

СОВРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОГРУЖНЫХ ВОДОСНАБЖАЮЩИХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

А.С. Козорез,

заместитель директора по коммерческим вопросам ОАО «Завод Промбурвод»

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования сельскохозяйственных предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.А. Лихтар,

инженер-электрик ОАО «Завод Промбурвод», магистрант БГАТУ

В статье приведены возникающие технические сложности при водоснабжении промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов. Проведен теоретический анализ рационального использования возможных вариантов электропривода погружных насосных агрегатов и обоснована целесообразность использования частотно-регулируемого асинхронного и синхронного электропривода. Приведено описание выпускаемых ОАО «Завод Промбурвод» насосных агрегатов с частотно-регулируемым синхронным электроприводом. Представлена принципиальная электрическая схема частотно-регулируемого электропривода насосного агрегата с асинхронным двигателем или синхронным двигателем с постоянными магнитами, обеспечивающими высокую энергоэффективность электропривода.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, синхронный электропривод, насосный агрегат, механические характеристики, потери мощности, законы регулирования.

The article presents technical difficulties that arise in the water supply of industrial, agricultural and municipal facilities. As a result, the goal is to analyze the rational use of possible options for electric drives for submersible pumping units. The theoretical analysis showed the feasibility of using a frequency-controlled asynchronous and synchronous electric drive. The article further describes the pumping units with a frequency-controlled synchronous electric drive manufactured by PC Promburovod Plant and the basic electrical circuit of a frequency-controlled electric drive of a pumping unit with an asynchronous motor.

Key words: asynchronous motor, synchronous electric drive, pump unit, mechanical characteristics, power losses, control laws.

Введение

Водопотребление в промышленном, сельскохозяйственном и коммунально-бытовом секторе непрерывно изменяется во времени и в широком диапазоне.

Характер изменения водопотребления определяется случайно-вероятностными законами. В итоге эти изменения требуют непрерывного регулирования режима работы насосной установки.

Процесс регулирования осложняется несоответствием рабочих характеристик центробежных насосов и трубопроводов. Для того чтобы увеличить расход воды по трубопроводу, необходимо увеличить и напор на насосной станции, а рабочие характеристики центробежных насосов таковы, что при увеличении подачи воды напор, развиваемый насосом, падает. В то же время при уменьшении подачи воды напор насоса также следовало бы уменьшить, а он, наоборот, увеличивается. Поэтому в периоды уменьшенного водопотребления системы водоснабжения

работают с избыточным напором, который увеличивает утечки и непроизводительные расходы воды, а также при этом нерационально расходуется потребляемая насосным агрегатом электроэнергия, затрачиваемая на создание избыточного напора.

Несоответствие в режимах работы насосов и трубопроводов устраняют использованием накопительных емкостей (водонапорных башен, воздушно-водяных гидроаккумуляторов), дросселирующих устройств и/или регулированием скорости вращения насосных агрегатов параметрическими или частотными методами [1].

При уменьшении скорости вращения насоса уменьшается его подача воды и развиваемый напор, при увеличении скорости вращения подача и напор воды увеличиваются одновременно, что позволяет исключить вышеуказанный недостаток.

Регулированием скорости вращения насоса его рабочие параметры приводятся в соответствие с режи-

мом работы системы водоснабжения. Чтобы изменить скорость вращения насоса, необходимо использование регулируемого электропривода (ЭП). Значение скорости вращения насоса, с которой он должен работать в конкретный момент времени, определяется системой автоматического управления насосной установки.

Требуемое значение скорости вращения определяется многими факторами, к которым относятся расход жидкости и потери напора в системе водоснабжения, ее уровень в резервуарах, значения статического и динамического противодавления, количество параллельно и/или последовательно работающих насосов и насосных установок, подающих жидкость в систему водоснабжения и т.д.

Все это в конечном итоге снижает энергозатраты, но усложняет систему водоснабжения, так как наряду с механическими и гидравлическими устройствами, появилась достаточно сложная электромеханическая система – регулируемый ЭП насоса. Кроме того, ЭП насосных установок требует устройства защиты от возможных аварийных режимов.

Цель данной работы – провести анализ рационального использования возможных вариантов ЭП погружных насосных агрегатов систем водоснабжения.

Основная часть

Сравнение ЭП при вентиляторной нагрузке, к которой относятся насосы, по возможному диапазону регулирования и потерям в асинхронных электродвигателях (АД) проводилось авторами в работах [2, 3].

Анализ выражений, полученных в работе [2] при параметрическом регулировании скорости, показывает, что диапазон регулирования скорости будет зависеть от вида механической характеристики насоса. Чем более выражена зависимость момента нагрузки от скорости, тем возможен более широкий диапазон регулирования. Однако необходимо учитывать, что при росте нагрузки и приближении указанной зависимости к линейному закону, который происходит при росте напора (противодавления) в системе водоснабжения, этот диапазон значительно уменьшается, так как коэффициент жесткости механической характеристики насоса β_c растет медленнее, чем коэффициент жесткости механической характеристики электродвигателя β_d . Следовательно, критерий статической устойчивости работы агрегата $\beta_d - \beta_c < 0$ перестанет выполняться при большей скорости, что говорит об уменьшении диапазона регулирования скорости. При этом необходимо учитывать, что работа ЭП в широком диапазоне скоростей, т.е. с большим скольжением, вызывает значительные потери в роторе АД (рис. 1). Потери в обмотке ротора при номинальной скорости ω_n , соответствующей номинальному напряжению питания обмоток статора U_{1n} , будет выражаться площадью прямоугольника $\omega_0 - \omega_n - \text{т.1} - a$, а потери в обмотке ротора при скорости ω_{y3} , соответствующей пониженному напряжению U_1 , – площадью прямоугольника $\omega_0 - \omega_{y3} - \text{т.3} - b$. Из

рисунка 1 очевидно, что они значительно выросли.

Полные же электромагнитные потери в АД будут определяться из следующего выражения:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{c1}, \quad (1)$$

где ΔP_{m1} – потери в меди статора, Вт;

ΔP_{m2} – потери в меди ротора, Вт;

ΔP_{c1} – потери в стали статора, Вт.

При работе АД на естественной характеристике согласно [4, 5], эти потери определяются выражениями:

$$\Delta P_{m1} = \left(\frac{I_{\mu n}}{I_{1n}} + \left(1 - \frac{I_{\mu n}}{I_{1n}} \right) \mu_c^2 \right) \Delta P_{m1n}; \quad (2)$$

$$\Delta P_{m2} = \mu_c^2 \Delta P_{m2n}; \quad (3)$$

$$\Delta P_{c1} = [B + (1 - B) \mu_c^2] \Delta P_{c1n}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{m1n} = 3 I_{1n}^2 r_1'$ – номинальные потери в меди статора, Вт;

I_{1n} – номинальный ток обмотки статора, А;

r_1' – активное сопротивление обмотки статора, Ом;

$\Delta P_{m2n} = 3 (I_{2n}')^2 r_2'$ – номинальные потери в обмотке ротора, Вт;

I_{2n}' – приведенный номинальный ток обмотки ротора, А;

r_2' – приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора, Ом;

$$\Delta P_{c1n} = \Delta P_n - \left(\Delta P_{m1n} + 1,5 \cdot 10^{-2} P_n + 10^{-2} \frac{P_n s_n}{1 - s_n} \right) \quad - \text{номинальные потери в стали статора, Вт;}$$

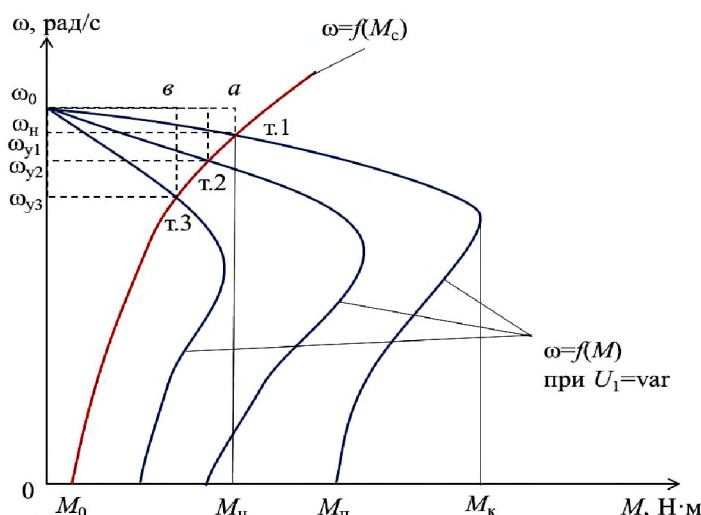


Рисунок 1. Естественная и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различных напряжениях обмоток статора U_1 и механическая характеристика погружного насоса $\omega=f(M_c)$: M_0 , M_n , M_{Π} – соответственно, моменты – критический, пусковой и номинальный АД, Н·м; M_0 – момент трогания насоса, Н·м.

s_n – номинальное скольжение АД, о.е.;

P_n – номинальная мощность АД, Вт;

$$\Delta P_n = \frac{P_n(1-\eta_n)}{\eta_n} - \text{суммарные номинальные}$$

потери в АД, Вт;

η_n – номинальный КПД АД, о.е.;

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_n} - \text{относительное значение момента}$$

статической нагрузки M_c по отношению к номинальному моменту M_n АД, о.е.;

B – конструктивный коэффициент, зависящий от серии АД, о.е. ($B=0,96-0,98$ – для серии АД 4А);

$I_{\mu n}$ – намагничивающий ток АД в номинальном режиме, А.

При работе АД на искусственных механических характеристиках, полученных за счет снижения напряжения питания обмотки статора U_1 , составляющие полных электромагнитных потерь в АД согласно [4, 5], определяются по выражениям:

$$\Delta P_{m1} = 1,1\mu_c^2 \left(\frac{I_0 s_n}{I_{\mu n} s} + \left(1 - \frac{I_0}{I_{\mu n}} \right) \frac{s_n}{s} \right) \Delta P_{m1n}; \quad (5)$$

$$\Delta P_{m2} = 1,1\mu_c^2 \left(\frac{s}{s_n} \right) \Delta P_{m2n}; \quad (6)$$

$$\Delta P_{c1} = \mu_c^2 \left[B \frac{s_n}{s} + (1-B) \frac{s}{s_n} \right] \Delta P_{c1n}, \quad (7)$$

где $I_0 = i \cdot I_{\mu n}$ – намагничивающий ток, при значении питающего напряжения U_1 , А;

i – относительный намагничивающий ток (о.е.), который для используемых электротехнических сталей согласно [2; 5, 6], определяется из выражения:

$$i = (-0,988 + \sqrt{0,988^2 - 4 \cdot (-0,229)(0,242 - \Phi)}) / 2 \cdot (-0,229),$$

где $\Phi = U_1 / U_{1n}$ – относительное значение магнитного потока, о.е.

Анализ выражений (2)...(7) показывает, что при работе АД на искусственных механических характеристиках при пониженном напряжении питания обмоток статора U_1 увеличиваются потери в обмотке ротора ΔP_{m2} за счет увеличения отношения скольжений s/s_n , но уменьшаются потери в меди статора ΔP_{m1} и в стали статора ΔP_{c1} за счет уменьшения отношения скольжений s_n/s . При этом их суммарное соотношение таково, что общие электромагнитные потери $\Delta P_{эм}$ при работе на искус-

ственных характеристиках оказываются в 1,5-2 раза меньше, чем при работе на естественной характеристике в связи с тем, что статический момент насоса на искусственных характеристиках значительно меньше номинального.

При частотном регулировании скорости АД для насосного агрегата обеспечивается широкий диапазон скорости, при этом с уменьшением частоты f_1 напряжения питания обмоток статора АД U_1 уменьшается, соответственно, и относительная частота α , а также потери в обмотке ротора, которые эквивалентны площадям заштрихованных прямоугольников одной вершиной касающихся точек пересечения механических характеристик АД и насоса при соответствующих установившихся скоростях ω_{yn} – ω_{y3} (рис. 2).

Для полной оценки энергоэффективности частотного регулирования скорости АД насосных агрегатов необходимо проанализировать суммарную мощность потерь ΔP в рассматриваемом ЭП, состоящую из постоянных $\Delta P_{пост}$ и переменных $\Delta P_{пер}$ потерь [7, 8]:

$$\Delta P = \Delta P_{пост} + \Delta P_{пер}. \quad (8)$$

Постоянные потери мощности в АД включают потери в стали статора $\Delta P_{ст1}$, потери в стали ротора $\Delta P_{ст2}$, потери в обмотке статора от протекания намагничивающего тока ΔP_{μ} и механические потери $\Delta P_{мех}$:

$$\Delta P_{пост} = \Delta P_{ст1} + \Delta P_{ст2} + \Delta P_{\mu} + \Delta P_{мех}. \quad (9)$$

Или в развернутом виде постоянные потери мощности можно записать следующим образом:

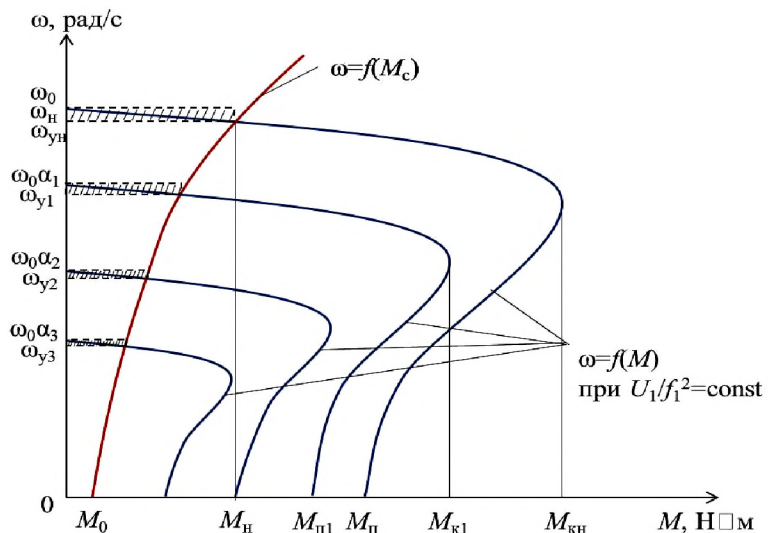


Рисунок 2. Естественная и искусственные механические характеристики АД $\omega=f(M)$ при различной частоте напряжения питания его обмоток статора f_1 для закона регулирования $U_1/f_1^2=\text{const}$ при $1>\alpha_1>\alpha_2>\alpha_3>0$ и механическая характеристика погружного насоса $\omega=f(M_c)$; $M_{кн}$, M_n , M_n – соответственно, момент критический номинальный, пусковой, номинальный на естественной характеристике АД, $H \cdot m$; $M_{к1}$, $M_{п1}$ – момент критический и пусковой на искусственной характеристике АД, $H \cdot m$; M_0 – момент трогания насоса, $H \cdot m$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{пост}} = & \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m + \\ & + \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^m s^m + \Delta P_{\text{ун}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + \\ & + \Delta P_{\text{мехн}} \left(\frac{f_1}{f_{1\text{н}}} \right)^2 = \Delta P_{\text{ст1н}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 \alpha^m (1 + s^m) + \\ & + \Delta P_{\text{ун}} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{н}}} \right)^2 + \Delta P_{\text{мехн}} \alpha^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\Delta P_{\text{ст1н}}$ – потери в стали статора при номинальном режиме работы АД, Вт;

$\Delta P_{\text{ун}}$ – потери в обмотке статора от протекания намагничивающего тока в номинальном режиме, Вт;

Φ , $\Phi_{\text{н}}$ – текущее и номинальное значение магнитного потока, Вб;

m – показатель степени, принимающий значения $m = 1,3-1,5$ в зависимости от сорта электротехнической стали;

$f_{1\text{н}}$ – номинальная частота напряжения питания обмоток статора АД, Гц.

Суммарные переменные потери АД можно определить используя следующее выражение [8]:

$$\Delta P_{\text{пер}} = \Delta P_{\text{пер2}} \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right), \quad (11)$$

где $\Delta P_{\text{пер2}}$ – переменные потери в роторе АД, Вт.
Так как

$$\Delta P_{\text{пер2}} = M \omega_0 \alpha s, \quad (12)$$

то

$$\Delta P_{\text{пер}} = M \omega_0 \alpha s \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right). \quad (13)$$

Учитывая, что магнитный поток АД при частотном регулировании скорости в зависимости от используемого скалярного закона регулирования или

$$\Phi = \frac{E_1}{K f_1} \approx \frac{U_1}{K f_1}, \quad (14)$$

или

$$\Phi = \frac{E_1}{K f_1^2} \approx \frac{U_1}{K f_1^2}, \quad (15)$$

где E_1 – ЭДС обмоток статора АД, В;

K – конструктивный коэффициент, о.е.

то из анализа выражения (10) очевидно, что при постоянном магнитном потоке возбуждения АД, который обеспечивается законом регулирования скорости, не будет влиять на изменение постоянных потерь в процессе регулирования, но для закона регулирования по формуле (14) они будут выше, чем для закона, используемого при регулировании насосных агрегатов по формуле (15).

Двухзонное частотное регулирование скорости изменением (уменьшением) магнитного потока возбуждения для расширения диапазона регулирования в насосных агрегатах не используется из-за возможного возникновения явления кавитации, поэтому на практике, как правило, используется одна зона регулирования.

Для вентиляторной нагрузки при частотном регулировании скорости АД, скольжение его ротора s практически не изменяется, следовательно, для упрощения анализа потерь в расчетах можно использовать $s = s_{\text{н}}$.

Дальнейший анализ выражений (10) и (13) показывает, что на постоянные и переменные потери одновременно влияет относительная частота напряжения питания обмоток статора α . С ростом α они растут, с уменьшением – убывают. Кроме того, на переменные потери непосредственное влияние оказывает момент нагрузки M .

При использовании в насосном агрегате частотно-регулируемого ЭП с синхронным двигателем, ротор которого имеет постоянные магниты (СДПМ), из вышеприведенных потерь исключаются еще и потери в стали ротора $\Delta P_{\text{ст2}}$, которые пропорциональны аналогичным потерям в статоре $\Delta P_{\text{ст1}}$ и зависят от скольжения ротора АД s :

$$\Delta P_{\text{ст2}} = \Delta P_{\text{ст1}} \cdot s^m. \quad (16)$$

Так как $s = 0$, то и $\Delta P_{\text{ст2}} = 0$.

Применение в водоснабжении частотно-регулируемых синхронных ЭП с СДПМ позволяет значительно повысить энергоэффективность насосных агрегатов, уменьшить объемы водонапорных башен и воздушно-водяных гидроаккумуляторов, но требует применения сложных преобразователей частоты.

Одним из крупнейших производителей погружных водоснабжающих насосных установок в Беларуси является ОАО «Завод Промбурвод» (ежегодный выпуск погружных насосных агрегатов превышает 28 тыс. единиц), который с 2007 года входит в состав холдинга Российской Федерации Группа ГМС. Группа ГМС, в свою очередь, является одним из крупнейших производителей в России и СНГ насосного и компрессорного оборудования для нефтегазового комплекса, энергетики, жилищно-коммунального и водного хозяйства.

Благодаря совместному сотрудничеству было налажено производство насосных агрегатов консольного типа марки К и КМ, дренажных насосов погружного типа ГНОМ и другого оборудования. В последние годы «Завод Промбурвод» усовершенствовал уже известные своей надежностью агрегаты ЭЦВ используя нержавеющую сталь для производства корпусов и рабочих колес насосов, что повысило их долговечность.

В связи с дефицитом импортных комплектующих и возросшей конкуренцией со стороны иностранных производителей заводом были введены в производство новые скважные агрегаты марки СПА, которые аналогичны по конструкции скважным агрегатам ЭЦВ, но изготовленные с применением электродвигателей герметичного исполнения собственно-

го или импортного производства. При этом электродвигатели заводского производства не уступают импортным по качеству.

С 2018 года на заводе изготавливаются СПДМ для погружных скважных насосов трех типоразмеров мощностью от 4 до 37 кВт, которые позволяют обеспечивать подачу воды в широком диапазоне от 6 до 120 м³ и напор от 60 до 275 м при КПД η синхронного электродвигателя (СД) от 85 до 93% (рис. 3) [9].

Общий вид, конструкция статора и ротора СД герметичного исполнения, в ротор которого встроены (инкорпорированы) постоянные магниты, представлены на рисунке 4.

Ротор – вращающаяся часть электродвигателя, состоящая из сердечника, набранного из той же электротехнической стали, что и статор, в который во внутренние пазы инкорпорированы постоянные магниты. В качестве постоянных магнитов используются неодимовые магниты с высокой коэрцитивной силой по индукции, покрытые сплавом никель-медь-никель. При этом магнитное поле ротора, созданное постоянными магнитами, взаимодействуя с синхронным вращающимся магнитным полем статора, создает вращающий момент, заставляя ротор вращаться с такой же скоростью, что и вращающееся магнитное поле статора.

В связи с этим СД не может запуститься при прямом пуске, т.е. при прямом подключении обмотки статора к трехфазной сети 50 Гц. Для работы такого СД обязательно требуется система управления с частотным преобразователем, обеспечивающая плавный подъем частоты и амплитуды напряжения питания обмоток статора от нуля до максимально допустимой.

В СД с постоянными магнитами отсутствуют потери, как в меди, так и в стали ротора, которые составляют порядка 5-8 % от общих потерь, т.е. СД обладают более

высоким КПД по сравнению с АД. Основные технические характеристики СД, выпускаемых на ОАО «Завод Промбурвод», представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики синхронных электродвигателей

Мощность номинальная, кВт	Осевая нагрузка, кН	I _n , А	КПД, %	cos ϕ	Масса, кг	Длина, мм
4	15,5	8	88	0,92	41	655
5,5		10	89			
7,5		13	89,5			
9,3		18	91,5			
11	15,5	20	92	0,93	56	810
13		23	92,5			
15		26	92,5			
18,5		32	92,5			
22	27,5	39	93	0,94	72	970
26		46	92,5			
30		54	91,5			
37		72	90			

Во всех приведенных СДПМ:

- напряжение и частота питающей сети: 400 В (-10 %; +6 %); 50 Гц (± 6);
- максимальная частота питания обмоток статора синхронного двигателя 100 Гц, частота вращения ротора при этом 3000 об/мин.

СДПМ водонаполнен, выполнен герметичным (диаметр 144 мм) с узлом дыхания, изготовлен из нержавеющей материалов. Электродвигатель имеет IP68 степень защиты, при температуре перекачиваемой среды 30°C, со скоростью движения охлаждающей жидкости не менее 0,2 м/с. Двигатель допускает 20 пусков в час. Соединение фланца и хвостовика электродвигателя соответствует стандарту NEMA. Погружной СД может быть как вертикальной, так и горизонтальной установки.

Для управления и комплексной защиты погружных насосных агрегатов изготовитель, ОАО «Завод Промбурвод» рекомендует использовать микропроцессорное устройство МКЗ, выпускаемое ООО «Но-

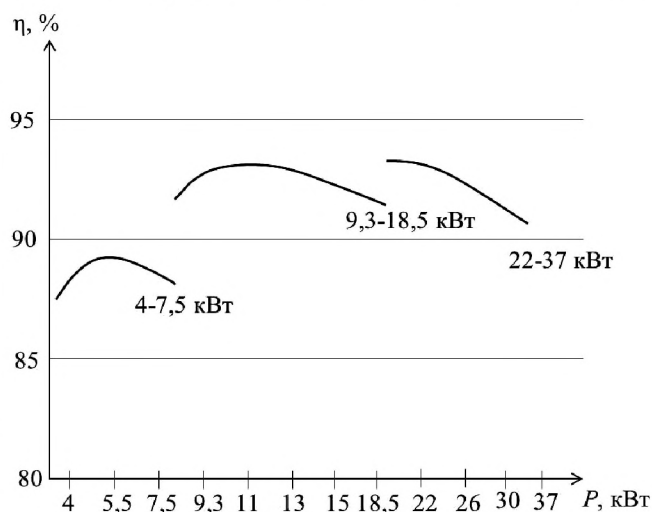
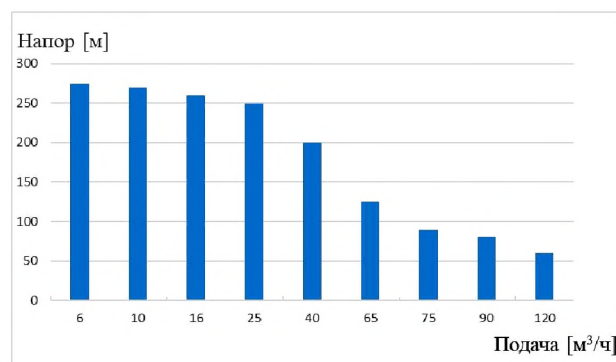


Рисунок 3. Рабочие характеристики насосных агрегатов СПА и их СДПМ



Рисунок 4. Погружной СДПМ герметичного исполнения

вая Автоматика», соответствующее климатическому исполнению УЗ.1 (эксплуатация в закрытых помещениях с естественной вентиляцией при температуре окружающего воздуха $-20...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Верхний предел относительной влажности воздуха – не более 80 % при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более низких температурах, без конденсации влаги. Степень защиты МКЗ от воды и пыли: IP54 – лицевая панель; IP30 – задняя панель.

Однако использование для управления и защиты только устройства МКЗ не обеспечивает регулирование угловой скорости насосного агрегата, поэтому применяется, как правило, в башенных системах водоснабжения с большой накопительной емкостью, которая позволяет обеспечивать нечастые включения насосного агрегата. В системах водоснабжения с водонапорной башней или воздушно-водяным гидроаккумулятором относительно небольшого объема происходят, как правило, частые включения насосных агрегатов, поэтому микропроцессорные устройства МКЗ используются совместно с устройством плавного пуска или преобразователем частоты. Устройство плавного пуска облегчает пуск насосных агрегатов с АД, а преобразователь частоты обеспечивает плавный пуск и регулирование угловой скорости, как АД, так и СДПМ, что уменьшает число их включений.

На рисунке 5 представлена принципиальная электрическая схема частотно-регулируемого ЭП насосного агрегата с АД или СДПМ. В схеме используется микропроцессорное устройство МКЗ (А1), GPRS-модем (А2), обеспечивающее взаимодействие между программным обеспечением и внешним устройством по интерфейсу RS485 и/или RS232, устройство А3 для подключения датчика сухого хода и преобразователь частоты INVT35D (А4). Схема обеспечивает также подключение счетчика воды, электросчетчика, датчика температуры и датчика давления.

Заключение

1. Проведенный анализ возможных вариантов ЭП погружных насосных агрегатов систем водоснабжения

показывает, что частотно-регулируемый ЭП с СДПМ обладает наилучшей энергоэффективностью, так как в нем по сравнению с АД отсутствуют переменные потери и потери в стали ротора. Кроме этого, он позволяет уменьшить количество включений насосного агрегата в процессе обеспечения водоснабжения при малых объемах промежуточных емкостей.

2. Частотное регулирование скорости АД и СДПМ при скалярном законе $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и изменении частоты напряжения питания обмоток статора α в диапазоне от 1 до 0,1 приводит к уменьшению как постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$, так и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь электродвигателей.

3. Использование частотного регулирования скорости АД и СДПМ при скалярном законе $U_1/f_1 = \text{const}$ приводит к необоснованному завышению как постоянных $\Delta P_{\text{пост}}$, так и переменных $\Delta P_{\text{пер}}$ потерь электродвигателей, что в итоге способствует снижению энергоэффективности ЭП.

4. Совместное использование контроллера МКЗ и преобразователя частоты INVT350 в приведенной принципиальной схеме частотно-регулируемого ЭП насосного агрегата с АД и СДПМ обеспечивает плавный пуск и плавное регулирование угловой скорости насосного агрегата в зависимости от давления в системе водоснабжения, его защиту от сухого хода, перегрузок, учет расхода воды и электрической энергии, а также возможность обмена информацией по протоколу Modbus.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
2. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и параметрическом

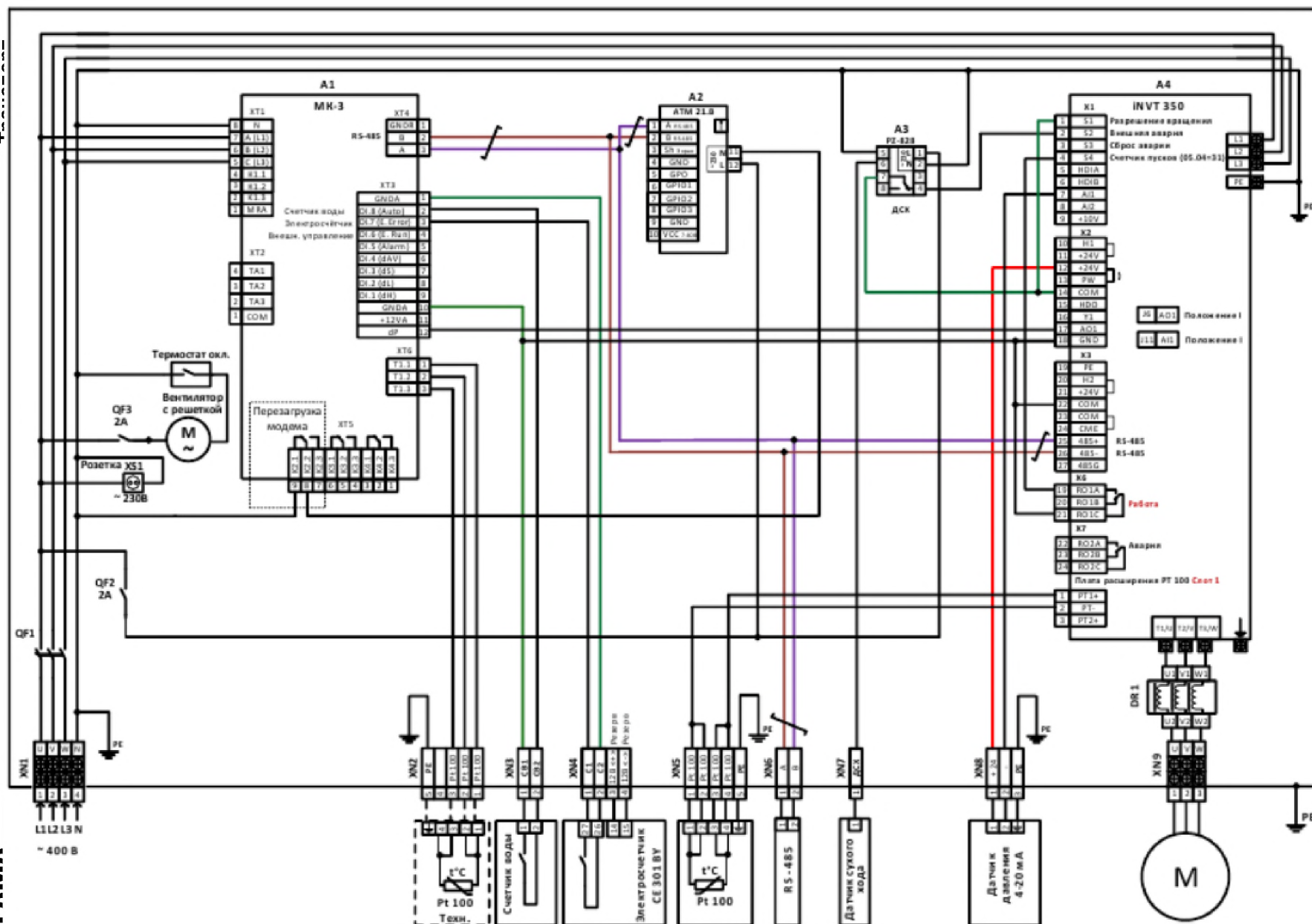


Рисунок 5. Принципиальная электрическая схема частотно-регулируемого ЭП насосного агрегата с АД или СДГМ

регулировании скорости / М.А. Прищепов // Агропанорама. – 2022. – № 3 (151). – С. 29-38.

3. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и частотном регулировании скорости / М.А. Прищепов, Е.М. Прищепова, А.И. Зеленкевич // Агропанорама. – 2022. – № 4 (152). – С. 19-23.

4. Дементьев, Ю.Н. Автоматизированный электропривод: учеб. пособие / Ю.Н. Дементьев, А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: ТПУ, 2009. – 224 с.

5. Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконяна. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

6. Гридин, В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным дан-

ным / В.М. Гридин // Электричество, 2012. – № 5. – С. 40-44.

7. Вольдек, А.И. Электрические машины: учеб. для вузов / А. И. Вольдек. – 2-е изд.; перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.

8. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / Ю.А. Мощинский, В.Я. Беспалов, А.А. Кирякин // Электричество, 1998. – № 4. – С. 38-42.

9. Козорез, А.С. Сквжинные электронасосные агрегаты с синхронными электродвигателями на постоянных магнитах / А.С. Козорез, В.О. Китиков, Ю.А. Башко; под общ. ред. В.О. Китикова. – Минск: Белорусская наука, 2023. – 163 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 04.06.2025

Программа балансирования рационов кормов для молочного скота

Программа балансирования рационов разработана по заданию РНТП «Развитие Минской области» и *предназначена* для создания рационов кормов для молочного скота с учетом показателей углеводного состава кормов и чистой энергии лактации.

Программа работает в интерактивном режиме. Пользователь имеет возможность выбрать корма, задав предварительно структуру рациона, и далее в процессе оптимизации отслеживать состояние баланса по всем показателям питательности.

Созданная программа предоставляет животноводам широкие возможности формирования рациона молочного скота.

Интерфейс программы позволяет конечному пользователю редактировать базу данных и пополнять ее за счет местных кормов.

Программа внедряется на молочных фермах Минской области.

Название корма	желаемый %	не более Кг.
Кормовые бобовые культуры, свежая кормовая	0	25
Сенаж из бобовых культур, люцерновый	0	25
Сено МТФ "Русакевичи"	0	24
Силос из злаковых культур, кукурузный, молочно-восковая спелость	0	23

Компонент	Норма	Содерж. в рационе	Отклон. от норм.	Отклон. %
Корм. ед.				
ОЗ КРС, МДж				
Сух. в-во, кг				
Сыр. прот., г				
Перев. прот., г				
Сыр. жир, г				
Сыр. клетч., г				
Крахмал, г				
Сахар, г				
ЧЭД, МДж				
Соль, г				
КДК, г				
НДК, г				

Название корма	Запасы (т.)	Цена (руб/кг)	ОЗ, МДж	Сух. в-во, кг	С. прот., г
Кормовые бобовые культуры, свежая кормовая	71.74	1181	1.42	0.108	1
Сенаж из бобовых культур, люцерновый	93.89	2120	4.02	0.422	1
Сено МТФ "Русакевичи"	100	0	6.55	0.845	2
Силос из злаковых культур, кукурузный, молочно-восковая спелость	108.4	2160	2.27	0.255	2