

УДК 621.873.01

UDC 621.873.01

**АДАПТИВНЫЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ
АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРЕОБРА-
ЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ ПРИВОДА НАСО-
СОВ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**ADAPTIVE ENERGY SAVING CONTROL AL-
GORITHM FOR FREQUENCY CONVERTER
OF ELECTRIC DRIVE FOR PUMPS OF WA-
TER SUPPLY SYSTEMS**

Таранов Дмитрий Михайлович
к.т.н., доцент кафедры ЭЭО и ЭМ

Taranov Dmitriy Mikhailovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor of EEE and EM

Каун Олег Юрьевич
ассистент кафедры ИТ и УС

Kaun Oleg Yurievich
assistant of IT and CS

Гуляев Павел Владимирович
к.т.н., доцент кафедры ЭЭО и ЭМ

Gulyaev Pavel Vladimirovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor of EEE and EM

Гуляева Татьяна Владимировна
к.т.н. ассистент кафедры ЭЭО и ЭМ

Gulyaev Tatiana Vladimirovna
Cand.Tech.Sci., assistant professor of EEE and EM

Лыткин Алексей Владимирович
аспирант кафедры ЭЭО и ЭМ
*Азово-Черноморская государственная агроинже-
нерная академия, Зерноград, Россия*

Lytkin Aleksey Vladimirovich
postgraduate student of EEE and EM
*Azov-Black Sea State Agroengineering Academy,
Zernograd, Russia*

В статье представлен адаптивный алгоритм управ-
ления преобразователем частоты, позволяющий
уменьшить энергетические затраты и повысить
КПД насосного агрегата системы водоснабжения

This article offers adaptive control algorithm for fre-
quency converter. It can make decrease expenditure of
energy and increase coefficient of efficiency of pump
of water supply systems

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРО-
ПРИВОД, НАСОС, СИСТЕМА ВОДОСНАБЖЕ-
НИЯ, ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ,
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ, АДАПТИВНЫЙ
АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Keywords: ASYNCHRONOUS DRIVE, PUMP,
WATER SUPPLY SYSTEM, PULSE-DURATION
MODULATION, FREQUENCY CONVERTER,
ADAPTIVE ALGORITHM OF CONTROL

В настоящее время актуальной проблемой является экономия элек-
трической энергии. Одним из путей энергосбережения в сельском хозяй-
стве является создание энергосберегающих электроприводов, позволяю-
щих максимально возможно снижать потребление электрической энергии,
обеспечивая при этом максимальный КПД электропривода.

Существенная часть энергетических затрат в животноводстве при-
ходится на водоснабжение /1/. Для снижения энергетических затрат в
процессе водоснабжения целесообразно использовать асинхронный регу-
лируемый электропривод совместно с преобразователями частоты с про-
межуточным звеном постоянного тока.

Однако алгоритмы управления преобразователями частоты в настоящее время не являются оптимальными, поэтому существует потребность в создании адаптивных алгоритмов управления преобразователями частоты для поддержания стабильного давления в системе водоснабжения.

Адаптивный алгоритм должен решать такую оптимизационную задачу, как увеличение КПД насосного агрегата при минимальных энергетических затратах. Целевая функция оптимизационной задачи имеет следующий вид:

$$I_{\text{эд}} = f(U, f, P) \quad (1)$$

где: $I_{\text{эд}}$ - потребляемый электродвигателем ток, А;

U – фазное напряжение, В;

f – частота питающей сети, Гц;

P – давление в системе водоснабжения, Па.

Граничные условия:

$$1. \quad h_{\text{аг}} = h_{\text{нч}} \cdot h_{\text{эд}} \cdot h_{\text{н}} \cdot h_{\text{т}} \rightarrow \max$$

где: $h_{\text{нч}}$, $h_{\text{эд}}$, $h_{\text{н}}$, $h_{\text{т}}$ - соответственно КПД преобразователя частоты, электродвигателя; насоса; трубопровода.

$$2. \quad I_{\text{эд}} \rightarrow \min$$

КПД асинхронного электродвигателя рассчитывается по формуле /2/:

$$\eta_{\text{эд}} = \frac{P_2}{P_1}, \quad (2)$$

где P_1 – потребляемая из сети мощность;

P_2 – полезная мощность на валу электродвигателя, которая равна:

$$P_2 = P_1 - P_{\text{эл1}} - P_{\text{ст}} - P_{\text{эл2}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{д}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{эл1}}$ - потери мощности электрические в обмотке статора, Вт;

$P_{ст}$ - потери в стали, Вт;

$P_{эл2}$ - потери мощности электрические в короткозамкнутом роторе;

$P_{мех}$ - потери механические, Вт;

$P_{д}$ - добавочные потери, Вт.

Подставляя значения потерь асинхронного электродвигателя /2/ в формулу (3), получим:

$$P_2 = P_1 \cdot \left(0,995 - \frac{n_1 - n_2}{n_1}\right) - 1,22 \cdot I_1^2 \cdot R_{1\phi 20} \cdot \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1}\right) - P_{ст} \cdot \left(1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1}\right) - P_{мех}, \quad (4)$$

где n_1 – синхронная частота вращения, мин^{-1} ;

n_2 – частота вращения ротора, мин^{-1} .

I_1 – линейный ток обмотки статора, А;

$R_{1\phi 20}$ – сопротивление фазной обмотки, приведенное к температуре 20°C, Ом.

Из формулы (4) следует, что полезная мощность зависит от тока статора, частоты вращения, механических потерь, потерь в стали и сопротивления обмоток статора.

Из этого можно сделать вывод, что при уменьшении тока статора увеличивается полезная мощность на валу электродвигателя, и соответственно увеличиваем КПД асинхронного электродвигателя и рабочей машины в целом.

Для решения поставленной задачи разработана структурная схема автоматического управления электроприводом насоса с обратной связью по давлению и току, которая необходима для создания стабильного давле-

ния в системе водоснабжения и контроля потребляемой мощности (рисунок 1).

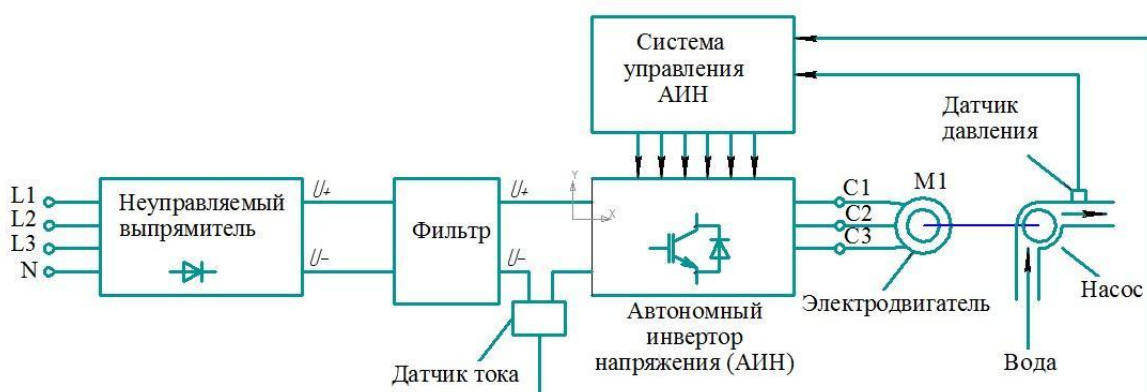


Рисунок 1 - Структурная схема электропривода насоса

Структурная схема электропривода насоса работает следующим образом. Трехфазное переменное напряжение 380В подается на неуправляемый выпрямитель, который преобразует трехфазное переменное напряжение в постоянное напряжение. Выпрямленное напряжение поступает на фильтр, где происходит сглаживание. Затем постоянное напряжение подается на автономный инвертор напряжения. Блок управления формирует трехфазную симметричную широтно-импульсную модуляцию на автономном инверторе напряжения. С выхода инвертора напряжение подается на электродвигатель. Датчик тока необходим для контроля тока двигателя и автоматического подбора минимального энергопотребления. При изменении давления в системе водоснабжения при помощи обратной связи сигнал подается в блок управления и алгоритм преобразователя частоты самостоятельно корректирует частоту вращения насоса таким образом, чтобы давление в системе водоснабжения было постоянным.

Выпускаемые в настоящее время преобразователи частоты, несмотря на огромное количество достоинств, обладают следующими недостатками:

- 1 ограниченное количество стандартных законов управления частоты и напряжения $U/f^n = \text{const}$;

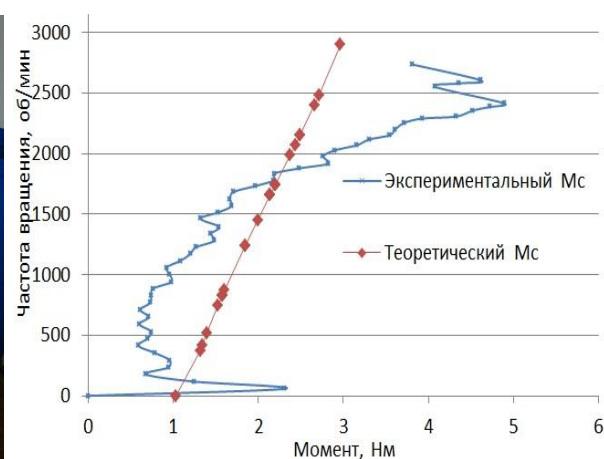
2 возможность ручного подбора закона управления ограничено максимум 5 точками;

3 отсутствие адаптивного подбора параметров, обеспечивающих минимальное энергопотребление и стабильное давление при подключении ПИД-датчика по давлению.

На рисунке 2 (а) представлена экспериментальная установка для снятия механической характеристики насосов в режиме адаптивного управления по току и давлению. Экспериментальные данные получены для электродвигателя АИР80А2У3 $P_n=1,5$ кВт совместно с насосом К8/18.



а)



б)

Рисунок 2 – а) экспериментальная установка, б) графики зависимостей механических характеристик насосного агрегата

При проведении экспериментальных исследований была определена реальная механическая характеристика насосного агрегата (рисунок 2(б)), которая значительно отличается от теоретической.

Это подтверждает предположение, что именно адаптивный алгоритм управления, позволит снизить энергопотребление по сравнению со стандартными законами управления, так как каждый насосный агрегат имеет свою собственную неповторимую механическую характеристику.

Теоретическая зависимость строилась по формуле /3/

$$M_c = 0,3 \cdot M_n + \left(\frac{Q \cdot H \cdot 1000}{102 \cdot 3600 \cdot \eta} - 0,3 \cdot M_n \right) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (5)$$

где M_n – номинальный момент сопротивления, Нм;

Q – текущий расход жидкости, м³/с;

H – напор жидкости, м;

η - КПД насоса;

ω_n - номинальная угловая частота вращения электродвигателя, с⁻¹;

ω - угловая частота вращения электродвигателя, с⁻¹.

Анализ теоретической и экспериментальной зависимостей показал резкое отличие момента расчетного от экспериментального (до 50%), что, в определенных режимах работы, приводит к перерасходу электроэнергии.

Изначально подбирать закон управления под каждый конкретный двигатель не целесообразно, гораздо проще создать адаптивный алгоритм, в котором будет заложена функция поиска минимального тока при регулировании напряжения и постоянстве частоты питающей сети. Однако минимальный ток еще не означает минимальное энергопотребление, поэтому был проведен ряд экспериментальных исследований, целью которых было установление минимума тока и активной мощности при постоянстве частоты питающей сети и регулировании входного напряжения.

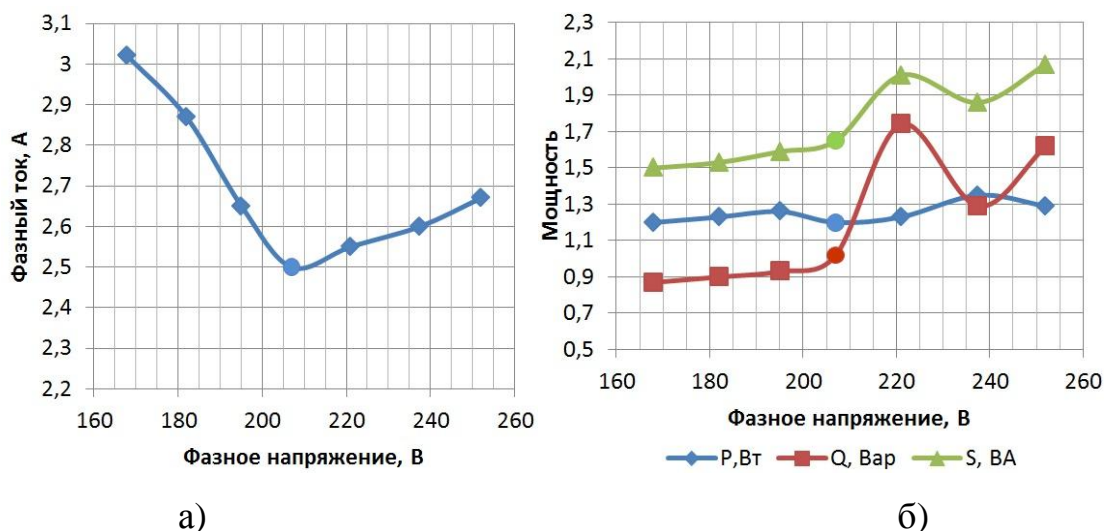


Рисунок 3 – а) - график зависимости тока от напряжения при частоте питающего напряжения 50 Гц; б) - графики зависимостей мощностей от напряжения при частоте питающего напряжения 50 Гц.

На рисунках 4а, 4б, 5а представлены результаты экспериментальных исследований зависимостей тока электродвигателя, активной, реактивной и полной мощностей, коэффициента мощности от величины фазного напряжения.

Анализ этих зависимостей показал, что при частоте тока 50 Гц оптимальным питающим напряжением является $U_{\phi}=207$ В.

При увеличении фазного напряжения происходит значительное увеличение реактивной мощности, а при уменьшении напряжения увеличивается активная мощность по сравнению с реактивной и значительно возрастает ток.

Из анализа зависимости коэффициента мощности от фазного напряжения следует, что при минимальном токе коэффициент мощности практически максимален. Дальнейшее увеличение коэффициента мощности приводит к увеличению тока, что увеличивает затраты электроэнергии.

Для подтверждения нестандартности закона управления построим график зависимости $f=f(U)$ (рисунок 5б), используя оптимальные значения на разных частотах.

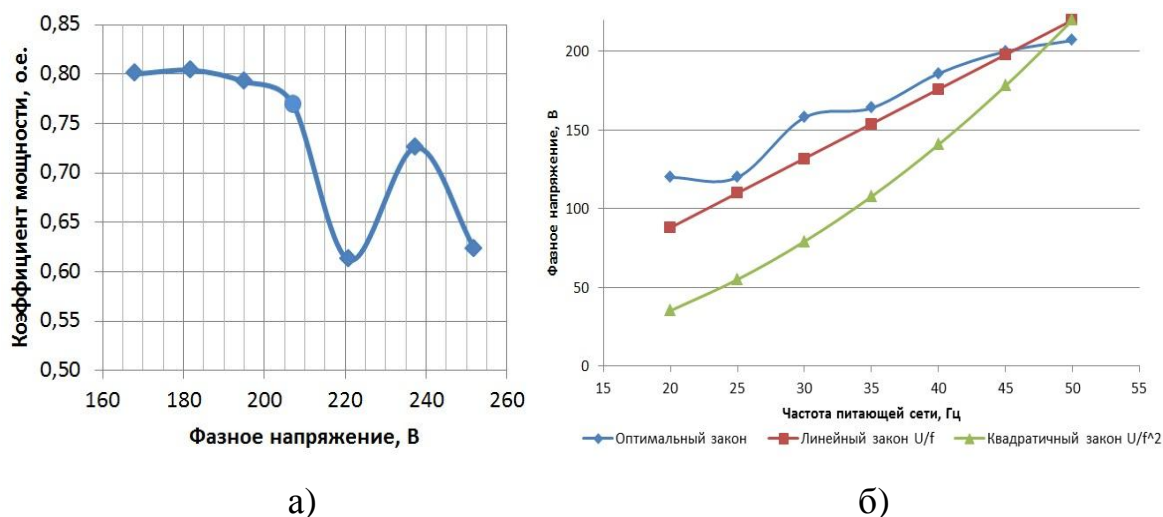


Рисунок 4 – а) график зависимости коэффициента мощности от фазного напряжения при частоте питающего напряжения с частотой 50 Гц; б) оптимальный закон управления преобразователем частоты.

Из графика видно, что стандартные законы управления не оптимальны, поэтому создание алгоритма, который самостоятельно подстраивался бы под конкретную рабочую машину, является актуальной задачей.

На рисунке 8 представлен адаптивный алгоритм работы преобразователя частоты, подстраивающийся под минимальное энергопотребление рабочей машины с максимальным КПД.

Работа алгоритма заключается в автоматическом поиске оптимального значения тока, соответствующего минимальному энергопотреблению. При включении алгоритма в работу, в программу (блок 2) вносятся постоянные величины: начальное, конечное значение и шаг изменения коэффициента заполнения и количества импульсов, величина задержки, учитывающей инерционность системы (А). Коэффициент заполнения импульсов (q) отвечает за амплитуду питающего электродвигатель напряжения, а количество импульсов (z) отвечает за частоту тока питающей электродвигатель сети.

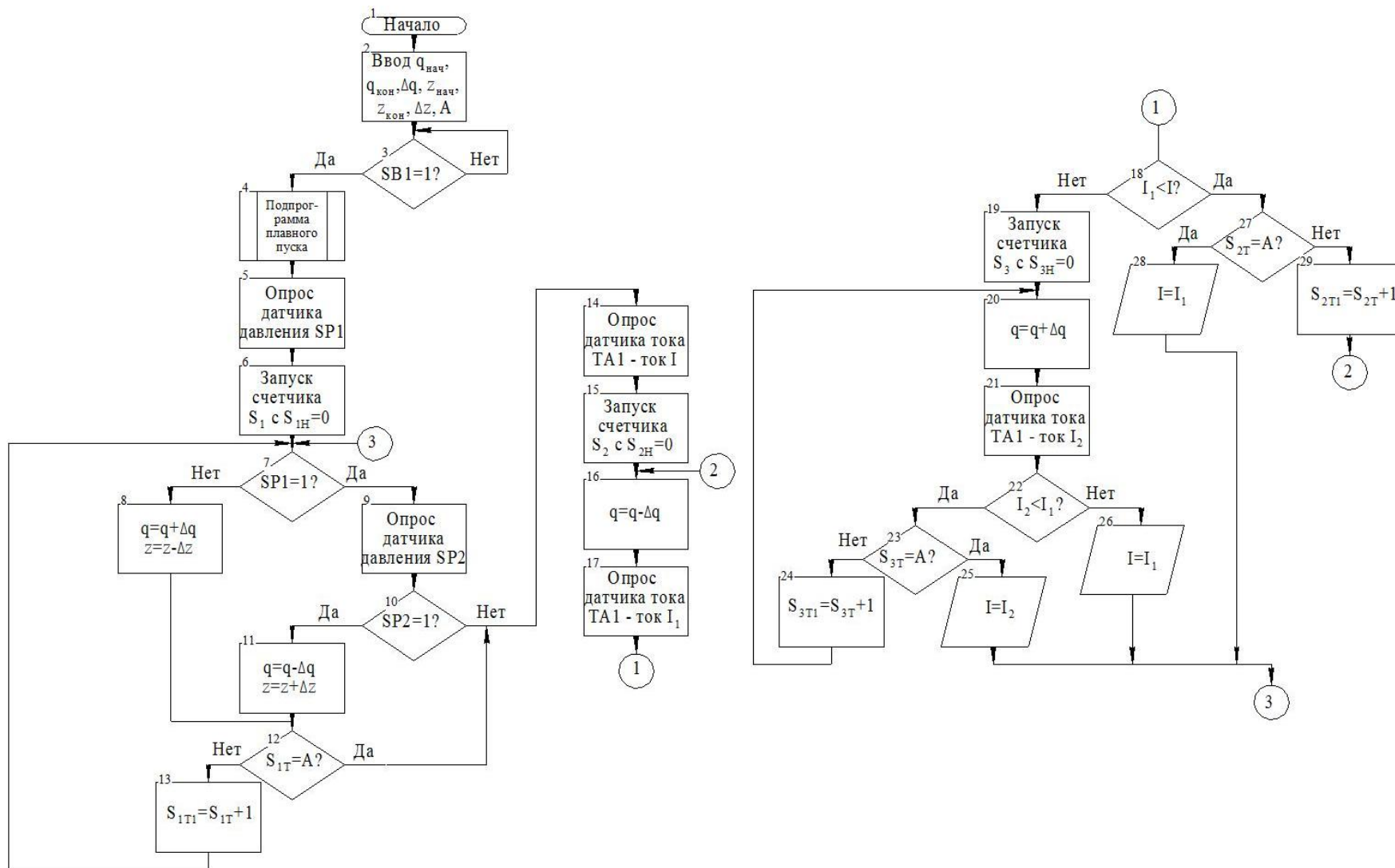


Рисунок 5 - Адаптивный алгоритм управления преобразователем частоты.

В блоке 3 производится опрос кнопки «Пуск» - SB1. Если она нажата ($SB1=1$), то алгоритм переходит к подпрограмме плавного пуска по линейному закону управления (блок 4), иначе алгоритм возвращается на проверку кнопки SB1.

В блоке 5 происходит опрос дискретного датчика минимального давления SP1 (давление меньше заданного). В блоке 6 происходит запуск счетчика S_1 с начальным значением $S_{1H}=0$.

В блоке 7 проверяется, замкнут ли датчик ($SP1=1?$). Если не замкнут, то в блоке 8 производится увеличение q и уменьшение z на шаг. Далее алгоритм переходит к блоку 12, в котором происходит проверка значения A счетчика инерционности.

Если текущее значение S_{1T} не равно A , то в блоке 13 увеличиваем S_{1T} на 1 и возвращаемся к блоку 7.

Если SP1 замкнут, то происходит опрос датчика максимального давления SP2. Если SP2 замкнут, то в блоке 11 производится уменьшение q и увеличение z на шаг. Далее алгоритм переходит к блоку 12, в котором происходит проверка значения счетчика с A .

Если текущее значение S_{1T} не равно A , то в блоке 13 осуществляется увеличение S_{1T} на 1 и возврат к блоку 7.

Если SP2 не замкнут, то алгоритм переходит к блоку 14 - опросу датчика тока ТА1, в результате чего получается значение тока I .

В блоке 15 происходит запуск счетчика S_2 с начальным значением $S_{2H}=0$. В блоке 16 происходит уменьшение q на шаг. В блоке 17 происходит опрос датчика тока ТА1, в результате чего получается значение тока I_1 . В блоке 18 осуществляется сравнение текущего тока I_1 с предыдущим значением тока I .

Если ток $I_1 < I$, то в блоке 27 происходит сравнение текущего значения счетчика S_{2T} с A . Если значение счетчика S_{2T} не равно A , то в блоке 29 происходит увеличение S_{2T} на 1 и возврат к блоку 16, а если значение

счетчика S_{2T} равно A , то параметры q и z остаются без изменения. И далее двигатель работает с этими параметрами при минимальном токе I_1 .

Если ток $I_1 > I$, то в блоке 19 происходит запуск счетчика S_3 с начальным значением $S_{3H}=0$. В блоке 20 происходит увеличение q на шаг. В блоке 21 происходит опрос датчика тока $TA1$, в результате чего получаем ток I_2 .

Если ток $I_2 < I_1$, то в блоке 23 сравнивается текущее значение счетчика S_{3T} с A . Если значение S_{3T} не равно A , то в блоке 24 происходит увеличение S_{3T} на 1 и возврат к блоку 20, а если значение счетчика S_{3T} равно A , то параметры q и z остаются без изменения. И далее двигатель работает с этими параметрами при минимальном токе I_1 .

При дальнейшем изменении давления в системе водоснабжения происходит опрос датчика давления и тока и поиск значения оптимальных параметров для нового расхода.

Учитывая, что у каждого насоса момент сопротивления индивидуален, закон управления электроприводом $U=f(f)$ также должен быть индивидуален. Представленный адаптивный алгоритм будет изменять частоту вращения насоса таким образом, чтобы давление было всегда постоянным при минимально возможном энергопотреблении. Предположительно, использование адаптивного алгоритма управления позволит уменьшить энергетические затраты электропривода на 7-10%, что приведет к увеличению КПД электродвигателя даже в ненагруженном режиме до номинального значения.

Литература

- /1/ Таранов Д.М., Каун О.Ю. Автоматизация технологических объектов та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць XIII науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 14-17 травня 2013 р. – Донецьк, ДонНТУ, 2013. – 441 с. Современный регулируемый электропривод в системах водоснабжения животноводческих комплексов – с. 292-295.
- /2/ Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – Санкт-Петербург.: Питер, 2008. – 350 с.: ил.

- /3/ Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздухоудных установках. – Москва: Энергоатомиздат, 2006. 360с. ил.
- /4/ Гуляев П.В. – Совершенствование защиты и управления электродвигателями погружных насосов на основе преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией. Специальность 05.20.02 - Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве: автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук, Зерноград 2005 г. – 19 с.
- /5/ Гуляева Т.В. – Автоматизированный энергосберегающий электропривод вентиляторов в свиарнике-маточнике. Специальность 05.20.02 - Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве: автореферат, на соискание учёной степени кандидата технических наук, Зерноград, 2011 г. – 18 с.
- /6/ Полупроводниковый трехфазный регулятор напряжения с ШИМ для насосов системы водоснабжения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012617187. Каун О. Ю. Таранов Д. М., Чугунов А. В., Гуляев П. В., Гуляева Т.В., Озеров И. Н.

References

- /1/ Taranov D.M., Kaun O.Ju. Avtomatizacija tehnologichnih ob'ektiv ta procesiv. Poshuk molodih. Zbirnik naukovih prac' XIII naukovno-tehnichnoi konferencii aspirantiv ta studentiv v m. Donec'ku 14-17 travnja 2013 r. – Donec'k, DonNTU, 2013. – 441 s. Sovremennyj reguliruemyy jelektroprivod v sistemah vodosnabzhenija zhivotnovodcheskih kompleksov – s. 292-295.
- /2/ Vol'dek A.I., Popov V.V. Jelekticheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka: Uchebnik dlja vuzov. – Sankt-Peterburg.: Piter, 2008. – 350 s.: il.
- /3/ Leznov B.S. Jenergoberezhenie i reguliruemyy jelektroprivod v nasosnyh i vozduhoduynyh ustanovkah. – Moskva: Jenergoatomizdat, 2006. 360s. il.
- /4/ Guljaev P.V. – Sovershenstvovanie zashhity i upravlenija jelektrodvigateljami pogruznyh nasosov na osnove preobrazovatelej chastoty s shirotno-impul'snoj moduljaciej. Special'nost' 05.20.02 - Jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie v sel'skom hozjajstve: avtoreferat na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk, Zernograd 2005 g. – 19 s.
- /5/ Guljaeva T.V. – Avtomatizirovannyj jenergoberegajushhij jelektroprivod ventiljatorov v svinarnike-matochnike. Special'nost' 05.20.02 - Jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie v sel'skom hozjajstve: avtoreferat, na soiskanie uchjonoj stepeni kandidata tehniceskikh nauk, Zernograd, 2011 g. – 18 s.
- /6/ Poluprovodnikovyy trehfaznyj reguljator naprjazhenija s ShIM dlja nasosov sistemy vodosnabzhenija. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM №2012617187. Kaun O. Ju. Taranov D. M., Chugunov A. V., Guljaev P. V., Guljaeva T.V., Ozerov I. N.