

К ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНОГО АГРЕГАТА

М.А. Прищепов,

зав. каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Е.М. Прищепова,

доцент каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

С.А. Лихтар,

инженер-электрик ОАО «Завод Промбурвод», аспирант каф. электрооборудования с.-х. предприятий БГАТУ

В статье приведен теоретический анализ параметров системы водоснабжения, влияющих на частоту включений ее насосных агрегатов, а также сформулирована задача оптимизации этих параметров, приводящая к минимизации частоты их включений.

Ключевые слова: насосный агрегат, регулируемый электропривод, частота включений, система водоснабжения, водонапорная башня, гидроаккумулятор.

The article provides the theoretical analysis of the parameters of the water supply system that affect the frequency of activation of its pumping units, and also formulates the task of optimizing these parameters to minimize the activation frequency.

Keywords: pump unit, adjustable electric drive, switching frequency, water supply system, water tower, hydraulic accumulator.

Введение

В структуре себестоимости услуг водоснабжения до 50...60 % приходится на долю стоимости электроэнергии, затраченной на транспортирование воды от источника к потребителю. В Республике Беларусь в среднем удельная энергоемкость добычи, подъема и подачи питьевой воды к потребителю составляет около 0,7 кВт·ч/м³. Одним из основных направлений рационального использования энергетических ресурсов в системах водоснабжения является применение регулируемого электропривода в насосах, что позволяет повысить энергоэффективность процесса водоснабжения потребителей, т.е. снизить энергозатраты и повысить надежность системы водоснабжения. Однако это требует новых подходов к обоснованию их параметров и построению систем управления водоснабжением, так как все это осложняется случайно-вероятностными законами водопотребления, зависящими от времени суток, поры года и технологических процессов водопотребителей. Несоответствие режимов работы трубопроводов водоснабжения и насосов с регулируемым электроприводом устраняется в определенной степени использованием накопительных емкостей (водонапорных башен, воздушно-водяных гидроаккумуляторов) и регулированием производительности (подачи) насосных агрегатов путем изменения скорости их вращения,

как правило, частотными методами [1-5]. При хорошем согласовании режимов водопотребления сети водоснабжения и подачи насосов воды режимы пуска и останова насосов будут сведены к минимуму. Это значительно снизит энергопотери, связанные с пуском насосов, и повысит надежность работы насосных агрегатов, так как их пуск является одним из самых тяжелых режимов работы для электродвигателей.

Цель данной работы – установить зависимость параметров, влияющих на количество включений насосных агрегатов и предложить способы их снижения.

Основная часть

Режим работы насосного агрегата определяется подачей насоса Q_n (м³/ч), расходом или водопотреблением воды в системе водоснабжения Q_p (м³/ч) и рабочим объемом бака V_p (м³) водонапорной башни или воздушно-водяного гидроаккумулятора [6].

Продолжительность работы насосного агрегата

$$t_p = \frac{V_p}{Q_n - Q_p}. \quad (1)$$

Продолжительность паузы в работе агрегата

$$t_o = \frac{V_p}{Q_p}. \quad (2)$$

Тогда длительность одного цикла при конкретном водопотреблении Q_p , подаче насоса Q_n и рабочем объеме бака V_p

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_o = \frac{V_p}{Q_n - Q_p} + \frac{V_p}{Q_p} = \frac{V_p Q_n}{Q_p(Q_n - Q_p)} = \frac{V_p Q_n}{Q_p Q_n - Q_p^2}. \quad (3)$$

Число включений насосного агрегата в единицу времени (частота включений)

$$Z = \frac{1}{t_{\text{ц}}} = \frac{Q_p Q_n - Q_p^2}{V_p Q_n}. \quad (4)$$

Таким образом, число включений насосного агрегата будет зависеть от контролируемого, но не управляемого насосной станцией расхода воды Q_p от управляемой насосной станцией подачи насоса Q_n , изменением угловой скорости насоса, и от постоянно-го конструктивно принятого рабочего объема бака V_p .

Далее определим, при каком расходе воды насосный агрегат будет включаться наибольшее число раз

$$\frac{dZ}{dQ_p} = \frac{1}{V_p Q_n} (Q_n - 2Q_p) = 0; \quad (5)$$

$$Q_n - 2Q_p = 0; \quad (6)$$

$$Q_p = \frac{Q_n}{2}. \quad (7)$$

Тогда, подставив выражение (7) в выражение (4) и проводя преобразование, получим:

$$Z_{\text{max}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} = \frac{\frac{Q_n}{2} \left(Q_n - \frac{Q_n}{2} \right)}{V_p Q_n} = \frac{Q_n}{4V_p}. \quad (8)$$

Относительная продолжительность включения насосного агрегата

$$\varepsilon = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{V_p}{Q_n - Q_p} \cdot \frac{Q_n Q_p - Q_p^2}{V_p Q_n} = \frac{Q_p}{Q_n} \quad (9)$$

определяется отношением расхода воды к подаче насоса.

Если в выражение (9) подставить выражение (7), то очевидно, что при относительной продолжительности включений $\varepsilon = 0,5$ частота включений будет максимальной.

Таким образом, относительная продолжительность включения насосного агрегата будет определяться расходом в сети водоснабжения и подачей насоса, а количество включений насосного агрегата еще и соотношением подачи насоса к рабочему объему бака.

Получим зависимость количества включений в единицу времени насосного агрегата для различных соотношений расхода воды в сети и производительности насоса используя выражение (4):

$$\text{при } Q_p = 0 \quad Z = \frac{0(Q_n - 0)}{V_p Q_n} = 0; \quad (10)$$

$$\text{при } Q_p = \frac{Q_n}{8} \quad Z = \frac{\frac{Q_n}{8} \left(Q_n - \frac{Q_n}{8} \right)}{V_p Q_n} = \frac{7}{64} \frac{Q_n}{V_p}; \quad (11)$$

$$\text{при } Q_p = \frac{Q_n}{4} \quad Z = \frac{\frac{Q_n}{4} \left(Q_n - \frac{Q_n}{4} \right)}{V_p Q_n} = \frac{3}{16} \frac{Q_n}{V_p}; \quad (12)$$

$$\text{при } Q_p = \frac{Q_n}{2} \quad Z = \frac{\frac{Q_n}{2} \left(Q_n - \frac{Q_n}{2} \right)}{V_p Q_n} = \frac{1}{4} \frac{Q_n}{V_p}; \quad (13)$$

$$\text{при } Q_p = \frac{3}{4} Q_n \quad Z = \frac{\frac{3}{4} Q_n \left(Q_n - \frac{3}{4} Q_n \right)}{V_p Q_n} = \frac{3}{16} \frac{Q_n}{V_p}; \quad (14)$$

$$\text{при } Q_p = Q_n \quad Z = \frac{Q_n (Q_n - Q_n)}{V_p Q_n} = 0. \quad (15)$$

Далее построим графики зависимостей количества включений в единицу времени (частоты включений) насосного агрегата при различной относительной продолжительности включений $\varepsilon = Q_p / Q_n$ и различных значениях соотношения Q_n / V_p (рис. 1).

Из графиков видно, что они имеют форму парабол, максимум у которых при $\varepsilon = 0,5$.

Опишем эти параболы математически. Для этого на одной из парабол возьмем три точки (две крайние и точку максимума Z) и запишем для них уравнения парабол, получив при этом систему этих уравнений. Решив ее относительно неизвестных коэффициентов, получим:

$$Z = - \left(\frac{Q_p}{Q_n} \right)^2 \frac{Q_n}{V_p} + \frac{Q_p}{Q_n} \frac{Q_n}{V_p} = \frac{Q_p Q_n - Q_p^2}{Q_n^2} \cdot \frac{Q_n}{V_p}. \quad (16)$$

Проанализировав выражение (16), можно заключить, что это преобразованное выражение (4), т.е

$$\frac{Q_p (Q_n - Q_p)}{V_p Q_n} = \frac{Q_p Q_n - Q_p^2}{Q_n^2} \cdot \frac{Q_n}{V_p}. \quad (17)$$

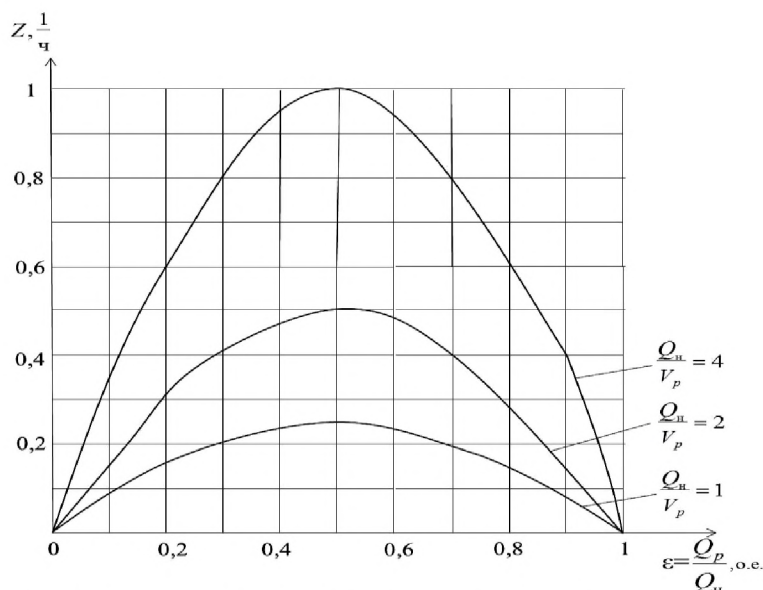


Рисунок 1. Графики зависимостей количества включений в единицу времени насосного агрегата при различной относительной продолжительности включений $\varepsilon = Q_p/Q_n$ и различных значениях соотношения Q_n/V_p

Выражение (16) можно представить в следующем виде:

$$Z = \frac{Q_p Q_n - Q_p^2}{Q_n^2} \cdot \frac{Q_n}{V_p} = (\varepsilon - \varepsilon^2) \frac{Q_n}{V_p} = \varepsilon(1 - \varepsilon) \frac{Q_n}{V_p}. \quad (18)$$

Анализ выражения (18) показывает, что первая составляющая этого выражения $(\varepsilon - \varepsilon^2)$ при любых значениях Q_p и Q_n , если $Q_p < Q_n$, будет иметь значение на отрезке от 0 до 0,25. Следовательно, основное влияние на количество включений будет оказывать соотношение Q_n/V_p , т.е. производительность насоса и рабочий объем бака. Чем больше будет это соотношение, тем больше частота включений Z насосного агрегата. Для нормальной работы электропривода насосного агрегата необходимо, чтобы частота включений агрегата не превышала допустимого значения. Уменьшение рабочего объема ведет к увеличению максимальной частоты включения. С целью увеличения срока службы электродвигателя насосного агрегата и снижения энергозатрат на подачу воды за счет уменьшения энергопотерь при пуске, необходимо уменьшать $Z_{\max}$ и увеличивать относительную продолжительность включения насосного агрегата ε .

При расходе воды, меньшем $0,5 Q_n$, частота и продолжительность включений уменьшаются, режим работы двигателей, как правило, кратковременный S2, нагрев двигателя за цикл работы не достигает установившейся температуры. При расходе воды более $0,5 Q_n$, частота включений уменьшается, а продолжительность включений увеличивается, т.е. $\varepsilon \rightarrow 1$. При расходе воды

$Q_p = Q_n$ режим работы двигателя насосного агрегата становится продолжительным ($\varepsilon = 1$), а его нагрев наибольший, т.е. температура двигателя достигает установившейся температуры, не превышающей допустимую температуру изоляции двигателя. Поэтому двигатели насосных установок выбирают, как правило, для продолжительного режима работы S1.

Если расход воды в сети превышает подачу насоса, т.е. $Q_p > Q_n$, то время, за которое опустошится рабочий объем бака

$$t_{\text{опуст.}} = \frac{V_p}{Q_p - Q_n}. \quad (19)$$

При остановке насоса $Q_n = 0$ время опустошения рабочего объема бака будет наименьшим и равным

$$t_{\text{опуст.}} = \frac{V_p}{Q_p}. \quad (20)$$

При работе системы водоснабжения с воздушно-водяным гидроаккумулятором, например ВУ-5-30 (рис. 2), необходимо рабочий объем гидроаккумулятора выразить через давление в гидроаккумуляторе.

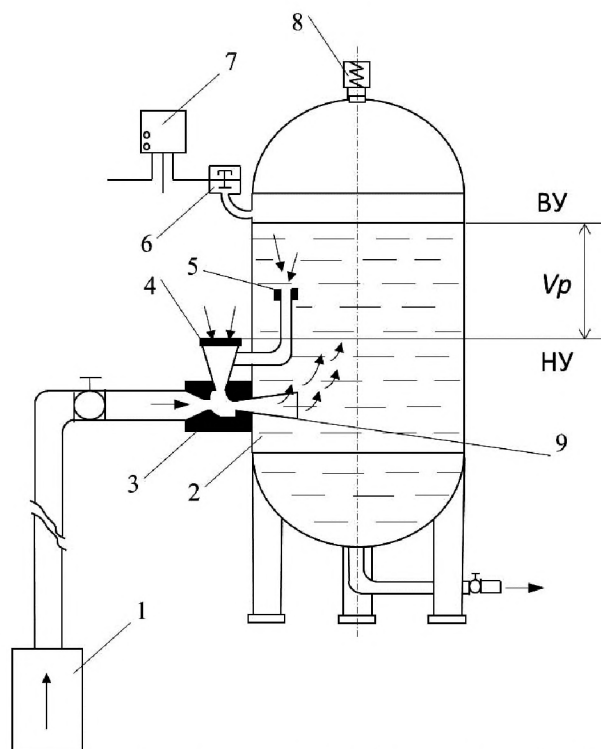


Рисунок 2. Схема водоподъемной установки ВУ-5-30: 1 – насосный агрегат; 2 – воздушно-водяной гидроаккумулятор; 3 – струйный насос; 4 – воздушный клапан; 5 – жиклер; 6 – реле давления; 7 – станция управления; 8 – предохранительный клапан; 9 – диффузор

Объем гидроаккумулятора определяют исходя из анализа процесса заполнения его водой:

1) в гидроаккумуляторе 2 (рис. 2) полным объемом V_0 действует начальное давление воздуха p_0 , вода при этом отсутствует;

2) вода в гидроаккумуляторе находится на нижнем уровне (НУ), при котором происходит автоматическое включение электродвигателя насосного агрегата, в гидроаккумуляторе объем воздушной подушки равен V_1 , давление, создаваемое воздухом p_1 ;

3) вода в котле находится на верхнем уровне (ВУ), при котором происходит автоматическое отключение электродвигателя насосного агрегата, объем воздушной подушки равен V_2 , давление воздуха p_2 .

Тогда регулируемый объем котла

$$V_p = V_1 - V_2. \quad (21)$$

Считая, что исходное количество воздуха в гидроаккумуляторе и его температура в процессе работы остаются постоянными, т.е. процесс изотермический, то согласно закону Бойля-Мариотта, можно записать:

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (22)$$

тогда регулируемый объем гидроаккумулятора

$$\begin{aligned} V_p &= \frac{p_0 V_0}{p_1} - \frac{p_0 V_0}{p_2} = p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) = \\ &= \frac{p_0 V_0}{p_1} \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right), \end{aligned} \quad (23)$$

откуда полный объем

$$V_0 = V_p \frac{p_1}{p_0} \left(\frac{1}{1 - \frac{p_1}{p_2}} \right). \quad (24)$$

Если в пустом гидроаккумуляторе давление воздуха равно атмосферному, т.е. $p_0=1$, то отношение p_1 / p_2 берется в пределах 0,65-0,85. Полный объем гидроаккумулятора можно уменьшить, если в нем создать предварительное давление воздуха. Давление p_1 выбирают таким, чтобы обеспечить подачу воды к самому удаленному потребителю, а давление p_2 определяют из соотношения $p_1 / p_2 = 0,65-0,85$.

Максимальную частоту включений для насосных установок с гидроаккумулятором определяют исходя из формулы (8):

$$Z_{\max} = \frac{Q_n p_1}{4V_0 p_0 \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \right)}. \quad (25)$$

Наличие воздушной подушки в гидроаккумуляторе смягчает гидравлические удары, возникающие при динамических режимах работы насосного агрега-

та. Однако воздушная подушка, соприкасаясь под давлением непосредственно с водой, растворяется в ней и уносится водой, тем самым уменьшая объем воздушной подушки и увеличивая частоту включений насосного агрегата. Для автоматического поддержания требуемого объема воздушной подушки в воздушно-водяных гидроаккумуляторах имеется струйный насос (регулятор) 3 (рис. 2). Подаваемая насосом вода проходит через сужающееся сопло струйного насоса 3, установленного в падающем водопроводе, увеличивая скорость струи воды, создающей разрежение после сопла, что обеспечивает подсос воздуха из окружающей среды через воздушный клапан 4, который смешивается с водой и поступает в гидроаккумулятор, и компенсирует растворенный воздух. Разрежение после сопла и открытие воздушного клапана 4 происходит тогда, когда жиклер 5 трубки струйного насоса находится в воде.

Частоту включений насосного агрегата в системе водоснабжения с воздушно-водяным гидроаккумулятором можно определить путем подстановки выражения (23) в выражение (4) с последующим преобразованием:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{Q_p (Q_n - Q_p)}{V_p Q_n} = \frac{Q_p (Q_n - Q_p)}{p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) Q_n} = \\ &= \frac{Q_p Q_n - Q_p^2}{Q_n^2} \cdot \frac{Q_n}{p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right)} = \\ &= \frac{Q_p Q_n - Q_p^2}{Q_n^2} \cdot \frac{Q_n}{V_0}. \end{aligned} \quad (26)$$

В итоге получим выражение, аналогичное выражению (16), где рабочий объем гидроаккумулятора V_p выражаем через полный объем и давления p_0 , p_1 и p_2 . Если провести анализ выражения (23)

$$\begin{aligned} V_p &= p_0 V_0 \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) = p_0 V_0 \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1 p_2} \right) = \\ &= p_0 V_0 \frac{\Delta p}{p_1 p_2}, \end{aligned} \quad (27)$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ – разность (дифференциал) давлений при выключении и включении насосного агрегата, то очевидно, что, чем выше дифференциал давлений Δp , полный объем V_0 и начальное давление p_0 в гидроаккумуляторе, тем больше регулируемый объем гидроаккумулятора. При большем дифференциале давлений Δp произведение давлений $p_1 p_2$ будет наименьшим, что еще в большей степени увеличивает рабочий объем V_p .

Закключение

1. Для снижения энергозатрат на водоснабжение и повышение надежности системы водоснабжения, т.е. уменьшения количества отказов электродвигателя насосного агрегата, необходимо создать систему водоснабжения, обеспечивающую наименьшую частоту включений и наибольшую относительную продолжительность включений насосного агрегата.

2. Относительная продолжительность включений насосного агрегата определяется отношением расхода воды в сети к производительности насоса (Q_p / Q_n), а частота его включений соотношением Q_p / Q_n и соотношением Q_n / V_p , следовательно, контролируя расход воды в сети Q_p и регулируя подачу (производительность) насоса Q_n , можно уменьшить соотношение Q_p / Q_n , увеличивая производительность насоса Q_n , но при этом увеличивается соотношение Q_n / V_p , т.е. возникает оптимизационная задача, определяющая, какой должен быть рабочий объем гидроаккумулятора и как (по какому закону) регулировать производительность насоса при изменении расхода воды в сети водоснабжения.

3. При постановке задачи оптимизации параметров насосной станции необходимо использовать упорядоченные годовые диаграммы, суточные графики водопотребления в различное время года для определения минимального, максимального и среднего водопотребления, а также максимального и минимального коэффициентов неравномерности водопотребления.

4. Система управления регулируемым электроприводом насосного агрегата должна обеспечивать плавный пуск электродвигателя и диапазон регулирования угловой скорости в пределах высоких значений коэффициентов полезного действия насосного агрегата, а также допустимые режимы работы насоса (от-

сутствие кавитации, помпажа), наличие достаточного потока воды для охлаждения электродвигателя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лезнов, Б.С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок / Б.С. Лезнов. – М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.
2. Прищепов, М.А. Современный электропривод погружных водоснабжающих насосных установок / М.А. Прищепов, А.С. Козорез, Е.М. Прищепова, С.А. Лихтар // Агропанорама. – 2025. – № 3. – С. 26-33.
3. Прищепов, М.А. К вопросу о диапазоне регулирования скорости и потерях асинхронного двигателя при вентиляторной нагрузке и параметрическом регулировании скорости / М.А. Прищепов // Агропанорама. – 2022. – № 3. – С. 29-38.
4. 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. – С. 19-23.
5. Козорез, А.С. Сквальные 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.
6. Фоменков, А.П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий: учеб. пособие / А.П. Фоменков. – М.: Колос, 1973. – 311 с.: ил.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 29.06.2026

Малогабаритная система очистки рабочих жидкостей гидравлических систем

Предназначена для профилактической очистки рабочих жидкостей гидравлических приводов мобильной сельскохозяйственной техники.



Основные технические данные

Производительность	Не менее 24 л/мин
Давление на входе в блок центрифугирования	0,8 МПа
Давление на входе в блок фильтрования	0,2-0,3 МПа
Давление на выходе из блока фильтрования	0,15 МПа
Тонкость очистки	15-40 мкм

Применение системы позволяет при обкатке двигателей расходовать масло без остатка, не снижать качество повторно используемого моторного масла, постоянно добавляя в него свежее товарное масло (гомогенизировать), полностью устранить расход электроэнергии, необходимой для подогрева масла, отказаться от необходимости хранения и утилизации масла. Она может применяться на ремонтно-обслуживающих предприятиях, а также непосредственно в хозяйствах для технического обслуживания машинно-тракторного парка.