

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДВИГАТЕЛЬ» В MATLAB+SIMULINK

В статье рассмотрены особенности моделирования системы «тиристорный преобразователь–двигатель» в MATLAB+Simulink.

Ключевые слова: электродвигатель, преобразователь, структурные схемы, модульный оптимум, обратные связи, пространство состояний, регуляторы, переходные процессы.

V.V. Kibardin, O.A. Kovaleva, V.N. Yazev

PECULIARITIES OF MODELING «THYRISTOR INVERTER – MOTOR» SYSTEM IN MATLAB+SIMULINK

The peculiarities of modeling «thyristor inverter–motor» system in MATLAB+Simulink are considered in the article.

Key words: electric motor, inverter, structural schemes, modular optimum, feedback, state space, regulators, transient processes.

Анализ динамических свойств электромеханических объектов, структурная схема которых приведена на рисунке 1, целесообразно выполнять с помощью пакета прикладных программ MATLAB+Simulink [1, 2]. Такое представление адекватно отражает свойства двигателей постоянного и переменного тока, работающих на линейном участке электромеханической характеристики при однозонном регулировании скорости, и применяется при выборе структуры и параметров регуляторов по критериям модульного, симметричного и компромиссного оптимумов [3, 4].

Рассмотрим особенности моделирования мехатронного объекта [3], структурная схема которого в MATLAB+Simulink приведена на рисунке 1. Это система ТП – Д с номинальными данными: двигатель (Д) – $R_{ном} = 30$ кВт; $U_{ном} = 220$ В; $I_{ном} = 147$ А; $\omega_{ном} = 157$ с⁻¹; $\omega_0 = 169$ с⁻¹; $\omega_{max} = 187$ с⁻¹; момент сопротивления номинальный $M_{ном} = 150$ Н*м; кратность пускового тока = 2; тиристорный преобразователь – $U_{ном} = 230$ В; $U_y = 10$ В; $I_{ном} = 300$ А; кратность кратковременной перегрузки по току = 1,2.

При моделировании таких объектов нужно учитывать ток холостого хода, который для асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором достигает 20–40 % от номинального тока статора, а для двигателей постоянного тока – 10–30 % от номинального тока якоря. Он обусловлен механическими потерями и наличием воздушного зазора между статором и ротором АД [5]. Для учета этого на вход интегрирующего звена включен генератор ступенчатого сигнала Step3, 4. Амплитуда этого сигнала выбрана из условия, что ток $i_x \approx 30$ А.

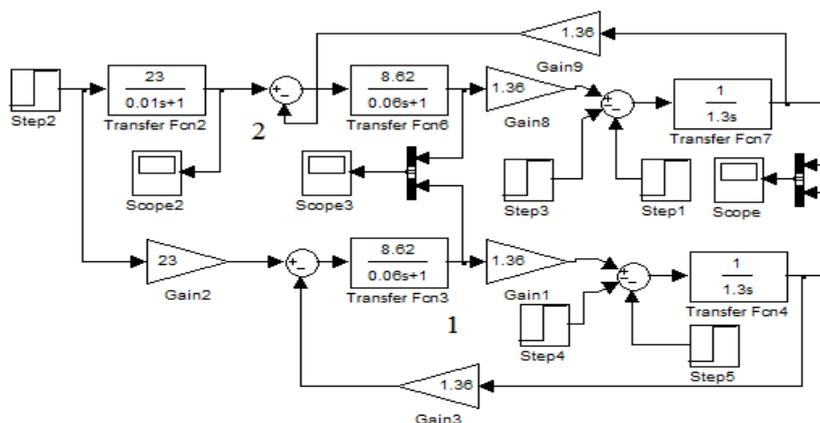


Рис. 1. Структурные схемы двигателя (1) и системы ТП-Д (2)

На рисунках 2–4 представлены переходные характеристики Д и системы ТП-Д: угловая скорость $\omega(t)$, ток двигателя $I(t)$ и напряжение преобразователя $U_p(t)$. Очевидно, что математические модели Д и системы ТП-Д в виде передаточных функций вход-выход адекватно отражают реальные свойства объекта управления.

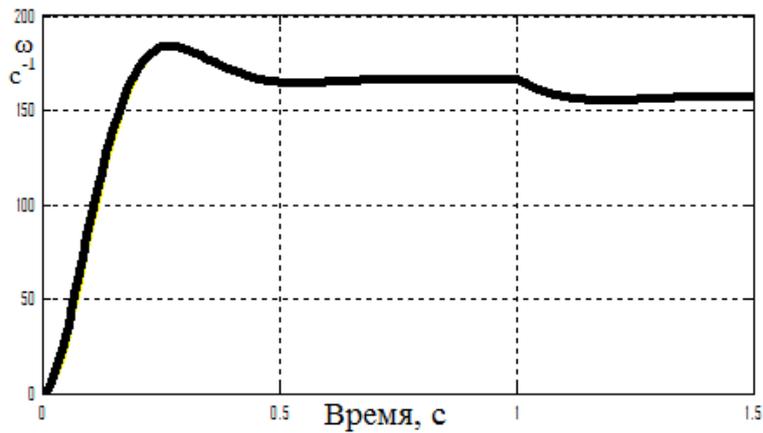


Рис. 2. График зависимости $\omega(t)$

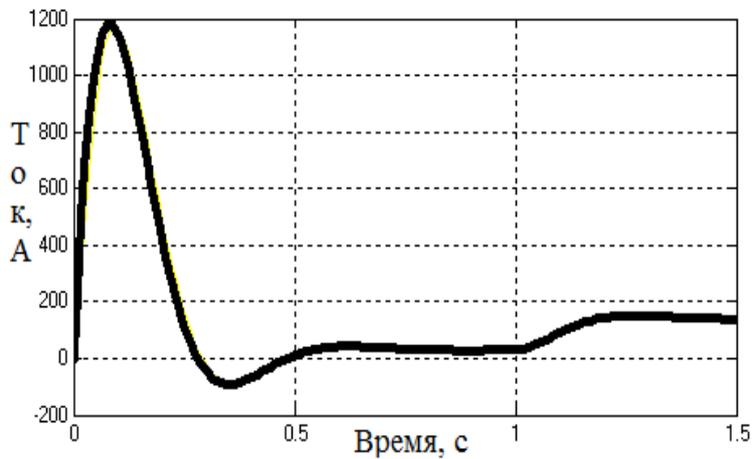


Рис. 3. График зависимости $I(t)$

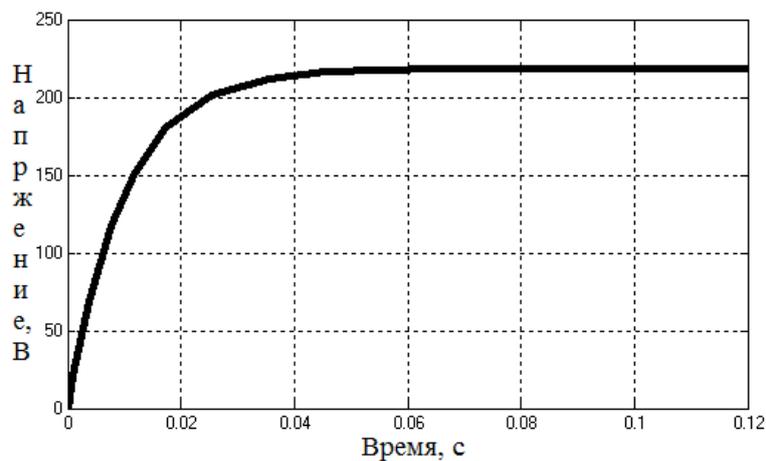


Рис. 4. График зависимости $U(t)$

Рассмотрим замкнутую систему управления (рис. 5), регуляторы которой выбраны по критерию модульного оптимума (МО-МО).

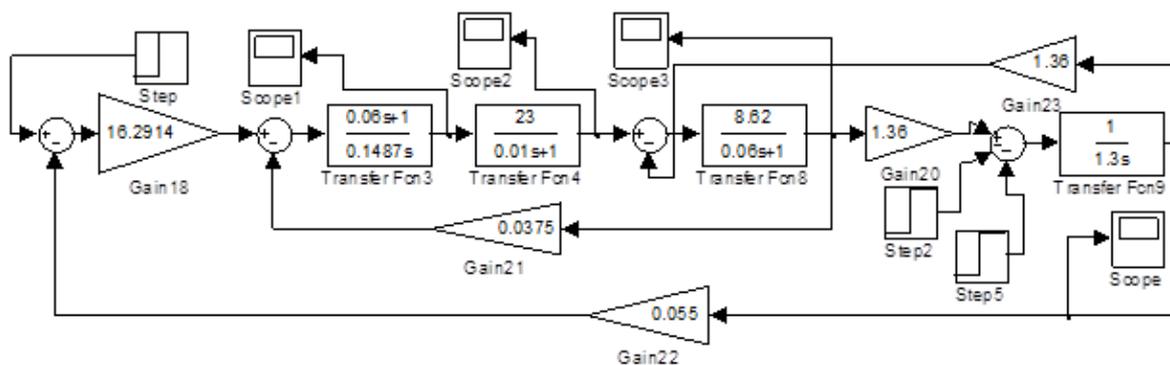


Рис. 5. Структурная схема системы управления, критерий МО-МО

На рисунках 6–9 представлены переходные характеристики этой системы: угловая скорость $\omega(t)$, напряжение управления $U_y(t)$, напряжение преобразователя $U_p(t)$ и ток двигателя $I(t)$. Как следует из этих графиков, данная система устойчива по скорости и обладает внутренней неустойчивостью по напряжениям управления и преобразователя, а также по току двигателя, что является недопустимым в промышленных системах управления электроприводом.

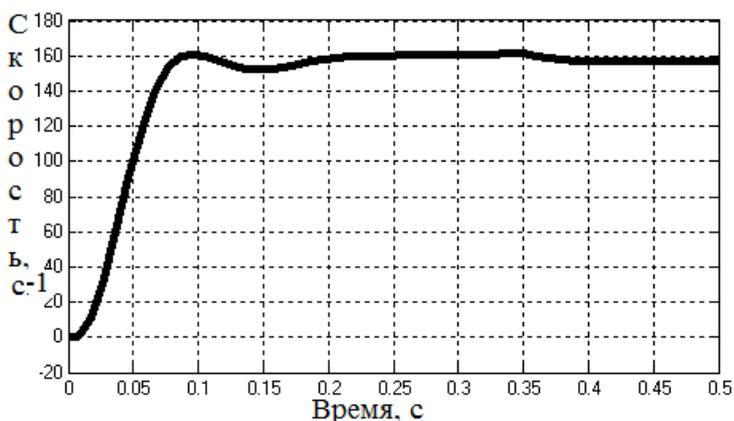


Рис. 6. График зависимости $\omega(t)$, с⁻¹, система МО-МО

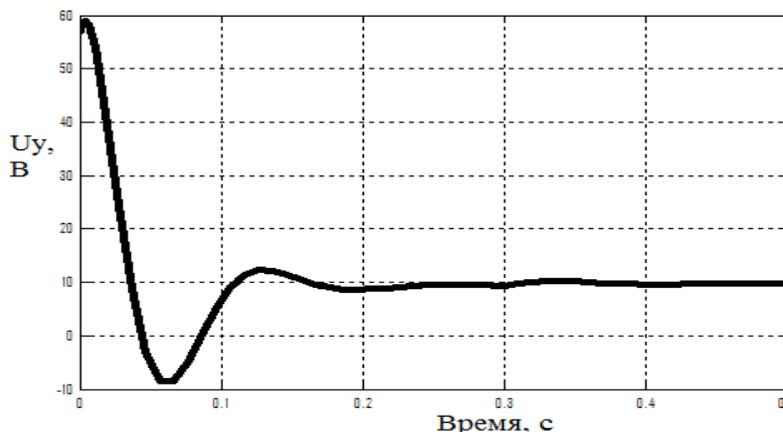


Рис. 7. График зависимости $U_y(t)$, В, система МО-МО

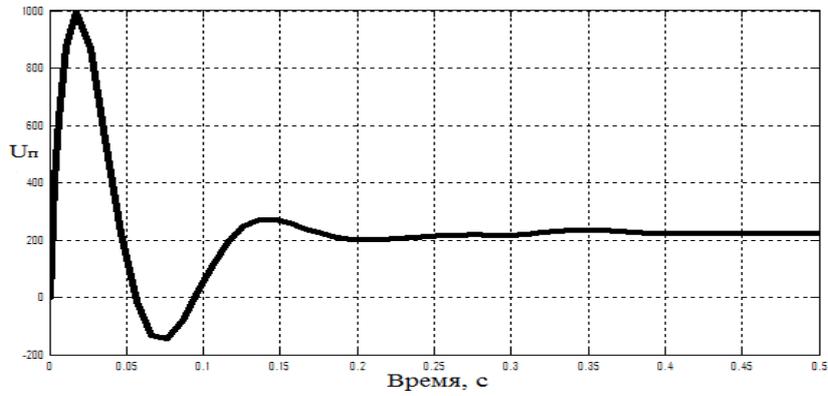


Рис. 8. График зависимости $U_n(t)$, В, система МО-МО

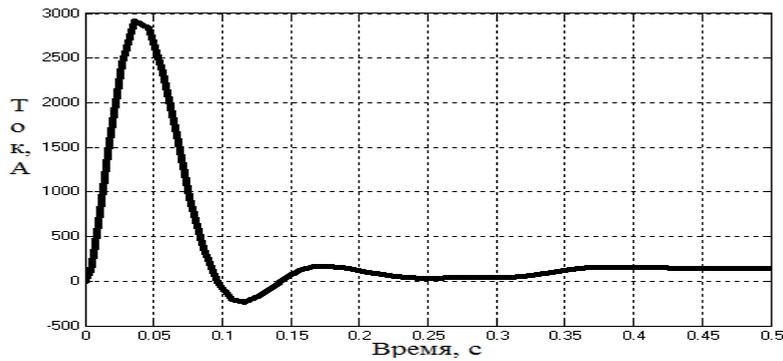


Рис. 9. График зависимости $I(t)$, А, система МО-МО

Действительно, напряжение управления должно быть не более 11 В, напряжение тиристорного преобразователя – не более 230 В, ток двигателя не более 2000 А.

Для устранения этих недостатков при моделировании таких систем необходимо или включать на входе системы задатчик интенсивности (система 2), или ограничивать управляющее воздействие регулятора (система 3) внешнего контура (рис. 10), тем более что это соответствует практике работы промышленных систем управления электроприводом.

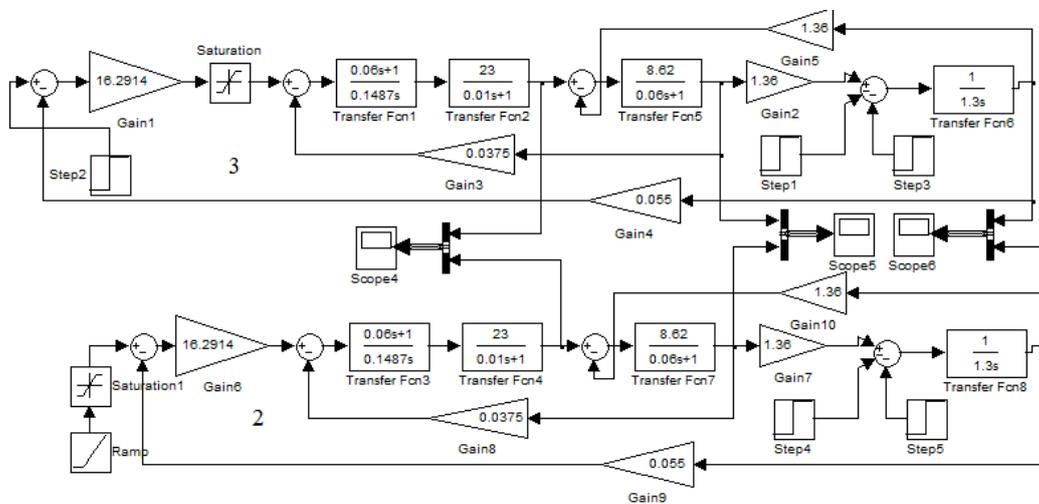


Рис. 10. Структурные схемы системы управления с задатчиком интенсивности (2) и с ограничением сигнала регулятора (3)

В данной модели задатчик интенсивности реализован с помощью блока Ramp (формирует линейно изменяющееся воздействие) и блока ограничения выходного сигнала Saturation (рис. 10, 2). Ограничение сигнала пропорционального регулятора (рис. 10, 3) также реализовано с помощью блока Saturation.

Анализ полученных результатов показывает (рис. 11–13), что обе системы обладают устойчивостью как по переменной выхода – угловая скорость ω , так и по внутренним переменным – ток двигателя I и напряжение источника питания U_p . Кроме того, система 3 обеспечивает лучшие условия пускового режима, хотя и проигрывает в быстродействии. На интервале времени от 0,2 до 0,7 с источник питания работает в режиме источника тока. Время переходного процесса 0,6–0,7 с.

Ограничение внутренних переменных при моделировании механотронных систем можно реализовать, если решить задачу методом аналитического конструирования регулятора (АКОР, линейно-квадратичный регулятор, LQR-регулятор), используя представление объекта управления в пространстве состояний в виде матричной передаточной функции [6]. В качестве переменных состояния рассматриваем напряжение на выходе преобразователя, ток двигателя и угловую скорость. На рисунке 14, 4 представлена структурная схема системы управления с оптимальными жесткими обратными связями (ЖОС), которые обеспечивают переходный процесс по скорости, аналогичный системе с регуляторами МО-МО. На рисунках 15–17 представлены переходные процессы в двух системах: система МО-МО с задатчиком интенсивности (2) и система с оптимальными ЖОС и задатчиком интенсивности (4).

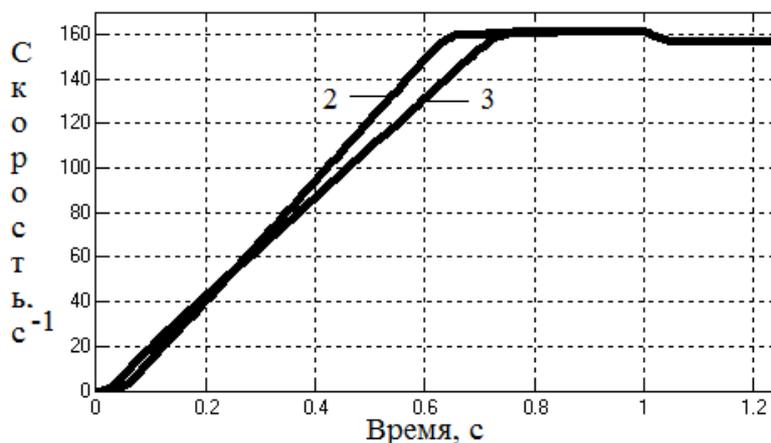


Рис. 11. Зависимость $\omega(t)$, s^{-1} : 2 – система с задатчиком интенсивности; 3 – система с ограничением регулятора

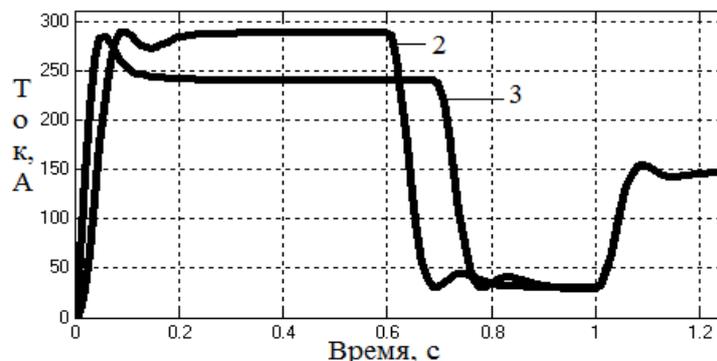


Рис. 12. Зависимость $I(t)$, А: 2 – система с задатчиком интенсивности; 3 – система с ограничением регулятора

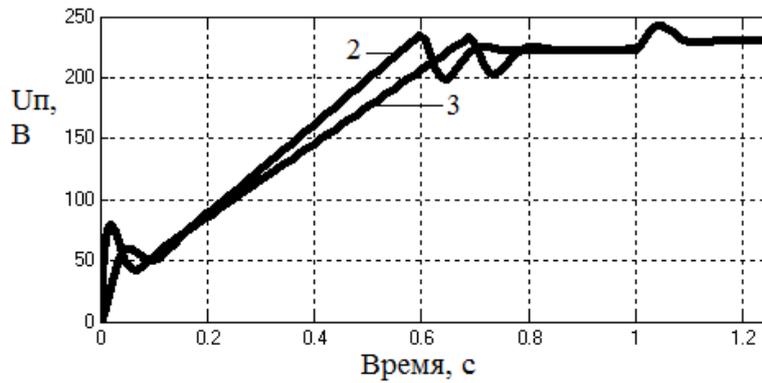


Рис. 13. Зависимость $U(t)$, В: 2 – система с задатчиком интенсивности; 3 – система с ограничением регулятора

Результаты моделирования позволяют сделать вывод, что система с оптимальными ЖОС обеспечивает плавные переходные процессы по всем переменным состояния. Они также совпадают с алгоритмами работы тиристорных преобразователей для плавного пуска асинхронных электродвигателей, выпускаемых промышленностью [7], следовательно, их можно использовать для определения оптимальных диаграмм работы тиристорных преобразователей.

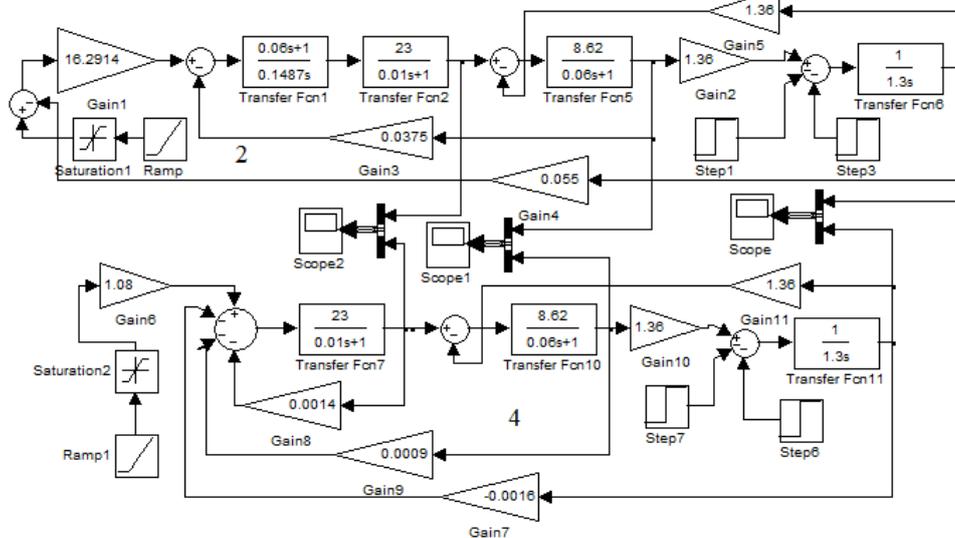


Рис. 14. Структурные схемы систем МО-МО и ЖОС с задатчиками интенсивности

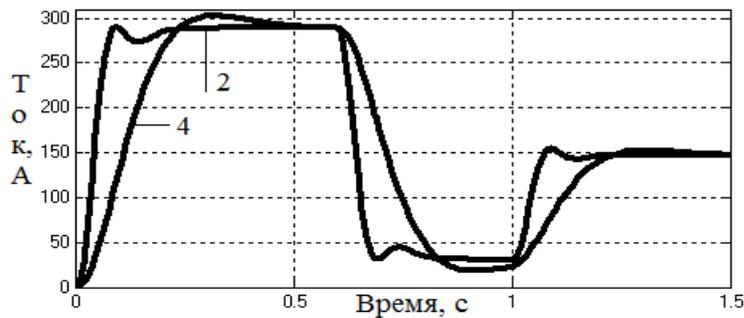


Рис. 15. Графики токов систем (2) и (4)

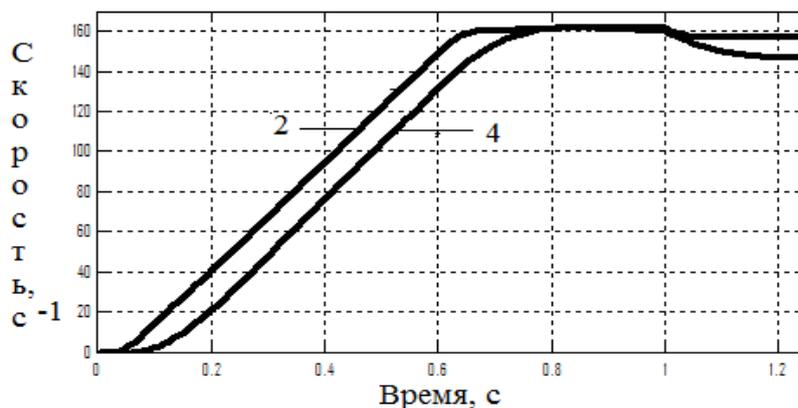


Рис. 16. Графики угловых скоростей систем (2) и (4)

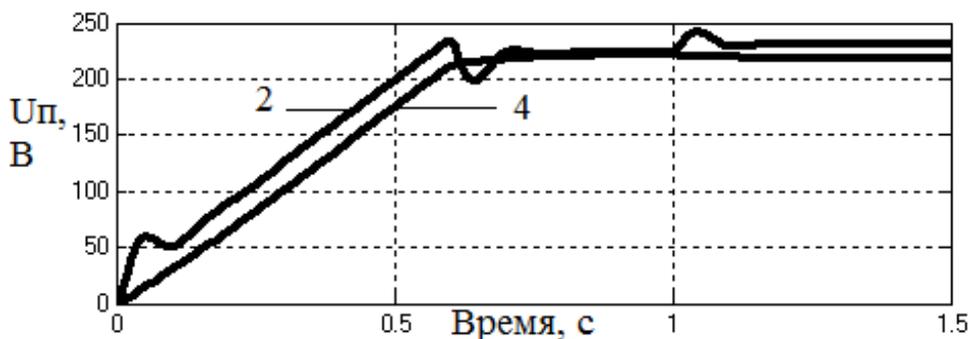


Рис. 17. Графики напряжения на выходе преобразователя систем (2) и (4)

Выводы

Моделирование ТП-Д необходимо выполнять при условии, что ток холостого хода двигателя не равен нулю.

Мехатронный объект (ТП-Д), устойчивый в разомкнутой системе управления, становится неустойчивым по внутренним переменным (ток двигателя, напряжение источника питания и напряжение управления на выходе внешнего регулятора) в замкнутой системе управления, так как нет ограничений на управляющие воздействия.

При моделировании замкнутых систем управления необходимо включать в структурную схему блоки ограничений сигналов.

Представление объекта управления в пространстве состояний и использование аппарата синтеза LQR-регуляторов позволяет решить проблему внутренней устойчивости с помощью оптимальных обратных связей по переменным состояниям.

Зависимости $U(t)$, приведенные на рисунках 13, 17, совпадают с алгоритмами работы промышленных тиристорных преобразователей для плавного пуска высоковольтных асинхронных электродвигателей.

Литература

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
2. Дьяконов В.П. Simulink: Самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2013. – 784 с.
3. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
4. Егоров В.Н., Шестаков В.М. Динамика систем электропривода. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.

5. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
6. Веремей Е.И. Линейные системы с обратной связью: учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 448 с.
7. Ткачук А., Кривовяз В., Копырин В. Тиристорный преобразователь для плавного пуска высоковольтных асинхронных электродвигателей // Силовая электроника. – 2007. – № 1.



УДК 621.43.001.42

А.М. Плаксин, А.В. Гриценко,
А.Ю. Бурцев, К.В. Глемба

СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТУРБОКОМПРЕССОРА ДИЗЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОНОМНОГО СМАЗОЧНО-ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА

Доказано, что применение тормозного устройства ротора турбокомпрессора, встроенного в систему впуска двигателя внутреннего сгорания, имеющего расчетные конструктивные параметры, сокращает продолжительность выбега ротора на 30–35 %, что, соответственно, даёт возможность уменьшить габариты и время работы гидроаккумулятора при одновременном исключении возникновения явления помпажа в компрессорной части турбокомпрессора, тем самым исключает поломку его деталей. Расчётный экономический эффект составляет в пределах 50–80 тысяч рублей за сезон эксплуатации агрегатов с тракторами различной единичной мощности.

Ключевые слова: *двигатель, системы двигателя, турбонаддув, турбокомпрессор, диагностирование, выбег турбокомпрессора, тормозное устройство, гидроаккумулятор, работоспособность, надёжность.*

А.М. Plaksin, A.V. Gritsenko,
A.Yu. Burtsev, K.V. Glemba

THE WAY TO ENSURE THE EFFICIENCY OF THE DIESEL ENGINE TURBOCHARGER USING AUTONOMOUS LUBRICATING-BRAKING DEVICE

It is proved that the use of the braking device of the turbocharger rotor integrated in the intake system of the internal combustion engine, that has the estimated structural parameters, reduces the duration of the rotor running-out by 30–35 %, which thus makes it possible to reduce the clearance and the operating time of the hydro-accumulator with the exception of the surge phenomenon emergence in the compressor part of the turbocharger, thus avoiding the breakage of its parts. The estimated economic impact is in the range of 50–80 thousand rubles for the season of the unit operation with the tractors of different unit power.

Key words: *engine, engine systems, turbocharging, turbocharger, diagnostics, turbocharger running-out, brake device, the hydro-accumulator, working capacity, reliability.*

Введение. На сегодняшний день существует целый ряд способов повышения мощности двигателя [1–5]. Но наиболее эффективным из них является турбонаддув.

Конструктивно и технологически турбокомпрессор взаимосвязан с рядом систем двигателя, что обуславливает их взаимосвязь и взаимовлияние (системы: смазки, охлаждения, впуска, выпуска). Рассмотрим на рисунке 1 взаимосвязь параметров ТКР при резком снижении оборотов коленчатого вала ДВС или его остановке с параметрами процесса смазки, температурой деталей ТКР и временем выбега его ротора.