

### НАБЛЮДАТЕЛЬ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА С РЕВЕРСОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В статье рассматривается способ косвенного вычисления скорости вращения двигателя в электроприводах постоянного тока, где реверс и торможение осуществляется изменением магнитного потока. В данных электроприводах определение скорости через электрические переменные системы (ток якорной цепи, напряжение на якоре, ЭДС) является недостаточно точным, так как при осуществлении реверсов и торможений происходит снижение магнитного потока до нулевого значения. Это приводит к возникновению значительной ошибки вычисления скорости. Для устранения данного недостатка предлагается использовать наблюдатель с переключающейся структурой. Он содержит две модели вычисления скорости. Одна модель осуществляет расчет скорости по электрическим переменным двигателя. Другая, представляющая собой модель механической части электропривода, осуществляет расчет скорости на основе уравнения движения электропривода. Предложена структура наблюдателя, описан принцип его действия. Рассмотрены линеаризованные структурные схемы замкнутой системы управления электропривода «Регулируемый источник тока – двигатель» в различных режимах работы наблюдателя. Синтезирован регулятор скорости и даны рекомендации по расчету его параметров при работе наблюдателя по электрическим и магнитным переменным двигателя. Проверена устойчивость системы электропривода в других режимах. Разработана имитационная модель предложенной системы управления в системе *MatLab Simulink*. Приведены экспериментальные осциллограммы, подтверждающие теоретические положения и адекватность моделирования. Проверена работоспособность системы управления электроприводом с обратной связью от наблюдателя при изменении момента инерции механизма и статического момента нагрузки. В заключение сделан вывод о возможности применения предложенной бездатчиковой системы в электроприводах механизмов поворота и подъема карьерных экскаваторов.

**Ключевые слова:** магнитный поток, скорость, переключающаяся структура, наблюдатель, реверс, момент инерции, обратная связь.

#### ВВЕДЕНИЕ

Электроприводы основных механизмов одноковшовых экскаваторов, оснащенные двигателями постоянного тока, как правило, построены по двум системам: «Генератор – двигатель» (Г-Д) и «Тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д). В данных системах управление скоростью и моментом по величине и направлению осуществляется регулированием напряжения якоря двигателя по величине и полярности [1, 2]. Этот способ построения системы автоматического управления обеспечивает необходимый диапазон регулирования скорости, жесткость механических характеристик и рекуперацию энергии. Данные системы позволяют обходиться без обратной связи по скорости и являются более удобными в эксплуатации.

С целью снижения затрат на силовой преобразователь целесообразно в цепь якоря двигателя включать неревверсивный вентильный преобразователь, а реверс двигателя осуществлять изменением направления тока в обмотке возбуждения [3-5]. Таким образом можно перейти от системы ТП-Д к системе «Регулируемый источник тока – двигатель» (РИТ-Д) [6, 7]. Для обеспечения управляемости как по заданию, так и по нагрузке в данной системе необходимо наличие датчика скорости [8]. Целью работы является разработка способа косвенного вычисления скорости в электроприводах постоянного тока с реверсом магнитного потока.

#### ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМА

Система уравнений, позволяющая оценить скорость вращения двигателя постоянного тока при из-

вестных мгновенных значениях электрических и магнитных переменных, имеет вид

$$\begin{cases} e = u - i_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} - L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt}; \\ k\Phi = f(i_{\text{в}}); \\ \omega = \frac{e}{k\Phi}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $u$  – напряжение на якоре;  $i_{\text{я}}$  – ток, протекающий по якорной цепи;  $e$  – ЭДС двигателя;  $\Phi$  – магнитный поток;  $k$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $i_{\text{в}}$  – ток возбуждения;  $\omega$  – угловая скорость вращения вала двигателя;  $R_{\text{я}}$  и  $L_{\text{я}}$  – активное сопротивление и индуктивность якорной цепи соответственно;  $f(i_{\text{в}})$  – нелинейная функция, учитывающая насыщение магнитной цепи.

Структурная схема блока косвенного вычисления скорости, построенная на основе системы уравнений (1), представлена на рис. 1 [9].

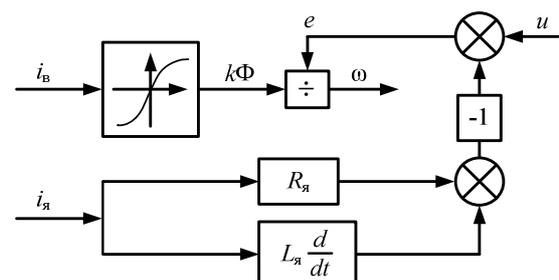


Рис. 1. Структурная схема косвенного вычисления скорости

В системе ТП-Д, где реверс осуществляется изменением полярности напряжения якоря двигателя, а магнитный поток не изменяется (регулирование в первой зоне), вычисление скорости не представляет собой сложную задачу. Анализируя систему уравнений и структурную схему, можно выявить основную проблему. Применение данного способа в системе РИТ-Д, где реверс и торможение осуществляются изменением полярности магнитного потока, затруднительно, так как снижение магнитного потока до нуля приводит к значительному увеличению ошибки вычисления скорости.

РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

На рис. 2 представлена функциональная схема рассматриваемой системы РИТ-Д.

Система содержит два канала управления, основным из которых является реверсивный канал управления возбуждением двигателя и вспомогательный – быстродействующий, неререверсивный канал управления током якоря. В установившихся режимах работы система управления работает так же, как обычная система подчиненного регулирования, за исключением того, что при изменении знака напряжения на выходе регулятора скорости (РС) изменяется знак напряжения задания на ток возбуждения при неизменном знаке напряжения на выходе функционального преобразователя (ФП). Целесообразная форма характеристики ФП определяется характером статической нагрузки электропривода. Логическое переключающее устройство (ЛПУ) необходимо для полного устранения ложных выбросов момента, возникающих в результате разницы в быстродействии контуров регулирования тока якоря и тока возбуждения [3, 10].

Его назначение состоит в том, чтобы на вход регулятора тока (РТЯ) подавать сигнал, равный нулю, если знаки задания на ток возбуждения и рассчитанного магнитного потока противоположны друг другу.

На рис. 3 представлены осциллограммы работы системы РИТ-Д, где в качестве датчика обратной связи по скорости использовался квадратурный энкодер. Экспериментальные исследования проводились на испытательном стенде, состоящем из исследуемого двигателя ДПЭ-52 ( $P_H = 54 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 150 \text{ А}$ ,  $n_H = 1200 \text{ об/мин}$ ,  $U_H = 395 \text{ В}$ ,  $I_{BH} = 10 \text{ А}$ ,  $U_{BH} = 85 \text{ В}$ ,  $\eta_H = 91 \%$ ) и нагрузочной машины, представляющей собой генератор постоянного тока ПЭМ141-4К-2У2 ( $P_H = 250 \text{ кВт}$ ,  $I_H = 397 \text{ А}$ ,  $n_H = 1000 \text{ об/мин}$ ,  $U_H = 630 \text{ В}$ ,  $I_{BH} = 12 \text{ А}$ ,  $U_{BH} = 30 \text{ В}$ ).

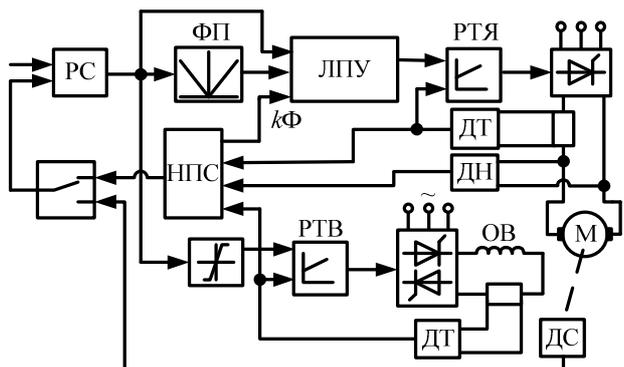


Рис. 2. Функциональная схема системы РИТ-Д

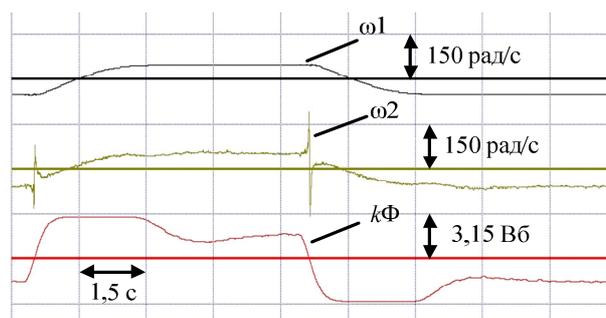


Рис. 3. Осциллограммы работы системы РИТ-Д ( $\omega_1$  – скорость, измеряемая квадратурным энкодером,  $\omega_2$  – вычисляемая скорость по рис. 1,  $k\Phi$  – магнитный поток с учетом конструктивного коэффициента двигателя)

Суммарный момент инерции системы составлял  $17 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ . Вычисление магнитного потока осуществлялось путем пересчета универсальной кривой намагничивания на исследуемый двигатель с последующим фильтрованием вычисленного магнитного потока [11, 12]. В качестве фильтра использовалось цифровое инерционное звено, постоянная времени которого учитывала влияние вихревых токов.

Из приведенных осциллограмм видно, что в моменты реверса магнитного потока скорость, вычисляемая косвенным путем, изменяется скачкообразно при приближении и переходе магнитного потока через нулевое значение.

Для устранения ошибки предлагается использовать наблюдатель с переключающейся структурой (НПС). На рис. 4 представлена его имитационная модель, построенная в системе *MatLab Simulink*. В зависимости от величины магнитного потока скорость вычисляется либо через электрические параметры согласно рис. 1, либо через модель механической части электропривода, которая описывается уравнением

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \tag{2}$$

где  $M$  – электромагнитный момент двигателя,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  $M_c$  – статический момент нагрузки,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  $J$  – суммарный момент инерции электропривода,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ .

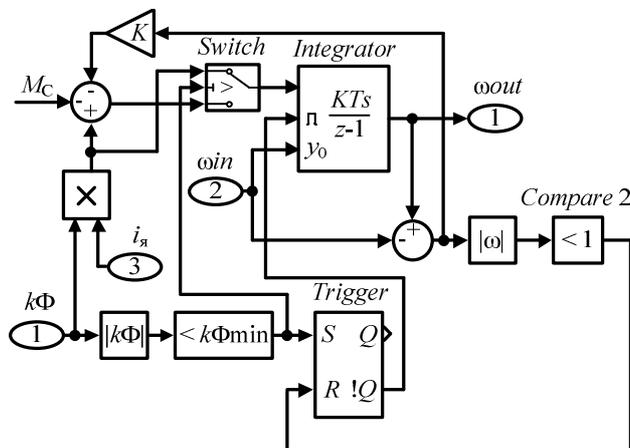


Рис. 4. Имитационная модель наблюдателя с переключающейся структурой

Блок «Integrator» является цифровой моделью механической части электропривода. Входным сигналом интегратора является электромагнитный момент, получаемый путем перемножения тока якорной цепи « $i_{я}$ » и магнитного потока « $k\Phi$ », рассчитанного по модели, структурная схема которой представлена на рис. 1.

$$\omega = \frac{1}{J} \cdot \int [i_{я} \cdot k\Phi] dt . \quad (3)$$

На вход интегратора в качестве начального условия подается скорость вращения « $\omega_{in}$ », вычисленная через электрические параметры системы. Если магнитный поток « $k\Phi$ » больше (по модулю), чем уставка минимального потока « $k\Phi_{min}$ », то на выходе «! $Q$ » триггера формируется сигнал логической «1» и интегратор находится в сброшенном состоянии. Выходная скорость « $\omega_{out}$ » при этом соответствует скорости « $\omega_{in}$ » [9].

Рассмотрим работу НПС при осуществлении реверса магнитного потока. При снижении потока ниже уставки RS триггер переключается, формируя сигнал на включение интегратора. Одновременно с этим на вход интегратора начинает поступать сигнал, соответствующий электромагнитному моменту двигателя и вычисляемый блоком «Product». При достижении магнитным потоком значения большего, чем « $k\Phi_{min}$ », блок «Switch» переключается и на вход интегратора подается динамический момент и дополнительный сигнал рассогласования скоростей, вычисляемых разными моделями наблюдателя. Эта связь приводит в соответствие выходной сигнал модели механической части к рассчитанной скорости по электрическим параметрам для бесступенчатого переключения наблюдателя. Последующий сброс интегратора осуществляется при достижении рассогласования скоростей меньше установленной величины, которая задается в блоке «Compare 2».

Статический момент нагрузки вычисляется по уравнению (2) в процессе работы наблюдателя при потоке больше, чем « $k\Phi_{min}$ », фиксируется при снижении потока меньше, чем « $k\Phi_{min}$ » и остается постоянным до последующего сброса интегратора.

При синтезе регулятора скорости целесообразно рассмотреть 3 режима работы НПС: 1 режим – работа с магнитным потоком больше « $k\Phi_{min}$ » (вычисление скорости осуществляется по электрическим сигналам двигателя), 2 режим – работа с магнитным потоком меньше « $k\Phi_{min}$ » (вычисление скорости осуществляется по модели механической части электропривода), 3 режим – комбинированный, учитывающий связь, которая приводит в соответствие выходной сигнал модели механической части к рассчитанной скорости по электрическим переменным. На рис. 5 представлена структурная схема системы при работе НПС в 1 режиме.

На рис. 5 приняты следующие обозначения:  $\omega_3$  – задание на скорость,  $I_{я.з}$ ,  $I_{в.з}$  – задание на ток якоря и ток возбуждения соответственно,  $K_{OCT}$ ,  $K_{OTB}$ ,  $K_{OCC}$  – коэффициенты обратных связей по току якоря, току возбуждения и скорости соответственно,  $T_{\mu}$  – некомпенсированные постоянные времени контуров регулирования тока якоря и тока возбуждения (для упрощения в обоих контурах значения  $T_{\mu}$  принимаются равными),  $K_2$  – коэффициент пропорциональности между заданиями на токи,  $T_{\Phi}$ ,  $T_{BT}$  – постоянные времени фильтра и вихревых токов соответственно,  $K_{\Phi}$  – линейризованный коэффициент пропорциональности между током возбуждения  $I_{в}$  и магнитным потоком  $k\Phi$ .

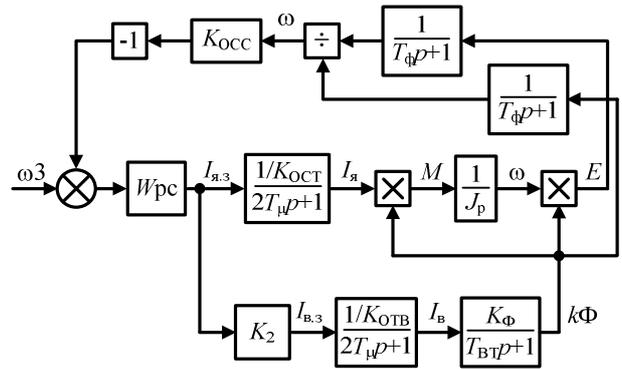


Рис. 5. Структурная схема системы при работе НПС в 1 режиме

При построении структурной схемы были приняты следующие допущения:

- 1) отсутствует насыщение магнитной цепи двигателя;
- 2) контуры тока якоря и тока возбуждения, настроенные на технический оптимум, представлены в виде апериодических звеньев;
- 3) положительная связь по ЭДС внутри контура тока якоря полностью скомпенсирована.

Обычно обратную связь по ЭДС внутри контура тока якоря игнорируют либо компенсируют. В данном случае компенсация необходима, так как магнитный поток изменяется в значительных пределах, что, совместно с изменением скорости вращения, приводит к значительной динамической ошибке. В цепь обратной связи по ЭДС включен фильтр для уменьшения высокочастотных колебаний сигнала в процессе расчета. Для компенсации действия фильтра в цепи расчетного магнитного потока присутствует такой же фильтр.

Как видно, структурная схема нелинейная, так как содержит два умножения и одно деление. Линеаризуем систему в окрестности точек  $k\Phi_0$ ,  $\omega_0$ ,  $I_{я0}$ ,  $E_0$  согласно уравнениям:

$$\Delta M = \Delta k\Phi \cdot I_{я0} + \Delta I_{я0} \cdot k\Phi_0 , \quad (4)$$

$$\Delta E = \Delta k\Phi \cdot \omega_0 + \Delta \omega \cdot k\Phi_0 , \quad (5)$$

$$\Delta \omega = \frac{\Delta E}{k\Phi_0} - \frac{\Delta k\Phi \cdot E_0}{k\Phi_0^2} . \quad (6)$$

Передаточная функция объекта регулирования имеет вид

$$W_{op} = K_1 \frac{T_1 p + 1}{(2T_{\mu} p + 1) \cdot (T_{BT} p + 1) \cdot p} , \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{k\Phi_0^2 K_{OTB} + I_{я0} k\Phi_0 K_2 K_{OCT} K_{\Phi}}{K_{OCT} \cdot K_{OTB} \cdot J k\Phi_0} , \quad (8)$$

$$T_1 = \frac{k\Phi_0^2 K_{OTB} T_{BT} + J \omega_0 K_2 K_{OCT} K_{\Phi}}{k\Phi_0^2 K_{OTB} + I_{я0} k\Phi_0 K_2 K_{OCT} K_{\Phi}} - \frac{K_{11}}{K_1} , \quad (9)$$

$$K_{11} = \frac{K_2 \cdot E_0 \cdot K_{\Phi}}{K_{OTB} \cdot k\Phi_0^2} . \quad (10)$$

Желаемая передаточная функция

$$W_{ж1} = \frac{1}{T_{ж}p \cdot (2T_{\mu}p + 1) \cdot (T_{\phi}p + 1)}. \quad (11)$$

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{PC} = \frac{W_{ж1} \cdot (T_{\phi}p + 1)}{W_{op} \cdot K_{OCC}} = K_{PC1} \cdot \frac{T_{BT}p + 1}{T_1p + 1}, \quad (12)$$

$$K_{PC1} = \frac{1}{T_{ж} \cdot K_1 \cdot K_{OCC}}. \quad (13)$$

На рис. 6 представлена структурная схема системы при работе НПС во 2-м режиме.

$J_1$  – момент инерции модели механической части электропривода. После линеаризации системы в окрестности точек  $k\Phi_0$ ,  $\omega_0$ ,  $I_{я0}$ ,  $E_0$  передаточная функция объекта регулирования имеет вид:

$$W_{op} = K \cdot \frac{T_2p + 1}{(2T_{\mu}p + 1) \cdot (T_{BT}p + 1)}. \quad (14)$$

$$K = \frac{k\Phi_0 \cdot K_{OTB} + K_2 \cdot K_{OCT} \cdot K_{\Phi} \cdot I_{я0}}{K_{OCT} \cdot K_{OTB}}, \quad (15)$$

$$T_2 = \frac{k\Phi_0 \cdot K_{OTB} \cdot T_{BT}}{k\Phi_0 \cdot K_{OTB} + K_2 \cdot K_{OCT} \cdot K_{\Phi} \cdot I_{я0}}. \quad (16)$$

Желаемая передаточная функция

$$W_{ж2} = \frac{1}{T_{ж}p \cdot (2T_{\mu}p + 1)}. \quad (17)$$

Передаточная функция регулятора скорости

$$W_{PC} = \frac{W_{ж2} \cdot J_1}{W_{op} \cdot K_{OCC}} = K_{PC2} \cdot \frac{T_{BT}p + 1}{T_2p + 1}, \quad (18)$$

$$K_{PC2} = \frac{J_1}{T_{ж} \cdot K \cdot K_{OCC}}. \quad (19)$$

На рис. 7 представлена структурная схема системы при работе НПС в 3-м режиме, где  $Kd$  – коэффициент связи, приводящей в соответствие выходной сигнал модели механической части к рассчитанной скорости по электрическим параметрам.

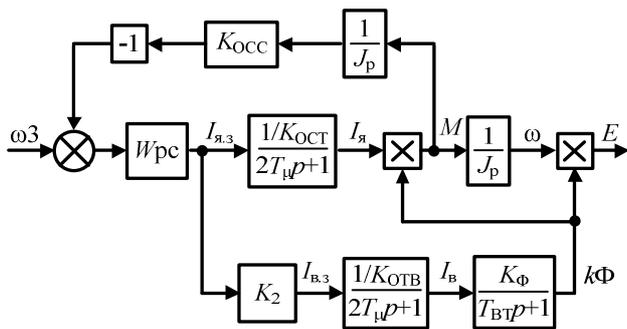


Рис. 6. Структурная схема системы при работе НПС во 2 режиме

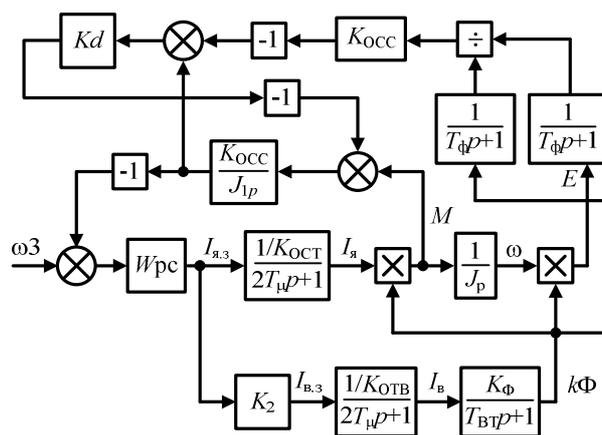


Рис. 7. Структурная схема системы при работе НПС в 3 режиме

Передаточная функция объекта регулирования с компенсационной обратной связью имеет вид

$$W_{op} = \frac{K_3 T_3 T_{\phi} p^3 + p^2 (K_3 T_3 + K_3 T_{\phi}) + p (K_3 + K_1 K_{OCC} K d T_1) + K_1 K_{OCC} K d}{p (2 T_{\mu} p + 1) (T_{BT} p + 1) (T_{\phi} p + 1)} \cdot \frac{1 / K d}{T_4 p + 1}, \quad (20)$$

$$K_3 = \frac{k\Phi_0 \cdot K_{OTB} + I_{я0} \cdot k\Phi_0 \cdot K_2 \cdot K_{OCT} \cdot K_{\Phi}}{K_{OCT} \cdot K_{OTB}}, \quad (21)$$

$$T_3 = \frac{k\Phi_0 \cdot K_{OTB} \cdot T_{BT}}{k\Phi_0 \cdot K_{OTB} + I_{я0} \cdot k\Phi_0 \cdot K_2 \cdot K_{OCT} \cdot K_{\Phi}}, \quad (22)$$

$$T_4 = \frac{J_1}{K_{OCC} \cdot K_d}. \quad (23)$$

Как видно из (20), при настройке на технический оптимум передаточная функция регулятора скорости будет иметь значительное количество динамических звеньев, что делает реализацию регулятора затруднительной. Ввиду того, что длительность переходных процессов во 2-м и 3-м режимах работы НПС, как правило, кратковременна, имеет смысл использовать один регулятор на все режимы, который будет настроен по формулам (7)-(13).

При настройке регулятора в 1-м режиме работы постоянно времени инерционной составляющей регулятора и коэффициент усиления рекомендуется рассчитывать, проводя линеаризацию в окрестности номинальных значений  $k\Phi_0$ ,  $\omega_0$ ,  $I_{я0}$ ,  $E_0$ . Во 2-м и 3-м режимах необходимо проверить систему на устойчивость, при этом во 2-м режиме работы в окрестности значений стопорного тока и минимального магнитного потока, в 3-м режиме в окрестности номинальных значений  $k\Phi_0$ ,  $\omega_0$ ,  $E_0$  и стопорного значения тока якоря. На рис. 8 представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) разомкнутой скорректированной системы при использовании регулятора 1-го режима при работе во 2-м и 3-м режимах. Расчет параметров системы осуществлялся для лабораторного стенда, описанного выше.

Анализируя ЛАЧХ, можно сделать вывод, что система, при использовании регулятора с настройками для 1-го режима, является устойчивой и во 2-м, и 3-м режимах. На рис. 9 представлены переходные характеристики 3 режимов работы НПС с настройками регулятора для 1-го режима и линеаризации в окрестностях точек, значения которых соответствуют режимам работы.

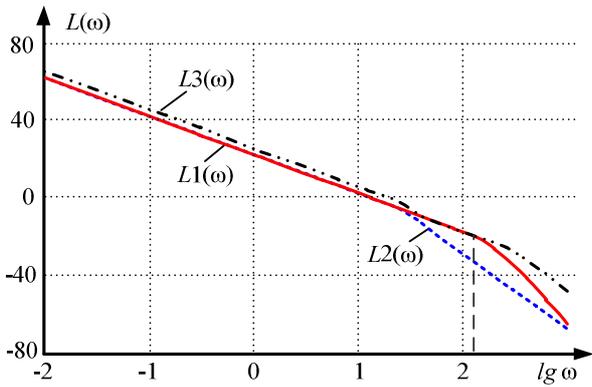


Рис. 8. ЛАЧХ разомкнутой скорректированной системы ( $L1(\omega)$  – 1 режим,  $L2(\omega)$  – 2 режим,  $L3(\omega)$  – 3 режим)

Из рис. 9 видно, что переходной процесс во 2-м режиме длится несколько дольше, чем в первом, 3-й режим обладает наибольшим перерегулированием. В любом режиме качество переходных процессов удовлетворительное.

На рис. 10 представлены осциллограммы работы имитационной модели системы РИТ-Д, где в качестве датчика обратной связи по скорости используется НПС. Значение логической «1» сигнала «Trigger» соответствует работе интегратора. Значение логического «0» сигнала «Phi\_min» соответствует интегрированию входной величины, равной рассогласованию между динамическим моментом и компенсационной обратной связью.

На рис. 11, 12 представлены реальные осциллограммы работы системы РИТ-Д, полученные на физической установке, где в качестве датчика обратной связи по скорости используется НПС. Высокий уровень сигнала «Trigger» соответствует вычислению скорости через модель механической части электропривода. Сопоставляя результаты моделирования и экспериментальных исследований (рис. 10, 12), можно сделать вывод об адекватности разработанной имитационной модели системы РИТ-Д с НПС.

В рамках данной работы на имитационной модели было проведено исследование поведения системы при различных суммарных моментах инерции электропривода, но при неизменном моменте инерции наблюдателя. Моделирование проводилось при следующих параметрах: на валу двигателя действует реактивный момент нагрузки, составляющий 10% от номинального момента двигателя.

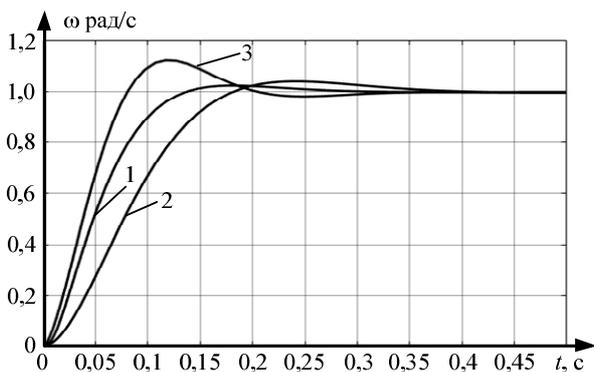


Рис. 9. Переходные характеристики 3 режимов работы НПС (1, 2, 3 – режимы работы соответственно)

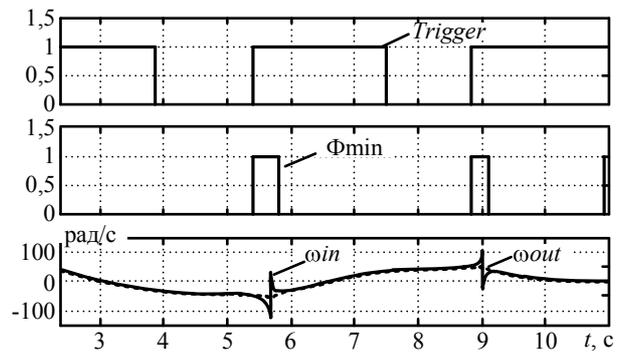


Рис. 10. Осциллограммы работы имитационной модели системы РИТ-Д

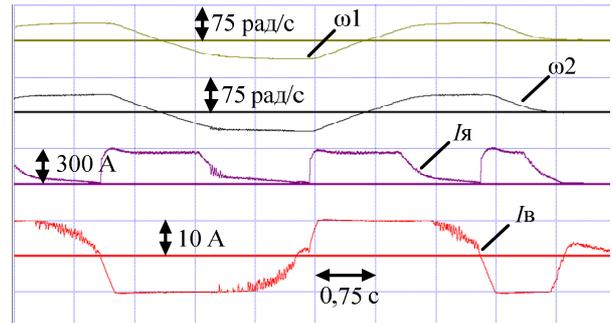


Рис. 11. Экспериментальные осциллограммы работы системы РИТ-Д с НПС ( $\omega_1$  – скорость вращения, определяемая датчиком скорости;  $\omega_2$  – скорость вращения, определяемая НПС;  $I_a$  – ток якоря,  $I_b$  – ток возбуждения)

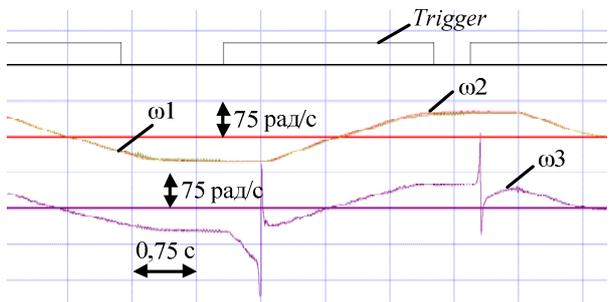
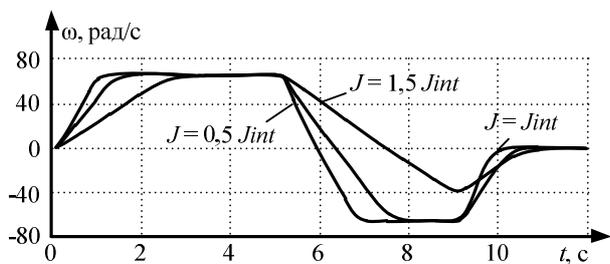


Рис. 12. Экспериментальные осциллограммы работы системы РИТ-Д с НПС ( $\omega_1$  – скорость вращения, определяемая наблюдателем с переключающейся структурой;  $\omega_2$  – скорость вращения, определяемая датчиком скорости;  $\omega_3$  – скорость вращения, вычисляемая через электрические параметры)

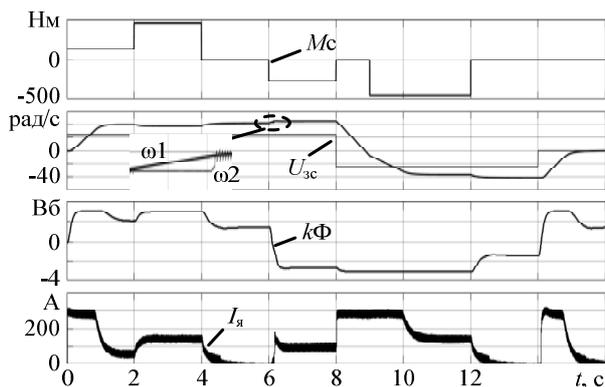
На рис. 13 представлены осциллограммы изменения (пуск, реверс, торможение) скорости при различных соотношениях суммарного момента инерции электропривода и момента инерции НПС. Момент инерции модели механической части электропривода  $J_{int}$  составлял  $17 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ .

На рис. 14 представлены результаты работы имитационной модели системы при изменении статического момента нагрузки. Наибольшее рассогласование скоростей наблюдается в первые моменты времени после изменении знака статического момента нагрузки ( $t = 6 \text{ с}$ ) и не превышает  $1,8 \text{ рад/с}$ .

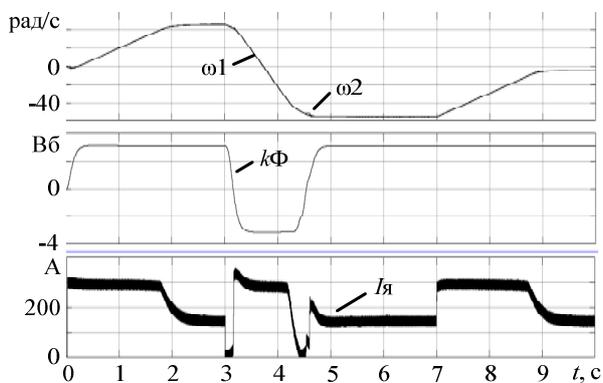
На рис. 15 представлены результаты имитационного моделирования электропривода по системе РИТ-Д при работе с активной нагрузкой на валу двигателя. Статический момент нагрузки равен номинальному моменту двигателя.



**Рис. 13. Осциллограммы скорости вращения при различных соотношениях суммарного момента инерции электропривода и момента инерции НПС (пуск, реверс, торможение), полученные на имитационной модели**



**Рис. 14. Осциллограммы работы имитационной модели при изменении статического момента нагрузки ( $\omega_1$  – скорость вращения, определяемая датчиком скорости;  $\omega_2$  – скорость вращения, определяемая НПС;  $U_{zc}$  – масштабированное задание на скорость)**



**Рис. 15. Осциллограммы работы системы РИТ-Д с активной нагрузкой ( $\omega_1$  – скорость вращения, определяемая датчиком скорости,  $\omega_2$  – скорость вращения, определяемая наблюдателем)**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Применение наблюдателя с переключающейся структурой устраняет скачкообразные изменения рассчитанной скорости при приближении и переходе магнитно-

го потока через нулевое значение. Анализируя результаты имитационного моделирования (см. рис. 13-15), можно сделать следующий вывод: предложенный способ косвенного вычисления скорости позволяет применить бездатчиковую систему РИТ-Д в электроприводе механизма поворота экскаватора, где присутствует небольшой статический момент на валу двигателя при значительном изменении момента инерции механизма в цикле экскавации, а также в электроприводе механизма подъема, так как обеспечивает управляемость по заданию и по возмущению при активном моменте нагрузки.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Остриров В.Н., Микитченко А.Я. Современное состояние и тенденции развития электроприводов горных машин открытых разработок // Электропривод экскаваторов: доклады научно-практического семинара, 3 февр. 2004 г., Москва. М.: Изд-во МЭИ, 2004. С. 10-33. ISBN 5-7046-1039-0
2. Thyristor Control of Electric Drives V. Subrahmanyam. Tata McGraw-Hill Education, 1987. 410 p. ISBN 0-0746-0341-8
3. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. 328 с.
4. Schröder D (2009) Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen. Springer, Berlin. ISBN 978-3-540-89612-8
5. A New Speed-Control System for DC Motors and its Application to Elevators. Inaba, H., Onoda, Y., Shima, S., (...), Sakai, Y., Maekawa, T. 1980 IEEE Transactions on Industry Applications IA-16(2). P. 179-185.
6. Усманов А.М. Разработка и исследование электроприводов основных механизмов экскаваторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1977.
7. Микитченко А.Я. Разработка и исследование экскаваторного тиристорного электропривода с улучшенными энергетическими показателями: дис. ... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1978.
8. Электропривод по системе РИТ-Д для бурового станка. Современное состояние и перспективы развития механизации и электрификации горного и нефтегазового производства / Микитченко А.Я., Сафoshин В.В., Артемов А.А., Бирюков Ю.А. // Записки горного института; Санкт-Петербургский государственный институт (технический университет). СПб., 2004. С. 118-121. ISBN 5-94211-183-9
9. Сорокин В.А. Способ косвенного вычисления скорости в электроприводе постоянного тока с реверсом поля двигателя // Труды VIII Всероссийской научно-технической конференции: «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». Оренбург: ООО «Агентство «Пресса», 2016. С. 210-212. ISBN 978-5-91854-236-1
10. Сорокин В.А. Система управления электроприводом постоянного тока с реверсом поля двигателя // Труды Всероссийской научно-технической конференции: «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012. С. 318-321. ISBN 978-5-4417-0090-0
11. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. 6-е изд., испр. М.: Энергия, 1977.
12. Лебедев Е.Д. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. М.: Энергия, 1970.

Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

**INFORMATION IN ENGLISH**

**AN OBSERVER OF THE ROTOR SPEED IN A DC ELECTRIC DRIVE WITH A MAGNETIC FIELD REVERSAL**

Victor A. Sorokin

Assistant Professor, Department of automated electric drive, electromechanical and electrical engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: sorokin\_va@mail.ru

Eduard L. Grekov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of automated electric drive, electromechanical and electrical engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: aeptpm@rambler.ru

Vasily G. Bessonov

Ph.D. (Eng.), Assistant Professor, Department of automated electric drive, electromechanical and electrical engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: bessonov\_vg@mail.ru

The article deals with the method of indirect speed calculation in DC electric drives where the reverse and braking is performed by changing the magnetic flux. In these electric drives, determination of speed through electrical parameters of the system (armature current, armature voltage, EMF) is not accurate enough since reversal and braking processes reduce the magnetic flux to zero. This leads to a significant calculation error. To correct this disadvantage, it is proposed to use an observer with a switching structure, which contains two models of speed calculation. One model calculates the speed by the electric signals of the motor. Another one, which is a model of the mechanical part of the electric drive, calculates the speed based on the equation of motion of the electric drive. The structure of the observer is proposed and the principle of its operation is described. Linearized structural circuits of the closed control system of the electric drive "Adjustable current source – motor" are considered in various modes of operation of the observer. The speed controller is synthesized and recommendations are given on the calculation of its parameters when the observer is controlled by the electric and magnetic variables of the motor. The stability of the electric drive system in other modes has been verified. A simulation model of the system "Adjustable current source – motor" was developed in the system MatLab Simulink. Experimental oscillograms confirming the theoretical positions and the adequacy of the simulation are presented. The efficiency of the electric drive control system with feedback from the observer is checked when the moment of inertia of the mechanism changes, the static load moment. Thus, the conclusion is made about the possibility of using the proposed sensorless system in electric drives for turning and lifting of mining excavators.

**Keywords:** Magnetic flux, speed, switchable structure, observer, revers, moment of inertia, feedback.

#### REFERENCES

- Ostrirov V.N., Mikitchenko A.Ya. Current status and development trends of electric drives of mining machines open-pit mining. *Electric drives of excavators: reports of the scientific – practical seminar*, 3 Feb. 2004, Moscow, Publishing house of MEI, 2004, pp. 10-33. ISBN 5-7046-1039-0 (In Russian)
- Thyristor Control of Electric Drives V. Subrahmanyam Tata McGraw-Hill Education, 1987. 410 p. ISBN 0-0746-0341-8
- Usynin Yu.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Control systems of electric drives]: Teaching aid. 2nd corrected and enlarged edition. Chelyabinsk: Publishing house SUSU, 2004. 328 p. (In Russian)
- Schröder D (2009) *Elektrische Antriebe-Regelung von Antriebssystemen*. Springer, Berlin. ISBN 978-3-540-89612-8
- A New Speed-Control System for DC Motors and its Application to Elevators. Inaba, H., Onoda, Y., Shima, S., (...), Sakai, Y., Maekawa, T. 1980 IEEE Transactions on Industry Applications IA-16(2), pp. 179-185.
- Usmanov A.M. *Razrabotka i issledovanie elektroprivodov osnovnykh mekhanizmov ekskavatorov* [Development and research of electric drives of the main mechanisms of excavators]. Extended abstract of Ph.D. dissertation. Moscow, 1977. (In Russian)
- Mikitchenko A.Ya. *Razrabotka i issledovanie ekskavatornogo tiristorного elektroprivoda s uluchshennymi energeticheskimi pokazatelyami* [Development and research of the excavator thyristor electric drive with improved power indicators]: Ph.D. dissertation. Moscow, 1978. (In Russian)
- Mikitchenko A.Ya., Safoshin V.V., Artyomov A.A., Biryukov Yu. A. Electric drive on the "Adjustable current source – motor" system for the drilling rig. Current state and prospects of development of mechanization and electrification mountain and oil and gas mining. *Proceedings of the mining institute*. St-Petersburg state institute (technical university). SPb., 2004, pp. 118-121. ISBN 5-94211-183-9 (In Russian)
- Sorokin V.A. A way of indirect calculation of speed in the electric drive of direct current with a reverse of the engine field. *Proceedings of VIII All-Russian scientific and technical conference: "Power: state, problems, prospects"*. Orenburg: LLC Pressa Agency, 2016, pp. 210-212. ISBN 978-5-91854-236-1 (In Russian)
- Sorokin V.A. Control system of the DC electric drive with a reverse of the engine field. *Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference: "Power: state, problems, prospects"*. Orenburg: LLC IPK University, 2012, pp. 318-321. ISBN 978-5-4417-0090-0 (In Russian)
- Veshenevsky S.N. *Kharakteristiki dviagteley v elektroprivode* [Characteristics of engines in the electric drive]. Prod. the 6<sup>th</sup>, corrected. Moscow: Energy, 1977. (In Russian)
- Lebedev E.D. *Upravlenie ventilnymi elektroprivodami postoyannogo toka* [Control of DC electric drive systems]. Moscow: Energy, 1970. (In Russian)

Сорокин В.А., Греков Э.Л., Бессонов В.Г. Наблюдатель скорости вращения в электроприводе постоянного тока с реверсом магнитного поля // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. № 4(37). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-4-10)

Sorokin V.A., Grekov E.L., Bessonov V.G. An Observer of the Rotor Speed in a DC Electric Drive with a Magnetic Field Reversal. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-4-10)