропривода.

Технический уровень электропривода и принятые в этой части технические решения существенным образом сказываются на всех технических и экономических показателях установки в целом и прежде всего на таких, как:

а) производительность установки;

б) качество выпускаемой продукции;

в) себестоимость продукции;

г) стоимость оборудования (величина капитальных вложений);

д) величина капитальных вложений в смежные отрасли промышленности;

е) уровень техники безопасности, производственной санитарии и т. д.

Содержанием технико-экономического анализа является определение экономического эффекта от проведения тех или иных технических мероприятий по совершенствованию электропривода и решение вопроса о целесообразности внесения дополнительных (по сравнению с базовым вариантом) капитальных затрат для осуществления этих мероприятий, т. е. для осуществления нового варианта.

При проведении сравнительного технико-экономического анализа определяются:

1) срок окупаемости дополнительных капитальных затрат

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2}; \qquad (123)$$

2) коэффициент экономической эффективности, являющийся величиной, обратной сроку окупаемости $E = 1/T_{ок}$;

3) расчетные затраты $З_i = C_i + E_н K_i$; (124)

4) условная годовая экономия $Э = З_1 - З_i$.

В приведенных формулах:

K_1, K_i — капитальные затраты соответственно по базовому и i-му вариантам; C_1, C_i — годовая стоимость выпускаемой продукции или годовые эксплуатационные расходы соответственно по базовому и сравниваемому вариантам; $E_н$ — нормативный коэффициент экономической эффективности, который различен для отдельных отраслей народного хозяйства Методика [Л. 34] устанавливает, что коэффициент $E_н$ не должен быть меньше 0,12

Обязательным условием использования (123) и (124) является условие равноценности рассматриваемых вариантов по объему выпускаемой продукции, объему работ и т. д. Если варианты различаются объемом выпускаемой продукции, то расчет ведется по удельным показателям, приходящимся на единицу продукции

Условием экономической эффективности, если рассматривается один вариант по сравнению с базовым, является

$$T_{ок} \leqslant T_н,$$

где $T_н = 1/E_н$.

Если один из вариантов имеет и меньшие капитальные затраты и связан с меньшими эксплуатационными расходами, то такой вариант обладает очевидной экономической эффективностью. Обычно же те из вариантов, которые сопряжены с большими капитальными затратами, связаны с меньшими эксплуатационными расходами В этом случае при сравнении двух или нескольких вариантов удобнее пользоваться условием минимума расчетных затрат

$$З_i = C_i + E_н K_i = \text{мин}, \qquad (125)$$

или для двух вариантов: $З_i < З_1$;

$$(C_1 - C_i) > E_н (K_i - K_1). \qquad (126)$$

В состав капитальных затрат входят:

1) стоимость оборудования для электропривода, определенная по прейскурантным или расчетным ценам,

2) капитальные затраты на здания, сооружения, фундаменты;

3) транспортные расходы на доставку оборудования к месту монтажа;

4) стоимость монтажных и наладочных работ;

5) капиталовложения в смежные отрасли промышленности.

Таким образом:

$$K = K_{об} + K_{ст} + K_{тр} + K_{м} + K_{см}. \qquad (127)$$

Наибольшую сложность представляет правильное определение цен на новое электрооборудование, которое во время его освоения имеет обычно более высокую стоимость, чем после освоения. В этом случае следует ориентироваться на расчетные цены, предполагаемые на второй год освоения изделия. При сравнении электроприводов большое значение имеют их энергетические показатели. Коэффициент полезного действия приводов учитывается в эксплуатационных расходах, участвуя в определении стоимости электроэнергии. Для правильного учета коэффициента мощности следует все сравниваемые приводы приводить к одному нормативному коэффициенту мощности (0,92—0,93). Для этого необходимо в расчетах капитальных затрат на электрооборудование предусматривать средства компенсации реактивной мощности (при отстающем $\cos\varphi$) для доведения коэффициента мощности до нормативного значения.

Затраты на строительные работы, связанные с электроприводом, следует рассчитывать по укрупненным показателям По данным Ленгипроэнергопрома стоимость 1 $м^3$ фундамента составляет 22 руб., стоимость строительства 1 $м^3$ производственного здания составляет 6 руб. Стоимость транспортных расходов связана с доставкой оборудования для электроприводов к месту монтажа. Усредненно по тем же данным она составляет 3% стоимости оборудования. Стоимость монтажно-наладочных работ рекомендуется принимать в размере 10—12% стоимости электрооборудования.

Принципиальное значение для анализа технико-экономических характеристик электроприводов имеет учет капиталовложений в смежные отрасли народного хозяйства, в электрическую и топливную промышленность. Правомерность учета смежных капиталовложений подтверждается типовой методикой [Л. 34] и определяется следующими соображениями: если из двух вариантов электропривода один имеет лучший средневзвешенный к. п д., то это означает, что при осуществлении этого варианта будет потребляться меньшее количество элек-

троэнергии, а следовательно, потребуется меньшая установленная мощность электростанций, линий передач и т. п., а также будет расходоваться меньше топлива на тепловых электростанциях, т. е. будут сэкономлены некоторые средства, которые необходимо было бы направить на строительство той доли электростанций и предприятий топливной промышленности, которая пошла бы на покрытие худшего к. п. д. установки. В этом смысле мероприятия, направленные на улучшение к. п. д. приводов, всегда выгодны с народнохозяйственной точки зрения.

Однако указанная экономия в капиталовложениях за счет сокращения расхода электроэнергии реализуется только при больших масштабах мероприятий, когда полученная экономия электроэнергии существенна для энергетического баланса страны. Это может иметь место при увеличении к. п. д. установок массового применения либо уникальных сверхмощных установок.

При расчетах технико-экономического эффекта, который получает какое-либо предприятие, использующее более совершенные электроприводы, очевидно, можно не учитывать дополнительные капиталовложения в смежные отрасли.

Величина дополнительных капитальных затрат в электроэнергетике, угольной промышленности и на транспорте составляет около 0,1 руб. и на каждый сэкономленный киловатт-час.

При сравнении двух вариантов удобнее подсчитывать не сумму капитальных затрат по обоим вариантам, а сразу определять разность между капиталовложениями по вариантам $(K_i - K_1)$. При этом отпадает необходимость учитывать стоимость оборудования и затраты, одинаковые для обоих вариантов, что упрощает расчеты.

Эксплуатационные расходы C складываются из стоимости потребляемой электроэнергии, амортизационных отчислений, стоимости обслуживания (зарплаты обслуживающего персонала) и стоимости ремонтных работ

$$C = C_э + C_а + C_{обсл} + C_{рем}. \qquad (128)$$

Стоимость потребляемой за год электроэнергии $A_{год}$ для рассматриваемого варианта определяют как

$$C_э = ц_э A_{год}.$$

Цену электроэнергии $ц_э$ для мероприятий, имеющих многорайонный характер, рекомендуется принимать как среднюю по стране 0,008 *руб/квт·ч*. В случае, если мероприятие имеет значение только для данного предприятия или района, цена на электроэнергию принимается в соответствии с районными тарифами.

Сумма амортизации электрооборудования определяется по его первоначальной стоимости и нормам амортизационных отчислений[1] (табл. 18).

Таблица 18

Наименование электрооборудования	Нормы амортизации, %
Электродвигатели мощностью до 100 *квт*	10,2
Электродвигатели мощностью свыше 100 *квт*	7,4
Силовое электрооборудование и распредустройства	6,3
Трансформаторы силовые	5,0
Статические конденсаторы	10,0
Системы управления и автоматики	12,0

Стоимость текущего обслуживания определяется главным образом величиной зарплаты обслуживающего персонала (машинистов, операторов, электрослесарей и т. д.). Стоимость ремонта при отсутствии нормативных данных может приниматься укрупненно.

При сравнении двух вариантов подсчет эксплуатационных расходов, так же как и капитальных затрат, целесообразнее производить не для каждого варианта в отдельности, а сразу определяя разность эксплуатационных расходов.

В последующих параграфах приведены два примера технико-экономического анализа с целью выбора рациональных систем привода для насосов и шахтных вентиляторов.

30. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Как уже указывалось в предыдущих главах, наибольшего внимания в качестве регулируемого электропривода центробежных насосов заслуживают приводы с индукторными муфтами скольжения и вентильные каскады.

[1] Нормы амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР, М., 1968.

Первая из этих систем требует относительно небольших капиталовложений, но обладает худшим эксплуатационным к. п. д., чем вторая, более дорогая система привода. Очевидно, что целесообразность применения той или иной системы привода будет зависеть от ряда факторов: числа часов работы установки в год, средней производительности, мощности установки, характеристики сети и т. д. Попытаемся рассмотреть задачу в общем виде и найти границы экономической целесообразности применения каждой из указанных систем привода.

Исходным условием, определяющим целесообразность применения одной из двух рассматриваемых систем привода в соответствии с (126), явится:

$$C_{м}-C_{к}=E_{н}(K_{к}-K_{м}), \qquad (129)$$

где $K_{м}$ и $C_{м}$ — соответственно капитальные затраты и эксплуатационные расходы для варианта с муфтой скольжения; $K_{к}$ и $C_{к}$ — то же для варианта вентильного каскада.

Очевидно, что если в (129) левая часть больше правой, то целесообразнее вентильные каскады, если правая часть больше левой, то предпочтительнее муфты скольжения.

Учитывая (127) и (128), но не принимая во внимание необходимость капиталовложений в смежные отрасли, получим:

$$(C_{wк}-C_{wм})+(C_{ам}-C_{ак})+(C_{обсл.м}-C_{обсл.к})+$$
$$+(C_{рем\ м}-C_{рем\ к})=E_{н}[(K_{об\ к}-K_{об.м})+$$
$$+(K_{ст.к}-K_{ст.м})+(K_{тр.к}-K_{тр.м})+(K_{м.к}-K_{м\ м})].$$

Полагая стоимости текущего обслуживания и ремонта для обоих вариантов одинаковыми, считая равными строительные расходы, полагая средний процент амортизации равным 8,5% и нормативный коэффициент экономической эффективности равным $E_{н}=0{,}12$, получим:

$$\Delta C_{w}-0{,}085\Delta K_{об}=0{,}12(\Delta K_{об}+0{,}1\Delta K_{об}+0{,}03\Delta K_{об}).$$

Окончательно граничное условие применения муфт скольжения либо каскадов будет:

$$\Delta C_{w}=0{,}22\,\Delta K_{об}. \qquad (130)$$

Расчет капитальных затрат проведем на основе цен по действующим с июля 1967 г. прейскурантам (для серийно выпускаемой продукции) и на основе расчетных перспективных цен для оборудования, осваиваемого в производстве. В табл. 19 приведены результаты расчетов стоимости оборудования $K_{об}$ для привода по схеме вентильного каскада (см. рис. 81) и приводов с индукторной муфтой скольжения (см. рис. 60) мощностью от 40 до 2 000 *квт* при синхронной скорости вращения от 375 до 1 500 *об/мин*.

В составе оборудования приводов по схеме вентильного каскада при расчете стоимости учитывались:

а) асинхронный двигатель с фазным ротором;

б) мостовые преобразователи (роторный и инверторный);

в) трансформатор инвертора;

г) статические конденсаторы для повышения коэффициента мощности;

д) низковольтные либо высоковольтные распредустройства для подключения двигателя, трансформатора и конденсаторов;

в) пусковое сопротивление и станция управления.

Нужно отметить, что стоимость оборудования для схемы вентильного каскада зависит от глубины регулирования скорости $K_{р.с}$. Для упрощения дальнейших расчетов стоимость привода по схеме вентильного каскада принята во всех случаях максимальной, соответствующей коэффициенту регулирования $K_{р.с}=0{,}4$ (диапазон регулирования 2,5 : 1).

При определении стоимости оборудования для привода с муфтами скольжения учитывалось следующее оборудование:

а) приводной электродвигатель;

б) муфта скольжения;

в) станция управления приводным двигателем;

г) регулятор муфты скольжения;

д) высоковольтное или низковольтное распредустройство для подключения двигателя.

При выборе приводного электродвигателя для мощности 320 *квт* и ниже в варианте с муфтами скольжения принимались асинхронные короткозамкнутые двигатели, а для приводов большей мощности — синхронные двигатели. Ориентировочные стоимости электроприводов

Таблица 19

Мощность привода, *квт*	Синхронная скорость вращения, *об/мин*	Напряжение питания, *в*	$K_{об\ к}$, руб.	$K_{об\ м}$, руб.	$\Delta K_{об}$, руб.
40	1 000	380	3 100	1 200	1 800
55	1 500	380	3 150	1 250	1 900
55	1 000	380	3 150	1 400	1 750
75	1 000	380	3 300	1 650	1 650
125	1 500	380	4 500	1 700	2 800
125	1 000	360	4 600	1 900	2 700
160	1 000	380	5 400	2 100	3 300
250	1 500	360	6 600	2 300	4 300
250	1 000	380	7 000	2 800	4 200
250	750	380	7 200	3 000	3 900
320	1 000	380	7 500	3 300	4 200
500	1 500	6 000	13 100	6 500	6 600
500	1 000	6 000	13 700		6 000
500	750	6 000	14 000	8 800	5 200
500	500	6 000	17 200	12 800	4 400
630	1 000	6 000	14 400	9 500	4 900
1 000	1 000	6 000	21 200	16 600	4 600
1 000	750	6 000	22 200	18 900	3 300
1 000	500	6 000	23 700	20 400	3 300
1 250	1 000	6 000	24 000	19 600	4 400
1 250	500	6 000	26 700	24 300	2 400
2 000	1 000	6 000	35 000	23 400	11 600
2 000	750	6 000	36 500	25 800	10 300

с муфтами скольжения и по схеме вентильного каскада приведены в табл. 19.

По данным табл. 19 на рис. 117 построена приближенная зависимость средней удельной разности стоимостей оборудования для каскадов и для приводов с муфтами скольжения в зависимости от номинальной мощности привода $\Delta K_{об}/P_н = f(P_н)$. Полученная кривая отражает, разумеется, только средние результаты по ряду типоразмеров электроприводов и может служить только для приближенных расчетов.

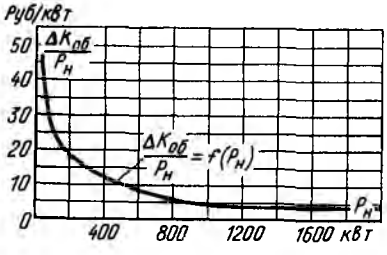

Рис. 117. Средняя удельная разность стоимостей оборудования для вентильных каскадов и для приводов с муфтами скольжения.

Следующим шагом проводимого анализа является определение разности расхода электро-

энергии при использовании муфт скольжения и каскада. Для определения расхода электроэнергии нужно знать прежде всего режимы работы насосов, характеристику сети и т. д.

Такие расчеты, как правило, следует проводить для условий конкретной установки, обладая для этого необходимыми исходными данными.

В настоящем анализе зададимся исходными данными, наиболее характерными для большинства насосных установок водоснабжения.

Расчет проводим для насосов шести типов:

1)	40В-24	1 600 *квт*	500 *об/мин*;
2)	40В-16	1 250 *квт*	368 *об/мин*;
3)	14Д-6	630 *квт*	1 450 *об/мин*;
4)	18НДс	500 *квт*	960 *об/мин*;
5)	10Д-6	125 *квт*	1 450 *об/мин*;
6)	12НДс	55 *квт*	960 *об/мин*.

Положим далее, что каждый насос работает на сеть, определяемую характеристикой (16), причем требуется регулирование производительности насоса в диапазоне от $0{,}2\,Q_н$ до $Q_н$. Рассмотрим четыре случая, когда статическая высота подъема такова, что для регулирования производительности насоса в заданных пределах скорость вращения насоса должна регулироваться в диапазоне $k_{р.с}=0{,}1$; $k_{р.с}=0{,}2$; $k_{р.с}=0{,}3$; $k_{р.с}=0{,}4$.

Характеристики насоса и сети, соответствующие указанным условиям, показаны на рис. 118.

Параметры сети $H_{ст}$ и R для каждого из четырех рас-

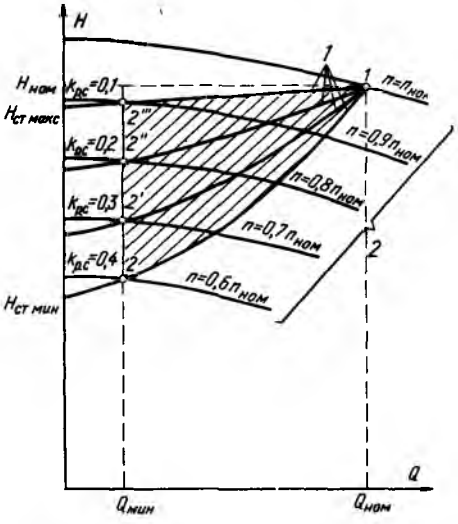

Рис. 118. Q—H-характеристики насоса и сети.

1 — характеристики сети при различной величине статической составляющей напора; *2* — характеристики насоса при различных скоростях вращения.

сматриваемых случаев могут быть найдены по двум граничным точкам, соответствующим номинальной производительности и производительности, равной $0{,}2\,Q_н$. Порядок расчета принят следующий (см. рис. 118). Построим характеристики насоса, соответствующие скоростям вращения $n_н$; $0{,}9\,n_н$; $0{,}8\,n_н$; $0{,}7\,n_н$; $0{,}6\,n_н$, т. е. соответствующие $k_{р\,с}=0$; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. Построение характеристик насоса при различных скоростях вращения производится по формулам подобия (см § 4). Найдем на этих характеристиках точки, соответствующие номинальной производительности (точка *1*) и минимальной $0{,}2\,Q_{ном}$ (точки *2*, *2'*, *2''*, *2'''*). По координатам этих точек ($Q_н$, $H_н$) и ($Q_{мин}$, $H_{мин}$) найдем параметры уравнений характеристики сети для четырех рассматриваемых случаев по формулам

$$R=\frac{H_н-H_{мин}}{Q_н^2-Q_{мин}^2};\qquad H_{ст}=H_н-\frac{H_н-H_{мин}}{Q_н^2-Q_{мин}^2}.$$

Для определения Q, H, η и $P_{мех}$ насоса во всех рабочих точках в пределах заданного диапазона регулирования строим характеристики сети, соответствующие найденным значениям R и $H_{ст}$.

Рабочие точки насоса, лежащие на характеристиках сети между точками *1* и *2*, находятся как точки пересечения характеристики сети и характеристики насоса, соответствующих различным скоростям вращения.

Метод определения мощности на валу насоса при регулировании скорости вращения изложен в § 4, пример 2.

На рис 119 показаны характеристики для одного из рассматриваемых насосов 14Д-6. Зная мощность на валу насоса и скорость его вращения, можно определить мощность, потребляемую электроприводом при схеме вентильного каскада и при использовании индукторной муфты скольжения:

$$P_к=\frac{P_{мех}}{\eta_к};\quad P_{муфты}=\frac{P_{мех}}{\eta_{дв}\eta_{муфты}}.$$

Определение к. п. д. вентильного каскада и привода с муфтой скольжения производится в соответствии с методами, изложенными в § 20 (пример 8) и § 26 (пример 9).

Значение к. п. д каскада для привода указанных насосов взято из рис. 93.

На рис. 120 представлены зависимости разности потребляемых приводом мощностей от расхода при муфте скольжения и вентильном каскаде, отнесенной к номинальной мощности привода:

$$\frac{P_{\text{муфты}} - P_{\text{к}}}{P_{\text{н}}} = \frac{\Delta P}{P_{\text{н}}} = f\,(Q/Q_{\text{н}}).$$

Эти зависимости построены для указанных насосов для каждого из четырех принятых диапазонов регулирования по скорости. Анализ кривых рис. 120 показывает, что удельная разность потребляемой мощности при каскаде и муфте скольжения мало зависит от мощности насоса, его характеристик или номинальной скорости вращения, а определяется в основном характеристикой сети (или требуемым диапазоном регулирования $k_{\text{р с}}$) и расходом $Q/Q_{\text{н}}$.

Для определения разности расходов электроэнергии ΔW при муфте скольжения и вентильном каскаде, соответствующей найденной разности потребляемых мощностей $\Delta P/P_{\text{н}}$, необходимо знать число часов работы насоса t_i с каждой производительностью Q_i, лежащей в пределах заданного диапазона регулирования. Тогда разность расходов электроэнергии определится как

$$\Delta W = \sum \frac{\Delta P_i}{P_{\text{н}}} P_{\text{н}} t_i,$$

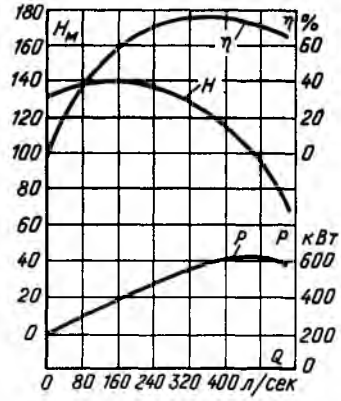

Рис 119 Характеристики насоса 14Д-6

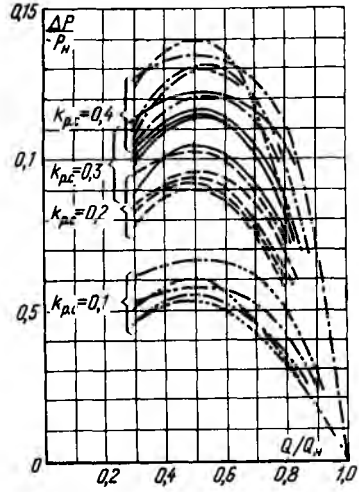

Рис 120. Разность потребляемых мощностей при регулировании скорости вращения насосов с помощью муфты и вентильного каскада.

или в интегральной форме.

$$\Delta W = \int_{t=0}^{t=t_{год}} \frac{\Delta P}{P_н} P_н \, dt. \qquad (131)$$

Решение задачи по определению ΔW можно упростить, если принять, что график работы насосной установки является равномерным, т. е. насос равное время работает при всех производительностях.

Ввиду случайного характера изменения потребности в количестве подаваемой воды в системах водоснабжения использование равномерного графика изменения производительности насоса для целей экономического анализа является вполне оправданным. В этом случае график изменения производительности во времени может быть представлен формулой

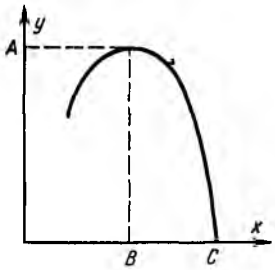

Рис. 121. Аппроксимация зависимости $\Delta P/P_н = f(Q/Q_н)$.

$$Q/Q_н = 0{,}2 + 0{,}8 \frac{t}{t_{год}},$$

где $t_{год}$ — число часов работы насоса в год, т. е. принимается, что в пределах времени от $t=0$ до $t=t_{год}$ производительность насоса соответственно меняется от $0{,}2\,Q_н$ до $Q_н$.

Переходя от переменной t к переменной $Q/Q_н$ в (131) и учитывая, что $d\left(\frac{Q}{Q_н}\right) = 0{,}8 \frac{dt}{t_{год}}$, получим:

$$\Delta W = \frac{t_{год}}{Q_н} \int_{Q=0{,}2Q_н}^{Q=Q_н} \frac{\Delta P}{P_н} P_н dQ,$$

или

$$\Delta W = t_{год} P_н \int_{0{,}2}^{1} \frac{\Delta P}{P_н} d\left(\frac{Q}{Q_н}\right). \qquad (132)$$

Зависимость $\frac{\Delta P}{P_н} = f\left(\frac{Q}{Q_н}\right)$ с достаточной точностью может быть аппроксимирована кубической параболой вида

$$y = A - \frac{A}{(C-B)^3}(x-B)^3. \qquad (133)$$

Значения постоянных уясняются из рис. 121. Сравнение рис. 120 с рис. 121 дает следующие значения постоянных: $B=0{,}55$; $C=1$; величина A зависит от $k_{р.с}$ и лежит в пределах:

при $k_{р.с}=0{,}1$ $A=0{,}055\div0{,}065$
» $k_{р.с}=0{,}2$ $A=0{,}09\div0{,}1$
» $k_{р.с}=0{,}3$ $A=0{,}105\div0{,}12$
» $k_{р.с}=0{,}4$ $A=0{,}12\div0{,}14$

Кривые, построенные по (133), представлены на рис. 122.

Подставляя (133) в (132) и интегрируя, получим:

$$\Delta W=0{,}81\,AP_{н}t_{год}. \qquad (134)$$

Обозначив удельную величину $\Delta W_{у}=0{,}81A$ и учитывая значение A для различных глубин регулирования, получим:

при $k_{р.с}=0{,}1$ $\Delta W_{у}=0{,}0445\div0{,}0525$
» $k_{р.с}=0{,}2$ $\Delta W_{у}=0{,}073\div0{,}081$
» $k_{р.с}=0{,}3$ $\Delta W_{у}=0{,}085\div0{,}097$
» $k_{р.с}=0{,}4$ $\Delta W_{у}=0{,}097\div0{,}0113$

Построив зависимость $\Delta W_{у}=f(k_{р.с})$, можно определить $\Delta W_{у}$ для любой глубины регулирования (рис. 123).

Разность потребляемых за год приводом с индукторной муфтой скольжения и приводом по системе вентильного каскада энергий выразится формулой

$$\Delta W=\Delta W_{у}P_{н}t_{год}, \qquad (135)$$

и стоимость этой электроэнергии

$$\Delta C_{W}=\Delta W_{у}P_{н}t_{год}ц_{э}, \qquad (136)$$

где $ц_{э}$ — стоимость 1 *квт·ч*. Для общего случая принимаем $ц_{э}=0{,}008$ *руб/квт·ч*.

Подставляя (136) в (130), получим:

$$0{,}22\,\Delta K_{об}=\Delta W_{у}P_{н}t_{год}ц_{э}. \qquad (137)$$

Условие (137) позволяет с помощью графиков (рис. 124) определить области применения целесообразного с экономической точки зрения применения асинхронного вентильного каскада и привода с индукторными муфтами скольжения. На рис. 124,*а*, *б*, *в*, *г* построены графики, отражающие условия (137) для различных глубин регулирования $k_{рс}$. Если мощность установки и

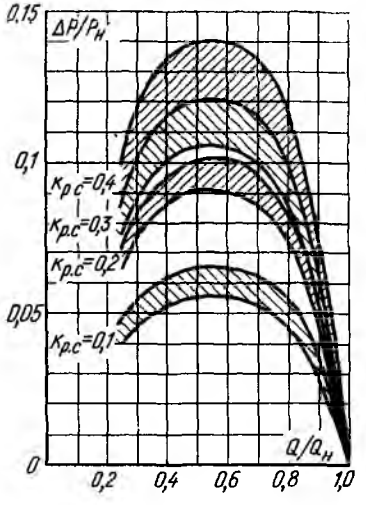

Рис. 122. Аппроксимированные кривые разности потребляемых мощностей при регулировании скорости вращения насосов с помощью муфты и вентильного каскада.

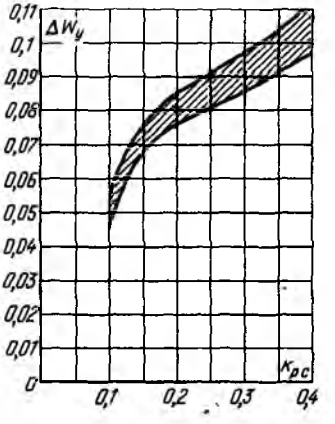

Рис. 123. Удельная разность расходов электроэнергии при регулировании скорости вращения насоса муфтой и асинхронным вентильным каскадом в зависимости от глубины регулирования.

число часов ее работы в год таковы, что точка, определяемая этими координатами, лежит выше кривой, соответствующей требуемому значению $k_{р.с}$, то следует применять каскадные схемы, если ниже, то муфты скольжения. Из графиков рис. 124 видно, что каскадные схемы тем предпочтительнее, чем больше мощность привода, чем больше число часов в году он работает и чем глубже диапазон регулирования по скорости.

Следует, конечно, иметь в виду, что найденные границы областей применения каскадов и муфт носят ориентировочный характер, учитывая принятые допущения и приближенность определения капитальных затрат по

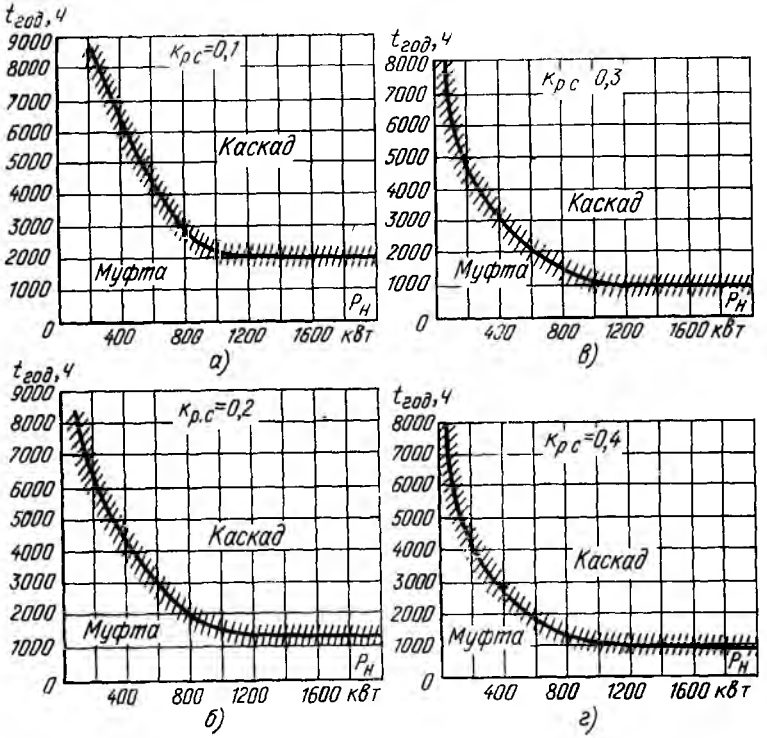

Рис. 124 Диаграммы для выбора типа регулируемого электропривода насосов.

вариантам. В то же время приведенный метод технико-экономического анализа может быть использован при решении аналогичных задач.

31. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ

В качестве второго примера технико-экономического анализа рассмотрим вопрос о целесообразности применения регулируемого электропривода для шахтных вентиляторов главного проветривания.

Как указывалось в § 7, прогнозирование режима работы шахтных вентиляторов чрезвычайно затруднительно и большинство вентиляторов в действительности ра-

ботает в режимах, существенно отличающихся от расчетных. Исходя из этого, режимы работы шахтных вентиляторов главного проветривания можно отнести к категории случайных и при их анализе пользоваться методами математической статистики.

Данные по распределению к. п. д. центробежных вентиляторов по результатам обследования вентиляторных установок Донбасса приведены в табл. 2.

Из этой таблицы следует, что только 40% вентиляторов работают с к. п. д. выше 60%, который можно считать допустимым; большинство же вентиляторов работают с недопустимо низкими к. п. д. Это связано с тем, что режимы работы вентилятора оказались, как правило, ниже расчетных и вентиляторы работают существенно зарегулированными посредством направляющего аппарата. Если бы вентиляторы были оборудованы регулируемым электроприводом, то требуемые режимы работы были бы обеспечены без существенного снижения их к. п. д. Однако применение регулируемого электропривода связано с затратой дополнительных средств. Рассмотрим целесообразность вложения дополнительных средств на оборудование шахтных вентиляторов регулируемым электроприводом.

Эти затраты по (127) складываются из стоимости дополнительного оборудования, его транспортировки и монтажа. Вентиляторы главного проветривания являются, как правило, установками большой мощности (выше 100 *квт*), работают круглосуточно и нуждаются в регулировании в диапазоне $k_{р\,с}=0{,}5$. Поэтому в соответствии с выводами предыдущего параграфа для них следует использовать систему электропривода, обладающую высоким к. п. д. во всем диапазоне регулирования, например асинхронный вентильный каскад.

В составе дополнительного оборудования следует учесть:

а) тиристорные преобразователи (роторный и инверторный);

б) трансформатор инвертора;

в) статические конденсаторы для повышения коэффициента мощности;

г) высоковольтное распредустройство для подключения двигателя, трансформатора и конденсаторов.

Эта стоимость дополнительного оборудования $K_{об}$ в зависимости от мощности привода подсчитана с исполь-

зованием тех же исходных данных, что и при составлении табл. 19.

Полученная зависимость $K_{об}$ от мощности вентилятора представлена в табл. 20

Таблица 20

Мощность привода $P_н$, *квт*	125	160	250	320	500	630	1 000	1 250	22 000
$K_{об}$, руб	4 000	4 800	6 000	6 500	9 300	10 700	14 500	17 000	27 300

С учетом стоимости транспортировки (3%) и монтажа (10%) дополнительные капитальные затраты составят:

$$K = 1{,}13\, K_{об}.$$

Эксплуатационные расходы при использовании регулируемого электропривода будут меньше за счет экономии электроэнергии ΔC_W. Примем, что стоимость текущих ремонтов и эксплуатации всей вентиляторной установки не изменится при использовании более сложного регулируемого электропривода, так как при этом существенно облегчатся условия работы механической части вентилятора, работающего со сниженными скоростями. Принимая средний процент амортизации электрооборудования 8,5%, экономию эксплуатационных расходов определим как

$$\Delta C = \Delta C_W - 0{,}085\, K_{об}.$$

Экономия электроэнергии может быть определена следующим образом:

$$\Delta W = \left(\frac{P_в}{\eta_{в1}\eta_{дв}} - \frac{P_в}{\eta_{в2}\eta_к}\right) t_{год},$$

где $P_в$ — полезная мощность, развиваемая вентилятором, *квт*; $\eta_{в1}$ — к. п. д. вентилятора при регулировании его с помощью направляющего аппарата; $\eta_{в2}$ — к. п. д. вентилятора при регулировании его изменением скорости вращения; $\eta_{дв1}$ — к. п. д. нерегулируемого двигателя; $\eta_к$ — к. п. д. вентильного каскада; $t_{год}$ — число часов работы установки в год — 8 000 *ч*.

Коэффициент полезного действия вентилятора будет определяться режимами работы каждой конкретной установки. Для обобщенного же анализа воспользуемся

статистическими методами на основе данных по к. п. д. вентиляторов, представленных в табл 2. Для каждого из обследованных 50 вентиляторов был также определен предполагаемый его к. п. д. при регулировании скорости вращения. Анализируя функции распределения существующих и ожидаемых к. п. д. вентилятора, найдем средневзвешенные значения этих величин:

$\eta_{в1}=0{,}56$ — при регулировании направляющим аппаратом;

$\eta_{в2}=0{,}68$ — при регулировании изменением скорости вращения.

Аналогичным образом был определен усредненный режим работы, характеризующийся загрузкой вентиляторов полезной мощностью

$$\frac{P_в}{P_{в\ ном}}=0{,}6,$$

а также усредненные к. п. д. нерегулируемого и регулируемого приводов:

$$\eta_{дв}=0{,}9;\quad \eta_к=0{,}86.$$

Используя найденные значения, получим:

$$\Delta W=\left(\frac{0{,}6P_{в\ ном}}{0{,}56\cdot 0{,}9}-\frac{0{,}6P_{в\ ном}}{0{,}68\ 0{,}86}\right)t_{год}=0{,}17P_{в\ ном}t_{год}. \tag{138}$$

Мощность привода $P_н$ по табл 19 должна соответствовать номинальной мощности вентилятора

$$P_н=\frac{P_{в\ ном}}{\eta_{в\ н}},$$

где $\eta_{в\ н}$ — номинальный к. п. д. вентилятора, который может в зависимости от номинального расчетного режима его работы лежать в пределах от 0,8 до 0,6.

Принимая $\eta_{в\ н}=0{,}7$ и заменяя в (138) $P_{в\ ном}$ на $P_н$, получим:

$$\Delta W=0{,}119\,P_н t_{год}.$$

Стоимость сэкономленной электроэнергии при цене, равной 0,008 *руб/квт·ч*, составит:

$$\Delta C_W=0{,}00095\,P_н t_{год}.$$

Срок окупаемости дополнительных капиталовложений на создание регулируемого привода определится как

$$T_{ок} = \frac{1,13K_{об}}{7,6P_н - 0,085K_{об}}.$$

Пользуясь данными табл. 20, построим (рис. 125) зависимость срока окупаемости от мощности привода вентилятора.

Эта зависимость показывает, что при мощности установки свыше 300 *квт* применение регулируемого электропривода целесообразно даже только в целях экономии электроэнергии. В приведенном расчете не были учтены другие экономические преимущества регулируемого привода, такие как повышение надежности работы вентилятора и увеличение ресурса его работы вследствие снижения скорости вращения рабочего колеса, возможность упрощения конструкции вентилятора за счет исключения направляющего аппарата и ряд других. Учет всех преимуществ регулируемого привода дает значительно более быструю окупаемость дополнительных капитальных вложений, а в некоторых случаях позволит определить его как мероприятие очевидной экономической эффективности. При учете экономии капиталовложений в смежных отраслях (энергетике, топливной промышленности), возникающей вследствие сокращения потребления электроэнергии, применение регулируемого электропривода для шахтных вентиляторов главного проветривания всегда может расцениваться как мероприятие, дающее безусловный экономический эффект.

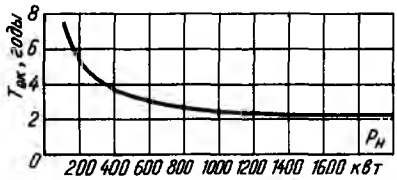

Рис 125 Зависимость срока окупаемости дополнительных затрат от мощности привода вентилятора.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1П

Ориентировочные максимально допустимые для синхронных двигателей СДН (СДНЗ) величины махового момента турбомеханизмов

Синхронная скорость вращения, n_0, *об/мин*	Мощность двигателя, *квт*	Масса пусковой клетки двигателя $G_{кл}$, *кг*	Маховой момент ротора $GD^2_{рот}$, *кгс·м²*	Допустимая величина махового момента турбомеханизма GD^2, *кгс·м²*, при числе пусков	
				$n_п=1$	$n_п=2$
250	320	32	1 920	40 000	20 000
	400	38	2 420	48 000	24 000
	500	47	3 000	60 000	30 000
	630	55	3 550	70 000	35 000
	800	62	7 580	75 000	37 500
	1 000	74	9 170	88 000	44 000
	1 250	85	10 400	102 000	51 000
	1 600	93	20 500	104 000	52 000
	2 000	112	24 700	124 000	62 000
	2 500	134	29 300	148 000	74 000
	3 200	203	59 600	210 000	105 000
	4 000	232	69 800	240 000	120 000
300	320	35	1 140	30 000	15 000
	400	41	1 480	36 000	18 000
	500	47	2 750	40 000	20 000
	530	58	3 110	50 000	25 000
	800	67	3 610	58 000	29 000
	1 000	72	7 450	60 000	30 000
	1 250	77	8 930	62 000	31 000
	1 600	88	10 020	70 000	35 000
	2 000	126	17 900	100 000	50 000
	2 500	152	21 800	118 000	59 000
	3 200	183	26 000	144 000	72 000
	4 000	217	30 800	170 000	85 000
375	320	27	920	15 000	7 500
	400	32	1 150	18 000	9 000
	500	39	1 370	22 000	11 000
	630	46	1 660	25 000	12 500
	800	54	3 120	29 000	14 500
	1 000	63	3 700	34 000	17 000
	1 250	76	4 460	40 000	20 000
	1 600	88	8 300	44 000	22 000
	2 000	101	10 000	50 000	25 000
	2 500	117	11 600	58 000	29 000
	3 200	184	28 500	80 000	40 000
	4 000	212	33 000	93 000	46 500

Синхронная скорость вращения, n_0, *об/мин*	Мощность двигателя, *квт*	Масса пусковой клетки двигателя $G_{кл}$, *кг*	Маховой момент ротора $GD^2_{рот}$, *кгс·м²*	Допустимая величина махового момента турбомеханизма GD^2, *кгс м²* при числе пусков	
				$n_п=1$	$n_п=2$
500	400	31	540	10 000	5 000
	500	37	630	12 000	6 000
	630	56	1 460	17 000	8 500
	800	60	1 780	18 000	9 000
	1 000	70	2 010	21 000	10 500
	1 250	90	4 640	25 000	12 500
	1 600	103	5 530	29 000	14 500
	2 000	120	6 740	44 000	22 000
	2 500	137	14 100	41 000	20 500
	3 200	152	16 500	34 000	17 000
	4 000	179	21 300	38 000	19 000
	5 000	240	31 600	49 000	24 500
	6 300	266	36 500	52 000	26 000
	8 000	318	44 800	62 000	31 000
	10 000	364	52 100	69 000	34 500
600	630	62	790	13 000	6 500
	800	74	960	16 000	8 000
	1 000	77	1 880	17 000	8 500
	1 250	82	2 220	19 000	9 500
	1 600	98	2 600	20 000	10 000
	2 000	104	4 000	23 000	11 500
	2 500	124	4 960	24 000	12 000
	3 200	131	5 800	23 000	11 500
	4 000	152	11 500	26 000	13 000
	5 000	178	14 500	29 000	14 500
	6 300	205	17 300	22 000	11 000
	8 000	250	34 800	22 000	11 000
	10 000	291	41 900	25 000	12 500
750	800	45	640	6 000	3 000
	1 000	64	820	7 000	3 500
	1 250	70	1 580	9 000	4 500
	1 600	80	1 970	10 000	5 000
	2 000	95	2 300	11 000	5 500
	2 500	114	4 700	12 000	6 000
	3 200	132	5 450	14 000	7 000
	4 000	147	6 400	15 000	7 500
	5 000	169	12 000	13 000	6 500
	6 300	195	14 400	15 000	7 500
	8 000	223	17 400	16 000	8 000
	10 000	263	22 000	17 000	8 500

Синхронная скорость вращения, n_0, *об/мин*	Мощность двигателя, *квт*	Масса пусковой клетки двигателя $G_{кл}$, *кг*	Маховой момент ротора $GD^2_{рот}$, *кгс·м²*	Допустимая величина махового момента турбомеханизма GD^2, *кгс·м²*, при числе пусков	
				$n_п=1$	$n_п=2$
1 000	1 000	52	560	3 800	1 700
	1 250	59	690	4 200	2 100
	1 600	65	1 150	4 200	2 100
	2 000	73	1 400	4 700	2 350
	2 500	85	1 700	5 400	2 700
	3 200	95	1 980	5 900	2 950
	4 000	135	4 440	6 800	3 400
	5 000	152	5 100	7 500	3 750
	6 300	176	6 160	8 400	4 200

Таблица 2П

Ориентировочные, максимально допустимые для синхронных двигателей серии СДВ величины махового момента турбомеханизмов

Синхронная скорость вращения, *об/мин*	Мощность двигателя, *квт*	Масса пусковой клетки, $G_{кл}$, *кг*	Маховой момент ротора $CD^2_{рот}$, *кгс·м²*	Допустимая величина махового момента турбомеханизма GD^2, *кгс·м²*, при числе пусков	
				$n_п=1$	$n_п=2$
500	400	83	1 460	26 000	13 000
	500	83	1 460	26 000	13 000
	800	106	2 010	33 000	16 500
	1 250	153	4 640	46 000	23 000
	2 000	205	6 740	62 000	31 000
600	800	123	1 880	27 000	13 500
	1 250	169	2 600	37 000	18 500

Таблица 3П

Технические данные тиристорных возбудительных устройств серии ТВУ

Тип	Преобразователь			
	Выпрямленное номинальное напряжение, *в*	Максимальное выпрямленное напряжение, *в*	Выпрямленный ток, *а*	Габаритные размеры, *мм*
ТВУ-46-320	46	80	320	1 300×700×2 000
ТВУ-65-320	65	115	320	
ТВУ-80-320	80	140	320	
ТВУ-105-320	105	185	320	
ТВУ-137-320	137	240	320	
ТВУ-163-320	163	290	320	
ТВУ-195-320	195	340	320	
ТВУ-247-320	247	435	320	

Продолжение табл. 3П

Тип	Трансформатор		
	Мощность, *ква*	Вторичное напряжение, *в*	Габаритные размеры, *мм*
ТВУ-46-320	40	133	1 100×760×450
ТВУ-65-320	63	190	1 200×830×490
ТВУ-80-320	63	230	1 200×830×490
ТВУ-105-320	100	300	1 260×880×520
ТВУ-137-320	100	190	1 260×880×520
ТВУ-163-320	100	230	1 260×880×520
ТВУ-195-320	160	270	—
ТВУ-247-320	160	340	—

Таблица 4П

Технические данные высокоскоростных асинхронных электродвигателей с фазным ротором

Тип двигателя	ФАЗ-800	АТМФ-2600-2Б	ФАЗ-400-6000	ФАЗ-6300	АФЗ-4500-1500
Мощность $P_н$, *квт*	800	2 000	4 000	6 300	4 500
Напряжение статора $U_{1н}$, *в*	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000
Ток статора $I_{1н}$, *а*	93,5	230	458	690	522
Скорость вращения $n_н$, *об/мин*	2 960	2 980	2 985	2 985	1 480
Перегрузочная способность k_M	3,0	4,0	2,6	2,26	2,4
Напряжение ротора $E_р$, *в*	855	1 330	1 627	3 290	1 506
Ток ротора I_2, *а*	595	920	1 490	1 170	1 825
Коэффициент мощности $\cos\varphi_н$	0,89	0,88	0,88	0,91	0,88
Коэффициент полезного действия двигателя $\eta_н$, %	92,5	—	95,6	96,5	96,2

Таблица 5П

Технические данные индукторных муфт скольжения

Тип муфты	Номинальный момент, *кгс·м*	Номинальное скольжение, *об/мин*	Максимально допустимая скорость вращения, *об/мин*	Допустимые длительные потери скольжения, *квт*, при входной скорости вращения, *об/мин*						Напряжение источника питания и номинальный ток возбуждения муфты: при управлении муфтой посредством вариаторов напряжения (параллельное соединение секций обмоток возбуждения)		при управлении муфтой посредством магнитных усилителей (последовательное соединение секций обмотки возбуждения)		GD^2, (не более), *кгс м²*		Масса муфты (не более), *кг*
				3 000	1 500	1 000	750	600	500	*U, в*	*I, а*	*U, в*	*I, а*	якорь	индуктор	
ИМС-7,5	7,5	100	3 000	6,5	4	3	2,5	2	1,8	220	1	380	0,5	6,5	3,5	180
ИМС-22	22	50	3 000	15	9	7	5,5	5	4	220	1,4	380	0,7	15	7,5	350
ИМС-40	40	50	1 500	28	17,5	13	10,5	9	8	220	3,0	380	1,5	80	40	590
ИМС-75	75	50	1 500	65	40	30	24,5	21	18	220	3,0	380	1,5	1 895	65	1 170
ИМС-100	100	50	1 500	65	40	30	24,5	21	18	220	3,0	380	1,5	195	65	1 170
ИМС-160	160	50	1 500	108	66	50	41	35	30	220	5,0	380	2,5	330	140	1 740

Технические данные электроприводов типа ВАДИ

Тип привода	Номинальные данные привода							Длительно допустимые моменты, *кгс·м*, при различных скоростях					$M_{пуск}$, *кгс·м*	$I_{пуск}$, *а*
	U, *в*	$P_н$, *квт*	$I_{1н}$, *а*	к. п. д., %	$\cos\varphi_н$	$M_н$, *кгс·м*	$n_н$, *об/мин*	400 *об/мин*	600 *об/мин*	800 *об/мин*	1 000 *об/мин*	1 200 *об/мин*		
ВАДИ41-4	380	1,65	7,0	65	0,55	1,44	1 120	0,65	0,79	1,1	1,20	1,0	2,3	1,5
ВАДИ42-4	380	2,50	9,4	65	0,62	2,03	1 180	0,65	0,83	1,1	1,40	2,0	2,8	31
ВАДИ51-4	380	2,9	12,3	65	0,55	2,44	1 160	0,85	1,1	1,4	2,0	2,4	3,5	35
ВАДИ52-4	380	4,7	16,5	70	0,62	3,72	1 230	0,65	0,95	1,5	2,40	3,5	5,3	41
ВАДИ61-4	380	6,1	24,0	70	0,55	4,70	1 260	1,40	1,90	2,4	3,20	4,5	11,0	65
ВАДИ62-4	380	8,2	28,6	70	0,62	6,25	1 280	1,9	2,4	3,1	4,20	5,5	14,5	90
ВАДИ71-4	380	10,5	38,5	75	0,55	7,9	1 300	1,6	2,0	3,0	4,30	6,0	20,0	110
ВАДИ72-4	380	13,8	45,0	75	0,62	10,0	1 330	2,0	2,9	4,2	6,0	8,5	25,5	155

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн И. Я. Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока. М., «Энергия», 1967.

2. Ботвинник М. М., Шакарян Ю. Г. Управляемая машина переменного тока. М., «Наука», 1970.

3. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М., «Наука», 1966.

4. Вешеневский С. Н. Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей. М., «Энергия», 1968.

5. Грейсух М. В. Выбор регулируемого электропривода для турбокомпрессоров, В кн.: Автоматизированный электропривод, т. 2, 1968.

6. Жумахов И. М., Насосы, вентиляторы и компрессоры. М., Углетехиздат, 1958.

7. Завалишин А. Д. Сдвоенная каскадная схема асинхронных двигателей для привода мощных вентиляторов. Сб. «Электросила», 1952, № 1.

8. Земляной Ю. М. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей с фазным ротором. — «Электротехника», 1966, № 8.

9. Костенко М. П., Пиотровский Л. М., Электрические машины, ч. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.

10. Лабунцов В. А., Ривкин Г. А., Шевченко Г. И. Автономные тиристорные инверторы. М., «Энергия», 1967.

11. Лезнов Б. С. Опыт регулирования центробежного насоса электромагнитной муфтой. — «Водоснабжение и санитарная техника», 1965, № 5.

12. Лезнов Б. С. Электромагнитные муфты скольжения в приводе центробежных насосов. Материалы совещания молодых специалистов ВНИИВодгео. М., 1965.

13. Лейбзон Я. И., Волков В. Г. Монтаж и эксплуатация индукторных муфт скольжения. М., «Энергия», 1968.

14. Лютер Р. А. Моменты вращения синхронной машины в асинхронном режиме. — «Вестник электропромышленности», 1948, № 10.

15. Мастер И. М. Электропривод и автоматика рудничных вентиляторных установок главного проветривания. М., «Недра», 1964.

16. Онищенко Г. Б., Юньков М. Г. Электропривод мощных турбомашин, ЦИНТИПриборэлектропром, 1962.

17. Онищенко Г. Б. Асинхронный вентильный каскад. М., «Энергия», 1967.

18. Очищенко Г. Б., Рожанковский Ю. В. Регулируемый электропривод шахтных вентиляторов. — В кн.: Автоматизиро-

ванный электропривод в народном хозяйстве, т. 2. М., «Энергия», 1971.

19. Петелин Д. П. Автоматическое управление синхронными электроприводами. М., «Энергия», 1968.

20. Попов В. С., Современные методы регулирования центробежных насосов. — Тр. ВНИИВОДГЕО, 1964, вып. 8.

21. Прозоров В. А. Электропривод переменного тока с коллекторными двигателями. ВНИИЭМ, 1964.

22. Пфлейдерер К. Центробежные и пропеллерные насосы. ОНТИ, 1937.

23. Пшеничный Н. А. Экономия электроэнергии на вентиляционных установках. — «Промышленная энергетика», 1967, № 2.

24. Раскин И. А. Новые вентиляторы для шахт и рудников. М., «Недра», 1965.

25. Рихтер Л. А. Вопросы аэродинамики газовоздухопроводов и регулирования тягодутьевых машин электростанций. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.

26. Сандлер А. С. Мощный регулируемый привод с поворотным статором для механизмов с вентиляторным моментом нагрузки. — Труды совещания по автоматизированному электроприводу переменного тока, АН СССР, 1958.

27. Сандлер А. С. Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1966.

28. Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Частотное управление асинхронными двигателями. М., «Энергия», 1966.

29. Селезнев К. П., Подобуев Ю. С., Анисимов С. А. Теория и расчет турбокомпрессоров. М., «Машиностроение», 1968.

30. Ситник Н. Х., Некрасов Л. Т., Беркович Е. И., Ягупов С. М. Автономные инверторы с отделенными от нагрузки конденсаторами. М., «Энергия», 1968.

31. Соколов М. М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М., «Энергия», 1969.

32. Степанов А. Центробежные и осевые насосы. М, Машгиз, 1960.

33. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

34. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. М., «Экономика», 1969.

35. Тихонов В. В. Электродвижение кораблей. М., Воениздат, 1947.

36. Товстолес Ф. Р., Гидравлика и насосы, ч. III. ГОНТИ, 1938.

37. Толстов Ю. Г. Автономные инверторы, В кн.: Тиристорные преобразователи. М., «Наука», 1970.

38. Уманский В. Б. Электропривод шахтного вентилятора. М, Стандартиздат, 1933.

39. Черкасский В. М., Романова Т. М., Кауль Р. А. Насосы, компрессоры, вентиляторы. М., «Энергия», 1968.

40. Чиженко И. М., Выдолоб Ю. Я. Вентильный каскад с компенсационным инвертором. — Труды КПИ, т. 39, 1962.

41. Чиликин М. Г., Сандлер А. С., Шапиро Л. Я. Двухдвигательный вентильно-машинный каскад с полупроводниковыми выпрямителями. — «Электричество», 1961, № 8.

42. Чиликин М. Г., Соколов М. М., Шинянский А. В. Асинхронный электропривод с дросселями насыщения. М., «Энергия», 1964.

43. Электрооборудование аэродинамических труб. — «Электричество», 1951, № 5.

44. Эттингер Е. Л., Бутаев Ф. И. Вентильный электропривод. М.—Л., Госэнергоиздат, 1951.

45. Эттингер Е. Л., Тиристорный электропривод переменного тока. Доклад на II Научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу стран СЭВ. М., 1968.

46. Юньков М. Г., Онищенко Г. Б., Зверев Г. А. Промышленные исследования асинхронного вентильного каскада. — «Вестник электропромышленности», 1961, № 10.

47. Anwendung untersynchroner Stromrichterkaskaden in der Industrie — «BBC-Nachr.», 1969, **51**, № 2.

48. Large brushless synchronous motor. — «Electrical Review», 1964, January 3.

49. Bürstenlose Erregung Synchronmotore — «Siemens-Z», 1966, H. 10.

50. Drehzahlgeregelte Gleichstrommotoren zum Antrieb von Pumpen im Wasserwerk Grasdorf der Stadtwerke Hannover.—«Siemens-Z», 1968, 42, H. 11.

51 Elektrický pohon diagonalnich cerpadel v cerpači stanici surové vody na reče Zelivce. «Elektrotechn. Obzor», 1968, **57**, № 10.

52. Klima V., Rožek I. Trojfazové komutatorove derivačni motory. Praha, 1962.

53. Sranks I. Variable-speed d. c. motor for mine fans and conveyer — «LSE Enging Bull.», 1968, № 2.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Введение 5

Глава первая. **Основные характеристики и режимы работы турбомеханизмов** 10

1. Физические основы работы турбомеханизмов . . . 10
2. Основные характеристики турбомеханизмов 13
3. Работа турбомеханизмов на сеть 22

Глава вторая. **Особенности характеристик турбомеханизмов как нагрузочных машин электроприводов** 25

4. Механические характеристики турбомеханизмов . . 25
5. Характеристики турбомеханизмов при пуске . . . 35
6. Особенности работы центробежных насосов и требования к их электроприводу 38
7. Особенности работы вентиляторов и требования к их электроприводу 43
8. Особенности работы турбокомпрессоров и требования к их электроприводу 53
9. Понятие о полной автоматизации турбомеханизмов . 57
10. Классификация систем электропривода турбомеханизмов 61

Глава третья. **Нерегулируемый электропривод турбомеханизмов** 66

11. Электропривод с асинхронным короткозамкнутым двигателем 66
12. Электропривод с синхронным двигателем 68
13. Электропривод с асинхронным двигателем с фазным ротором 81
14. Потери скольжения асинхронного двигателя . . . 89

Глава четвертая. **Электропривод турбомеханизмов со ступенчатым регулированием скорости вращения** . . . 91

15. Электропривод с многоскоростным асинхронным двигателем 91
16. Двухскоростной электропривод с преобразователем частоты 93
17. Синхронно-асинхронный привод 95

Глава пятая. **Электропривод турбомеханизмов с плавным регулированием скорости вращения** 98

18. Электропривод с двигателем постоянного тока . . . 98
19. Асинхронный электропривод с частотным управлением 104

20. Электропривод с индукторной муфтой скольжения . . 114
21. Асинхронный электропривод с регулированием напряжения на статоре двигателя 120
22. Регулируемый двухдвигательный асинхронный привод с поворотным статором 125
23. Электропривод с коллекторными двигателями переменного тока 130

Глава шестая. **Каскадные схемы электропривода турбомеханизмов** 133
24. Принцип работы каскадных схем асинхронного двигателя 133
25. Асинхронные электромашинные каскады 142
26. Асинхронный вентильный каскад 145
27. Асинхронные вентильно-машинные каскады . . . 184
28. Асинхронный двигатель в режиме двойного питания . 207

Глава седьмая. **Технико-экономический анализ электропривода турбомеханизмов** 210
29. Исходные предпосылки для технико-экономического анализа 210
30. Выбор рациональной системы регулируемого электропривода для центробежных насосов 215
31. Технико-экономический анализ целесообразности применения регулируемого электропривода для вентиляторов 225

Приложение 230

Литература 236