



УДК 621.314.6.078

© 2007 г. **С.А. Васильченко**, канд. техн. наук,
П.А. Гнедин,
В.А. Соловьев, д-р техн. наук
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С КОМБИНИРОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

Смоделирована работа быстродействующих систем электропривода с комбинированным источником питания. Для повышения быстродействия предложено в качестве сигнала задания силового корректирующего звена использовать ошибку регулирования скорости. Проведен ряд исследований, подтвердивших повышение быстродействия при данном подходе.

Введение

Системы регулируемого электропривода (ЭП) средней и большой мощности, работающие в основном в режиме стабилизации скорости и момента двигателя, широко применяются в промышленности. Постоянно растущие требования к быстродействию таких систем, в значительной мере определяющему динамическую и статическую точность стабилизации регулируемых параметров, могут быть удовлетворены только при использовании в таких системах быстродействующих источников питания. Применение в качестве источников питания преобразователей, выполненных на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах, – например, IGBT-транзисторах – при специальных способах управления обеспечивает требуемое высокое быстродействие. Однако несмотря на наблюдающуюся тенденцию к постоянному снижению стоимости силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов, в настоящее время при большой и средней мощности ЭП стоимость преобразователя на полностью управляемых полупроводниковых приборах остается высокой и практически соизмеримой со стоимостью электромеханической части.

Эффективным средством снижения стоимости преобразовательной части ЭП большой и средней мощности, часть времени работающих в режиме малых отклонений регулируемых координат, является применение силовых корректирующих звеньев (СКЗ), в частности параллельных СКЗ.

Принцип такой коррекции применительно к контуру регулирования тока ЭП постоянного тока по системе тиристорный преобразователь-двигатель предложен В.Д. Латышко и нашел дальнейшее развитие в ряде совместных работ В.Д. Латышко, В.А. Соловьева, С.А. Васильченко и др. [1, 2].

Принцип параллельной силовой коррекции в приводах постоянного тока заключается в следующем: якорная обмотка двигателя питается от тиристорного преобразователя (ТП) с естественной коммутацией (ЕК), быстродействие которого относительно невелико, и от транзисторного широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с установленной мощностью 20 ... 25 % от номинальной мощности нагрузки и с быстродействием не менее чем на порядок большим, чем быстродействие ТП. ТП и ШИП включаются параллельно якорю двигателя. В этой системе регулирования тока якоря, при соответствующей структуре и настройках регуляторов, ТП создает только медленно изменяющиеся составляющие тока с большими амплитудами. Быстро изменяющиеся составляющие тока (с амплитудой не более 20...25% от номинального тока якоря) создаются быстродействующим ШИП. При наличии интегральной составляющей в законе регулирования тока и отработке ШИП только динамических составляющих тока якоря в переходных процессах с компенсацией вносимых выпрямителем пульсаций тока, установленная мощность ТП будет равна номинальной мощности двигателя. Такое техническое решение, ориентированное на применение относительно недорогого мощного ТП на обыкновенных тиристорах и мало мощного транзисторного ШИП, будет менее затратно, чем применение в подобной системе только одного быстродействующего транзисторного преобразователя на номинальную мощность двигателя.

В литературе известны схемы, использующие силовую коррекцию в системе стабилизации скорости двигателя постоянного тока [2] (рис. 1), где сигнал задания, поступающий на силовое корректирующее звено, есть ошибка регулирования тока между сигналом задания тока, поступающего с регулятора скорости, и сигналом обратной связи тока тиристорного преобразователя.

Кроме того, в качестве сигнала задания силового корректирующего звена можно использовать ошибку регулирования скорости, возникающую между сигналом задания скорости и сигналом обратной связи скорости двигателя постоянного тока (рис. 2).

На рис. 1 и 2 приняты следующие обозначения: Тр1 – силовой трансформатор тиристорного преобразователя; Тр2 – силовой трансформатор широтно-импульсного преобразователя; $L_{др\ вп}$ – дроссель тиристорного преобразователя; $L_{др\ шип}$ – дроссель широтно-импульсного преобразователя; ДТ – датчик тока; ДС – датчик скорости; СУ ТП – система управления тиристорного преобразователя; СУ ШИП – система управления широтно-импульсного преобразователя; РТ ТП – регулятор тока тиристорного преобразователя; РТ ШИП – регулятор тока широтно-импульсного преобразо-

вателя; РС – регулятор скорости; РС ТП – регулятор скорости тиристорного преобразователя; РС ШИП – регулятор скорости широтно-импульсного преобразователя; И – интегрирующее звено; Д – машина постоянного тока; ω_3 – сигнал задания скорости двигателя.

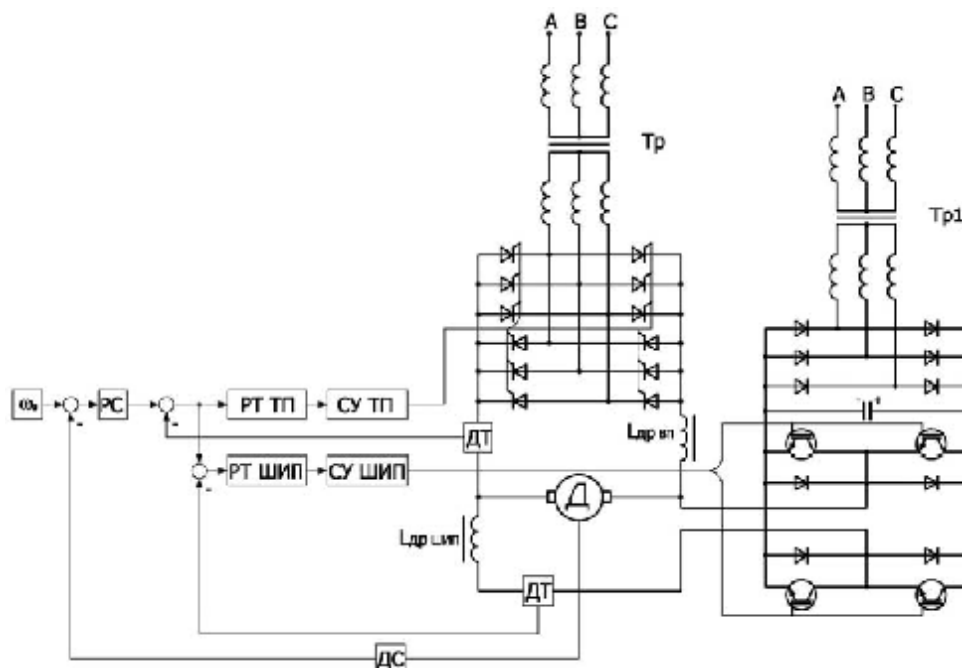


Рис. 1. Схема ЭП постоянного тока на базе тиристорного преобразователя с силовым корректирующим звеном и управлением по ошибке тока.

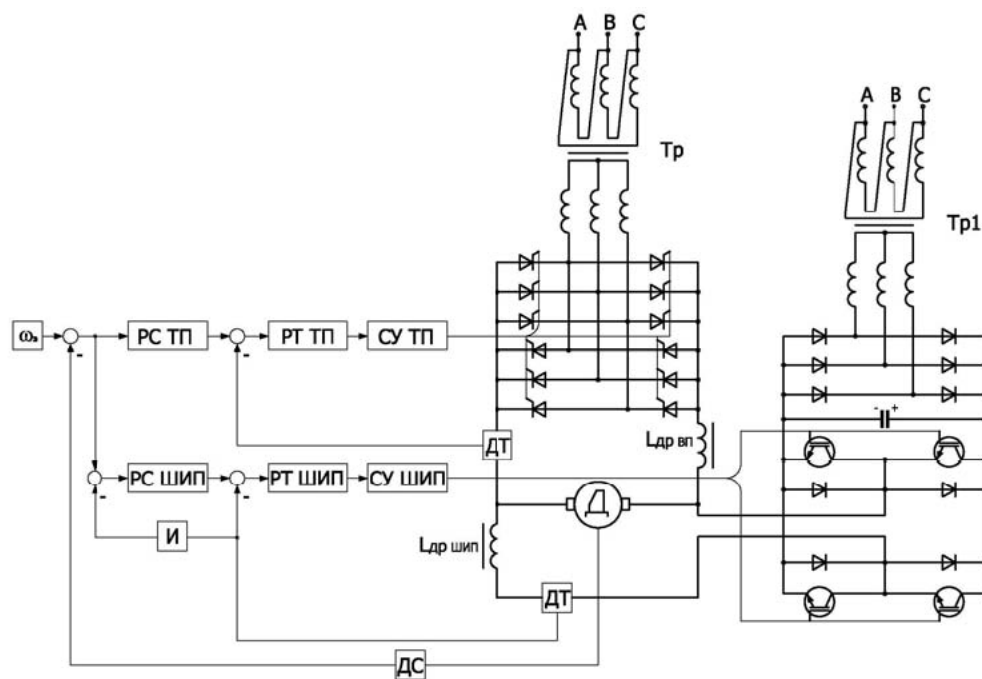


Рис. 2. Схема ЭП постоянного тока на базе тиристорного преобразователя с силовым корректирующим звеном и управлением по ошибке скорости.

Модели ЭП с комбинированным источником питания

Для исследования процессов в схемах, представленных на рис. 1 и 2, с целью оценки качества переходных процессов, точности стабилизации скорости и быстродействия, была смоделирована их работа с использованием высокоуровневого языка программы Matlab, с помощью пакетов Simulink и SimPowerSystems.

Модель силовых схем ЭП представлена на рис. 3, где ω^* – сигнал задания скорости; D_{iv} – дроссель тиристорного преобразователя; D_{rrip} – дроссель широтно-импульсного преобразователя; C – конденсатор широтно-импульсного преобразователя; dc – машина постоянного тока; $Pulses_1$, $Pulses_2$ – управляющие импульсы групп тиристорного преобразователя; $Pulses_Sip$ – управляющие импульсы широтно-импульсного преобразователя.

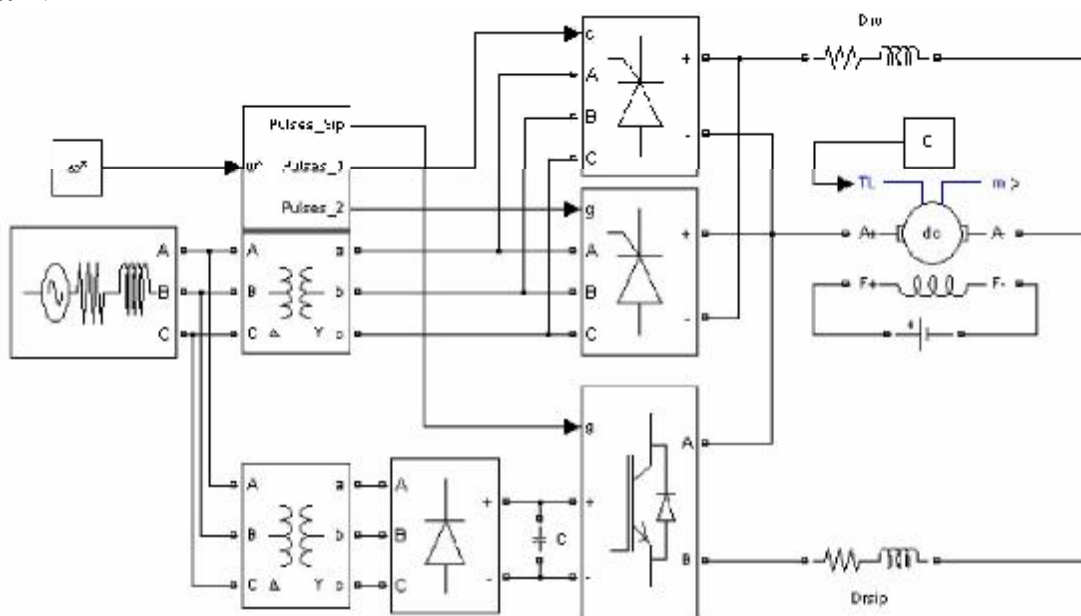


Рис. 3. Модель силовой части системы ЭП с комбинированным источником питания.

Система управления ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ, где СКЗ управляется по ошибке тока (см. рис. 1), показана на рис. 4, здесь ω^* – сигнал задания скорости; ω – сигнал обратной связи скорости двигателя; I_a – сигнал обратной связи тока якоря двигателя; I_s – сигнал обратной связи тока широтно-импульсного преобразователя; Bridge driver – логическое переключающее устройство; Bridge firing unit – система импульсно-фазового управления; Discrete PWM Generator – система управления широтно-импульсным преобразователем.

Система управления ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ, где СКЗ управляется по ошибке скорости (см. рис. 2), показана на рис. 5, здесь ω^* – сигнал задания скорости; ω – сигнал обратной связи скорости двигателя; I_a – сигнал обратной связи тока якоря двигателя; I_s – сигнал обратной связи

тока широтно-импульсного преобразователя; Bridge driver – логическое переключающее устройство; Bridge firing unit – система импульсно-фазового управления; Discrete PWM Generator – система управления широтно-импульсным преобразователем.

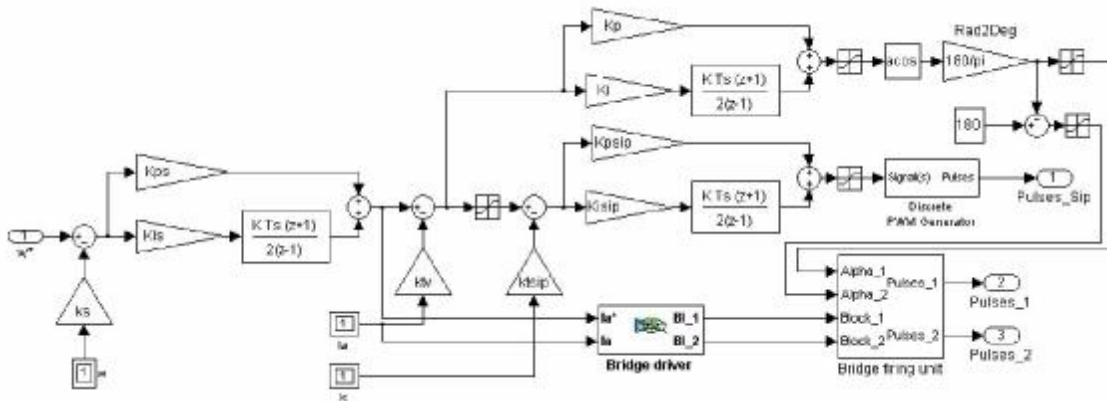


Рис. 4. Система управления ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ (см. рис. 1).

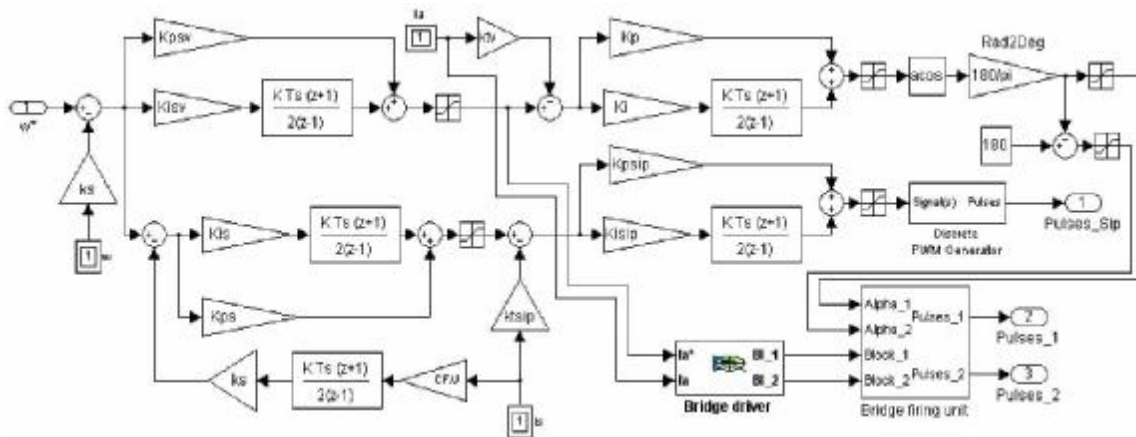


Рис. 5. Система управления ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ (см. рис. 2).

Числовые параметры моделей соответствуют параметрам электропривода с двигателем постоянного тока мощностью 75 кВт. Номинальные выходные токи ТП и ШИП (относительно параметров силовых трансформаторов) 262 А и 41 А соответственно. Ограничение тока ШИП на уровне 25 % от номинального тока ТП.

Контур тока системы ТП с СКЗ настраивали на модульный оптимум [3], а контур скорости – на симметричный оптимум, передаточные функции регуляторов при этом приняли вид:

$$W_{pm}^{MO}(p) = \frac{L}{a_{km} \cdot T_m \cdot k_n \cdot k_m} + \frac{R}{a_{km} \cdot T_m \cdot k_n \cdot k_m} \cdot \frac{1}{p},$$

$$W_{pc}^{CO}(p) = \frac{k_m \cdot J}{a_{kc} \cdot T_{m\,kc} \cdot C\Phi \cdot k_c} + \frac{k_m \cdot J}{4 \cdot T_{m\,kc}^2 \cdot a_{kc} \cdot C\Phi \cdot k_c} \cdot \frac{1}{p}.$$
(1)

При анализе систем ЭП (рис. 1, 2) по управлению на вход полученных моделей подавали единичный скачкообразный сигнал. На рис. 6 представлен переходный процесс пуска двигателя (до момента времени $t = 1$ с) системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока, в относительных единицах, при нулевом статическом моменте и настройке контура скорости на симметричный оптимум. На рис. 7 представлен переходный процесс пуска двигателя (до момента времени $t = 1$ с) системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости, в относительных единицах, при нулевом статическом моменте и настройке контура скорости на симметричный оптимум.

Для анализа кривых была смоделирована также работа систем ЭП постоянного тока на базе ТП-ДПТ, ШИП-ДПТ.

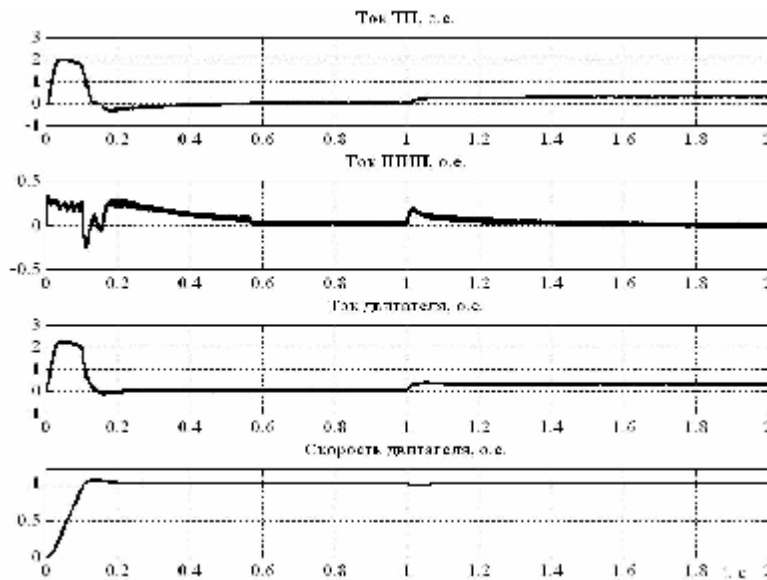


Рис. 6. Переходный процесс пуска двигателя системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока.

Анализ показал, что перерегулирование систем ЭП постоянного тока на базе ТП-ДПТ, ШИП-ДПТ и ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока примерно одинаково и составляет $\sigma \approx 5\%$. Перерегулирование системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости $\sigma \approx 15\%$. Самое большое время переходного процесса в «большом» имеет система ЭП постоянного тока на базе ТП-ДПТ $t_{\text{пн}} = 0.7$ с. Время переходного процесса системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости составляет $t_{\text{пн}} = 0.4$ с. Время переходного процесса системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока равно $t_{\text{пн}} = 0.35$ с. Самое маленькое время переходного процесса имеет система ЭП постоянного тока на базе ШИП-ДПТ $t_{\text{пн}} = 0.25$ с.

Проанализируем полученные системы по возмущению, для этого в момент времени $t = 1$ секунде увеличим момент нагрузки от нуля до 25% номинального момента двигателя. На рис. 6 и 7 представлены переходные

процессы системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока и на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости при набросе 25% номинальной нагрузки двигателя, в момент времени $t = 1$ с.

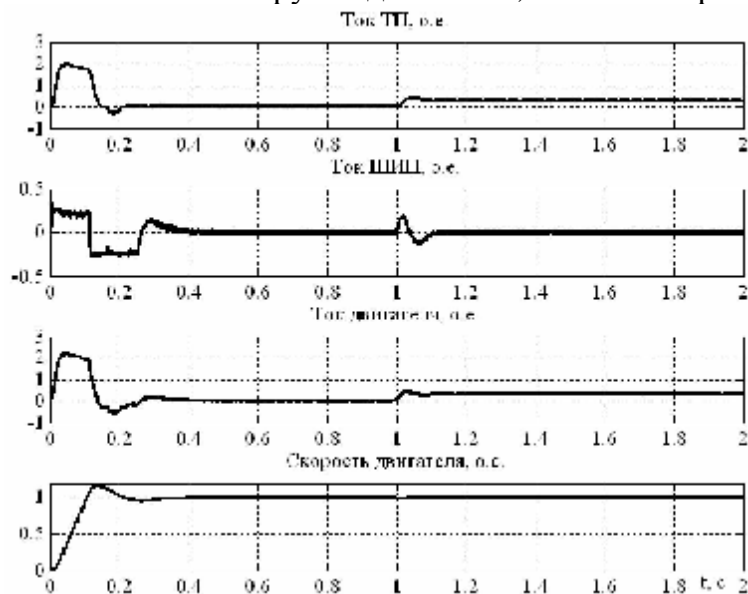


Рис. 7. Переходный процесс пуска двигателя системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости.

На рис. 8 представлены графики переходного процесса для скорости двигателя постоянного тока в увеличенном масштабе для системы ЭП постоянного тока на базе ТП-ДПТ, ШИП-ДПТ, ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока и ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости, в увеличенном масштабе, а также при набросе 25% номинальной нагрузки.

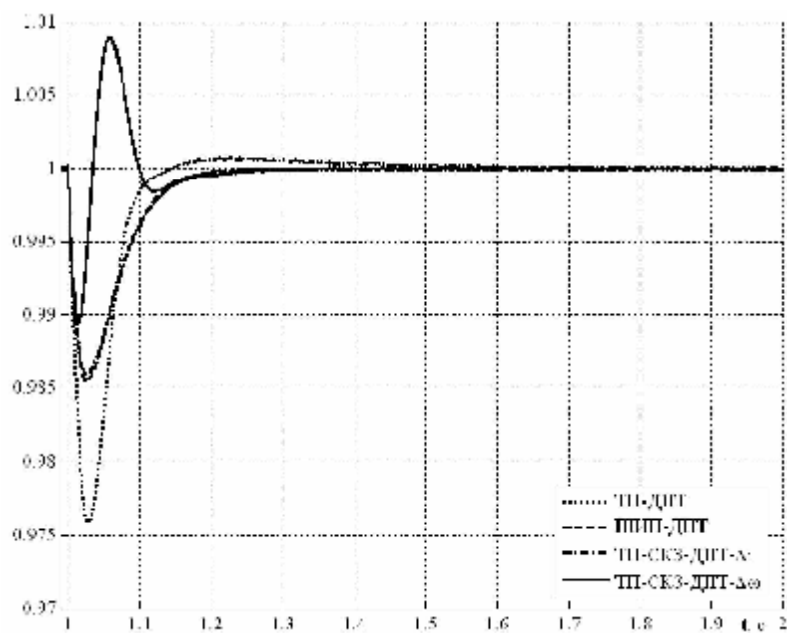


Рис. 8. Графики переходного процесса для скорости двигателя постоянного тока.

Далее делалась попытка улучшить характеристики рассматриваемых систем по возмущению. Для этого выполнялось ряд исследований. Во-первых, проводился анализ изменения параметра $a_{кт}$ ШИП (см. формулу 1), представляющего собой отношение постоянной времени интегрирования контура тока ШИП к суммарной малой некомпенсируемой постоянной времени, для системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока и на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости, который показал, что его изменение слабо влияет на переходные характеристики по управлению и возмущению данных систем.

Анализ изменения параметра $a_{кс}$ ТП (см. уравнение (1)) для системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке тока и на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости, показал, что его уменьшение ведет к ухудшению отработке возмущений и в «большом», и в «малом», система становится неустойчивой.

Анализ изменения параметра $a_{кс}$ ШИП (см. уравнение (1)), который проводился для системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости показал, что данная система имеет наименьшее время переходного процесса при отработке возмущений в «малом» (рис. 9) и в «большом» (рис. 10), при этом характеристики системы по управлению не изменились.

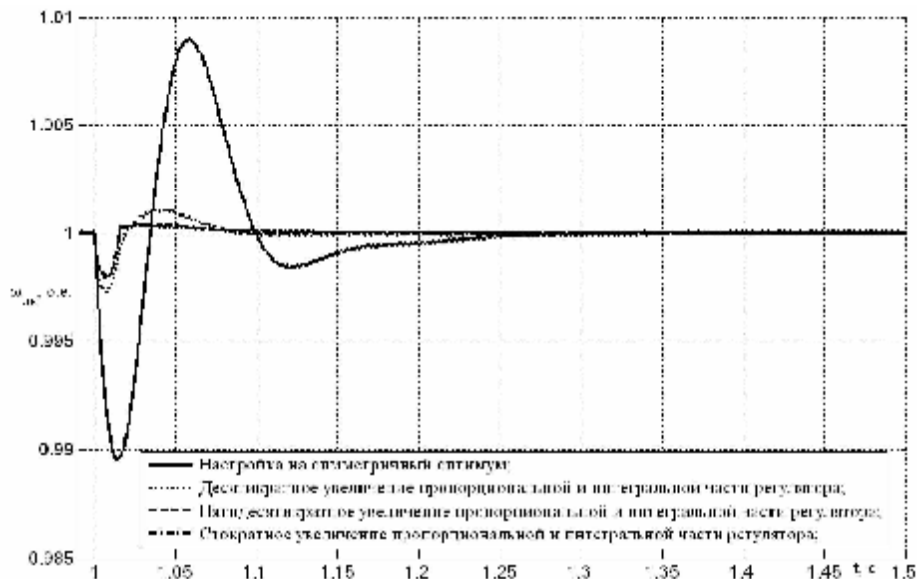


Рис. 9. Графики переходных процессов при отработке возмущений в «малом».

Анализ переходных процессов по возмущению «в малом» для системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости при различных несущих частотах коммутации транзисторов показал слабое влияние частоты коммутации транзисторов на время переходного процесса (полученные зависимости представляют собой прямые линии) и заметное влияние на перерегулирование. На рис. 11 показаны переходные

процессы по возмущению «в малом» для системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ и управлением по ошибке скорости при различных несущих частотах коммутации транзисторов.

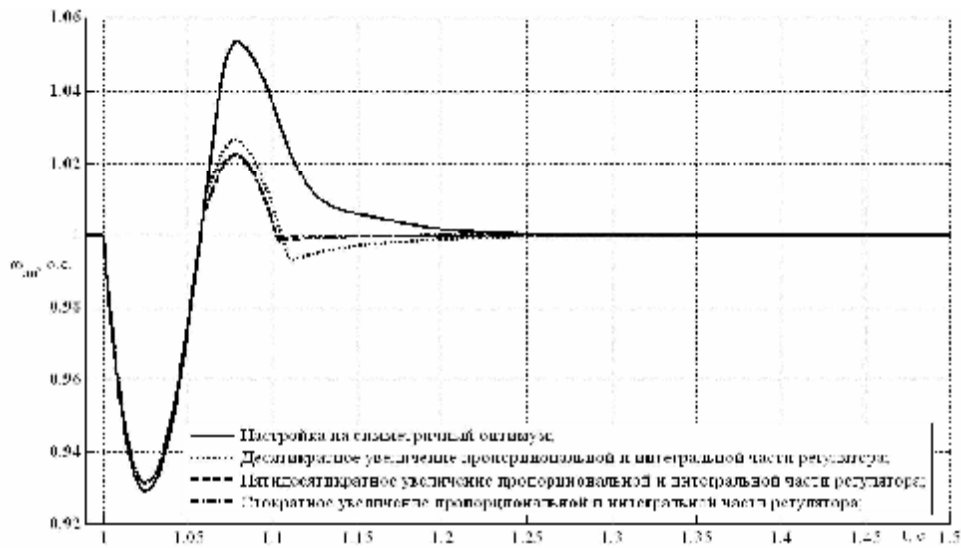


Рис. 10. Графики переходных процессов при отработке возмущений в «большом».

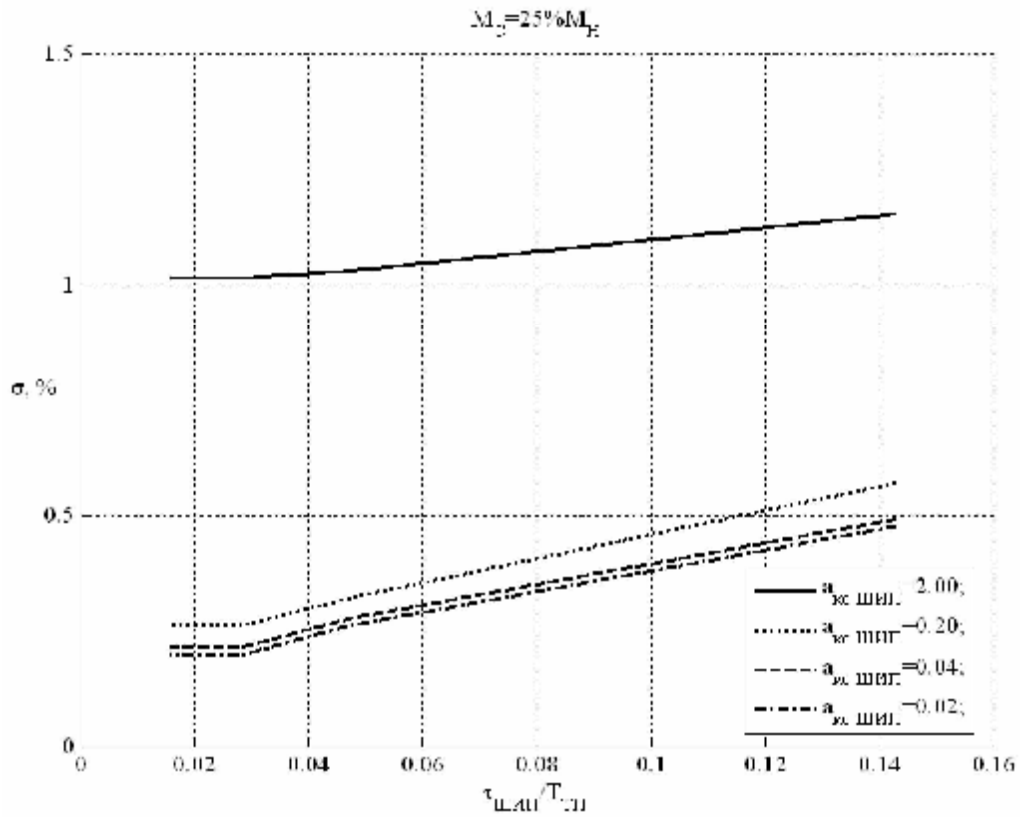


Рис. 11. Переходные процессы по возмущению «в малом» для системы ЭП постоянного тока на базе ТП с СКЗ.



Заключение

С учетом вышеизложенного в системах стабилизации скорости двигателя постоянного тока с силовой коррекцией силовым корректирующим звеном целесообразно управлять по ошибке скорости, а в контуре скорости ШИП использовать ПИ-регулятор с 10...20 кратным уменьшением пропорциональной и интегральной составляющих (отклонение от стандартной настройки на симметричный оптимум).

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильченко С.А., Горячев В.Ф., Латышко В.Д., Соловьев В.А. Устройство регулирования тока. А.С. №1332283 (СССР). Кл. G05F1/44. Оpubл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки». – 1987. – №31.
2. Васильченко С.А., Мурашко Ю.П., Латышко В.Д., Соловьев В.А. Электропривод постоянного тока. А.С. №1628173 (СССР). Кл. H02P5/06, Оpubл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки». – 1991. – №6.
3. Соловьев В.А., Васильченко С.А., Гнедин П.А. Улучшение динамических характеристик контура тока электропривода путем нелинейной силовой коррекции // Современные технологии в области энергоснабжения и автоматизации автономных объектов. Сборник докладов научно-практической конференции. – СПб.: ВИСУ, 2006. – С.33-43.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

УДК 004.65:004.051

© 2007 г. **Е.Л. Еремин**, д-р техн. наук
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

L-ДИССИПАТИВНОСТЬ ГИПЕРУСТОЙЧИВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ СТРУКТУРНОМ ВОЗМУЩЕНИИ. III¹

Определены достаточные условия L -диссипативности систем с явно-неявной эталонной моделью для управления неустойчивыми минимально-фазовыми скалярными объектами (имеющими относительный порядок передаточной функции больше единицы) с использованием метода структурного возмущения упрощенных гиперустойчивых систем последовательностью малоинерционных апериодических звеньев.

¹ Работа выполнена в рамках плана НИР по заданию Федерального агентства по образованию в 2007 г. «Модели и алгоритмы непрерывных и гибридных систем управления априорно неопределенными нелинейно-нестационарными объектами» и частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 07-08-00045).