Оригинальная статья

Original Paper

УДК 681.5 © Э.А. Тшипунгу✉, В.М. Шатунова

НИТУ МИСИС, 119049, г. Москва, Россия
✉ e-mail: tchipungo369@mail.ru

UDC 681.5 © E.A. Tshipungu✉, V.M. Shatunova, 2026

National Research University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation
✉ e-mail: tchipungo369@mail.ru

Исследование эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в системе автоматического управления уровнем хвостохранилища

Study of the efficiency of using a variable frequency electric drive in the system of automatic control of the level of the tailings dump

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-10-89-93

Основным акцентом в данной работе являются разработка и исследование системы автоматического управления центробежным насосом хвостохранилища на базе частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) с ПИД-регулятором для обеспечения энергоэффективности и заданного давления. В ходе моделирования установлено, что применение скалярного закона управления U/f = const обеспечивает плавный разгон двигателя до номинальной скорости (50 Гц) за 1,5 секунды без превышения критического момента, что исключает гидроудары. Давление в системе при этом плавно достигает номинальных 5,8 МПа. Экспериментальным путем определены оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора, обеспечивающие качественное регулирование: $K_p = 3$, $K_i = 0,1$, $K_d = 0,0001$. При данных настройках время отработки возмущения (изменения давления) составляет около 1 секунды, перерегулирование не превышает 5%, статическая ошибка отсутствует. Разработанная модель подтверждает, что применение ЧРП с ПИД-регулятором позволяет снизить энергопотребление насосного агрегата на 35-50% по сравнению с дроссельным регулированием за счет приведения частоты вращения к фактической потребности (кубическая зависимость мощности от частоты).

Ключевые слова: *ПИД-регулятор, асинхронный двигатель, центробежный насос, частотно-регулируемый привод, хвостохранилище, энергосбережение, Matlab/Simulink.*

Для цитирования: Тшипунгу Э.А., Шатунова В.М. Исследование эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в системе автоматического управления уровнем хвостохранилища // Уголь. 2026;(10):89-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-89-93.

ТШИПУНГУ Э.А.
Аспирант, НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: tchipungo369@mail.ru

ШАТУНОВА В.М.
Студентка кафедры АСУ НИТУ МИСИС,
119049, г. Москва, Россия

Abstract

The focus of this work is the development and study of an automatic control system for the centrifugal pump of the tailings dump based on a variable frequency electric drive (VFD) with a PID regulator to ensure energy efficiency and set pressure.

During the simulation, it was found that the use of the scalar control law provides a smooth acceleration of the engine to the nominal speed (50 Hz) in 1.5 seconds without exceeding the critical torque, which excludes water hammers. At the same time, the pressure in the system smoothly reaches the nominal 5.8 MPa. The optimal coefficients of the PID regulator that provide high-quality regulation have been experimentally determined. With these settings, the time for working out the disturbance (pressure change) is about 1 second, overshooting does not exceed 5%, there is no static error. The developed model confirms that the use of a VFD with a PID controller can reduce the power consumption of the pumping unit by 35-50% compared to throttle control by bringing the rotation speed to the actual demand (cubic power vs. frequency). U/f = const, K_p = 3, K_i = 0,1, K_d = 0,0001. With these settings, the time for working out the disturbance (pressure change) is about 1 second, overshooting does not exceed 5%, there is no static error. The developed model confirms that the use of a VFD with a PID controller can reduce the power consumption of the pumping unit by 35-50% compared to throttle control by bringing the rotation speed to the actual demand (cubic power vs. frequency).

Keywords

PID controller, induction motor, centrifugal pump, variable frequency drive, tailings storage, energy saving, Matlab/Simulink.

For citation

Tshipungu E.A., Shatunova V.M. Study of the efficiency of using a variable frequency electric drive in the system of automatic control of the level of the tailings dump. *Ugol'*. 2026;(10):89-93 (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-89-93.

ВВЕДЕНИЕ

Современные горно-обогатительные комбинаты предъявляют высокие требования к надежности и энергоэффективности систем гидротранспорта. Хвостохранилища являются критически важными объектами, где бесперебойная работа насосного оборудования обеспечивает технологический цикл и экологическую безопасность. Центробежные насосы, составляющие основу таких систем, относятся к механизмам с вентиляторной нагрузкой, где момент сопротивления имеет квадратичную зависимость от скорости.

Традиционные методы регулирования производительности, такие как дросселирование задвижек, приводят к значительным потерям энергии, достигающим 45% и более от номинальной мощности агрегата. Альтернативой является использование частотно-регулируемого электропривода (ЧРП), который позволяет изменять скорость вращения рабочего колеса насоса в соответствии с реальной потребностью в давлении или расходе, следуя законам подобия (напор $H \propto n^2$, мощность $H \propto n^3$). Целью данной работы являются анализ структуры и моделирование системы управления насосом на базе преобразователя частоты (ПЧ) со скалярным управлением и ПИД-регулятором для условий хвостохранилища [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследование выполнено путем компьютерного моделирования в среде Matlab/Simulink. Разработана имитационная модель, включающая модели преобразователя частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором и центробежного насоса с квадратичной нагрузкой ($M_c = M_{c0} + k \cdot \omega^2$). В качестве объекта моделирования принят насосный агрегат мощностью, соответствующей рабочим параметрам давления 5,8 МПа и питанию 6 кВ. Проведена серия численных экспериментов по отработке системой пуска, выхода на режим и реакций на ступенчатые возмущения давления. Осуществлена настройка коэффициентов ПИД-регулятора.

ПРИНЦИПЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЧРП

Основным преимуществом применения ПЧ для управления центробежными насосами является реализация закона квадратичной зависимости U/f. Благодаря этой характеристике магнитный поток двигателя остается постоянным, что минимизирует потери в стали и меди. Потери энергии при дроссельном регулировании обусловлены необходимостью гашения избыточного напора на регулирующих клапанах и задвижках. Теоретически и экспериментально доказано, что передача функции регулирования давления самому насосному агрегату путем изменения частоты вращения позволяет исключить дополнительные гидравлические сопротивления.

Помимо энергосбережения современные ПЧ (например, PowerFlex 7000) обладают рядом функций, повышающих надежность:

– встроенный ПИД-регулятор позволяет организовать замкнутый контур управления по показаниям технологического датчика давления (или уровня);

– подхват вращающегося двигателя обеспечивает синхронизацию с вращающимся по инерции двигателем при кратковременном пропадании питания, исключая гидроудары и пусковые токи;

– пропускаемые частоты предотвращают длительную работу привода на частотах, вызывающих резонанс в системе «насос – трубопровод».

Функциональная схема системы управления представлена на *рис. 1*. Задатчик интенсивности обеспечивает плавные пуски и остановы, ПИД-регулятор на основе обратной связи от датчика давления формирует задание на частоту, которое реализуется блоком скалярного управления ПЧ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ В MATLAB/SIMULINK

Для анализа динамических режимов работы насосного агрегата была разработана имитационная модель в пакете Matlab/Simulink (*рис. 2*). Модель включает в себя три основные части: модель преобразователя частоты, модель асинхронного двигателя и модель нагрузки (насос и трубопровод).

В работе рассматривается скалярная система управления, где ПЧ реализует закон $U/f = \text{const}$. Модель ПЧ построена на базе трехфазного автономного инвертора

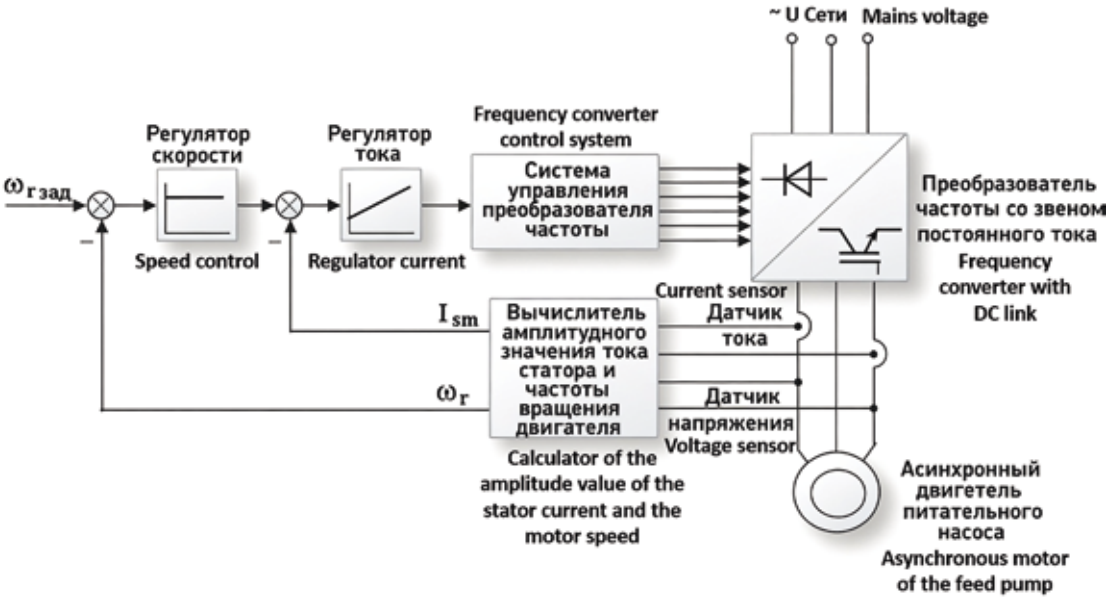

Рис. 1. Функциональная схема системы управления электроприводом питательного насоса

Fig. 1. Functional diagram of the feed pump electric drive control system

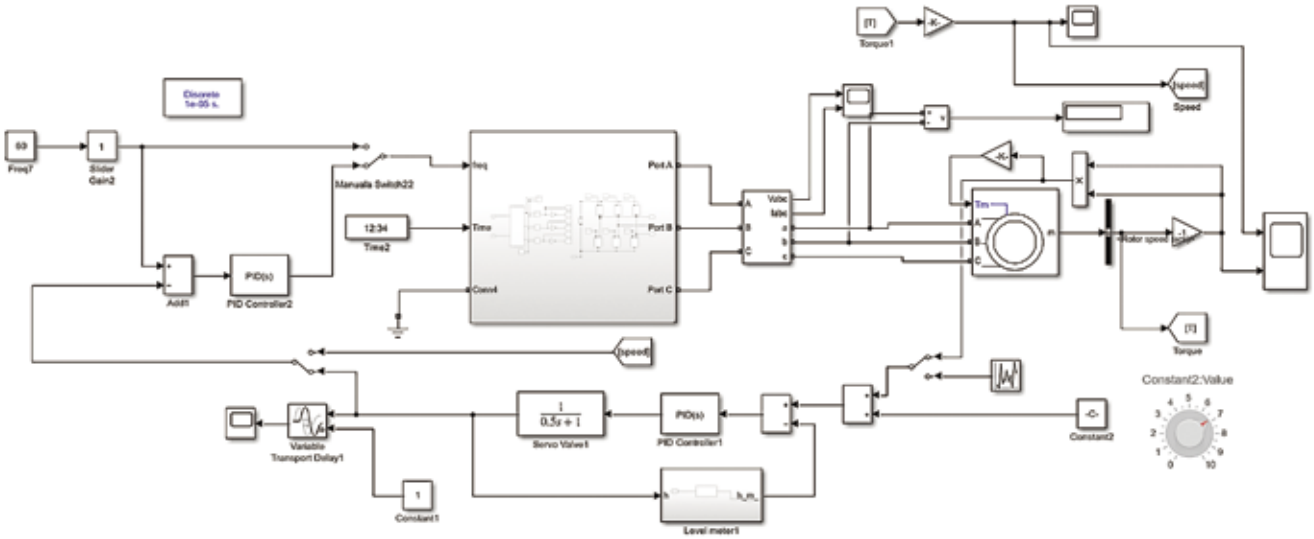

Рис. 2. Структурная схема модели насосной установки в Matlab/Simulink

Fig. 2. Structural diagram of the pumping unit model in Matlab/Simulink

напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Силовые ключи (IGBT-транзисторы) коммутируются сигналами, формируемыми блоком сравнения опорного синусоидального сигнала заданной частоты и пилообразного сигнала несущей частоты.

Асинхронный двигатель представлен моделью из библиотеки Simscape Electrical. Нагрузка на валу двигателя, создаваемая центробежным насосом, имеет квадратичную зависимость от частоты вращения:

$$M_c = M_{c0} + k \cdot \omega^2,$$

где $k_{нас}$ – коэффициент аппроксимации нагрузки насоса, ω – угловая скорость. Параметры модели соответствуют насосу, работающему в системе с номинальным давлением 5,8 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В процессе моделирования решались две основные задачи: оценка пусковых режимов и отработка возмущений системой автоматического регулирования (САР) с ПИД-регулятором.

На *рис. 3* представлены результаты моделирования прямого пуска и разгона двигателя с вентиляторной нагрузкой. Процесс разгона до номинальной частоты вращения (соответствующей 50 Гц) занимает 1,5 с. Благодаря плавному нарастанию задания от задатчика интенсивности бросок электромагнитного момента двигателя не превышает допустимых значений, что исключает возникновение гидравлического удара в трубопроводе.

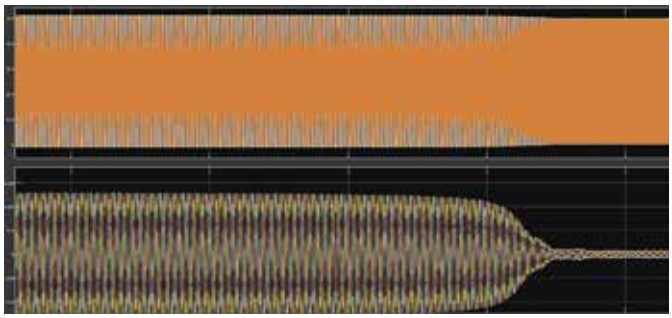

Рис. 3. Переходные процессы в системе при пуске и разгоне: частота вращения (n), давление (P)

Fig. 3. Transient processes in the system during start-up and acceleration: speed (n), pressure (P)

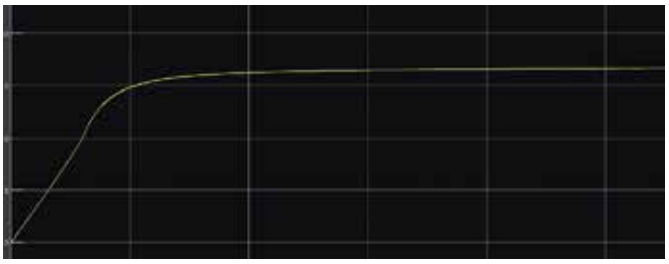

Рис. 4. Переходные процессы в системе с ПИД-регулятором ($K_p = 3,\ K_i = 0{,}1,\ K_d = 0{,}0001$): изменение частоты вращения и давления при отработке возмущения

Fig. 4. Transient processes in the system with a PID controller ($K_p = 3,\ K_i = 0{,}1,\ K_d = 0{,}0001$): change in speed and pressure during disturbance rejection

Давление в системе P плавно увеличивается и достигает номинальных 5,8 МПа к моменту выхода на установившуюся скорость.

НАСТРОЙКА ПИД-РЕГУЛЯТОРА И ОТРАБОТКА ВОЗМУЩЕНИЙ

Ключевым этапом исследования стал подбор коэффициентов ПИД-регулятора для обеспечения качественного регулирования давления. Моделировалась ситуация ступенчатого изменения задания или возмущения по нагрузке (имитация открытия/закрытия задвижки).

В ходе экспериментов было установлено, что пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор с коэффициентами $K_p = 1,\ K_i = 1,\ K_d = 0{,}001$, приводит к возникновению значительных колебаний скорости и давления в системе, что делает процесс регулирования неприемлемым.

Оптимальные настройки, обеспечивающие наилучшее качество переходного процесса, были получены при значениях $K_p = 3,\ K_i = 0{,}1,\ K_d = 0{,}0001$. На *рис. 4* представлена реакция системы на возмущение при данных настройках.

Анализ осциллограмм показывает, что система отрабатывает возмущение примерно за 1 секунду. Перерегулирование не превышает 5%, а статическая ошибка регулирования отсутствует благодаря наличию интегральной составляющей. Это полностью удовлетворяет требованиям к точности поддержания давления (не хуже ±0,65%).

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ: ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ POWERFLEX 7000

В качестве базового элемента системы управления предлагается использовать высоковольтный преобразователь частоты PowerFlex 7000 (Rockwell Automation), предназначенный для работы в сетях 6 кВ. Его основные параметры приведены в *таблице*. Применение данного ПЧ обеспечивает высокую надежность благодаря модульной конструкции и использованию запираемых GTO-тиристоров в силовых цепях инвертора.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования, опираясь на разработанную имитационную модель и полученные количественные данные, можно сделать следующие выводы:

Энергоэффективность. Применение ЧРП со скалярным управлением и ПИД-регулятором позволяет снизить энергопотребление насосного агрегата на 35-50%. Это достигается за счет работы двигателя в соответствии с реальной гидравлической потребностью системы, исключения потерь на дроссельных элементах и реализацией кубической зависимости потребляемой мощности от частоты вращения ($H \infty n^3$).

Качество регулирования. Путем подбора коэффициентов в модели определены оптимальные настройки ПИД-регулятора ($K_p = 3,\ K_i = 0{,}1,\ K_d = 0{,}0001$). Данные настройки обеспечивают высокую точность поддержания давления: время отработки возмущения составляет ≈1 с, перерегулирование не превышает 5%, статическая ошибка отсутствует, что соответствует требуемой точности не хуже ±0,65% от заданного значения (5,8 МПа).

Надежность. Моделирование подтвердило, что плавный разгон двигателя (длительностью 1,5 с) исключает гидроудары и пусковые токи, что в комплексе с функциями ПЧ (подхват вращающегося двигателя, пропуск резонансных частот) значительно продлевает срок службы механического и гидравлического оборудования.

Основные параметры системы регулирования

The main parameters of the control system

Наименование / Name	Значение / Value
Питание / Power supply	3 фазы / phases, 6 кВ / kV, 50 Гц / Hz
Выход / Output	0...6 кВ / kV, 0...50 Гц / Hz
Перегрузочная способность / Overload capacity	110% (120 с / s)
КПД / Efficiency	0,97
Коэффициент мощности на входе / Input power fator	0,95

Практическая значимость. Разработанная модель может быть использована на этапе проектирования для выбора оптимальных параметров системы управления насосной станции хвостохранилища, такого как комбинат «Катока», без необходимости проведения натурных экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель подтверждает, что применение ЧРП с ПИД-регулятором позволяет снизить энергопотребление насосного агрегата на 35-50% по сравнению с дроссельным регулированием за счет приведения частоты вращения к фактической потребности (кубическая зависимость мощности от частоты). Система обеспечивает требуемую точность поддержания давления (отклонение не более ±0,65%) и исключает аварийные режимы, что повышает надежность оборудования хвостохранилища.

Список литературы • References

1. Гусев В.А., Харькин В.А. Мониторинг состояния хвостохранилищ горнорудных предприятий с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022;19(3):175-187. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-175-187.
   Gusev V.A., Kharkin V.A. Monitoring of the state of tailings dumps of mining enterprises using remote sensing data. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2022;19(3):175-187. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-175-187. (In Russ.).
2. Крупская Л.Т., Дербенцева А.М., Крупский А.В**.** Проблемы ликвидации накопленного экологического ущерба при разработке рудных месторождений // Тихоокеанская геология. 2023;42(4):98-110. DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-4-98-110.
   Krupskaya L.T., Derbentseva A.M., Krupsky A.V**.** Problems of Liquidation of Accumulated Environmental Damage in the Development of Ore Deposits. *Pacific Geology*. 2023;42(4):98-110. DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-4-98-110. (In Russ.).
3. Макаров А.Б., Таловская А.В., Язиков Е.Г**.** Эколого-геохимическая оценка состояния компонентов природной среды в зоне влияния хвостохранилищ горнорудного производства // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2022;(2):72-83. DOI: 10.31857/S0869780922020055.
   Makarov A.B., Talovskaya A.V., Yazikov E.G**.** Ecological and geochemical assessment of the state of the components of the natural environment in the zone of influence of tailings of mining production dumps. *Engineering geology, hydrogeology, geocryology.* 2022;(2):72-83. DOI: 10.31857/S0869780922020055. (In Russ.).
4. Пашкевич М.А., Петрова Т.А**.** Геоэкологическая оценка воздействия горнопромышленного комплекса на поверхностные водные объекты // Записки Горного института. 2024;(265):89-100.
   Pashkevich M.A., Petrova T.A**.** Geoecological assessment of the impact of the mining complex on surface water bodies. *Notes of the Mining Institute*. 2024;(265):89-100. (In Russ.).
5. Хаустов В.В., Редина М.М**.** Анализ рисков загрязнения водных объектов при эксплуатации хвостохранилищ в криолитозоне // Криосфера Земли. 2023:27(2):45-55. DOI: 10.15372/KZ20230204.
   Khaustov V.V., Redina M.M**.** Analysis of the risks of pollution of water bodies during the operation of tailings in the permafrost zone. *Cryosphere of the Earth.* 2023;27(2):45-55. DOI: 10.15372/KZ20230204. (In Russ.).
6. Bussière B., Guittonny M. Hydrogeotechnical characterization of tailings storage facilities. *Canadian Geotechnical Journal*. 2022;59(7):1150-1167. DOI: 10.1139/cgj-2021-0279.
7. Ivulo F., Montero-Peña J.M**.** El desarrollo sustentable de la minería del diamante en Lunda Sul, Angola. *Minería y Geología*. 2024;40(4):343-355.
8. Komnitsas K. Assessment of the long-term environmental performance of mine tailings. *Journal of Sustainable Mining*. 2022;21(3):188-199. DOI: 10.46873/2300-3960.1356.
9. Ruppen D., Runnalls J., Tshimanga R.M., Wehrli B., Odermatt D. Optical remote sensing of large-scale water pollution in Angola and DR Congo caused by the Catoca mine tailings spill. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023;(118):103237. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103237.
10. Schoenberger E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. *Resources Policy.* 2023;(81):103361. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103361.

Authors Information

Tshipungu E.A. – Postgraduate Student, National Research University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation,
e-mail: tchipungo369@mail.ru

Shatunova V.M. – Student of the Department of ACS, National Research University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS), Moscow, 119049, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 1.09.2026
Поступила после рецензирования: 17.09.2026
Принята к публикации: 30.09.2026

Paper info

Received September 1, 2026
Reviewed September 17, 2026
Accepted September 30, 2026