

Савчук Иван Викторович, к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»

Халина Татьяна Михайловна, д.т.н., профессор

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»*

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИВОДА НАСОСОВ

Аннотация: Применение частотно-регулируемого привода (ЧРП) на питательных насосах имеет ряд особенностей, требующий учета при их применении. Система ЧРП питательного насоса, состоящая из «автономного инвертора напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) – АД» с векторным управлением является сложной. Анализ этих систем требует математических моделей различного уровня сложности. Полная модель должна учитывать способы коммутации обмоток; процессы переключения транзисторов; несинусоидальность токов в АД; взаимное влияние процессов в обмотках статора и ротора АД.

Ключевые слова: синхронная машина, надежность, частотно-регулируемый привод, частотный преобразователь, автономный инвертор напряжения, энергоэффективность.

Annotation: The use of a frequency-controlled drive (PSR) on feed pumps has a number of features that need to be taken into account when using them. The system of the feed pump PSR, consisting of an "autonomous voltage inverter (AIN) with pulse width modulation (PWM) - AD" with vector control is complex. The analysis of these systems requires mathematical models of various levels of complexity. The complete

model should take into account the methods of switching windings; transistor switching processes; non-sinusoidal currents in AD; mutual influence of processes in the stator and rotor windings of AD.

Keywords: synchronous machine, reliability, frequency-controlled drive, frequency converter, autonomous voltage inverter, energy efficiency.

Введение

Центробежные насосы широко распространены в производстве и являются энергоемкими механизмами. Мощность большинства промышленных насосов находится в пределах от 1 до 10 тыс. кВт. Мощность питательных насосов тепловых электростанций достигает порядка 20000 кВт. Большую часть времени насосы эксплуатируются в режиме работы на сеть с противодавлением. В результате чего статический напор сети составляет меньше 25% полного напора.

Целью работы является анализ существующих решений частотного регулирования привода насосов.

Методы регулирования электропривода насосов

В данный момент самыми распространенными способами регулирования подачи воды насосами являются:

- дросселирование;
- байпасирование;
- ступенчатое регулирование;
- изменением частоты вращения насоса.

Дроссельное регулирование - самый простой и надежный способ. Осуществляется при помощи задвижки, расположенной вблизи насоса на его напорной линии. При переменных нагрузках дросселирование рабочей среды запорно-регулирующей арматурой при постоянной частоте вращения электроприводов механизмов приводит к значительным расходам электроэнергии на собственные нужды. Рассмотрим случай, когда требуется уменьшение расхода жидкости. Для этого осуществляется процесс закрытия задвижек, в результате чего, происходит уменьшение поперечного сечения.

Таким образом, подача воды уменьшается, а напор возрастает (рисунок 1) [1].

Так же, для такого способа регулирования, остается неизменной мощность, которая потребляется электроприводом насоса. Ее излишек расходуется на повышение давления в трубопроводе выше требуемого значения, что является причиной интенсивного изнашивания тепломеханического оборудования, запорной арматуры. Также по причине опасности возникновения кавитации дроссельное регулирование на всасывающей линии не нашло практического применения [1].

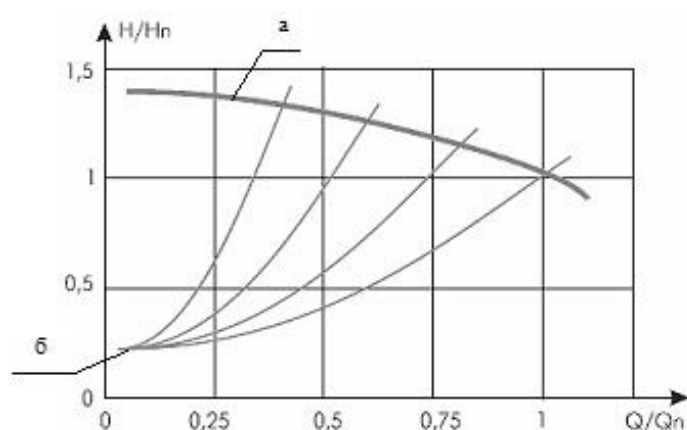


Рисунок 1 – Регулирование режима работы насоса дросселированием, где H – напор насоса, Q – подача насоса, а – характеристика насоса, б – характеристики трубопровода при разных положениях регулирующей задвижки

При использовании способа регулирования байпасированием требуемая подача системы достигается путем перепуска части подачи насоса из напорной линии на всасывание. Энергоэффективность такого способа регулирования допустим для насосов с частотой вращения более 250 об/мин и для вихревых насосов, мощность которых падает с увеличением подачи. Для центробежных насосов с частотой вращения менее 250 об/мин регулирование байпасом дополнительно нагружает двигатель, вызывает увеличение потребляемой мощности [2].

Также используется ступенчатое регулирование насосных установок. Для обеспечения рабочего режима выполняют подключение дополнительных

насосов или их отключение. Этот способ не требует установки дополнительных регулирующих устройств, поэтому он прост в управлении. Недостатками данного способа является некачественное непрерывное управление. В процессе регулирования возможен частый перепуск двигателей. Возможна длительная работа электропривода в неоптимальном режиме, по этой причине снижается КПД установки [2].

Регулирование изменением частоты вращения АД. Этот способ реализуется с применением частотно-регулируемого электропривода, который позволяет производить плавный разгон, остановку и увеличивает эффективность использования насосов. Кроме того, такой пуск способствует постепенному поднятию давления в подающей линии, что положительно сказывается на эксплуатации, трубопроводной части. На рисунке 2 показано, какие изменения терпит механическое свойство насоса в зависимости от частоты вращения электродвигателя [1].

Переключение на более низкую скорость вращения автоматически переключит на другую кривую мощности, которой характерны более маленькими значения. Как хорошо известно, мощность насоса находится в прямой зависимости от расхода жидкости и развиваемого напора. С уменьшением этих свойств снижается и мощность [1].

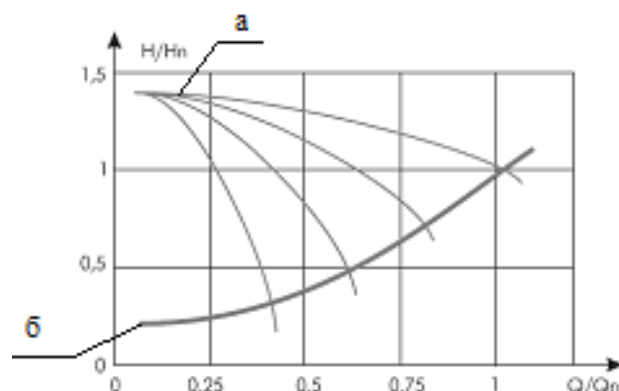


Рисунок 2 – Регулирование режима работы насоса с использованием частотно-преобразователя, где H – напор насоса, Q – подача насоса; а – характеристики насоса при разной частоте вращения, б – характеристика трубопровода

К недостаткам применения преобразователей частоты для регулирования АД относятся: повышенный уровень потерь в двигателе; большой нагрев; повышенные требования к изоляции. По этой причине, при питании от преобразователя в среднем только до 90-95% тока могут нагрузить АД при подключении от источника синусоидального напряжения. Применение для каждого регулируемого привода преобразователя является неоправданно дорогим. По этой причине в большинстве случаев стараются ограничиться одним преобразователем. Остальные двигатели подключаются к питающей сети и работают в нерегулируемом режиме. В данном случае решается только задача точного поддержания давления, а другие негативные факторы, присущие нерегулируемому приводу остаются [3].

На практике также используется совмещение разных способов регулирования. Известен способ регулирования сочетанием дросселирования с перепуском. В конструкцию насоса встроен подвижный цилиндр с отверстиями. Цилиндр имеет возможность осевого перемещения. Снижение нагрузки насоса приводит соответственно к уменьшению подачи и росту давления, в то время как цилиндр начинает сдвигаться в направлении рабочего колеса, перекрывая его входное сечение. Перепуск потока жидкости с напорной стороны на всасывающую обеспечивают отверстия в корпусе цилиндра, после он постепенно нарастает по величине [4].

Широко используется ступенчатое регулирование вместе с частотным [5]. Из двух или трех насосов регулируемым приводом оснащается один насосный агрегат [6].

Режимы управления электродвигателями

Для управления АД при помощи ПЧ применяются следующие алгоритмы:

1. U/f – скалярное управление (вольт - частотное);
2. Векторное управление.

Управление по вольт - частотной характеристике реализует следующее выражение

$$\frac{U}{f} = const, \quad (1)$$

Постоянная перегрузочная способность обеспечивает постоянный номинальный КПД и коэффициент мощности во всем диапазоне регулирования двигателя [7].

Данный алгоритм поддерживает требуемое качество регулирования по скорости. Его применяют для управления приводами с нагрузками, для которых характерны незначительные изменения момента сопротивления режиме, который был установлен. Для таких механических свойств момент статического сопротивления находится в зависимости от скорости или от частоты [7].

$$\omega = \frac{\pi f}{p}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость, p – число пар полюсов, f – частота.

Интервал регулирования скорости вращения двигателя по данному закону ограничен сверху и снизу.

$$\frac{y}{\alpha} \left(y = \frac{U}{U_{ном}}, \alpha = \frac{f}{f_{ном}} \right) \quad (3)$$

Насыщением обмотки двигателя определяется верхняя граница. С ростом отношения растет магнитный поток двигателя. Резко увеличивается ток намагничивания, из-за этого и ограничивается допустимое значение выше приведенного отношения. Вследствие этого, применение данного закона практически ограничено нагрузками, не превышающими номинальный момент двигателя [7].

Нижняя граница интервала регулирования зависит от $M_{ст}$ – момента статического сопротивления во время того, когда запускается двигатель. По этой причине, когда происходит рост напряжения и частоты, двигатель остается неподвижным. Вплоть до момента, пока частота ротора, равная частоте статора не достигнет значения, соответствующего моменту разгона привода [7].

Электродвигатели стандартного исполнения не имеют высоких пусковых характеристик и перегрузочной способности [8]. На практике чаще всего

вынуждены увеличивать мощность двигателя и настраивать параметры преобразователя частоты такие как:

- функцию компенсации момента;
- вольт-частотную характеристику;
- время разгона и торможения.

С помощью функции коррекции крутящего момента можно увеличить выходной крутящий момент при движении под уклон или при работе двигателя на малых оборотах. Когда это условие выполняется, выходное напряжение инвертора регулируется с регулируемым коэффициентом компенсации [8].

Параметрический анализ вольт-частотных характеристик относит более высокие значения напряжения к более низким частотам, чем линейная зависимость, показанная на рисунке 3 [8].

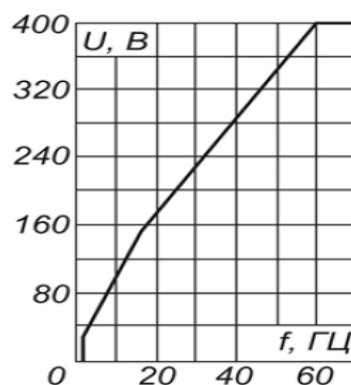


Рисунок 3 – Характеристика U/f

Представленный вид характеристики предназначен для нагрузок требовательных к большому стартовому моменту.

Базовая структурная схема скалярного управления с датчиком положения ротора изображена на рисунке 4.

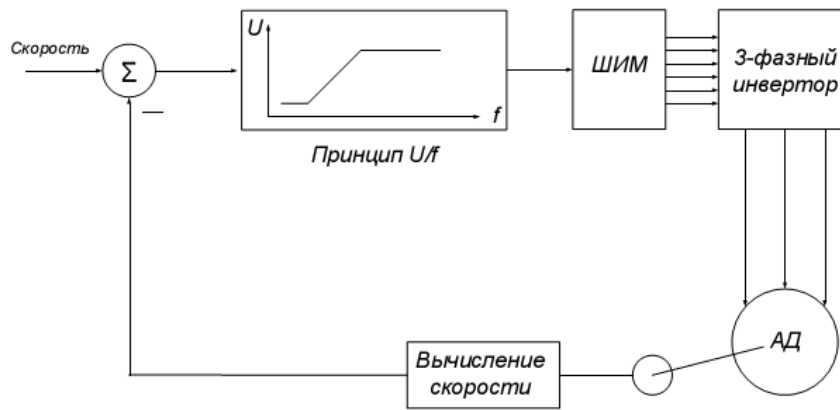


Рисунок 4 – Структурная схема U/f управления

Рассмотрим наиболее совершенный метод векторного управления. Векторное управление - технология управления двигателем, которая не только сочетает в себе скалярное управление, но и обеспечивает управление потоком двигателя. В состав представления векторного управления так же входит информацию о соединениях напряжения, тока и потока, реализованных в виде пространственных векторов [9].

С помощью данного метода становится возможным повышение точности управления, диапазона регулирования и скорости электропривода, а также контролировать крутящий момент. Расчет крутящего момента происходит исходя из значения тока статора, который создает поле возбуждения. Чтобы управлять крутящим моментом, следует корректировать амплитуду и фазу тока статора, то есть вектор тока. По этой причине, данный способ и назван "векторным управлением" [10].

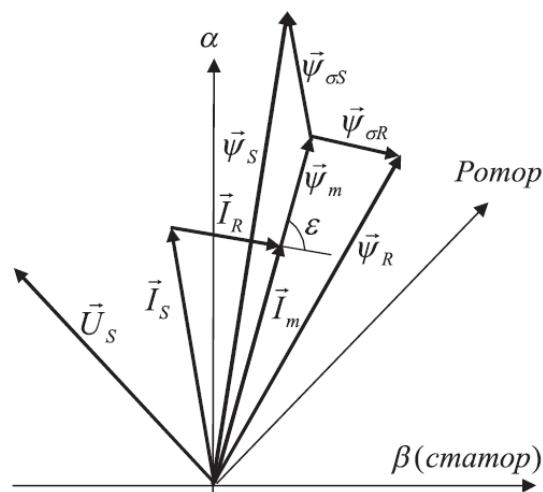


Рисунок 5 – Векторная диаграмма электродвигателя

Приведённая, векторная диаграмма на рисунке 5 иллюстрирует зависимость векторов состояний двигателя. Во время деятельности абсолютно все векторы крутятся в плоскости поперечного сечения двигателя вокруг оси вращения роторам. Если скорость и момент нагрузки постоянны, фазовый сдвиг и скорость всех векторов состояния остаются постоянными. Движение во время переходного процесса изменяет амплитуду векторов состояния и фазовый сдвиг между ними [11].

Асинхронный двигатель имеет следующие вектора состояний:

\vec{U}_s – вектор напряжения статора;

\vec{I}_s – вектор тока статора;

\vec{I}_r – вектор тока ротора;

\vec{I}_m – вектор тока намагничивания;

$\vec{\Psi}_s$ – вектор потока статора;

$\vec{\Psi}_r$ – вектор потока ротора;

$\vec{\Psi}_m$ – вектор потокосцепления намагничивания.

При векторном управлении управляющее звено предполагает существование математической модели (ММ) регулируемого электропривода. Режимы для этой классификации векторного управления:

1. По точности ММ электродвигателя, применяемого в звене управления:
 - без вспомогательных прецизионных измерений контроля параметров электродвигателя (требуется только данные с паспортной таблички двигателя);
 - с вспомогательными прецизионными измерениями с помощью контроллера параметров электродвигателя (активные и реактивные сопротивления статора и ротора, напряжения и тока двигателя).

2. векторное управление может быть классифицировано в зависимости от наличия или отсутствия обратной связи по скорости (датчик скорости)

следующим образом:

– управление двигателем без обратной связи по скорости. Регулятор использует данные ММ двигателя и значения, полученные путем измерения тока статора или ротора.;

– управление двигателем с обратной связью по скорости. В этом случае устройство использует данные о скорости (положении) ротора с датчика, а также значения, полученные при измерении тока статора или ротора [13].

На данный момент выделяют три основных законы векторного управления:

- постоянство потокосцепления статора $\overline{\Psi}_s$;
- постоянство потокосцепления намагничивания $\overline{\Psi}_m$;
- постоянство потокосцепления ротора $\overline{\Psi}_r$.

Закон сохранения инвариантности проточной связи статора реализуется при сохранении определенной зависимости между электродвижущей силой статора и угловой частотой магнитного поля. Главным минусом такого закона считается уменьшение перегрузочной способности мотора во время работы на высоких частотах. Это происходит по причине повышения индуктивного сопротивления статора и снижением связи потока в полостях между статором и ротором с повышением нагрузки.

Если основная мощность не меняется, происходит повышение перегрузочной способности двигателя, которая способствует более сложной осуществлению системы управления оборудованием, что в свою очередь приводит к изменениям в конструкции машины и особым проблемам.

При поддержании неизменной проточной связи ротора крутящий момент двигателя не имеет максимального значения, но по мере увеличения нагрузки основной поток увеличивается, происходит насыщение магнитной цепи, и поддержание постоянной потокосцепления ротора становится невозможным [12].

Становится возможным управление текущим вектором, но только в том

случае, если каждый раз известно текущее положение ротора. Для достижения этих целей может быть установлен датчик положения ротора или положение ротора может быть рассчитано в соответствии с другими параметрами электродвигателя. На рисунке 6 показана базовая блок-схема системы векторного управления с использованием датчика положения [11].

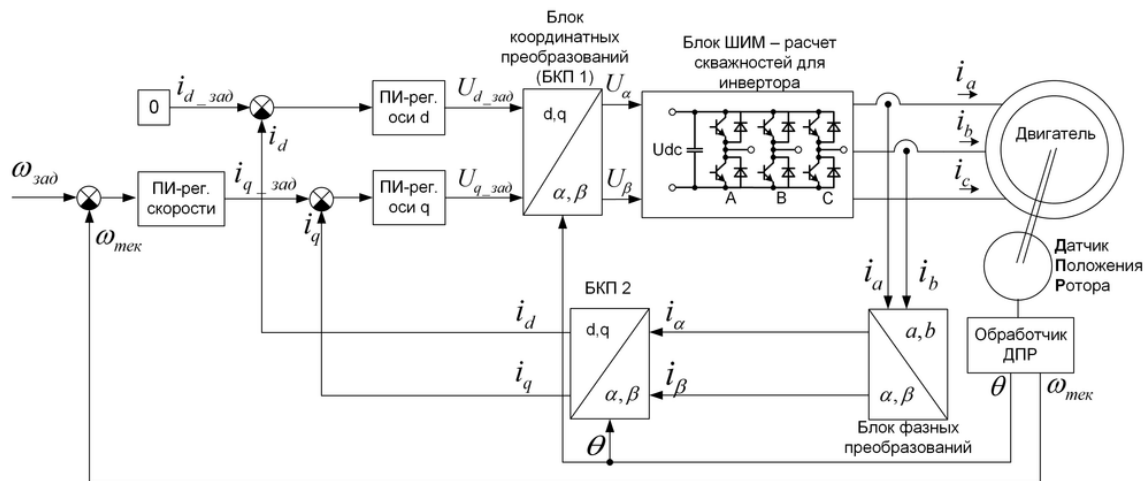


Рисунок 6 – Схема датчикового управления

Назначение функциональных блоков в этой схеме. Блок обработки сигнала датчика положения - модифицирует сигнал датчика положения ротора в угловое положение ротора, а также выполняет вычисление скорости вращения ротора. Механическое положения ротора программно преобразуется в сигнал электрического положения ротора внутри полюсного деления машины (θ). БФП – блок фазных преобразований из трехфазной системы (a, b, c) в двухфазную (α, β). На основе информации сигнала о токах фаз i_a и i_b изображенных на рисунке 7, восстанавливается значение тока в фазе С (i_c) такой процесс имеет название «Прямого преобразования Кларка».

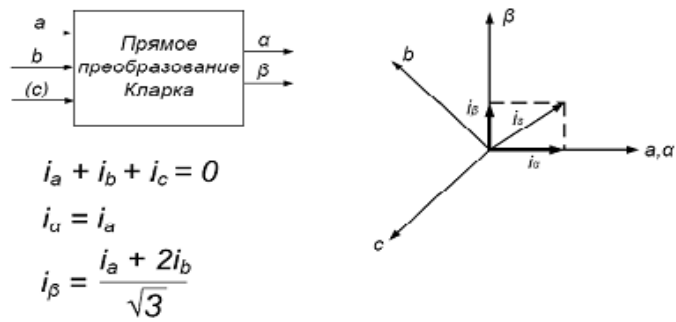


Рисунок 7 – Прямое преобразование Кларка

БКП 1 и БКП 2 – блоки изменения координат из фиксированной системы координат (α, β) в систему координат, вращение которых происходит синхронно с полем двигателя (x, y) и обратно. Переход от стационарной системы к мобильной системе (рис. 8) имеет связь с нынешним положением ротора, и становится возможным расчет компонентов результирующего вектора тока статора по осям d и q .

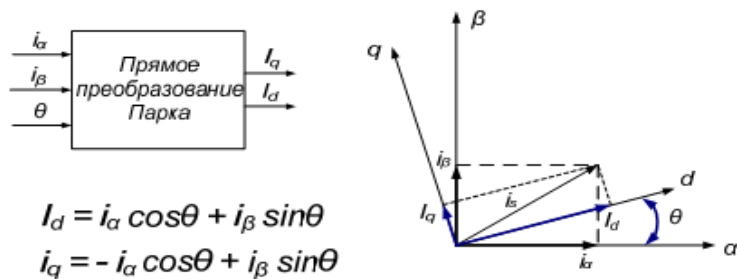


Рисунок 8 – Прямое преобразование Парка

На рисунках 9 и 10 изображены переходы с подвижной системы координат к неподвижной– «Обратные преобразование Кларка».

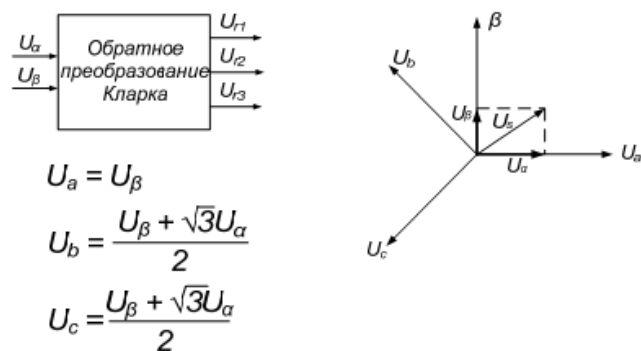


Рисунок 9 – Обратное преобразование Кларка

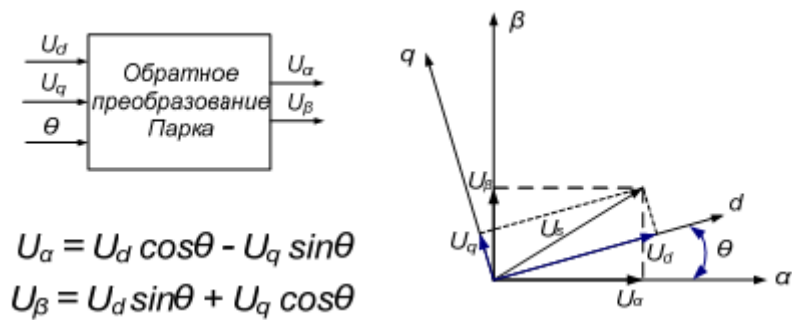


Рисунок 10 – Обратное преобразование Парка

Выход регулятора тока пропорционален компонентам по осям d и q результирующего вектора напряжения статора. Блок ШИМ преобразует вектор напряжения в полярную систему координат, которая связана с продольной осью ротора. Потом с учетом текущего положения ротора q , определяется рабочий сектор и внутри секторный угол, а также рассчитываются компоненты базовых векторов в абсолютной системе координат, которые имеют связь со статором. Далее формируются напряжения, прикладываемые к обмоткам двигателя U_a, U_b, U_c .

Рассмотрим векторное управление без датчика скорости, который имеет меньшую стоимость. Данный способ требует высокой скорости вычислений от ПЧ и проведения больших объемов вычислений. На рисунке 11 представлена реализация структурной схемы данного способа [11].

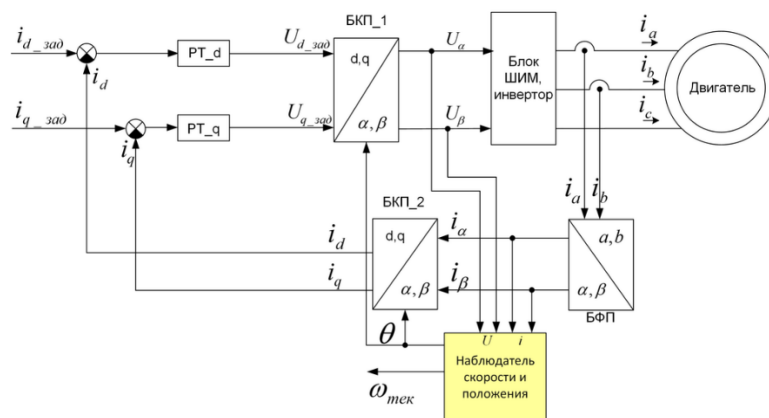


Рисунок 11– Схема бездатчикового управления

Назначением блока «наблюдатель» является этот блок, который получает информацию о подаваемом на двигатель напряжении (например, из задания модуля ШИМ) и информацию о токе в двигателе от датчиков. На маленьких скоростях работа ЧРП невозможна без датчика скорости. Питание обеспечивается инвертором, который обеспечивает желаемую амплитуду и угловое положение вектора тока или напряжения статора в каждый момент времени.

Управление приводом возможно, как в режиме нормальной точности, когда происходит вычисление опорных значений скорости или крутящего момента, так и в режиме повышенной точности. Точность удержания скорости вращения ротора $\pm 0,2\%$ при бездатчиковом векторном управлении скорости и точность $\pm 0,01\%$ при полной скорости векторного управления с датчиком [14].

Достоинством системы с ШИМ является:

- регулирования частоты и скорости имеет неограниченный диапазон;
- возможность работы в режиме холостого хода, при отключенных асинхронных двигателях;
- близкое к единице значение коэффициента мощности сети ($\cos\varphi \approx 1$) во всех режимах работы;
- синусоидальность выходного тока, плавное без скачкового вращения АД на скоростях близких к нулевым;
- хорошие динамические показатели электропривода, зависящие от быстродействия ШИМ управления.

Выводы

Широко используемым методом является частотное регулирование. Этот способ за счет изменения частоты вращения вала двигателя позволяет сократить потребление мощности при работе электропривода насоса и других электроустановок.

Более подробно был сделан анализ технической базы применения режима управления электродвигателями при помощи частотного управления и сравнения этих методов.

Векторное управление может быть реализовано в электроприводах на базе АИТ (автономный преобразователь тока) и АВИ (автономный преобразователь напряжения с ШИМ-управлением). Электроприводы на базе АВИ с ШИМ-управлением более универсальны, чем электроприводы на базе автономных инверторов мощности.

В конечном итоге, векторное управление — лучший способ реализовать требуемую систему управления приводом.

Библиографический список:

1. Возможности использования современного регулируемого электропривода в системах водоснабжения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.privod.ru> Загл. с экрана.
2. Автоматизация насосов и насосных станций с применением регулируемого электропривода [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nnz-ipc.ru> - Загл. с экрана.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов – ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново: 2008 - 298 с.
4. Количественные способы регулирования подачи [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://pumps-ctrl.narod.ru> - Загл. с экрана.
5. Виноградов А.Б. Автоматизация насосной станции с применением частотно-регулируемого электропривода / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, И.Ю. Колодин // Силовая электроника №2 - 2006.
6. Пути повышения энергоэффективности насосных систем [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.agrovodcom.ru> - Загл. с экрана.
7. Коротко о частотно-регулируемом приводе [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://energoberezhnie.rut> - Загл. с экрана.
8. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник - М.: 1982.514 с.
9. Векторное управление [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> - Загл. с экрана.

10. Векторное управление / Сайт для тех, кто хочет научиться программировать ПЛК [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://plc24.ru> - Загл. с экрана.

11. Калачев Ю. Н. Векторное регулирование (заметки практика): методические указания / Ю. Н. Калачев. – М.: ЭФО, 2013. - 63 с.

13. Елизаров В.В., Суринский Д.О. Методика применения напряжения высокой частоты в высоковольтных устройствах для отпугивания синантропных птиц. / Вестник КрасГАУ. 2017. № 12 (135). С. 96-100.

14. Абраменко В.В., Савчук И.В. Моделирование частотно-регулируемого электропривода питательных электронасосов. / В сборнике: Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. 2020. С. 505-509.