

ОТЗЫВ

официального оппонента Карякина А. Л.

на диссертацию **Палкина Георгия Александровича**

«Управление электротехническим комплексом участка первого подъема в
сложных природных условиях эксплуатации»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

На отзыв представлены:

- диссертационная работа объемом 164 страницы машинописного текста, состоящая из введения, четырех глав с выводами, заключения, 66 рисунков, 10 таблиц, библиографического списка литературы из 130 наименований, двух приложений;

- автореферат диссертации объемом 19 страниц машинописного текста с общей характеристикой работы, кратким изложением основного содержания и результатов исследования.

Актуальность темы диссертации

Электротехнические комплексы электропривода скважинных насосов участка первого подъема систем водоснабжения с накапливающим резервуаром обеспечивают работу насосов, подающих воду для систем питьевого и хозяйственного водоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий.

Как правило, эффективность работы электрооборудования, насосов и трубопроводной системы первого подъема определяют по критерию минимума потребления электроэнергии и эксплуатационных затрат.

На эксплуатационные затраты, кроме стоимости электроэнергии, оказывает влияние точность поддержания требуемого уровня в накапливающем резервуаре и условия эксплуатации.

Требования к комплексам первого подъема отличаются для различных климатических зон. Сложные условия эксплуатации присутствуют в климатических районах с низкими средними температурами, такими, как Дальневосточный федеральный округ, Сибирский федеральный округ, север Тюменской области. Низкие температуры воздуха в зимний период определяют необходимость предусматривать технические меры по предотвращению замерзания воды в трубопроводе.

Поэтому исследование Палкина Г. А. по изучению влияния сложных природных условий эксплуатации, разработке законов и алгоритмов управления

электротехническим комплексом электроприводов погружных насосов с преобразователями частоты со скалярным управлением в составе технологического комплекса участка первого подъема, повышающие экономическую эффективность и безаварийность процесса водоснабжения, является актуальным.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

1. Классификация способов регулирования производительности водопроводной насосной станции по исходной воде обоснована наличием двух вариантов воздействия на положение рабочей точки на напорно-расходной характеристике системы водоснабжения, и, следовательно, производительности насосной станции: изменением характеристик гидравлической части – насосов и трубопроводов, и изменением частоты вращения ротора приводного электродвигателя насоса, а также зависимостью производительности насосной станции от закона регулирования частоты вращения приводного электродвигателя.

Классификация методов защиты трубопроводов от замерзания обоснована зависимостью температуры воды в трубопроводе от скорости течения, начальной температуры при выходе из насосной станции, качества теплоизоляции водовода.

2. Способ управления производительностью насосного агрегата по каналам «производительность – уровень воды в резервуаре» и «производительность – температуры воды», путем регулирования частоты вращения электродвигателя привода насоса с помощью двухканального пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора обоснован теоретическими и практическими результатами известных работ в области систем управления с переменной структурой, результатами компьютерного моделирования и результатами экспериментов на физической модели водопроводной насосной станции с одним насосным агрегатом и водопроводной сетью, выполненных автором. Способ защищен патентом РФ на изобретение RU2593649C1 от 10.08.2016 на регулирование уровня жидкости в ёмкости-сборнике.

3. Достоверность имитационной компьютерной модели системы управления, электротехнического и технологического комплексов водопроводной насосной станции первого подъема, реализованная в форме взаимосвязанных алгоритмических блоков среды блочно-функционального моделирования Simulink математического пакета Matlab, обоснована оценкой погрешности результатов имитационного моделирования и результатов экспериментов на физической модели водопроводной насосной станции с одним насосным агрегатом и водопроводной сетью. Средняя погрешность результатов моделирования и

экспериментальных результатов для 7 точек в диапазоне частоты напряжения статора электродвигателя 20...50 Гц с шагом 5 Гц не превышает, при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, для показателей: потребляемая активная электрическая мощность – 1,25%, производительность насоса – 2,35%, температура воды в конце трубопровода – 1,71%, напор – 3,46%.

Эффективность способа управления обоснована сравнением прямых показателей качества управления производительностью насоса по каналам «уровень воды в резервуаре», и «температура воды в трубопроводе» с последующим выбором максимального управляющего воздействия и вычислением оптимальной величины подачи, которая поддерживается отдельным регулятором частоты вращения электродвигателя, для различных структур – П, ПИ, ПД, ПИД, для каждого из трех регуляторов.

Выбор наилучшей структуры и параметров каждого регулятора по каждому каналу осуществлен путем сравнения показателей качества регулирования выходной переменной по каждому каналу по критерию минимума перерегулирования первого максимума, времени затухания, периоду колебаний. После оценки показателей качества каждого вида регулятора произведен выбор регулятора, обеспечивающего наилучшие показатели качества регулирования, что подтверждает эффективность способа управления.

4. Оптимальность решения задачи выбора способов и параметров защиты трубопровода от замерзания по критерию минимума суммы капитальных и эксплуатационных затрат как функции объемного расхода воды, толщины, теплопроводности и стоимости теплоизоляции, начальной температуры воды, с учетом накладываемых ограничений на минимальную температуру в конце водовода и минимальную производительность насоса, обоснована учетом в алгоритме решения различных комбинаций и сочетаний способов защиты от замерзания: поддержание избыточной подачи, подогрев, использование пассивной теплоизоляции. Алгоритм оптимизации основан на полном переборе вариантов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений подтверждается:

принятой (неявно) системой допущений, корректным применением известных уравнений термодинамики и математической физики и результатов их аналитического решения, численных методов решения дифференциальных и нелинейных уравнений, классических методов теории автоматического управления, апробированных математических моделей управляющей и силовой части преобразователей частоты со скалярным управлением, асинхронных

электродвигателей с короткозамкнутым ротором в различных системах координат и по различным каналам;

удовлетворительной сходимостью результатов исследования режимов регулирования производительности насосного агрегата по различным каналам с использованием моделей, реализованных в математическом пакете *Matlab*, и экспериментальных данных, полученных на испытательном стенде водопроводной насосной станции – средняя погрешность для четырех переменных находится в пределах 1,25...3,46%;

метрологическим обеспечением и точностью измерительной аппаратуры для получения и обработки результатов экспериментальных исследований.

Новизна исследований и полученных результатов

В результате анализа научной новизны положений диссертационной работы можно сделать следующие выводы.

1. Классификация способов регулирования производительности электротехнического комплекса участка первого подъема, как следует из текста работы, предложена на основе «изучения и систематизации существующей информации в области разработки различных методик и технических средств управления системами водоснабжения». Определены признаки классификации способов: по типу регулятора, по типу воздействия. Однако, в связи с тем, что в обзоре известных литературных источников не представлены сведения о существующей классификации способов регулирования производительности, не представляется возможным сделать заключение о научной новизне данного положения. Также имеются замечания к выбору признаков классификации устройства управления и закона управления.

В диссертации указано, что при составлении классификации «выявлено, что наиболее перспективным методом регулирования производительности является частотное управление электродвигателем насоса по контуру обратной связи». Данный научный результат хорошо известен и не является новым.

Классификация способов защиты трубопроводов от замерзания также предложена автором без анализа существующих вариантов данной классификации, что не позволяет оценить научную значимость классификации.

В то же время, если классификации способов регулирования производительности участка первого подъема и способов защиты трубопроводов от замерзания предложены автором впервые, их необходимо признать имеющими научную новизну.

Научную новизну имеет положение о том, что «для защиты трубопровода первого подъема от замерзания целесообразно применять циркуляцию воды, предварительный электроподогрев и пассивную теплоизоляцию».

2. Способ управления производительностью насосного агрегата по каналам «производительность – уровень воды в резервуаре» и «производительность – температуры воды», путем регулирования частоты вращения электродвигателя привода насоса с помощью двухканального пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора, реализованный по принципу управления систем с переменной структурой, обладает научной новизной, что подтверждено патентом РФ на изобретение RU2593649C1 от 10.08.2016 на способ регулирования уровня жидкости в ёмкости-сборнике.

3. Научной новизной обладает постановка и алгоритм решения задачи выбора оптимальных способов и параметров защиты трубопровода от замерзания по критерию минимума суммы капитальных и эксплуатационных затрат как функции объемного расхода воды, толщины, теплопроводности и стоимости теплоизоляции, начальной температуры воды, с учетом накладываемых ограничений на минимальную температуру в конце водовода и минимальную производительность насоса.

Значимость для науки и практики результатов диссертационного исследования

Научная и практическая значимость работы состоит в разработке математических, структурных, алгоритмических и программных решений по проектированию систем управления, электротехнических и технологических комплексов первого подъема для эффективной, по критериям повышения точности регулирования технологических выходных координат комплекса первого подъема изменением частоты вращения электродвигателя насоса, уменьшения капитальных и эксплуатационных затрат, эксплуатации таких комплексов в сложных природных условиях.

Имеют научную значимость результаты оценки достоверности математической модели регулирования производительности насосного агрегата по различным каналам по экспериментальным данным, полученным на испытательном стенде водопроводной насосной станции. Результаты показали высокую степень достоверности модели.

Отдельно в качестве значимого научного и практического результата следует выделить имитационную компьютерную модель системы управления, электротехнического и технологического комплекса участка первого подъема на

основе функциональных блоков математического программного пакета *Simulink* – *Matlab*.

Результаты работы следует использовать в организациях и на предприятиях, занимающихся проектированием и эксплуатацией систем управления, электротехнических и технологических комплексов первого подъема с погружными насосами, водоводом и накопительным резервуаром в сложных условиях эксплуатации при низких температурах.

Апробация результатов диссертационного исследования

Согласно представленным в автореферате сведениям, основные научные положения диссертации опубликованы в печатных работах, которые включают две статьи в двух журналах из перечня рекомендованных ВАК для публикации результатов научных исследований по специальности 05.09.03, три статьи в журналах из перечня рекомендованных ВАК для публикации результатов научных исследований, одну статью в журнале квартиля Q2, входящем в систему цитирования Scopus и Web of Science, два доклада на международных конференциях в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus и Web of Science, два патента РФ на изобретение, два свидетельства о регистрации программы ЭВМ, одно учебное пособие.

Содержание диссертации и её соответствие паспорту научной специальности

Диссертация написана с использованием общепринятой научной и технической терминологии. Изложенный материал представлен последовательно и аргументировано. Оформление диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к научным квалификационным работам.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 *Электротехнические комплексы и системы* в части физического, математического, имитационного и компьютерного моделирования компонентов электротехнических комплексов и систем (первая область исследования); обоснования совокупности технологических и экономических критериев оценки принимаемых решений в области проектирования и эксплуатации электротехнических комплексов и систем (вторая область исследования); структурного и параметрического синтеза электротехнических комплексов и систем, и разработки алгоритмов эффективного управления (третья область исследования).

Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы

1. При составлении классификации способов регулирования производительности электротехнического комплекса участка первого подъема автором предложены следующие признаки: по типу регулятора, по типу воздействия. Согласно классическому определению [Теория управления. Терминология. Вып. 107. М.: Наука, 1988], регулятором является «управляющее устройство, осуществляющее автоматическое управление посредством аппаратурной реализации алгоритмов управления». Согласно определению, регуляторы следует классифицировать по способу аппаратурной реализации алгоритмов управления. Поэтому для полного описания способов регулирования производительности следовало включить признак классификации – закон управления, определяющий название «вида, принципа или закона управления».

2. Так как в диссертации автор использует полученную ранее модель тепловых процессов, предложенную Л. Д. Тереховым, необходимо было привести данные о погрешности модели, имеющиеся в первоисточнике. В зависимости от наличия или отсутствия данных о погрешности предложенного Л. Д. Тереховым уравнения, необходимо по-разному оценивать представленные в диссертации результаты эксперимента: или как подтверждение ранее полученных Л. Д. Тереховым данных о погрешности уравнения, или как новые научные результаты по оценке погрешности известной модели тепловых процессов в водоводе.

3. На с. 40 сказано: «...диссипативная теплота трения, вычисляемая по формуле (1.12)». Однако формула (1.12) в работе отсутствует. В то же время, уравнение для определения диссипативной теплоты трения является важным для оценки адекватности использованной автором модели тепловой энергии воды в трубопроводе. Вероятно, автор имел в виду уравнение (1.9).

4. Следует пояснить, как учтено в модели водовода изменение расчетных соотношений для вычисления диссипативной теплоты трения для разных типов труб и скоростей движения воды, представленное системой уравнений (4.16). При этом ни одно из уравнений системы (4.16) не соответствует уравнению (1.9). Какому материалу труб соответствует уравнение (1.9), использованное при построении модели и почему данное уравнение не учтено в системе (4.16)?

5. Автор указывает (с. 54), что «...формула (1.8) не учитывает транспортную задержку изменения температуры при возмущениях подачи и других внешних условий». В выражение (1.8) не входит транспортное запаздывание, так как процесс переноса тепла описывается дифференциальным уравнением в частных производных без транспортного запаздывания. При этом решение уравнения описывает апериодический процесс. Аналогично дифференциальное уравнение

(2.10), в отличие от утверждения автора, не содержит транспортного запаздывания. Следует вспомнить, что уравнение звена запаздывания не является дифференциальным и относится к классу особых уравнений со смещенным (запаздывающим) аргументом.

6. В подразделе «2.2 Математическая модель электротехнического комплекса участка» автор подробно описывает итерационный процесс вычисления приращения задающего воздействия по частоте статора с учетом особенностей аналитического выражения, определяющего решение дифференциального уравнения для расчета конечной температуры воды (2.10). Сказано, что в работе вычисление температуры выполнено при условии, что в течение переходного процесса значения переменных параметров не изменяются, и соответствуют началу переходного процесса. При этом «момент изменения внешних параметров расценивается как начало нового переходного процесса и перезапуск расчетов».

Однако при этом в качестве начальных условий используются результаты, полученные на предыдущем шаге вычислений. Зачем дано в диссертации такое сложное описание для классической итерационной схемы решения нелинейных дифференциальных уравнений?

7. Учитывая сложность вычислительной задачи, следовало сделать обзор численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

8. Уравнение (2.1) вычисления приращения задающего воздействия по частоте статора соответствует уравнению экстраполятора (фиксатора) нулевого порядка. Более точные результаты восстановления непрерывного сигнала по дискретным значениям дает использование уравнения экстраполятора первого порядка. Следовало в обзоре современного состояния проблемы исследования сделать критический анализ методов восстановления сигналов.

9. В скалярной системе управления принято корректировать задание на частоту поля статора, вычисляемое на основе сигнала ошибки частоты вращения ротора, на величину, пропорциональную скольжению. Каким образом в системе управления электроприводом насосного агрегата учтено скольжение асинхронного электродвигателя?

10. Автор в работе смешивает и неправильно использует понятия «переменная» и «параметр». Например, на с. 50 указано «Исходным параметром, определяющим результаты вычисления всех последующих блоков модели, является управляющее воздействие f_w ». Управляющее воздействие является переменной величиной, зависящей от времени, а не параметром, как, например, номинальная частота вращения электродвигателя.

Аналогично, в тексте на с. 49: «Потребляемая мощность P и объем перелива Q_3 являются дополнительными выходными параметрами», что неверно – вместо термина «параметры» следовало применить – «переменные».

Данное несоответствие в определениях свойств физических величин существенно затрудняет понимание текста.

11. При проведении экспериментов на стенде следовало вместо трехфазного счетчика активной и реактивной электрической энергии использовать анализатор спектра ввиду существенно нелинейного характера питающего напряжения при питании электродвигателя от преобразователя частоты, и связанного с этим ухудшения метрологических характеристик счетчика.

12. Учитывая наличие прямой аналогии между процессами в электрических цепях и гидравлических сетях, а также возможность описания процессов нагрева в форме передаточных функций, следовало рассмотреть возможность аналитического параметрического синтеза параметров ПИД-регуляторов по параллельным каналам регулирования уровня воды в резервуаре и температуры воды в конце трубопровода, и сравнить результаты. При таком подходе диссипативную теплоту трения, определяемую по формуле (1.9), можно учесть параллельным каналом по подаче насоса (скорости течения жидкости при постоянном сечении) аналогично тому, как учитывают диссипативные силы в классической алгоритмической схеме двухмассовой механической системы.

13. На с. 80 автор указывает, что «процесс наполнения резервуара является инерционным» при «работе насоса на максимальной производительности». Так как график выходной переменной инерционного звена – экспонента, правильным является определение – «процесс наполнения резервуара подчиняется интегральному закону».

14. На схеме лабораторного стенда (рис. 2.14) не показан электродвигатель привода насоса, получающий питание от преобразователя частоты.

15. Время нарастания задающего воздействия на выходе задатчика интенсивности на с. 50 названо «задержкой», что неверно.

16. В приложениях не представлены акт от 23.10.2017 № 225 о внедрении результатов работы на предприятии ООО «Гарант» (в настоящее время АО «Забайкальская топливно-энергетическая компания»), и справка о внедрении результатов работы в учебный процесс Забайкальского государственного университета (с. 10 диссертации). Акты должны быть представлены при защите диссертации.

17. Редакционные замечания.

- а) В научном тексте не принято на функциональной схеме использовать нотацию, применяемую в программном коде. Так, вместо обозначения задающего воздействия $SetQ$ на рис. 2.1 следовало применить обозначение $Q_{зад}$ или аналогичное.
- б) На алгоритмических структурных и функциональных схемах вход отрицательной обратной связи сумматора обозначается символом '(-)' у соответствующего сигнала, а не сплошной заливкой сектора (рис. 2.1).
- с) Вместо «переходной процесс» (с. 51), правильно писать «переходный процесс».
- д) Имеется ряд неудачных выражений: «номинальных значений электропитания», «формула не учитывает сопротивление моменту нагрузки», «частотного регулирования электропривода основного насоса».

Соответствие диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

В соответствии с п. 9 диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические решения в области разработки законов и алгоритмов эффективного управления асинхронным электродвигателем при работе в комплексе с преобразователем частоты со скалярным управлением в составе насосной станции первого подъема с учетом сложных условий эксплуатации, имеющие существенное значение для экономики отрасли.

В соответствии с п. 10 диссертационная работа содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты. Полученные результаты подтверждены актами об использовании результатов научных исследований и разработок на производстве и в учебном процессе.

В соответствии с пп. 11–13 основные научные результаты опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Количество научных трудов соответствует требованиям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В соответствии с п. 14 диссертационная работа содержит ссылки на источники заимствования материалов и на работы других авторов.

Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации.

Структура и оформление диссертации и автореферата диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11–2011.

Заключение

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические решения в области разработки законов и алгоритмов эффективного управления асинхронным электродвигателем при работе в комплексе с преобразователем частоты со скалярным управлением в составе насосной станции первого подъема с учетом сложных условий эксплуатации, имеющие существенное значение для экономики отрасли.

По содержанию и по форме работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. от 01.10.2018 г.), а ее автор, Палкин Георгий Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент, д-р техн. наук (05.09.03),
ст. научн. сотр. (электрооборудование (промышленность)),
профессор кафедры электрификации горных предприятий
ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
Карякин Александр Ливиевич

10 июня 2022 г.

Полное наименование организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет»

Юридический адрес:

620144, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, д. 30

Тел.: +7 (343) 251-48-38

E-mail: office@ursmu.ru

Подпись Карякина Александра Ливиевича заверяю.

Начальник отдела кадров

Т. Б. Сабанова

