

УДК 68-83-52:621.9

## СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

*Жорняк А.Э., асп., Блохин И.В., студент*

*Запорожский национальный технический университет*

*69063, г. Запорожье, ул. Жуковского, 64*

*E-mail: [vazilinys@mail.ru](mailto:vazilinys@mail.ru)*

Проведено аналіз різних технічних рішень і методів регулювання електропривода високовольтних перетворювачів частоти в різних галузях промисловості. Розглянуті перспективи розвитку різних перетворювачів з метою енергозбереження.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый электропривод, высоковольтный преобразователь, магистральный нефтепровод, насосная станция, водоснабжение.

The variety technical deception analysis and frequency high-voltage converter electric drive control methods were done for varying branch of industry. The perspectives of varying converter development were soon for energy serving.

**Key words:** variable-frequency electric drive, high-voltage converter, oil pipeline pumping station, water supply.

**Введение.** Известно, что показатель технического уровня развития и эффективности функционирования экономики различных стран мира принято оценивать по такому интегральному показателю, как процент использования электроэнергии в преобразованном виде. Этот показатель в технически развитых странах мира достигает 40-50% с тенденцией роста 60%, а в Украине его величина не превышает 30% [7].

**Анализ предыдущих исследований.** Исследования, связанные с электроприводом определяют перспективу дальнейшего развития практически всех отраслей хозяйственной деятельности человечества. Общеизвестен факт, что электропривод потребляет порядка двух третей электроэнергии, а его доля в приводе механизмов превышает девяносто процентов [1-6, 9]. Особенно заметно роль электропривода проявилась в последние десятилетия, когда в полный рост встала проблема энергосбережения. Это привело к тому, что наряду с традиционными отраслями промышленности (металлорежущие станки, робототехнические комплексы, металлургическое производство и т.п.), регулируемый электропривод стал внедряться в те сферы производства, где применялся нерегулируемый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Предполагается, что к 2010 г. в развитых странах соотношение нерегулируемого и регулируемого приводов составит 50 процентов. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует о высокой эффективности регулируемого электропривода в системах водоснабжения, теплоснабжения, вентиляции, воздушного отопления зданий. Например, в водоснабжении экономия электроэнергии достигает до 50%, воды до 15%, тепла до 10% и более, сокращается вдвое ремонт аппаратуры, исключаются гидравлические удары в системах водоснабжения, обеспечивается удобная диспетчеризация и учет энергоносителей. Срок окупаемости новой техники,

как правило, не превышает двух лет.

По данным консалтинговой группы ARCAdvisoryGroup (США), в 2004 году мировой рынок регулируемых электроприводов оценивался примерно в 2,5 млрд USD и в ближайшие несколько лет будет расти ежегодно на 5,3% [5].

В настоящее время модернизация различных действующих комплексов проводится с заменой систем с числовым программным управлением (ЧПУ), электроприводов, двигателей и измерительных систем. При выборе конструктивных решений оборудования должна учитываться необходимость создания гибкой системы с широкими возможностями расширения системо- и схемотехнических характеристик, чему удовлетворяет продукция ведущих электротехнических фирм Японии, Китая, Германии и др., в т.ч. фирмы Siemens, оборудование которой эксплуатируется в системах автоматизации процессов во всем мире. При разработке оборудования для различных технологических процессов на современном этапе развития широко используются высоковольтные преобразователи частоты с микроконтроллерным управлением [6].

Такие работы проводит ряд ведущих фирм: ABB, Siemens, Allen-Bradley, Toshiba, Mitsubishi, Robicon, Ansaldo, Alstom, ESTEL, GE, Hyundai, Lenze, XЭМЗ, Danfoss, Shneider Electric и др.

**Цель работы** – анализ различных технических решений и методов регулирования электропривода высоковольтных преобразователей частоты в различных отраслях промышленности.

**Материал и результаты исследования.** Практика проектирования и опыт эксплуатации показывают, что при выборе ВПЧ нужно учитывать влияние высших гармоник на потери в двигателе, его допустимую нагрузку, а также изоляцию статора. В системе «ВПЧ – асинхронный двигатель» необходимо учитывать снижение допустимого момента вследствие дополнительных потерь из-за высших

гармоник в токе автономного инвертора и ухудшения условий охлаждения самовентилируемых двигателей при работе в диапазоне регулирования частоты вращения. Это ограничение не столь критично для частотно-регулируемых электроприводов турбомеханизмов с квадратичной характеристикой момента сопротивления, поскольку в этом случае при снижении частоты вращения активно снижается ток нагрузки двигателя.

Решение, которое наиболее эффективно обеспечивает электромагнитную совместимость инвертора и электродвигателя, – это применение широтно-импульсной модуляции (ШИМ) при управлении инвертором. ШИМ позволяет сформировать близкий к синусоидальному ток в асинхронном двигателе с суммарными нелинейными искажениями (total harmonic distortion) THD I 5-6% [5].

Хотя круг рациональных технических решений и схем ВПЧ с автономными инверторами тока и напряжения уже определен, но процесс их совершенствования непрерывно продолжается. С одной стороны, их характеристики в значительной мере определяют технико-экономические показатели электропривода в целом, а с другой – существенное влияние на этот процесс оказывает появление на рынке новых компонентов. Наконец, такой немаловажный фактор, как применение компьютерного управления и специализированных микропроцессорных контроллеров, позволяет формировать улучшенные характеристики регулируемого электропривода. Создание силовых полупроводниковых приборов с новыми свойствами и характеристиками расширяет возможности регулируемых электроприводов, а использование достижений микропроцессорной и компьютерной техники принципиально изменило элементную базу, функциональные возможности и «интеллект» систем управления электроприводами.

Автономные инверторы как составная часть ВПЧ выполняются по следующим принципиальным схемам:

- автономный инвертор тока (АИТ) по мостовой схеме на SCR-тиристорах (включаемых по управлению и выключаемых с помощью конденсаторов);
- АИТ на полностью управляемых (включаемых и выключаемых по управлению) симметричных тиристорах (GTO, SGCT);
- автономный инвертор напряжения (АИН) с тремя уровнями напряжения (3-level) и коммутацией в «звезду» (с фиксированной нулевой точкой или фиксированной нейтралью (Neutral-Point Clamped – NPC));
- АИН с четырьмя уровнями напряжения (4-level);
- выполнение АИН многоуровневым (Multi-level) [5].

Несмотря на различия в технической политике фирм в области создания электроприводов с ВПЧ, можно выделить следующие тенденции:

- обеспечение электромагнитной совместимости автономного инвертора и асинхронного двигателя,

что позволяет использовать стандартные двигатели практически без их разгрузки по мощности;

- оптимизация параметров высоковольтного «вентилля», состоящего из последовательно соединенных силовых полупроводниковых приборов, что особенно важно при применении приборов нового типа (IGBT, GTO, IGCT, SGCT);

- диагностика вентиляционного оборудования преобразователя, обеспечивающая превентивный контроль силовой схемы;

- совершенствование функций микропроцессорного контроллера;

- расширение возможностей (опций), предоставляемых заказчику для различных технологических применений высоковольтного частотно-регулируемого электропривода (насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры);

- совершенствование тест-контроля элементов оборудования и выходного контроля преобразователь частоты;

- применение новых конструкционных материалов, оптоэлектроники, совершенствование системы охлаждения силовых полупроводниковых приборов;

- обеспечение электромагнитной совместимости высоковольтных преобразователей с системой электроснабжения и соответствия показателей качества электроэнергии действующим стандартам [12].

Магистральные насосы широко используются, в том числе для перекачки газа и нефти. По данным, приведенным в [8] (рис. 1, 2), представляется возрастная структура магистральных нефтепроводов России, находящихся в эксплуатации более 10 лет. Из процентного соотношения газо- и нефтепроводов, находящихся в настоящий момент в эксплуатации, видно, что большая часть оборудования требует модернизации. Она направлена на повышение надежности и качества работы технологического оборудования путем замены устаревших систем и блоков на более новые, усовершенствованные и надежные при работе, и путем их конструктивных улучшений [6].

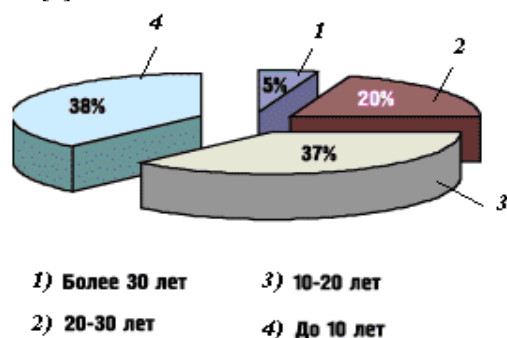


Рисунок 1 – Структура магистральных нефтепроводов, находящихся в эксплуатации

Как показывают исследования, приведенные в различных литературных источниках [8-10], частотно-регулируемый электропривод в насосных станциях по перекачке жидкостей имеет ряд отличительных особенностей. Это связано с массовым использованием центробежных конструкций насо-

сов, которые отличаются тем, что для них расход пропорционален частоте оборотов крыльчатки, давление пропорционально квадрату числа оборотов, а потребляемая мощность – кубической степени.

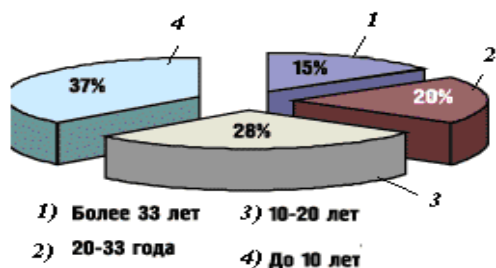


Рисунок 2 – Структура магистральных газопроводов, находящихся в эксплуатации

Режим экономии электроэнергии в насосных станциях с асинхронным приводом показан на рис. 2, где выходное давление насоса в зависимости от расхода воды описывается падающей квадратичной кривой и показано на рисунке вверху. Гидравлические характеристики водопроводной магистрали зависят от числа включенных потребителей и описываются возрастающими квадратичными кривыми. На рис. 3 горизонтальная прямая соответствует нормативному напору (50%), полезные затраты энергии при максимальном и минимальном водоразборе соответственно равны  $Q_2H_2$  и  $Q_1H_1$  [10].

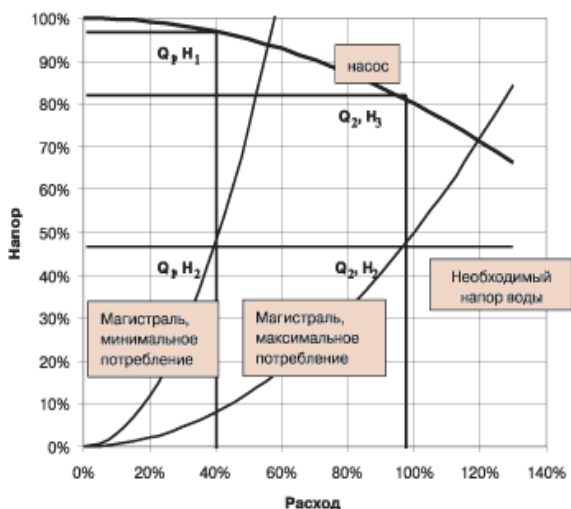


Рисунок 3 – Гидравлические характеристики насоса и магистрали. Общие затраты энергии соответственно равны  $Q_2H_3$  и  $Q_1H_1$

Эффективность насосного агрегата в рабочем диапазоне в основном определяется способом регулирования и характеристиками системы. При этом требуется, чтобы в рабочей точке достигался максимальный КПД агрегата. Если изменяется, например, расход или давление, тогда необходимо скорректировать механическую характеристику насоса или характеристики системы в целом. При периодической работе насосного агрегата (при управлении в

старт-стопном режиме) демпфирующее устройство обеспечивает поддержание требуемого технологического параметра, которое компенсирует броски и провалы потока жидкости при пуске и остановке насоса. Однако, превышение в 5 - 7 раз номинального значения пускового тока электродвигателя при прямом пуске негативно сказывается на ресурсе всего электрооборудования [10].

Альтернативой такому способу управления является регулирование давления и расхода воды в напорном трубопроводе, получившее название дросселирования. Суть его в том, чтобы ограничить поперечное сечение выпускного тракта насоса с помощью дроссельной задвижки [11]. На рис. 4 показано, что скорость вращения рабочего колеса насоса остается практически неизменной, при этом асинхронный двигатель работает непосредственно от сети, и его скорость на 5 - 7 % отличается от синхронной частоты. Потребление электроэнергии двигателем пропорционально производительности насоса.

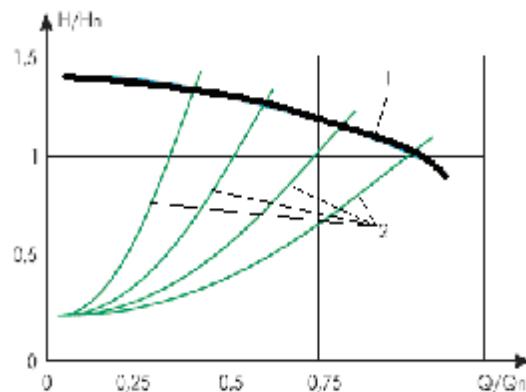


Рисунок 4 – Механическая характеристика насоса и изменение характеристики системы:

$H/H_n$  – напор жидкости в безразмерных единицах;  
 $Q/Q_n$  – расход воды в безразмерных единицах;  
1 – характеристика насоса; 2 – характеристика трубопровода для различных положений задвижки

Однако на практике часто встречается совместная работа нескольких параллельно работающих насосных агрегатов на один напорный трубопровод. Этот метод регулирования обеспечивает качественное управление асинхронными электродвигателями в широком диапазоне изменения частоты и позволяет снизить непроизводительное потребление электроэнергии. На рис. 5 показано, как изменяется механическая характеристика насоса в зависимости от частоты вращения электродвигателя.

Экономии электроэнергии можно достичь при применении центробежных насосов, например в коммунальном хозяйстве. В [7] приводится пример сравнения затрат электроэнергии в системе водоснабжения при регулировании с помощью дросселирования и при использовании регулируемого по скорости электропривода насоса. Для создания в системе расхода воды  $Q$  при регулировании с помощью дросселирования напор  $H_2$  достигается за счет потерь на заслонке:  $\Delta H = H_1 - H_2$ . Потребляемая

насосом мощность в этом случае будет равна  $P_1$ . Если регулировать расход воды с помощью преобразователя частоты, то расход воды  $Q$  и напор  $H_2$  будет достигаться за счет управления скоростью вращения двигателя.

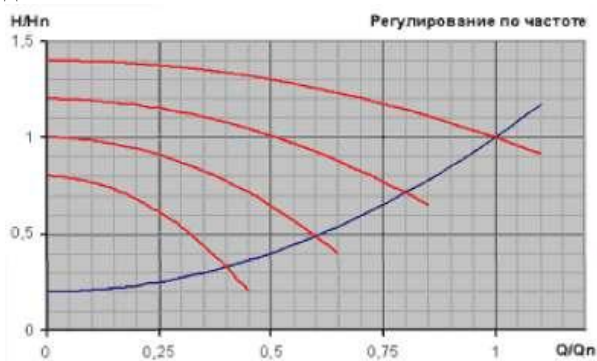


Рисунок 5 – Изменение механической характеристики насоса в зависимости от частоты вращения электродвигателя

На рис. 6 дается сравнительная характеристика производительности насосов при различных методах регулирования, из которого видно, что наиболее эффективным с точки зрения потерь энергии является частотно-регулируемый метод.

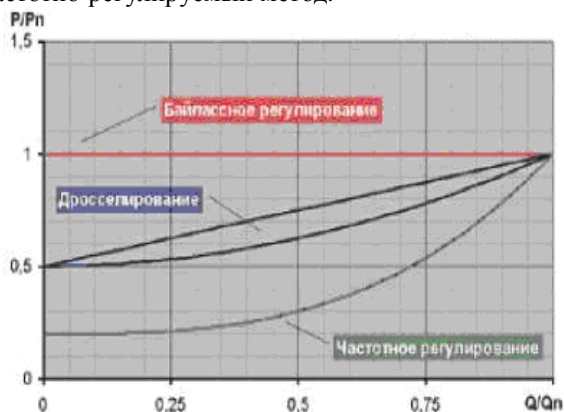


Рисунок 6 – Сравнительная характеристика двигателей насосов при различных методах регулирования:

$P/P_n$  – мощность двигателей в безразмерных единицах;  $Q/Q_n$  – расход воды в безразмерных единицах

Итак, частотно-регулируемое управление обеспечивает следующие преимущества по сравнению с другими методами:

- эффективное использование асинхронных электродвигателей, дешевых в эксплуатации и ремонте;
- получение КПД преобразователя до 95 - 98%, коэффициента мощности близкому к 1,0;
- плавный пуск электродвигателя, отсутствие гидравлических ударов;
- снижение уровня шума при пуске и работе; автономную безопасную работу, интеграцию в АСУ ТП.

**Выводы.** Проведенный анализ различных тех-

нических решений и методов регулирования ВПЧ позволяет сделать следующий вывод – применение энергосберегающих ВПЧ в различных областях промышленности позволит значительно повысить показатель энергосбережения Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Г. Пивняк, А.В. Волков. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровск: – 2006. – 470 с.
2. О.В. Слежановский. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями.–М.: – Энергоатомиздат, 1983. –256 с.
3. В.Я. Беспалов. Статья о электродвигателях для ЧРП. Перспективы создания отечественных электродвигателей нового поколения для частотно-регулируемого электропривода. - М.: // Электрооборудование 3/2006.
4. М. Козлов, А. Чистяков. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми электроприводами. // Современные технологии автоматизации. – 2001. – № 1. – 7 с.
5. Г. Лазарев. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости Электротехники. – 2005. – №2 (32).
6. И.Д. Труфанов, А.П. Лютый, К.И. Чумаченко, И.А. Андрияс. Системометодология и опыт модернизации электроприводов программно-управляемого технологического оборудования // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – 3/3(27). – С.29-45.
7. И.Д. Труфанов, В.В. Любас. Высоковольтные преобразователи частоты для частотно-регулируемого электропривода // Электрик. – 2008. – №3. – С.30-33.
8. [http:// www.ngv.ru](http://www.ngv.ru) – О. Иванцов. Безопасность трубопроводных систем // Нефтегазовая вертикаль.
9. [http:// www.fiacrus.com](http://www.fiacrus.com) – Статья о необходимости применения ЧРП.
10. [http:// www.yanviktor.narod.ru](http://www.yanviktor.narod.ru) – Компания Данфос. Частотно-регулируемый привод в системах тепло- и водоснабжения и вентиляции. – 4 с.
11. [http:// www.momentum.ru](http://www.momentum.ru) – Промышленная группа «Приводная техника». Использование частотно-регулируемого электропривода в насосных станциях // Новости приводной техники.
12. [http:// www.momentum.ru](http://www.momentum.ru) – Промышленная группа «Приводная техника». Возможности использования современного регулируемого электропривода в системах водоснабжения // Новости приводной техники.

Стаття надійшла 14.04.2008 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.