

Научная статья

УДК 622-331

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19

Коржев Александр Александрович^{1,*}, Толстикова Мария Вячеславовна¹,
Ватлина Анна Михайловна³¹Санкт-Петербургский горный университет²ООО «Сигнал», 196084, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Рощинская, д. 5

*E-mail: Korzhev_AA@pers.spmi.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПУЛЬПОНАСОСА ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ПЕРЕКАЧИВАЕМОЙ ЖИДКОСТИ****Информация о статье**

Поступила:

18 декабря 2022 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 апреля 2023 г.

Принята к печати:

27 апреля 2023 г.

Опубликована:

17 мая 2023 г.

Ключевые слова:*гидротранспорт, пульпа, грунтовый насос, электропривод, концентрация, твердая фаза, энергоэффективность, моделирование.***Аннотация.**

Поставлена задача создания математической модели динамических процессов в системах гидротранспорта, учитывающей влияние на режим работы электропривода при различных значениях концентрации и плотности твердого вещества в пульпе, а также возможность регулирования скорости вращения насосных агрегатов. На основе анализа известных работ сделан вывод об актуальности этой задачи. Была разработана математическая модель динамики системы, включающая в себя: насосный агрегат с регулируемым электроприводом на основе асинхронного электродвигателя и преобразователя частоты, центробежный насос и трубопровод, по которому перемещается пульпа, с изменяющимися значениями концентрации и плотности твердого вещества. На основе математической модели построена имитационная модель в системе OpenModelica, построены графики зависимостей скорости двигателя, момента на валу двигателя, напора в трубопроводе, объемного расхода транспортируемой гидро-смеси, мощности на валу двигателя от переменных значений концентрации твердого вещества в составе пульпы. На основании полученных результатов сделаны выводы о работоспособности модели, ее адекватности, а также о целесообразности регулирования скорости вращения насоса в зависимости от концентрации твердого вещества в пульпе. Предполагается, что данная модель будет полезна при выборе грунтового насоса и режима работы его электропривода для предприятий, связанных с добычей, обогащением и транспортировкой руд, а также транспортировкой хвостов обогащения к хвостохранилищу или складочному комплексу. Модель может быть полезна для анализа работы существующих систем гидротранспорта, при создании систем управления гидротранспортом.

Для цитирования: Коржев А.А., Толстикова М.В., Ватлина А.М. Моделирование динамических процессов в системе электропривода пульпонасоса при переменной концентрации перекачиваемой жидкости // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 2 (166). С. 12-19. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19, EDN: SSLZTR

Введение

На горно-обогатительных предприятиях для транспортировки полезных ископаемых широко используется гидротранспорт на основе центробежных насосов, многие из которых оснащены регулируемым электроприводом. Подобные системы также могут использоваться при транспортировке гидросмеси в составе складочных комплексов при

относительно низкой концентрации твердого вещества в складочной смеси.

Функционирование гидротранспорта с минимальными потерями энергии и минимальным износом оборудования позволит снизить затраты на эксплуатацию, избежать серьезных аварий при внезапных поломках оборудования.

Для обеспечения такого режима работы необходимо, чтобы насос работал с нагрузкой, близкой к

номинальному значению, допускается отклонение не более 5-10% в ту или иную сторону. Однако характеристики центробежных насосов, как правило, приводятся изготовителем для случая перекачки воды при номинальной скорости вращения либо при ряде фиксированных значений скорости. На стадии проектирования не всегда возможно выбрать насосный агрегат и заданную скорость работы приводного двигателя, обеспечивающие указанное выше требование. Кроме того, концентрация твердого в пульпе и плотность твердого изменяются в процессе эксплуатации в широких пределах. В связи с этим необходима система управления, позволяющая поддерживать заданный режим работы насосного оборудования в зависимости от свойств пульпы, указанных выше.

Существует ряд работ, в которых приводятся теоретические и экспериментальные зависимости тех или иных параметров пульпы между собой, их влияние на нагрузку приводных двигателей, однако отсутствует единая математическая модель динамики гидротранспортной системы, учитывающая как процессы в трубопроводе и насосном агрегате, так и процессы, происходящие в электроприводе насосного агрегата при их совместной работе.

Таким образом, актуальной задачей является создание математической модели, позволяющей оценить фактические энергетические показатели работы гидросистемы, в том числе в переходных режимах работы, влияние на них концентрации пульпы и плотности твердого в ней. Эта модель может быть полезна при создании систем автоматического управления электроприводами пульпонасосов, а также для оценки энергоэффективности существующих систем, либо при выборе электромеханического оборудования и режима работы регулируемых электроприводов насосных агрегатов на стадии проектирования новых гидротранспортных систем. Для оценки работоспособности и адекватности математической модели необходима ее реализация на ЭВМ, для чего авторы используют программную среду OpenModelica, к достоинствам которой можно отнести свободное распространение, универсальность и большое количество библиотек элементов, распространяемых свободно. Оценка адекватности выполняется путем сравнения полученных характеристик с известными из литературы и полученными экспериментально в лабораторных и промышленных условиях.

1. Теоретические исследования

Характеристику центробежного насоса и характеристику сети можно описать выражениями (1) и (2) соответственно

$$H_H = H_{H0} - r_H Q^2, \quad (1)$$

$$H_c = H_{c0} + r_c Q^2. \quad (2)$$

В установленном режиме работы формула примет следующий вид

$$H_c = H_H = H, \quad (3)$$

что соответствует точке пересечения характеристик насоса и сети.

Обозначив $T = Q^2$, получим уравнения

$$H_H = H_{H0} - r_H T \quad (4)$$

и характеристику сети

$$H_c = H_{c0} - r_c T. \quad (5)$$

Непосредственное моделирование уравнений (4), (5) в виде структурной схемы затруднительно, так как отсутствует постоянная времени, а это приводит к возникновению «алгебраической петли». Для решения данной задачи дополним уравнение сети малой постоянной времени L_c , много меньшей механической постоянной времени привода, тогда уравнение (5) примет вид

$$T = \frac{1}{L_c s} (H - H_c - r_c T), \quad (6)$$

где s – оператор Лапласа.

При частотном регулировании [1-4, 19] для напора и гидравлического сопротивления насоса справедливы формулы

$$H'_{H0} = \frac{H_{H0}}{\omega_H^2} \omega^2, \quad (7)$$

$$r'_H = r_H. \quad (8)$$

Для связи модели насоса с моделью электропривода необходимо определить момент двигателя, который можно найти, вычислив предварительно гидравлическую мощность

$$P_H = \frac{\rho g H Q}{\eta}, \quad (9)$$

$$M = \frac{P_H}{\omega} \quad (10)$$

Коэффициент полезного действия насоса связан с относительными расходом и скоростью вращения его вала согласно выражению [5,6, 23-25]

$$\eta = \eta_H \left(1 - k \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 \right) \left(1 - \left(1 - \frac{Q}{Q_H} \right)^a \right) \right), \quad (11)$$

коэффициенты в формуле определяются эмпирически.

Модель, задаваемая выражениями (1)-(11), при перекачке пульпы переменной плотности нуждается в коррекции [7-11]. В качестве основного параметра, характеризующего свойства пульпы, примем концентрацию твердого

$$c_p = \frac{m_{mв}}{m_{mв} + m_b} = \frac{m_{mв}}{m_{cm}}. \quad (12)$$

Для расчета действительной объемной концентрации можно воспользоваться выражением

$$C_0 = \frac{c_p}{p_{mв} - c_p(p_{mв} - 1)}. \quad (13)$$

Плотность смеси можно определить из выражения

$$c_0 = \frac{p_{cm} - p_b}{p_{mв} - p_b}, \quad (14)$$

$$p_{cm} = c_0 p_{mв} - c_0 p_b + p_b. \quad (15)$$

Потери напора в трубопроводе равны [12, 19]

$$I = \lambda \frac{v^2 p_{cm}}{2g p_b}, \quad (16)$$

где

$$v = \frac{4Q}{\pi D}. \quad (17)$$

Сопротивление сети может быть найдено по формуле

$$r_c = I/Q^2, \quad (18)$$

λ – коэффициент потерь

$$\lambda = a c_p + b, \quad (19)$$

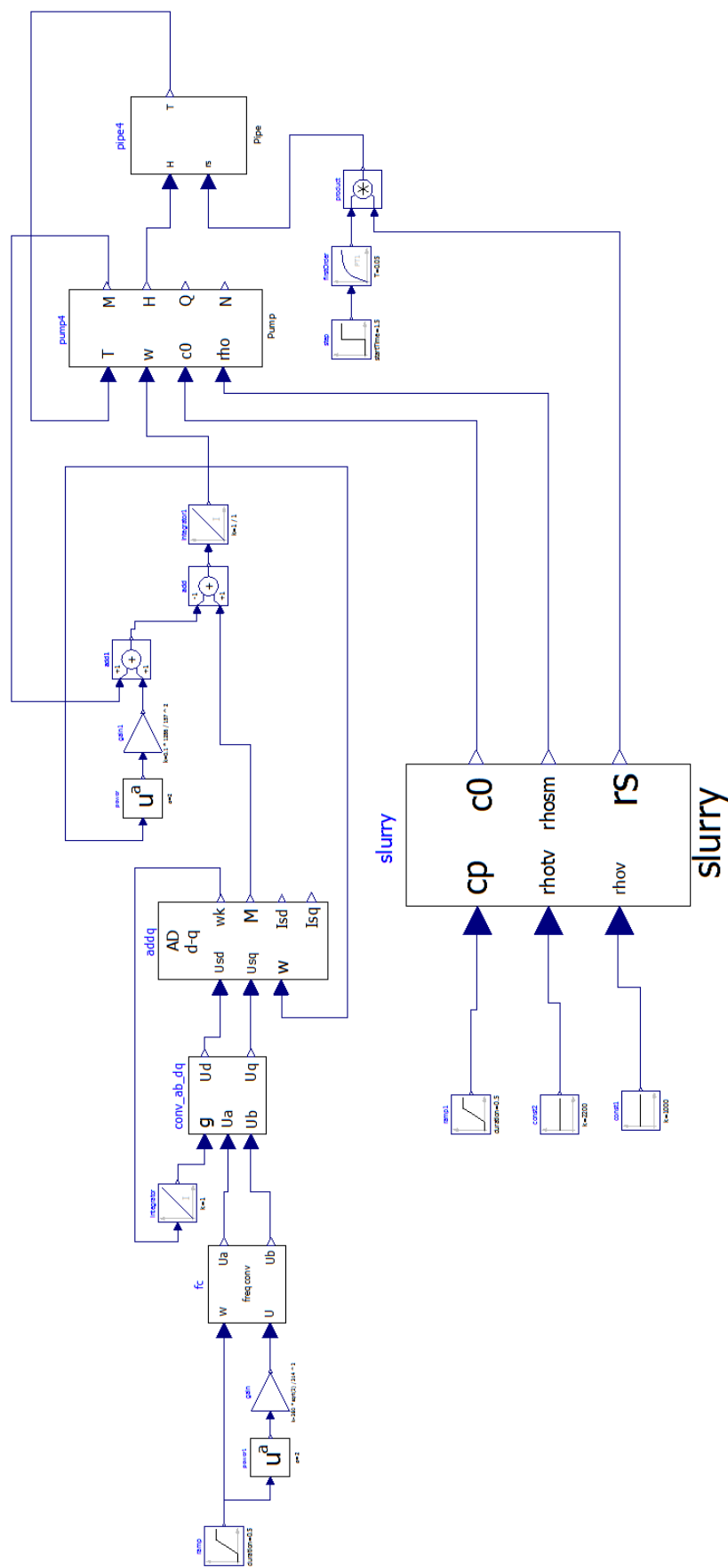


Рис. 1. Модель системы электропривода пульпонаса при переменной концентрации перекачиваемой жидкости

Fig. 1. Model of the electric drive system of the pulp pump at a variable concentration of the pumped liquid

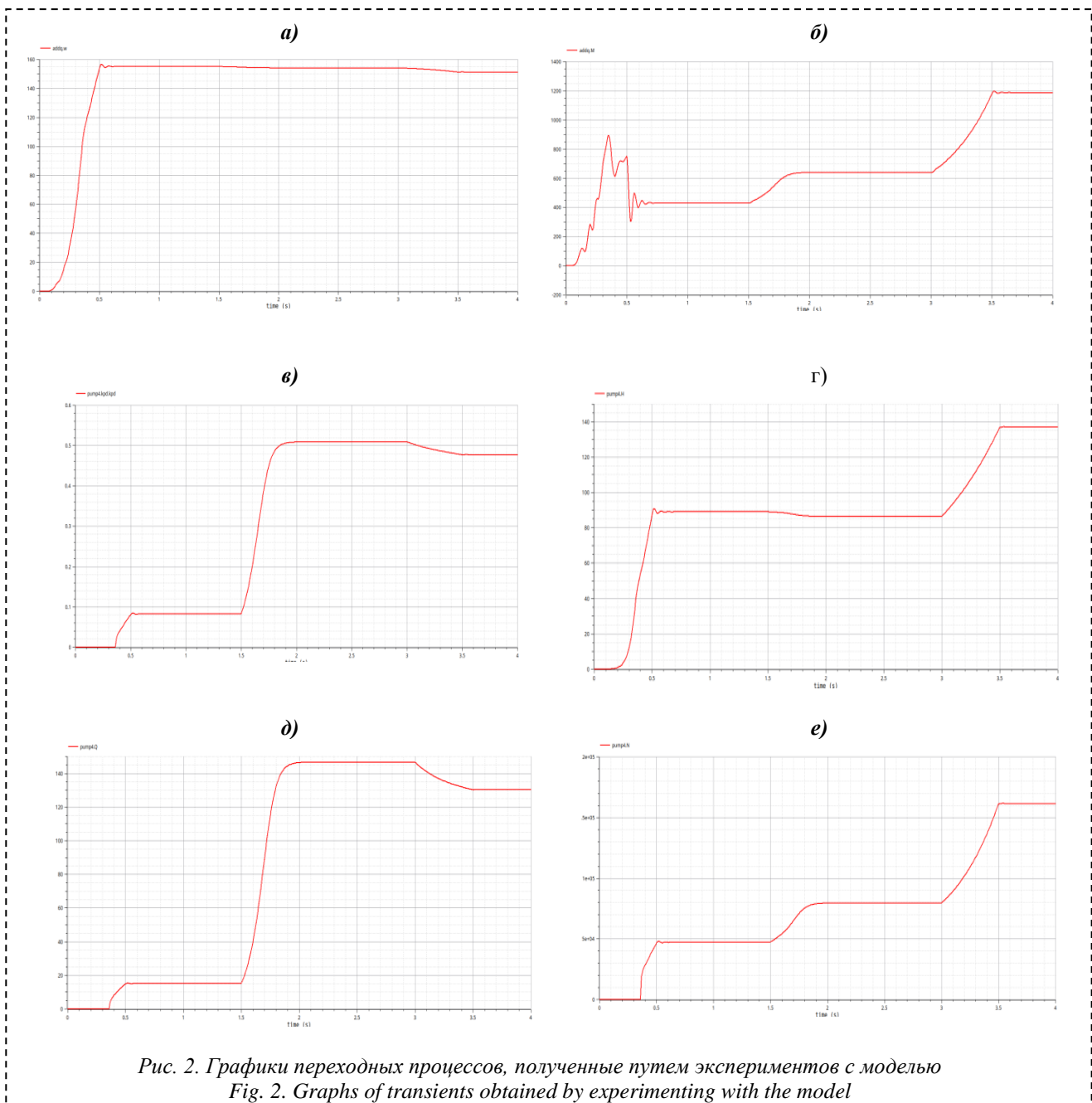


Рис. 2. Графики переходных процессов, полученные путем экспериментов с моделью
 Fig. 2. Graphs of transients obtained by experimenting with the model

где a , b – эмпирические параметры, зависящие от свойств пульпы и материала трубопровода.

Из выражений (13)-(19) получаем:

$$r_c = k_r (ac_p + b) \frac{p_{cm}}{p_B}, \quad (20)$$

$$k_r = \frac{8}{g\pi^2 D^3}. \quad (21)$$

Согласно [9, 17-18] для напора насоса справедливо

$$H_{cm} = k_0 H_B \left(1 + \frac{c_0^{1,2}}{\sqrt{\psi}} \right), \quad (22)$$

где ψ – крупность твердого в смеси, $k_0 = 1$ при выполнении условия

$$Q \leq Q_{Bmax} (1 - 1,65c_0). \quad (23)$$

2. Имитационное моделирование

Выражения (3), (6)-(13), (15), (20)-(22) стали основой для разработки имитационной модели пульпонасоса и трубопровода в среде OpenModelica, представленной на Рис. 1. Данная модель также

содержит модель асинхронного электродвигателя и преобразователя частоты, построенную во вращающейся системе координат d-q по известным выражениям [13-16, 20-22].

Для проверки адекватности модели моделировались следующие процессы: 0...0,5 с – плавный разгон насоса до номинальной скорости при закрытой задвижке, 1,5..2 с – открытие задвижки, 3...4 с – плавное увеличение концентрации пульпы от 0,3 до 0,7.

В качестве пульпонасоса был принят насос ГРАТ-225-67-3-2-2, реологические характеристики пульпы и соответствующие им коэффициенты в выражениях были приняты по данным экспериментальных исследований в условиях Качканарского ГОКа.

Были получены графики переходных процессов, показанные на Рис. 2: а) график изменения скорости приводного двигателя, рад/с; б) график момента

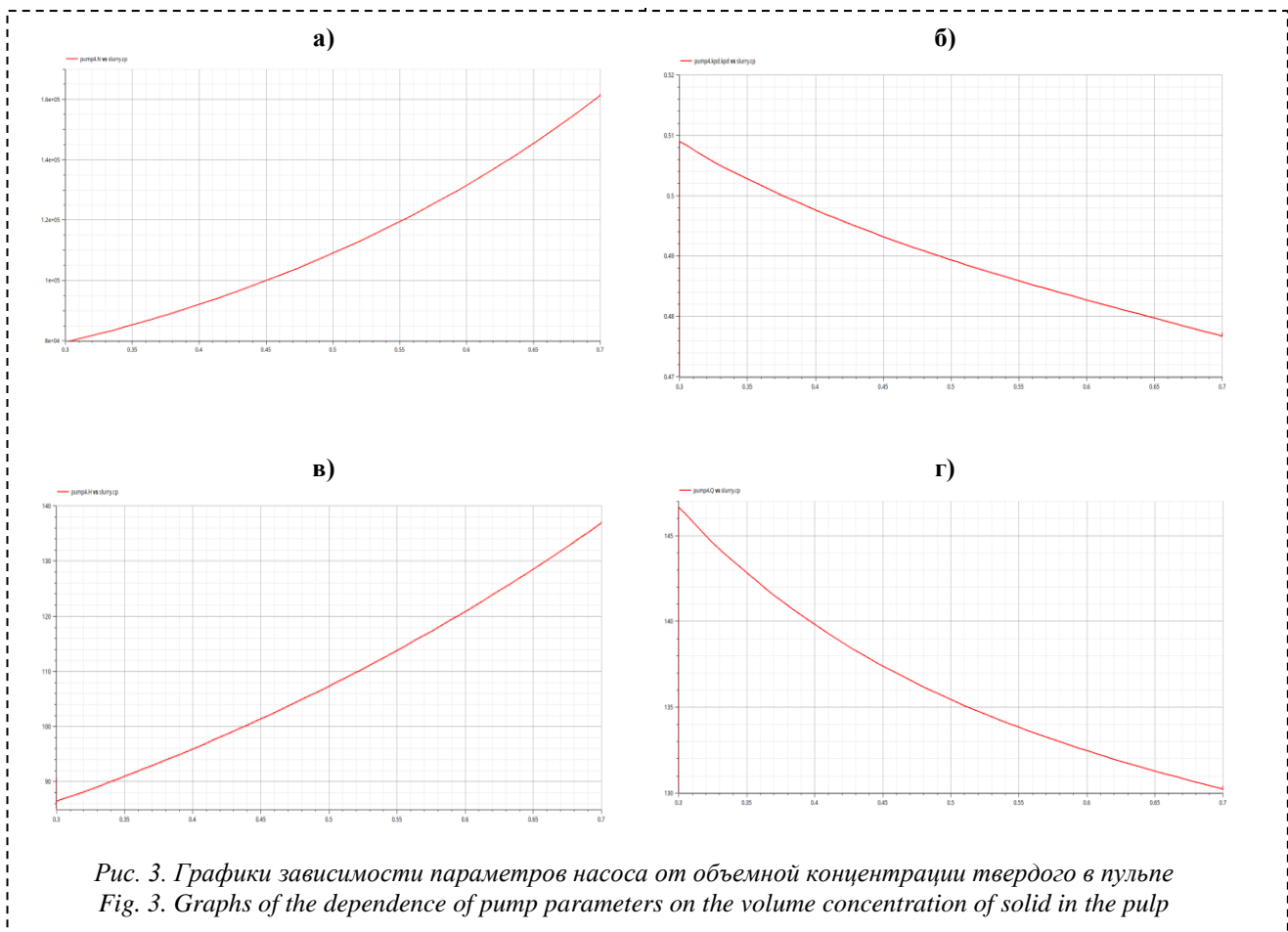


Рис. 3. Графики зависимости параметров насоса от объемной концентрации твердого в пульпе
 Fig. 3. Graphs of the dependence of pump parameters on the volume concentration of solid in the pulp

на валу приводного двигателя, Н·м; в) коэффициент полезного действия насоса; г) напор в трубопроводе, м; д) объемный расход перекачиваемой гидросмеси, м³/ч; е) мощность на валу приводного двигателя, Вт.

Из графиков видно, что модель адекватно воспроизводит характер переходных процессов при плавном пуске насоса на закрытую задвижку, процесс нарастания нагрузки при открытии задвижки, увеличение объемной концентрации твердого в пульпе от 0,3 до 0,7 объемных единиц. Установившиеся значения величин напора, расхода и мощности соответствуют расчетным.

По данным экспериментов также были построены графики зависимости параметров насоса от объемной концентрации пульпы, представленные на Рис. 3: а) мощность на валу приводного двигателя, б) коэффициент полезного действия, в) напор, г) расход перекачиваемой пульпы.

Заключение

В результате экспериментов с моделью установлено, что предлагаемая математическая модель и имитационная модель в системе OpenModelica работоспособна, адекватна объекту моделирования и позволяет оценить показатели энергоэффективности работы системы гидротранспорта. Эти модели могут быть полезны при проектировании новых систем регулируемого и нерегулируемого электропривода пульпонасосов, а также при анализе энергоэффективности работы систем гидротранспорта действующих горно-обогатительных комбинатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ещин Е. К. Детализация расчетов динамических режимов работы электроприводов горных машин // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 5. С. 35–39.
2. Иштуинов Д. В., Охапкин С. И. Расчет Q-H характеристик насосов с использованием аппроксимации методом наименьших квадратов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 3: в 5 ч. Ч. 2. С.23–28.
3. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Обеспечение устойчивости проходческого комбайна с двухкорончатым реверсивным рабочим органом // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 6. С. 3–7.
4. Jan A. Melkebeek. Electrical Machines and Drives. Fundamentals and Advanced Modelling. Cham (Switzerland): Springer International Publishing AG, 2018. P. 442.
5. Поспелов А. А., Виноградов В. Н., Зорин М. Ю., Ледуховский Г.В., Денисов Д.Г. Сравнительный анализ методик построения рабочих характеристик насосов с частотно-регулируемым электроприводом // Вестник ИГЭУ. 2007. Вып. 2.
6. Sen P. C. Principles of electric machines and power electronics. Chennai (India): John Wiley & Sons, Inc., 2014. P. 618.
7. Воробьев А. С. Повышение эффективности гидротранспорта полидисперсных смесей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 1. С. 377–380.

8. Поветкин В. В., Керимжанова М. Ф., Орлова Е. П., Букаева А. З. Совершенствование оборудования для транспортировки гидросмеси в обогательном производстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 6. С. 161–169. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-161-169

9. Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов П 59-72. Л.: «Энергия». Ленинградское отделение. 1972 г.

10. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование механотронных систем на ПК // СПб.: КОРОНА-Век. 2008. 368 с.

11. Korzhev A., Bolshunova O., Voytyuk I., Vatlina A. Mathematical simulation of transient operation modes of an electric drive of a centrifugal pump for a slurry pipeline E3S Web of Conferences 2019. 140. 04012

12. Alexandrov V., Vasilyeva M. Vasilyeva P. Efficiency of Using Polyurethane-lined Pipes in Hydrotransport Systems of Slurry Tailings // Journal of Physics. 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012002

13. Abramovich, B. N., Ustinov, D. A., Abdallah, W. J. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2022. 13(2). Pp. 1007–1025.

14. Babyr K. V., Ustinov D. A., Pelenev D. N. Improving Electrical Safety of the Maintenance Personnel in the Conditions of Incomplete Single-Phase Ground Faults // Bezopasnost Truda v Promyshlennosti. 2022. 2022(8). Pp. 55–61.

15. Sychev Yu. A., Prokhorova V. B., Aladin M. E. The modeling and analysis of the parameters of the non-sinusoidal modes // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1753(1).

16. Minakova T. E. Improving reliability of power supply of mineral-raw-material complex // Journal of Physics: Conference Series. 2021. 1753(1).

17. Kostin V. N., Minakova. T. E., Kopteva A. V. Urban substations transformers allowed loading // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. ElConRus. 2018. Pp. 692–695

18. Vasilev B. U., Shpenst V. A., Kalashnikov O. V. Ways of Telecommunications Interaction Arrangement for Microprocessor Devices of Different Types in Composition of Multi-Motor Electric Drives // Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 2(1015). С. 1–5.

19. Ещин Е. К. Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин // Записки горного института. 2018. Т. 233. С. 534–538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534

20. Sychev Y. A., Zimin R. Yu. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices // Journal of Mining Institute. 2021. 247(1). Pp. 132–140.

21. Докунин В. П., Вельниковский А. А. Повышение эффективности работы систем удаления отходов обогащения Удачинского ГОКа. Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 83.

22. Александров В. И., Собота И. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья. Записки Горного института. 2015. Т. 213. С. 9.

23. Александров В. И., Власак П. Методика расчета потерь напора при гидротранспорте сгущенных пульп хвостов обогащения руд. Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 38.

24. Васильев Б. Ю., Шпенст В. А., Калашников О. В., Ульянов Г. Н. Обеспечение энергетической развязки электроприводов и сетей электроснабжения промышленных электротехнических комплексов. Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 41. DOI: 10.25515/pmi.2018.1.41.

25. Васин С. А., Васильев А. С., Плахотникова Е. В. Методы оценки технической совместимости разнородных элементов в рамках технической системы. Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 329. DOI: 10.31897/pmi.2020.3.329.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Коржев Александр Александрович, кандидат техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), e-mail: Korzhev_AA@pers.spmi.ru

Толстикова Мария Вячеславовна, Санкт-Петербургский горный университет (199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), e-mail: Maria_Tolstikova@mail.ru

Ватлина Анна Михайловна, кандидат техн. наук, ООО «Сигнал» (196084, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Рошинская, д.5), e-mail: vatlina.anka@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Коржев А.А. – создание математической модели системы электропривода, помощь в создании математической модели системы «насос-пульпопровод» при переменной концентрации пульпы, разработка компьютерных моделей на ЭВМ, постановка задачи исследования.

Ватлина А.М. – создание математической модели системы «насос-пульпопровод» при переменной концентрации пульпы, участие в создании имитационной модели на ЭВМ и выполнении экспериментов с моделью, оценка адекватности модели, обобщение полученных результатов.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19

Aleksandr A. Korzhev ^{1,*}, Maria V. Tolstikova ¹, Anna M. Vatlina ²

¹Saint-Petersburg Mining University

²LLC "Signal"

*E-mail: Korzhev_AA@pers.spmi.ru

SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN THE ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF THE PULP PUMP WITH VARIABLE CONCENTRATION OF THE PUMPED LIQUID



Article info

Received:

18 December 2022

Accepted for publication:

15 April 2023

Accepted:

27 April 2023

Published:

17 May 2023

Keywords: hydraulic

transport, pulp, ground pump, electric drive, concentration, solid phase, energy efficiency, modeling.

Abstract.

The task was set to create a mathematical model of dynamic processes in hydrotransport systems, taking into account the influence of the concentration and density of solid matter in the pulp on the operation mode of the electric drive, as well as the possibility of controlling the speed of rotation of pumping units. Based on the analysis of known works, the conclusion was made about the relevance of this problem. The mathematical model of the system dynamics was developed, including: a pump unit with an adjustable electric drive based on an asynchronous electric motor and a frequency converter, a centrifugal pump and a pipeline through which the slurry moves with varying values of the concentration and density of the solid. On the basis of the mathematical model, a simulation model was built in the OpenModelica system, graphs of the dependences of the engine speed, torque on the engine shaft, pressure in the pipeline, volumetric flow rate of the transported slurry, power on the engine shaft on variable values of the concentration of solid matter in the composition of the pulp were plotted. Based on the results obtained, conclusions were drawn about the performance of the model, the adequacy of the model, as well as the feasibility of regulating the speed of rotation of the pump, depending on the concentration of solids in the pulp. It is assumed that this model will be useful in choosing a soil pump and the mode of operation of its electric drive for enterprises involved in extraction, enrichment and transportation of ores, as well as the transportation of enrichment tailings to a tailing dump or stowing complex. Also, the model can be useful for analyzing the operation of existing hydraulic transport systems, when creating hydraulic transport control systems.

For citation: Korzhev A.A., Tolstikova M.V., Vatlina A.M. Simulation of dynamic processes in the electric drive system of the pulp pump with variable concentration of the pumped liquid. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2023; 2(166):12-19 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-2-12-19, EDN: SSLZTR

REFERENCES

1. Eshchin E.K. Detailing calculations of dynamic modes of operation of electric drives of mining machines. *Mining equipment and electromechanics*. 2017; 5:35–39.
2. Ishutinov D.V., Okhapkin S.I. Calculation of Q-H characteristics of pumps using approximation by the method of least squares. *Izvestiya TulSU. Technical sciences*. 2010; 3(5),2:23–28.
3. Khoreshok A.A., Mametyev L.E., Tsekhin A.M., Borisov A.Yu. Ensuring the stability of a tunneling combine with a two-horned reversible working body. *Mining equipment and electromechanics*. 2016; 6:3–7.

4. Jan A. Melkebeek. *Electrical Machines and Drives. Fundamentals and Advanced Modelling*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing AG, 2018. P. 442.
5. Pospelov A.A., Vinogradov V.N., Zorin M.Yu., Ledukhovskiy G.V., Denisov D.G. Comparative analysis of methods for measuring the performance characteristics of pumps with a frequency-controlled electric drive. *IGEU Bulletin*. 2007; 2.
6. Sen P.C. *Principles of electric machines and power electronics*. Chennai (India): John Wiley & Sons. Inc. 2014. P. 618.

7. Vorobyev A.S. Improving the efficiency of hydrotransport of polydisperse mixtures. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2015; 1:377–380.

8. Povetkin V.V., Kerimzhanova M.F., Orlova E.P., Bukaeva A.Z. Improvement of equipment for transportation of hydraulic mixtures in enrichment production. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and Technical journal)* 2018; 6:161-169. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-161-169

9. Instructions for hydraulic calculations of pressure hydraulic transport systems of soils P 59–72. L.: Energy; Leningrad branch. 1972.

10. Herman-Galkin S.G. Matlab & Simulink. Designing of mechatronic systems on a PC. St. Petersburg: KORONA-Vek; 2008. 368 p.

11. Korzhev A., Bolshunova O., Voytyuk I., Vatlina A. Mathematical simulation of transient operation modes of an electric drive of a centrifugal pump for a slurry pipeline E3S Web of Conferences 2019; 140:04012.

12. Alexandrov V., Vasilyeva M. Vasilyeva P. Efficiency of Using Polyurethane-lined Pipes in Hydrotransport Systems of Slurry Tailings. *Journal of Physics*. 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1118/1/012002

13. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Abdallah W.J. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022; 13(2):1007–1025.

14. Babyr K.V., Ustinov D.A., Pelenev D.N. Improving Electrical Safety of the Maintenance Personnel in the Conditions of Incomplete Single-Phase Ground Faults. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti*. 2022, 2022(8):55–61.

15. Sychev Yu.A., Prokhorova V.B., Aladin M.E. The modeling and analysis of the parameters of the non-sinusoidal modes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1753(1).

16. Minakova T.E. Improving reliability of power supply of mineral-raw-material complex. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021; 1753(1).

17. Kostin V.N., Minakova T.E., Kopteva A.V. Urban substations transformers allowed loading. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering*. ElConRus. 2018; 692–695.

18. Vasiliev B.U., Shpenst V.A., Kalashnikov O.V. Ways of Telecommunications Interaction Arrangement for Microprocessor Devices of Different Types in Composition of Multi-Motor Electric Drives. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018; 2(1015):1–5.

19. Eshchin E.K. Calculations of dynamic modes of operation of electric drives of self-propelled mining machines. *Notes of the Mining Institute*. 2018; 233:534–538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534

20. Sychev Y.A., Zimin R.Yu. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *Journal of Mining Institute*. 2021; 247(1):132–140.

21. Dokunin V.P., Velnikovsky A.A. Improving the efficiency of waste disposal systems of the Udachninsky GOK enrichment. *Notes of the Mining Institute*. 2011; 189:83.

22. Alexandrov V.I., Sobota J. Specific energy intensity of hydraulic transportation of mineral processing products. *Notes of the Mining Institute*. 2015; 213:9.

23. Alexandrov V.I., Vlasak P. Methodology for calculating pressure losses during hydraulic transport of condensed pulps of ore dressing tailings. *Notes of the Mining Institute*. 2015; 216:38.

24. Vasiliev B.Y., Shpenst V.A., Kalashnikov O.V., Ulyanov G.N. Ensuring the energy decoupling of electric drives and power supply networks of industrial electrical complexes. *Notes of the Mining Institute*. 2018; 229:41. DOI: 10.25515/pmi.2018.1.41

25. Vasin S.A., Vasiliev A.S., Plakhotnikova E.V. Methods for assessing the technical compatibility of heterogeneous elements within a technical system. *Notes of the Mining Institute*. 2020; 243:329. DOI: 10.31897/pmi.2020.3.329

© 2023 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The author declare no conflict of interest.

About the author:

Korzhev Alexander Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, St. Petersburg Mining University (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line, d. 2), e-mail: Korzhev_AA@pers.spmi.ru

Tolstikova Maria Vyacheslavovna, St. Petersburg Mining University (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilievsky Island, 21 line 2), e-mail: Maria_Tolstikova@mail.ru

Vatlina Anna Mikhailovna, LLC "Signal" (196084, Russia, St. Petersburg, Roshchinskaya str., 5), e-mail: vatlina.anka@yandex.ru

Contribution of the authors:

Korzhev A.A. – creation of a mathematical model of an electric drive system, assistance in creating a mathematical model of a pump-pulp pipeline system with variable pulp concentration, development of computer models on a computer, formulation of a research problem.

Vatlina A.M. – creation of a mathematical model of the pump-pulp pipeline system with variable pulp concentration, participation in the creation of a simulation model on a computer and performing experiments with the model, assessment of the adequacy of the model, generalization of the results obtained.

Tolstikova M.V. – analysis of literary sources, the design of the article, the design of accompanying documents, assistance in the design of graphic materials.

Author have read and approved the final manuscript.

