

Елена Назарова, канд. техн. наук
Ирина Мелешко, аспирант

Моделирование особенностей возникновения завалов пневмотранспортных систем

Аннотация. Учитывая затраты электроэнергии и объемы производства при пневмотранспортировке сыпучих материалов, актуальным является снижение расхода сжатого воздуха, учет при разработке систем автоматического управления потери давления, влияющей на возникновения завалов, на выходе пневмотрассы. Разработаны модели электропривода пневмотранспортной системы, получены графики электромеханических процессов, подтверждающие её адекватность. Использование названных моделей позволит сэкономить время и средства на проведение предварительных экспериментов при разработке новых и модернизации существующих пневмотранспортных систем.

Ключевые слова: пневмотранспортная система, завал, сыпучие материалы, система управления, энергоэффективность.

Olena Nazarova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Iryna Meleshko, Postgraduate

Modeling of the occurrence of blockages in pneumatic transport systems peculiarities

Annotation. Considering the cost of electricity and production volumes during pneumatic transportation of bulk materials, it is relevant to reduce the consumption of compressed air, to take into account when developing automatic control systems, the pressure loss affecting the occurrence of blockages at the outlet of the pneumatic line. Models of an electric drive of a pneumatic transport system have been developed, graphs of electromechanical processes have been obtained, confirming its adequacy. The use of these models will save time and money for preliminary experiments in the development of new and modernization of existing pneumatic transport systems.

Keywords: pneumatic transport system, blockage, bulk materials, control system, energy efficiency.

Введение. Пневматический способ транспортировки сыпучих материалов широко распространен на предприятиях металлургической, горной, энергетической, химической, фармацевтической промышленности, в агропромышленном комплексе и строительстве [1-2]. Трубопроводный транспорт составляет 30 % всех промышленных транспортных систем, что обуславливает актуальность рассматриваемой тематики. Развитие технологий транспортирования сыпучих материалов направлено на снижение удельной стоимости транспортирования одной тонны сыпучего материала за счет снижения потребления электроэнергии в процессе транспортирования; работы с минимально допустимым давлением в пневмотрассе, позволяющей выбрать электродвигатель меньшей мощности, что при таких объемах производства даёт значительный экономический эффект [3].

Недостатком пневмотранспортных систем (ПТС) является вероятность запаздывания при реакции системы автоматического управления (САУ) на изменение давления и, как следствие, возникновения завалов трубопровода сыпучим материалом, что вызывает остановку технологического процесса, простой оборудования и значительные материальные убытки [4]. Энергоемкость процесса транспортирования при пневматическом способе перемещения сыпучих

материалов, конструктивные особенности трубопроводов [5-6] и комплектующего оборудования, технические параметры пневмотранспортных установок во многом зависят от режимов движения сыпучих материалов, возможности автоматизации процессов их транспортирования. Удельный расход электроэнергии и износ трубопровода, определяет его эффективность и зависят от используемого режима транспортирования. Оптимизация электромеханических процессов перемещения сыпучих материалов, а также создание энергосберегающих способов пневматического транспорта, работающего в его нестабильных режимах, является актуальной задачей.

Цель работы - моделирование особенностей возникновения завалов в пневмотранспортных системах при транспортировке сыпучих материалов, сопровождающихся потерей давления на выходе пневмотранспортной системы.

Материалы исследования.

С целью исследования изменения давления в пневмотранспортной магистрали проведены замеры в условиях обычного функционирования объекта на ОАО «Запорожский алюминиевый комбинат», где объектом исследования была часть пневмотрассы (рис. 1) от камерного питателя (КП) до приемного бункера (ПБ) электролизного цеха [7].

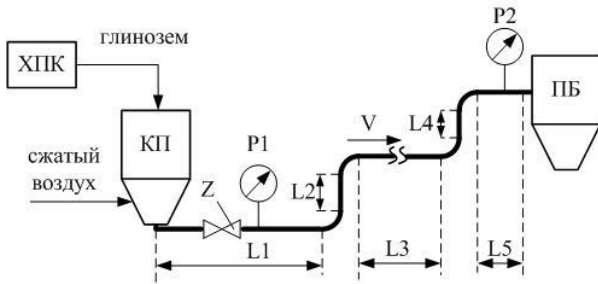


Рис.1. Структурная схема экспериментального участка ПТС

Было обнаружено, что снижение давления на выходе ПТС уменьшает энергоэффективность системы в целом, а также может привести к закупориванию сыпучим материалом транспортирующего трубопровода [7].

Компрессор характеризуется газодинамическими характеристиками (зависимость давления от расхода). Если взять какую-либо точку на статической характеристике нагнетателя, то можно проследить ее траекторию движения при изменении частоты вращения компрессора [8].

Рассмотрим математическую модель компрессорной установки по второму контуру расхода воздуха (Q). Следовательно, стабилизировать на основании установки будем расход воздуха на данном этапе модель представлена без учета задвижек и второго контура по давлению, а также перегрева двигателя, так как это реализуется аппаратно помощью теплового реле, таким образом, исследован изотермический процесс [9]. Простейшая теория компрессорных машин, обладающая приемлемой точностью, основывается на термодинамике идеального газа. В данном случае используется закон Бойля-Мариотта, то есть объем газа пропорционален давлению при постоянной температуре

$$PV = const, T = const.$$

Для реализации центробежного компрессора в одиночных трубопроводах используется аperiодическое звено второго порядка, в данной системе запаздывание не учитывается. Таким образом, передаточная функция компрессора, в которой входным сигналом является угловая скорость вращения вала приводного двигателя, а выходным сигналом является расход, выглядит следующим образом

$$W_K(p) = \frac{\omega_0(p)}{Q(p)} = \frac{K}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (1)$$

где: T_1, T_2 – постоянные времени компрессора, K – коэффициент усиления передаточной функции ком. Математическая модель трубопровода с жидкостью состоит из равенства расходов на входе (узел i) и выходе (узел j) и уравнения потерь давления по длине и имеет вид (2) [10]. При

рассмотрении пневмотранспортировки смеси воздуха с глиноземом принято допущение, что смесь с некой усредненной плотностью (псевдожидкость) можно рассматривать как жидкость

$$\begin{cases} Q_i = Q_j, \\ P_j = P_i - \lambda \frac{8\rho L_{tr}}{\pi^2 D_{tr}^5} Q_i |Q_i|. \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2) L_{tr}, D_{tr} – длина и диаметр трубопровода; ρ – плотность рабочей жидкости; λ – коэффициент потерь давления по длине трубопровода

$$\lambda = \begin{cases} 75/Re \text{ при } Re \leq 2300, \\ 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \text{ при } Re > 2300, \end{cases}$$

где: Re – число Рейнольдса

$$Re = \frac{4|Q_i|}{\pi \cdot D_{tr} \cdot \nu}, \quad (3)$$

где: ν – кинематическая вязкость; $\nu = \eta / \rho$, η – динамическая вязкость жидкости; η (воздуха) = $1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с; ρ (глинозема) – 3,5-3,9 г/см; $L_{tr} = L_e = 370$ м; $D_{tr} = D = 0,143$ м.

При разработке новых и модернизации существующих САУ ПТС целесообразно использовать математические и компьютерные модели этих систем, что позволит сэкономить время и средства на проведение предварительных экспериментов [11-13]. Упрощенная функциональная схема электропривода пневмотранспортной системы показана на рис. 2, где САУ – система автоматического управления; Д – приводной двигатель (СТД-1600-24ХЛ4); К – компрессор (К-250-61-2 – многоступенчатый центробежный компрессор); Z – управляемая задвижка; P1, P2 – датчики давления на входе и выходе ПТС соответственно; ПТС – пневмотранспортная система, учитывающая траекторию и геометрические размеры; ПБ – приемный бункер.

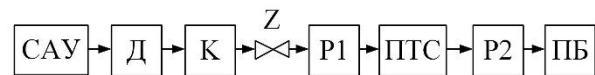


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема электропривода пневмотранспортной системы

Для описания динамических режимов работы синхронного электродвигателя (СД) при любом способе управления его скоростью удобно

обратиться к модели обобщённой двухфазной машины переменного тока [14].

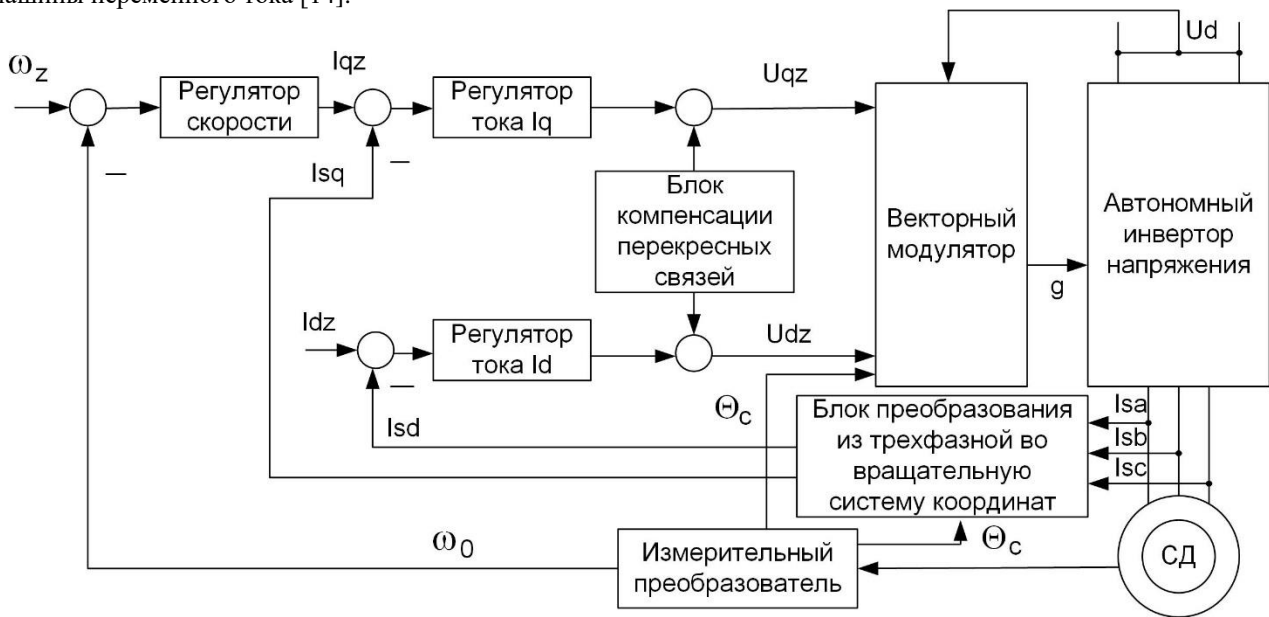


Рис. 3 Функциональная схема векторного управления СД

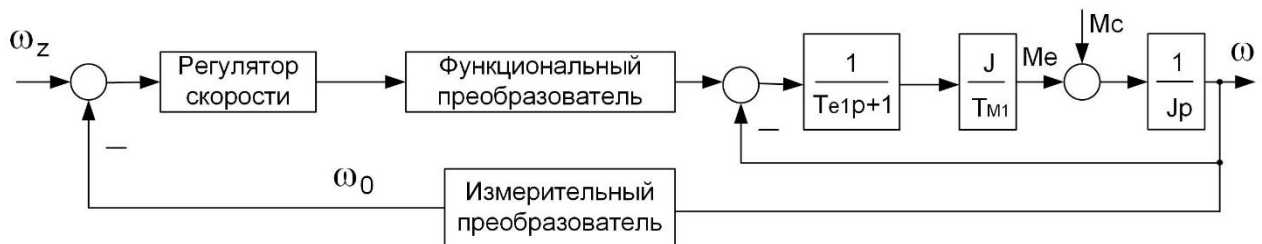


Рис. 4 Упрощенная линеаризованная функциональная схема системы автоматического управления СД

Синтез системы векторного управления, поддерживающей составляющую тока статора I_{sd} равной нулю, выполнен на основе математической модели СД при постоянном потоке ротора в системе координат (d, q) , ориентированной по магнитной оси ротора [15].

Функциональная схема системы векторного управления СД с заданием на продольную составляющую тока статора $I_{sd} = 0$ изображена на рис. 3, где ω_z , I_{dz} , I_{qz} , U_{dz} , U_{qz} - задание скорости, токов и напряжений, I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} - токи фаз статора, U_{kd} , U_{kq} - компенсационные составляющие, g - ШИМ сигнал, поступают на АИН.

Нулевое задания тока по оси d обеспечивает направление тока статора во всех режимах работы электропривода перпендикулярно магнитной оси ротора. Преобразователь координат $abc \rightarrow dq$. Данный блок выполняет преобразование фазных токов статора СД из естественной трехфазной системы координат (a, b, c) в ортогональную синхронную систему координат (d, q) . θ_c - угловое положение ротора в электрическом пространстве, для измерения которого в схеме присутствует блок «измерительный преобразователь» [15,16].

Векторный модулятор преобразует напряжение статора, заданное в системе координат (d, q) , в импульсы управления ключами инвертора напряжения на основе метода векторного формирования ШИМ. АИН является составной частью двухзвенного преобразователя частоты со звеном постоянного тока.

Регулятор скорости (РС) обеспечивает поддержание заданной скорости вращения вала двигателя. Сигналом задания скорости является внешний сигнал, который задается пользователем или системой управления верхнего уровня. В качестве обратной связи по скорости используется сигнал, пропорциональный текущей скорости двигателя, рассчитанной с помощью измерительного преобразователя как производная от угла поворота ротора. Выходной сигнал регулятора скорости является сигналом задания момента двигателя. В данной системе реализована так называемая система подчиненного регулирования координат [16].

Динамические характеристики синхронного двигателя, работающего в режиме вентильного двигателя (бесколлекторного двигателя постоянно-го тока) [14] аналогичны соответствующим харак-

теристикам обычного электродвигателя постоянного тока.

Структура, составленная на основе полного линейаризованного описания СД [15] соответствует структуре описания двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 5). Скорость синхронного двигателя в этом режиме пропорциональна напряжению, приложенному к статорным обмоткам [14].

На основании математического описания [7, 17] и (1)-(3) составлена компьютерная модель электропривода пневмотранспортной системы

(рис. 6) и получены электромеханические процессы этой системы (рис. 7) средствами Matlab-Simulink.

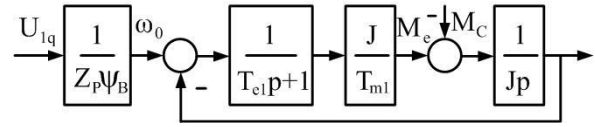


Рис.5. Структурная схема линейаризованного описания СД

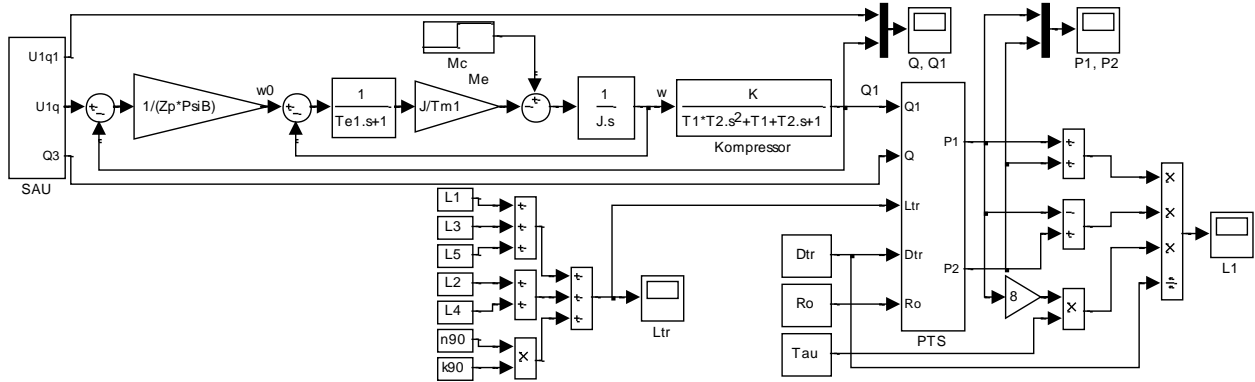
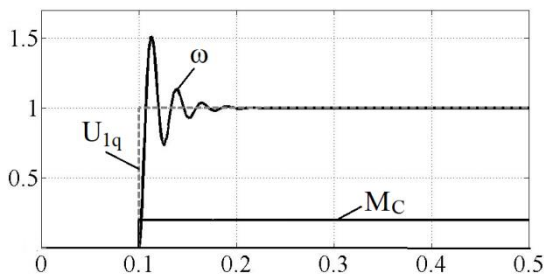
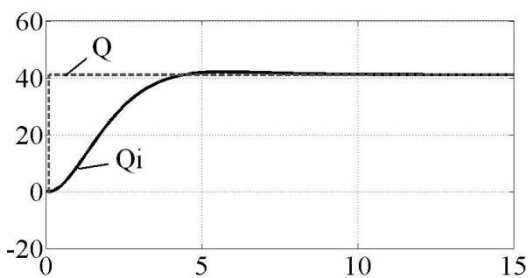


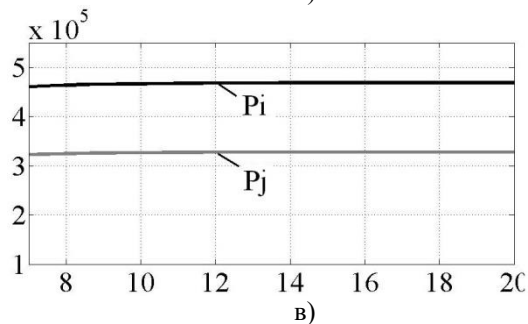
Рис. 6. Компьютерная модель электропривода пневмотранспортной системы



а)



б)



в)

Рис. 7. Электромеханические процессы

пневмотранспортной системы: переходные процессы СД с учетом приложенной номинальной нагрузки M_c (а), переходные процессы электропривода компрессора (б), результаты моделирования давления на входе P_i и на выходе P_j пневмотрассы (в)

Полученные графики электромеханических процессов электропривода ПТС подтверждают адекватность разработанной математической и компьютерной моделей с погрешностью 5-7%.

Выводы. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что снижение давления на выходе ПТС уменьшает энергоэффективность системы в целом, а также может привести к появлению завалов. С целью снижения потребления электроэнергии пневмотранспортной системой предлагается осуществлять транспортировку сыпучих материалов со скоростью, обеспечивающей минимально допустимое по технологическому процессу давление.

Разработаны математическая и компьютерная модели электропривода пневмотранспортной системы, получены графики электромеханических процессов, подтверждающие её адекватность с погрешностью 5-7%. Использование названных моделей позволит сэкономить время и средства на проведение предварительных экспериментов при разработке новых и модернизации существующих ПТС.

Для более рационального использования энергоресурсов путем стабилизации давления при раз-

работке САУ ПТС рекомендуется прогнозировать изменение ее электромеханических параметров учитывая место возможной закупки ПТС и ввести дополнительный сигнал регулирования давления, тем самым снизить потребление электроэнергии и материальные затраты, связанные с ликвидацией завалов.

References

1. Harald Wilms. Pneumatic conveying: optimal system design, operation and control pneumatic conveying. Available at: <https://www.chemengonline.com/pneumatic-conveying-optimal-system-design-operation-and-control/>.
2. Mills D. Pneumatic Conveying Design Guide. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, 637 p.
3. Gomes L. M. & Mesquita, A. Effect of particle size and sphericity on the pickup velocity in horizontal pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, 2013, no.104, pp. 780-789.
4. Marcus, R. D. & Leung, L. S. & Klinzing, G. & Rizk, Fadi. Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach. *Drying Technology*, 1993, no. 11, pp. 859-860.
5. Hu, Shengyong & Zhou, Fubao & Geng, Fan & Liu, Yingke & Zhang, Yifan & Wang, Qingxiang. Investigation on blockage boundary condition of dense-phase pneumatic conveying in bending slits. *Powder Technology*, 2014, no. 266, pp. 96–105.
6. Zhang, Yifan & Zhou, Fubao & Xia, Tongqiang & Liu, Chun & Wang, Xinxin & Liu, Jun & Chen, Yazeng. Experimental Investigation on Blockage Boundary for Pneumatic Conveying of Powders in Narrow Bifurcation Slits. *Drying Technology*, 2015, Vol.34, pp. 1052-1062, doi: 10.1080/07373937.2015.1092157.
7. Nazarova, O.S. Experimental research and computer modeling of the obstruction occurrence in the pneumatic conveying systems peculiarities / O.S. Nazarova, I.A. Meleshko // *Herald of Advanced Information Technology*, 2020, Vol.3, No.1, pp. 428–439. DOI: 10.15276/hait 01.2020.9
8. Lupinos, O. N., Pylypenko, D. V., Fedun, R. V. Avtomaticheskoe upravlenie kompressornoj stanstiei ochistnih sooruzhenii [Automatic control the compressor cleansing buildings], *Naukovi pratsi DonNTU*, 2009, no.148, pp. 30-36.
9. Shamina, V. A. Avtomatizatsiia tehnologichnih ob'ektiv ta protsesiv. Poshuk molodih.

Zbirnik naukovih prats XII naukovo-tehnichnoi konferentsii aspirantiv ta studentiv. – Donetsk, DonNTU, 2012, pp. 269-299 (in Ukrainian).

10. Truboprovod [Pipeline]. Available at: http://www.simumath.net/library/book.html?code=HYSTR_library.

11. Nazarova, O. S. Modelirovanie elektromekhanicheskikh protsesov vzaimosviazannih mnogomassovih system [Modeling of electromechanical processes of interconnected multi-mass systems] *Energia*, Tbilisi, 2019, pp. 60-64.

12. Nazarova, O. S., Osadchyy, V. V., Meleshko, I. A., & Oleinikov, M. O. Identifikaciia kutovoi shvidkosti pri zavadah v optichnii sistemi enkodera [Identification of angular velocity during interference in the optical encoder system], *Visnik NTU "KhPI"*, 2019, pp. 65-69 <http://doi.org/10.20998/2079-8024.2019.16.12>.

13. Nazarova Olena. Computer Modeling of Multi-Mass Electromechanical Systems. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), 2020, Vol. 2608, pp. 489-498. CEUR-WS.org/Vol-2608/paper36.pdf

14. Rudnev, E. S. & Morozov D. I. Linearizovanaia matematicheskaia model sinhronnogo dvigatelja s postoiannimi magnitami kak objekta upravleniia [Linearized mathematical model of synchronous engine with permanent magnets as a control object], *Zbirnik naukovih prats DonDTU*, 2016, no.1(45), pp. 88-93.

15. Kovalchuk, D.A., Mazur A.V. Vektornoye upravleniye sinkhronnym elektrodvigatel'em [Vector control of a synchronous motor] // *Avtomatyzatsiya tekhnologichnykh i biznes-protsesiv*. – 2014. – №17. – С. 71-75.

16. Chorny O.P., Lugovoi A.V., Rodkin D.Yo., Sysuk G.Yu., Sadovoi O.V. Modelyuvannya elektromekhanichnykh system [Modeling of electromechanical systems], Kremenchuk, 2001, 410 p.

17. Nazarova, E. S., Bondarenko, V. I, & Meleshko, I. A. Issledovanie yavleniya transportnogo zapazdyvaniya v pnevmotransportnoy sisteme sypuchikh materialov [The research of transport delay occurrence in pneumatic transport system of the bulk materials] *Problems of energy saving in electrical systems. Science, formation and practice*. Kremenchug, 2018, no.5, pp. 27-29.

Елена Сергеевна Назарова, кандидат технических наук, доцент, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, nazarova16@gmail.com

Ирина Анатольевна Мелешко, аспирант, Национальный университет «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, iameleshko@gmail.com