

УДК 621.313.

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ДЛЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

¹Бердиев Усан Турдиевич - к.т.н., профессор, Email: berdiyev1962@inbox.ru ORCID ID: 0000-0003-3513-0496

²Норбоев Анвар Эшмунинович – ст.предователь. Email: a_norbojev@list.ru ORCID ID: 0000-0002-1949-7016

¹Ташкентский Государственный транспортный университет. г.Ташкент. Узбекистан.

²Каршинский инженерно-экономический институт. г.Карши. Узбекистан

Аннотация. В данной статье рассмотрено одно из приоритетных направлений для электроприводов с асинхронным электродвигателем, питаемым от преобразователя частоты. Для эффективного использования электрической энергии, подводимой через систему электроснабжения, необходимо иметь преимущества со стороны управления, снижение затрат, увеличение производительности, энергоэффективность, и высокое качество выпускаемой продукции или обрабатываемого материала. Проведен анализ работы насосной станции для двух видов пар полюсов.

Ключевые слова: электродвигатель, привод, проблемы регулирования, преимущества, асинхронный двигатель, нагрузка, частота, крутящий момент, входное напряжение, скалярное управление.

This article considers the issue of one of the priority areas for electric drives with asynchronous electric motors powered by a frequency converter. For the efficient use of electrical energy supplied through the power supply system and many benefits from the management side, cost reduction, increased productivity, energy efficiency, and high quality of the produced or processed material. The analysis of the operation of the pumping station for two types of pole pairs was carried out.

Key words. electric motor, drive, regulation problems, advantages, asynchronous, load, frequency, torque, input voltage, scalar control.

Быстрое развитие силовой электроники позволило применять асинхронные электродвигатели не только в традиционных решениях с фиксированной скоростью вращения, но и с успехом использовать их в системах регулирования скорости. В таких системах двигатель должен управляться от статического преобразователя частоты, а не от линии электропередачи. Использование электродвигателей с короткозамкнутым ротором в паре с преобразователем частоты имеет большие преимущества в отношении затрат и энергоэффективности, по сравнению с другими промышленными решениями регулирования скорости [1,3]. Тем не менее, преобразователь влияет на характеристики электродвигателя и может наводить помехи в питающую электросеть. Постоянное увеличение числа приложений с асинхронными электродвигателями, питаемыми от ШИМ преобразователей частоты, с регулируемой скоростью, требует хорошего понимания всей системы электропитания, а также взаимодействия между ее отдельными частями (линия электропитания - преобразователь частоты - асинхронный двигатель - нагрузка) [1,4].

Использование преобразователей частоты в настоящее время является наиболее эффективным методом регулирования скорости вращения электродвигателей. На выходе преобразователя из напряжения постоянной частоты и постоянной амплитуды формируется напряжение, переменное по частоте и амплитуде. Изменение частоты напряжения, подаваемого на зажимы электродвигателя, приводит к изменению частоты вращающегося магнитного поля, которое в свою очередь изменяет механическую скорость вращения вала электродвигателя [3,4,6]. Момент на валу, развиваемый электродвигателем, рассчитывается по формуле:

$$M = k_1 \varphi_1 I_2 \quad (1.1)$$

Пренебрегая падением напряжения, обусловленного сопротивлением статора, поток намагничивания рассчитывается по формуле:

$$\Phi_m = k_2 U_1 / f_1 \quad (1.2)$$

где: M - момент на валу (Нм); Φ_m - поток намагничивания (Вб); I_2 - ток ротора (А); U_1 - напряжение статора, зависит от нагрузки (В); k_1 и k_2 константы – зависят от материала и исполнения электрической машины. Учитывая постоянство момента нагрузки и допуская, что ток зависит от нагрузки, получаем, что изменение питающего напряжения, подаваемого на электродвигатель с амплитудой пропорциональной частоте приводит к постоянству потока намагничивания и, следовательно, постоянному крутящему моменту, в то время как ток остается неизменным [4]. Таким образом, двигатель обеспечивает постоянную корректировку скорости и вращающего момента в отношении механической нагрузки. Потери при этом могут быть сведены к минимуму, в соответствии с условиями нагрузки путем поддержания постоянного скольжения на любой скорости, для заданной нагрузки [4,6]. Из вышеприведенного выражения получен график, который приведен на рисунке 1.

Соотношение U/f остается неизменным до базовой (номинальной) скорости двигателя. Выше этой частоты значение напряжения остается неизменным, в то время как частота может увеличиваться, как показано на графике в рис.1, а. Область выше базовой частоты называется областью ослабления поля, в которой поток уменьшается в результате увеличения частоты и, как следствие, уменьшается крутящий момент двигателя. Типичная зависимость крутящего момента от скорости асинхронного двигателя при управлении от преобразователя частоты изображена на иллюстрации в рис.1,б. Получается, что крутящий момент остается постоянным до базовой частоты и выше этой частоты он падает (ослабление поля) [1,2]. Поскольку выходная мощность пропорциональна крутящему моменту, умноженному на скорость, она растет линейно до базовой частоты, а выше этой частоты остается постоянной, рис.1, с.

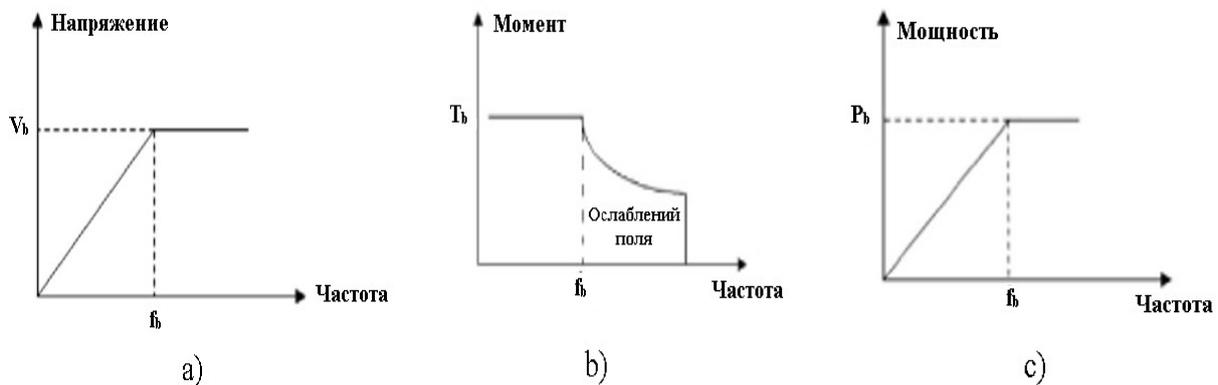


Рис.1.-Зависимости подводимого напряжения, крутящего момента и мощности асинхронного двигателя при управлении от преобразователя частоты

Для регулирования скорости электродвигателя используется ШИМ напряжение на выходе преобразователя частоты. Преобразователи работают в качестве интерфейса между источником энергии (линии электропитания) и асинхронным электродвигателем [3, 6]. Для того чтобы получить выходной сигнал требуемого напряжения и частоты, входной сигнал должен пройти три этапа (рис.2.):

диодный мост – выпрямление входного напряжения переменного тока постоянной амплитуды и частоты;

звено постоянного тока или фильтр – регулирование (сглаживание) выпрямленного напряжения с использованием конденсаторов;

инвертор на IGBT транзисторах – преобразование напряжения, после звена постоянного тока в переменное напряжение, переменной амплитуды и частоты.

На рис.2 показаны три основных звена преобразователя частоты для управления асинхронными двигателями.

В условиях малых нагрузок (или на холостом ходу) напряжение звена постоянного тока стабилизируется на уровне $\sqrt{2}U_{\text{пит}} \cong 1,41U_{\text{пит}}$. Однако при полной нагрузке напряжение звена постоянного тока снижается до отметки $3/\pi\sqrt{2}U_{\text{пит}} \cong 1,35U_{\text{пит}}$.

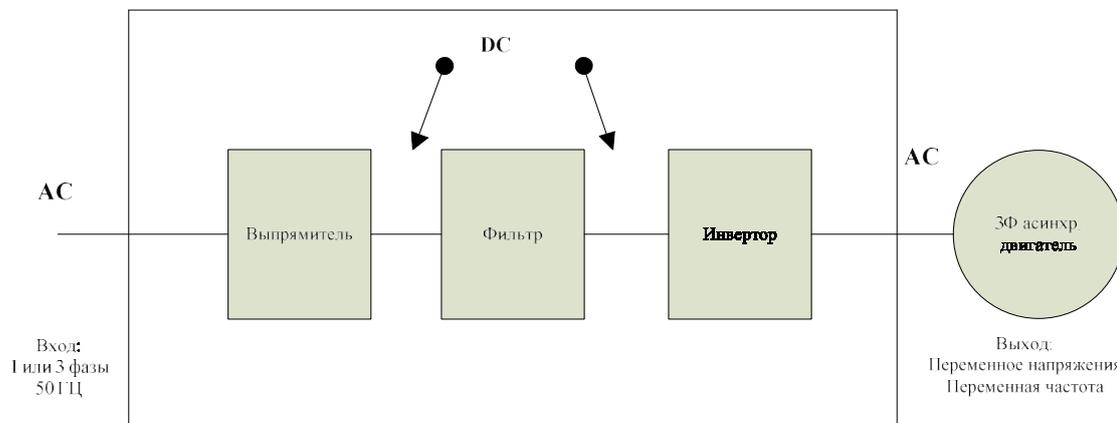


Рис.2. Последовательность включения элементов преобразователя.

Имеется два базовых типа управления: скалярное управление (без обратной связи) и векторное управление (с или без обратной связи). Скалярное управление, основано на оригинальной концепции преобразователей частоты: сигнал определенного соотношения напряжение/частота подается на клеммы электродвигателя и это соотношение сохраняется постоянным во всем диапазоне частот, для того чтобы сохранить постоянным поток намагничивания электродвигателя [5,7]. Скалярное управление обычно используется, когда нет необходимости быстрого реагирования на изменения задания крутящего момента и скорости, и особенно интересно, когда одним преобразователем регулируется скорость вращения нескольких подключенных к нему электродвигателей.

При скалярное управление производится без обратной связи, и точность поддержания скорости является функцией скольжения двигателя, которое зависит от нагрузки, так как частота накладывается на обмотке статора. Для того, чтобы улучшить производительность двигателя на низких скоростях, некоторые привода используют специальные функции, такие как компенсация скольжения (ослабление изменения скорости как функции нагрузки) и повышение крутящего момента (увеличение коэффициента U/f для компенсации падения напряжения на статоре), так что крутящий момент двигателя поддерживается постоянным. Это является наиболее широко используемым типом управления благодаря своей простоте, а также тому, что большинство приложений не требуют высокой точности или быстрого изменения скорости [5,6].

При этом векторное управление обеспечивает высокие быстродействие и точность управления скоростью электродвигателя и крутящего момента. По существу, ток двигателя разделяют на два вектора, один из них производит поток намагничивания, а другой образует крутящий момент, каждый из которых регулируется отдельно. Векторное управление может быть с разомкнутым контуром (без датчиков обратной связи) или с замкнутым контуром (с датчиками обратной связи). Обратная связь по скорости - датчик скорости (например, инкрементальный энкодер), устанавливается на электродвигателе. Данный режим обеспечивает высокую точность управления, как крутящим моментом, так и скоростью двигателя даже при очень низких (и нулевой) скоростях [2,6].

Основное различие между этими двумя типами управления заключается в том, что скалярное управление учитывает только величины мгновенных электрических величин (магнитного потока, тока и напряжения), приложенных к статору, с уравнениями на основе эквивалентной электрической цепи электродвигателя, то есть уравнениями стационарного

состояния. С другой стороны, при векторном управлении рассчитываются мгновенные электрические величины, влияющие на потокосцепление ротора в качестве векторов и его уравнения основываются на пространственной динамической модели двигателя. Асинхронный двигатель при векторном управлении рассматривается как двигатель постоянного тока, с отдельно управляемыми моментом и потоком.

Центробежные насосы имеют квадратичную зависимость крутящего момента от скорости вращения, в то время как мощность изменяется пропорционально кубу скорости. В этом случае, двигатель должен быть рассчитан на максимальную скорость в пределах рабочего диапазона насоса, потому что именно на ней происходит максимальное потребление момента. На рис.4 показано, что этот пример имеет два варианта выбора электродвигателя: 2-х полюсный двигатель, либо 4-х полюсный двигатель. 2-х полюсный двигатель будет работать в диапазоне с постоянным моментом (на скорости ниже базовой), а 4-х полюсный двигатель будет работать в диапазоне ослабления поля (на скорости выше базовой) [4,5].

Момент, необходимый насосу при максимальной скорости:

$$M(\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{м}) = 716 P \frac{\text{л. с.}}{n \left(\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right)} \Rightarrow \frac{M_{\text{ном}} 716(10)}{2700} = 25,99 \text{ Нм}$$

Для 2-х полюсного электродвигателя $2700 \text{ об/мин} = 0,75 \text{ о.е. } 45\text{Гц}$. В соответствии с критериями снижения момента, электродвигатели, способны работать в диапазоне 1000:1 с переменным моментом нагрузки, то есть, нет необходимости снижения момента во всем диапазоне скоростей. Тогда поправочный коэффициент будет равен 1.

$$M_{2p} = \left(\frac{M_{\text{ном}}}{df} \right) = 25,99 \frac{\text{Нм}}{1} = 25,99 \text{ Нм.}$$

Из каталога электродвигателей, наиболее подходящим трехфазным электродвигателем будет двигатель мощностью 11кВт - 2-х полюсный.

Для 4-х полюсного электродвигателя $2700 \text{ об/мин} = 1,5 \text{ о.е. } \Rightarrow 90\text{Гц}$.

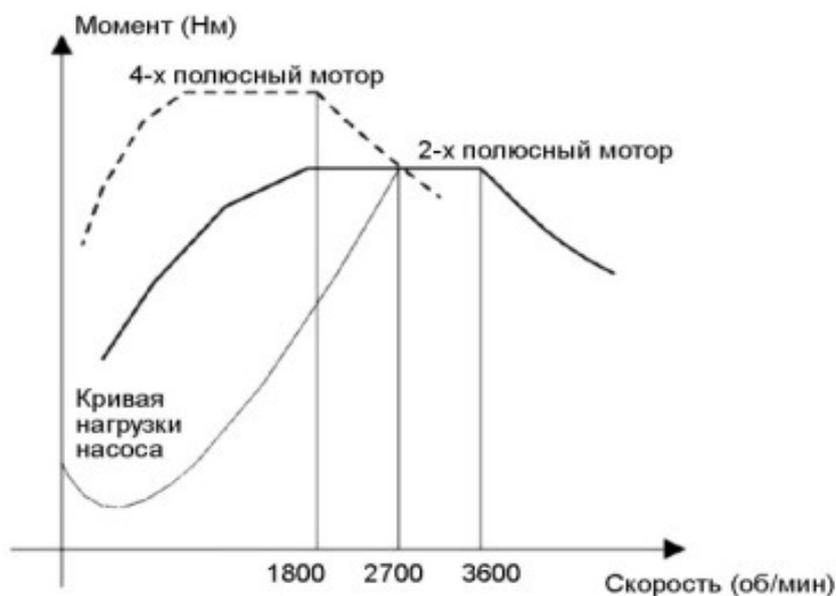


Рис.3. Механические характеристики насосного агрегата при 2-х и 4-х пар полюсов электродвигателя.

В соответствии с критериями снижения момента, электродвигатели способны поддерживать постоянную мощность от 90 до 90Гц с нагрузкой с переменным моментом. Тогда на 90Гц поправочный коэффициент будет равен $(1/1,5)$.

$$M_{4p} = \left(\frac{M_b}{df} \right) = 25,99 \text{ Нм} \cdot 1,5 = 38,99 \text{ Нм}$$

Вследствие работы в области ослабления магнитного поля также должен быть проверен критический вращающий момент двигателя. В соответствии с критическим вращающим моментом, двигатель соответствует требованиям приложения. Наиболее подходящим трехфазным 4-х полюсным электродвигателем является двигатель мощностью 7,5 кВт.

Таким образом, после проведения технического и экономического анализа выявлено, что наиболее подходящим двигателем для такого применения является 4-х полюсный электродвигатель мощностью 7,5 кВт.

За последние годы значительно увеличилось количество применений электродвигателей с регулированием скорости вращения преобразователем частоты. Результаты анализов показывают, что использование преобразователей частоты для регулирования электроприводов насосных и других производственных агрегатов является наиболее эффективным методом регулирования скорости вращения асинхронных электродвигателей. Это объясняется многими преимуществами таких применений: - со стороны управления; снижение затрат; увеличение производительности; энергоэффективность; универсальность; высокое качество. Все эти преимущества дают возможность широкого применения регулируемого асинхронного электродвигателя для различных агрегатов с помощью преобразователей частоты

ЛИТЕРАТУРА

1. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока/под ред. Народицкого А.Г.– СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2005. – 100 с.
2. Кулинич Ю.М. Электронная и преобразовательная техника: Уч. Пособия. -Хабаровск. Издательство ДВГУПС. 2008г. 181с.
3. У.Т.Бердиев - Особенности работы частотно-регулируемого тягового асинхронного двигателя. ТашИИТ, Вестник , 2015г №1, 78-80 стр.
4. Рутштейн А. М. Вспомогательный привод электровозов переменного тока // Электровозостроение. Сборник научных трудов – Новочеркасск: ОАО "ВЭЛНИИ", 2008 т. 56.
5. U.T.Berdiyev, Gapparov A.. Decrease in noise and vibration of single-phase asynchronous motors in rolling stock/ International Scientific Conference "Construction mechanics and Water Resources Enjunering" (CONMECHIDRO-2020) 22-23 April, 2020 in Tashkent , Uzbekistan, Number 287.
6. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. - М.: Academia, 2006. - 265 с.
7. Фираго, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго. Л. Б. Павлячик. - Мн.: Техноперспектива, 2006. -363 с.