

УДК 621.3.07

**С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Л.Е. Козлова, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин,
К.С. Афанасьев**

Разработка и исследование нейросетевого регулятора для электропривода с механической нагрузкой типа «пара трения»

Показана возможность решения проблемы фрикционных автоколебаний в электромеханических системах с нагрузкой «пара трения» с использования нейросетевого регулятора. Отличие предложенного способа устранения автоколебаний заключается в совместном использовании нейросетевого и классического регулятора. Такой подход дает возможность полностью сосредоточиться на стабилизации или устранении автоколебаний в механической части электропривода, а также значительно упростить разработку нейросетевого регулятора.

Ключевые слова: нейронная сеть, нейрорегулятор, вязкое трение, автоколебания.

В нежестких механических системах с нагрузкой типа «пара трения» может наблюдаться режим фрикционных автоколебаний (АК). Такие механические системы имеются в металлообрабатывающих станках, рельсовом транспорте, прокатных станах, где возникновение АК связано в основном с буксованием, юзом колесных пар или с пробуксовкой.

АК несут за собой негативные последствия, которые проявляются в виде сокращения срока службы агрегатов, увеличения упругих нагрузок в кинематических звеньях, а также в ухудшении технологического процесса.

Устранение фрикционных автоколебаний в таких механизмах возможно средствами регулируемого электропривода. Разработка теории, методов и алгоритмов управления, устраняющего автоколебания в механической системе электропривода, является актуальной задачей [1].

Для синтеза систем управления электропривода, подавляющих автоколебания, используется математический аппарат теории адаптивных систем, нейронных и нейронечетких сетей с применением генетических алгоритмов обучения, синергетического управления и т.д. Основной сложностью в решении данной задачи является то, что все эти методы чувствительны к изменению параметров в электроприводе или требуют дополнительных сведений о механизме, которые в реальных условиях получить сложно [2].

Интеллектуальные регуляторы на базе искусственной нейронной сети (ИНС) дают возможность организовать адаптивные алгоритмы управления, которые с применением стандартного математического аппарат реализовать сложно. Нейросетевые регуляторы (НСР) позволяют демпфировать автоколебания во всем заданном диапазоне работы электропривода и тем самым обеспечить устойчивую работу системы. К недостаткам этих регуляторов можно отнести необходимость обучения сети и выбор ее структуры.

Цель работы – исследование адаптивного электропривода постоянного тока с независимым возбуждением, построенного на основе НСР и классического регулятора, работающего на нагрузку типа «пара трения», а также оценка влияния НСР на механическую систему при изменении ее параметров.

В данной работе предлагается устранять возникновение автоколебаний в электромеханических системах с помощью НС-регулятора. Уникальность предложенного метода заключается в том, что данный регулятор работает совместно с классическим ПИ-регулятором, рассчитанным и оптимизированным на модульный оптимум. Основная задача нейросетевого регулятора – найти точку равновесия системы, где появление колебаний сводится к минимуму. Использование совместно двух разных структур регулятора позволяет полностью сосредоточиться на решении поставленной проблемы, а также снизить время обучения НСР [3, 4].

На рис. 1 показан принцип работы системы. Сначала на вход системы поступает задание по скорости $\omega_{ЗС}(t)$, затем вычисляется ошибка между заданным и текущим значением $\omega_{ОС}(t)$, которое определяется с помощью тахогенератора Вг. Далее ошибка проходит через ПИ-регулятор и на

выходе формируется соответствующее напряжение, необходимое двигателю постоянного тока для выхода на заданную скорость.

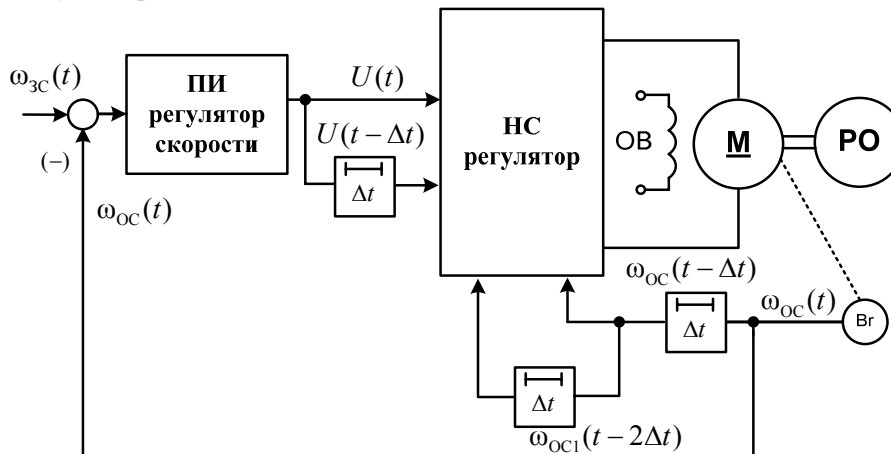


Рис. 1. Структурная схема электропривода постоянного тока с независимым возбуждением, работающего на нагрузку типа «пара трения»

На вход НСР поступают текущий $U(t)$ и задержанный выходной сигнал ПИ-регулятора $U(t-\Delta t)$, а также задержанные по времени значения скорости $\omega(t-\Delta t)$, $\omega(t-2\Delta t)$.

Величина временной задержки Δt составляет 0,0002 с. ПИ-регулятор обеспечивает астатизм электропривода, а НСР формирует напряжение в якорной цепи таким образом, чтобы система стала устойчивой.

Рабочий орган (РО) формирует нагрузку (рис. 2), которая приводит к нестабильной работе электропривода. Она имеет ярко выраженный нелинейный характер. Минимальный момент сопротивления (т. 1) определяется моментом трогания. На участке между точками 2 и 3 при увеличении скорости момент сопротивления нагрузки уменьшается. Появление автоколебаний в системе обусловлено именно падающим участком характеристики. При исследовании электропривода, работающего на нагрузку типа «пара трения» в диапазоне скоростей 35–55 рад/с, было установлено возникновение автоколебаний.

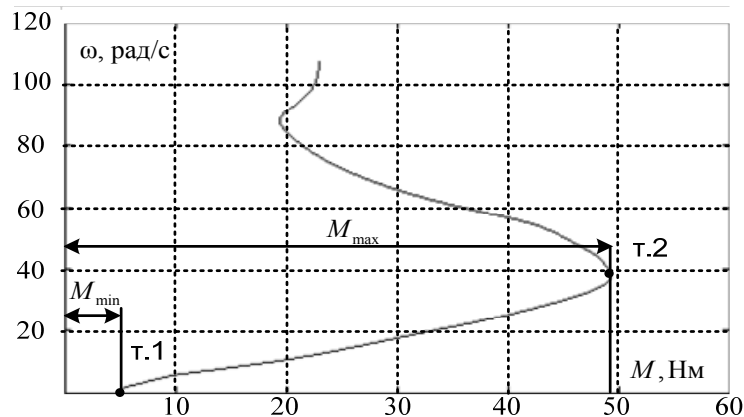


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления от скорости

При разработке нейросетевого регулятора использовалась структура сети, где входной слой имеет 4 нейрона, скрытый – 13, а выходной – 1. В качестве функции активации была выбрана логистическая функция

$$\text{logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$$

Она принадлежит к классу сигмоидальных функций, и ее аргумент может принимать любое значение в диапазоне $-\infty$ до $+\infty$, а выход изменяется в диапазоне от 0 до 1.

Тренировочный набор для НСР был получен с помощью имитационной модели, представленной на рис. 3. Вектор заданных значений $u_{з\Delta d}$, которые принимаются эталонными, был получен

следующим образом: сначала задана скорость и нагрузка, а затем был получен необходимый массив напряжения. Значения входных векторов для нейронной сети $U_{ВХ}(t), U_{ВХ}(t-\Delta t), \omega_{ВХ}(t-\Delta t), \omega_{ВХ}(t-2\Delta t)$ снимались по аналогичной имитационной модели, но уже с нагрузкой «пара трения».

Затем проводилось обучение НСР по полученным данным, которое проходило «с учителем», т.е. имелся вектор заданных значений, к которым стремилась сеть. Для повышения скорости обучения и уменьшения ошибки нейрорегулятора использовался метод обучения Левенберга–Марквардта. Данный метод обучения является оптимальным, так как позволяет получить неплохие результаты с небольшими затратами вычислительной мощности машины по сравнению с другими методами.

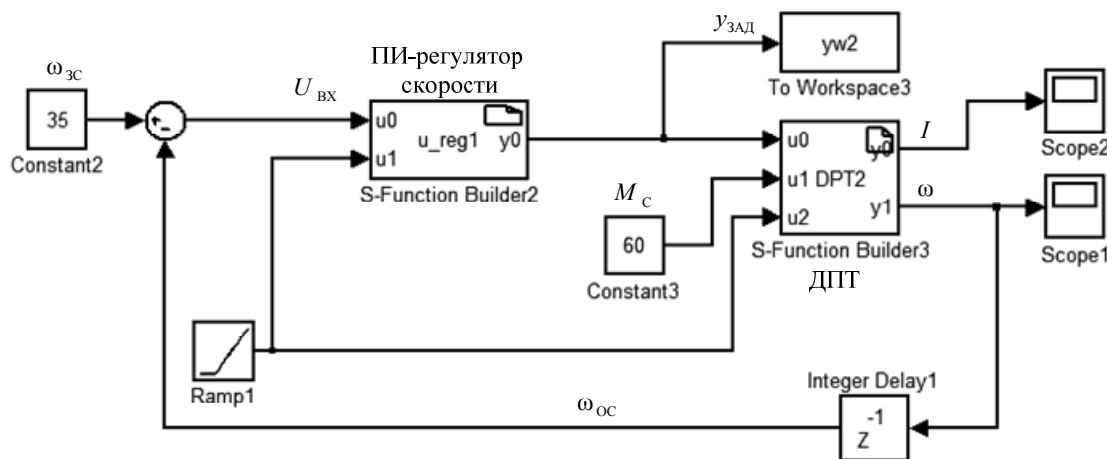


Рис. 3. Имитационная модель электропривода с ПИ-регулятором

При обучении сети использовалось 4000 эпох или, по-другому, 4000 итераций. Для обеспечения динамики нейронной сети были введены задержки по скорости и выходному сигналу с ПИ-регулятора.

Для получения удовлетворительных результатов достаточно провести обучение для одной заданной скорости и нагрузки, где наблюдались автоколебания. Улучшение результатов можно достичь, взяв несколько рабочих точек скорости и нагрузки.

Моделирование нагрузки типа «пара трения» (см. рис. 2) осуществлялось с помощью искусственной нейронной сети. Такой способ позволяет получить любую нелинейную кривую в виде функции, в данном случае зависимость момента сопротивления от скорости.

Помимо нагрузки типа «пара трения», использовалась нагрузка в виде реактивного момента, который определяет момент трогания.

Моделирование реверсивного электропривода постоянного тока с нагрузкой типа трения и НСР проводилось с помощью имитационной модели (рис. 4). Регулятор НСР1 и регулятор НСР2 обеспечивают работу привода в обоих направлениях и надежную работоспособность системы в диапазоне 20–120 рад/с. При скорости работы электропривода менее 20 рад/с наблюдается неустойчивая работа НСР (рис. 5, з). Для устранения этого недостатка можно дообучить нейронную сеть или отключить НСР, если не наблюдаются колебания при работе на заданной скорости. При моделировании был использован второй вариант.

Выбор регуляторов для прямого и обратного вращения привода позволяет организовать работу имитационной модели привода, когда от направления вращения зависит характер нагрузки. Это дает возможность более точно произвести настройку системы управления электропривода.

Моделирование двигателя и ПИ-регулятора производилось с помощью компонента Matlab Simulink S-Function, который позволяет реализовать модели в виде программного кода.

Элемент Ramp позволяет при повторном запуске модели обнулять параметры двигателя и ПИ-регулятора.

Результаты моделирования. На рис. 5 представлены результаты моделирования: слева – переходные процессы, полученные с помощью НСР, а справа – без него. Из данных графиков видно, что автоколебания удалось устранить во всем диапазоне их возникновения и привод работает на заданной скорости без статической ошибки.

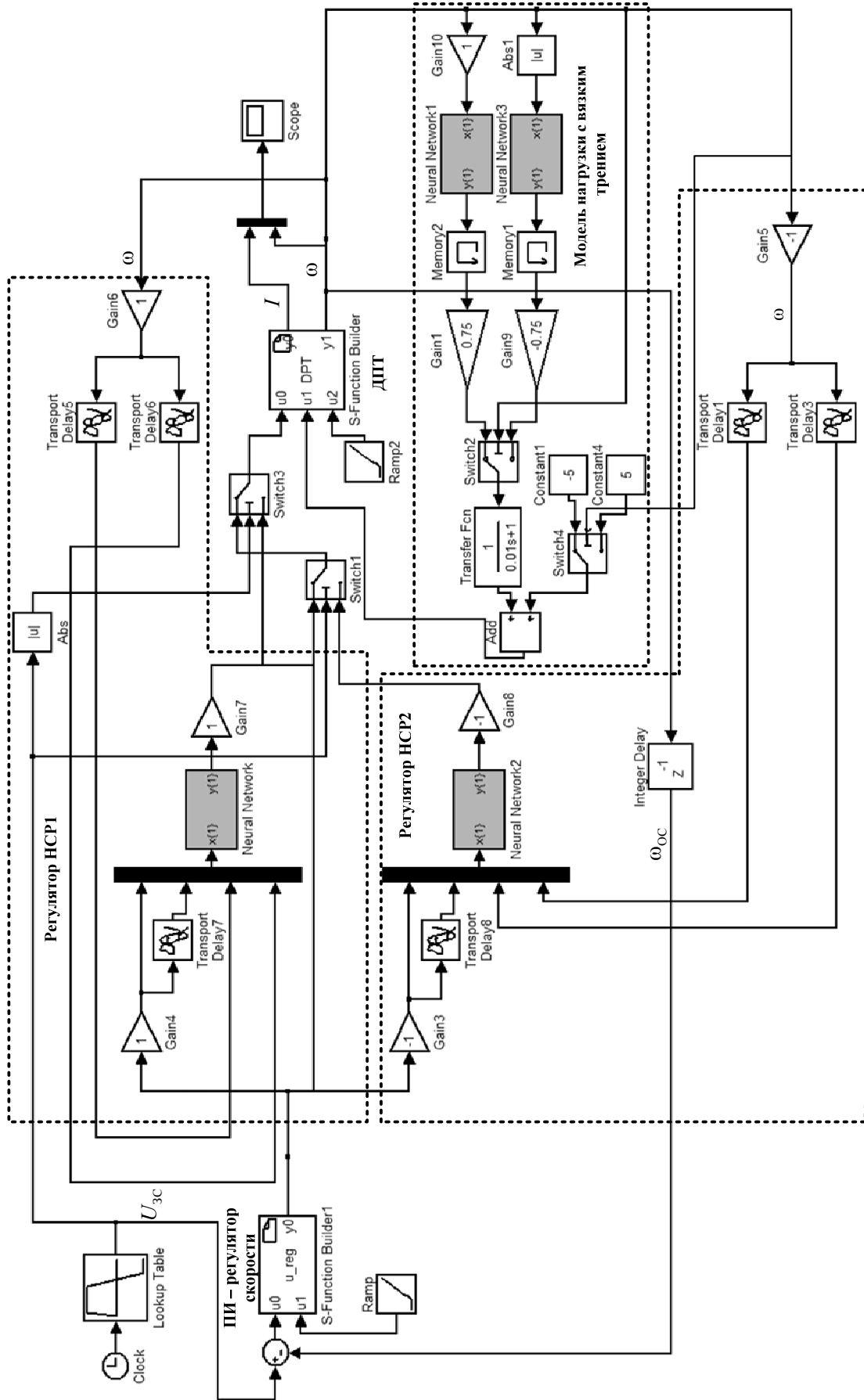


Рис. 4. Имитационная модель реверсивного электропривода постоянного тока с нагрузкой типа пара трения и НСР

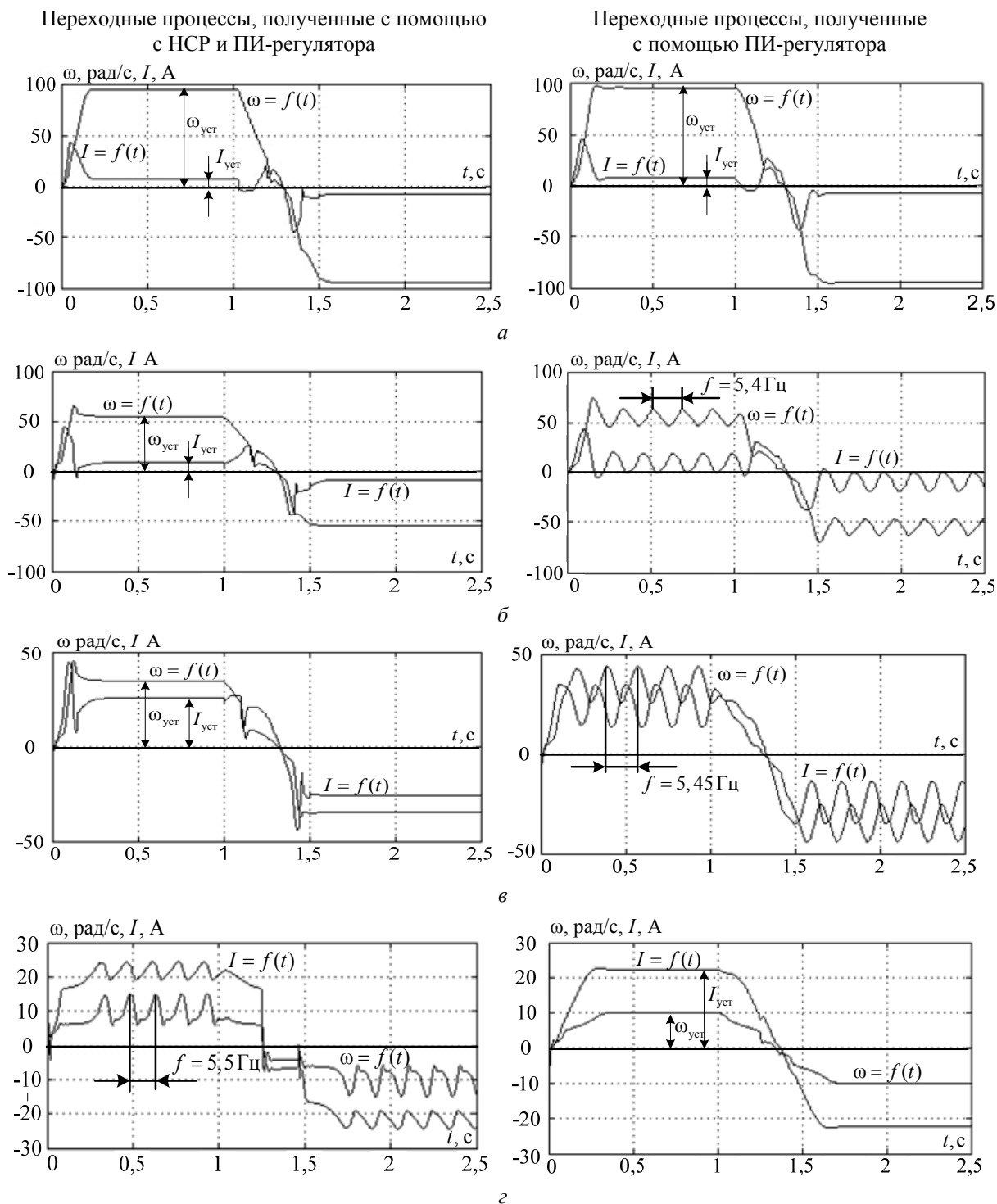


Рис. 5. Переходные процессы тока и скорости с НСР и без него при $\omega_{зад}$:
 а – 95 рад/с; б – 55 рад/с; в – 35 рад/с; г – 10 рад/с

Установлено, что НСР не так чувствителен к изменению параметров, как другие классические регуляторы. Это является одним из достоинств НСР, так как в ходе работы параметры привода могут меняться. Данный факт показан на рис. 6, из которого видно, что при уменьшении или увеличении момента инерции на 50% работоспособность регулятора на базе ИНС сохраняется. Изменение параметров механической части иллюстрирует меняющаяся частота автоколебаний (см. рис. 6). В ходе исследования было установлено, что НСР имеет зону нечувствительности к изменению характера нагрузки типа «пара трения».

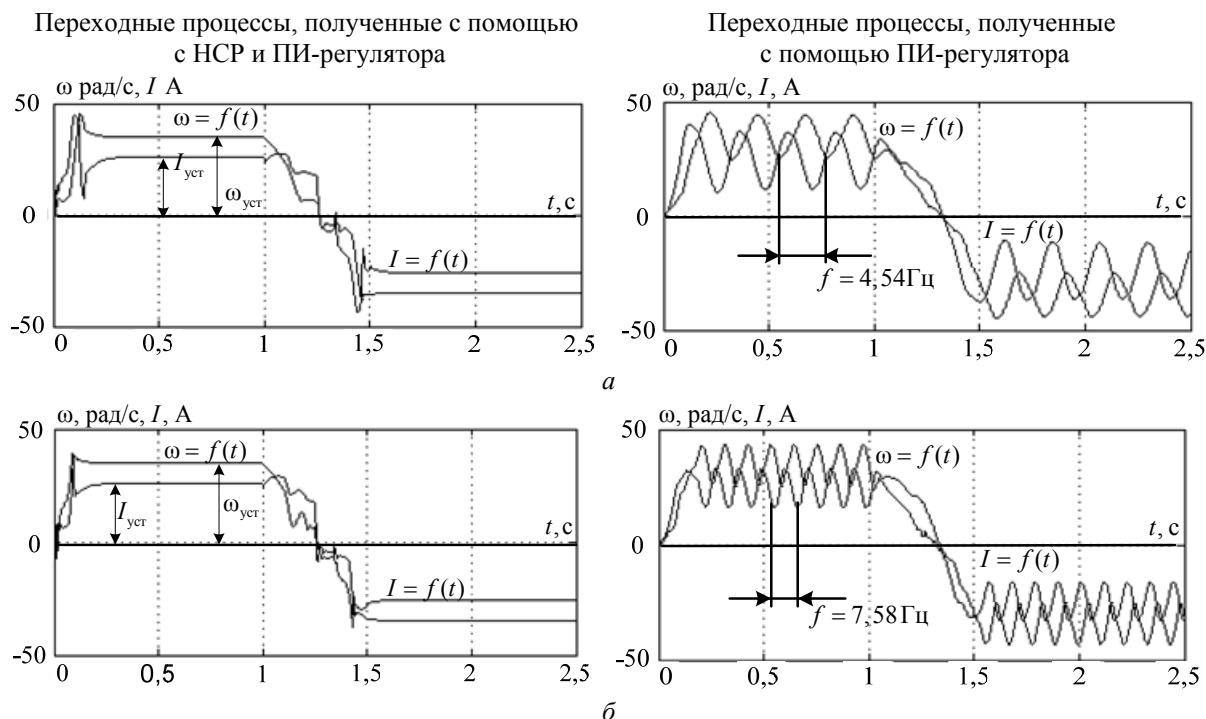


Рис. 6. Переходные процессы тока и скорости с НСР и без него при $\omega_{зд} = 35$ рад/с :

a – увеличение *b* – уменьшение момента инерции на 50%

При разработке НСР не использовалась дополнительная информация в виде значений тока с якоря двигателя постоянного тока, что значительно упрощает построение таких систем.

Заключение

1. При исследовании электромеханической системы, работающей на нагрузку типа «пара трения», было установлено, что замкнутая система с нейросетевым регулятором менее чувствительна к изменению момента инерции, чем система с классическим пропорционально-интегральным регулятором.

2. Недообученный нейросетевой регулятор полностью не решает поставленную задачу, а кроме того, приводит к смещению зоны возникновения автоколебаний в другой диапазон скоростей.

3. Одной из проблем нейросетевых регуляторов является то, что если он был разработан и настроен для конкретного объекта, то его работоспособность в другой системе не гарантирована.

Литература

1. Клепиков В.Б. Определение границ устойчивости электроприводов с вязким трением с учетом упругости кинематической цепи // *Электричество*. – 1989. – № 1. – С. 36–41.

2. Клепиков В.Б. Применение методов нейронных сетей и генетических алгоритмов в решении задач управления электроприводами / В.Б. Клепиков, К.В. Махотило, С.А. Сергеев // *Электротехника*. – 1999. – № 5. – С. 2–6.

3. Сивохин А.В. Искусственные нейронные сети / А.В. Сивохин, А.А. Лушников, С.В. Шибанов. – Пенза: Пенз. гос. ун-т, 2004. – 136 с.

4. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.

Ланграф Сергей Владимирович

Канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования (ЭПЭО)

Энергетического института ТПУ

Тел.: 56-37-59

Эл. почта: sergey.langraf@tpu.ru

Глазырин Александр Савельевич

Канд. техн. наук, доцент каф. ЭПЭО Энергетического института ТПУ

Тел.: 56-37-59

Эл. почта: ag@mail.elti.tpu.ru

Козлова Людмила Евгеньевна

Аспирант каф. электрических станций (ЭСС) Энергетического института ТПУ

Тел.: 56-37-59

Эл. почта: kozlovale@tpu.ru.

Глазырина Татьяна Анатольевна

Аспирант каф. ЭСС Энергетического института ТПУ

Тел.: 56-37-59

Эл. почта: tatjana.glazyrina@rambler.ru

Тимошкин Вадим Владимирович

Аспирант каф. ЭПЭО Энергетического института ТПУ

Тел.: 56-37-59

Эл. почта: timvv@sibmail.com

Афанасьев Кирилл Сергеевич

Магистрант каф. ЭПЭО Энергетического института ТПУ

Тел.: 56-37-59

Эл. почта: muzhik1@sibmail.com

Langraf S.V., Glazyrin A.S., Kozlova L.E., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Afanasyev K.S.

Development and research of neurocontroller for electric drive with a mechanical friction pair load

The article describes the opportunities of applying a neurocontroller in electromechanical systems with a friction pair load where the problems of self-excited frictional oscillations exist. The main advantage of the auto-oscillations elimination method is the usage of both neuro- and classic controller. This method allows to focus on the stabilization or elimination of auto-oscillations in the mechanical part of an electric drive system. Also it considerably simplifies the neurocontroller synthesis.

Keywords: neural network, neural network controller, viscosity, auto-oscillations.