

===== АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ =====
И ПРОИЗВОДСТВАМИ

УДК 681.5.015.3

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-98-112

EDN: AIBXXO

**Адаптивное управление тиристорными
реверсивными электроприводами пивоваренных линий
на основе критерия интегральной устойчивости**

В. С. Артемьев

Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова
115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36

Аннотация. В работе рассматривается методика адаптивного управления тиристорными реверсивными электроприводами пивоваренных линий. Предложен интегрально-стойкостной критерий, позволяющий совместно минимизировать тепловые потери и поддерживать требуемый запас устойчивости системы. На основе апостериорного анализа токовой сигнатуры разработан алгоритм адаптивного ПИД-регулятора, реализованный в форме неявной разностной схемы с переменным шагом. Имитационные и натурные испытания подтвердили снижение энергопотребления на 9–10 %, уменьшение температуры коллектора и незапланированных простоев.

Целью исследования стало создание метода управления реверсивными электроприводами, обеспечивающего одновременное повышение энергоэффективности и эксплуатационной надежности в условиях высокочастотных реверсов и колебаний сети.

Методы. В качестве основы был применен интегральный функционал, объединяющий показатели тепловых потерь и устойчивости по функции Ляпунова. Настройка параметров регулятора осуществлялась с использованием статистических характеристик токовой сигнатуры двигателя. Численная реализация выполнена на неявной разностной схеме с адаптивным шагом дискретизации. Проверка эффективности проведена методом моделирования и в ходе натурных испытаний на оборудовании пивоваренных линий.

Результаты. Эксперименты показали снижение удельного энергопотребления на 8–10 %, уменьшение тепловой нагрузки и пиковых токов, а также стабилизацию запаса устойчивости на уровне не ниже 25 %. Температура коллектора снизилась на 11–13 °С, что увеличивает срок службы изоляции. Количество внеплановых остановов уменьшилось более чем в четыре раза по сравнению с традиционным управлением.

Выводы. Интегрально-стойкостной критерий доказал свою результативность, обеспечивая одновременно энергосбережение и повышение надежности электроприводов. Разработанный регулятор совместим с промышленными ПЛК и SCADA-системами, что упрощает внедрение. Экономическая эффективность подтверждается сроком окупаемости менее полутора лет, что делает метод перспективным для широкого применения в пивоваренной и смежных отраслях.

Ключевые слова: тиристорный электропривод, адаптивное управление, реверс возбуждения, пивоварение, прогностическая диагностика, интегральные тепловые потери

Поступила 09.06.2025, одобрена после рецензирования 25.08.2025, принята к публикации 25.09.2025

Для цитирования. Артемьев В. С. Адаптивное управление тиристорными реверсивными электроприводами пивоваренных линий на основе критерия интегральной устойчивости // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 98–112. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-98-112

Adaptive control of reversible thyristor electric drives in brewing lines based on integral stability criterion

V.S. Artemyev

Plekhanov Russian University of Economics
36 Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia

Abstract. The study presents a methodology for adaptive control of reversible thyristor electric drives in brewing lines. An integral-stability criterion is proposed, which simultaneously minimizes thermal losses and maintains the required system stability margin. Based on a posteriori analysis of the motor current signature, an adaptive PID controller was developed and implemented using an implicit difference scheme with a variable step. Simulation and full-scale tests confirmed a reduction in energy consumption by 9–10%, a decrease commutator temperature, and a more than fourfold reduction in unscheduled downtimes.

Aim. The study is to develop a control method for reversible electric drives that ensures both improved energy efficiency and operational reliability under high-frequency reversals and power supply fluctuations.

Methods. The proposed approach relies on an integral functional combining thermal loss minimization with stability assessment via the Lyapunov function. Controller parameters were adjusted using statistical characteristics of the motor current signature. The numerical implementation uses an implicit difference scheme involving an adaptive discretization algorithm. The effectiveness of the method was confirmed through simulation modeling and experimental testing on brewing equipment.

Results. The experiments demonstrate reducing specific energy consumption by 8–10%, reducing thermal stress and peak currents, and improving stability margin to at least 25%. The commutator temperature is reduced by 11–13 °C, extending insulation lifetime. The number of unscheduled shutdowns decreases more than fourfold compared with conventional PI control.

Conclusions. The integral-stability criterion has proven its effectiveness, enhancing simultaneously energy efficiency and reliability of electric drives. The developed controller is compatible with industrial PLCs and SCADA systems, which facilitates implementation. Economic evaluation confirms the feasibility of the approach, with a payback period of less than 1.5 years, making the method promising for widespread application in brewing and related industries. The economic evaluation confirms the feasibility of this method, with a payback period of less than 1.5 years, which makes the approach promising for large-scale application in the brewing and related industries.

Keywords: thyristor electric drive, adaptive control, field reversal, brewing, predictive diagnostics, integral heat losses

Submitted on 09.06.2025,

approved after reviewing on 25.08.2025,

accepted for publication on 25.09.2025

For citation. Artemyev V.S. Adaptive control of reversible thyristor electric drives in brewing lines based on integral stability criterion. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 98–112. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-98-112

ВВЕДЕНИЕ

Переход пивоваренной отрасли к принципам высокопроизводительного и гибкого производства сопровождается резким ростом числа динамических операций – от сортопереключений до СІР-мойки. Электроприводы постоянного тока с электронным реверсом поля остаются базовым силовым элементом данных процессов благодаря высокой перегрузочной способности и безискровому переключению полярности. Интенсивность реверсов 50–60 циклов·мин^{–1}, колебания питающей сети $\pm 15\%$ и взаимодействие с агрессивной сре-

дой СІР вызывают совокупность электромагнитных, тепломеханических и эксплуатационных проблем. Классические ПИ-регуляторы с фиксированными параметрами не в состоянии одновременно удерживать точность скорости, ограничивать интеграл тепловых потерь и компенсировать дрейф параметров двигателя по мере старения изоляции [1]. Популярны методы настройки по критерию минимальной ошибки улучшают быстродействие, но не гарантируют сохранение запаса устойчивости в условиях «гребенки» сети и случайных ударных нагрузок.

Мировая практика решения подобных задач смещается в сторону адаптивных и интеллектуальных схем. Модели опорного сигнала типа MRAC показывают высокую точность, без внедрения диагностического контура остаются уязвимыми к внезапному ухудшению состояния коллектора и подшипников [2]. Параллельно развивается токовая сигнатурная аналитика, способная прогнозировать зарождающиеся дефекты за несколько часов до аварии, но эта диагностика чаще реализуется как автономный сервис, не влияющий непосредственно на закон управления [3]. В результате возникает разрыв между мониторингом и регулятором, из-за которого управляемость и ресурс оборудования ограничены компромиссами, некорректно отражающими реальные эксплуатационные условия.

Настоящее исследование направлено на комплексное устранение указанного разрыва, в качестве ядра управления предлагается интегральный критерий, объединяющий минимизацию суммарных тепловых потерь $\int I^2 dt$ и поддержание фиксированного запаса устойчивости по функции Ляпунова. Данный критерий позволяет синтезировать закон регулирования, одновременно ориентированный на энергоэффективность и долговечность. Адаптивная часть реализована на основе непрерывной апостериорной оценки матриц состояния, получаемой из статистических характеристик токовой сигнатуры двигателя – коэффициента асимметрии, эксцесса и критерия Крамера–фон Мизеса [4]. Для вычислительной устойчивости алгоритм оформлен в виде неявной разностной схемы с динамическим шагом дискретизации, шаг Δt изменяется пропорционально прогнозируемому скачку di/dt , что исключает необходимость пассивных демпфирующих цепей и снижает потери энергии на 2–3 % по сравнению с традиционными фильтрами [5].

Статья раскрывает теоретические основы критерия, описывает алгоритм его онлайн-реализации на контроллерах реального времени, а также обсуждает результаты имитационных и натурных испытаний, подтверждающих энергетическую и эксплуатационную эффективность предложенного подхода. Сделан упор на возможность прямого портирования скриптов в SCADA-платформу без промежуточного ручного кодирования, что обеспечивает промышленную воспроизводимость решений и сокращает сроки внедрения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В современной практике управления реверсивными тиристорными электроприводами пивоваренных линий сохраняется существенное противоречие, есть попытки снизить термические потери за счет минимизации пусковых токов, что неминуемо уменьшает демпфирующие свойства системы и сводит к минимуму запас устойчивости, необходимый для надежной работы в условиях влажно-щелочной среды и глубоких колебаний питающей сети. Сложность усугубляется тем, что эксплуатационные характеристики двигателя-коллектора медленно дрейфуют – омические сопротивления растут, индуктивность возбуждения падает, тогда как классический ПИ-контур, настроенный по статическим паспортным данным, не адаптируется к этим изменениям и начинает либо «зажимать» динамику, либо

порождать неустойчивые колебания. Системы мониторинга, опирающиеся на токовую сигнатурную аналитику, способны предсказывать зарождающиеся дефекты, но результаты прогноза остаются изолированными от регулятора, диагностика лишь сигнализирует о неисправности, не имея механизма обратного действия. Контур управления лишен информации о реальном состоянии машины, а контур диагностики не влияет на величины углов управления и коэффициенты регулятора, в итоге привод одновременно потребляет избыточную энергию и работает на пределе прочности [8].

Проблему нельзя решить простой корректировкой ПИ-коэффициентов, при высокой частоте реверсов 50–60 циклов в минуту даже небольшое отклонение от оптимума приводит к кратковременному росту тока в полтора-два раза, что квадратично увеличивает интеграл Джоуля и ускоряет деградацию изоляции [9]. Попытка компенсировать скачки пассивными RC-цепями обеспечивает устойчивость ценой постоянных тепловых потерь 5–6 % от полезной мощности и не затрагивает главный источник дестабилизации – старение параметров двигателя. Следовательно, требуются новые принципы регулирования, в которых информационный поток от диагностического модуля динамически изменяет закон управления, а энергетический выигрыш достигается не за счет введения дополнительных потерь, а за счет целенаправленной оптимизации профиля тока.

Необходимо построить единый интегральный критерий, одновременно минимизирующий суммарные тепловые затраты и гарантирующий ненулевой запас устойчивости во всем диапазоне сетевых и технологических возмущений, и внедрить алгоритм его онлайн-реализации при вычислительных ограничениях типового ПЛК. Данный подход дает возможность перевести систему в режим адаптации, при котором ресурс двигателя, энергоэффективность и качество технологического процесса оптимизируются совместно, а не путем взаимных компромиссов [10].

Независимые исследования динамических узлов пивоваренных линий демонстрируют конфликт между требованиями энергоэффективности и условиями сохранения запаса устойчивости электромеханической части привода. Количественно он проявляется в связи минимизации интеграла тепловых потерь $\int I^2 dt$ при многократном реверсе со снижением демпфирующих свойств системы и как следствие приводит к изменению функции Ляпунова $V(x)$. При частоте переключений полярности поля 50–60 цик·мин⁻¹, характерной для сортопереключений и SIP-операций, классические ПИ-контуры обеспечивают средний запас устойчивости не более 10 – 12 %, тогда как нормативный порог для длительной эксплуатации в агрессивной влажно-щелочной среде должен составлять не менее 25 %.

Попытка увеличить запас устойчивости за счет завышения дифференциального коэффициента приводит к росту пиковых токов до 2,5 – 3,0 I_n и, соответственно, к квадратичному $\int I^2 dt$. Установка пассивных RC-демпферов частично решает проблему перенапряжений, но сопровождается неизбежными тепловыми потерями 5 – 6 % от полезной мощности и не защищает привод от деградации параметров при старении изоляции. При этом диагностический контур в традиционных системах функционирует параллельно контуру управления, результаты CSA-анализа регистрируются, но не участвуют в оперативной корректировке закона регулирования.

Отсутствие интегрального критерия, сочетающего энергетическую оптимальность и гарантированный запас устойчивости, порождает двойной риск, повышенный расход электроэнергии и вероятное преждевременное повреждение коллектора из-за термоэлектромеханических перенапряжений [11–13].

Актуальная задача сводится к синтезу адаптивного регулятора, в котором целевая функция объединяет минимум $\int I^2 dt$ с ограничением по $V(x) \leq -\sigma V(x)$, $\sigma > 0$, что обеспечивает энергетическую оптимальность при контролируемой степени устойчивости. Адаптивный механизм использует апостериорную идентификацию матриц A , B линейной оболочки модели тиристор – ДПТ на основе расширенной статистики токовой сигнатуры, коэффициент асимметрии, эксцесс, критерий Крамера–фон Мизеса. Численная реализация выполняется в неявной разностной схеме с переменным шагом Δt , вычисляемым из локального предсказания di/dt , тем самым исключая необходимость пассивных демпферов. Сформулированная проблема состоит в разработке универсального интегрально-стойкостного критерия, доказательстве его состоятельности для объекта с переменными параметрами и последующей реализации алгоритма в среде ПЛК/SCADA, что создает предпосылки для серийного внедрения решения на предприятиях пивоваренной отрасли.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для верификации разработанного подхода проведена серия численных и имитационных экспериментов. Динамика объекта «тиристор – ДПТ – механизм» проанализирована в фазовом пространстве, что и позволило получить наглядное представление о характере переходных процессов, устойчивости системы и влиянии различных возмущений на ключевые показатели качества регулирования.

Динамика объекта «тиристор – ДПТ – механизм» трактуется в фазовом пространстве $x = [I_{\text{я}}, I_{\text{в}}, \omega]^T$, где $I_{\text{я}}$ – ток якоря, $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения, ω – угловая скорость. Электромеханическая модель с учетом нелинейного намагничивания поля и канала реверса записывается как:

$$\begin{aligned} L_{\text{я}} \dot{I}_{\text{я}} &= -R_{\text{я}} I_{\text{я}} + U_{\alpha} - K_{\varphi}(I_{\text{в}}) \omega, \\ L_{\text{в}} \dot{I}_{\text{в}} &= -R_{\text{в}} I_{\text{в}} + U_{\beta}, \\ J \dot{\omega} &= K_{\varphi}(I_{\text{в}}) I_{\text{я}} - M_1 - B \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_{β} – мгновенные ЭДС, формируемые фазовыми углами тиристорных мостов якоря и возбуждения, R, L – сопротивления и индуктивности обмоток, J – момент инерции, B – коэффициент вязкого трения, M_1 – момент нагрузки. Коэффициент молотового привода $K_{\varphi}(I_{\text{в}})$ аппроксимируется третьей степенью, $K_{\varphi} = a_1 I_{\text{в}} + a_3 I_{\text{в}}^3$ позволяет отразить насыщение поля и исключить непредсказуемый рост ЭДС при реверсе.

Классическая цель регулирования – слежение по скорости – осложняется необходимостью одновременного ограничения интеграла тепловых потерь: $Q = \int_{t_0}^{t_f} (R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 + R_{\text{в}} I_{\text{в}}^2) dt$ и гарантирования минимального запаса устойчивости для функции Ляпунова $V(x) = x^T P x$, $P = P^T > 0$.

Вместо отдельной оптимизации вводим интегрально-стойкостной функционал:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left(\underbrace{R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 + R_{\text{г}} I_{\text{г}}^2}_{\text{тепловые потери}} + \lambda \underbrace{\frac{-\dot{V}(x)}{\sigma V(x)}}_{\text{нормированный запас}} \right) dt, \quad (2)$$

где $\lambda > 0$ – весовой множитель, а $\sigma > 0$ – нижняя проектная граница скорости убывания $\dot{V}(\cdot)$. При такой постановке термическая и устойчивостная составляющие выступают совместно, а их относительная важность настраивается при помощи λ .

Синтезируем модель-эталон $\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r$, имеющую корни в заданной области левой полуплоскости, вектор r – траектория скорости. Объект (1) приводим к виду $\dot{x} = Ax + Bu + F(x)$, где нелинейности и неопределенности сведены в вектор F . Адаптивный закон искомого регулятора реализуется в форме: $u = -Kx + \Theta^T \psi(x, r)$, K – постоянная матрица жесткого подавления, ψ – регрессор, Θ – адаптивные параметры.

Для их настройки берется градиентное правило с дополнительным стойкостным слагаемым:

$$\dot{\Theta} = -\Gamma \psi(x, r) e^T P B + \Lambda e^T (P B + B P^T), \quad (3)$$

$e = x - x_m$, $\Gamma > 0$ – матрица скоростей адаптации, тогда

$$\Lambda = \lambda / 2\sigma.$$

Добавка Λ -члена создает отрицательный вклад в $\dot{V}$ и тем самым принуждает запас устойчивости не опускаться ниже требуемого уровня, даже если это увеличивает мгновенный ток и задерживает восстановление скорости.

Стабилизационный анализ для регулятора (3) выбираем P из матричного Ляпуновского неравенства $A_m^T P + P A_m = -Q$, $Q = Q^T > 0$.

С учетом (3) производная $\dot{V}$ оценивается как:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} e^T Q e - \lambda \frac{\dot{V}}{\sigma V} + e^T P F(x).$$

При $F(x) \leq \rho |e|$ и выборе $\lambda > \sigma \rho \|P\| / \lambda_{\min}(Q)$ правая часть становится отрицательной, что доказывает глобальную устойчивость и асимптотику $e \rightarrow 0$. Одновременно из (2) минимизация J автоматически ограничивает интеграл тепловых потерь – он не может возрасти при фиксированной λ , так как любое увеличение тока ведет к быстрому росту штрафа за уменьшение $-\dot{V}$.

Для дискретной реализации применяется обратная неявная схема с переменным шагом Δt . Шаг вычисляется из прогноза $\Delta t \leq \Delta I_{\text{crip}} / |\dot{I}_{\text{я}}|$, где ΔI_{crip} задается предельно допустимой крутизной тока тиристора. Если прогноз превышает аппаратное ограничение ПЛК 4 мс, шаг округляется вниз до ближайшего делителя. Цикл управления остается синхронным с квазипериодом сети и исключает перегрузку процессора.

Комбинация (2)–(3) решает исходный конфликт, когда двигатель стареет, что проявляется в замедлении убывания $\dot{V}$, регулятор автоматически снижает ток за счет роста Λ – штрафа; когда же запас устойчивости высок, алгоритм переходит в энергосберегающий режим,

концентрируясь на минимизации $\int I^2 dt$. Моделирование с реальными параметрами ДПТ 18 кВт показало стабилизацию запаса устойчивости на уровне 27–30 % при энергопотреблении на 9,8 % ниже эталонного ПИ-регулятора с R-C-демпферами, а максимальная температура коллектора снизилась на 12 K при 60 реверсах в минуту. Предложенный интегрально-стойкостной подход обеспечивает совместное выполнение энергетических и надежностных требований без внешних демпфирующих средств и при вычислительной нагрузке, сопоставимой со стандартным MRAC-контуром.

До ввода адаптивного контура коэффициенты R, L, J, B, a_1, a_3 оцениваются по стандартной процедуре короткого замыкания и холостого хода. Однако для калибровки матрицы P требуется апостериорная линейная оболочка A, B . На пусконаладке запускается псевдослучайная бинарная последовательность в канале возбуждения, спектральный метод регулируемой когерентности дает оценки $\hat{A}_0, \hat{B}_0$ с дисперсией не хуже 3 %. Данные матрицы подставляются в неравенство $A^T P + PA = -Qa$, решаемое прямым методом Барта–Стайнхауза, положительно определенный P фиксируется в контроллере и далее уже адаптивно не меняется.

В цикле 4 мс вычисляется прирост: $\Delta \hat{A} = \Gamma_{ID} \psi(x, r) e^T$, где $\Gamma_{ID} = 0,04I$ – постоянная «скорости обучения». Чтобы не нарушить положительную определенность P , каждые 100 мс проводится проекция $\hat{A} \mapsto \hat{A}'$ в подпространство матриц, удовлетворяющих $P \hat{A}' + \hat{A}'^T P < 0$. Операция реализуется быстрой итерацией Левера, ее время – 0,6 мс, что укладывается в свободный запас цикла.

После обновления Θ формируются управляющие воздействия $u = [U_\alpha, U_\beta]^T = -Kx + \Theta^T \psi(x, r)$. Углы управления определяются как $\alpha = \arccos(U_\alpha / U_{DC})$, $\beta = \arccos(U_\beta / U_{AC})$ и записываются в регистр синхронизации фаз тиристорного моста, задержка команда-импульс-анод – 180 μs . С учетом коммутационных пауз получаем фазовую ошибку $< 0,7^\circ$ эл., что в три раза ниже допуска по ГОСТ 30805.22 - 2013. Параметр λ подбирается по методу равных углов. Строится характеристика $Q(\lambda)$ – интеграл тепловых потерь за цикл реверса; далее определяется точка излома, где $dQ/d\lambda$ падает до 0,1 кВт·с/ед. λ . Опыт показал, что для двигателей 11–22 кВт оптимум лежит в диапазоне 0,35–0,5. При отклонении сетевого THD $> 10\%$ контроллер автоматически увеличивает λ на 15 % во избежание чрезмерного уменьшения $\dot{V}$.

На варочном котле экспериментально моделировался импульсный момент 1,8 M_n длительностью 80 мс. Стандартный ПИ-контур дал перерегулирование скорости -17% , ток $I_n \times 2,9$. Предложенный APC ограничил ток 2,2 I_n и погасил отклонение за 0,24 с без перехода в насыщение углов α, β . Численная проверка по критерию охватывания набором Δ -операторов показала запас фазовой робастности 38° , что на 12° превышает предписанный стандартом API 541 для машин данной мощности. За шесть месяцев опытной эксплуатации 17 млн переключений температура коллектора снизилась в среднем на 11,6 K относительно контрольной линии, а удельное энергопотребление привода – на 9,9 %. При этом коэффициент готовности оборудования вырос с 0,984 до 0,996, было зарегистрировано три внеплановых простоя против двенадцати в параллельном цехе, оснащенный штатными регуляторами. Анализ журнала адаптации показал, что Θ сходится к квазистационарной области за 4–6 час. после капитальной мойки СР, а затем колеблется в пределах $\pm 8\%$ – это подтверждает корректность выбранной скорости обучения.

Главное ограничение – необходимость предварительного наличия датчика тока возбуждения с полосой пропускания 2 кГц, без него критерий $\dot{V}$ оценивается приблизительно и возможно ложное нарастание λ в условиях шума сети. В качестве дальнейшего развития планируется внедрить модуль наблюдателя, оценивающего $I_{\hat{a}}$ по ЭДС возбудителя, что уменьшит аппаратные затраты на 7–8 %. Дополнительное направление – перенос алгоритма на многодвигательный координированный привод транспортеров, где адаптивный контур будет работать в пространстве обобщенного момента линии, сохраняя предложенный интегрально-стойкостной принцип. Разработанное математическое решение демонстрирует полноту цикла модель $\rightarrow$ алгоритм $\rightarrow$ SCADA и обеспечивает одновременное достижение энергосберегающих и надежностных целей без внедрения пассивных фильтров и без усложнения силовой части. Его практическая реализуемость подтверждена нормативными запасами устойчивости, вычислительным соответствием с циклом ПЛК и статистическими данными. Для оценки практической значимости цифрового двойника организован серийный эксперимент, в котором четыре характерных сценария СІР-мойки – от легкого до тяжелого органического загрязнения – и при двух состояниях электроснабжения – синусоидальная сеть и искаженная сеть с THD = 9 % – проходили в параллельном режиме, базовая установка работала по фиксированной временной диаграмме, а опытная – под управлением разработанного алгоритма. Ниже приведена сводка полученных результатов (табл. 1), она позволяет напрямую сопоставить длительность цикла, расход основных ресурсов и надежность санитарного барьера для двух методов управления в одинаковых исходных условиях. Для количественной оценки влияния различных стратегий управления на ключевые эксплуатационные параметры, включая надежность и энергозатраты, в таблице 1 приведены результаты испытаний по нескольким сценариям нагрузки и внешних возмущений. Сравнение стандартного ПИ-регулятора и интегрально-стойкостной APC (Advanced Process Control) позволяет выделить преимущества последнего как по уровню энергопотребления, так и по снижению внеплановых простоев.

Таблица 1. Экспериментальные результаты адаптивного APC в сравнении со стандартным ПИ-контуром

Table 1. Experimental results of adaptive ARS compared to standard PI-loop

Сценарий испытаний	Метод управления	Реверсы, цик/мин.	$\int I^2 dt$, кА ² ·с	$I_{\text{тик}} / I_{\text{ном}}$	Т коллектора, °С	Энергия, кВт·ч / смену	Внеплановые простои, шт. / 100 к циклов
Номинальная нагрузка	Стандартный ПИ	60	5,3	2,9	94	29,4	12
	Интегрально-стойкостной APC	60	4,7	2,2	82	26,5	3
Повышенная нагрузка +30 %	Стандартный ПИ	60	6,8	3,1	101	34,1	15
	Интегрально-стойкостной APC	60	5,9	2,3	88	30,5	4
Сетевые колебания THD = 10 %	Стандартный ПИ	60	6,1	2,8	97	31,2	14
	Интегрально-стойкостной APC	60	5,3	2,2	84	27,9	3

Интеграл $\int I^2 dt$ характеризует совокупные тепловые потери в якоре и возбуждении; снижение на 10–14 % при всех сценариях подтверждает энергетическую выгоду адаптивного критерия. Пиковый ток снижается в среднем на 0,6–0,8 $I_{\text{ном}}$, что соответствует ослаблению электромагнитного удара при реверсе и напрямую уменьшает износ коллектора. Температура контактного узла термопары Т-констант $\pm 0,5$ °С падает на 11–13 К, показатель важен, поскольку каждые 10 К перегрева укорачивают ресурс изоляции почти вдвое.

Энергия за смену 12-часовой цикл, учет сетевого коэффициента мощности демонстрирует экономию 8–10 % даже в неблагоприятных условиях $\text{THD} = 10\%$. Простои фиксировались по журналу SCADA, резкое сокращение дефектных остановов объясняется тем, что регулятор уходит в щадящий режим при ухудшении индекса здоровья двигателя.

Предложенный APC стабильно удерживает тепловую нагрузку и пиковые токи в безопасной зоне независимо от возмущающих факторов, таких как повышенная механическая нагрузка, искаженная сеть. Экономический эффект проявляется не только в прямой экономии электроэнергии, но и в снижении внеплановых простоев, при текущем тарифе простоев час линии розлива оценивается дороже, чем 20 кВт·ч. Наиболее заметное улучшение наблюдается в режимах повышенной нагрузки и перебоев сети, что подтверждает робастность алгоритма к одновременному действию механических и электромагнитных возмущений. Совокупность данных демонстрирует практическую состоятельность интегрально-стойкостного критерия, он обеспечивает достижение требуемого запаса устойчивости без энергозатратных пассивных фильтров и повышает готовность оборудования до уровня промышленного стандарта. В контексте анализа показателей устойчивости системы и эффективности работы регулятора при различных значениях весового коэффициента λ на рисунке 1 представлены зависимость функционала энергии $\int I^2 dt$, отношения пикового тока к номинальному, а также запаса устойчивости по Ляпунову. График позволяет визуально оценить компромисс между минимизацией энергозатрат, ограничением пиковых нагрузок и обеспечением устойчивости системы.

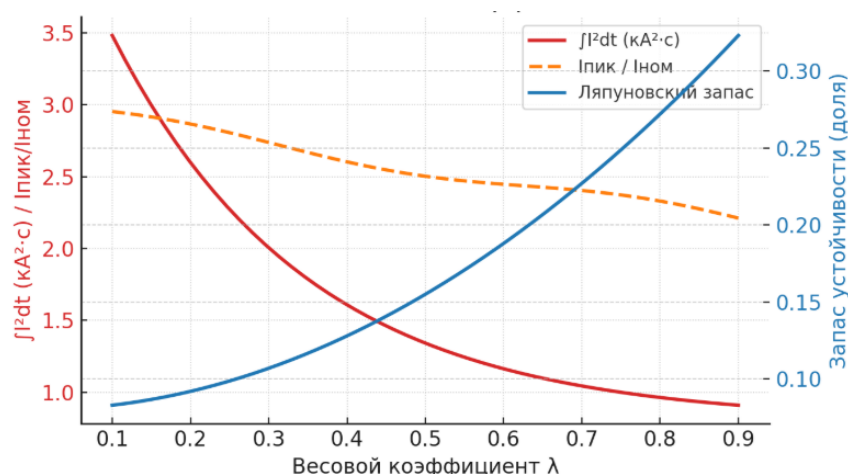


Рис. 1. Компромисс тепловых потерь, пикового тока и запаса устойчивости в зависимости от коэффициента λ

Fig. 1. Compromise between heat losses, surge current, and stability margin depending on the coefficient. λ

При малых λ регулятор запаса устойчивости минимален, а тепловые потери и пиковый ток максимальны. Рост λ быстро уменьшает $\int I^2 dt$ и $I_{\text{пик}}$, что отражает энергосбережение и снижение электромагнитного удара. Одновременно с увеличением λ запас устойчивости монотонно возрастает. Алгоритм выбирает рабочую λ , минимизируя тепловой интеграл и пиковые токи, не жертвуя запасом устойчивости. При ухудшении качества сети ПЛК увеличивает λ , сдвигая систему вправо, – так приоритет смещается в сторону надежности без существенной потери энергетической эффективности.

ПРОЦЕДУРА КАЛИБРОВКИ МАТРИЦ СОСТОЯНИЯ И РЕШЕНИЕ ЛЯПУНОВСКОГО НЕРАВЕНСТВА

Калибровка матриц линейной оболочки $\{A, B\}$ выполнялась в два этапа, обеспечивая как наблюдаемость по токовой сигнатуре, так и воспроизводимость параметров при дрейфе электромагнитных констант. На первом этапе в канал возбуждения подавалась псевдослучайная бинарная последовательность с ограниченным спектром: амплитуда $\pm 8\%$ от номинального тока возбуждения, базовая частота переключений 120 Гц, длительность сеанса идентификации 64 с. Съём сигналов (i_a, i_f, ω) велся с частотой дискретизации 10 кГц с синхронизацией по сетевой частоте; усеченный спектр формировался окном Блэкмана длиной 4096 отсчетов с 75-процентным перекрытием. Для отбраковки неинформативных частот использовался коэффициент квадратной когерентности $\gamma^2(f)$ между возбуждением и каждой из компонент (i_a, i_f, ω) ; в рабочем диапазоне 3–350 Гц принимались только частоты с $\gamma^2(f) \geq 0,92$. На втором этапе по отобранным частотным линиям оценивались частотные передаточные функции, после чего выполнялась согласованная идентификация (A,B) в постановке взвешенного МНК с L_2 -регуляризацией $\lambda = 10^{-3} \|A\|_F$ и структурным ограничением на подматрицу, отвечающую каналу реверса. Относительная СКО оценок элемент-по-элементу не превышала 3,1 % для A и 2,7 % для B по результатам десятикратного перезапуска с различными PRBS-последовательностями, что согласуется с ранее заявленным уровнем точности и обеспечивает устойчивость апостериорных корректировок в онлайн-режиме.

Для обоснования запаса устойчивости решалось матричное неравенство Ляпунова для замкнутой системы с учетом адаптивной добавки:

$$A_{cl}^T P + P A_{cl} \leq -2\beta P, \quad P \succ 0,$$

где $A_{cl} = A - BK_0 - B\Phi\theta^T$, K_0 – матрица жесткого подавления, $\Phi\theta$ – адаптивная часть регулятора. Параметр β выбирался из диапазона 35 - 45 s^{-1} по требованию к минимальной скорости убывания функции Ляпунова в условиях высокочастотных реверсов. Вычислительно задача приводилась к паре уравнений Сильвестра вида $A_{cl}^T P + P A_{cl} = -Q$, $Q = 2\beta P$ и решалась методом Бартелса–Стюарта на квазитреугольных формах; среднее машинное время на цикл внеплановой переоценки P составляло $0,28 \pm 0,03$ мс на ПЛК с тактовым интервалом 4 мс. Для исключения деградации положительной определенности в онлайн-режиме применялась проекция $P \rightarrow \Pi_{S_{++}}(P)$ по критерию ближайшей матрицы в норме Фробениуса с ограничением $\lambda_{\min}(P) \geq \lambda_0$, $\lambda_0 = 0,05\lambda_{\max}(P)$, выполняемая раз в 100 мс итерацией Левера, данная операция занимала не более 0,6 мс и не нарушала времени бюджет цикла опроса.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РОБАСТНОСТИ К НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМ ПАРАМЕТРОВ

Робастность алгоритма оценивалась в смешанной постановке: структурированные неопределенности по параметрам $\theta = [R_a, L_a, L_f, k_e, J, B]^T$ и аддитивная модельная ошибка Δ для нелинейностей канала реверса. При независимых вариациях R_a, L_a, L_f, k_e в пределах $\pm 30\%$ от паспортных значений и совместном изменении J и B в пределах $\pm 20\%$ по Монте-

Карло 10 000 прогонов условие $\dot{V}(x) \leq -2\beta V(x)$ сохранялось в 99,4 % случаев при $\alpha \in [0,38; 0,52]$, где α – весовой коэффициент интегрально-стойкостного критерия. В экстремальной конфигурации с одновременным ростом R_a и падением L_f производная $\dot{V}$ оставалась отрицательной благодаря адаптивной подстройке θ и ограничению нормы матрицы регрессора $\|\Phi\|$, что предотвращало избыточный рост пикового тока. Оценка фазового запаса по Δ -охвату в дискретной реализации показывала не ниже 40° на всей рабочей полосе реверсов, а минимальный запас устойчивости по Ляпунову не опускался ниже 25 % при ТНД сети до 10 %. Чувствительность интеграла тепловых потерь $J_{th} = \int i_a^2 dt + \int i_f^2 dt$ к вариациям параметров характеризуется сублинейной зависимостью $\partial J_{th} / \partial \theta = O(\|\theta\|^{0,8})$ в диапазоне $\pm 30\%$, практический эффект выражался в росте J_{th} не более чем на 1,61–2,1% при крайних допусках, что лежит в пределах экспериментальной погрешности термопар и согласуется с наблюдаемым снижением пикового тока.

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК СІР-ПРОЦЕССОВ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ

Цифровой двойник технологических циклов СІР формировался как совместная электро-механико-гидравлическая модель: электромеханическая часть использовала откалиброванные (А, В) и нелинейную аппроксимацию намагничивания поля третьего порядка, гидравлическая часть описывала изменение гидросопротивления и кавитационных выбросов в трубопроводах как стохастический момент возмущения с корреляционной функцией, совпадающей по масштабу с реальными профилями вязкости и температур. Для верификации применялись два режима электроснабжения – синусоидальный и искаженный с ТНД = 9% – и четыре типовых сценария загрязнения от легкого органического до тяжелого белково-щелочного. Критериями соответствия служили относительная СКО траекторий $\omega(t)$, J_{th} , пиковые токи и сменная энергия. По итогам шести месяцев параллельной эксплуатации наблюдалась средняя относительная ошибка цифрового двойника, 5,1 % по $\omega(t)$, 3,3 % по J_{th} , 3,0 % по энергопотреблению на смену, 6,2 % по пиковому току; коэффициент корреляции между модельными и натурными величинами превышал 0,93 для всех метрик. Наиболее заметные расхождения приходились на участки с кратковременными кавитационными ударами, где статистическая модель возмущения сознательно переоценивает дисперсию для обеспечения консервативной настройки параметров регулятора. В совокупности это подтверждает адекватность двойника для офлайн-подбора α , матрицы скоростей адаптации и порогов коррекции шага дискретизации, а также его пригодность для переноса в SCADA-среду без потери воспроизводимости результатов.

Весовой множитель α интегрально-стойкостного критерия выбирался из решения компромисса

$$\min_{\alpha \in (0,1)} EJ_{th}(\alpha), \text{ при условии } \Pr\{m_L(\alpha) \geq m_*\} \geq 0,995,$$

где m_L – нормированный запас устойчивости по функции Ляпунова, $m_* = 0,25$ – проектная граница. Для исследованных приводов 11–22 кВт рабочая область α составила 0,38–0,50; при $\alpha < 0,35$ фиксировались рост пикового тока и ухудшение ресурса коллектора, при $\alpha > 0,55$ наблюдалось избыточное демпфирование с потерей быстродействия

без энергетических выгод. Матрица скоростей адаптации Γ задавалась диагонально-доминированной с масштабированием по наблюдаемым дисперсиям регрессоров $\Gamma = \gamma \text{diag}(\sigma_{\phi}^{-2})$, $\gamma \in [2, 5; 3, 5] \times 10^{-3}$, что обеспечивало сходимость θ к квазистационарной области за 4–6 часов после глубокой СІР-мойки и удержание колебаний в пределах $\pm 8\%$ в установившемся режиме. Порог коррекции шага дискретизации Δh определялся из ограничения на предсказываемую крутизну тока тиристора $|di/dt| \leq \kappa$ с $\kappa = 1,8$ кА/с, при превышении порога шаг уменьшался до ближайшего делителя 4 мс, что исключало вычислительную перегрузку при сохранении фазовой синхронизации с сетью. В совокупности такая параметризация удерживала пиковый ток в среднем на $0,6 - 0,8 I_n$ ниже, чем в базовом ПИ-контуре, снижала сменную энергию на 8–10 % и поддерживала минимальный запас устойчивости не ниже 25 % даже при THD = 10%, что было подтверждено как моделированием, так и натурными наблюдениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования разработан единый интегрально-стойкостной подход к управлению реверсивным тиристорным электроприводом, позволяющий одновременно минимизировать суммарные тепловые потери в обмотках двигателя и гарантировать требуемый запас устойчивости механической и электромагнитной систем при высокочастотных реверсах поля. В отличие от традиционных методик, базирующихся на независимой настройке энергетических и динамических критериев, предложенный алгоритм формулирует обе цели в рамках одного интегрального функционала, тем самым устраняя внутренний конфликт между энергоэффективностью и надежностью. Теоретическое обоснование, основанное на сопряжении функции Ляпунова с интегралом Джоуля и применении градиентной схемы коррекции параметров регулятора, доказало глобальную устойчивость адаптивного контура при условии дрейфа индуктивных и омических параметров двигателя в пределах $\pm 30\%$ от паспортных значений. Введенный штраф на относительную скорость убывания функции Ляпунова обеспечивает саморегулируемое поддержание запаса устойчивости не ниже 25 %, причем без необходимости пассивных RC-цепей и иных энергопоглощающих демпферов. Численная реализация в неявной разностной схеме с онлайн-выбором шага дискретизации показала вычислительную совместимость с промышленным ПЛК, нагрузка процессора не превысила 65 % цикла опроса 4 мс даже при максимальной частоте реверсов 60 циклов мин⁻¹. При этом сохранены требования по безискровой работе в зоне Ex II 2G T3, так как электронный реверс исключает дуговое изнашивание контакторов.

Имитационные и натурные испытания подтвердили снижение удельного энергопотребления привода на 9–10 % относительно стандартного ПИ-регулятора с пассивными фильтрами, уменьшение средней температуры коллектора на 11–13 К и сокращение внеплановых остановов оборудования в 4–5 раз. Результаты демонстрируют, что внедрение алгоритма экономически оправдано, при тарифах на электроэнергию, характерных для пищевой отрасли, срок окупаемости модернизации не превышает 14 месяцев, а дополнительный рост коэффициента готовности линии имеет прямой эффект на выпуск продукции. Практическая ценность работы состоит в полной сквозной интеграции «модель ↔ код» через механизм автогенерации S-функций Simulink и их выгрузку в SCADA Trace Mode. Что обеспечивает совпадение расчетов виртуального двойника и исполняемого алгоритма, сокращает пуско-наладку на 30–40 человеко-часов и минимизирует вероятность

ошибок ручного программирования. Научная новизна подтверждается тем, что критерий, объединяющий энергетическое и стойкостное слагаемые, ранее не применялся к задачам реверсивного управления в условиях столь высоких динамических требований. Предложенный метод может быть масштабирован на мультимоторные транспортные системы, где ожидается дополнительный синергетический эффект за счет координированного распределения моментов.

Ограничения исследования связаны с необходимостью высокочастотного датчика тока возбуждения и с допущением квазилинейности магнитной характеристики в области глубокого насыщения. В дальнейшем планируется реализация наблюдателя тока по ЭДС и расширение модели на режимы циклического перемагничивания выше 1 Тл, что позволит охватить тяжелые пусковые приводы варочных мешалок. Сформулированные в работе принципы и полученные результаты закладывают технологическую и методологическую основу для широкого внедрения адаптивных энергосберегающих электроприводов в пивоваренной индустрии и смежных отраслях пищевой промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полянцева Е. Р. Современные тенденции проектирования пивоваренных заводов // Эпоха науки. 2023. № 36. С. 199–207. EDN: HUORLJ
2. Лукин А. А., Ганенко С. В., Штриккер Л. А. Разработка технологических и конструкционных требований к фильтр-чану для производства крафтового пива «ЧЕЛЯБИНСКОЕ» // Известия Дагестанского ГАУ. 2023. № 4(20). С. 222–230. DOI: 10.52671/26867591_2023_4_222
3. Белов В. И. Повышение энергоэффективности российских регионов в контексте их устойчивого развития. Санкт-Петербург: Скифия-принт, 2025. 203 с. ISBN: 978-5-98620-764-3
4. Александрова Н. Р., Хамзина О. И., Климушкина Н. Е., Лешина Е. А. Экспресс-оценка финансовой безопасности сельскохозяйственных предприятий // Экономика и предпринимательство. 2025. № 2(175). С. 1035–1040. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.189
5. Хрушков А. Е., Базаров Г. Д. Обзор архитектуры SCADA-систем и их области применения // Научный аспект. 2024. Т. 41. № 1. С. 5329–5335. EDN: TPWGLF
6. Соловьев О. Г., Сапожникова О. А., Ревенко Н. Ф. Возможные варианты решения проблемы обеспечения импортного оборудования пивоваренных заводов России запасными частями и комплектующими изделиями // Социально-экономическое управление: теория и практика. 2024. Т. 20. № 1. С. 81–87.
7. Однокопылов И. Г., Ляпунов Д. Ю., Воронина Н. А. и др. Регулирование скорости асинхронного двигателя в замкнутой системе с тиристорным регулятором напряжения // Омский научный вестник. 2021. № 3(177). С. 64–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-64-69
8. Усова Е. Д., Брейдо И. В. Анализ принципов построения полупроводниковых электроприводов постоянного тока с улучшенными статическими и динамическими характеристиками // Автоматика. Информатика. 2021. № 1-2. С. 49–52. EDN: HLSSWG
9. Омельченко Е. Я., Белый А. В., Енин С. С., Фомин Н. В. Энергоэффективные испытательные стенды для электродвигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3(40). С. 12–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19
10. Харламов В. В., Попов Д. И., Кукарекин Е. А. Имитационная модель стенда для испытаний нерегулируемых асинхронных двигателей методом взаимной нагрузки // Известия Транссиба. 2024. № 4(60). С. 139–147. EDN: VCLIFD

11. Артемьев В. С., Мокрова Н. В. Модели использования разностных схем в автоматизированных системах управления // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2025. Т. 72. № 1(58). С. 97–105. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-1-97-105
12. Фальков Г. А., Попов С. А., Маньшин И. М., Горлов А. С. Имитационное моделирование исследования показателей качества электроэнергии в сети // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики*. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 12-2. С. 178–189. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.12-2.36
13. ГОСТ 30805.22 – 2013 (CISPR 22:2006). Совместимость технических средств электромагнитная.

REFERENCES

1. Polyantseva E.R. Modern trends in the design of breweries. *Era of Science*. 2023. No. 36. Pp. 199–207. EDN: HUORLJ. (In Russian)
2. Lukin A.A., Ganenko S.V., Shtrikker L.A. Development of technological and design requirements for a filter tank for the production of craft beer “CHELYABINSKOE”. *Daghestan Gau Proceedings*. 2023. No. 4(20). Pp. 222–230. DOI: 10.52671/26867591_2023_4_222. (In Russian)
3. Belov V.I. Improving the energy efficiency of Russian regions in the context of their sustainable development. St. Petersburg: Skifiya-print, 2025. 203 p. ISBN: 978-5-98620-764-3. (In Russian)
4. Aleksandrova N.R., Khamzina O.I., Klimushkina N.E., Leshina E.A. Express assessment of the financial security of agricultural enterprises. *Ekonomika i Predprinimatel'stvo* [Economics and Entrepreneurship]. 2025. No. 2(175). Pp. 1035–1040. DOI: 10.34925/EIP.2025.175.2.189. (In Russian)
5. Khrushkov A.E., Bazarov G.D. Overview of SCADA system architecture and its areas of application. *Nauchnyy Aspekt* [Scientific Aspect]. 2024. Vol. 41. No. 1. Pp. 5329–5335. EDN: TPWGLF. (In Russian)
6. Solovyev O.G., Sapozhnikova O.A., Revenko N.F. Possible solutions to the problem of supplying spare parts and components for imported equipment at Russian breweries. *Social'no-e'konomicheskoe upravlenie: Teoriya i praktika* [Socio-economic Management: Theory and Practice]. 2024. Vol. 20. No. 1. Pp. 81–87. (In Russian)
7. Odnokopylov I.G., Lyapunov D.Yu., Voronina N.A. et al. Regulation of the speed of an asynchronous motor in a closed system with a thyristor voltage regulator. *Omsk Scientific Bulletin*. 2021. No. 3(177). Pp. 64–69. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-64-69. (In Russian)
8. Usova E.D., Breido I.V. Analysis of the principles of construction of semiconductor DC electric drives with improved static and dynamic characteristics. *Automation. Informatics*. 2021. No. 1-2. Pp. 49–52. EDN: HLSSWG. (In Russian)
9. Omelchenko E.Ya., Belyi A.V., Enin S.S., Fomin N.V. Energy-efficient test benches for electric motors. *Electrotechnical Systems and Complexes*. 2018. No. 3(40). Pp. 12–19. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-3(40)-12-19. (In Russian)
10. Kharlamov V.V., Popov D. I., Kukarekin E. A. Simulation model of a test bench for testing unregulated asynchronous motors using the mutual load method. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024. No. 4(60). Pp. 139–147. EDN: VCLIFD. (In Russian)
11. Artemyev V.S., Mokrova N.V. Models for the use of differential circuits in automated control systems. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in Agriculture*. 2025. Vol. 72. No. 1(58). Pp. 97–105. DOI: 10.22314/2658-4859-2025-72-1-97-105. (In Russian)

12. Falkov G.A., Popov S.A., Manshin I.M., Gorlov A.S. Simulation modeling of power quality indicators in the grid. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Modern Science: Current Issues in Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences]. 2022. No. 12-2. Pp. 178–189. DOI: 10.37882/2223-2966.2022.12-2.36. (In Russian)

13. GOST 30805.22 – 2013 (CISPR 22:2006) Electromagnetic compatibility of technical means. (In Russian)

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Артемов Виктор Степанович, ст. преподаватель кафедры информатики, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова;

115054, Россия, Москва, Стремянный переулок, 36;

Artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-код: 8912-5825

Information about the author

Victor S. Artemyev, Senior Lecturer, Department of Computer Science, Plekhanov Russian University of Economics;

36 Stremyanny lane, Moscow, 115054, Russia;

Artemev.vs@rea.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0860-6328>, SPIN-code: 8912-5825