

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН

Алматинский институт энергетики и связи

М.А.Мустафин

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЦЕНТРОБЕЖНЫХ
МЕХАНИЗМОВ

Учебное пособие

Алматы 2005

УДК 621. 33

Автоматизированный электропривод центробежных механизмов:

Учебное пособие / М.А.Мустафин;

АИЭС. Алматы,2005. – 80 с.

В учебном пособии проведен анализ особенностей механизмов центробежного действия и их систем регулирования. Рассмотрены электромеханические и регулировочные свойства, статические характеристики и энергетические показатели современных систем автоматизированного электропривода центробежных механизмов. Приведены методики расчета характеристик и выбора основных элементов механизмов и приводов, примеры расчета их гидравлических и электромеханических показателей.

Учебное пособие предназначено для студентов электроэнергетических специальностей дневной и заочной форм обучения. Может быть также использовано специалистами, занимающимися проектированием и эксплуатацией электрооборудования центробежных агрегатов.

Ил.58, библиогр.- 9 назв.

РЕЦЕНЗЕНТЫ: д-р техн.наук, проф. Сагитов П.И.,

д-р техн.наук, проф. Бекбаев А.Б.

Печатается по плану издания Министерства образования и
науки Республики Казахстан на 2005 г.

ISBN xx

© Алматинский институт энергетики и связи, 2005 г.

Содержание

Введение.....	4
1 Системы автоматизированного электропривода центробежных механизмов.....	5
1.1 Энергетические соотношения в силовом канале электропривода центробежных механизмов.....	5
1.2 Центробежные механизмы как нагрузка регулируемого электропривода.....	16
1.3 Системы регулирования частоты вращения электродвигателей центробежных агрегатов.....	19
2 Частотно – регулируемый электропривод центробежных механизмов.....	25
2.1 Законы частотного регулирования.....	25
2.2 Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями.....	29
2.2.1 Преобразователи частоты с автономными инверторами.....	34
2.2.2 Выходное напряжение преобразователей частоты с автономными инверторами	38
2.2.3 Преобразователи частоты с широтно – импульсной модуляцией.....	41
3 Управление электроприводом изменением напряжения на статоре двигателя.....	43
4 Управление электроприводом центробежных механизмов в каскадных схемах.....	47
4.1 Асинхронный вентильный каскад.....	48

4.1.1 Статические характеристики привода по схеме асинхронного вентильного каскада.....	52
4.1.2 Выбор основного оборудования асинхронных вентильных каскадов для центробежных механизмов.....	55
4.2 Машина двойного питания.....	58
4.2.1 Расчет энергетических показателей электропривода с машиной двойного питания	65
5 Примеры расчета электроприводов центробежных механизмов.....	66
5.1 Расчет гидравлических характеристик центробежных насосов	66
5.2 Расчет характеристик электроприводов центробежных механизмов с регулированием по цепи статора	69
5.3 Расчет электроприводов центробежных механизмов с регулированием по цепи ротора	74
Заключение.....	79
Список литературы.....	80

Введение

Центробежные механизмы для подачи жидкостей и газов (вентиляторы, насосы, нагнетатели, компрессоры) являются основными общепромышленными механизмами, обладающими в масштабах страны наибольшими потенциальными возможностями для значительного сокращения удельного расхода электроэнергии. Особое положение центробежных механизмов объясняется их массовостью, как правило, длительным режимом работы, большой установленной мощностью. Так, мощность промышленных насосов лежит в пределах от 1 до нескольких десятков тысяч киловатт.

Мощность питательных насосов тепловых электростанций и насосов гидротехнических сооружений достигает 25 000 кВт. Указанные обстоятельства определяют значительный удельный вес этих механизмов в энергетическом балансе страны.

Суммарная установленная мощность приводных двигателей насосов, вентиляторов, компрессоров составляет около 20% от мощности всех электростанций СНГ, при этом только вентиляторы потребляют около 10% от всей вырабатываемой электроэнергии.

В настоящее время все более широкое распространение получает применение регулируемого электропривода для оперативного управления режимами работы центробежных механизмов. Замена традиционных схем с использованием регулирующей запорной арматуры (дросселирование) автоматизированным электроприводом позволяет значительно сократить потери энергии, связанные с преодолением сопротивлений гидравлических (пневматических) регуляторов. Регулирование режимов работы таких механизмов изменением частоты вращения электрического привода является наиболее прогрессивным способом из всех известных. При этом методе регулирования задвижка на трубе или направляющие вентилятора остаются полностью открытыми. Следовательно, нет добавочного гидравлического сопротивления, нет добавочных потерь на гидравлическом сопротивлении. Потери мощности при дросселировании могут достигать 50%, поэтому перевод центробежных механизмов на регулируемые системы привода является важным направлением политики энергосбережения в промышленности. Дополнительный эффект от такой модернизации связан со снижением эксплуатационных затрат, увеличением срока службы оборудования, исключением гидравлических ударов в системе, возможностью включения автоматизированного привода насосов в системы автоматического управления технологическими процессами.

В техническом прогрессе ведущая роль в области автоматизации и электрификации производства принадлежит автоматизированному электроприводу переменного и постоянного тока. Одна из наиболее эффективных возможностей энергосбережения – это создание электроприводов, максимально учитывающих параметры и специфику работы приводного механизма. От способа регулирования, принятого в электроприводе, зависят его регулировочные свойства, энергетические, экономические и эксплуатационные показатели. Широкое распространение в качестве привода центробежных механизмов получил электропривод переменного тока с асинхронными и синхронными двигателями. Особенность асинхронных двигателей - возможность регулирования их угловой скорости множеством способов по цепи статора (изменением величины и частоты напряжения на обмотках статора, числа пар полюсов и т.д.) и ротора (введением в цепь ротора дополнительных ЭДС и резисторов, импульсное регулирование и т.д.). Практическое применение асинхронного привода с различными способами регулирования определяется как показателями этих систем, так и наличием элементной базы, необходимой для их реализации. Регулируемые электроприводы турбомеханизмов традиционно выполнялись по схемам: «асинхронный вентильный каскад» (АВК), «регулятор напряжения – асинхронный двигатель», управление проводилось в вентильно – машинных и реостатных системах. Прогресс в области преобразовательной техники позволил приступить к широкой практической реализации электроприводов с более высокими показателями. К таким системам переменного тока могут быть отнесены: «преобразователь частоты - асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором» (ПЧ-АД), «машина двойного питания» (МДП) и другие.

Следует иметь в виду, что любой принудительный способ регулирования частоты вращения асинхронных двигателей приводит к ухудшению их электромеханических свойств, энергетических и других показателей. Количественное ухудшение указанных показателей проявляется в различных системах автоматизированного электропривода неодинаково. Поэтому выбор системы электропривода как для новых машин и установок, так и для модернизации действующих должен базироваться на основе сравнительного анализа основных показателей и с учетом условий эксплуатации. Применительно к приводу центробежных механизмов к таким показателям могут быть отнесены КПД и $\cos\varphi$ установки, стоимость наладки и эксплуатации, влияние привода на качество напряжения в питающей сети, габариты электрооборудования.

В настоящее время разработке систем электропривода переменного тока на современной элементной базе посвящено множество трудов в различных периодических изданиях, опубликован ряд монографий. В данном учебном пособии эти вопросы рассмотрены в отношении большой и специфической группы центробежных механизмов и систематизированы применительно к учебному процессу студентов, специализирующихся по электрификации и автоматизации различных отраслей производства.

1 Системы электропривода центробежных механизмов

1.1 Энергетические соотношения в силовом канале электропривода центробежных механизмов

Центробежные механизмы (ЦМ) являются типичными представителями большого и важного класса промышленных установок, предназначенных для транспортировки жидкостей (насосы) и газов (вентиляторы).

Задачей данного раздела является определение взаимозависимостей параметров электропривода, механизма и трубопровода, на который ЦМ работает.

На рисунке представлена полная функциональная схема автоматизированного электропривода производственного механизма. Система управления СУ привода, включающая в себя силовую (ССУ) и информационную (ИСУ) составляющие, получает питание от сети с параметрами U_c, I_c, f_c и преобразует их для питания двигателя ЭД в соответствии с режимом работы последнего. Передаточный механизм ПМ служит для преобразования механических параметров на валу ЭД – момента M_B и частоты вращения ω_B и передачи их исполнительному механизму ИМ. В замкнутых

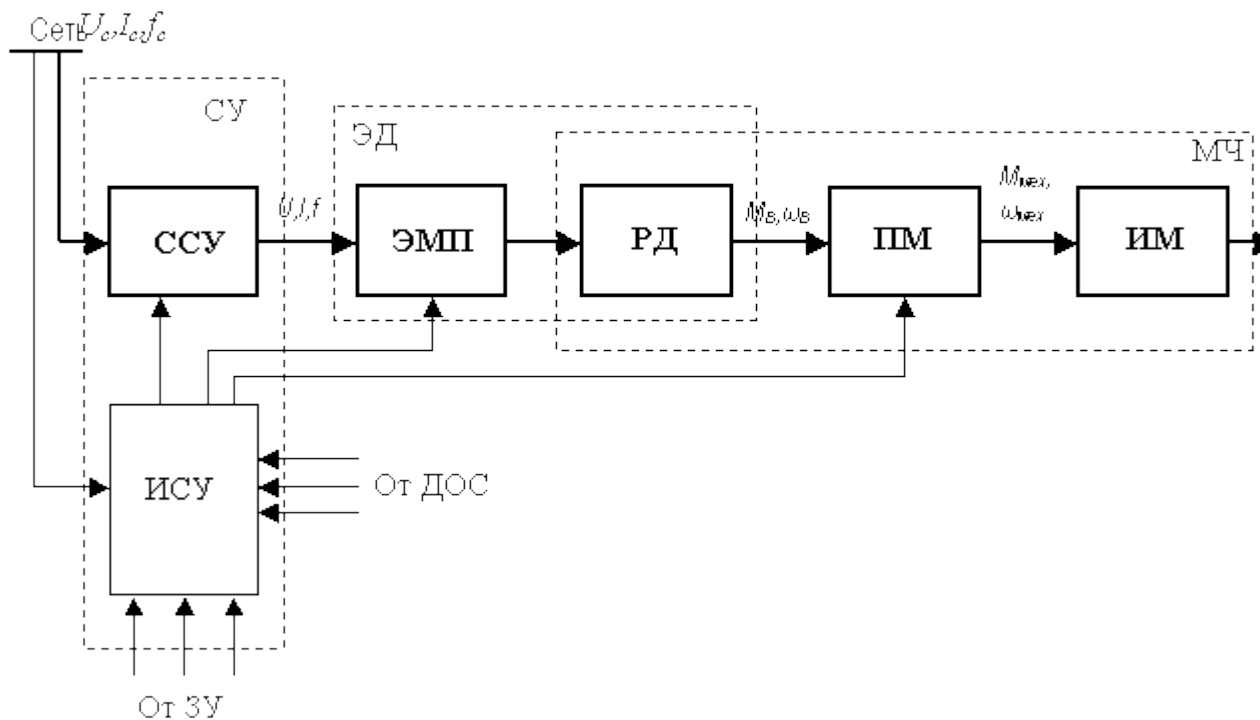


Рисунок 1.1 – Общая функциональная схема автоматизированного электропривода производственного механизма

системах АЭП сигнал управления формируется при сравнении сигналов задающего устройства (ЗУ) и датчиков обратных связей (ДОС). В конкретных агрегатах могут отсутствовать отдельные элементы схемы.

Центробежные механизмы имеют ряд особенностей. Во-первых, ЦМ как исполнительный механизм преобразует механическую мощность, характеризуемую моментом на валу M_B и частотой вращения ω_B , в гидравлическую, которая определяется напором $H_{ЦМ}$ и подачей $Q_{ЦМ}$. Во-вторых, в подавляющем большинстве случаев рабочее колесо ЦМ сопрягается непосредственно с валом двигателя без передаточных устройств. Это позволяет получить максимальные эксплуатационные показатели. Для изменения напора и подачи на выходе агрегата вместо регулируемого электропривода (или одновременно с ним) используется разного рода гидравлическая и пневматическая запорная аппаратура. Электродвигатель, поскольку нас интересует только возможность регулирования M_B и ω_B , представим одним блоком ЭД. С учетом изложенного функциональная схема автоматизированного электропривода центробежного механизма примет вид, представленный на рисунке 2.

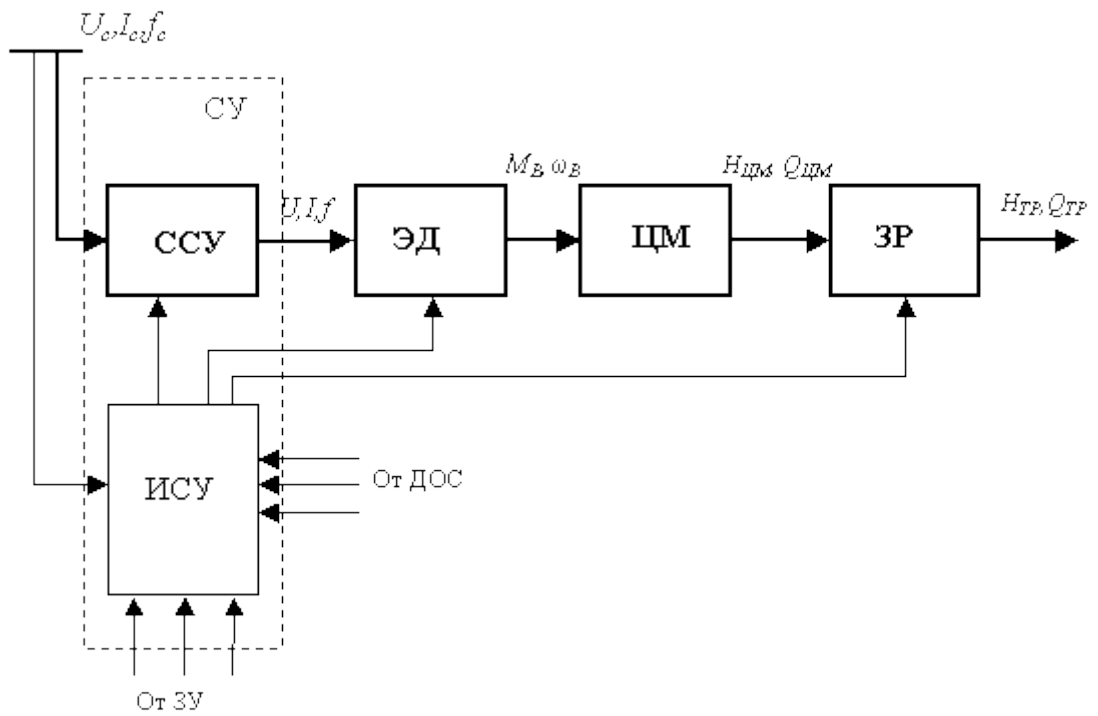
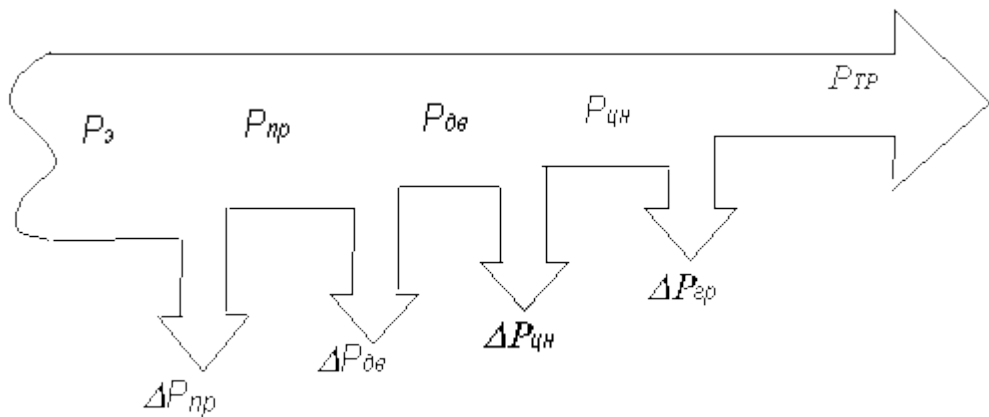


Рисунок 1.2 – Функциональная схема автоматизированного электропривода центробежного механизма

Рассматриваемая система содержит переменные различного характера – электрические, механические, гидравлические (аэродинамические),

поэтому для решения задачи воспользуемся диаграммой мощностей, изображенной на рисунке 3.



$P_{ГР}$ - полезная гидравлическая (аэродинамическая) мощность на входе трубопровода;

$P_{цн}$ - гидравлическая (аэродинамическая) мощность на выходе ЦМ;

$P_{дв}$ - механическая мощность на валу двигателя насоса (вентилятора);

$P_{пр}$ - электрическая мощность, потребляемая двигателем ЦМ;

$P_э$ - электрическая мощность, потребляемая из сети электроприводом ЦМ;

$DP_{зр}, DP_{цн}, DP_{дв}, DP_{пр}$ – потери мощности соответственно в запорном регуляторе, насосе, двигателе и преобразователе.

Рисунок 1.3 – Диаграмма мощностей центробежного механизма

Последовательно рассмотрим составляющие баланса мощностей системы.

Гидравлическая (аэродинамическая) мощность на входе трубопровода равна

$$P_{ГР} = H_{ГР} \times Q_{ГР}, \quad (1.1)$$

где $H_{ГР}$ – давление на входе трубопровода при производительности $Q_{ГР}$.

H_{TP} определяется гидравлической характеристикой трубопровода

$$Z \times Q^a, \quad H_{TP} = H_c + \quad (1.2)$$

где H_c – статический напор, обусловленный разностью уровней начала и конца трубопровода;

Z –параметр, характеризующий гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление трубопровода; степень a обычно принимают в пределах (1,5...2,5).

Напорные характеристики ЦМ приводятся заводом-изготовителем в паспортах, прейскурантах и каталогах. Для аналитических расчетов характеристику можно представить в виде

$$k_H \times Q^2, \quad H_{ЦМ} = H_0 - \quad (1.3)$$

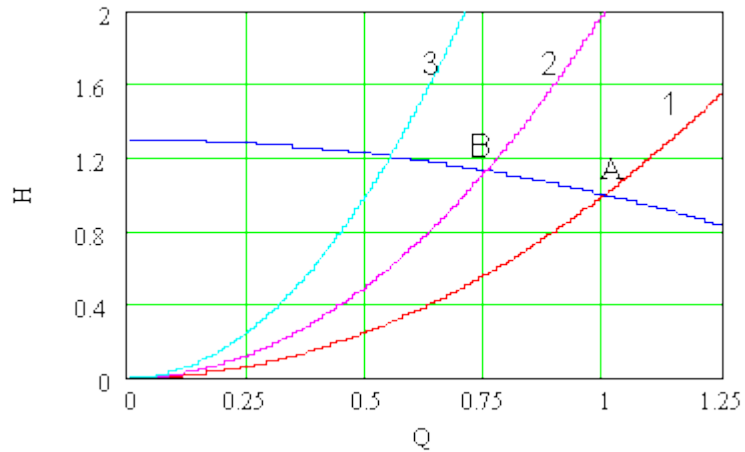
где H_0 - напор ЦМ при закрытой задвижке ($Q = 0$);

k_H - коэффициент, определяемый по паспортной характеристике ЦМ.

В случае, когда ЦМ работает непосредственно на трубопровод («на открытую задвижку») в стационарном режиме

$$P_{ЦМ} = P_{TP},$$

и гидравлические параметры системы определяются точкой пересечения напорных характеристик ЦМ и трубопровода (точка А, рисунок 1.4).



1 – $Z_{гр} = 0$; 2 – $Z_{гр} = 1$; 3 – $Z_{гр} = 3$.

Рисунок 1.4 - Регулирование подачи ЦН дросселированием

В общем случае для обеспечения заданных напора и подачи на выходе ЦН устанавливается запорный гидравлический (аэродинамический) регулятор, на котором теряется мощность $DP_{гр}$. При данном Q

$$DP_{гр} = DH_{гр} \times Q,$$

где $DH_{гр}$ - изменение напора на регуляторе.

В относительных единицах уравнения (2) и (3) примут вид

$$H = H_0(\omega^2 - C_H Q^2), \quad (1.4)$$

$$H = H_C + ZQ^2, \quad (1.5)$$

где ω – угловая скорость вращения, о.е.;

Z - гидравлическое сопротивление трубопровода;

C_H – коэффициент, равный

$$C_H = 1 - \frac{1}{H_0}$$

Совместное решение уравнений (1.4) и (1.5) дает

$$Q = \sqrt{\frac{H_0 \omega^2 - H_C}{C_H H_0 + Z}}, \quad (1.6)$$

$$H = \frac{H_0 (C_H H_C + Z \omega^2)}{C_H H_0 + Z},$$

(1.7)

Гидравлическая мощность на входе трубопровода

$$P_{\text{маг}} = Q_{\text{маг}} H_{\text{маг}} = \frac{H_0 (C_H H_C + Z \omega^2)}{C_H H_0 + Z} \sqrt{\frac{H_0 \omega^2 - H_C}{C_H H_0 + Z}}$$

(1.8)

Из уравнений (1.6) и (1.7) следует, что при заданных характеристиках ЦМ и трубопровода подачу и напор можно регулировать, изменяя гидравлическое сопротивление на входе магистрали Z или частоту вращения рабочего колеса ω .

В первом случае в о.е. $\omega = 1$, а на выходе ЦМ вводится дополнительное гидравлическое сопротивление регулятора $Z_{гр}$, изменяется характеристика трубопровода, и система работает в точке В (рисунок 1.4) с новыми значениями H и Q . Общее сопротивление на выходе насоса (вентилятора)

$$Z = Z_{\text{маг}} + Z_{\text{гр}},$$

где $Z_{гр}$ - характеризует сопротивление гидрорегулятора.

Гидравлическое сопротивление регулятора, необходимое для обеспечения производительности Q ; о.е.

$$z_{гр} = \frac{H_0(1 - Q^2) - H_c}{Q^2}$$

(1.9)

при этом на гидрорегуляторе давление изменится на величину

$$\Delta H = z_{гр} Q^2 = H_0(1 - Q^2) - H_c$$

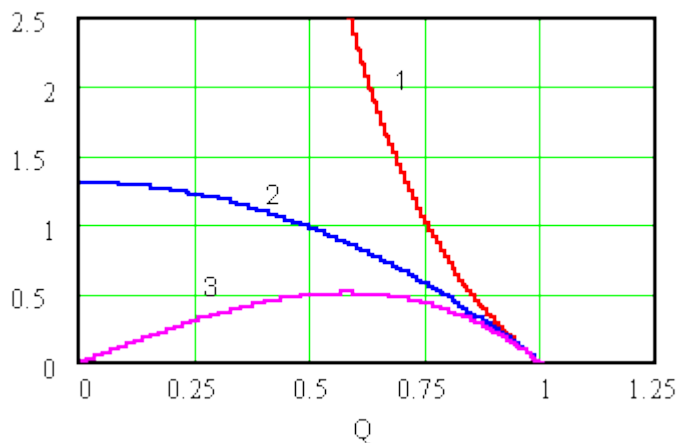
(1.10)

а потери мощности на нем составят

$$\Delta P_{гр} = \Delta H Q = (H_0 - H_c) Q - H_0 Q^3$$

(1.11)

На рисунке 1.5 представлены результаты расчетов, характеризующие изменение сопротивления гидрорегулятора в зависимости от требуемой подачи и соответствующие им изменение напора и потери мощности. Последние зависят от величины H_c (рисунок 1.6) и могут достигать 50% потребляемой мощности (при $H_c=0, H_0=1.3$).



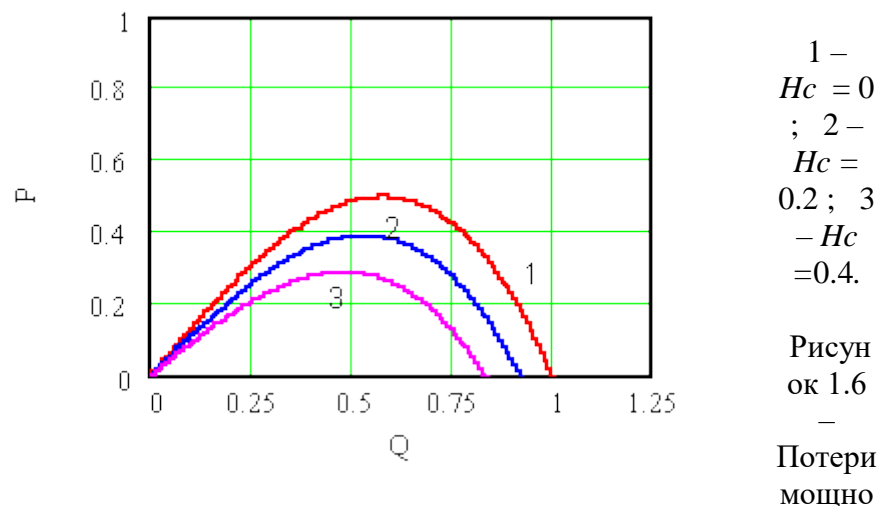
1 - $Z_{гр}$; 2 - $\Delta H_{гр}$; 3 - $\Delta P_{гр}$; $H_c=0, H_0=1.3$.

Рисунок 1.5 - Потери мощности при дросселировании

Относительные значения потерь мощности в гидрорегуляторе снижаются при увеличении величины H_c . Кроме того, при этом пик максимума потерь смещается в зону меньших значений Q , то есть выводится из области активного регулирования подачи.

На рисунке 1.7 представлены соотношения мощностей при регулировании подачи центробежного агрегата, иллюстрирующие чрезвычайно низкую эффективность регулирования подачи ЦМ дросселированием.

Кроме появления потерь мощности в задвижке, при переходе от работы в точке А к работе в точке В снижается КПД самого центробежного агрегата. **Потери мощности в ЦМ** обусловлены различного рода утечками жидкости и газа, преодолением гидравлических сопротивлений при прохождении жидкости через насос, трением в подшипниках, уплотнениях, трением диска колеса ЦМ о жидкость и т.д.



сти при регулировании подачи дросселированием

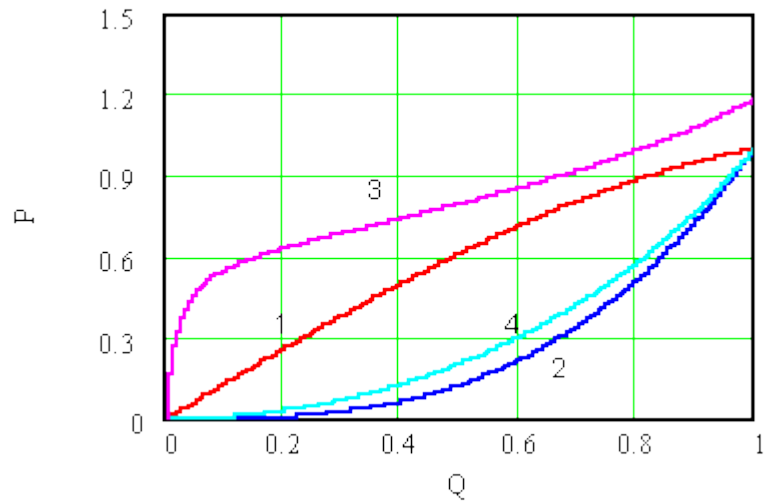


Рисунок 1.7 - Регулирование подачи гидрорегулятором

Изменение КПД ЦМ при регулировании подачи определяется по паспортной характеристике, представляемой заводом – изготовителем. В аналитических расчетах для описания этой кривой используют различные варианты аппроксимации. Так, в [1] предлагается представление зависимости $h(Q)$ в виде

$$\eta_{цм} = (2Q - Q^2) \eta_n \quad (1.12)$$

где η_n – номинальное значение КПД данного ЦМ.

Можно использовать представление КПД как гармонической функции

$$\eta_{цм} = \eta_n \sin\left(k_a \frac{\pi}{2} Q\right) \quad (1.13)$$

где ka – коэффициент аппроксимации.

В [2] характеристику $h(Q)$ представляют в виде

$$\eta_{цм} = kQ - k_1 Q^2$$

где k и k_1 – коэффициенты, значения которых для различных типов ЦМ приведены в [2].

Современные вычислительные средства позволяют просто и с высокой точностью аппроксимировать кривую КПД. Ниже приведен вариант расчета коэффициентов аппроксимации паспортной или

экспериментальной характеристик $h(Q)$ для подпорного насоса 12НДС Н с использованием стандартной подпрограммы Mathcad.

$$\begin{aligned}
 & \text{data} := M1^T \quad X := \text{data} \langle 0 \rangle \quad Y := \text{data} \langle 1 \rangle \\
 & n := \text{rows}(\text{data}) \quad k := 2 \quad z := \text{regress}(X, Y, k) \\
 & \text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad \text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0) \\
 & \text{coeffs}^T = (0.037 \quad 2.118 \quad -1.311) \quad \frac{\sum (\text{fit}(X) - \text{mean}(Y))^2}{\sum (Y - \text{mean}(Y))^2} = 0.992 \\
 & \eta(Q) := 0.037 + 2.118 \cdot Q - 1.311 \cdot Q^2
 \end{aligned}$$

В этом случае кривую $h(Q)$ представляем полиномом второй степени

$$\eta_{\text{вх}}(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 \quad (1.14)$$

Коэффициент корреляции расчетных кривых (рисунок 1.8) и значений

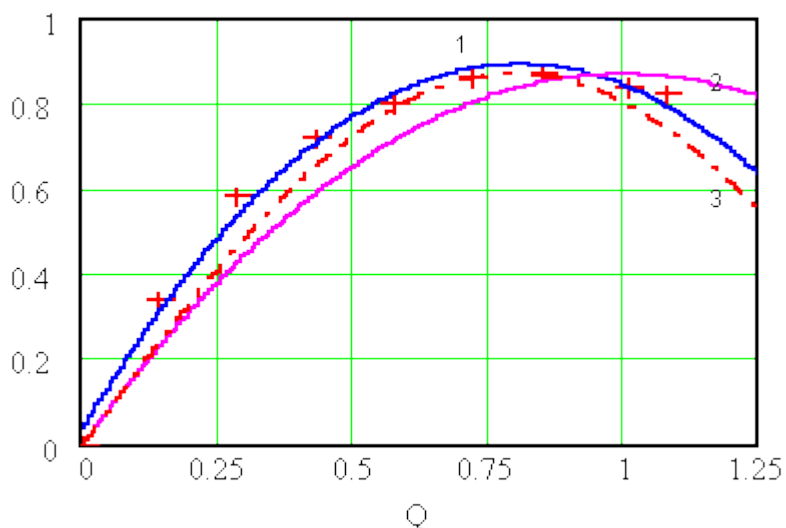


Рисунок 1.8 - Аппроксимация КПД ЦМ

1 – по подпрограмме (1.14); 2 – по формуле (1.12); 3 – по формуле (1.13)

КПД из заводской характеристики (отмечены крестиками) составил 0.979 при использовании выражения (1.12), 0.990 - выражения (1.13).

Расчеты показывают высокую точность последнего варианта (коэффициент корреляции 0.996), который без каких-либо затруднений может быть использован в дальнейших аналитических выводах и расчетах.

Механическая мощность, развиваемая двигателем (мощность, потребляемая ЦМ), связана с характеристиками механизма соотношением

$$P_{дв} = \frac{Q_{цм} H_{цм}}{\eta_{цм} \eta_{гр}}$$

(1.15)

зависимость $P_{дв}(Q)$ представлена на рисунке 5 (кривая 3). Отнесем гидрорегулятор к насосному агрегату. Тогда КПД агрегата в целом определится, как

$$\eta_{на} = \eta_{цм} \eta_{гр}$$

(1.16)

На рисунке 1.9 представлены значения КПД насосного агрегата в целом, рассчитанные в работе для $H_0=1.3$ и различных значений статического подпора

H_c .

1 – $H_c = 0$; 2 – $H_c = 0.2$; 3 – $H_c = 0.4$.

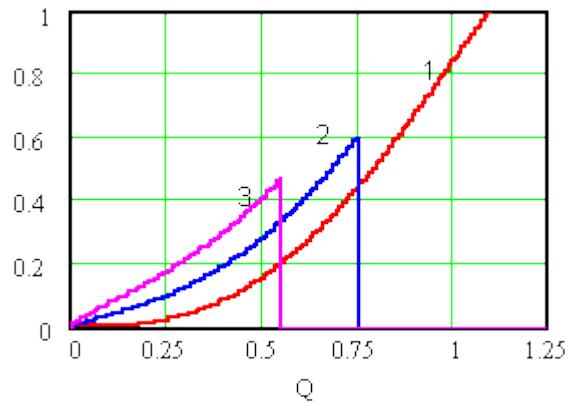


Рисунок 1.9 - КПД насосного агрегата при дроселировании

Применяя регулируемый привод, можно напрямую плавно управлять скоростью вращения рабочего колеса ЦМ и тем самым обеспечить требуемые значения расхода и подачи без использования дроселирующей арматуры. Последняя устанавливается только для вспомогательных целей и в процессе перекачки полностью открыта, что снижает гидравлическое (аэродинамическое) сопротивление сети.

При регулировании подачи изменением частоты вращения колеса ЦМ и полностью открытой задвижке на выходе ($Z=1$) уравнения (1.6), (1.7) и (1.8) примут вид

$$Q = \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}}$$

(1.17)

$$H = C_{\kappa} H_c + \omega^2$$

(1.18)

$$P_{\text{мгз}} = (C_{\kappa} H_c + \omega^2) \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}}$$

(1.19)

В этом случае снижение подачи происходит за счет уменьшения напора, создаваемого агрегатом (рисунок 1.10), при этом исключаются дополнительные потери мощности в гидрорегуляторе и при любом значении подачи

$$P_{\text{цн}} = P_{\text{маг}} .$$

При регулировании частоты вращения рабочего колеса ЦМ w и пренебрежении величиной статического подпора H_c указанные параметры изменяются в соответствии с законами гидравлического подобия, известными из литературы: $Q = w$, $H = w^2$, $P = w^3$ (в о.е.).

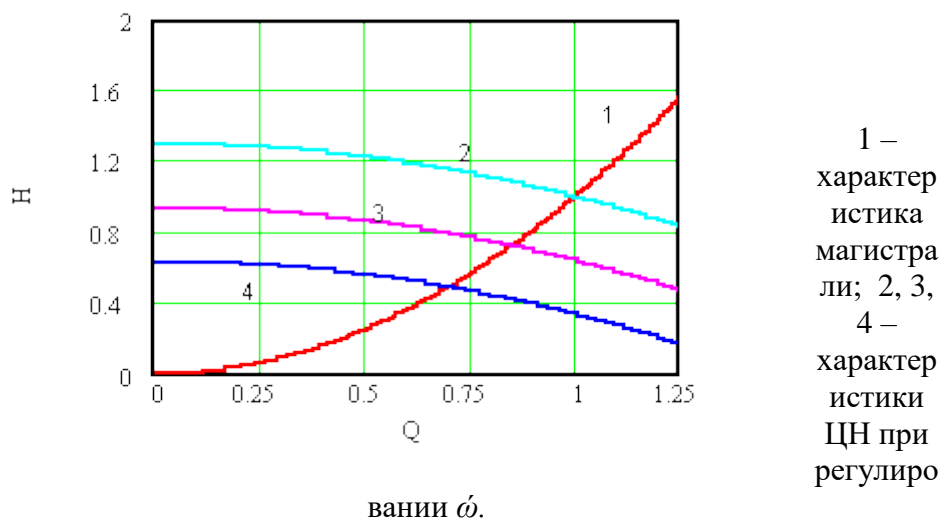
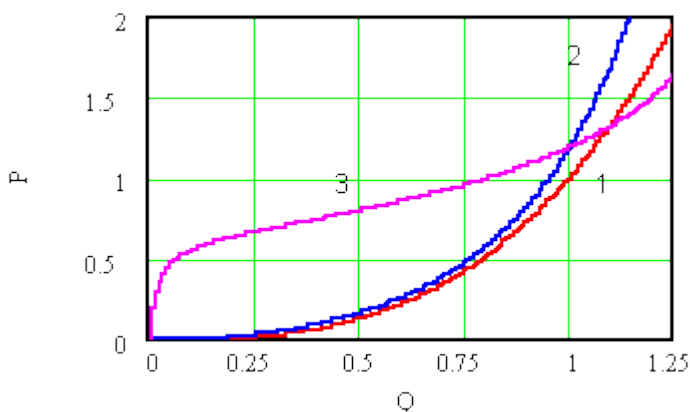


Рисунок 1.10 – Регулирование подачи ЦМ изменением частоты вращения рабочего колеса

Результаты расчета мощности при частотном регулировании ЦН ($H_c=0$, $H_0=1.3$) приведены на рисунке 1.11.



1 – гидравлическая мощность на выходе ЦН; 2 – механическая мощность на валу ЦН при регулировании частоты вращения; 3 – механическая мощность на валу ЦН при регулировании дросселированием

Рисунок 1.11 - Мощность ЦН при регулировании подачи

При расчете мощности на валу насоса использовалась полученная ранее кривая КПД ЦМ. Следует отметить, что КПД с увеличением ω несколько возрастает, так как пропорционально мощности изменяются только гидравлические потери в насосе и потери на дисковое трение. Составляющие потерь на трение в подшипниках и в сальниках не увеличиваются пропорционально мощности насоса.

Еще одним существенным преимуществом регулируемого привода ЦМ является следующее. Электроприводы ЦМ выбираются для обеспечения максимально возможного расхода при сохранении необходимого напора в системе. На выходе установки создается давление (порой значительно превышающее номинальное для системы), которое затем снижается оперативной арматурой до требуемого значения. Снижение давления ЦМ изменением частоты вращения рабочего колеса позволяет уменьшить нагрузки, увеличить срок службы деталей агрегата и снизить утечки в нем.

Современный автоматизированный электропривод ЦМ без принципиальных сложностей может быть включен в систему автоматического управления процессом любой сложности.

Сравнение значений мощности, потребляемой ЦМ с вала двигателя, указывает на значительный экономический эффект от перевода агрегатов на регулируемый привод. Поскольку расчет проведен в относительных единицах и для $H_0=1.3$, что соответствует параметрам подавляющего большинства центробежных агрегатов, мы можем оценить указанный эффект для режима работы конкретного трубопровода, используя полученные выше зависимости.

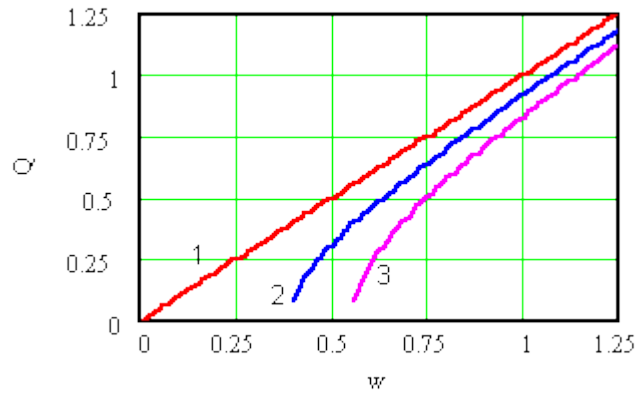
Все приведенные аргументы позволяют считать регулируемый привод ЦМ важнейшим средством энерго- и ресурсосбережения во всех отраслях, использующих трубопроводный транспорт.

1.2 Центробежные механизмы как нагрузка регулируемого привода

При выборе системы регулируемого электропривода ЦМ одним из важных является вопрос о необходимом диапазоне регулирования частоты вращения колеса. Скорость, необходимую для обеспечения подачи Q при заданных H_c и H_0 , определим из (1.17)

$$\omega = \sqrt{Q^2 + \frac{H_c}{H_0}} \quad (1.20)$$

Таким образом, закон гидравлического подобия ($\omega=Q$) необходимо корректировать с учетом значения статического подпора, что показано на рисунке 1.12.



1 – $H_c = 0$; 2 – $H_c = 0.2$; 3 – $H_c = 0.4$.

Рисунок 1.12 - Зависимость подачи от скорости колеса насоса при различных значениях статического подпора

Из (1.20) следует, что с увеличением величины статического подпора уменьшается диапазон регулирования скорости D_n , необходимый для изменения подачи от 0 до номинального значения

$$D_n = \frac{\omega_n}{\omega_{\min}} = \sqrt{\frac{H_o}{H_c}} \quad (1.21)$$

Следует отметить, что, согласно (1.20), при $H_c > 0$ номинальное значение подачи Q будет иметь место при частоте вращения колеса ЦМ больше номинальной.

Основной особенностью центробежных механизмов как нагрузочных машин для электропривода является зависимость статического момента сопротивления на валу от частоты его вращения $M_{cm} = f(\omega)$, называемая механической характеристикой.

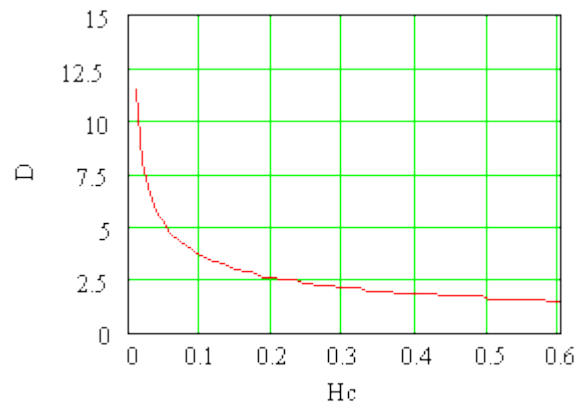


Рисунок 1.13 - Зависимость диапазона регулирования скорости колеса ЦН от величины статического подпора

Вид этой характеристики и механической характеристики привода определяют, в частности, и энергетические параметры работы агрегата. В соответствии с выражениями (1.15) и (1.19) момент на валу приводного двигателя ЦН при полностью открытой задвижке на выходе и регулировании ω равен

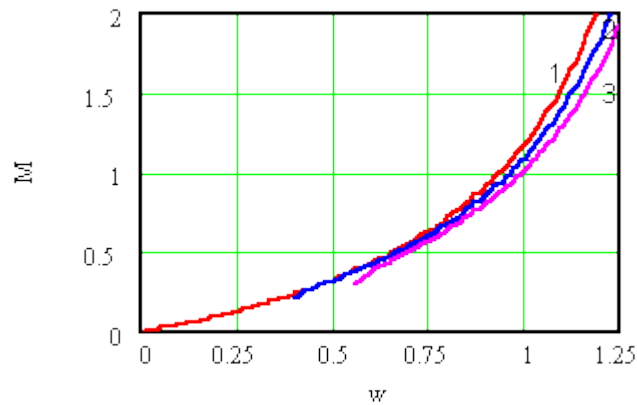
$$M = \frac{P_{\text{мдг}}}{\omega \eta_{\text{цн}}} = \frac{C_{\text{н}} H_c + \omega^2}{\omega \eta_{\text{цн}}(\omega, H_c)} \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} \quad (1.22)$$

В формуле (1.22) необходимо учесть изменение потерь в ЦМ при регулировании ω . Подача изменяется при определенном статическом подпоре H_c в функции ω , согласно (1.17). Тогда полином, аппроксимирующий КПД насоса, примет вид

$$\eta_{\text{цн}}(\omega, H_c) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{\omega^2 - \frac{H_c}{H_0}} + \alpha_2 \left(\omega^2 - \frac{H_c}{H_0} \right) \quad (1.23)$$

На рисунке 1.14 представлены зависимости $M_{\text{см}} = f(\omega)$, рассчитанные по (1.22), (1.23) для различных значений статического подпора.

На характер рассматриваемой зависимости существенным образом влияет вид характеристики сети, на которую работает ЦМ, а именно соотношение между статической и динамической составляющими требуемого напора. С увеличением H_c относительное значение момента сопротивления M_c при той же частоте вращения становится меньше.



$$1 - H_c = 0 ; \quad 2 - H_c = 0.2 ; \quad 3 - H_c = 0.4$$

Рисунок 1.14 - Механические характеристики ЦН

Мощность $P_{э}$, потребляемая электроприводом ЦМ, определяется, кроме характера нагрузки, режимом его работы, схемой и алгоритмами управления. При регулировании давления (расхода) гидрорегулятором электропривод независимо от величины этих параметров обеспечивает максимальный напор и потребление электроэнергии у него изменяется несущественно за счет гидравлических потерь на задвижке и самом насосном агрегате. При применении регулируемого электропривода в соответствии с заданными параметрами снижается скорость вращения и потребление электрической энергии. Дополнительную экономию в этом случае даст и разработка оптимальных по энергосбережению алгоритмов и законов управления приводом. Для расчета энергетических показателей центробежного агрегата в целом необходимо определить потери электрической мощности в двигателе и используемом для регулирования преобразователе, составляющие мощности на входе системы. Важное значение имеет уровень потребления реактивной мощности, определяющий загруженность питающих сетей и потери в них. При использовании для регулирования двигателя вентильных преобразователей учитывается и влияние несинусоидальности напряжений и токов на энергетические и эксплуатационные характеристики привода и на питающую сеть. Соотношения, полученные в данном разделе, являются основой для выбора и расчета систем автоматизированного электропривода ЦМ.

1.3 Системы регулирования частоты вращения электродвигателей центробежных агрегатов

Одной из наиболее эффективных возможностей энергосбережения является создание электроприводов, максимально учитывающих параметры и специфику работы приводного механизма. При выборе того или иного типа регулируемого электропривода для

центробежных агрегатов, наряду с общепринятыми критериями (массогабаритные показатели, стоимость, надежность и т.д.), следует учесть следующие особенности:

- ЦМ не требуют предельной точности и высокого быстродействия при регулировании производительности;

- рабочий диапазон регулирования скорости в подавляющем большинстве случаев невелик;

- значительные (до 10 МВт) установленные мощности и продолжительный режим работы центробежных агрегатов определяют повышенные требования к энергетическим показателям электропривода.

Поэтому из возможных вариантов регулирования следует исключить двигатели постоянного тока, уступающие машинам переменного тока по надежности, стоимости, массогабаритным показателям. Далее будут рассмотрены способы регулирования насосных агрегатов на базе асинхронных и синхронных двигателей.

Частоту вращения ротора электродвигателя переменного тока можно определить, как

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} (1 - s), \quad (1.24)$$

где f - частота питающего тока;

p - число пар полюсов;

s - скольжение.

Изменяя один или несколько параметров, входящих в (25), можно регулировать частоту вращения электродвигателя и, следовательно, насоса. На рисунке 1.15 представлены варианты систем электропривода переменного тока, используемые для центробежной нагрузки.

Питание двигателя **частотно - регулируемого электропривода** (рисунки 1.15,а,б) осуществляется вентильным преобразователем частоты (ПЧ), в котором постоянная частота питающей сети f_1 преобразуется в переменную f_2 . Пропорционально частоте f_2 изменяется частота вращения электродвигателя, подключенного к выходу преобразователя. В настоящее время для реализации частотного управления машинами переменного тока применяют различные варианты преобразователей частоты (ПЧ), отличающиеся принципом действия, схемными решениями, алгоритмами управления и т.д. Наибольшее распространение в электроприводе получили ПЧ со звеном постоянного тока, которые можно подразделить на преобразователи с управляемым выпрямителем и автономными инверторами напряжения или тока (ПЧ с АИ – рисунок 1.15,а) и с неуправляемым выпрямителем и широтно-импульсной

модуляцией выпрямленного напряжения (ПЧ с ШИМ – рисунок 1.15,б). Регулировочные данные приведенных схем практически одинаковы, использование ШИМ позволяет качественно улучшить гармонический состав выходного напряжения, однако увеличение частоты коммутации вентилей в ПЧ с ШИМ приводит к росту потерь в преобразователе.

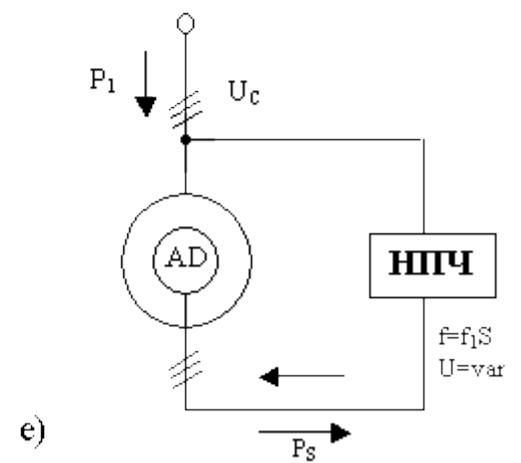
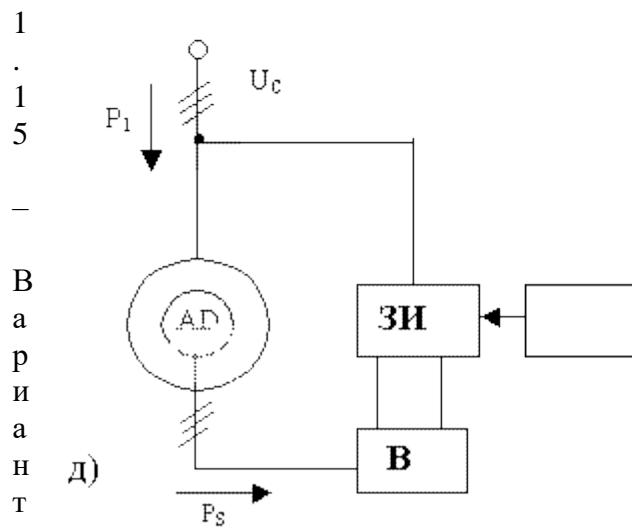
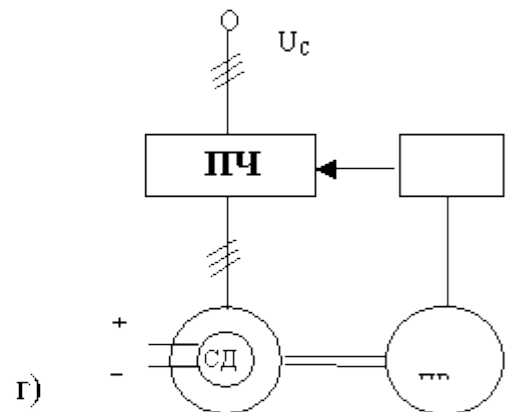
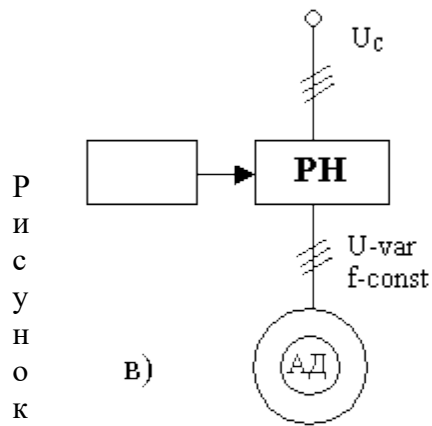
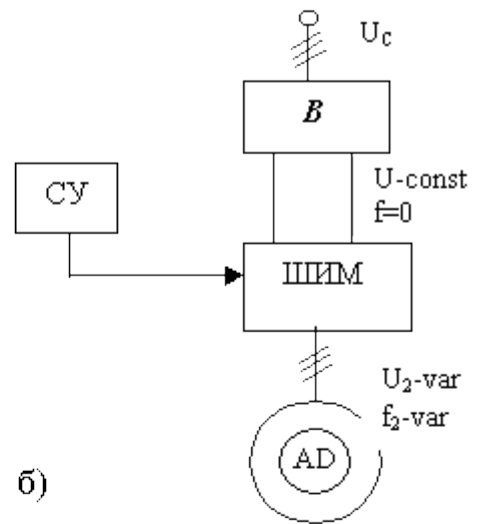
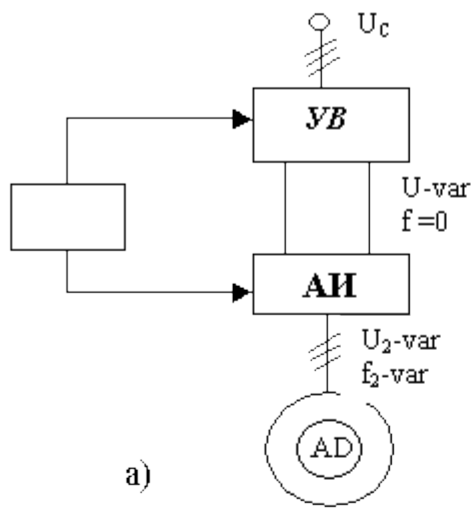
К достоинствам системы ПЧ-АД можно отнести следующее:

-высокий КПД в широком диапазоне регулирования скорости АД, так как он во всем диапазоне регулирования работает с малой величиной скольжения ротора (малыми потерями скольжения);

-хорошие регулировочные свойства, обеспечивающие возможность плавно регулировать скорость и формировать требуемые характеристики и законы регулирования;

-надежность используемого в системе АД с короткозамкнутым ротором.

Наличие в составе электропривода частотного преобразователя дает основание отнести к группе частотных электроприводов и **вентильный двигатель** - электромеханическую систему, состоящую из преобразователя частоты, синхронного электродвигателя и устройства, указывающего положение его ротора в пространстве (ДПР – рисунок 1.15, г). Преобразователь выполнен с явно выраженным звеном постоянного тока и состоит из управляемых выпрямителя и инвертора. Коммутация тиристорных вентилей инвертора в зоне малых частот осуществляется с помощью датчика



Р
и
с
у
н
о
к

1
·
1
5

В
а
р
и
а
н
т
ы

с
и
с

тем электропривода ЦМ

положения ротора, а в зоне частот более 3-5 Гц осуществляется по коммутирующей сверхпереходной ЭДС, получаемой из напряжения на зажимах электродвигателя с помощью узла выделения коммутирующей ЭДС. По принципу действия эта система аналогична электродвигателю постоянного тока, у которого функции коллектора и щеточного аппарата выполняют тиристорный инвертор и датчик положения ротора. Вентильный электродвигатель поэтому называют также и бесколлекторным электродвигателем постоянного тока.

Основным недостатком рассмотренных схем является высокая сложность и стоимость преобразователя, выполняемого на полную мощность электродвигателя. В настоящее время стоимость ПЧ в несколько раз превышает стоимость других типов преобразователей, например, системы АВК. Следует отметить, что стоимость выпускаемых преобразователей частоты значительно завышена также из-за наличия сложных функций, в которых нет необходимости для привода ЦН. Это такие возможности, как прецизионное регулирование на «ползучих» скоростях или формирование сложных пусковых характеристик.

Особые проблемы вызывает использование частотного регулирования мощных ЦН. В высоковольтном (двигатели от 400 кВт и выше выполняются на напряжение 6(10) кВ) преобразователе приходится использовать дорогие и сложные вентили на повышенное напряжение. Для снижения общей стоимости системы используют двухтрансформаторную схему включения низковольтного ПЧ, понижая напряжение на его входе и затем повышая выходное напряжение до необходимого, что также увеличивает стоимость и массо – габаритные показатели установки..

Регулирование частоты вращения электродвигателей изменением напряжения на его статоре осуществляется обычно системой «тиристорный регулятор напряжения – АД (ТРН - АД)», изображенной на рисунке 1.15,в.

Вращающий момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения, подводимого к электродвигателю. При изменении напряжения значение критического скольжения не изменяется, поэтому максимальный момент при любых изменениях напряжения соответствует одному и тому же значению критического скольжения, равному примерно 0,1-0,2. Этим определяется сравнительно узкий диапазон регулирования по частоте вращения, который может обеспечить этот способ регулирования. Пределы регулирования можно увеличить, используя АД с повышенным скольжением или включение добавочного сопротивления в цепь фазного ротора, а также применяя системы управления, замкнутые по скорости.

При относительной дешевизне и простоте в обслуживании, основным недостатком данного варианта является то, что энергия скольжения рассеивается в двигателе, а коэффициент мощности системы уменьшается с увеличением скольжения двигателя.

Интерес представляет применение системы «ГРН-АД» для реализации энергосберегающих режимов в зоне номинальной скорости при недогрузках, управления режимами пуска и торможения, а также для электроприводов с режимами кратковременного снижения скорости.

Электропривод центробежных механизмов является основной областью, где системам частотного регулирования асинхронных двигателей (ПЧ-АД) имеется альтернатива – **каскадные схемы управления** [3,5,6]. Наряду с известными преимуществами, первый вариант имеет и значительные недостатки: большая мощность преобразователя, которая независимо от диапазона регулирования скорости рассчитывается на полную мощность двигателя, высокая сложность силовой схемы и системы управления и обусловленная всем этим высокая стоимость.

В электроприводе по схеме **асинхронного вентильного каскада** (АВК – рисунок 1.15,д) регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется изменением противо-ЭДС инвертора, вводимой в цепь выпрямленного тока ротора асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Энергия скольжения ротора рекуперируется в питающую электрическую сеть через преобразователь АВК, который состоит из двух основных элементов: неуправляемого выпрямителя и управляемого инвертора. Согласующий трансформатор необходим в том случае, если номинальное напряжение питающей сети отличается от номинального напряжения преобразователя АВК.

Основными достоинствами данной системы по сравнению с вариантом ПЧ-АД являются меньшая установленная мощность преобразователя, соответствующая глубине регулирования скорости, и простота управления. Как положительное качество отмечается также возможность при аварии в преобразователе перейти в нерегулируемый режим (закоротив ротор) или в режим с пониженной частотой вращения при введении в цепь ротора резистора.

Особенно заметными эти преимущества становятся для центробежных механизмов, момент сопротивления которых зависит от частоты вращения рабочего колеса. Определим мощность скольжения электропривода центробежного насоса из выражения для механической характеристики ЦН (1.22). В первом разделе номинальную частоту вращения ротора в относительных единицах мы приняли за $\omega_{\text{н*}} = 1$. Тогда частота вращения электромагнитного поля статора

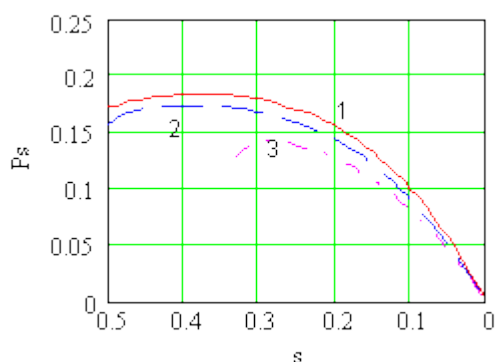
$$\omega_{\text{п*}} = \frac{1}{1 - s_{\text{н}}},$$

а частоту вращения ротора в относительных единицах можно записать, как

$$\omega_{*} = \frac{1 - s}{1 - s_{\text{н}}}.$$

После подстановки в (1.22) и простых преобразований получим

$$P_s = \frac{s(C_n H_c + \left(\frac{1-s}{1-s_n}\right)^2)}{(1-s_n) \eta_{цн}(\omega, H_c)} \sqrt{1 - \frac{H_c}{H_o} \left(\frac{1-s_n}{1-s}\right)^2} \quad (1.25)$$



Зависимость величины мощности, возвращаемой в сеть через преобразователь, от диапазона регулирования ЦН рассчитана по (1.25) в относительных единицах и представлена на рисунке 1.16.

1 - $H_c=0$; 2 - $H_c=0.3$; 3 - $H_c=0.6$

Рисунок 1.16

В рабочем диапазоне регулирования ЦН эта мощность не превышает 18% номинальной мощности двигателя [3,6] и уменьшается с увеличением H_c . Таким образом, установленная мощность преобразователя АВК в 4-5 раз меньше, чем в системе ПЧ-АД. Одновременно это ведет к снижению искажающих составляющих токов и напряжений, так как преобразованию подвергается только часть потребляемой приводом мощности.

Еще одним преимуществом каскадных схем является следующее. Выше указывалось, что для регулирования высоковольтных двигателей в схеме ПЧ –АД используется двухтрансформаторная схема ПЧ, что связано с отсутствием надежных и недорогих вентилях для коммутаций напряжений 6(10) кВ. Максимальное значение ЭДС ротора $E_{2к}$ таких двигателей лежит в пределах 1...1.5 кВ, а с учетом диапазона регулирования ЦН ($E_{2max} = E_{2к} s_{max}$) не превышает 600 В. Это позволяет использовать в каскадных схемах низковольтную элементную базу для преобразователей.

Наиболее общим вариантом привода с регулированием мощности скольжения является **машина двойного питания (МДП – рисунок 1.15,е)** – асинхронный двигатель, к контактным кольцам ротора которого подводится регулируемое по амплитуде, частоте и фазе напряжение. Сохраняя все преимущества АВК, МДП выгодно отличается более высоким КПД, обусловленным однократным преобразованием энергии скольжения в непосредственном преобразователе частоты (НПЧ). Кроме того, возможность регулирования реактивной мощности по цепи статора позволяет принципиально обеспечить работу привода с единичным (и даже опережающим, как будет показано ниже) коэффициентом мощности. Аналитические соотношения для такого варианта известны [3,5] и используются для теоретических исследований и разработок алгоритмов управления и отдельных схемных решений. Мощность преобразователя МДП, благодаря двухзонному регулированию скорости, ниже, чем у АВК, но система управления сложнее. Учитывая бурное развитие силовой электроники, можно предположить МДП наиболее перспективным вариантом привода ЦН.

Изложенное позволяет утверждать, что каскадные схемы электропривода переменного тока наиболее адаптированы к центробежной нагрузке, в них преобразуется не вся мощность, подводимая к насосному агрегату, а только рекуперлируемая мощность скольжения, которая в приводе насосных агрегатов не превышает 18% номинальной мощности электропривода; ограниченный диапазон регулирования насосов позволяет использовать менее мощные и более простые преобразователи, чем при частотном регулировании.

В данном пособии рассматриваются схемные решения и характеристики перечисленных систем электропривода.

2 Частотно – регулируемый электропривод центробежных механизмов

2.1 Законы частотного регулирования

Основная особенность при регулировании АД заключается в том, что необходимо изменять напряжение U на статоре как в функции момента статических M_c сопротивлений, так и в соответствии с изменением частоты [4,7,9].

$$M_x = \frac{m \cdot U^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} = \frac{mU^2}{2 \cdot 2\pi f (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \cong \frac{mU^2}{4\pi f \cdot x_k} \cong c \cdot \frac{U^2}{f^2},$$

Пренебрегая активным сопротивлением r_1 статорной цепи, имеем значение критического M_k момента двигателя

(2.1)

где x_k – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

ЭДС обмотки статора асинхронного двигателя пропорциональна частоте f питающей сети и потоку F машины

$$E = cFf. \quad (2.2)$$

Пренебрегая падением напряжения на обмотках статора, т.е. полагая

$$\Delta U_1 = I_1 \cdot \sqrt{r_1^2 + x_1^2} \approx 0,$$

имеем $U_1 \gg E_1$ и $U_1 \gg kFf_1$, (2.3)

где индуктивное сопротивление статорной цепи обозначено как x_1 .

Из соотношения следует, что при неизменном напряжении источника питания U_1 и регулировании его частоты изменяется магнитный поток машины. При уменьшении f_1 поток F растет, сказывается насыщение, увеличивается ток намагничивания, ухудшаются энергетические показатели двигателя и его недопустимый нагрев. Увеличение f_1 приводит к снижению F при постоянстве U , а при постоянном моменте нагрузки в

соответствии с выражением $M = kFI_2 \cos j$ приводит к возрастанию тока I_2 ротора, т.е. перегрузке его обмоток, снижению максимального момента и перегрузочной способности. По этим соображениям необходимо изменение напряжения статора в функции нагрузки и частоты для обеспечения $F = const$. При этом регулирование напряжения в функции частоты возможно в разомкнутых системах. Регулирование в функции частоты и нагрева возможно в замкнутых системах.

Регулирование скорости возможно вверх от основной в диапазоне 2:1 и ограничивается прочностью крепления обмоток ротора. Регулирование вниз от основной ограничено 15:1, что вызвано сложностью реализации источника питания с низкой частотой. Частотное управление может осуществляться в диапазоне до 30:1. Использование двигателей специальной конструкции расширяет диапазон за счет увеличения верхнего предела скорости.

(2.4)

Рассмотрим теперь закон изменения напряжения при частотном регулировании скорости. При этом исходят из условия сохранения перегрузочной способности асинхронного двигателя, т.е. кратности критического момента M_k к моменту статической нагрузки M_c . С учетом отмеченного ранее имеем

$$\frac{M_{k1} \sqrt{M_{c1}}}{M_{k2} \sqrt{M_{c2}}} = \frac{M_{k1} c F_{21}^2}{M_{k2} c F_{22}^2} \cdot \frac{f_2^2}{c U_2^2}, \quad (2.6)$$

В соотношениях (2.4 – 2.6) отдельные величины соответствуют: M_{k1} , M_{c1} – критический момент, статический момент при работе на характеристике с частотой питающей сети f_1 ; M_{k2} , M_{c2} – критический момент, статический момент при работе на характеристике с частотой питающей сети f_2 .

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \qquad \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \frac{U}{f} = Const$$

Если объект управления имеет регулирование при постоянстве момента, то

из соотношения (2.6) имеем $M_{k1} = M_{c2} = Const.$

Если объект управления имеет регулирование при постоянстве мощности, то имеем

$$P_{c1} = M_{c1}w_1 P_{c2} = M_{c2}w_2 P_{c1} = P_{c2}.$$

Отдельным скоростям вращения w_1 и w_2 соответствуют мощности P_{c1} , P_{c2} (M_{c1} , M_{c2}) Преобразовывая соотношение (2.6), имеем

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{P_{c1}\omega_2}{\omega_1 P_{c2}}} \cdot \frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{2\pi f_2}{2\pi f_1}} \cdot \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{f_1}}{\sqrt{f_2}} \quad \text{и} \quad \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_2}{\sqrt{f_2}} = \frac{U}{\sqrt{f}} = Const. \quad (2.7)$$

При вентиляторном моменте закон регулирования напряжения определяется по соотношению (2.5)

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{cf_1^2}{cf_2^2}} \cdot \frac{f_1}{f_2} = \frac{f_1^2}{f_2^2}, \quad \frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_2}{f_2^2} = Const. \quad (2.8)$$

$$M_{c1} \gg kw_1^2 \gg cf_1^2, \quad M_{c2} \gg kw_2^2 \gg cf_2^2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{cf_1}{cf_2}} \cdot \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{f_1^3}}{\sqrt{f_2^3}},$$

При моменте, пропорциональном скорости, имеем регулирование напряжения по соотношению

(2.9)

$$M_{c1} \gg kw_1 \gg cf_1,$$

$$M_{c2} \gg kw_2 \gg cf_2,$$

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1^3}} = \frac{U_2}{\sqrt{f_2^3}} = Const.$$

Механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости для различных объектов управления имеют вид, представленный на рисунках 2.1, 2.2, 2.3.

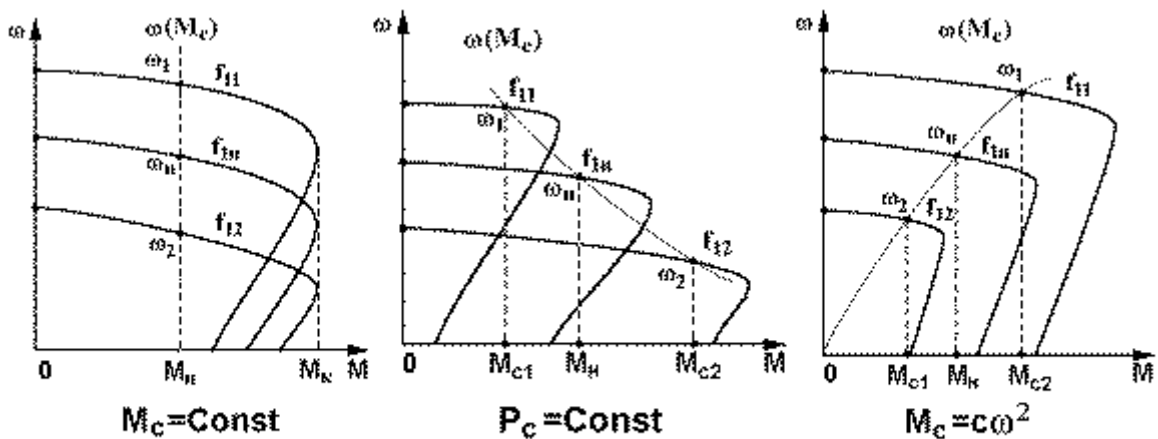


Рисунок 2.1

Рисунок 2.2

Рисунок 2.3 37

Итак, при объектах управления с постоянным моментом статической нагрузки $M_c = Const$, напряжение источника питания должно изменяться

пропорционально его частоте; $U/f = const$ при объектах управления, требующих регулирования скорости при постоянстве мощности $P_c = Const$, закон управления будет $U/\dot{\omega} = const$, при вентиляторной нагрузке закон управления соответствует $U/f^2 = const$. По этим соображениям наибольшее распространение метод регулирования получил для механизмов $M_c = Const$, хотя в принципе использование функциональных преобразователей позволяет реализовать любой из этих законов.

$$S_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}.$$

(2.10)

Заметим, что с понижением частоты f растет критическое скольжение S_k , поскольку снижается значение индуктивного сопротивления x_k .

Критический момент $M_{к.д}$ в двигательном режиме при снижении f становится меньше, т.к. надо снижать U на статоре. В генераторном режиме критический момент $M_{к.г}$ возрастает, пусковой момент при снижении частоты несколько увеличивается, достигает максимума и далее падает. Понижение момента наблюдается на низких частотах и объясняется относительным увеличением активного сопротивления, а также снижением магнитного потока, вызываемого падением напряжения на статоре. Последнее компенсируется увеличением U на низких частотах.

2.2 Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями

В настоящее время для реализации частотного управления машинами переменного тока применяют различные варианты преобразователей

частоты (ПЧ), отличающихся принципом действия, схемными решениями, алгоритмами управления и т.д. Исключив из рассмотрения применявшиеся ранее электромашинные ПЧ с известными их недостатками, остановимся на современных статических преобразователях [4,7,9].

По принципу формирования выходного напряжения или тока ПЧ можно подразделить на непосредственные преобразователи частоты (НПЧ, или циклоконвертеры) и ПЧ со звеном постоянного тока.

В НПЧ выходная кривая переменного напряжения (или тока) необходимой частоты, амплитуды и фазы формируется из кривых напряжения многофазной системы переменного тока на входе. В устройствах данного типа функции выпрямления напряжения сети и его преобразование в напряжение или ток требуемой частоты выполняются в одном устройстве. Это обуславливает однократное преобразование энергии и высокое значение КПД, малые габариты и массу. Преобразователи частоты с непосредственной связью могут выполняться по тем же схемам, что и выпрямители (однофазные, многофазные, нулевые, мостовые). Для уяснения принципа преобразования на рисунке 2.4 приведена простейшая схема НПЧ с непосредственной связью, осуществляющего преобразование трехфазного напряжения промышленной частоты f_1 в однофазное напряжение регулируемой частоты f_2 .

