

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.311

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40

## ВЛИЯНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СЕТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНОГО АГРЕГАТА ПРИ ЧАСТОТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Капанский А.А., Павлов В.В.

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь),  
г. Гомель, Республика Беларусь  
kapanski@mail.ru

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Эффективное функционирование городских систем водоснабжения играет важную роль в поддержании нормальной жизнедеятельности городов и населенных пунктов. Особенно важным является управление давлением и оптимизация гидравлических режимов в водопроводных сетях, поскольку они напрямую влияют на надежность водоснабжения и эффективное использование ресурсов. Однако, определение оптимальных параметров и методов регулирования в каждом конкретном случае требует тщательного исследования и анализа. В условиях постоянного увеличения требований к автоматизации водоснабжения и растущих инвестиций в её инфраструктуру, проблема корректного технико-экономического обоснования таких вложений приобретает особую актуальность. **ЦЕЛЬ.** Для плавного регулирования напорной характеристики насоса в условиях необходимости поддержания заданного давления сети водоснабжения повсеместно применяются преобразователи частоты. В условиях значимости точной оценки инвестиционных затрат на автоматизацию насосных агрегатов возникает необходимость получения уравнений, которые учитывают особенности эксплуатации водопроводной сети на предпроектной стадии. В связи с этим авторы статьи ставят перед собой цель исследовать степень влияния статической составляющей сети водоснабжения на изменение электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании и апробировать полученные зависимости на реальной статистике режимов водо-и энергопотребления водозабора «Сож» Гомельского водоканала. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленных задач использовались классические формулы подобия насосного агрегата, отражающие связь между расходом, напором и мощностью потребления. В качестве метрики оценки для верификации модели электропотребления насосного агрегата использовалась среднеквадратическая ошибка (mean squared error), средняя абсолютная ошибка (mean absolute error) и средняя абсолютная ошибка в процентах (mean percentage absolute error). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведенное исследование демонстрирует значительное улучшение точности моделирования электропотребления при использовании модифицированного коэффициента, отражающего степень изменения мощности при изменении частоты питающей сети. При применении этого подхода, среднеквадратическая ошибка уменьшается более чем в два раза, с 0,35 до 0,167, средняя абсолютная ошибка снижается с 0,347 до 0,165, и средняя абсолютная процентная ошибка уменьшается с 0,20% до 0,08%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенное исследование подтверждает эффективность применения частотного регулирования насосных агрегатов, обеспечивающего нелинейное изменение электрической мощности, и демонстрирует возможность более точного прогнозирования электропотребления, учитывающего специфику работы водопроводной сети. Результаты этой работы могут быть полезны для проектов по оптимизации систем городского водоснабжения, обеспечивая более точное планирование и использование ресурсов.

**Ключевые слова:** формулы подобия, насосных агрегат, частное регулирование, поддержание давления, статическая составляющая водопроводной сети, энергоэффективность насоса.

**Для цитирования:** Капанский А.А., Павлов В.В. Влияние статической составляющей сети водоснабжения на изменение мощности электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 4. С. 29-40. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40.

## THE INFLUENCE OF THE STATIC COMPONENT OF THE WATER SUPPLY NETWORK ON THE CHANGE IN THE POWER CONSUMPTION OF THE PUMPING UNIT WITH FREQUENCY CONTROL

A.A. Kapansky, V.V. Pavlov

Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus

[kapanski@mail.ru](mailto:kapanski@mail.ru)

**Summary:** *RELEVANCE.* The effective functioning of urban water supply systems plays an important role in maintaining the normal life of cities and towns. Of particular importance is the management of pressure and the optimization of hydraulic regimes in water-wired networks, since they directly affect the reliability of water supply and the efficient use of resources. However, the determination of the optimal parameters and methods of regulation in each specific case requires careful research and analysis. In the context of a constant increase in requirements for automation of water supply and growing investments in its infrastructure, the problem of a correct feasibility study for such investments is of particular relevance. *PURPOSE.* For smooth regulation of the pressure characteristic of the pump in the conditions of the need to maintain a given pressure of the water supply network, frequency converters are widely used. In the context of the significance of an accurate assessment of investment costs for the automation of pumping units, it becomes necessary to obtain equations that take into account the features of the operation of the water supply network at the pre-design stage. In this regard, the authors of the article set themselves the goal of studying the degree of influence of the static component of the water supply network on the change in the power consumption of the pumping unit with frequency regulation and testing the obtained dependencies on real statistics of the water and energy consumption modes of the Sozh water intake of the Gomel water utility. *METHODS.* To solve the tasks, classical formulas of similarity of the pumping unit were used, reflecting the relationship between flow, pressure and power consumption. The mean squared error, the mean absolute error and the average absolute error in percentages were used as the evaluation metric for verifying the electric power supply model of the pumping unit. *RESULTS.* The study demonstrates a significant improvement in the accuracy of power consumption modeling when using a modified coefficient reflecting the degree of power change when the frequency of the supply network changes. When using this approach, the standard error is reduced more than twice, from 0.35 to 0.167, the average absolute error is reduced from 0.347 to 0.165, and the average absolute percentage error is reduced from 0.20% to 0.08%. *CONCLUSION* The conducted research confirms the effectiveness of the use of frequency control of pumping units, which provides a nonlinear change in electrical power, and demonstrates the possibility of more accurate forecasting of electricity consumption, taking into account the specifics of the water supply network. The results of this work can be useful for projects to optimize urban water supply systems, providing more accurate planning and use of resources.

**Keywords:** *similarity formulas, pumping units, private regulation, pressure maintenance, static component of the water supply network, pump energy efficiency.*

**For citation:** Kapansky A.A., Pavlov V.V. The influence of the static component of the water supply network on the change in the power consumption of the pumping unit with frequency control *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023;25(4):29-40. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-4-29-40.

### **Введение и литературный обзор (Introduction and literature review)**

Оптимизация параметров режима в системах городского водоснабжения является важнейшей задачей, способствующей эффективному процессу транспортировки жидкости и исключению избыточного давления, возникающего в водопроводной сети. Превышение фактических значений параметров гидравлики над нормативными обусловлено большим

спектром причин, среди которых можно выделить некорректный выбор технических характеристик электронасосов, изменение конфигурации схемы водоснабжения, старение трубопроводов и оборудования. Регулирование давления осуществляется изменением режимов работы насосных агрегатов за счет трансформации геометрии напорного трубопровода или управлением частотой вращения вала электропривода насоса. Первый метод, называемый в практике дросселированием, реализуется с помощью частичного перекрытия запорной арматуры и не приводит к существенному изменению электропотребления насосного агрегата [1]. В свою очередь, регулирование скорости вращения рабочего колеса центробежного насоса обеспечивает нелинейное изменение электрической мощности, что делает такой метод управления режимами гидравлики эффективным, способствующим экономии электрической энергии при условии снижении частоты вращения электропривода [2, 3, 4].

При проведении литературного обзора по вопросам частотного регулирования насосного агрегата зачастую можно встретить классические формулы подобия. С их помощью уточняются значения основных величин, характеризующих насосный агрегат, таких как расход, напор и мощность. Известно, что снижение угловой скорости электропривода насоса приводит к пропорциональному изменению расхода подаваемой воды и квадратичному изменению напора. В статье [4] авторы Муравлева О.О., Вехтер Е. В. и Жарикова Т.В. приводят пересчет характеристик на другую частоту с помощью классических формул приведения. В работе авторов Мизюрина А.О. и Матвейчука Н.М. [5] для изменения электрической мощности используют строгую кубическую зависимость к отношению угловых скоростей вращения электропривода насосного агрегата. В тоже время, в источниках литературы можно встретить и формулы подобия, заданные с приближительным нестрогим равенством [6, 7, 8, 9]. Такое отличие обусловлено влиянием разности геодезических отметок точек подачи жидкости и места установки насоса, что характеризует статический напор водопроводной сети.

Фащиленко В.Н. в работе [10] акцентирует внимание на то, что частотная характеристика мощности при статическом напоре равно нулю имеет явную кубическую характеристику, в обратном случае эта зависимость не выполняется. В условиях значимости точной оценки инвестиционных затрат на автоматизацию насосных агрегатов возникает необходимость получения уравнений, которые учитывают особенности эксплуатации водопроводной сети на предпроектной стадии.

В связи с этим *целью работы* является исследование степени влияния статической составляющей сети водоснабжения на изменение электропотребления насосного агрегата при частотном регулировании и апробировать полученные зависимости на реальной статистике режимов водо-и энергопотребления водозабора «Сож» Гомельского водоканала.

*Научная значимость* работы заключается в систематизации и дополнении существующих теоретических знаний в области регулирования и оптимизации гидравлических режимов в системах водоснабжения. Результаты исследования дополняют существующие подходы к определению оптимальных режимов работы насосных агрегатов и формированию схем водоснабжения.

*Практическая значимость* исследования связана с возможностью применения полученных результатов при проектировании, эксплуатации и модернизации систем городского водоснабжения. Ожидается, что результаты исследования помогут проводить более точную оценку инвестиционных затрат на автоматизацию насосных агрегатов.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

Современные насосные станции, используемые для первичного подъема воды, оснащаются устройством частотного регулирования [2, 11]. Они функционируют в рамках единой автоматизированной системы водозаборов, что с одной стороны, дает возможность плавного регулирования производительностью насоса, с другой – поддержания установленного давления на оголовке скважины, тем самым предотвращая возникновение избыточного напора. Упрощенное представление схемы управления насосом приведено на рисунке 1.

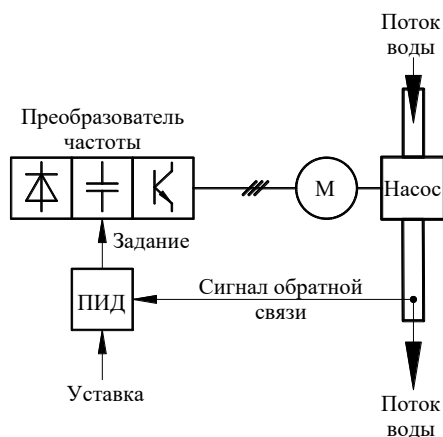


Рис. 1. Упрощённое представление схемы управления насосом

Fig. 1. Simplified representation of the pump control circuit

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Классический расчет экономической эффективности внедрения частотного преобразователя основан на определении величины снижения избыточного напора, который появляется в момент включения или отключения соседних скважин, работающих на общую гидравлическую сеть. Это приводит к изменению характеристики трубопроводной сети и смещению точки баланса режимов (рисунке 2 а). За счет регулирования скорости вращения рабочего колеса насоса меняется его напорная характеристика, в результате чего достигается точность поддержания заданного давления (рисунке 2 б).

Поведение напорной характеристики насоса в момент изменения частоты описывается формулами подбора [10]. Особый интерес представляет более глубокое исследование классических формул для понимания в каких случаях частотная характеристика имеет кубическую форму изменения мощности и как статическая составляющая сети влияет на изменение электропотребления.

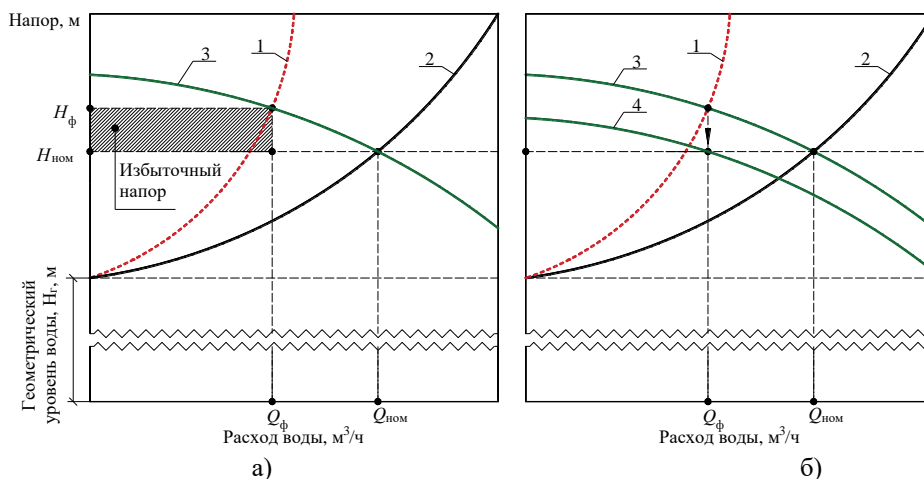


Рис. 2. Пояснение к процессу регулирования режимом работы насоса:  
 а – появление избыточного напора при изменении характеристики трубопроводной сети;  
 б – изменение характеристики насоса при частотном регулировании  
 1 – напорная характеристика трубопроводной сети в номинальном режиме; 2 – напорная характеристика трубопроводной сети в фактическом режиме; 3 – напорная характеристика насоса при номинальной частоте;  
 4 – напорная характеристика насоса при снижении частоты

Fig. 2. Explanation of the process of regulating the operating mode of the pump:  
 а – the appearance of excess pressure when the characteristics of the pipeline network change; б – change in the characteristics of the pump with frequency regulation  
 1 – pressure characteristic of the pipeline network in nominal mode; 2 – pressure characteristic of the pipeline network in the actual mode; 3 – pump head characteristic at nominal frequency; 4 – pressure characteristic of the pump with a decrease in frequency

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Как упоминалось ранее, уравнение для пересчёта величины электропотребления насоса при частотном регулировании называется формулой подобия и имеет следующий вид [10]:

$$\frac{N_1}{N_2} \approx \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^3 \quad \text{или} \quad \frac{N_1}{N_2} \approx \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^3, \quad (1)$$

где  $\omega_1, \omega_2$  – скорость вращения ротора в 1-м и 2-м режиме работы соответственно, рад/с;  $N_1, N_2$  – потребляемая мощность НА в 1-м и 2-м режиме работы соответственно, Вт [10]:

$$N = \frac{\rho \cdot Q \cdot H \cdot g}{\eta_H}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – подача воды, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – напор насоса, м;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,8 м/с<sup>2</sup>;  $\eta_H$  – КПД насоса, отн.ед., который может быть представлен зависимостью от скорости вращения электропривода [10]:

$$\eta_H(\omega) = 1 - \frac{1 - \eta_{\text{НОМ}}}{\left( \frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^{0.36}}, \quad (3)$$

где  $\eta_{\text{НОМ}}$  – номинальный КПД насосного агрегата.

Знак приблизительного равенства в формуле (1) связан с представлением соотношений в виде кубической степени, что является частным случаем, когда расстояние от уровня жидкости до точки подъема, в практике называемое геометрическим напором  $H_T$  (рисунок 3), оказывается равным нулю [7].

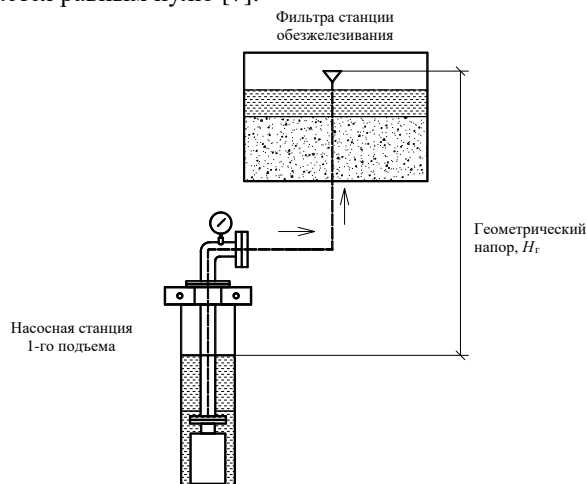


Рис. 3. К понятию геометрического напора насоса

Fig. 3. To the concept of the geometric head of the pump

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

С другой стороны, изменение производительности насоса без регулирования частотой (случай, приведенный на рисунке 2 а) также приводит к изменению гидравлического КПД, что может быть описано уравнением [12]:

$$\eta_H(Q) = \left( \frac{2 \cdot \eta_{\text{max}}}{Q_{\text{НОМ}}} \cdot Q - \frac{\eta_{\text{max}}}{Q_{\text{НОМ}}^2} \cdot Q^2 \right), \quad (4)$$

где  $\eta_{\text{max}}$  – максимальный гидравлический КПД насосного агрегата.

Сочетание уравнений ((3) и (4) позволяет описать гидравлический КПД насоса как нелинейную функцию угловой скорости и производительности (см. рисунок 4). Этот фактор

также важно учитывать при оценке необходимой величины мощности на валу электропривода в различных режимах работы.

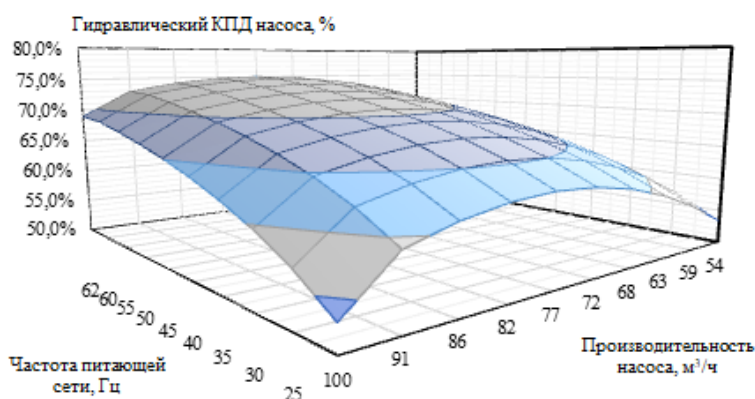


Рис. 4. Изменение гидравлического КПД насосного агрегата при изменении частоты и производительности насоса

Fig. 4. Change in the hydraulic efficiency of the pumping unit with a change in frequency and pump performance

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Для упрощения анализа и практического применения расчетных формул при подготовке технико-экономических обоснований внедрения устройств частотного регулирования или моделирования процессов электропотребления насосных агрегатов, целесообразен переход от угловой скорости вращения ротора электропривода к частоте питания электрической сети [13, 14]. Это объясняется тем, что обычно на панели управления частотными преобразователями предусмотрен вывод преобразованной частоты, которая может быть полезной для дальнейшего анализа. При этом необходимо учитывать известную связь  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f / p$ , где  $f$  – частота сети; а  $p$  – число пар полюсов электродвигателя приводящего в движение подвижные части насоса.

В опубликованных ранее материалах [15, 16] исследовано влияние геометрического напора на изменение мощности электропотребление при снижении частоты питающей сети. В результате сделан вывод, что увеличение  $H_r$  приводит к искажению мощностной характеристики, отдаляясь от классического представления в виде кубической зависимости, рассмотренной в уравнении (1). На рисунке 5 представлены зависимости, иллюстрирующие характер изменения мощности насоса при различных соотношениях геометрического напора к максимальному значению, которое определяется при нулевой подаче.

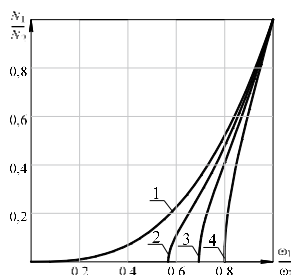


Рис. 5. Влияние относительного геометрического напора на частотную характеристику мощности насосного агрегата

Fig. 5. Influence of the relative geometric head on the frequency response

1 –  $H_r / H_\phi = 0$ ; 2 –  $H_r / H_\phi = 0.32$ ; 3 –  $H_r / H_\phi = 0.48$ ; 4 –  $H_r / H_\phi = 0.64$

1 –  $H_2 / H_\phi = 0$ ; 2 –  $H_2 / H_\phi = 0.32$ ; 3 –  $H_2 / H_\phi = 0.48$ ; 4 –  $H_2 / H_\phi = 0.64$

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Запишем уравнение (1) в общей форме, введя в качестве степени показатель  $k$ . Это дает возможность применить строгое равенство соотношений частот и мощностей насоса:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^k. \quad (5)$$

Заменяем  $f_2$  и  $N_2$  на частоту и мощность в номинальном режиме и методом логарифмирования, выразим из уравнения (2) показатель степени  $k$ :

$$k = \frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_{\text{НОМ}}}\right)}{\ln\left(\frac{f_1}{f_{\text{НОМ}}}\right)}. \quad (6)$$

Связь режимов работы насосного агрегата с производительностью и напором, с учетом анализа, приведенного в [10], принимает следующий вид:

$$Q = Q_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{H_{\Phi} \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{НОМ}}}\right)^2 - H_{\Gamma}}{H_{\Phi} - H_{\Gamma}}}; \quad (7)$$

$$H = H_{\Gamma} + (H_{\text{НОМ}} - H_{\Gamma}) \cdot \frac{H_{\Phi} \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{НОМ}}}\right)^2 - H_{\Gamma}}{H_{\Phi} - H_{\Gamma}}; \quad (8)$$

где  $H_{\Phi}$  – фиктивный напор, определяемый при нулевой подаче, м;  $f_{\text{НОМ}}$  – номинальная частота, Гц.

Упростим внешний вид формул (5) и (5) заменив  $f / f_{\text{НОМ}}$  на относительную частоту  $f_*$  и  $H_{\Gamma} / H_{\Phi}$  на относительный геометрический напор  $H_{\Gamma*}$  соответственно. Введя коэффициент, учитывающий тип перекачиваемой жидкости  $a = H_{\Phi} / H_{\text{НОМ}}$ , итоговые уравнения производительности и напора примут следующий вид:

$$Q = Q_{\text{НОМ}} \cdot \sqrt{\frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}}}; \quad (9)$$

$$H = H_{\Phi} \cdot \left[ H_{\Gamma*} + (a - H_{\Gamma*}) \cdot \frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}} \right]; \quad (10)$$

где  $a = \frac{H_{\Phi}}{H_{\text{НОМ}}}$  – коэффициент учитывающий тип перекачиваемой жидкости, определяется типом насоса, при отсутствии данных для чистой воды может быть принята  $\approx 1,25$  [10].

Рассмотрим подробнее полученное ранее уравнение (6). Для оценки влияния параметров гидравлической сети на коэффициент степени  $k$  подставим в формулу (6) выражение (2) раскрыв предварительно параметры производительности и напора полученными зависимостями (9) и (10). С учетом того вышеприведенного получаем следующее выражение:

$$k(f_*, H_{\Gamma*}) = \frac{\ln\left(\sqrt{\frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}}} \cdot \left[ a \cdot H_{\Gamma*} + (1 - a \cdot H_{\Gamma*}) \cdot \frac{(f_*)^2 - H_{\Gamma*}}{1 - H_{\Gamma*}} \right]\right)}{\ln(f_*)}. \quad (11)$$

Полученное уравнение (11) дает представление того, что изменение мощности насоса напрямую зависит от двух величин: электрической частоты питания и геометрического напора сети водоснабжения. Следует отметить проблемные зоны данной формулы:

- при  $f_* = 1$ , т.е.  $f = f_{\text{ном}}$ , коэффициент  $k$  не определён, так как знаменатель выражения обращается в нуль.
- при  $f_* < \sqrt{H_{r*}}$  результатом решения будет являться мнимое число.

**Результаты и обсуждения (Results and discussion)**

Проверим полученную зависимость (11) на статистических данных, отражающих режим работы скважины №158 водозабора «Сож» Гомельского водоканала. На этом объекте для подъема воды используется насосный агрегат Grundfos SP 77-5, работающий в составе общей гидравлической сети насосных станций первого подъема воды. Исследуемый насос характеризуется номинальным напором 60 м, производительностью 70 м<sup>3</sup>/ч и мощностью электропривода 18,5 кВт. Комплексная модернизация станции первого подъема воды на предприятии предусматривала автоматизацию работы насосов для поддержания заданного давления на оголовке скважины.

В результате на базе внедренной аналитической системы появилась возможность формировать информационную базу гидравлического и электрического режимов работы насосов для дальнейшего анализа. Исходная статистика включала в себя такие ключевые параметры как расход, напор, мощность и частоту питающей сети в момент измерения. Данные были собраны в течение 42 дней с часовым интервалом. Это позволило получить подробную статистику с глубиной истории равной 1009 значений, которая использовалась для проверки применимости полученных ранее уравнений. Для сравнения реального электропотребления с результатами моделирования были использованы классическая зависимость (5) при  $k=3$  и тоже уравнение с изменяющимся коэффициентом  $k$ , который пересчитывался в зависимости от существующей частоты питающей сети. На рисунке 6 представлен поверхностный график степени влияния  $k$  с учетом коэффициента  $a = 1,67$ , учитывающего тип перекачиваемой жидкости, и геометрического напора  $H_r = 58$  м.

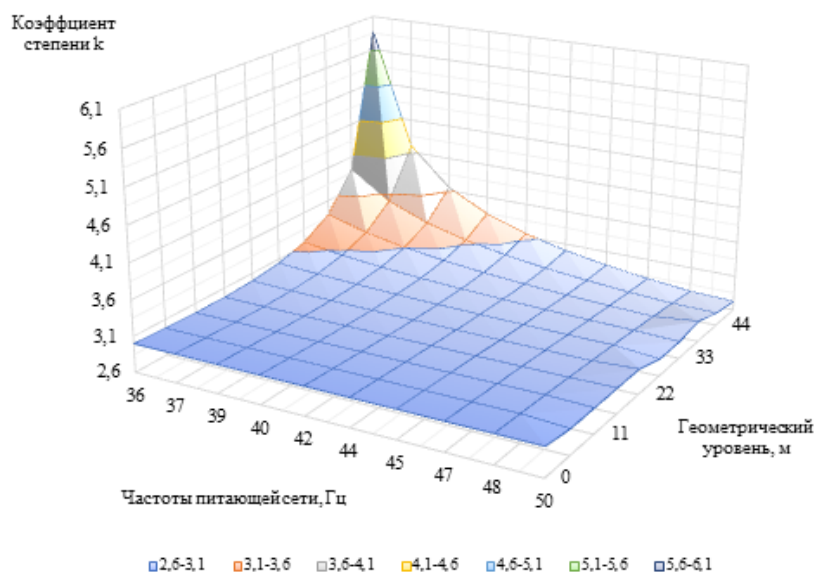


Рис 6. Зависимость коэффициента  $k$  от частоты сети и геометрического уровня

Fig. 6. Dependence of coefficient  $k$  on network frequency and geometric level

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

Оценка качества полученной модели выполнялась путем сравнения истинного электропотребления с результатами моделирования для случая  $k=3$  и  $k = \text{var}$ . В роли метрик использовались такие показатели как MAPE (Средняя абсолютная процентная ошибка), MAE (Средняя абсолютная ошибка) и RMSE (Корень из среднеквадратичной ошибки) [17, 18]. Для снижения разброса данных использована экспоненциальное сглаживание в виде модели Брауна [19]. В таблице 1 представлены результаты оценки метрик исследуемых моделей.



Таблица 1  
Table 1

Результаты оценки метрик модели электропотребления насоса  
The results of the evaluation of the metrics of the pump power consumption model

RMSE (среднеквадратическая ошибка), кВт		MAE (средняя абсолютная ошибка), кВт		MAPE (средняя абсолютная ошибка в процентах), %	
$k = 3$	$k = \text{var}$	$k = 3$	$k = \text{var}$	$k = 3$	$k = \text{var}$
0,35	0,167	0,347	0,165	0,20%	0,08%

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Изучив полученные результаты, можно увидеть, что использование модифицированного коэффициента  $k$ , который изменяется в зависимости от текущей частоты питающей сети (уравнение (11), приводит к значительному улучшению качества моделирования электропотребления по сравнению с классическим подходом, где  $k$  принимается равным 3. Так, для рассмотренного случая среднеквадратическая ошибка (RMSE) снижается более чем в два раза с 0,35 кВт до 0,167 кВт. Это указывает на значительное уменьшение ошибок предсказания, то есть модель с переменным  $k$  лучше описывает реальные данные. Аналогичные улучшения наблюдаются и для других метрик. Средняя абсолютная ошибка (MAE) снижается с 0,347 до 0,165 кВт, а средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) уменьшается с 0,20% до 0,08%.

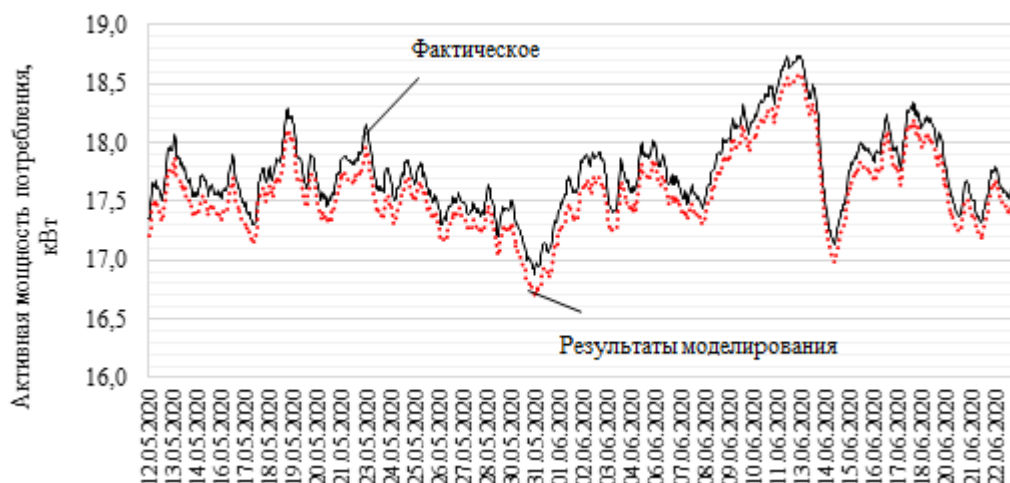


Рис. 7. Сравнение результатов моделирования с фактическим электропотреблением

Fig. 7. Comparison of simulation results with actual power consumption

\*Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author

На основании проведенного анализа результатов метрик можно сделать вывод о значительном улучшении точности моделирования электропотребления насосных агрегатов при использовании переменного коэффициента  $k$ , изменяющегося в зависимости от текущей частоты питающей сети.

#### Заключение (Conclusion)

В работе представлены результаты исследования режимов электропотребления одной из скважины водозабора «Сожд» Гомельского водоканала. Научная значимость проведенного исследования заключается в разработке и апробировании модели прогнозирования электропотребления насоса при учете частоты питания и статической составляющей сети водоснабжения. Основное внимание уделено сравнению фактического потребления электрической энергии с результатами моделирования, где использовались как классическое уравнение, отражающее кубическое изменение мощности при изменении частоты, так и предложенная модель, представленная адаптивным коэффициентом  $k$ , который пересчитывался в зависимости от текущей частоты питающей сети.

Результаты исследования показали значительное улучшение качества предложенной второй модели по сравнению с альтернативной. Среднеквадратическая ошибка (RMSE) снизилась более чем в два раза с 0,35 кВт до 0,167 кВт, средняя абсолютная ошибка (MAE) снижается с 0,347 до 0,165 кВт, и средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) уменьшается с 0,20% до 0,08%.

На практическом уровне, результаты исследования показывают, что предложенная модель электропотребления насоса, основанная на адаптивном коэффициенте, дает значительно более точные результаты по сравнению с классическими подходами. Наблюдаемое улучшение качества моделирования подтверждает возможность более эффективного технико-экономического обоснования автоматизации скважин в процессе проектирования, эксплуатации и модернизации систем городского водоснабжения.

В целом, проведенное исследование подтверждает эффективность частотного регулирования насосного агрегата, обеспечивающего нелинейное изменение электрической мощности, и показывает возможность более точного прогнозирования электропотребления на основе учета особенностей работы водопроводной сети.

### Литература

1. Fedorov O. V. Expeditious forecasting of power consumption //2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2017. С. 1-4.
2. Development of customized simulation models for high voltage generators / I. Kirillov, I. Morozov, N. Kuznetsov [et al.] // Sustainable Energy Systems: innovative perspectives : Conference proceedings, Saint-Petersburg, 29–30 октября 2020 года. – Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. – P. 190-196. – DOI 10.1007/978-3-030-67654-4\_21. – EDN GYZBKA.
3. Грачева Е.И. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей / Е.И. Грачева, О.В. Наумов. Москва: Издательство «Русайнс», 2017. – 168 с. – ISBN 978-5-4365-1661-5. – EDN YNMXXT.
4. Муравлева О. О., Вехтер Е. В., Жарикова Т. В. Оценка влияния энергетических характеристик асинхронного двигателя на энергосбережение насосного агрегата //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. – №. 1. – С. 174-178.
5. Мизюрин А.О., Матвейчук Н.М. Энергоэффективность использования частотно-регулируемого привода в системах водоснабжения в сельскохозяйственном производстве // Молодежь в науке-2016. – 2017. – С. 407-414.
6. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Стройиздат, 1986.- 320 с : ил.
7. Грунтович, Н.В., Влияние работающих двигателей на остаточные напряжения узлов комплексной нагрузки станций / Н.В. Грунтович, А.А. Капанский, В.М. Пупин, Д.О. Сафонов, О.В. Федоров // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2021. – № 2. – С. 78–90.
8. Оптимизация схем электроснабжения промышленных предприятий / Е.И. Грачева, Т.В. Синюкова, Т.В. Табачникова, А. Н. Алимова. – Казань : Казанский государственный энергетический университет, 2022. – 135 с. – EDN SMARQD.
9. Камаль С., Сулейман А. М. Особенности работы центробежных насосов с использованием преобразователя частоты вращения //Природообустройство. – 2013. – №. 5. – С. 64-67.
10. Фащиленко В.Н. Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: Учеб. пособие. — М.: Издательство «Горная книга». – 2011. – 260. с.: ил
12. Гришин А.П., Коэффициент полезного действия частотно-регулируемого электронасоса. Автоматизация и информатизация электрифицированного сельскохозяйственного производства. [Текст]/Гришин А.П., Гришин В.А.//Научные труды. Том 89. М.: ВИЭСХ, 2004. с. 118 – 127.
13. Романюк, В.Н. Интенсивное энергосбережение в промышленных теплотехнологиях / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, Т. В. Бубырь // Энергия и менеджмент. - 2013. - № 6. - С. 8-12.
14. Интеллектуальные системы учета как инструмент снижения потерь электрической энергии / Т. А. Мусаев, О. В. Федоров, С. Р. Шагеев, М. В. Прохорова // Строительство: новые технологии - новое оборудование. – 2021. – № 2. – С. 52-55. – EDN GDPLEJ.
15. Павлов В.В. Исследование степени влияния статического напора сети на

изменение активной мощности потребления насоса / В.В. Павлов, А.А. Капанский // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С 61-64

16. Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Baczynski, D., Vagapov, G. V., & Fedorov, O. V. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 124, p. 05060). EDP Sciences.

17. Chicco, D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman // *PeerJ. Computer Science*. – 2021. – Vol. 7. – P. 1-24. – doi 10.7717/PEERJ-CS.623. – EDN VSUBGE.

18. Грачева Е. И., Сафин А. Р., Садыков Р. Р. Применение аналитического метода расчета надежности элементов систем электроснабжения на основе вероятностных моделей // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2017. – Т. 10. – №. 1. – С. 48-52.

19. Васильев, А. А. Применение м-оценок для определения начального значения экспоненциальной средней в модели прогнозирования Брауна нулевого порядка / А. А. Васильев // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление*. – 2021. – № 3(55). – С. 150-165. – doi 10.26456/2219-1453/2021.3.150-165. – EDN AMCGRV.

#### Авторы публикации

**Капанский Алексей Александрович** – доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. *ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: kapanski@mail.ru.*

**Павлов Вадим Вячеславович** – студент Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, [mcplov24@mail.ru](mailto:mcplov24@mail.ru)

#### References

1. Fedorov O.V. *Expeditious forecasting of power consumption*. 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. С. 1-4.

2. Development of customized simulation models for high voltage generators / I. Kirillov, I. Morozov, N. Kuznetsov [et al.] *Sustainable Energy Systems: innovative perspectives* : Conference proceedings, Saint-Petersburg, 29–30 october, 2020. Saint-Petersburg: Springer, Cham, 2021. P. 190-196. doi 10.1007/978-3-030-67654-4\_21. EDN GYZBKA.

4. Muravleva O. O., Vekhter E. V., Zharikova T. V. Evaluation of the study of the energy characteristics of an asynchronous motor on the energy saving of a pumping unit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources*. 2005. V.308. No. 1. pp. 174-178.

3. Gracheva, E.I., Naumov, O.V. *Loss of electricity and the efficiency of shop network equipment*. Moscow: Publishing house «Rusigns», 2017. 168 p. ISBN 978-5-4365-1661-5. EDN YNMXXT.

5. Mizyurin A.O., Matveychuk N.M. Energy efficiency of using a frequency-controlled drive in water supply systems in agricultural production. *Youth in science-2016*. 2017. 407-414.

6. Karelin V. Ya., Minaev A. V. *Pumps and pumping stations: Proc. for universities*. 2nd ed., Re-work. and additional. М.: Stroyizdat, 1986.

7. Gruntovich, N.V., Influence of operating engines on the residual stresses of the nodes of the complex load of stations / N.V. Gruntovich, A.A. Kapansky, V.M. Pupin, D.O. Safonov, O.V. Fedorov. *Vestn. Gomel. state tech. un-ta im. P. O. Sukhoi*. 2021. No. 2. pp. 78–90.

8. *Optimization of power supply schemes for industrial enterprises* / E. I. Gracheva, T. V. Sinyukova, T. V. Tabachnikova, A. N. Alimova. Kazan: Kazan State Energy University, 2022. - 135 p. EDN SMARQD.

9. Kamal S., Suleiman A. M. Peculiarities of operation of centrifugal pumps using a frequency converter. 2013. no. 5. -pp. 64-67.

10. Fashilenko V.N. *Regulated electric drive of pumping and fan installations of mining enterprises: Proc. allowance*. М.: Publishing house «Mining Book». 2011. 260. p.

12. Grishin A.P., Efficiency of a frequency-controlled electric pump. Automation and informatization of electrified agricultural production. / Grishin A.P., Grishin V.A. *Scientific works*. Volume 89. М.: VIESKh, 2004. p. 118-127.

13. Romanyuk, V. N. Intensive energy saving in industrial heat technologies / V. N. Romanyuk, A. A. Bobich, T. V. Bubyр. *Energy and management*. 2013. No. 6. pp.8-12.
14. Musaev T. A., Fedorov O. V., Shageev S. R., Prokhorova M. V. Intelligent accounting systems as a tool for reducing electrical energy losses. *Construction: new technologies - new equipment*. 2021. No. 2. P. 52-55. EDN GDPLEJ.
15. Pavlov V.V. Investigation of the degree of influence of the static head of the network on the change in the active power of the consumption of the pump / V.V. Pavlov, A.A. Kapansky. *Modern problems of mechanical engineering* : Sat. scientific tr. At 2 pm, Part 2 / M-formation Resp. Belarus [and others]; under total ed. A. A. Boyko. - Gomel: GSTU im. P. O. Sukhoi, 2023. P 61-64.
16. Hruntovich, N. V., Kapanski, A. A., Baczynski, D., Vagapov, G. V., & Fedorov, O. V. (2019). Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. In E3S Web of Conferences (Vol. 124, p. 05060). EDP Sciences.
17. Chicco, D. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation / D. Chicco, M. J. Warrens, G. Jurman. *PeerJ. Computer Science*. 2021. Vol. 7. P. 1-24. doi 10.7717/PEERJ-CS.623. – EDN VSUBGE.
18. Gracheva E. I., Safin A. R., Sadykov R. R. Application of an analytical method for calculating the reliability of elements of power supply systems based on probabilistic models. *Reliability and safety of energy*. 2017. V. 10. No. 1. S. 48-52.
19. Vasiliev, A. A. Application of m-estimates to determine the initial value of the exponential mean in the zero-order Brown forecasting model / A. A. Vasiliev. *Bulletin of the Tver State University. Series: Economics and Management*. 2021. No. 3 (55). pp. 150-165. doi 10.26456/2219-1453/2021.3.150-165. EDN AMCGRV.

#### **Authors of the publication**

**Aliaksey A. Kapanski** – Ph.D. tech. Sci., Associate Professor, Department of Power Supply, Gomel State Technical University. BY. Sukhoi, kapanski@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2902-2695

**Vadim V. Pavlov** - a student of the Gomel State Technical University. BY. Sukhoi, [mcplov24@mail.ru](mailto:mcplov24@mail.ru)

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.*

**Получено** **18.07.2023г.**

**Отредактировано** **08.08.2023г.**

**Принято** **09.08.2023г.**