

УДК 631.371:621.313:004.896

Краткое сообщение



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-409-08-175-180

А.Н. Цветков

Казанский государственный
энергетический университет,
Казань, Россия

✉ tsvetkov9@mail.ru

Поступила в редакцию: 09.04.2026

Одобрена после рецензирования: 17.07.2026

Принята к публикации: 01.08.2026

© Цветков А.Н.

Адаптивные алгоритмы управления электроприводами насосных установок оросительных систем в условиях цифровизации агропромышленного комплекса: стендовые исследования и производственная верификация

РЕЗЮМЕ

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования адаптивных алгоритмов управления электроприводами насосных установок оросительных систем, основанных на анализе ваттметрограммы — зависимости потребляемой электроприводом активной мощности от времени. Алгоритм предусматривает автоматическое формирование эталона нагрузки при пуске (предварительный эталон — через 30 минут, окончательный — через 60 минут после стабилизации режима), допусковой контроль «меньше — норма — больше» относительно эталона и мажоритарную логику принятия решений «два из трех», исключающую ложные срабатывания защиты. Исследование выполнено на специализированном испытательном стенде Казанского государственного энергетического университета с системой нагружения на основе асинхронного электродвигателя с прямым управлением моментом (DTC) и цифровым ПИД-регулятором момента (перерегулирование не более 10%, время регулирования 0,1 с); нагрузочные профили сформированы по ваттметрограммам действующей насосной станции капельного орошения. В 140 стендовых опытах воспроизводились нормальный режим, засорение фильтров и капельных линий, сухой ход и кавитация; вероятность правильной идентификации режимов составила 96,4%, среднее время обнаружения сухого хода — 14 ± 3 с, кавитации — 85 ± 12 с. Производственная верификация на насосной станции сельскохозяйственного предприятия Республики Татарстан (оросительный сезон 2025 г., наработка 720 ч) подтвердила корректность стендовой настройки без перенастройки алгоритмов: своевременно идентифицированы шесть эпизодов прогрессирующего засорения и два эпизода сухого хода, отфильтрованы три ложных возмущения. Зафиксированное за сезон снижение удельного энергопотребления станции на 11,3% относится к переходу от дроссельного регулирования подачи к частотному в целом и представляет расчетную оценку, справедливую при сохранении гидравлических условий водоподдачи; вклад адаптивных алгоритмов в этот результат отдельно не выделялся. Показана возможность интеграции алгоритмов в цифровую платформу предприятия по протоколам Modbus TCP и MQTT в качестве элемента цифровизации агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: цифровизация агропромышленного комплекса, адаптивное управление, электропривод, насосная установка, орошение, ваттметрограмма, испытательный стенд, преобразователь частоты, цифровой регулятор, диагностика осложненных режимов

Для цитирования: Цветков А.Н. Адаптивные алгоритмы управления электроприводами насосных установок оросительных систем в условиях цифровизации агропромышленного комплекса: стендовые исследования и производственная верификация. *Аграрная наука*. 2026; 409(08): 175–180. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-409-08-175-180>

Short communications



DOI: 10.32634/0869-8155-2026-409-08-175-180

Alexei N. Tsvetkov

Kazan State Power Engineering
University, Kazan, Russia

✉ tsvetkov9@mail.ru

Received by the editorial office: 09.04.2026

Accepted in revised: 17.07.2026

Accepted for publication: 01.08.2026

© Tsvetkov A.N.

Adaptive control algorithms for electric drives of irrigation pumping units in the context of agricultural digitalization: bench studies and on-farm verification

ABSTRACT

The article presents the development and experimental study of adaptive control algorithms for electric drives of irrigation pumping units based on the analysis of the wattmeter diagram, i.e. the time dependence of the active power consumed by the electric drive. The algorithm provides automatic formation of a load reference at start-up (a preliminary reference after 30 minutes and a final one after 60 minutes of steady operation), tolerance control of the “less — normal — more” type relative to the reference, and a “two out of three” majority voting logic that excludes false trips. The study was carried out on a specialized test bench of Kazan State Power Engineering University with a loading system based on an induction motor with direct torque control (DTC) and a digital PID torque controller (overshoot below 10%, settling time 0.1 s); the loading profiles were formed from wattmeter diagrams recorded at an operating drip irrigation pumping station. In 140 bench experiments, the normal mode, clogging of filters and drip lines, dry running and cavitation were reproduced; the probability of correct mode identification amounted to 96.4%, the mean detection time was 14 ± 3 s for dry running and 85 ± 12 s for cavitation. On-farm verification at the pumping station of an agricultural enterprise of the Republic of Tatarstan (2025 irrigation season, 720 h of operation) confirmed the correctness of the bench tuning without readjustment of the algorithms: six episodes of progressive clogging and two episodes of dry running were identified in a timely manner and three false disturbances were filtered out. The reduction in the specific energy consumption of the station by 11.3% recorded over the season refers to the transition from throttling to frequency control of water supply as a whole and represents a calculated estimate valid provided that the hydraulic conditions of water supply are preserved; the contribution of the adaptive algorithms to this result was not evaluated separately. The possibility of integrating the algorithms into the digital platform of the enterprise via Modbus TCP and MQTT protocols as an element of agricultural digitalization is shown.

Key words: digitalization of agriculture, adaptive control, electric drive, pumping unit, irrigation, wattmeter diagram, test bench, frequency converter, digital controller, fault diagnostics

For citation: Tsvetkov A.N. Adaptive control algorithms for electric drives of irrigation pumping units in the context of agricultural digitalization: bench studies and on-farm verification. *Agarian science*. 2026; 409(08): 175–180 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-409-08-175-180>

Введение/Introduction

Растениеводство опирается на непрерывные потоки производственных данных: показания датчиков влажности почвы, измерения локальных метеостанций, материалы дистанционного зондирования, телематику техники [1, 2]. Исполнительным звеном цифрового контура в инженерной инфраструктуре агропромышленного комплекса служит электропривод насосной станции, вентиляционной установки, технологической линии.

В растениеводстве орошение остается самым энергоемким процессом, основная доля затрат приходится на насосные станции. Умное орошение, при котором расход воды планируется по влажности почвы и прогнозу водопотребления культур, требует управляемости насосного оборудования [3, 4]. Преобразователь частоты позволяет отказаться от дроссельного регулирования; публикуемые оценки экономии электроэнергии при таком переходе составляют 30–40% [4, 5]. Точность поддержания подачи влияет на водосбережение и урожайность [6].

Взвеси и водоросли засоряют сетчатые и дисковые фильтры, затем капельные линии: гидравлическое сопротивление сети растёт, рабочая точка насоса смещается относительно номинальной. При пиковом водоотборе уровень в источнике падает, начинается сухой ход, первым отказывает торцевое уплотнение. Недостаточный подпор на всасывании вызывает кавитацию, разрушающую рабочие колеса. Штатные средства защиты (реле давления, поплавковые и электродные датчики уровня) требуют монтажа и обслуживания отдельного первичного преобразователя и срабатывают уже после развития аварии.

Состояние агрегата диагностируется по электрическим параметрам привода, току и активной мощности, без выхода за пределы шкафа управления [7, 8]. Интегральный диагностический признак — ваттметрограмма, зависимость потребляемой активной мощности от времени. На электроприводах станков-качалок адаптивное управление по ваттметрограмме применяется для диагностики эмульсеобразования и предотвращения аварийных остановок [9, 10].

Воспроизведение сухого хода и кавитации на работающей станции в вегетационный период недопустимо из-за риска для оборудования и графика полива, а многократное повторение этих режимов на действующем объекте невозможно. Настройку алгоритмов выполняют на специализированных испытательных стендах, где записанные на объекте режимы воспроизводятся с требуемым числом повторностей [11, 12].

Цель данной работы — разработка адаптивных алгоритмов идентификации осложненных режимов насосной установки оросительной системы по ваттметрограмме, без дополнительных датчиков, их настройка на испытательном стенде и проверка в производственных условиях с интеграцией в цифровую платформу предприятия.

Материал и методы исследования / Material and methods

Исследование выполнено в два этапа. Стендовый этап проведен в Казанском государственном энергетическом университете, производственный — на насосной станции капельного орошения сельскохозяйственного предприятия Республики Татарстан с июня по сентябрь 2025 г.

Объектом послужил электропривод центробежной насосной установки системы капельного орошения: асинхронный двигатель номинальной мощностью 15 кВт, преобразователь частоты, станция управления со встроенными в контроллер адаптивными алгоритмами. Диагностическим параметром принята ваттметрограмма, формируемая штатным ваттметрографом станции управления. Измеряли ток и напряжение в цепи питания. Достаточно измерения по одной фазе: привод создает симметричную нагрузку. Потребляемая активная мощность связана с моментом на валу и частотой вращения через КПД двигателя, поэтому изменение механической нагрузки отражается в ваттметрограмме.

Анализировали среднюю огибающую ваттметрограммы при окне усреднения 10 с, среднеквадратическое отклонение (СКО) огибающей и низкочастотную часть спектра в полосе 2–8 Гц. Засорение фильтров и капельных линий смещает рабочую точку в сторону меньшей подачи, средняя мощность плавно снижается (для центробежных насосов с лопатками, загнутыми назад). Сухой ход сопровождается падением мощности на 35–40% за 10–20 с. Кавитация проявляется колебаниями мощности 2–8 Гц при росте СКО огибающей в 3–4 раза [7, 8]. Механическое повреждение и заклинивание повышают мощность сверх эталонной.

Единые пороговые уставки для разных объектов неприменимы: оросительные системы различаются протяжённостью и конфигурацией трубопроводов, статическим напором, водоисточником и качеством воды. Эталон нагрузки формируется индивидуально для каждой установки при пуске в технически исправном состоянии: фильтры промыты, всасывающая линия заполнена, приток воды подтверждён. Схема апробирована на электроприводах станков-качалок [9].

При пуске и стабилизации отклонения средней огибающей не выходят за $\pm 3\sigma$. Предварительный эталон фиксируется через 30 мин, окончательный — через 60 мин при стабилизировавшейся подаче. Далее выполняется периодический контроль с интервалом 60 с, и для каждого окна усреднения вычисляется коэффициент режима КР по формуле (1):

$$K_p(t) = W_{\text{ТЕК}}(t)/W_{\text{ЭТАЛ}} \quad (1)$$

где: $W_{\text{ТЕК}}(t)$ — текущее значение средней огибающей ваттметрограммы; $W_{\text{ЭТАЛ}}$ — эталонное значение, зафиксированное при пуске.

Текущая ваттметрограмма сопоставляется с эталонной по схеме допускового контроля «меньше — норма — больше». Режим считается нормальным при доле частных решений «норма» не ниже 90%. Иначе применяется мажоритарная логика «два из трех» по трем последним измерениям с доводкой до «три из трех»; так отфильтровываются просадка напряжения сети, переключение задвижки, прохождение воздушной пробки. Реакция дифференцирована по виду осложнения. Устойчивое снижение КР до 0,85 с трендом 0,8–1,2 %/ч формирует сигнал о промывке фильтров. При КР ниже 0,65 и скорости снижения свыше 2 %/с фиксируется сухой ход: привод останавливается и автоматически перезапускается после восстановления притока. Рост СКО огибающей втрое и более с составляющими 2–8 Гц идентифицируется как кавитация, частота вращения снижается на 20% на 30 мин, затем ступенчато возвращается к заданию [9, 10].

Настройку выполняли на испытательном стенде, созданном для исследования электроприводов возвратно-поступательного и вращательного действия [10–12]. Управляющий сигнал формируется персональным компьютером в цифровом виде, цифро-аналоговый преобразователь преобразует его в унифицированный токовый сигнал 4–20 мА, который поступает на преобразователь частоты нагрузочного асинхронного двигателя. Нагрузочный двигатель работает в режиме прямого управления моментом (DTC) и жестко соединен с валом испытуемого привода через датчик момента. Переход на DTC вместо противовключения исключил перегрев нагрузочной машины и повысил быстродействие системы нагружения [12]. В контур введен цифровой ПИД-регулятор момента с передаточной функцией (2):

$$W(s) = K_p + K_i/s + K_d \cdot s \quad (2)$$

Дискретная реализация получена билинейным преобразованием и записана разностными уравнениями в программном обеспечении аппаратно-программного комплекса стенда [11]. С регулятором перерегулирование системы нагружения не превышало 10%, время регулирования составило 0,1 с, приборная погрешность скомпенсирована.

Нагрузочные профили сформированы по ваттметрограммам действующей насосной станции капельного орошения сельскохозяйственного предприятия Республики Татарстан — два агрегата по 15 кВт, оросительный сезон 2025 г. Тренды засорения масштабировали по гидравлической модели сети и журналу эксплуатации станции. Воспроизводили четыре группы режимов (таблица 1), каждую по 35 повторностей при установившемся тепловом состоянии двигателя, всего 140 опытов.

Вероятность идентификации принимали равной доле правильных решений в серии из 35 опытов. Время обнаружения представляли выборочным средним $\pm$ выборочное стандартное отклонение по тем же 35 повторностям, отдельно фиксировали число ложных срабатываний. При таком объеме выборки полуширина 95%-го доверительного интервала для среднего времени обнаружения не превышает 1 с для сухого хода, 4 с для кавитации и 0,2 ч для засорения.

Производственную проверку выполнили на той же станции в оросительный сезон 2025 г., суммарная наработка 720 ч. В станцию управления загрузили версию программного обеспечения с настроенными на стенде алгоритмами. Под объектами не перенастраивали. Идентифицированные эпизоды сопоставляли с перепадом давления на фильтрах, уровнем воды в водозаборе и записями журнала эксплуатации.

Базой сравнения по удельному энергопотреблению (кВт·ч на кубометр поданной воды) служил оросительный сезон 2024 г., когда та же станция работала на нерегулируемом приводе, а подачу регулировали дросселированием напорной задвижки. Значение за 2024 г. принято по журналу учета станции: электроэнергия по счётчику, объем воды по расходомеру. Сопоставление основано на допущении о сравнимости гидравлических условий двух сезонов (объем водоподачи, статический напор, качество воды); независимой проверки по данным станции не выполняли, поэтому сравнение носит оценочный характер. Обмен с сервером предприятия выполнялся по Modbus TCP, телеметрия публиковалась в MQTT-брокер и накапливалась в базе данных временных рядов.

Таблица 1. Режимы работы насосной установки, воспроизводимые на испытательном стенде

Table 1. Operating modes of the pumping unit reproduced on the test bench

Режим	Источник данных нагрузочного профиля	Характерное проявление в ваттметрограмме	Число опытов
Нормальный режим	Ваттметрограммы действующей насосной станции (оросительный сезон 2025 г.)	Стабильная средняя мощность 12,6 $\pm$ 0,3 кВт	35
Засорение фильтров и капельных линий	Журнал эксплуатации станции, гидравлическая модель сети	Плавное снижение средней мощности со скоростью 0,8–1,2 %/ч	35
Сухой ход	Зарегистрированный эпизод падения уровня воды в водозаборе	Падение мощности на 35–40% за 10–20 с	35
Кавитация	Полевые записи при дросселировании всасывающей линии	Колебания мощности с частотами 2–8 Гц, рост СКО огибающей в 3–4 раза	35
Итого	—	—	140

Примечание. Ваттметрограммы нормального режима и осложненных режимов записаны штатным ваттметрографом станции управления без установки дополнительных датчиков. Источник: данные эксперимента.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Цифровой ПИД-регулятор момента воспроизводил записанные на объекте ваттметрограммы с относительной погрешностью по СКО не более 2,5%. Без корректирующего контура перерегулирование при ступенчатом изменении нагрузки достигало 30–35% при времени реакции около 0,5 с, с включённым контуром — не более 10% при времени регулирования 0,1 с.

Нормальный режим (частота питания 50 Гц) воспроизводился при средней потребляемой мощности $12,6 \pm 0,3$ кВт и СКО огибающей 0,14 кВт. Предварительный эталон сформирован через 30 мин после пуска и уточнён через 60 мин, после стабилизации сигнала. Дальнейший контроль выполнялся по КР с окном усреднения 10 с и интервалом 60 с [9, 10].

Результаты идентификации сведены в таблице 2. Из 140 стендовых опытов правильные решения приняты в 135 (96,4%). Падение мощности на 35–40% за 10–20 с алгоритм идентифицировал во всех 35 опытах сухого хода, в среднем за 14 ± 3 с. Засорение, воспроизведённое трендом 0,8–1,2 %/ч, выявлено в 34 опытах из 35; устойчивое решение при тренде 1 %/ч формировалось за $4,2 \pm 0,6$ ч. Кавитация распознана в 32 опытах из 35 (91,4%). В трёх случаях колебания мощности маскировались переходными процессами при изменении задания подачи. Достоверность распознавания кавитации может быть повышена спектральной обработкой сигнала и классификаторами машинного обучения [4, 16].

За 720 ч наработки идентифицировано шесть эпизодов прогрессирующего засорения: сигнал о промывке формировался при снижении КР до 0,85 и подтверждался ростом перепада давления на фильтрах с 0,04 до 0,09 МПа. Два эпизода сухого хода, вызванные падением уровня в водозаборе при пиковом отборе, распознаны за 14 и 17 с; выполнены автоматический останов и перезапуск после восстановления притока. Три кратковременных возмущения (провалы напряжения сети, переключение задвижек при переходе между поливными участками) отфильтрованы мажоритарной логикой. Ложные остановки за сезон не зарегистрированы.

Удельное энергопотребление снизилось с 0,160 до 0,142 кВт·ч/м³, на 11,3% относительно

сезона 2024 г. В сезоне 2025 г. станция перешла от дроссельного регулирования подачи к частотному по графику полива с контролем КР. Разделить вклад смены способа регулирования и алгоритмического контроля по имеющимся данным невозможно; основная часть эффекта относится к отказу от дросселирования, экономия при котором оценивается в 30–40% [4, 5]. Раннее обнаружение засорения удерживает гидравлическое сопротивление сети ближе к расчетному и снижает удельный расход энергии; вынужденные снижения частоты вращения при идентификации кавитации и остановки при сухом ходе уменьшают объём поданной воды. Количественно ни один из эффектов не измерялся, сокращение объемов недополива за счёт раннего обнаружения засорения также не оценивалось [6].

Величина 11,3% получена расчетом и справедлива при сохранении гидравлических условий водоподачи (объем подачи, статический напор, качество воды); измеренным эффектом предложенной системы она не является. Оценка находится в нижней части опубликованного диапазона для регулируемых электроприводов насосных систем [4, 5]: частота вращения ограничивалась снизу требованием к минимальному давлению в капельной сети. Раздельная оценка требует синхронного опыта на двух агрегатах станции, один из которых работает под адаптивным управлением, второй под базовым частотным, при одном и том же графике полива. Такой эксперимент не проводился.

Значения времени обнаружения сухого хода на объекте (14 и 17 с) лежат в пределах стендового интервала 14 ± 3 с; динамика формирования эталона совпадает со стендовой. Адаптация к конкретной установке обеспечивается эталоном нагрузки, формируемым при пуске [9, 10].

Решение бездатчиковое и реализовано на уровне станции управления приводом (граничный, edge, уровень). В цифровую платформу передаются агрегированные диагностические признаки и события [13, 15, 16]. Накопленные ваттметрограммы вместе с данными о водоподаче служат исходными данными для цифрового двойника станции и прогностического обслуживания оборудования [14].

Работа выполнена на одном типе насосного оборудования (консольные центробежные насосы

Таблица 2. Результаты идентификации режимов адаптивным алгоритмом на испытательном стенде и при производственной верификации

Table 2. Results of mode identification by the adaptive algorithm on the test bench and during on-farm verification

Режим	Опыты на стенде	Правильные решения, %	Среднее время обнаружения	Эпизоды на объекте	Выявлено
Нормальный режим	35	97,1	—	—	—
Засорение фильтров и капельных линий	35	97,1	$4,2 \pm 0,6$ ч (при тренде 1 %/ч)	6	6
Сухой ход	35	100	14 ± 3 с	2	2
Кавитация	35	91,4	85 ± 12 с	—	—
Итого	140	96,4	—	8	8

Примечание. Для нормального режима указана доля опытов без ложных срабатываний защит; производственная верификация выполнена в течение оросительного сезона 2025 г. при суммарной наработке 720 ч. Источник: данные эксперимента.

с лопатками, загнутыми назад), на одной станции и за один оросительный сезон.

Перенос на погружные скважинные агрегаты потребует уточнения диагностических признаков.

Энергетическая часть выводов основана на межсезонном сравнении без нормировки по объёму подачи и напору, вклад алгоритмов в ней не выделен. Направления продолжения: проверка спектральных признаков ваттметрограммы классификаторами машинного обучения и синхронный опыт с отдельной оценкой энергетического эффекта, а также сопряжение адаптивного управления станцией с системами точного орошения, управляемыми по данным датчиков влажности почвы [3, 4].

Выводы/Conclusion

1. На испытательном стенде вероятность правильной идентификации осложнённых режимов насосной установки по ваттметрограмме составила 96,4%, сухой ход выявлялся за 14 с.

2. Эталон нагрузки формируется автоматически в первые 60 мин пуска, решения принимаются по мажоритарной логике. Ручная настройка

пороговых значений для конкретной оросительной системы не требуется.

3. Производственная верификация в течение оросительного сезона подтвердила корректность стендовых настроек; алгоритмы применимы как компонент системы управления электроприводом насосной станции и переносимы на однотипное оборудование.

4. Снижение удельного энергопотребления на 11,3% не может быть отнесено к адаптивным алгоритмам: величина получена сравнением двух сезонов с разными способами регулирования, сопоставимость гидравлических условий не контролировалась. Раздельная оценка энергетического вклада алгоритмов требует контролируемого эксперимента с синхронной работой двух идентичных агрегатов.

5. Достоверность распознавания кавитации 91,4% недостаточна для безусловного применения. Её повышение возможно методами машинного обучения. Дальнейшие исследования направлены на создание цифровых двойников насосных станций с интеграцией разработанных алгоритмов в платформы точного орошения.

Автор несет ответственность за работу и представленные данные.
Автор несет ответственность за плагиат.
Автор объявил об отсутствии конфликта интересов.

The author is responsible for the work and the submitted data.
The author is responsible for plagiarism.
The author declared no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счёт гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

FUNDING

The work was carried out with the support of a grant provided by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, scientific and other organizations for the support of human resources development plans, in the part related to encouraging their research and academic teaching staff to defend doctoral dissertations and to carry out research work.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mansoor S., Iqbal S., Popescu S.M., Kim S.L., Chung Y.S., Baek J.-H. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 16: 1587869. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
2. Soussi A., Zero E., Sacile R., Trincherio D., Fossa M. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*. 2024; 24(8): 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>
3. García L., Parra L., Jimenez J.M., Lloret J., Lorenz P. IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*. 2020; 20(4): 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
4. Nsoh B. et al. Internet of Things-Based Automated Solutions Utilizing Machine Learning for Smart and Real-Time Irrigation Management: A Review. *Sensors*. 2024; 24(23): 7480. <https://doi.org/10.3390/s24237480>
5. Cingöz T., Toylan H., Uğurlu A. Optimization of Variable Frequency Drive Used in Water Pumping Systems for Energy Efficiency. *Water*. 2026; 18(12): 1405. <https://doi.org/10.3390/w18121405>
6. Lakhiar I.A. et al. A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*. 2024; 14(7): 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
7. Liang C., Hao Y., Tengzhou X., Zhiguo L. Identification of cavitation state of centrifugal pump based on current signal. *Frontiers in Energy Research*. 2023; 11: 1204300. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1204300>
8. Luo Y., Zhixiang X., Sun H., Yuan S., Yuan J. Research on the induction motor current signature for centrifugal pump at cavitation condition. *Advances in Mechanical Engineering*. 2015; 7(11): 1687814015617134. <https://doi.org/10.1177/1687814015617134>
9. Tsvetkov A.N., Safin A.R., Ivshin I.V., Petrov T.I., Misbakhov R.Sh., Kornilov V.Yu. Adaptive Control System of the Pumping Unit. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(5S3): 289–291. <https://doi.org/10.35940/ijeat.E1064.0785S319>
10. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., Кувшинов Н.Е., Петров Т.И., Гибадуллин Р.Р. Разработка стенда для исследования электроприводов станков-качалок. *Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета*. 2020; 23(4): 364–375. EDN EAZOPH

REFERENCES

1. Mansoor S., Iqbal S., Popescu S.M., Kim S.L., Chung Y.S., Baek J.-H. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: trends, challenges and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 16: 1587869. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869>
2. Soussi A., Zero E., Sacile R., Trincherio D., Fossa M. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*. 2024; 24(8): 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>
3. García L., Parra L., Jimenez J.M., Lloret J., Lorenz P. IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors*. 2020; 20(4): 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
4. Nsoh B. et al. Internet of Things-Based Automated Solutions Utilizing Machine Learning for Smart and Real-Time Irrigation Management: A Review. *Sensors*. 2024; 24(23): 7480. <https://doi.org/10.3390/s24237480>
5. Cingöz T., Toylan H., Uğurlu A. Optimization of Variable Frequency Drive Used in Water Pumping Systems for Energy Efficiency. *Water*. 2026; 18(12): 1405. <https://doi.org/10.3390/w18121405>
6. Lakhiar I.A. et al. A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints. *Agriculture*. 2024; 14(7): 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
7. Liang C., Hao Y., Tengzhou X., Zhiguo L. Identification of cavitation state of centrifugal pump based on current signal. *Frontiers in Energy Research*. 2023; 11: 1204300. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1204300>
8. Luo Y., Zhixiang X., Sun H., Yuan S., Yuan J. Research on the induction motor current signature for centrifugal pump at cavitation condition. *Advances in Mechanical Engineering*. 2015; 7(11): 1687814015617134. <https://doi.org/10.1177/1687814015617134>
9. Tsvetkov A.N., Safin A.R., Ivshin I.V., Petrov T.I., Misbakhov R.Sh., Kornilov V.Yu. Adaptive Control System of the Pumping Unit. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 8(5S3): 289–291. <https://doi.org/10.35940/ijeat.E1064.0785S319>
10. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., Kuvshinov N.E., Petrov T.I., Gibadullin R.R. Development of a stand for researching electric drives of pumping units. *Vestnik of MSTU. Scientific Journal of Murmansk State Technical University*. 2020; 23(4): 364–375 (in Russian). EDN EAZOPH

11. Оськин С.П., Кузнецов А.В., Конева Н.Е. Функциональное моделирование и параметрическая оценка компонентов IoT-системы сбора данных для задач точного земледелия. *Аграрная наука*. 2026; (4): 137–143. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-137-143>

12. Омелченко Е.Я., Белый А.В., Енин С.С., Фомин Н.В. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей. *Электротехнические системы и комплексы*. 2018; (3): 12–19. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-12-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19)

13. Kalyani Y., Collier R. A Systematic Survey on the Role of Cloud, Fog, and Edge Computing Combination in Smart Agriculture. *Sensors*. 2021; 21(17): 5922. <https://doi.org/10.3390/s21175922>

14. Peladarinos N., Piromalis D., Cheimaras V., Tserepas E., Munteanu R.A., Papageorgas P. Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2023; 23(16): 7128. <https://doi.org/10.3390/s23167128>

15. Yu P., Teng F., Zhu W., Shen C., Chen Z., Song J. Cloud-edge-device collaborative computing in smart agriculture: architectures, applications, and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 16: 1668545. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1668545>

16. Sathupadi K., Achar S., Bhaskaran S.V., Faruqi N., Abdullah-Al-Wadud M., Uddin J. Edge-Cloud Synergy for AI-Enhanced Sensor Network Data: A Real-Time Predictive Maintenance Framework. *Sensors*. 2024; 24(24): 7918. <https://doi.org/10.3390/s24247918>

11. Oskin S.P., Kuznetsov A.V., Koneva N.E. Functional modeling and parametric evaluation of components of an IoT data collection system for precision agriculture. *Agrarian science*. 2026; (4): 137–143 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-405-04-137-143>

12. Omelchenko E.Ya., Belyi A.V., Enin S.S., Fomin N.V. Energy-Efficient Test Facility for Electric Motors. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018; (3): 12–19 (in Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-12-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19)

13. Kalyani Y., Collier R. A Systematic Survey on the Role of Cloud, Fog, and Edge Computing Combination in Smart Agriculture. *Sensors*. 2021; 21(17): 5922. <https://doi.org/10.3390/s21175922>

14. Peladarinos N., Piromalis D., Cheimaras V., Tserepas E., Munteanu R.A., Papageorgas P. Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2023; 23(16): 7128. <https://doi.org/10.3390/s23167128>

15. Yu P., Teng F., Zhu W., Shen C., Chen Z., Song J. Cloud-edge-device collaborative computing in smart agriculture: architectures, applications, and future perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2025; 16: 1668545. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1668545>

16. Sathupadi K., Achar S., Bhaskaran S.V., Faruqi N., Abdullah-Al-Wadud M., Uddin J. Edge-Cloud Synergy for AI-Enhanced Sensor Network Data: A Real-Time Predictive Maintenance Framework. *Sensors*. 2024; 24(24): 7918. <https://doi.org/10.3390/s24247918>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексей Николаевич Цветков

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Электроснабжение
промышленных предприятий»
tsvetkov9@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4795-8844>

Казанский государственный энергетический университет,
ул. Красносельская, 51, Казань, 420066, Россия

AUTHORS' INFORMATION

Alexei Nikolaevich Tsvetkov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Power
Supply of Industrial Enterprises
tsvetkov9@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-4795-8844>

Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya st., Kazan, 420066, Russia



Достойное вознаграждение за привлеченную рекламу от ИД «Аграрная наука»

Вы



- общительны и активны
- владеете связями в сфере АПК
- имеете время и желание
- хотите заработать

Мы гарантируем

- ☒ интересную работу по привлечению рекламы в проекты ИД
- ☒ свободный, удобный график
- ☒ официальное оформление
- ☒ щедрый % за принесенную вами рекламу

Звоните +7 (916) 616-05-31

Реклама