

УДК 62-83:621.873

**МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ГЕНЕТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ ВО
ВЗАИМОСВЯЗАННОМ АСИНХРОННОМ ПРИВОДЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КРАНА**

*Орловский И.А., докторант, Бут Ю.С., аспирант
Запорожский национальный технический университет
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64, ЗНТУ, каф. ЭПА
E-mail: i_orlovsky@mail.ru, but_yul@mail.ru*

Розроблено модель взаємозалежного асинхронного привода переміщення крана з векторною системою керування й виконаний пошук за допомогою генетичних алгоритмів оптимального настроювання цього привода з мінімальними втратами енергії при відпрацюванні переміщення.

Ключові слова: взаємозалежний привод крана, генетичні алгоритми.

The model of the interconnected asynchronous drive of the crane moving with a vector control system is developed and search with the help of genetic algorithms of this drive optimum adjustment with the minimal energy losses is executed at improvement of moving.

Key words: crane interconnected drive, genetic algorithms.

Введение. В последние годы ведущие фирмы выпускают краны с раздельным приводом перемещения. В этом случае каждая ходовая тележка либо каждое колесо тележки имеет собственный привод. Привода тележек механически связаны между собой упругой металлоконструкцией пролетного строения и опор (козловые краны), а также сцеплением колёс с рельсами. При работе таких кранов возможны проскальзывание приводных колёс, наезд (с возможным заклиниванием реборд колёс) на головки рельсов, возможен "шагающий режим" - колебательный процесс поочередного забегания опор. Это связано с изменениями параметров привода и механизма, например: не одинаковые диаметры колёс (вследствие неточной обработки или неравномерного износа), не строго идентичные механические характеристики двигателей механизма перемещения, различные случайные статические нагрузки на опорах (связанные с изменениями массы и положения груза), искривление рельсового пути и др. Наезд реборд колёс на головки рельса кроме несимметричного перемещения опор крана может вызываться поперечными силами, возникающими при не строго вертикальном усилии в начале подъёма груза, при раскачке груза, а также из-за неровностей и кривизны рельсового пути.

Перекас крана и наезд реборд на головки рельса является нежелательным, поскольку возникают большие нагрузочные моменты на двигатели, происходит деформация металлоконструкции крана, износ ходовых частей крана, дополнительный расход электроэнергии. Разработке приводов перемещения крана посвящено большое число исследований.

Анализ предыдущих исследований. В [1] рассматривается взаимосвязанный электропривод перемещения крана с параметрическими способами регулирования асинхронными двигателями с фазным ротором: изменение подводимого к двигателю напряжения; регулирование тока ротора; использование несимметричных режимов работы. Система управления взаимосвязанным электроприводом

крана содержит местные обратные связи каждого привода, обеспечивающие требуемые регулировочные механические характеристики. Механическая система крана для простоты сведена к двухмассовой. Синхронизация выполнена с помощью обратной связи по разности угловых скоростей с пропорционально-дифференциальным преобразователем и обратной связи по разности пройденного пути с интегральным звеном. Система управления обеспечивает выравнивание скоростей опор крана и уменьшает статическую ошибку по пути. Однако, параметрические способы управления приводят к значительному дополнительному расходу энергии. Способы частотного управления перемещения крана и их оптимизация в работе не рассматривались.

В [2] рассматривается задача выполнения точно го перемещения груза произвольной массы (в пределах допустимой величины) на заданное расстояние и минимизирование раскачивания груза во время движения на примере мостового крана. Выполнено построение нейросетевого компенсатора, осуществляющего адаптивную коррекцию сигнала обратной связи в замкнутой системе управления мостовым краном. Показана возможность обеспечения заданной точности позиционирования односкоростного мостового крана с применением нейросетевого компенсатора при изменяющихся параметрах и шумах. При этом при обучении нейросетевого компенсатора критерий минимальной потери энергии не использовался.

В [3] представлены две схемы взаимосвязанных электроприводов, реализующих электрическое согласование скоростей вращения рабочих органов механизмов скрутки и бронирования кабелей. Авторы отмечают, что электроприводы с взаимной коррекцией скоростей (использование дополнительных перекрёстных связей) обычно используются в тех случаях, когда регулируемые скорости являются функционально равнозначными и выделить одну из этих скоростей как основную невозможно, что вполне можно при-

менить для взаимосвязанного привода перемещения крана.

В [4] рассмотрено оптимальное по быстродействию микропроцессорное управление электроприводом механизма поворота крана с использованием принципа максимума Понтрягина. При создании системы управления используется наблюдатель – цифровая модель объекта, реализуемая на базе микропроцессорной системы управления, которая формирует расчетные данные о поведении груза, а также позволяет выполнять комплексную автоматизацию технологического процесса поворота крана и согласованную работу нескольких приводов комплекса, таких как механизм вылета стрелы и подъема груза. В [5] рассмотрена система управления четырехдвигательного электропривода механизма поворота кислородного конвертора с кольцевым выравниванием нагрузок приводных электродвигателей конвертора. Каждый электропривод имеет датчик обратной связи по скорости. Для выравнивания нагрузок в состав каждой из систем авторегулирования отдельных электроприводов включен дополнительный регулятор выравнивания нагрузки, на входе которого (первая схема) производится сравнение величин токов нагрузки данного и соседнего с ним электродвигателей. Выходной сигнал регулятора выравнивания включен в качестве корректирующего на вход регулятора скорости соседнего электродвигателя. Во второй схеме на входе регулятора выравнивания производится сравнение выходных сигналов регуляторов скорости этих электроприводов. Выходные сигналы регуляторов выравнивания нагрузки поступают в качестве корректирующих на входы соответствующих регуляторов токов нагрузки электродвигателей. При настройке регуляторов как в [4], так и [5] критерий минимальных потерь энергии не рассматривался.

Для оптимального управления перемещением крана необходимо знание параметров механизмов и электроприводов и наличие алгоритмов управления электроприводами. Условия работы крана изменяются в широком диапазоне, к тому же, из-за сложности аналитических зависимостей описания механизмов крана, получение оптимальных алгоритмов управления в аналитическом виде далеко не всегда возможно. В настоящее время в системах автоматического управления электроприводов широко применяется микропроцессорная техника, что даёт возможность в полной мере воспользоваться результатами теории оптимального управления и позволяет применять различные интеллектуальные методики управления. В этих методиках используются искусственные нейронные сети, нечеткая логика и генетические алгоритмы (ГА), которые способны находить глобальный оптимум, не боятся нелинейностей объекта и не требуют точного знания параметров объекта управления.

В статье [6] описана эволюционная процедура разработки дискретного простого регулятора для электрических приводов. Выполняется ГА для тестирования и сравнения регуляторов разных порядков. По мнению авторов, регулятор, полученный с

помощью генетического поиска, значительно выигрывает у альтернативных систем, полученных обычными методами проектирования. В [7] показана оптимизация ПИД-регулятора с помощью многоцелевого ГА. Показано, что системы управления с параметрами, найденными ГА, выполняют оптимизацию по разным критериям: минимизация максимума ошибки, уменьшение времени регулирования выхода и другие. Однако, в [6] и [7] вопросы взаимосвязанного привода перемещения крана не рассматривались.

В [8] рассмотрено применение в электроприводе постоянного тока ГА для определения нелинейных П- и ПИ-регуляторов, обеспечивающих заданное качество управления объектом. Рассматривалось оптимальное управление по критерию минимизации потерь. Вопросы оптимального взаимосвязанного асинхронного привода перемещения крана не рассматривались.

Из анализа литературных источников следует, что вопросы оптимальной настройки параметров системы управления взаимосвязанного асинхронного привода крана по критерию минимальной потери энергии не рассматривались.

В данной статье нахождение оптимальных (минимизации потерь энергии) настроек системы управления подъемно-транспортного механизма предлагается выполнять с помощью ГА. Для решения задачи предлагается предварительную оценку искомым параметрам системы управления выполнять на модели электропривода крана. Модель объекта можно получить с использованием рекуррентных нейронных сетей [9, 10]. Такие сети позволяют представлять модель объекта в пространстве состояний, что даёт возможность аналитически вычислить требуемую минимальную структуру сети.

Цель работы. Разработка модели взаимосвязанного асинхронного привода перемещения крана с векторной системой управления и методики поиска с помощью ГА оптимальной настройки системы управления этого привода, обеспечивающей минимальные потери энергии при отработке перемещения.

Материал и результаты исследований.

Модель взаимосвязанного асинхронного привода перемещения крана. Структурная схема взаимосвязанного асинхронного электропривода перемещения крана с блоком ГА представлена на рис.1. РП1, РП2 – регуляторы положения, РС1, РС2 – регуляторы скорости, ЗМ1, ЗМ2 – звенья моментов асинхронных двигателей с векторной системой управления, ЗС1, ЗС2 – звенья скорости приводов, ЗП1, ЗП2 – звенья перемещения опор крана, РООС – регулятор общей обратной связи. На входе схемы для обеспечения плавного разгона и торможения есть задачник интенсивности ЗИ.

Взаимосвязь между двумя электроприводами представлена в виде разных моментов сопротивления, значения которых зависят от разности перемещений (перекоса). Радиусы приводных колес различны, их разность составляет от 0 до 10%.

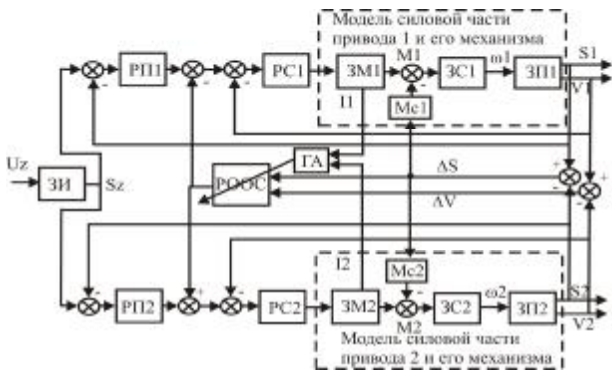
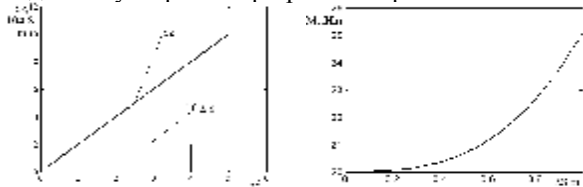


Рисунок 1 – Структурная схема двухдвигательного взаимосвязанного асинхронного привода перемещения крана с блоком ГА для настройки РООС

Для отработки методики оптимальной настройки системы используется упрощённая зависимость моментов сопротивления опор крана (рис. 2) от трения $M_{тр}$ и перекоса $M_{\Delta S}$:

$$M_c = M_{тр} + M_{\Delta S} = M_{тр} + |\Delta S + k \cdot \Delta S^3|, \quad (1)$$

где ΔS - разность перемещений опор крана, k - коэффициент. Наезд реборды колеса на головку рельса может возникать не только из-за возникновения перекоса опор крана, но также из-за искривлений рельсов и действия поперечных сил на опоры крана, вызванных раскачкой груза и смещением между центром массы груза и вертикальным положением крюка в начале подъёма. Данные факторы во многом являются случайными. Моделирование их воздействия задаётся небольшим возмущением в виде перекоса ΔS , через определённое время или перемещение (рис. 2а). Здесь же показан выходной сигнал с датчика интенсивности S_z , обеспечивающий заданное ускорение при разгоне крана.



а) задание и возмущение (перекос) крана
 б) зависимость M_c от ошибки перемещения

Рисунок 2 – Формирование задания и возмущения

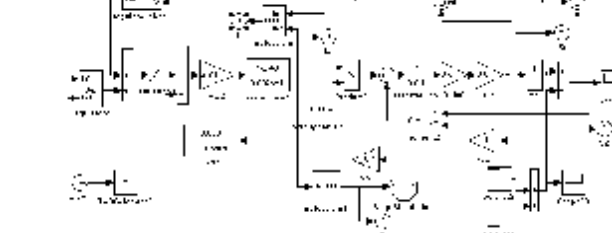


Рисунок 3 – Модель взаимосвязанного асинхронного привода перемещения крана

Асинхронные электроприводы с векторным управлением представлены блоками *Vozbyudzenie1,2*, *zveno toka1,2*, *transFcn2,3*. Используются двигатели 4A132S6У3 со следующими параметрами: номинальная мощность $P_{д.н}=5,5$ кВт, номинальное напряжение статора $U_{снф}=220$ В, номинальный ток статора $I_{снф}=10,4$ А, номинальная частота вращения $\omega_n=100,7c^{-1}$, номинальный момент двигателя $M_n=49,2$ Нм, число пар полюсов $z=3$, амплитуда номинального фазного потокосцепления ротора $\Psi_{rn}=0,889$ Вб, индуктивность рассеяния ротора $L_{\sigma r}=0,0074$ Гн, индуктивность намагничивания $L_m=0,128$ Гн, момент инерции двигателя $J_{дв}=0,04$ кг·м², постоянная времени датчика скорости $T_{фс}=0,005$ с, коэффициент передачи датчика скорости $k_c=0,099$ В/с⁻¹, коэффициент передачи датчика положения $k_{п}=0,1$ В/м.

Контур тока представлен инерционным звеном с постоянной времени $T_{и}=0,002$ с и коэффициентом передачи тока $k_T=0,48$ В/А. Передаточные функции регулятора скорости, настроенного на модульный оптимум (МО), $W_{pc}^{MO}(p)$ и регулятора положения, настроенного на МО, $W_{pp}^{MO}(p)$ имеют вид:

$$W_{pc}^{MO}(p) = k_T \cdot J_{дв} / (3 \cdot T_{\mu c}' \cdot (z \cdot K \cdot \Psi_{rn}) \cdot k_c) = 2,84, \quad (2)$$

$$W_{pp}^{MO}(p) = k_c / (4 \cdot T_{\mu c}' \cdot k_{п}) = 27,5, \quad (3)$$

где $T_{\mu c}' = 0,009$ с, $K = L_m / (L_m + L_{\sigma r}) = 0,95$.

Для обеспечения синхронного перемещения опор (уменьшения перекоса) в системе имеется РООС по разности скоростей и положений приводов. В РООС по разности скоростей имеется пропорциональное звено, а по разности положений - пропорциональное и интегральное звенья. Параметры этих звеньев можно найти с помощью классических настроек, например на МО. Однако такая настройка не обеспечивает минимальные потери энергии при отработке заданного перемещения при известных параметрах привода а тем более при изменяющихся параметрах.

Для настройки параметров, исходя из требуемых критериев качества, используем возможности ГА. Целевая функция ГА, составленная для критерия, который минимизирует суммарные потери энергии в обоих приводах, при отработке заданного перемещения, описывается следующей функцией:

$$F = \int_0^T R(I_1^2(t) + I_2^2(t))dt, \quad (4)$$

где $I_1(t)$, $I_2(t)$ – моментные составляющие токов соответственно первого и второго двигателей; R – суммарное активное сопротивление в статорной цепи двигателя; T – время отработки перемещения крана; t – текущее время.

Организация программы поиска параметров

РООС с помощью ГА. Программа поиска параметров РООС состоит из программы блока генетических операций и программы модели взаимосвязанного электропривода. Программа блока генетических операций состоит из основного модуля и модуля поиска оптимальных параметров. В основном модуле задаются: количество варьируемых переменных, параметры генетических операций, критерии останова ГА, начальные значения варьируемых параметров, а также осуществляется запуск модуля определения лучших параметров. В модуле поиска оптимальных параметров выполняются генетические операции, и для каждого нового значения параметров РООС осуществляется запуск программы модели электропривода, и по результату моделирования вычисляется фитнес функция, согласно уравнению (4).

Система управления взаимосвязанного привода содержит РООС, настраиваемый с помощью ГА, регулятор положения и скорости каждого привода с параметрами, полученными по уравнениям (2) и (3). РООС выполняется в виде ПИ-регулятора по разности перемещений и П-регулятора по разности скоростей. Для его настройки необходимо определить три параметра: K_p – коэффициент пропорциональной части и K_i – коэффициент интегральной части по разности перемещений, K_{pw} – коэффициент пропорциональной части по разности скоростей. Для представления трех параметров регулятора используются три хромосомы. В модели взаимосвязанного привода (рис. 3) блоки Regulator1,2 – регуляторы положения, блоки moment1,2 – момент сопротивления (уравнение (1)), блок regulator obchi – РООС, блок Ostanovka – останова моделирования, если ток двигателя превысит $2I_n$.

Результаты моделирования. Моделирование электропривода выполнялось в системе MATLAB с использованием пакета инструментов ГА с фиксированным шагом 0,01с. В основном модуле программы блока генетических операций для всех настроек параметров РООС задавались следующие параметры ГА: диапазон начальной популяции [0;200], количество эпох - 50, размер популяции - 100, вид мутации - однородная, вероятность мутации – 0,9, отбор – турнирный метод с размером особей в подгруппе 6, число элитных особей – 3, кроссовер – рассеивающий. Данные параметры выбраны по результатам экспериментов.

Результаты настройки для критерия (уравнение (4)) параметров РООС для минимизации суммарных потерь энергии в обоих приводах с моментом инерции J_n и $2J_n$ приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов и потерь энергии

Момент инерции	Кэф. регулятора, найденные ГА		Потери энерг, Втс		Уменьшение потерь
			МО	ГА	
J_n	K_p	20,838	588,05	570,88	3%
	K_{pw}	0,5027			
$2J_n$	K_p	22,319	626,08	613,36	2%
	K_i	58,29			
	K_{pw}	0,84216			

Результаты моделирования взаимосвязанного привода с заданной нагрузкой и моментом инерции без РООС, с настройкой на МО при параметрах

РООС, найденных ГА (таблица 1), приведены на рис. 4 и 5. Электрические потери (рис. 4в и 5в) при параметрах РООС, найденных ГА, при J_n составляю 570,88 Втс, при $2J_n$ составляют 613,36 Втс. А при стандартной настройке на МО электрические потери составляют 588,05 Втс, при $2J_n$ составляют 626,08 Втс, что превышает потери в приводе с системой управления, настроенной с помощью ГА.

Выводы. 1. Разработана модель взаимосвязанного асинхронного привода перемещения крана. 2. Проверена методика применения ГА для настройки РООС с учетом минимальных электрических потерь. Получены с помощью ГА значения параметров РООС для различных моментов инерции. 3. Результаты моделирования показали уменьшение электрических потерь на 2-3% за 5-6с во взаимосвязанном асинхронном приводе с РООС, параметры которого определены ГА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Герасимьяк Р.П. Динамика асинхронных электроприводов крановых механизмов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
2. Гаврилов А.Ю. Разработка методов и средств управления подъемно-транспортными электротехническими системами [Электронный ресурс]: Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 - М., 2003. – 180 с.
3. Трухан Д.А. Взаимосвязанный и частотно-управляемый электропривод технологической линии скрутки и бронирования кабеля [Электронный ресурс] : Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03.- Краснодар, 2004. – 193 с.
4. Тепляков А.Г. Реализация оптимального управления частотным электроприводом механизма поворота // Электромашинобудування та електрообладнання. Вип. 62. – Одеса, 2004. – С. 36-39.
5. Лимонов Л.Г., Моргулис В.П. Управление многодвигательным электроприводом // Вестник Национал. Технического ун-та. Харьков. Политех. Ин-т. Тем. Вып. 45."Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков, 2005. – С. 244-245.
6. Francesco Cupertino, Member, IEEE, Ernesto Mininno, David Naso, Biagio Turchiano, Senior Member, IEEE, and Luigi Salvatore. On-Line Genetic Design of Anti-Windup Unstructured Controllers for Electric Drives With Variable Load//IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOL. 8, NO. 4, AUGUST 2004.– P. 347-364.
7. K. S Tang, K.F. Man, G. Chen, S. Kwong. An Optimal Fuzzi PID Controller// IEEE Transactions on industrial electronics. – 2001. - Vol. 48, № 4, august, - P. 757-765.
8. Орловский И.А., Бут Ю.С. Применение генетических алгоритмов для определения параметров нелинейных регуляторов в электроприводе постоянного тока // Электротехніка та електроенергетика.- 2005. - №2.- С. 62-68.
9. Орловский И.А., Бут Ю.С. Поиск генетическими алгоритмами весовых коэффициентов в моделях тиристорного электропривода на рекуррентных нейронных сетях // Искусственный интеллект. - 2006. - №3. - С. 314-326.
10. Орловский И.А., Синявский А.А. Разработка моделей нелинейных электротехнических объектов в виде степенных рекуррентных нейронных сетей. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. - 2007. - №1.

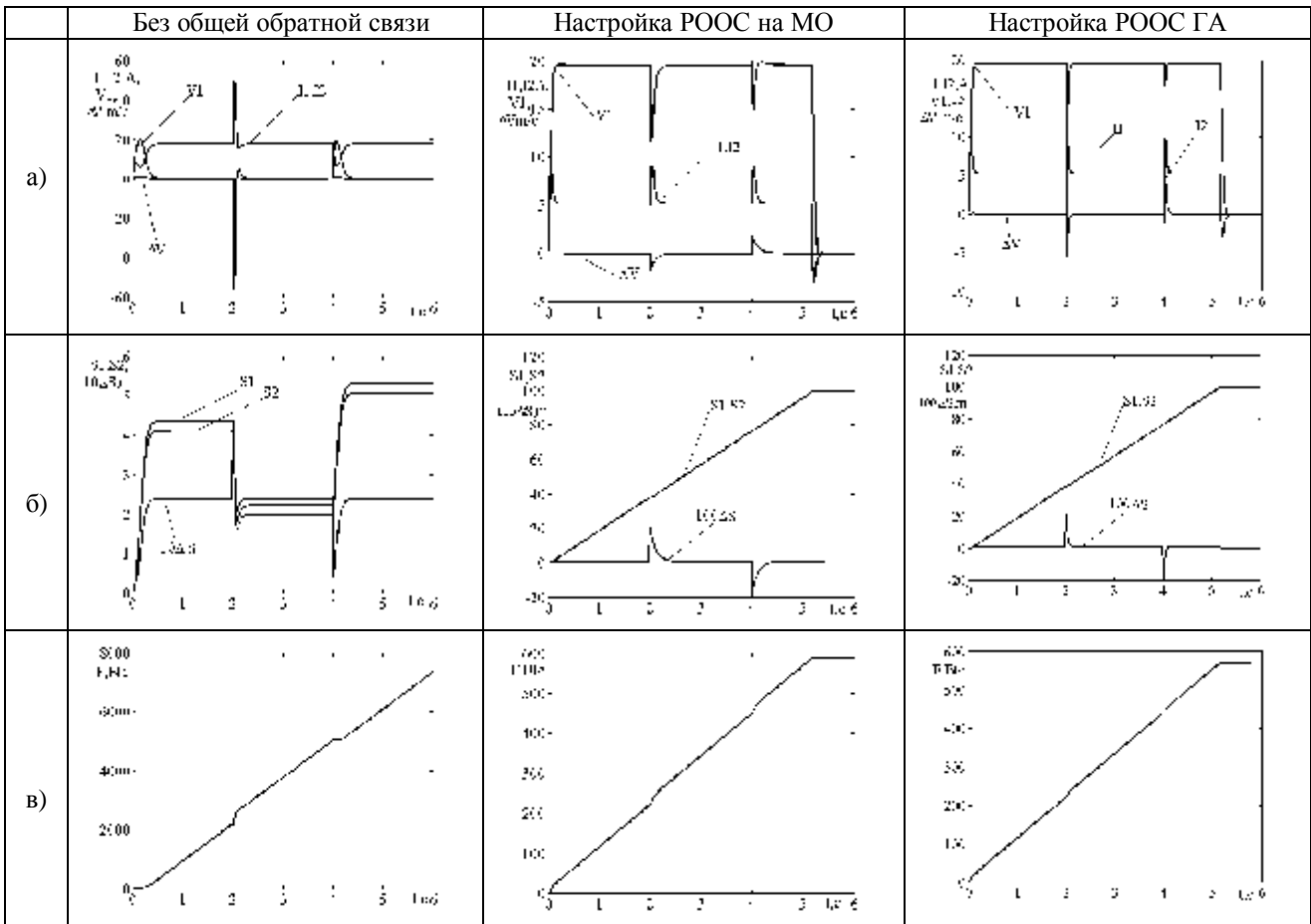


Рисунок 4 – Результаты моделирования работы взаимосвязанного привода с моментом инерции J_H :
а) линейные скорости и токи АД; б) перемещения; в) электрические потери

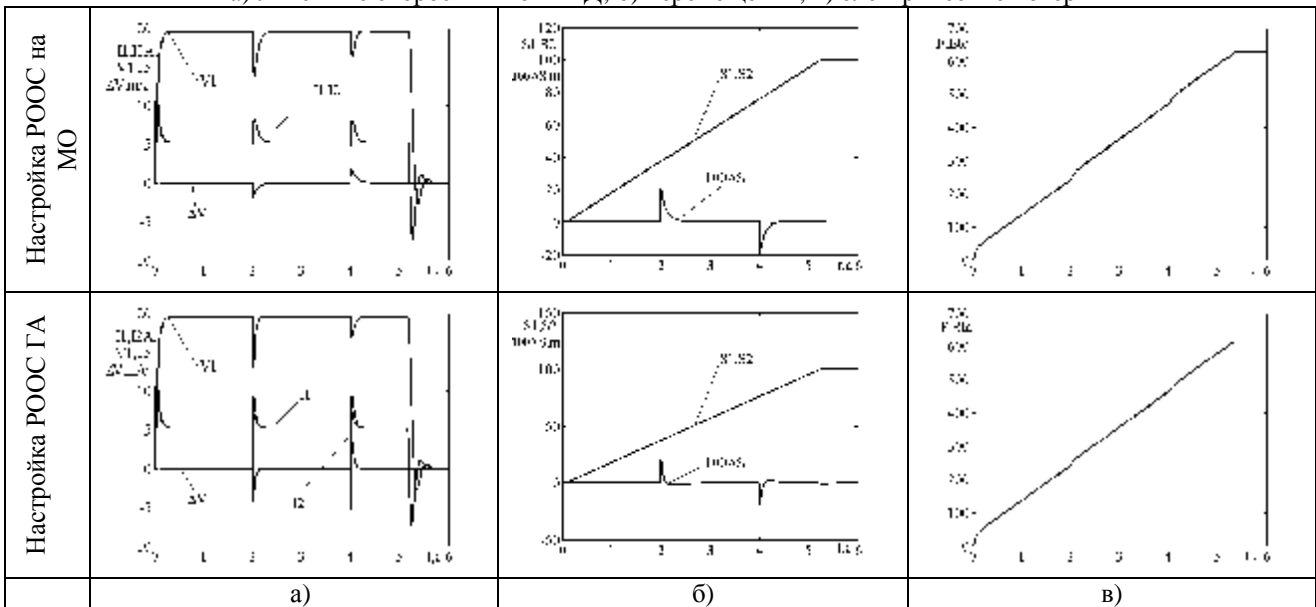


Рисунок 5 – Результаты моделирования работы взаимосвязанного привода с моментом инерции $2J_H$:
а) линейные скорости и токи АД; б) перемещения; в) электрические потери

Статья надійшла 14.04.2007р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Волковим О.В.