



**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСОВ ПЕРВОГО ПОДЪЕМА,
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Г.А. Палкин¹, А.Ф. Гайсин²

¹Забайкальский государственный университет», г. Чита, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-2524>, pala88@yandex.ru

²gaysinazat@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Работа направлена на решение важной проблемы повышения экономической эффективности, уровня ресурсосбережения и безаварийности участка первого подъема систем централизованного водоснабжения малых и средних населенных пунктов. При этом ставится задача минимизации затрат электроэнергии и водных ресурсов, связанных с переработкой насосов, с одновременным обеспечением защиты трубопровода от замерзания в условиях отрицательных температур окружающей среды. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленной задачи был разработан оптимальный метод управления электроприводами насосов первого подъема по запросам конечного потребителя воды, отличающийся от существующих анализом состояния тепловых параметров трубопроводной линии, для её защиты от замерзания в условиях низких температур окружающей среды. Метод основывается на вычислении управляющих воздействий по уровню воды в накапливающем резервуаре или давлению воды в трубопроводе U_L и температуры воды в конце трубопровода U_T , с последующим расчетом оптимальной уставки подачи насоса, которая затем поддерживается методом частотного регулирования. Чтобы определить оптимальные законы вычисления управляющих воздействий и оценить эффективность предложенных решений использовалась имитационная модель Matlab® Smulink. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** По результатам моделирования было выявлено, что для вычисления управляющего воздействия по уровню U_L целесообразно применять ПИД закон, по температуре U_T - ПД закон, по расходу - ПИ закон. Также были оценены параметры технологического процесса и уровень потребляемой мощности в процессе управления. **ВЫВОДЫ.** Исследования предложенной концепции управления участком первого подъема показали высокую технико-экономическую эффективность, в частности экономия потребляемой электроэнергии оценивается примерно в 22 % при обеспечении защиты трубопровода от замерзания.

Ключевые слова: электрический привод; электротехнический комплекс; частотное регулирование; имитационное моделирование; защита от замерзания.

Для цитирования: Палкин Г.А., Гайсин А.Ф. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 194-208. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208.

**RESEARCH OF THE OPTIMAL METHOD OF CONTROL OF THE FIRST RISE
PUMPS ELECTRIC DRIVES OPERATED IN CONDITIONS OF NEGATIVE
TEMPERATURES**

GA. Palkin¹, AF. Gaysin²

¹FSBEI HE Transbaikal State University, Chita, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9025-2524>, pala88@yandex.ru

²gaysinazat@mail.ru

Abstract: *OBJECT.* The work is aimed at solving an important problem of increasing the economic efficiency, the level of resource saving and accident-free operation of the first rise section of the centralized water supply systems of small and medium-sized settlements. At the same time, the task is to minimize the cost of electricity associated with the excess performance of pumps, while ensuring the protection of the pipeline from freezing in conditions of negative ambient temperatures. *METHODS.* To solve this problem, an optimal method for controlling electric drives of first rise pumps at the request of the end user of water was developed, which differs from the existing ones by analyzing the state of the thermal parameters of the pipeline. The method is based on the calculation of control actions based on the water level in the storage reservoir or the water pressure in the pipeline U_L and the water temperature at the end of the pipeline U_T , followed by the calculation of the optimal pump supply setpoint, which is then maintained by the frequency control method. The Matlab® Simulink simulation model was used to determine the optimal laws for calculating control actions and evaluate the effectiveness of the proposed solutions. *RESULTS.* Based on the simulation results, it was found that it is advisable to use the PID law for calculating the control effect for the U_L level, the PD law for the U_T temperature, and the PI law for the flow rate. The parameters of the technological process and the level of power consumption in the control process were also evaluated. *CONCLUSIONS.* Studies of the proposed concept of managing the first rise section have shown high technical and economic efficiency, in particular, the savings in electricity consumption are estimated at about 22 % while ensuring the protection of the pipeline from freezing.

Keywords: *electric drive; electrical complex; frequency control; simulation modeling; frost protection.*

For citation: Palkin GA, Gaysin AF. Research of the optimal method of control of the first rise pumps electric drives operated in conditions of negative temperatures. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):194-208. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-194-208.

Введение

В современном мире процесс водоснабжения играет важную роль в жизни человеческого общества. Во всем мире наблюдается тенденция к обеспечению качественным централизованным водоснабжением все большего количества населенных пунктов.

Организация водоснабжения требует определенных капитальных и текущих экономических затрат, которые необходимо минимизировать при проектировании и эксплуатации системы водоснабжения.

Основным источником эксплуатационных затрат систем водоснабжения является их электротехнический комплекс, обеспечивающий технологический процесс и вспомогательные нужды объектов водоснабжения. При этом наиболее энергоемким элементом являются электроприводы насосов, которые могут потреблять до 90 % всей электроэнергии, и в то же время являются главным элементом обеспечения технологического процесса.

Особую сложность представляет забор и транспортировка воды в суровых природных условиях эксплуатации, что обуславливает дополнительные энергетические и, как следствие, экономические издержки на данные процессы. Суровые условия эксплуатации свойственны, в первую очередь, районам крайнего севера и территориям с резко континентальным климатом. Тем не менее, освоение данных территории в последнее время является стратегической задачей большинства стран, включающих в свой состав подобные районы. Основными факторами суровых условий эксплуатации являются низкие температуры окружающей среды, вечные мерзлоты и сложный природный ландшафт.

Количество объектов централизованного питьевого водоснабжения на территории Российской Федерации (РФ) на 2020 год составляет 94 299 штук, при этом около 20% источников централизованного водоснабжения сезонно эксплуатируются при низких температурах окружающей среды, при этом 13 % таких систем водоснабжения сосредоточены на территории Сибири и Дальнего Востока [1]. На таких объектах затраты электроэнергии могут повышаться за счет необходимости подогрева помещений и

транспортируемой воды, а также для сброса воды с целью предотвращения замерзания трубопровода. Соответственно, важной задачей является нахождение источников неоправданных энергетических затрат с целью их минимизации.

Участки первого подъема являются ключевыми элементами системы водоснабжения, поскольку их неоптимальная работа может отразиться на функционировании всей системы. Насосное оборудование первого подъема обеспечивает перекачивание воды из скважины или поверхностного водоема в накапливающие резервуары или в систему водоснабжения для прямого разбора.

Чаще всего неоправданные эксплуатационные затраты на участках первого подъема возникают в связи с переработкой насосов. Данная ситуация влечет за собой перерасход электроэнергии на питание электрического привода насосного агрегата, преждевременный износ узлов насоса и трубопроводной системы, растрату природных ресурсов (обычно артезианской воды) за счет перелива воды из резервуара или её слива из системы. Общий объем утечки воды, в том числе на перелив, для Российской Федерации за 2019 год составил 710 913.12 тысяч кубических метров [2]. В некоторых случаях затраты электроэнергии объектов водоснабжения на переработку насосов могут достигать 50 % от общего потребления.

Причиной переработки может являться либо превышение подачи насоса первого подъема над разбором воды, либо поддержание заранее заданных параметров системы водоснабжения, для предотвращения аварийных ситуаций.

Аварийные ситуации на участке первого подъема могут быть вызваны внезапной поломкой узлов насосного агрегата либо трубопроводной системы. Аварии на трубопроводе, эксплуатируемом в суровых природных условиях, являются наиболее опасными и чаще всего возникают в результате замерзания транспортируемой воды. При этом необходимо учитывать, что температура воды в трубопроводе может снижаться не только в связи с низкими температурами окружающей среды, но и за счет изменения гидравлических параметров системы, в первую очередь – подачи насоса.

За 2019 год на территории РФ произошло 14 629 аварий трубопроводов [3], при этом 28 % аварий произошло на территориях с суровыми природными условиями эксплуатации.

Решением описанных проблем существующих систем водоснабжения является использование систем автоматического управления производительностью электроприводов насосов. Обзор существующих решений показал, что наиболее эффективно данная задача решается путем частотного регулирования электропривода насоса [4-10]. При этом изменяется частота питающего напряжения, что пропорционально влияет на гидравлические параметры насоса. В электроприводе насосов номинальной мощностью менее 250 кВт применяются трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. При частотном регулировании данных машин изменяется частота вращения вала двигателя и крутящий момент, что влияет на такие гидравлические параметры насоса как напор и подача.

Помимо экономии воды, частотное регулирование позволяет значительно сократить затраты электроэнергии, питающей электродвигатель насоса, в отличие от методов изменения гидравлического сопротивления трубопровода путем применения регулирующих задвижек. Для управления насосами чаще применяется метод скалярного частотного регулирования, поскольку он более простой и дешевый для реализации [11].

Частотное регулирование не лишено и недостатков, к которым можно отнести отрицательное влияние на питающую электрическую сеть [12]. Данный недостаток может быть минимизирован путем применения специальных технических средств, например сетевых фильтров высших гармоник. Также необходимо уделять серьезное внимание параметрам и условиям эксплуатации каждого конкретного объекта водоснабжения. Например, необходимо поддерживать достаточную температуру воды в трубопроводе при изменении производительности насоса в условиях низких температур окружающей среды. Обзор существующих работ по управлению насосами первого подъема [13-15] показал недостаточную степень проработанности данного вопроса.

Таким образом, важной задачей, решаемой в текущей работе, является разработка и исследование методики управления частотно-регулируемыми электроприводами насосов первого подъема, с обеспечением достаточного уровня безаварийности объекта и минимизацией неоправданных эксплуатационных затрат.

Целью исследования предложенного метода является определение наиболее эффективного способа расчета управляющего воздействия на частотный

интегральный управляющий сигнал по температуре; u_T^D - дифференциальный управляющий сигнал по температуре; u_T - полный управляющий сигнал по температуре.

Величина уставки подачи Set_Q поступает на элемент сравнения 14 регулятора, затем вычисляется величина рассогласования по подаче e_Q , которая подается на частотный преобразователь для поддержания требуемой величины подачи жидкости в трубопроводе.

Расчет величины подачи, которую необходимо поддерживать может осуществляться разными способами. Для определения наиболее эффективного из них была разработана компьютерная имитационная модель участка первого подъема, включающая его электротехнический комплекс и систему управления [17]. Структурная схема данной модели приводится на рисунке 2.

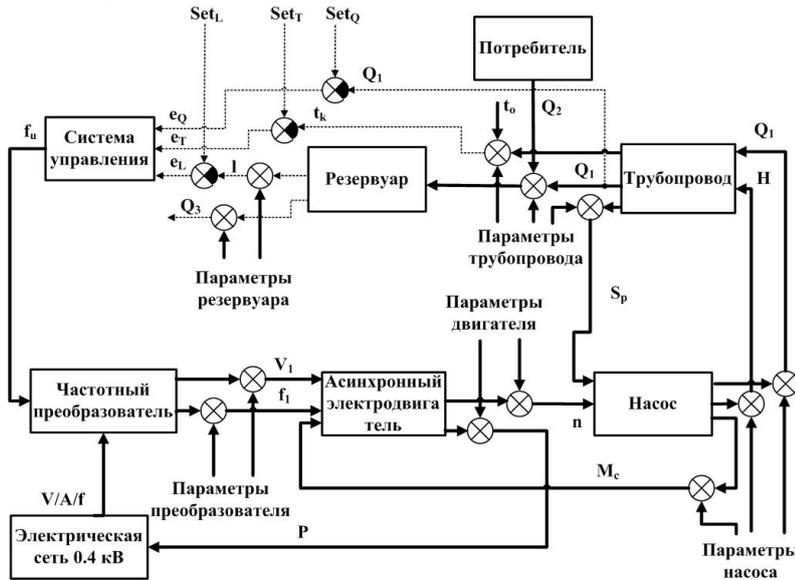


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели

Fig. 2. Block diagram of the simulation model

Помимо описанных ранее, модель учитывает следующие параметры участка первого подъема: напряжение, ток и частота питающей сети - $V/A/f$ (В, А, Гц); управляющее воздействие на частотный преобразователь - f_u (Гц); напряжение на выходе частотного преобразователя - V_1 (В); частота на выходе частотного преобразователя - f_1 (Гц); потребляемая электроприводом насоса мощность - P (Вт); момент сопротивления насоса на валу электродвигателя - M_c (Н·м); механическая частота вращения вала электродвигателя - n (об/мин); объемный расход (подача) в трубопроводе - Q_1 (м³/с); объемный расход на выходе из резервуара (нужды потребителей) - Q_2 (м³/с); перелив воды из резервуара (слив из системы) - Q_3 (м³/с); напор насоса - H (м); напор трубопроводной системы - S_p (м); температура окружающей среды - t_o (°C).

В соответствии со схемой автоматизируемого объекта, сигнал f_u является основным управляющим воздействием на объект; сигналы Q_1, l, t_k - формируют отрицательную обратную связь путем вычисления соответствующих ошибок регулирования e_Q, e_L, e_T от заданных уставок расхода Set_Q , уровня Set_L и температуры Set_T . Q_2 и t_o - основные возмущающие воздействия. На выходные сигналы каждого элемента воздействуют его внешние и внутренние параметры, условно принятые неизменными в процессе управления.

Описанная схема реализуется в среде *Simulink* в виде имитационной модели, представленной на рисунке 3.

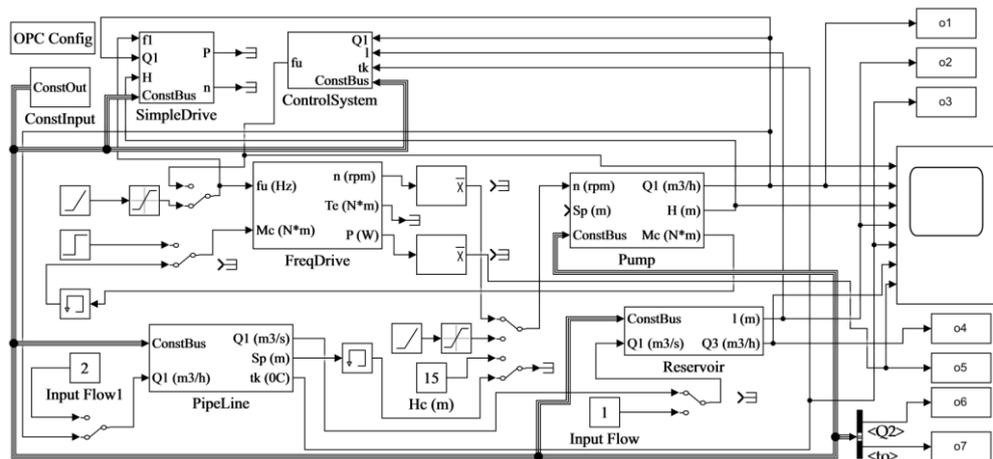


Рис. 3. Имитационная модель Simulink

Fig. 3. Simulink simulation model

Данная модель состоит из шести основных и одного вспомогательного блоков-подсистем. Блоки «Pump», «PipeLine», «Reservoir» и «ControlSystem» соответствуют одноименным блокам на рисунке 2. Блок «FreqDrive» объединяет в себе трехфазный источник питания, частотный преобразователь и трехфазный асинхронный электродвигатель. Блок «ConstInput» предназначен для ввода внешних данных и параметров в модель. Вспомогательная подсистема «SimpleDrive» позволяет упрощенно моделировать выходные сигналы асинхронного электропривода, при необходимости проведения длительных расчетов, не требующих высокой точности вычислений.

На рисунке 4 приводится схема подсистемы «FreqDrive».

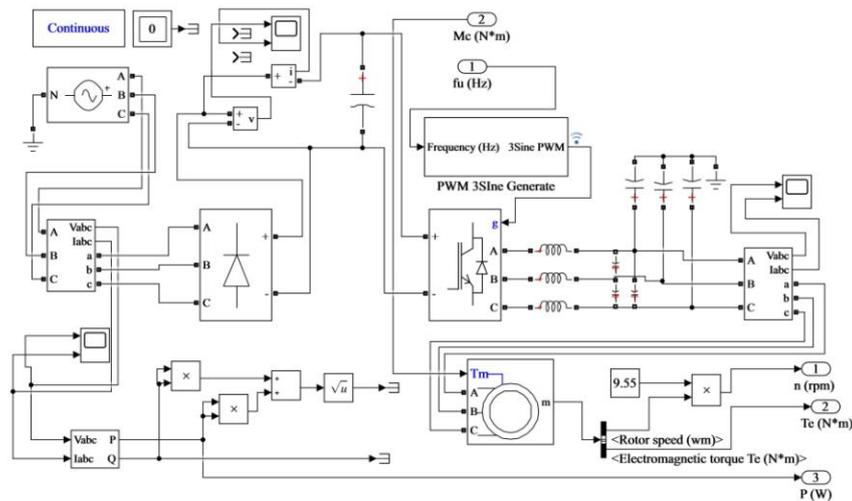


Рис. 4. Подсистема «FreqDrive»

Fig. 4. The "FreqDrive" subsystem»

Элемент «Three-Phase Programmable Voltage Source» генерирует трехфазное переменное линейное напряжение 380 В с частотой 50 Гц. Данное напряжение выпрямляется полнофазным трехфазным диодным выпрямителем «Universal Bridge» и поступает на трехфазный полнофазный инвертор «Universal Bridge1» на основе IGBT. Режим работы инвертора задается при помощи блока «PWM 3Sine Generate». Данный блок генерирует 6 сигналов широтно-импульсной модуляции для открытия транзисторных ключей инвертора на основе трех эталонных синусоид, соответствующих фазным напряжениям. Частота эталонной синусоиды (f_u) поступает в блок в качестве внешнего сигнала, а амплитуда рассчитывается по принципу $V_1/f_1 = \text{const}$, что соответствует скалярному способу частотного преобразования, который наиболее подходит для применения в приводе с насосной нагрузкой. Преобразованное напряжение требуемой частоты поступает на элемент «Asynchronous Machine SI Units». Помимо требуемой частоты на выходе частотного преобразователя, блок получает момент сопротивления на валу двигателя M_c . Основными выходными сигналами блока

является механическая частота вращения ротора n , крутящий момент и потребляемая электрическая мощность P .

Подсистема «ControlSystem», приведенная на рисунке 5, реализует в себе различные варианты автоматического управления системой.

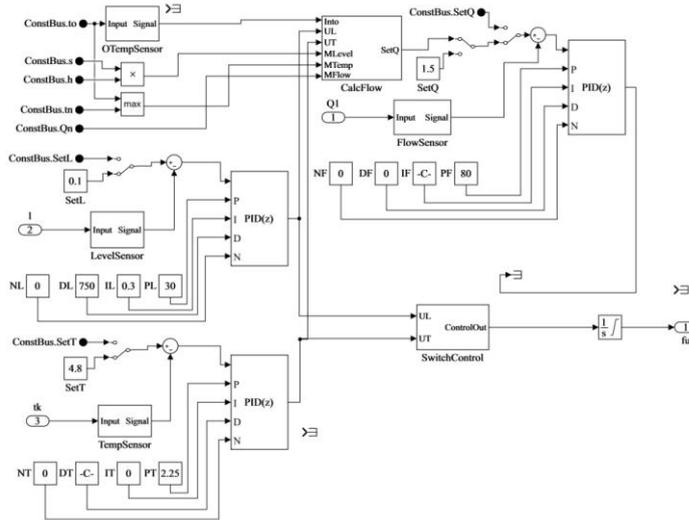


Рис. 5. Подсистема « ControlSystem»

Fig. 5. The "ControlSystem" subsystem

В подсистеме выполняется одновременное вычисление управляющих воздействий по уровню и по температуре, с нахождением оптимального значения общего управляющего воздействия. В качестве основных элементов подсистемы выступают стандартные ПИД регуляторы. Результирующее управляющее воздействие может вычисляться напрямую, как максимум между воздействиями по уровню и температуре, либо через оптимальное значение уставки подачи, задающей затем f_w , которая вычисляется по следующей формуле [16]:

$$\begin{cases} Set_Q(i) = Set_Q(i-1) + \max\left(\frac{Q_n \cdot u_L(i)}{h}, \frac{Q_n \cdot u_T(i)}{\max(t_o(i), t_n(i))}\right), t_k(i) \geq z_k, \\ Set_Q(i) = Q_n, t_k(i) < z_k \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_n – максимально возможная величина подачи насоса ($m^3/ч$); h – высота резервуара(м); t_n – температура воды в начале трубопровода ($^{\circ}C$); z_k – критическая температура ($^{\circ}C$), вычисляемая по формуле:

$$z_k = Set_T - d, \quad (2)$$

где d - величина допустимого отклонения требуемой температуры Set_T .

Первое выражение формулы 1 предназначено для вычисления оптимальной величины подачи насоса, снижающей финансовые затраты на эксплуатацию электроприводов скважинных насосов, при ограничениях, связанных с замерзанием трубопровода за счет снижения подачи воды. Использование приведенной зависимости для расчета подачи позволяет осуществить минимизацию затрат на переработку насоса при обеспечении безаварийной работы участка первого подъема. Данный результат достигается за счет выбора в качестве основного управляющего сигнала максимального из вычисляемых: по уровню воды в резервуаре, либо по температуре воды в трубопроводе. В первом случае, когда $u_L > u_T$, осуществляется поддержание требуемого уровня воды, при игнорировании температуры, поскольку условия эксплуатации объекта допускают текущие параметры работы участка первого подъема без угрозы замерзания воды. В противном случае осуществляется поддержание заданной температуры воды в конце трубопровода, при игнорировании уровня воды в резервуаре. В данной ситуации обеспечивается защита трубопровода от замерзания в условиях низких температур окружающей среды, при этом возможна незначительная переработка насосов, обеспечивающая требуемую циркуляцию воды. Второе выражение формулы 1 обеспечивает экстренную защиту трубопровода от замерзания путем установки

максимально возможной подачи при резком падении температуры воды.

Моделирование представленной подсистемы позволит подобрать наиболее эффективные коэффициенты регуляторов, а также метод определения общего управляющего воздействия.

Результаты

В качестве входных данных для расчета были выбраны значения основных параметров, которые соответствовали характеристикам разработанного ранее лабораторного стенда [18], на котором выполнялась апробация модели [17].

Для того, чтобы максимально повысить эффективность процесса управления необходимо правильно подобрать вид управляющего закона, а так же его коэффициенты. Как было упомянуто ранее, в качестве основного управляющего закона применяется классический ПИД регулятор. Полный ПИД регулятор позволяет изменить управляющее воздействие максимально быстро и минимизировать статическую ошибку регулирования. Тем не менее, для некоторых процессов применение данного регулятора может дать отрицательный эффект, вплоть до выхода системы из состояния равновесия. Поэтому для каждого управляемого процесса в модели были выполнены исследования как ПИД, так и пропорционального (П), пропорционально интегрального (ПИ), пропорционально дифференциального (ПД) регуляторов. Коэффициенты пропорциональной (K_P), интегральной (K_I) и дифференциальной (K_D) составляющих регуляторов были подобраны по принципу Циглера-Николса.

На рисунке 6 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания уровня воды в накапливающем резервуаре. Величина уставки $Set_L = 0.1$ м. Основное возмущение $Q_2 = 0.7$ м³/ч.

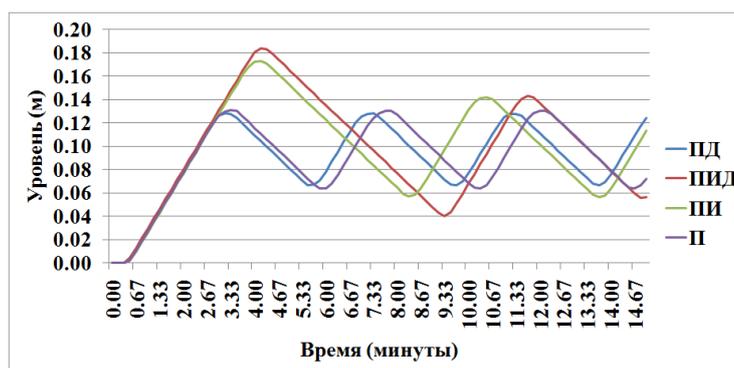


Рис. 6. Результаты управления по уровню воды в резервуаре

Fig. 6. Results of water level control in the tank

Наиболее эффективным для данного процесса в текущих условиях является ПИД закон, обеспечивающий наибольший период колебаний управляемой величины, что приводит к повышению экономической эффективности управления. Более высокое первоначальное перерегулирование в процессе поддержания уровня не является критическим.

Максимальное перерегулирование составляет: 9 %.

Период колебаний: 2 минуты 18 секунд.

Следует отметить, что анализ управляющего воздействия по уровню показал скачок частоты на этапе разгона двигателя, значительно превышающий максимально допустимое значение. Поэтому было принято решение искусственно ограничивать управляющее воздействие максимально возможным значением, которое может выдать частотный преобразователь для двигателей данного типа. Эта величина составила 50 Гц. Применения ограничения управляющего воздействия позволило значительно уменьшить первоначальное перерегулирование и повысить качество процесса управления. Тот же принцип был применен и в остальных регуляторах системы.

На рисунке 7 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания температуры воды в конце трубопровода. Величина уставки $Set_T = 4.8$ °С. Основное возмущение $t_o = -9$ °С; $t_n = +5$ °С.

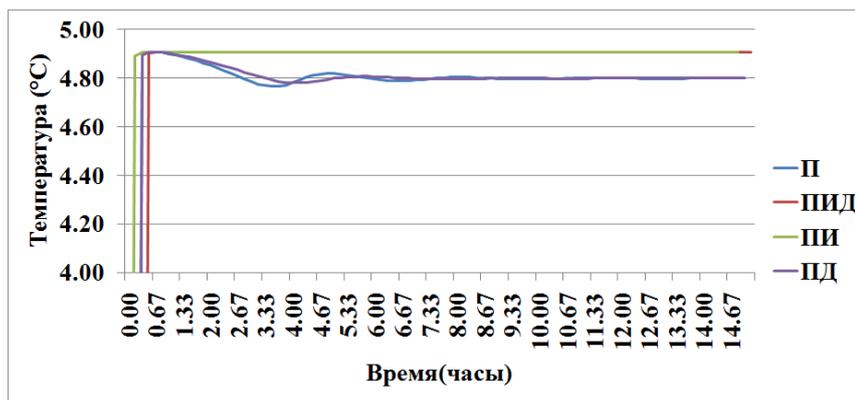


Рис. 7. Результаты управления по температуре воды в трубопроводе

Fig. 7. Results of water temperature control in the pipeline

Наиболее эффективным для данного процесса в текущих условиях является ПД закон, обеспечивающий быстрое затухание флуктуаций управляемой величины. Первоначальное перерегулирование не превышает величины у остальных законов. На некоторых участках незначительно проигрывает ПД - закону по величине отклонения.

Максимальное перерегулирование составляет: 2 %.

Период затухания основных колебаний: 9 минут.

На рисунке 8 приводится анализ работы различных регуляторов для поддержания подачи (расхода) воды в трубопроводе. Величина уставки $Set_Q = 1.5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

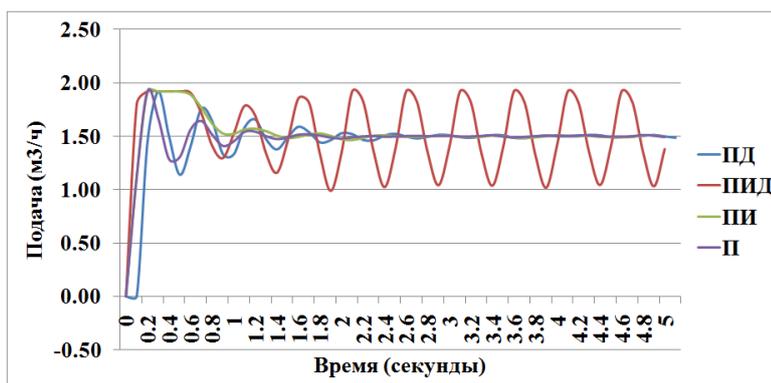


Рис. 8. Результаты управления по расходу воды в трубопроводе

Fig. 8. Results of water flow control in the pipeline

Наиболее эффективным для данного процесса в текущих условиях является ПИ закон, обеспечивающий быстрое затухание флуктуаций управляемой величины (при условии ограничения управляющего воздействия) и имеющий приемлемое первоначальное перерегулирование. Из фигуры видно, что полный ПИД закон приводит к “расшатыванию” системы и недопустим в текущих условиях.

Максимальное перерегулирование составляет: 20 %.

Период затухания основных колебаний: 2.6 секунды.

Концепция предлагаемого алгоритма управления участком первого подъема заключается в одновременном вычислении и анализе отклонений по уровню и по температуре. Основное управляющее воздействие f_u в данном случае может определяться либо вычислением требуемой уставки по расходу, которая затем поддерживается регулятором расхода, либо прямым преобразованием воздействий по уровню и температуре к общему воздействию.

На рисунке 9 приводится анализ работы прямого двухканального регулятора уровень-температура. Величина уставок $Set_T = 4.8 \text{ °C}$; $Set_L = 0.1 \text{ м}$.

Далее рассмотрен алгоритм в котором по воздействиям от уровня и температуры рассчитывается переменная уставка по расходу Set_Q , которая затем поддерживается регулятором по расходу.

На рисунке 10 приводится анализ работы двухканального регулятора уровень-

температура с промежуточным вычислением уставки расхода. Величина уставок $Set_T = 0$ °C; $Set_L = 0.1$ м.

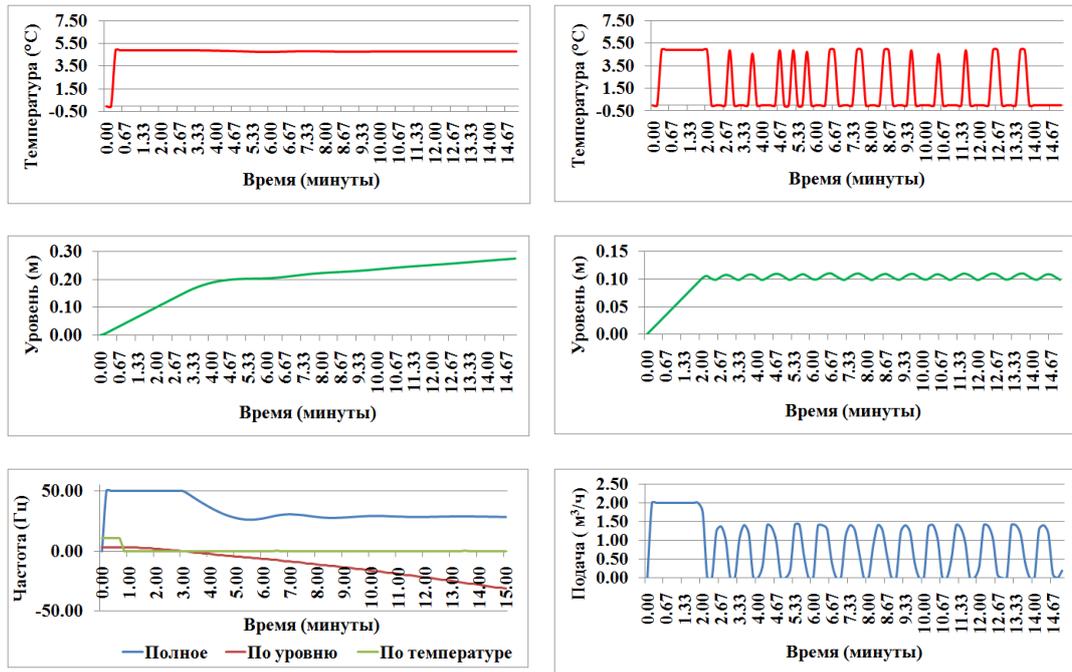


Рис. 9. Прямое управление по уровню и температуре

Fig. 9. Direct level and temperature control

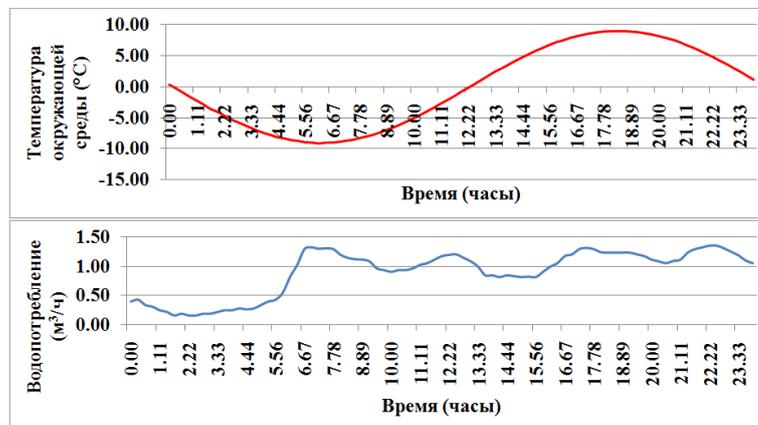
Рис. 10. Управление по уровню и температуре через уставку расхода

Fig. 10. Level and temperature control via the flow setpoint

В первом случае для поддержания заданной температуры требуется большая подача, соответственно уставка по уровню игнорируется, что может привести к переполнению резервуара.

Во втором случае уже игнорируется температура для поддержания требуемого уровня. Флуктуации расхода приводят к постоянным нежелательным скачкам температуры. Следует отметить, что данное явление наблюдается и в предыдущем методе на тех же значениях уставок. Отсюда следует вывод о необходимости более детальной проработки вопроса приведения управляющих воздействий различных физических процессов к величине уставки по расходу.

На рисунке 11 приводится анализ работы двухканального регулятора уровень-температура с промежуточным вычислением уставки расхода для длительного интервала времени (24 часа). Величина уставок $Set_T = 4.8$ °C; $Set_L = 0.1$ м.



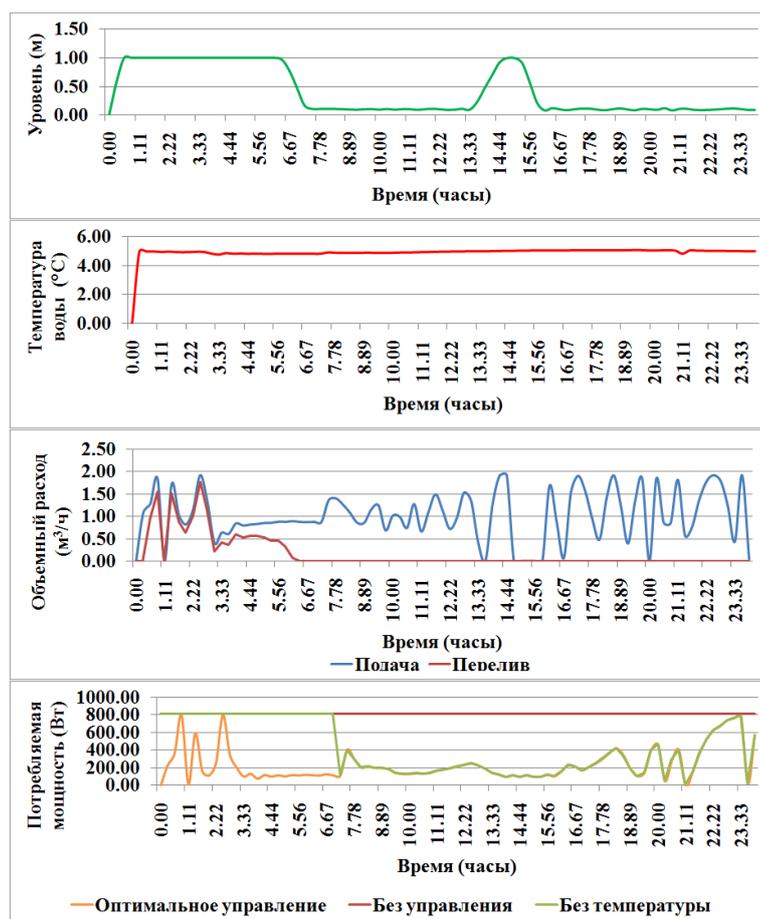


Рис. 11. Анализ поведения системы в течении суток

Fig. 11. Analysis of the system behavior during the day

Для данного эксперимента основные возмущения задавались как величины, изменяющиеся во времени в соответствии с прогнозируемыми суточными колебаниями.

Температура окружающей среды t_0 задавалась по синусоидальному закону со средним значением в 0°C , отклонением в -9°C и периодом 1 Гц. Поскольку точка отсчета соответствует ночному времени суток 0 часов, график синусоиды смещен на половину периода.

Величина водопотребления Q_2 определяется усредненными данными суточного потребления воды.

Из зависимостей видно, что в ночные и утренние часы происходили колебания температуры воды в конце трубопровода, в связи с наиболее низкими температурами окружающей среды. В этот промежуток управляющие воздействия по уровню практически не учитывались, и как следствие происходило переполнение резервуара. На остальных участках уровень поддерживался на заданной величине, за исключением отрезка с резким послеобеденным падением водоразбора.

Анализируя графики потребляемой электрической мощности, можно наблюдать значительное снижение среднего значения данного показателя. Примерная оценка снижения потребляемой мощности по сравнению с номинальным режимом работы системы составила около 70 %. При реализации стандартного управления только по уровню без учета температуры воды, в условиях отрицательных температур окружающей среды, для защиты водовода от замерзания поддерживается максимальная подача насоса, и экономия электроэнергии составляет 48 %. Таким образом, применение предложенного алгоритма управления, по сравнению со стандартными, обеспечивает снижение потребляемой мощности на 22 %. В реальных условиях данная величина может изменяться в зависимости от условий и режимов эксплуатации объекта водоснабжения.

Обсуждение

Исследования системы автоматического управления производительностью насосов показали возможность и целесообразность её применения для повышения

экономической эффективности рассматриваемого объекта. При этом для вычисления управляющего воздействия по уровню целесообразно применять ПИД закон, по температуре - ПД закон, по расходу - ПИ закон. Также было выявлено, что при значительном изменении параметров и возмущений системы, требуется корректировка коэффициентов управляющих закон, что приводит к необходимости применения адаптивных алгоритмов их расчета. В целом, исследования предложенной концепции управления участком первого подъема показали высокую технико-экономическую эффективность, в частности экономия потребляемой электроэнергии оценивается примерно в 22 % (данное значение может изменяться в зависимости от параметров и режимов работы моделируемого объекта).

Условия функционирования участка первого подъема подразумевают наличие инерционности основных контролируемых параметров. Причем величина инерции и задержки наложения управляющего воздействия для различных параметров может значительно отличаться. Например, задержка изменения температуры при регулировании расхода, для приведенного расчетного эксперимента, составила порядка 15-30 секунды, не учитывая инерционность датчиков температуры. Задержка же при изменении уровня в накапливающем резервуаре составила порядка 2 минут. Для оптимизации процесса управления необходимо разработать методику точного приведения управляющих воздействий по различным параметрам к единому масштабу, а затем минимизировать негативное влияние инерционности. Также следует отметить серьезное влияние изменения внешних и внутренних параметров и возмущений на качество процесса управления, что требует постоянной корректировки коэффициентов управляющих элементов.

Перспективным направлением дальнейших работ является разработка и исследование адаптивных и прогностических многоканальных регуляторов, обеспечивающих повышение качества процесса управления. Так же необходимо рассмотреть целесообразность использования программного вычислителя величины уставок, компенсирующего изменения внешних условий функционирования участка первого подъема, с возможностью использования вероятностных моделей на основе известной статистической информации о режимах работы объекта. Например, при снижении водоразбора в ночное время целесообразно предварительно снизить поддерживаемый уровень в резервуаре для создания запаса поддержания подачи с обеспечением приемлемой температуры воды. Ближе к утру, наоборот, необходимо повысить поддерживаемый уровень для компенсации повышения водоразбора. Уставка по температуре также может изменяться в зависимости от температуры окружающей среды.

Эксперименты на модели показали, что в условиях низкого водоразбора поддерживать температуру воды в конце трубопровода путем обеспечения повышенной подачи, является не рентабельным из-за значительной величины переработки насосов. В этом случае допустимой эксплуатационной мерой является предварительный подогрев воды электрическими нагревательными элементами. При этом в комплекс управления требуется ввести дополнительный регулятор, и построить алгоритм управления по принципу нахождения точки минимального энергопотребления между насосом и нагревателем.

Предложенные решения, успешно апробированные на модели, можно будет рекомендовать к внедрению на объектах водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

Заключение

Результаты проведенных расчетов позволили определить методику и оптимальные параметры алгоритма управления: выявлено, что для расчета управляющего воздействия по уровню целесообразно использовать закон ПИД; для температуры - закон ПД; для расхода - закон ПИ. Для расчета основного управляющего воздействия предлагается одновременно рассчитать действия по уровню и температуре с последующим доведением большего из них до заданного значения для расхода, поддерживаемого регулятором расхода. Исследования предлагаемого способа управления показали его высокую технико-экономическую эффективность: экономия потребления электроэнергии оценивается примерно в 22 % при обеспечении защиты трубопроводов от замерзания.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для разработки и оптимизации систем автоматического управления скважинными насосами

первых подъемных участков систем водоснабжения с накопительным резервуаром или без него. Предлагаемый способ управления не требует аппаратных средств управления и может быть реализован на бюджетных программируемых логических контроллерах или регуляторах, обеспечивая при этом значительную экономию электроэнергии и природных ресурсов при сохранении достаточного уровня надежности системы при работе при низких температурах окружающей среды. Разработанная модель позволяет оптимизировать систему управления для конкретного объекта водоснабжения без серьезных предварительных полевых исследований, что снижает затраты на ввод системы в эксплуатацию.

Проект направлен на применение в системах водоснабжения малых и средних населенных пунктов и автономных предприятий, особенно тех, которые работают в условиях низких температур окружающей среды. Перспективами развития работы являются совершенствование алгоритма управления с использованием адаптивных технологий и разработка алгоритма высокоточной оптимизации с низкими требованиями. Для повышения надежности системы также целесообразно контролировать температуру воды в скважине и в резервуаре, регулируя расход таким образом, чтобы обеспечить нормальное функционирование всех элементов автоматизированного объекта.

Литература

1. Число объектов хозяйственно-питьевого централизованного водоснабжения. Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335>. Ссылка активна на 09 мая 2021.
2. Утечки и неучтенный расход воды (тысяч кубических метров, объем показателя за год). Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034>. Ссылка активна на 09 мая 2021.
3. Число аварий в системе водопровода. Доступно по: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186>. Ссылка активна на 09 мая 2021.
4. Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(5):59-70.
5. Гумерова Р.Х., Черняховский В.А. Моделирование потребления электроэнергии приводами насосов при дроссельном и частотном регулировании производительности. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017;19(3-4):96-106.
6. Мустафин Э.Н. Применение регулируемых асинхронных двигателей в жилищно-коммунальном хозяйстве. В поиске компромиссного решения. Бюллетень строительной техники. Москва: Бст., 2018. № 3 (1003) С. 51-53.
7. Abidov K., Zaripov O., Zaripova S. Automatic drive-support method for constant pressure maintenance at pump units of the hydraulic power stations, E3S Web of Conf., 216 (2020) 01110DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601110>.
8. Kan E., Ikramov N., Mukhammadiev M. The change in the efficiency factor of the pumping unit with a frequency converter, E3S Web Conf., 97 (2019) 05010
9. Pöyhönen S., Simola A.; Ahola J. Variable-speed-drive-based sensorless estimation of pump system reservoir fluid level, 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020; pp. P.1-P.10,
10. Rodriguez Arribas J.; Vega Gonzalez C. M. Optimal vector control of pumping and ventilation induction motor drives, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002; vol. 49, no. 4, pp. 889-895.
11. Kukishev D., Meshcheryakov V., Boikov A, et al Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive, 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novochoerkassk, 2018, pp. 30-31.
12. Костинский С.С. Обзор и результаты исследований гармонического состава тока, потребляемого преобразователями частоты малой мощности, а также способов и устройств для снижения их негативного влияния на системы электроснабжения. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020;22(2):27-42.
13. Jahmeerbacus M. I. Flow rate regulation of a variable speed driven pumping system using fuzzy logic, 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, 2015; pp. 1-6.
14. He L., Song L. The pump house constant pressure fuzzy self-tuning PID control system simulation, 2011 International Conference on Electric Information and Control

Engineering, Wuhan, 2011; pp. 5525-5527.

15. Fulai Y.; Hexu S. Optimal control in variable-speed pumping stations, 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2011, pp. 2397-2401.

16. Палкин Г.А., Горбунов Р.В., Суворов И.Ф. и т.д. Способ регулирования уровня жидкости в емкости-сборнике и цифровая система для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2593649. 10.08.2016. Бюл. № 22. Доступно по: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?facesredirect=true&id=ee50a00bd42fb65219a943ab3f25f61e>. Ссылка активна на 09 мая 2021.

17. Palkin G.; Suvorov I., Development of a simulation model of the first rise area of a water supply system with a storage reservoir. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020, pp. 804-809.

18. Palkin G., Suvorov I and Gorbunov R. Evaluation of Ways to Improve the Energy Efficiency of Sites of First Rise Supply Water Systems with Storage Tank by Laboratory Modeling, 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018, pp. 227-234.

Авторы публикации

Палкин Георгий Александрович – старший преподаватель кафедры Информатики, вычислительной техники и прикладной математики (ИВТ и ПМ), Забайкальский государственный университет (ЗабГУ).

Гайсин Азат Фивзатович – д-р техн. наук, профессор кафедры Физики, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. *Number of objects of household and drinking centralized water supply*. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/37335>. Accessed: 09 may 2021.

2. *Leakage and unrecorded water consumption (thousand cubic meters, the value of the indicator for the year)*. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/34034>. Accessed: 09 may 2021.

3. *Number of accidents in the water supply system*. Available at: <https://www.fedstat.ru/indicator/34186>. Accessed: 09 may 2021.

4. Ivanova VR, Kiselev IN. Frequency-adjustable electric drive for energy saving and optimization of technological processes in electrical complexes. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019;21(5):59-70. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-5-59-70>

5. Gumerova RK, Chernyakhovskiy VA. Modelling of electrical energy consumption of electrical drives in throttle and frequency regimes of control. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(3-4):96-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-3-4-96-106>

6. Mustafin EN. The use of regulated asynchronous motors in housing and communal services. In search of a compromise solution. *Byulleten' stroitel'noi tekhniki*. Moskva: Bst., 2018. № 3 (1003) Pp. 51-53.

7. Abidov K, Zaripov O, Zaripova S. *Automatic drive-support method for constant pressure maintenance at pump units of the hydraulic power stations*. E3S Web of Conf., 216 (2020) 01110. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601110>

8. Kan E, Ikramov N, Mukhammadiev M. *The change in the efficiency factor of the pumping unit with a frequency converter*. E3S Web Conf., 97 (2019) 05010 doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199705010>

9. Pöyhönen S, Simola A, Ahola J. *Variable-speed-drive-based sensorless estimation of pump system reservoir fluid level*. 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020; pp. 1-P.10, doi: 10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215786

10. Rodriguez Arribas J, Vega Gonzalez CM. *Optimal vector control of pumping and ventilation induction motor drives*. in IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002;49(4):889-895. doi: 10.1109/TIE.2002.801240

11. Kukishev D, Meshcheryakov V, Boikov A et al *Energy saving in the scalar control system of an asynchronous electric drive*. 2018 X International Conference on Electrical Power

Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018, pp. 30-31. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571784

12. Kostinskiy SS. Review and results of studies of the harmonic composition of the current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(2):27-42. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-2-27-42>

13. Jahmeerbacus MI. *Flow rate regulation of a variable speed driven pumping system using fuzzy logic*. 2015 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, 2015; pp. 1-6, doi: 10.1109/EPECS.2015.7368520

14. He L, Song L. *The pump house constant pressure fuzzy self-tuning PID control system simulation*. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, 2011; pp. 5525-5527, doi: 10.1109/ICEICE.2011.5777320

15. Fulai Y, Hexu S. *Optimal control in variable-speed pumping stations*. 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2011, pp. 2397-2401, doi: 10.1109/ICMA.2011.5985981.

16. Palkin GA, Gorbunov RV, Suvorov IF. et al. *Sposob regulirovaniya urovnya zhidkosti v emkosti-sbornike i tsifrovaya sistema dlya ego osushchestvleniya*. Patent RUS № 2593649. 10.08.2016. Byul. №22. Available at: <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&idee50a00bd42fb65219a943ab3f25f61e>. Accessed 09 may 2021.

17. Palkin G, Suvorov I. *Development of a simulation model of the first rise area of a water supply system with a storage reservoir*. 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2020, pp. 804-809, doi: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208073.

18. Palkin G, Suvorov I, Gorbunov R. *Evaluation of Ways to Improve the Energy Efficiency of Sites of First Rise Supply Water Systems with Storage Tank by Laboratory Modeling*. 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, 2018, pp. 227-234, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544369.

Authors of the publication

George A. Palkin – TransBaikal State University, Chita, Russia.

Azat F. Gaysin – Department of Physics, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 15.05.2021 г.

Отредактировано 28.05.2021 г.

Принято 08.06.2021 г.