

## ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ В НАСОСАХ

А. И. Шестака,<sup>1</sup> Л. В. Мельникова,<sup>2</sup> А. Г. Калинин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный университет "Одесская морская академия"

<sup>2</sup>Одесский национальный политехнический университет

**Аннотация.** Сделан обзор энергоэффективных частотно-регулируемых приводов, выпускаемых ведущими фирмами-производителями. Рассмотрены основные параметры, характеристики и методы регулирования насосных систем. Описан наиболее современный и экономичный метод регулирования подачи применением частотно-регулируемого привода с базовым алгоритмом энергосбережения и с отдельным управлением магнитным потоком и моментом асинхронного двигателя.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, насос, напор, подача, асинхронный двигатель, частотный преобразователь, КПД двигателя, управление скоростью, управление по полю, прямое управление моментом.

### Введение

В последние годы ведущие производители частотно-управляемых приводов (Variable Frequency Drive, VFD) демонстрируют устойчивую тенденцию к сегментации своей продукции в соответствии классу прикладных технологических задач. При этом разработчики ориентируются на актуальные направления требований промышленности, строительства, инфраструктуры, для которых предлагают оптимальные решения в виде специализированных VFD. Производители и их потребители стимулируют процесс совершенствования и повышения технических качеств VFD с обеих сторон: растущие требования клиентов ускоряют процесс научных и инженерных исследований, разработки и запуска в производство новых серий VFD – с одной стороны, а предложения производителями перспективных новинок стимулируют рост требований потребителей – с другой. Кроме того, в связи с устойчивым глобальным трендом снижения электропотребления разработчики VFD делают особый акцент на энергосберегающих показателях своей продукции. По разным оценкам, около 72% всей электроэнергии в промышленности потребляется электродвигателями, причем 63% от этой величины используется для привода насосов, компрессоров и вентиляторов [26].

**Целью работы** является обзор выпускаемых ведущими производителями частотно-регулируемых приводов и анализ возможностей применения для управления насосными системами современных энергоэффективных технологий.

### 1. Анализ оборудования ведущих производителей частотно-управляемых приводов

Производители классифицируют свою продукцию индивидуально. Тем не менее, можно проследить выделение следующих сегментов:

- передовые высокотехнологичные разработки с самыми современными коммуникационными и интеграционными возможностями;
- VFD для стандартных задач;
- специализированные VFD для задач управления насосами, вентиляторами, установками нагрева, вентиляции и кондиционирования воздуха, лифтами, кранами [7-21].

Характерным для всех производителей является появление и бурное развитие серий VFD, предназначенных для задач управления насосами и вентиляторами – как следствие повышения требований энергосбережения и комфорта в сферах гражданского и промышленного строительства; отопления, кондиционирования и вентиляции (Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC); водоснабжения и канализации; мелиорации.

Основные серии VFD, выпускаемые сегодня ведущими производителями, перечислены ниже. Следует обратить внимание, на то, что все производители выделяют в отдельную группу VFD для насосов и вентиляторов.

#### **Mitsubishi:**

- \* FR – A800 (0,4...630) kW - универсальные VFD нового поколения для широкого круга задач промышленности;
- \* FR – A 800 Plus (0,75...630) kW - VFD для кранов и намоточных машин;
- \* FR – A700 (5,5...630) kW – для кранов и промышленного применения с рекуперацией движения;

- \* FR – F800 (0,75...630) kW - енергосберегаючі VFD для насосів, вентиляторів, HVAC;
- \* FR – E 700 SC (0,1...2,2) kW – компактні універсальні VFD;
- \* FR – D700 (0,1...2,2) kW - стандартні VFD для простих задач;
- \* MELSERVO (50W...50kW) - сервоусилители переменного тока для управления движением.

#### **Schneider Electric:**

- \* Altivar Proces – сучасні економічні та високоінтелектуальні VFD, призначені для забезпечення максимальної ефективності технологічного обладнання, с сучасними алгоритмами управління та комунікаційними можливостями:
  - ATV900 (0,75 kW... 1,5 MW) – для відповідних задач,
  - ATV600 (0,75 kW... 1,5 MW) – для насосів та вентиляції;
- \* Machine Drives – для машин та механізмів з простими та продвинутими вимогами:
  - Altivar 12 (0,18...4) kW,
  - Altivar Machine ATV 320 (0,18...15)kW,
  - Altivar Machine ATV 340 (0,75...75)kW;
- \* Building Drives – спеціалізовані VFD для будівель:
  - Altivar Lift (4... 22) kW- для ліфтових застосувань,
  - Altivar 212 (0,75...75) kW - для систем HVAC;
- \* General Purpose стандартні VFD:
  - Altivar 71 (0,37...630) kW – для задач промисловості,
  - Altivar 61 (0,75...800) kW- для задач систем HVAC, насосів та вентиляторів,
  - Altivar 32 (0,18...15) kW – загального застосування.

#### **ABB:**

- \* Machinery Drives – для машин та механізмів:
  - ACS 355, ACS 380, ACS 850 (0,37...560) kW – з можливістю інтегрування в системи автоматичного управління,
  - ACSM1 - 04 (0,75...355) kW – для управління швидкістю та моментом в задачах позиціонування;
- \* Industrial Drives ACS 880 (0,55...5600 kW) – для широкого кола задач промисловості;
- \* General Purpose – загального застосування:
  - ACH 310, ACH 480 (0,37...22) kW – для насосів та вентиляторів,
  - ACH 550, ACH 580 (0,75...500) kW – для широкого кола задач;
- \* Micro Dives ACS 55 (0,18...22) kW, ACS 150, ACS 355 - для задач локального управління двигателем.

#### **Danfoss:**

- \* VLT Automation Drive FC301/FC302 (0,25 - 1400) kW - загального застосування з каскадним контролером руху. Забезпечує виконання всіх вимог автоматизації в сучасних системах;
- \* MLT AQUA Drive, FC 202 (0,25 kW...1,4 MW) – для насосів всіх типів з каскадним контролером;
- \* VLT HVAC Drive FC 102 (1,1 kW...1,4 MW) – інтелектуальні функції HVAC для роботи з насосами та вентиляторами в сучасних будівлях;
- \* VLT Refrigeration Drive FC 103 (1,1...630) kW – управління насосами та вентиляторами для забезпечення суттєвої економії електроенергії в холодильних установках;
- \* VLT Midi Drive FC 280 (0,37...2,2) kW - загального застосування, а також в автоматизації та машинобудуванні;
- \* VLT Micro Drive FC 51 (0,18...2,2) kW – для локальних задач електропривода.

#### **Delta Electronics:**

- \* CFP 2000 (0,75... 90) kW - для насосів, вентиляторів, HVAC;
- \* MH 300 (0,2... 22) kW – для машин та механізмів;
- \* MS 300 (0,2...22) kW – загального застосування;
- \* CH 2000 (0,75... 280) kW – для кранів та інших промислових застосувань;
- \* C 200 (0,4...7,5) kW – мікроприводи загального застосування.

## **2. Управление насосами и вентиляторами**

Свойства и технические характеристики "насосно-вентиляторных" серий VFD, в первую очередь, обусловлены характером технологического процесса: вентиляторная нагрузка и изменение нагрузки в достаточно широких пределах вследствие непостоянных характеристик гидравлической системы. Кроме того обязательно учитываются технические свойства исполнительных органов: насосов, вентиляторов, компрессоров, а так же предусматривается возможность управления по технологическим параметрам: давление (перепад давления в системе до и после насоса); температура теплоносителя (вода, воздух, фреон); температура в помещении; содержание CO<sub>2</sub> и расход воды.

В результате учета всех перечисленных факторов потребителям предлагаются энергоэффективные VFD, которые с одной стороны в состоянии самостоятельно решать локальные задачи автоматизации работы насосов и вентиляторов, а

с другой – могут легко интегрироваться в общую систему автоматизации объекта, выступая компонентом системы управления зданием (Build Managment System, BMS).

Первая подзадача решается наличием встроенного, полностью соответствующего задачам, набора параметров и макросов, а также путем интеграции в VFD, полноценного программируемого логического контроллера (Programmable Logic Controller, PLC). Вторая – через базовое оснащение VFD интерфейсами связи актуальных стандартов: Ethernet, Modbus, Profibus, BACnet. Дополнительно специализированные VFD оснащаются многофункциональным дисплеем, выполняющим роль панели оператора (Human Machine Interface, HMI), с набором вложенных подпрограмм для мониторинга параметров технологического процесса, с индикацией рабочей точки и возможностью построения трендов.

Основными параметрами, характеризующими работу центробежных насосов и вентиляторов, являются создаваемое ими напор (давление)  $H$  и расход перемещаемой среды (подача, производительность)  $Q$ .

Расход (Flow)  $Q$ ,  $m^3/s$  ( $m^3/h$ ) определяется как объем жидкости (теплоносителя, в большинстве случаев вода, иногда – этиленгликоль) или воздуха, перемещаемый за единицу времени через напорный патрубок насоса.

Напор насоса (Head)  $H$ ,  $m$  есть прирост энергии потока за время прохождения жидкости через рабочие полости насоса.

Под напором понимается удельная механическая работа, передаваемая насосом перекачиваемой жидкости:

$$H = \frac{E}{G},$$

где  $E$  – механическая энергия,  $Nm$ ;  $G$  – вес перекачиваемой жидкости,  $N$ .

Напор  $H$  для насосов также может быть определен как давление  $P$  в данной точке гидравлической сети, выраженное в метрах высоты открытого столба перекачиваемой жидкости (рис.1,б).

Напор и прирост давления  $P$  связаны через очевидное соотношение:

$$P = \rho \cdot g \cdot H,$$

где  $\rho$ ,  $kg/m^3$  – плотность перекачиваемой жидкости;

$g=9,81 m/s^2$  – ускорение свободного падения.

Конструкция центробежного насоса (рис.1, а) [ 24-25] определяет также использование таких характерных параметров, как:

- полный напор (Total Dynamic Head, TDH) - разница давлений между входным и выходным патрубками насоса. Зависимость TDH от расхода является основной характеристикой насоса;

- максимальный напор  $TDH_{max}$  – это максимальное давление, которое насос может создать при нулевом расходе, как показано на рис.1,б;

- полезная мощность  $P_v$ ,  $W$ , переданная жидкости определяется как:

$$P_v = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q;$$

- механическая мощность на валу приводного двигателя  $P$ . Рассчитывается с учетом КПД  $\eta$  насоса, который, в свою очередь, зависит от расхода:

$$P = P_v / \eta;$$

- номинальная рабочая точка (Best Efficiency Point, BEP) - определяется из условия максимума КПД.

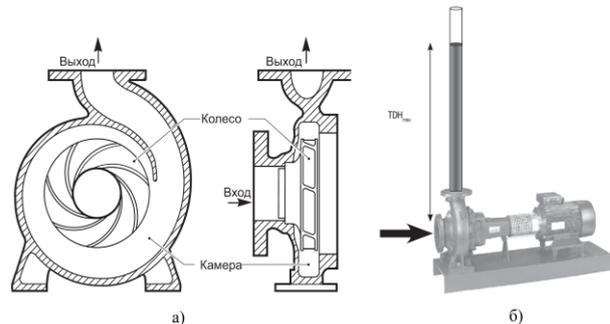


Рис. 1. Конструкция центробежного насоса и  $TDH_{max}$

Расход, напор и мощность для вентиляторов и центробежных насосов (с некоторым приближением) связаны со скоростью вала вентилятора или насоса соотношениями, называемыми законами подобия:

1) расход пропорционален скорости вала  $\omega$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2};$$

2) напор пропорционален квадрату скорости

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2};$$

3) мощность пропорциональна кубу скорости

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\omega_1^3}{\omega_2^3}$$

Типовые наборы характеристик современных насосов фирм Wilo и Grundfos для различных скоростей [22,25] приведены на рис.2, а и 2, б соответственно

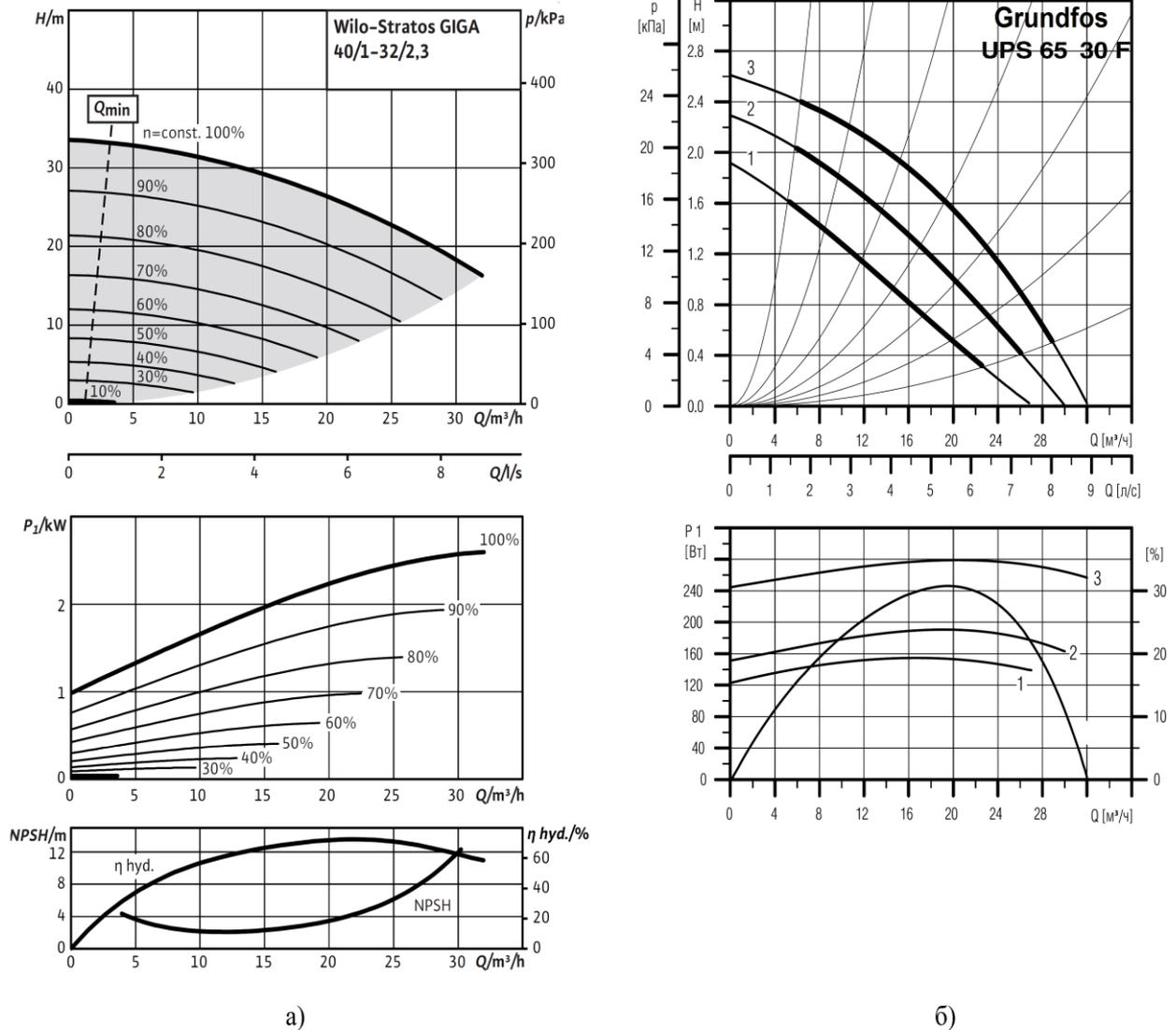


Рис. 2. Типовые характеристики насосов фирм: а) – Wilo, б) – Grundfos

Рабочая точка насоса определяется как место пересечения характеристик насоса и нагрузки гидравлической системы. Трение, имеющее место в трубопроводной сети ведет к потере давления перекачиваемой жидкости по всей длине гидравлической магистрали. Потеря давления также является функцией температуры и вязкости жидкости, скорости потока, а также диаметра, длины и шероховатости труб. Из теоретической гидравлики известно, что падение

напора в системе пропорционально квадрату подачи (см. рис. 3):

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{Q_1}{Q_2} \right)^2$$

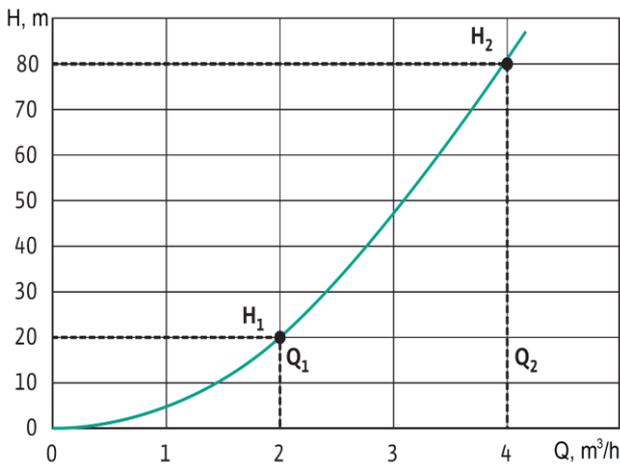


Рис. 3. QH характеристика магістралі

### 3. Методы регулирования подачи в насосах

В закрытых и в открытых системах подъема жидкости нагрузочная характеристика смещается по вертикали на величину статического или геодезического давления  $H_z$  (рис.4) соответственно. В подавляющем большинстве практических применений подача насоса должна меняться непрерывно в соответствии с текущей потребностью [23,26].

Рассмотрим основные методы решения этой задачи.

1. Дросселирование. Регулирование подачи конечным потребителям (тепловой радиатор, фанкойл, кран водоразбора и т.п.) или их группам (этаж, здание, микрорайон) традиционно производится путем дросселирования гидравлического потока, т.е. изменением эффективного поперечного сечения трубопровода.

При использовании работающих с постоянной скоростью насосов изменение суммарной потребности в подаче (суточное или сезонное) реализуется путем использования клапанов (задвижек), изменяющих сечение трубопровода после насоса. В результате применения такого метода увеличивается гидравлическое сопротивление сети, что приводит к увеличению потерь напора в сети, которое выражается в повышении давления на выходе насоса при снижении подачи (клапан частично закрыт), что иллюстрируется рисунком 4. Показан переход к более крутой нагрузочной характеристике системы из точки А с номинальной подачей  $Q_n$  в точку В с пониженной подачей  $Q_r$ . Оптимальной рабочей точкой системы насос-нагрузка должна была бы быть точка С. Потери при таком способе регулирования пропорциональны затемненному прямоугольнику. В этом случае насос работает на принудительную задвижку.

2. Байпас. Одним из вариантов "пассивного" регулирования подачи является использование байпасной линии, когда часть выходного потока

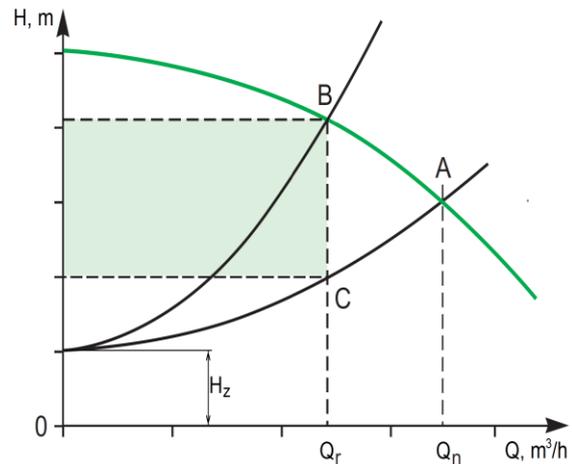


Рис. 4. Характеристики системы при регулировании подачи клапаном после насоса

возвращается на вход насоса через регулируемый клапан, практически не изменяющий характеристику сети. Это позволяет точно регулировать подачу, однако насос частично работает "сам на себя", что существенно снижает КПД системы в целом. Процесс байпасного регулирования иллюстрируется рисунком 5: система находится в рабочей точке С, а насос – в точке А; потери мощности в насосе соответствуют площади затемненных участков.

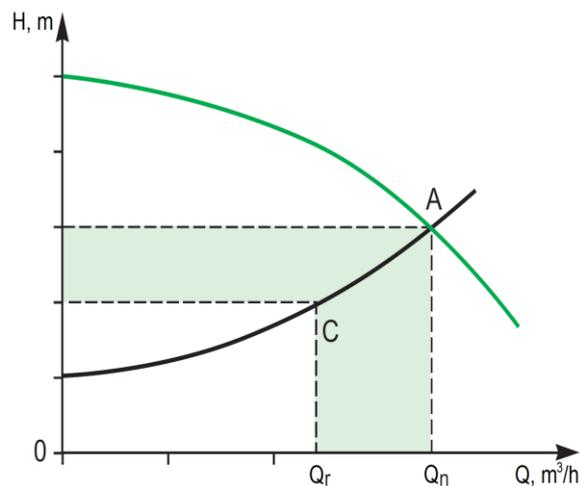


Рис. 5. Характеристики системы при использовании байпасной линии после насоса

3. Параллельная работа насосов. К традиционным методам управления подачей следует также отнести параллельную работу насосов. При этом снижение подачи осуществляется отключением одного или нескольких из них.

4. Регулирование скорости. Вследствие внедрения VFD в управление двигателями насосов в полной мере стал доступен наиболее прогрессивный и экономичный метод регулирования

подачі посредством изменения скорости. Исходя из приведенных выше соотношений для законов подобия, снижение скорости на 20% (т.е. переход к выходной частоте VFD 40 Hz) приводит к уменьшению подачи (см. рис.6) в точке С до 64% относительно точки А. При этом потребляемая насосом мощность в т. С снижается до 51%. Собственно, последнее является и основной причиной применения VFD в насосах, и основным побудительным мотивом совершенствования алгоритмов управления VFD для оптимального решения специфических "насосных" задач, в том числе и для дополнительной экономии энергии.

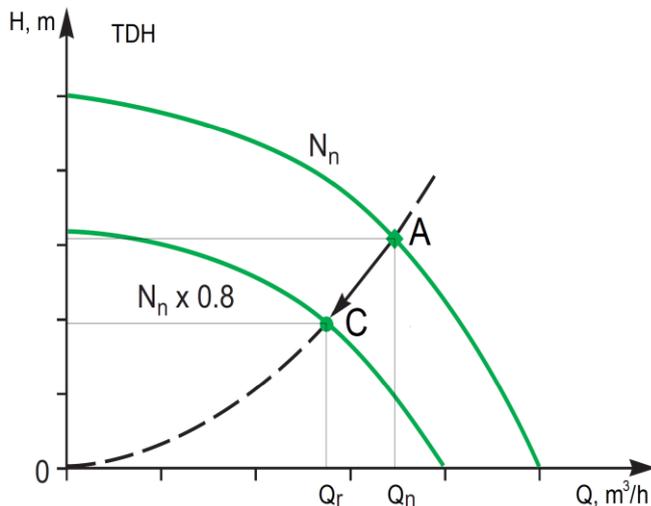


Рис. 6. Характеристики системы при регулировании скорости насоса

Базовый алгоритм энергосбережения, например, таких серий, как FR-F800 и ATV600, предусматривает задание по пяти-шести точкам ожидаемых нагрузочных характеристик гидравлической системы для различных режимов работы. При этом обеспечивается дальнейшее автоматическое бездатчиковое регулирование выходного напряжения и частоты VFD до уравнивания момента приводного двигателя насоса с требуемым TDH при заданном расходе [8; 11].

Таким образом, осуществляется мониторинг насосного агрегата, основанный на контроле фактической рабочей точки, что обеспечивает абсолютно точное управление напора  $H$  в зависимости от требуемого расхода  $Q$  при использовании соответствующих датчиков давления и протока. В случае же бездатчикового (sensorless) решения используются заложенные пользователем 5-6- точечные нагрузочные характеристики, а также данные двигателя и насоса в сочетании с уставками критических значений давления и расхода.

Только эти методы уже обеспечивают существенное снижение (пропорционально кубу скорости насоса) потребляемой энергии.

Кроме того, Mitsubishi в серии FR – F800 предлагает инновационные алгоритмы оптимального управления током возбуждения (Optimum Excitation Control, OEC) реализующие возможность работы асинхронного двигателя (АД) насоса с максимально возможным КПД при пониженных нагрузках, что обеспечивает дополнительный энергосберегающий эффект. Такое управление позволяет поддерживать оптимальный магнитный поток в режиме реального времени, что обеспечивает работу АД с максимально возможным КПД для каждого текущего значения нагрузки на валу. Это решение по оценкам Mitsubishi [8] дополнительно добавляет (12-15) % к энергосберегающим возможностям VFD при работе с малыми нагрузками.

Этот прогрессивный метод заслуживает детального рассмотрения, но вся касающаяся его информация на сегодняшний день является закрытой, что, однако, не запрещает авторам сделать некоторые предположения относительно содержания алгоритма OEC.

#### 4. Управление подачей с минимизацией энергетических потерь в приводном двигателе

В настоящее время векторное управление асинхронными двигателями развивается с применением двух основных методов: управление по полю (Field Oriented Control, FOC) и прямое управление моментом (Direct Torque Control, DTC), реализуемое в VFD производства ABB [1-3].

Особенностью FOC является раздельное управление магнитным потоком и моментом асинхронного двигателя с помощью независимых составляющих ("продольной" и "поперечной") тока статора, соответствующих проекциям вектора тока статора  $\vec{i}_1$  на оси вращающейся системы координат, ориентированных по направлению вектора магнитного поля ротора  $\vec{\psi}_2$ . При выборе такой вращающейся ортогональной системы координат (dq), ось d которой совпадает с вектором  $\vec{\psi}_2$ , уравнение для электромагнитного момента  $\vec{m}$  принимает вид:

$$\vec{m} \equiv \vec{\psi}_2 \times \vec{i}_{1q},$$

где  $\vec{\psi}_2$  - вектор магнитного поля ротора,

$\overline{i_{1q}}$  - так называемая "поперечная" (или "квадратурная") составляющая вектора тока статора  $\overline{i_1}$ , перпендикулярная к вектору  $\overline{\psi_2}$ .

"Продольная" же составляющая  $\overline{i_{1d}}$  вектора тока статора совпадает с ориентированным вдоль оси d вектором магнитного потока ротора  $\overline{\psi_2}$ . Таким образом, с помощью этой проекции представляется возможным управлять магнитным потоком, однако она не влияет на векторное произведение  $\overline{\psi_2} \times \overline{i_1}$ , то есть, на электромагнитный момент двигателя. Это объясняется тем, что ток статора  $\overline{i_1}$  определяет все процессы в короткозамкнутом АД, и если одна из его составляющих не влияет на момент, то она, так или иначе, должна быть связана с магнитным потоком. А поскольку вращающаяся с угловой скоростью  $\omega = 2\pi f_1 / z_p$  ( $f_1$  - частота питающего статор напряжения,  $z_p$  - число пар полюсов АД) система координат (dq) ортогональна, то изменение одной из проекций вектора тока  $\overline{i_1}$  никак не влияет на его вторую проекцию. Это означает, что управление моментом (через  $\overline{i_{1q}}$ ) и потоком (через  $\overline{i_{1d}}$ ) осуществляется независимо.

В современных VFD разработчики используют информацию о напряжении  $u_1$  и токе  $i_1$  статора, из которой вычисляется потокосцепление статора  $\psi_1$  и через него – магнитный поток ротора  $\psi_2$ . Разумеется, информация о моменте и скорости АД тоже может являться продуктом вычислений, что делает возможным построение достаточно точных бессенсорных систем управления с большим диапазоном регулирования скорости.

Как известно, КПД асинхронного двигателя варьируется в зависимости от нагрузки на валу, достигая своего максимума в районе номинальной нагрузки. С уменьшением нагрузки (TDH для насосов и вентиляторов) КПД существенно (до 50%) снижается [4; 5].

Для повышения КПД двигателя при снижении нагрузки большинство известных алгоритмов оптимизации энергопотребления используют управление по модели энергетических потерь (Loss Model Control, LMC) [6]. Такой подход позволяет определить оптимальное значение магнитного потока ротора  $\psi_{2opt}$  на основании информации о нагрузке на валу, приравняваемой

вычисляемому модулю электромагнитного момента M:

$$\psi_{2opt} \equiv \omega_2 \cdot \sqrt{M},$$

где  $\omega_2$  - угловая скорость вала АД.

Принимая во внимание, что минимум потребляемой мощности достигается при равенстве мощностей потерь, создаваемых продольной и поперечной составляющими тока статора  $r_d \cdot i_{1d}^2 = r_q \cdot i_{1q}^2$ , представляется возможным определить оптимальный ток намагничивания (возбуждения) в функции момента нагрузки через соотношение  $i_{1dopt} \equiv \sqrt{M}$ .

Весьма вероятно, что именно такой алгоритм может быть положен в основу разработанного Mitsubishi метода управления с оптимизацией тока возбуждения ОЕС.

Дополнительно необходимо заметить, что современные "насосные" серии VFD оснащены развитой коммуникативной периферией, а также расширенными возможностями построения локальных систем управления:

- сдвоенный порт Ethernet и Modbus TCP, последовательный порт Modbus;
- интегрированный WEB-Server;
- локальный и удаленный доступ к данным VFD и технологического процесса через планшет, смартфон;
- возможность обмена данными между VFD в режиме реального времени;
- работа VFD с архитектурой "ведущий – ведомый" с распределением нагрузки между VFD;
- возможность интеграции в системы автоматизации и в SCADA с использованием стандартных технологий;
- интегрируемые аналоговые входы/выходы;
- аналоговые входы для датчиков температуры PT100, PT1000, TCP;
- поддержка опционально PROFINET, CAN-open RJ 45, RS 232, RS 485;
- многофункциональный дисплей с функциями HMI и др.

## Выводы

Подводя итоги вышеизложенного, следует отметить, что специализированные VFD для насосов и вентиляторов уверенно и прочно занимают должное место в системах управления АД в таких отраслях промышленности и инфраструктуры как:

- водоподготовка, водоснабжение и водоотведение;
- системы вентиляции и управления климатом;

- нефтегазовая промышленность;
- морской транспорт;
- пищевая промышленность.

При этом растущие требования со стороны промышленности к энергосбережению, качеству управления технологическим процессом, а также к возможностям интеграции VFD в автоматические системы управления находят свое воплощение в новых сериях таких приводов.

### Список использованной литературы

1. F. Blaschke, "The Principle of Field Orientation as Applied to the NEW Transvector Closed-Loop System for Rotating-Field Machines," [Text] Siemens Review, Vol. 34, No. 3, 1972, pp. 217-220
2. Vector Control of Three-Phase AC Machines - System Development in the Practice, [Text] N. P. Quang and J.-A. Dittrich, Springer, 2008.
3. Vector Control and Dynamics of AC Drives, [Text] D. W. Novotny and T. A. Lipo, Clarendon Pr, USA, September 1996.
4. Bleizgys V., Baskys A., Lipinskis T. Induction Motor Voltage Amplitude Control Technique Based on the Motor Efficiency Observation [Text] // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2011. – No. 3(109). – P. 89–92
5. C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, and Pramod Agarwal. Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - A Review. [Text] // International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, April 2009, ISSN 1793-8198. – P. 61-70
6. Kheldoun Aissa, and Khodja Djalal Eddine. Vector Control Using Series Iron Loss Model of Induction, Motors and Power Loss Minimization [Text] // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:3, No:4, 2009. – P. 596-602
7. Inverter Family. Product catalogue for Mitsubishi Electric frequency inverters [Text] // 2016-12-22 – Art. no 206313-H
8. FR-F800 Inverter. Instruction Manual. [Text] Mitsubishi Electric Europe B.V. // 2015-12-03 – Version B – Art. no 292550
9. Japanese Smart Energy Products & Technologies. [Text], 2017 - JASE-W – Mitsubishi General-Purpose Inverter – F-34. [Electronic Resource]. – Access Mode - <http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/factory/F-34.pdf>.
10. Altivar Process ATV600. Variable speed drives. [Text]. Catalog, January 2017 // Schneider Electric Industries SAS - January 2017 - V4.2 - DIA2ED2140502EN
11. Altivar Process. Variable Speed Drives ATV630, ATV650, ATV660, ATV680. [Text] Programming Manual, 11/2016 - EN\_EAV64318\_04
12. Altivar Process ATV600. [Text]. Application Note. Multi-Drives Booster Control Optimized, 01/2017 - GH36060\_01
13. ABB drives and controls. The green guide to more profitable business. Product Guide. [Text]. 11/2016 - 3AFE68401771 REV Q EN - 29.11.2016
14. ABB drives for HVAC. ACH580-01, 0.75 to 250 kW. [Text]. Catalog - 3AUA0000186691 REV A EN 18.9.2015
15. ABB drives for HVAC. [Text]. ACH580-01 technical data sheet - 3AUA0000190753 REV A EN 4.2.2016 \*12715
16. New generation VLT® AQUA Drive. World beating cost efficiency - Danfoss VLT Drives, [Text]. PE-MSMBM - October 2014 - DKDD.PB.203.A4.02
17. HVAC & Refrigeration applications – Danfoss. [Text]. PE-MMSC2014.09-DKDD.PB.36.U2.02
18. VLT® HVAC Drive FC 102. Operating Instructions – Danfoss. [Text]. 130R0083 - MG11AK02 - Rev. 2014-02-25
19. Delta IP55 Fan and Pump Drive CFP2000 Series. [Text] Catalogue, 2017 – DELTA\_IA\_DS\_CFP2000\_C\_EN – Rev. 2017-03-07
20. Delta Fan and Pump Drive. [Text] CFP2000 Series User Manual – Delta Electronics, Inc. – 5014056600 – Rev. 2017-03-03
21. Delta AC Motor Drive. [Text]. Application Manual for C2000, CP2000, CH2000 Series – Delta Electronics, Inc. – IA-MDS\_VFD- C2000-CP2000-CH2000\_AM\_EN – Rev. 2016-05-09
22. Grundfos. Общий обзор производственной программы. Каталог, 2015 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ua.grundfos.com/content/dam/GUA/forClient/2015/WIDE%20RANGE%202015.pdf>
23. Grundfos. Теория перекачивания жидкостей – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.grundfos.com/content/dam/GMO/Documentation/books/PumpTheory-91830082-0908.pdf>

24. Grundfos. Центробежный насос – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.grundfos.com/content/dam/GMO/Documentation/books/Centrifugal-Pump-70160132->

25. Wilo. Насосы и насосные установки для систем отопления, кондиционирования, охлаждения. Каталог 2015/2016 – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wilo.cdn.mediamid.com/cdndoc/wilo25615/46861/wilo25615.pdf>

26. Энергоэффективность. Преимущества применения частотно-регулируемого привода в насосных, вентиляционных и компрессорных установках. [Текст]. Библиотечка электрика публикация компании "Шнайдер Электрик", выпуск 12. – К.: ДИА, 2010. – 32 с.; ил.

### References

1. F. Blaschke, (1972) "The Principle of Field Orientation as Applied to the NEW Transvector Closed-Loop System for Rotating-Field Machines". Siemens Review, Vol. 34, No. 3, , pp. 217–220

2. N. P. Quang , J A. Dittrich, (2008) Vector Control of Three-Phase AC Machines – System Development in the Practice. Springer,.

3. D. W. Novotny, T. A. Lipo (1996), Vector Control and Dynamics of AC Drives and, Clarendon Pr, USA, September.

4. Bleizgys, V., Baskys, A., Lipinskis, T. (2011) Induction Motor Voltage Amplitude Control Technique Based on the Motor Efficiency Observation Electronics and Electrical Engineering. Technologija, Kaunas: No. 3(109). P. 89–92

5. C. Thanga Raj, S. P. Srivastava, and Pramod Agarwal. (2009) Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor - A Review International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, April, ISSN 1793–8198. P. 61–70

6. Kheldoun Aissa, and Khodja Djalal Eddine. (2009) Vector Control Using Series Iron Loss Model of Induction, Motors and Power Loss Minimization World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol.3, No 4., pp. 596–602

7. Inverter Family. Product catalogue for Mitsubishi Electric frequency inverters 2016-12-22 – Art. no 206313-H

8. FR-F800 Inverter. Instruction Manual. Mitsubishi Electric Europe B.V. 2015-12-03 – Version B – Art. no 292550

9. Japanese Smart Energy Products & Technologies. (2017) JASE-W – Mitsubishi General-Purpose Inverter – F-34 available at: <http://www.jase-w.eccj.or.jp/technologies/pdf/factory/F-34.pdf>.

10. Altivar Process ATV600. Variable speed drives. . Catalog, January 2017 Schneider Electric Industries SAS - January 2017 - V4.2 - DIA2ED2140502EN

11. Altivar Process. Variable Speed Drives ATV630, ATV650, ATV660, ATV680. Programming Manual, 11/2016 -EN\_EAV64318\_04

12. Altivar Process ATV600. Application Note. Multi-Drives Booster Control Optimized, 01/2017 GH36060\_01

13. ABB drives and controls. The green guide to more profitable business. Product Guide, 11/2016 - 3AFE68401771 REV Q EN 29.11.2016

14. ABB drives for HVAC. ACH580-01, 0.75 to 250 kW. Catalog - 3AUA0000186691 REV A EN 18.9.2015

15. ABB drives for HVAC. ACH580-01 technical data sheet - 3AUA0000190753 REV A EN 4.2.2016 \*12715

16. New generation VLT® AQUA Drive. World beating cost efficiency Danfoss VLT Drives, PE-MSMBM - October 2014 - DKDD.PB.203.A4.02

17. HVAC & Refrigeration applications – Danfoss. PE-MMSC 2014.09 - DKDD.PB.36.U2.02

18. VLT® HVAC Drive FC 102. Operating Instructions – Danfoss, 130R0083 - MG11AK02 - Rev. 2014-02-25

19. Delta IP55 Fan and Pump Drive CFP2000 Series. Catalogue, 2017 – DELTA\_IA\_DS\_CFP2000\_C\_EN – Rev. 2017-03-07

20. Delta Fan and Pump Drive. CFP2000 Series User Manual – Delta Electronics, Inc. – 5014056600 – Rev. 2017-03-03

21. Delta AC Motor Drive. Application Manual for C2000, CP2000, CH2000 Series – Delta Electronics, Inc. – IA-MDS\_VFD- C2000-CP2000-CH2000\_AM\_EN – Rev. 2016-05-09

22. Grundfos. Overview of the production program. [Обшчий обзор производственной программы. Каталог]. Catalog, 2015 – available at: <http://ua.grundfos.com/content/dam/GUA/for-Client/2015/WIDE%20RANGE%202015.pdf>

23. Grundfos. Theory of pumping liquids [Теорія перекачивання рідин] – available at: <http://ru.grundfos.com/content/dam/GMO/Documentation/books/PumpTheory-91830082-0908.pdf>

24. Grundfos. Centrifugal Pump. [Центробежны насос].- available at: <http://ru.grundfos.com/content/dam/GMO/Documentation/books/Centrifugal-Pump-70160132-1113.pdf>

25. Wilo Pumps and pumping units for heating, air-conditioning, cooling systems.. Catalog 2015/2016 [Nasosy i nasosnye ustanovki dlya

sistem otopleniya, kondicionirovaniya, ohlazhdeniya. Katalog 2015/2016] – available at: <https://wilo.cdn.mediamid.com/cdndoc/wilo25615/46861/wilo25615.pdf>

26. Energy efficiency. Advantages of using a variable frequency drive in pumping, ventilation and compressor installations. [EHnergoehffektivnost'. Preimushchestva primeneniya chastotno-

reguliruemogo privoda v nasosnyh, ventilyacionnyh i kompressornyh ustanovkah. Bibliotekha ehlektrika ( publikaciya kompanii "SHnajder EHlektrik"),]. Library Electrician (publication of the company "Schneider Electric", issue 12. К .: DIA,2010. 32p.;Yl.

## VARIABLE FREQUENCY DRIVES IN PUMPS

A. I. Shestaka,<sup>1</sup> L. V. Melnikova,<sup>2</sup> A. G. Kalinin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National University "Odessa Maritime Academy"

<sup>2</sup>Odessa National Polytechnic University

**Abstract.** Variable Frequency Drive is reviewed in the article. Such drives have been successfully used in the in variable load mechanisms, which include fans, pumps and blowers last 10-15 years. The main parameters, characteristics, classical and modern methods of regulating pumping systems are considered. The power consumption of such mechanisms is proportional to the cube of the rotational speed, which is regulated by modern Variable Frequency Drives. They are used to control the speed and torque of the engine, which leads to a reduction of power consumption. This provides significant energy and resource savings. Nowadays the leading manufacturers of such drives offer already in addition to this advanced software that implements advanced algorithmic and technological solutions, provides optimum performance, enhanced security and easier installation and diagnostics. To increase the efficiency of the engine Mitsubishi Electric offers innovative algorithms of Optimum Excitation Control. With such control, at different load moments, the motor operates with the maximum possible efficiency close to the optimum. This method provides significant energy savings when working with low loads, providing an additional saving of power consumption of at least 15%. In addition to significant energy savings, the efficiency of the engine with such control is approximately 30% higher than for the classic ( $V / F = \text{const}$ ), and at the same time a large starting torque. This concept of construction and management of pumping systems, the introduction of energy saving technologies leads to increasing comfort, efficiency and decreasing lifecycle costs. The saving of heat and electricity energy and the ecological effect, connected with this, as well as raising the standard of living, are the first tasks that engineers are setting up today.

**Key words:** Energy Consumption, Pumps, Variable Frequency Drive, Efficiency, Speed Control, Field Oriented Control, Direct Torque Control.

## ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД В НАСОСАХ

А. Шестака,<sup>1</sup> Л. Мельнікова,<sup>2</sup> А. Калінін<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет "Одеська морська академія"

<sup>2</sup>Одеський національний політехнічний університет

**Анотація.** Зроблено огляд енергоефективних частотно-регульованих приводів, що випускаються провідними фірмами-виробниками. Розглянуто основні параметри, характеристики та методи регулювання насосних систем. Описано найбільш сучасний і економічний метод регулювання подачі з застосуванням частотно-регульованого приводу з базовим алгоритмом енергозбереження та з роздільним керуванням магнітним потоком і моментом асинхронного двигуна.

**Ключові слова:** Енергоефективність, насос, асинхронний двигун, частотний перетворювач, ККД двигуна, управління швидкістю, управління по полю, пряме керування моментом.

Получено 03.05.2017



**Шестака Анатолий Иванович**, старший преподаватель кафедры судовой электромеханики и электротехники национального университета "Одесская морская академия". Ул. Дидрихсона, 8, Одесса, 65029, Украина.

E-mail: [a.shestaka@gmail.com](mailto:a.shestaka@gmail.com) , тел. +38-050-336-8216

**Anatoly Shestaka**, senior Lecturer of Department of Electromechanics and electrical ship, National University "Odessa Maritime Academy", Didrikhson str., 8, Odessa, 65029, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0003-3229-0922



**Мельникова Любовь Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина. E-mail: [lubam@meta.ua](mailto:lubam@meta.ua) т.+38-067-949-4290

Melnikova Lubov, Doctor of Philosophy (Ph.D), Associate Professor of Department of electromechanical systems with computer control, Odessa National Polytechnic University. Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0002-1732-1930



**Калинин Александр Георгиевич**, старший преподаватель кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением Одесского национального политехнического университета. Просп. Шевченко, 1, Одесса, 65044, Украина.

E-mail: [agk@opu.ua](mailto:agk@opu.ua) тел. +38-050-392-1298

Alexander Kalinin senior Lecturer of Department of Department of electromechanical systems with computer control, Odessa National Polytechnic University. Shevchenko ave., 1, Odessa, 65044, Ukraine.

**ORCID ID:** 0000-0003-2654-9969