

ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДРОБНО-ИНТЕГРАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Горошко В. В.

Объектом исследования в работе являются электромеханические системы, характерной особенностью которых является наличие существенной степенной зависимости в математическом описании. Из-за этого возникают проблемы при выборе структуры и параметров регуляторов. В частности, в двигателе постоянного тока с последовательным возбуждением, вентильно-реактивном двигателе и электромагнитных тормозах может происходить насыщение магнитной системы в статических и динамических режимах. Примененный в работе аппарат дробно-интегрального исчисления позволяет такие нелинейные объекты описать с высокой точностью линейными передаточными функциями дробного порядка. Так, при аппроксимации якорной цепи двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением передаточной функцией дробного порядка получена наименьшая среднеквадратичная погрешность. Комбинация обычного PID-регулятора с дробно-интегральными составляющими порядка 0.35 и 1.35 обеспечила наилучшее качество переходного процесса – ток достигает заданного значения максимально быстро без перерегулирования. Во-вторых, вентильно-реактивный двигатель, в модели которого необходимо учитывать степенные зависимости, при описании переходных процессов скорости при скачке напряжения аппроксимирован апериодической функцией порядка 0.7. Из семейства исследованных регуляторов традиционный PI-регулятор с дополнительными дробно-интегральными составляющими порядка 0.7 и 1.7 обеспечил астатизм контура скорости порядка 1.7 и наименьшее перерегулирование. В-третьих, электромагнитные тормоза ведущих колес автомобиля, используемые для настройки двигателя внутреннего сгорания, также после тестирования наиболее точно описаны передаточной функцией дробного порядка. С помощью $PID I^m$ -регулятора, обеспечившего астатизм замкнутого контура порядка 1.63, достигнута стабилизация скорости вращения двух колес без противофазных колебаний и точная отработка треугольной тахограммы. Таким образом, благодаря аппарату дробно-интегрального исчисления, обеспечивается более точная идентификация параметров объекта, математическое описание сводится к линейным передаточным функциям дробного порядка. А в замкнутых системах можно обеспечить астатизм дробного порядка 1.3–1.7 и добиться лучшего качества переходных процессов, чем при использовании классических методов.

Ключевые слова: дробно-интегральное исчисление, дробные интегрально-дифференцирующие регуляторы, замкнутая система управления, двигатель

постоянного тока.

1. Введение

Началом развития дробного исчисления считается 1695 год, когда Лейбниц в письме к Франсуа Лопиталю обсуждал дифференцирование порядка $\frac{1}{2}$ [1]. С того момента уже прошло более 300 лет, математиками проведены многочисленные исследования в этой области. Но новый всплеск интереса к ней заметен в последние десятилетия. Это связано в первую очередь с тем, что дифференциальные уравнения с дробным порядком позволили описывать некоторые физические процессы с большей точностью, чем целочисленные [2, 3]. Также вычислительные возможности современных однокристальных процессоров уже соответствуют сложности вычисления дробных интегралов и производных в реальном времени. Поэтому открылись пути применения этого математического аппарата в технических системах, в частности в акустике, электронике, термодинамике [4, 5]. В управляемых системах находят применение $PI^{\nu}D^{\mu}$ -регуляторы, которые позволяют улучшить качество переходных процессов по сравнению с классическими целочисленными PID-регуляторами, особенно в нелинейных системах [6, 7].

Целью данной работы является исследование возможности применения аппарата дробно-интегрального счисления в электромеханике для оптимизации переходных и установившихся процессов. В качестве *объектов исследования* рассмотрены двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, вентильно-реактивный двигатель и индукционный тормоз.

2. Методика проведения исследования

Исследование каждого из перечисленных объектов проведено по общепринятой методике. На основании тестирования объектов путем подачи стандартных сигналов выполнялась идентификация параметров моделей с последующим синтезом оптимальных регуляторов и проверкой замкнутых систем. Однако на стадии идентификации, кроме общепринятых, рассмотрены также модели, включающие в себя дробно-дифференциальные уравнения. Такой выбор обусловлен тем, что в основе аппарата дробно-интегрального счисления лежат степенные функции, а в рассмотренных электромеханических объектах кривая намагничивания также близка к степенной функции. Именно это позволяет предположить, что регуляторы с интегральными и дифференциальными составляющими нецелого порядка могут обеспечить лучшие динамические и статические показатели систем.

3. Результаты исследования и обсуждение

В двигателе с последовательным возбуждением при токе в якорной цепи выше номинального переходные процессы существенно отличаются от решений дифференциальных уравнений первого или второго порядков [8]. Наименьшая среднеквадратичная погрешность обеспечивается при использовании следующей математической модели:

$$W_{co} = \frac{K}{a_1 s^{1+\mu} + a_0 s^\mu + 1}, \quad (1)$$

где для исследуемого двигателя мощностью 450 Вт получены $K=0.193$ – коэффициент усиления; $\mu=0.35$ – показатель дробно-дифференциального уравнения; $a_1=0.0062$, $a_0=0.127$ – параметры, эквивалентные постоянным времени в степенях $1+\mu$ и μ , соответственно.

Соответственно, для обеспечения настройки на оптимум с заданным целым или дробным порядком астатизма необходимы $D^\mu I^\nu I^\mu$ -, $P I^\nu I^\mu$ -, $PID I^\nu I^\mu$ -регуляторы.

В ходе экспериментальных исследований наилучшее качество переходного процесса получено с $PID I^\nu I^\mu$ -регулятором (рис. 1, а). В этом случае ток достигает заданного значения максимально быстро и без перерегулирования.

Оказалось, что такие настройки эффективны и при сигналах задания вдвое ниже максимального, а также при ступенчатом изменении задания (рис. 1, б, в). Видно, что качественные показатели системы остаются неизменными и соответствующими желаемым настройкам.

Другой электрической машиной, в описании которой необходимо учитывать степенные зависимости, является вентильно-реактивный двигатель. Для идентификации замкнутого контура скорости также была выбрана дробно-апериодическая передаточная функция следующего вида [9]:

$$W_{col} = \frac{K}{a_0 s^\mu + 1}. \quad (2)$$

Результаты аппроксимации иллюстрирует рис. 2. Как видно, при разных приложенных напряжениях характер переходного процесса изменяется, но использование передаточной функции дробного порядка (2) обеспечивает наименьшее отклонение. И это же позволяет при синтезе регуляторов отказаться от сложной модели двигателя, описываемой системой нелинейных дифференциальных уравнений.

Соответственно, существенно упрощается настройка замкнутого контура – модульный оптимум обеспечивает II^ν -регулятор, а дробный порядок астатизма 1.7 достигается с помощью $PII^\nu I^\mu$ -регулятора.

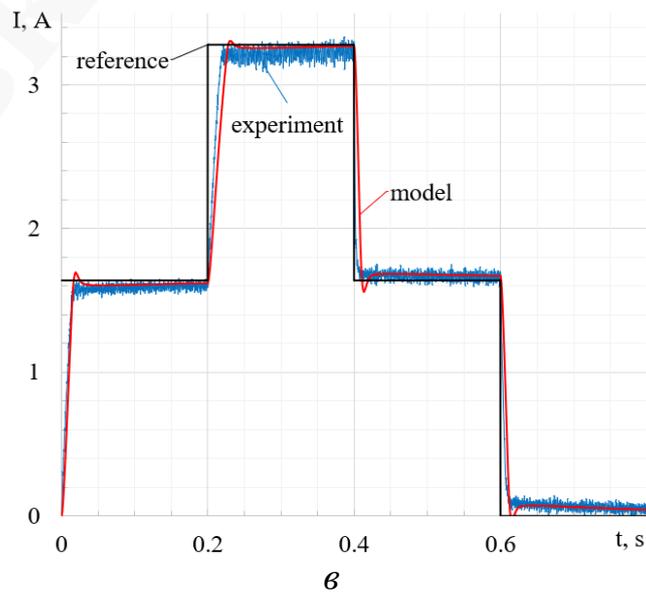
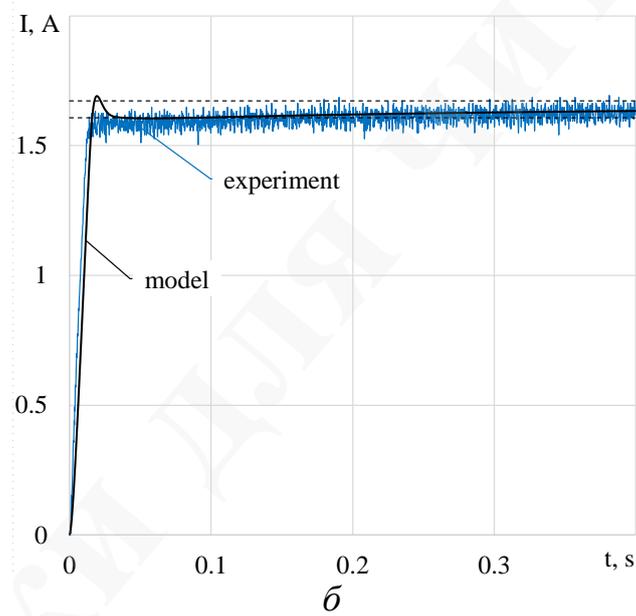
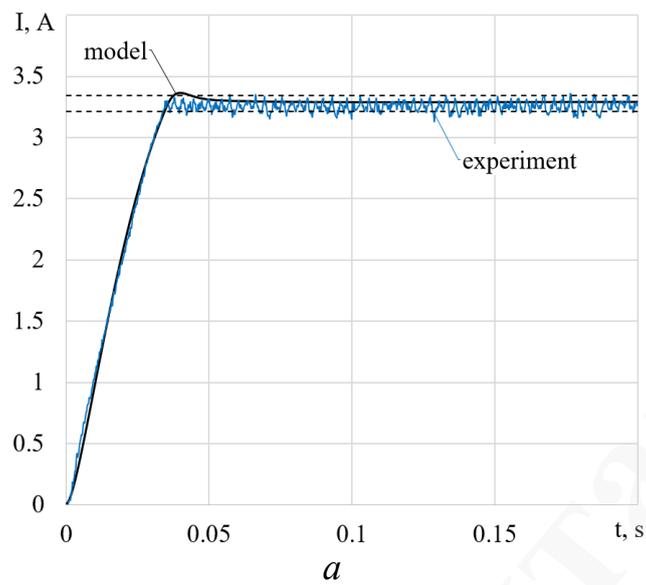


Рис. 1. Переходные процессы по току в двигателе последовательного возбуждения: *a* – при сигнале задания 3.2 А; *б* – при сигнале задания 1.6 А; *в* – при ступенчатом изменении сигнала задания

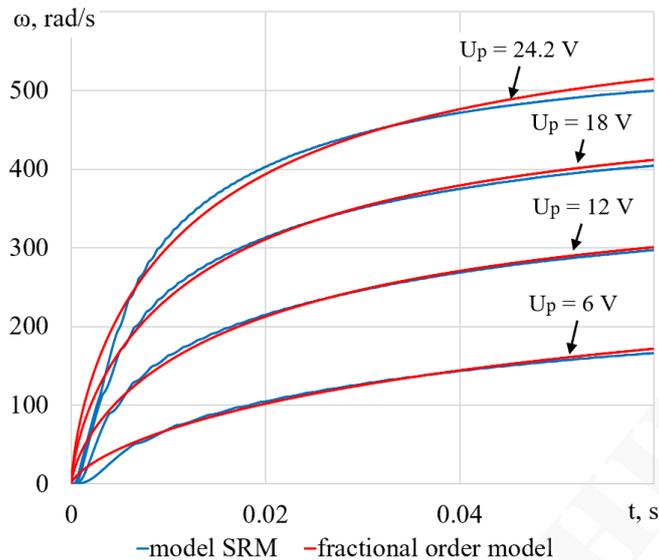


Рис. 2. Графики переходных процессов скорости в разомкнутой системе при различных напряжениях

На рис. 3 показаны результаты моделирования переходных процессов в контуре управления скоростью вентильно-реактивного двигателя. На рис. 3, *а* показаны графики переходных процессов при скачке задания, на рис. 3, *б* – при ступенчатом изменении сигнала задания. Во всех случаях система с дробным порядком астатизма обладает лучшими динамическими характеристиками.

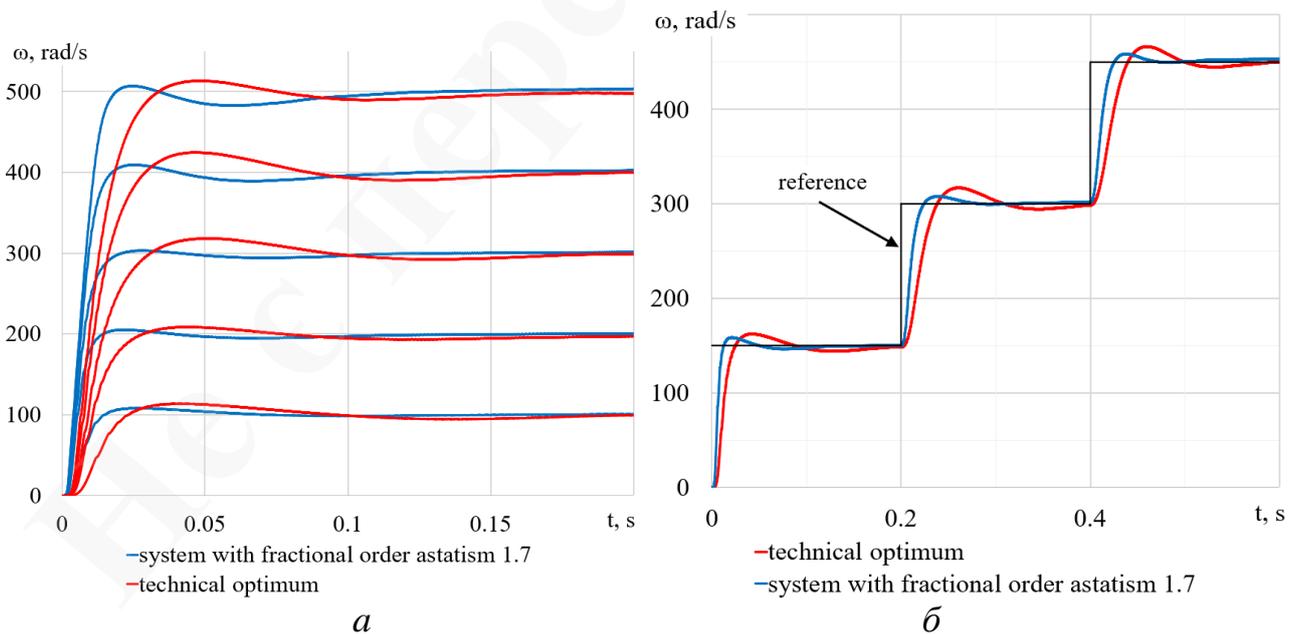


Рис. 3. Графики переходных процессов скорости вентильно-реактивного двигателя: *а* – в замкнутой системе при скачках задания, *б* – при ступенчатом изменении задающего сигнала

Аналогичный подход использован для синтеза системы управления электромагнитными тормозами ведущих колес автомобиля на стенде для настройки и измерения мощности (момента) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [10].

По полученным экспериментальным данным объект управления аппроксимирован

с погрешностью около 1 % следующими передаточными функциями:

$$W_{co3} = \frac{K}{(a_1s + 1)(a_2s + 1)(a_3s + 1)}, \quad (3)$$

$$W_{co4}(s) = \frac{K}{a_1s^{1+\mu_{co}} + a_2s^{\mu_{co}} + 1}. \quad (4)$$

По передаточной функции (3) найдены коэффициенты для PID-регулятора, а по (4) синтезированы два типа дробно-интегральных регуляторов – $D^{\gamma}I^{\mu}I$, обеспечивающего настройку на модульный оптимум, и $PIDI^{\gamma}I^{\mu}$, позволяющего получить дробный порядок астатизма 1.63.

При проведении экспериментальных исследований получены графики переходных процессов при стабилизации скорости полуосей автомобиля (рис. 4, а). PID-регулятор обеспечил лучшее быстродействие (2.55 с), но с наибольшим перерегулированием $\delta_1=27.6\%$. С $D^{\gamma}I^{\mu}I$ -регулятором перерегулирование составило $\delta_2=16.3\%$, а длительность переходного процесса – 4.42 с. Наименьшее перерегулирование получено с $PIDI^{\gamma}I^{\mu}$ -регулятором – $\delta_3=3.3\%$ при длительности 3.8 с.

Важным этапом проверки результатов настройки ДВС является измерение мощности и максимального момента при формировании треугольной тахограммы. Результаты такого теста с самым быстрым (PID) и самым точным ($PIDI^{\gamma}I^{\mu}$) регуляторами приведены на рис. 4, б.

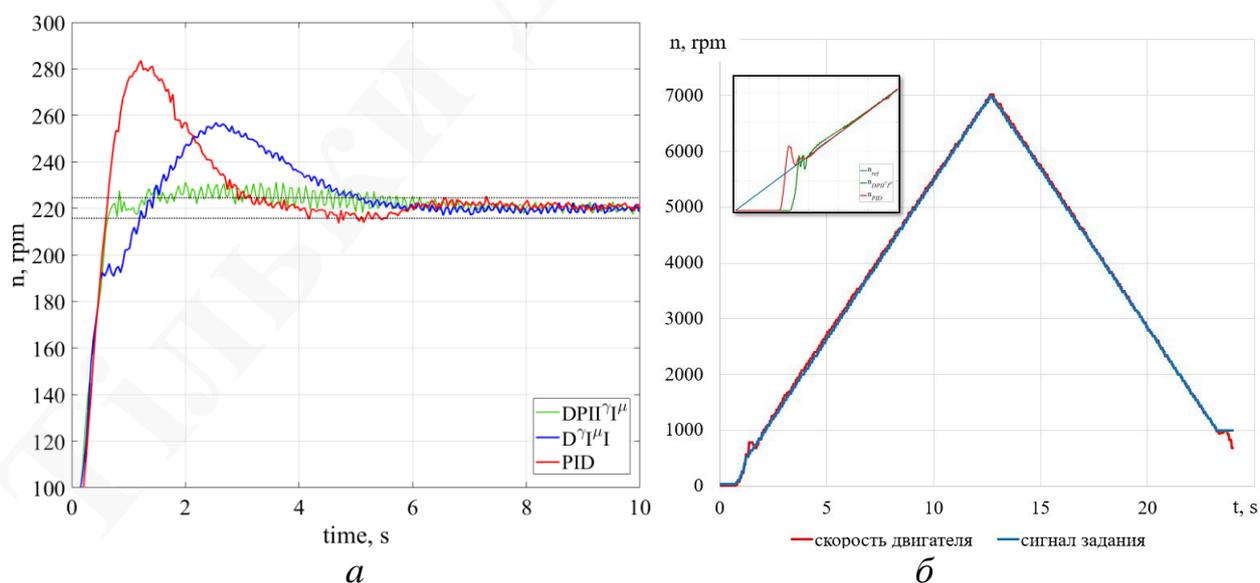


Рис. 4. Графики переходных процессов средней скорости полуосей автомобиля: а – при стабилизации скорости; б – при измерении мощности

Оба регулятора обеспечивают стабилизацию скорости во всем диапазоне измерения мощности, но меньшее перерегулирование и колебательность в начале разгона (начальные участки переходных процессов с различными регуляторами сопоставлены слева вверху на рис. 4, б). Это позволило принять окончательное решение о выборе

структурной схемы системы управления в пользу PIDITⁿ-регулятора.

4. Выводы

Таким образом, применение аппарата дробно-интегрального счисления для трех типов нелинейных электромеханических объектов, в описании которых присутствуют степенные функции, позволило получить следующее:

1. Более точную идентификацию параметров, при которой достигается наименьшее рассогласование между расчетными и экспериментальными данными при тестировании разомкнутых систем.

2. Упрощенное математическое описание за счет применения в моделях линейных передаточных функций дробного порядка.

3. Лучшие динамические и статические показатели, особенно при использовании дробно-интегральных регуляторов, обеспечивающих дробный (1.5–1.7) порядок астатизма замкнутого контура.

Литература

1. Joseph, K. M. (2009). *Fractional calculus: Definitions and Applications*. Masters Theses & Specialist Projects. Available at: <https://digitalcommons.wku.edu/theses/115/>

2. Uchaikin, V. V. (2013). *Fractional Derivatives for Physicists and Engineers*. Berlin Heidelberg: Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag, 385. doi: <http://doi.org/10.1007/978-3-642-33911-0>

3. Tarasov, V. E. (2010). *Fractional Dynamics. Applications of Fractional Calculus to Dynamics of Particles, Fields and Media*. Berlin, Heidelberg: Higher Education Press, Beijing and Springer-Verlag, 505.

4. Oldham, K. B., Spanier, J. (1974). *The Fractional Calculus: Theory and Applications of Differentiation and Integration to Arbitrary Order*. New York: Academic Press, 322.

5. Hilfer, R. (2000). *Applications of Fractional Calculus in Physics*. River Edge: World Scientific, 472. doi: <http://doi.org/10.1142/3779>

6. Petráš, I. (2009). Fractional – order feedback control of a dc motor. *Journal of Electrical Engineering*, 60(3), 117–128. Available at: http://iris.elf.stuba.sk/jeeec/data/pdf/3_109-01.pdf

7. Tytiuk, V., Chorny, O., Baranovskaya, M., Serhienko, S., Zachepa, I., Tsvirkun, L. et. al. (2019). Synthesis of a fractional-order PI λ D μ -controller for a closed system of switched reluctance motor control. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (98)), 35–42. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.160946>

8. Busher, V., Melnikova, L., Horoshko, V. (2019). Synthesis and implementation of fractional-order controllers in a current circuit of the motor with series excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (98)), 63–72. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.161352>

9. Busher, V. V., Goroshko, V. V. (2019). Fractional Integral-Differentiating Control in Speed Loop of Switched Reluctance Motor. *Problemele energeticii regionale*, 1 (2 (42)), 46–54. doi: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3239166>

10. Busher, V., Horoshko, V. (2019). Dual Electromagnetic Retarder Control System for Tuning Internal Combustion Engines. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. doi: <http://doi.org/10.1109/mees.2019.8896526>