

Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А., Мараховский Е.А.

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА

В статье рассмотрен двигатель совмещенной конструкции электропривода сепаратора, состоящий из статора электродвигателя и массивного ротора, который выполняет функцию рабочего органа электропривода сепаратора – барабана. Электропривод – это электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств. Электропривод сепаратора с двигателем совмещенной конструкции содержит управляющее устройство и двигатель совмещенной конструкции. В статье представлена математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе совмещенной конструкции электропривода сепаратора, позволяющая получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами, разработанного двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора. В статье рассмотрен вывод выражений момента сопротивления и момента инерции электропривода сепаратора, составной частью которого является двигатель совмещенной конструкции. В выражения момента сопротивления и момента инерции электропривода сепаратора с двигателем совмещенной конструкции введены переменные, учитывающие геометрические особенности подвижных элементов двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и изменения состава многофазного сепарируемого продукта. Данная математическая модель реализована в программном пакете *MatLab Simulink* и позволяет учитывать влияние параметров напряжения сети (амплитуды питающего напряжения, частоты питающего напряжения, степени искажения синусоидальной формы кривой питающего напряжения высшими гармониками напряжения, к примеру пятой или седьмой); изменения момента сопротивления и момента инерции, создаваемого сепарируемым продуктом, на электромагнитный момент двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и скорость вращения рабочего органа электропривода сепаратора с двигателем совмещенной конструкции.

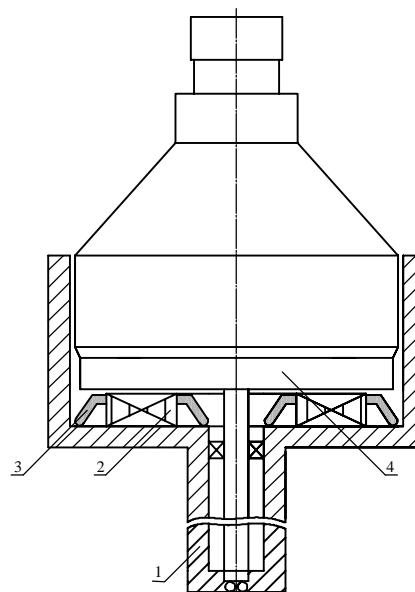
**Ключевые слова:** электропривод, сепаратор, энергосбережение, совмещенная конструкция, массивный ротор, математическая модель, блок-схема, момент сопротивления, момент инерции.

### ВВЕДЕНИЕ

Электропривод сепаратора с двигателем совмещенной конструкции [1-3] содержит управляющее устройство и двигатель совмещенной конструкции, состоящий из статора электродвигателя и массивного ротора, который выполняет функцию рабочего органа электропривода сепаратора – барабана (далее по тексту – ротор-барабан). В настоящей статье приведены исследования математической модели двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора.

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

На рис. 1 представлен сепаратор с двигателем совмещенной конструкции, содержащий корпус 1 и смонтированные в нем статор электродвигателя 2, 3 и массивный ротор-барабан 4. Статор электродвигателя установлен в корпусе 1 и содержит магнитопровод 2, в пазы которого уложена обмотка 3. Двигатель совмещенной конструкции электропривода сепаратора работает следующим образом. При подаче напряжения на обмотку, уложенную в пазы магнитопровода статора, возникает вращающееся магнитное поле статора, которое наводит вихревые токи в роторе-барабане, жестко связанном с осью, установленной в корпусе в подшипниковых опорах. Взаимодействие вращающегося магнитного поля, созданного током, протекающим в обмотках, и магнитного поля, созданного вихревыми токами в роторе-барабане, приводит к возникновению вращающего момента, под действием которого ротор-барабан приходит во вращение вокруг оси.



**Рис. 1. Сепаратор с двигателем совмещенной конструкции**

### ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В MATLAB SIMULINK

Для проведения комплексных исследований двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора была разработана математическая модель (1) двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора (ДСК ЭС) на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в ДСК ЭС, которая позво-

ляет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами разработанной ДСК ЭС [4-7].

В формуле (1) приняты следующие маркировки  $X_{mi}$ , где индекс  $m = s, r$  указывает на принадлежность параметра  $X$  статору или ротору соответственно, а индекс  $i=1,2,3$  указывает на принадлежность параметра  $X$  одной из трех фаз и  $X_{ij}$ , где индекс  $i=1, 2, 3$  указывает на принадлежность параметра  $X$  одной из трех фаз, а индекс  $j=1, \dots, n$  указывает на номер параметра  $X$  относительно одной из фаз.

$$\begin{aligned}
 U_1(t) &= A_{11} \sin(\omega_f t) + \dots + A_{17} \sin(7\omega_f t); \\
 U_2(t) &= A_{21} \sin(\omega_f t - 120^\circ) + \dots + \\
 &+ A_{27} \sin(7\omega_f t - 120^\circ); \\
 U_3(t) &= A_{31} \sin(\omega_f t - 240^\circ) + \dots \\
 &+ A_{37} \sin(7\omega_f t - 240^\circ); \\
 U_1(t) &= R_s i_{s1}(t) + L_s \frac{di_{s1}(t)}{dt} + M \frac{di_{r1}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s2}(t) + i_{r2}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)); \\
 U_2(t) &= R_s i_{s2}(t) + L_s \frac{di_{s2}(t)}{dt} + M \frac{di_{r2}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)); \\
 U_3(t) &= R_s i_{s3}(t) + L_s \frac{di_{s3}(t)}{dt} + M \frac{di_{r3}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s2}(t) + i_{r2}(t)); \\
 0 &= R_r i_{r1}(t) + L_r \frac{di_{r1}(t)}{dt} + M \frac{di_{s1}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s2}(t) + i_{r2}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)) + \\
 &+ \{L_r [i_{r2}(t) - i_{r3}(t)] + M [i_{s2}(t) - i_{s3}(t)] - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s3}(t) + i_{r3}(t) - i_{s2}(t) - i_{r2}(t))\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}}; \\
 0 &= R_r i_{r2}(t) + L_r \frac{di_{r2}(t)}{dt} + M \frac{di_{s2}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)) + \\
 &+ \{L_r [i_{r3}(t) - i_{r1}(t)] + M [i_{s3}(t) - i_{s1}(t)] - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) - i_{s3}(t) - i_{r3}(t))\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}}; \\
 0 &= R_r i_{r3}(t) + L_r \frac{di_{r3}(t)}{dt} + M \frac{di_{s3}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s2}(t) + i_{r2}(t)) +
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \{L_r [i_{r1}(t) - i_{r2}(t)] + M [i_{s1}(t) - i_{s2}(t)] - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s2}(t) + i_{r2}(t) - i_{s1}(t) - i_{r1}(t))\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}}; \\
 M_{\Sigma M}(t) &= M_c(t) + M_{\text{дин}}(t); \\
 M_{\Sigma M}(t) &= \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s1}}(t) i_{r3}(t) + \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s2}}(t) \times \\
 &\times i_{r1}(t) + \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s3}}(t) i_{r2}(t) - \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s1}}(t) \times \\
 &\times i_{r2}(t) - \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s2}}(t) i_{r3}(t) - \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s3}}(t) \times \\
 &\times i_{r1}(t); \\
 M_c(t) &= k_n f_T g \frac{d_6}{2} \frac{m_0 + m_6 + m(t)}{\eta_{\text{дв.мех}}}; \\
 M_{\text{дин}}(t) &= \sum J(t) \frac{d\omega_r(t)}{dt},
 \end{aligned}$$

где  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ ,  $U_3(t)$  – фазное напряжение сети в функции времени, для возможности моделирования несинусоидальности питающего напряжения представлено в виде ряда Фурье, где  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ , ...,  $A_{1n}$  – амплитудные значения 1-й, 2-й и последующих гармоник;  $\omega_f = 2\pi f$  – угловая скорость изменения напряжения сети, где  $f$  – частота сетевого напряжения;  $i_{s1}(t)$ ,  $i_{s2}(t)$ ,  $i_{s3}(t)$ ,  $i_{r1}(t)$ ,  $i_{r2}(t)$ ,  $i_{r3}(t)$  – токи, протекающие в цепях статора и ротора двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $R_s$  – активное сопротивление статорной обмотки двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора, представленное по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $L_s$  – индуктивность статорной обмотки двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора, представленная по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $\omega_r(t)$  – угловая скорость ротора;  $R_r$  – активное сопротивление ротора двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $L_r$  – индуктивность ротора двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $M$  – взаимоиנדукция;  $M_{\Sigma M}(t)$  – электромагнитный момент двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $M_c(t)$  – статический момент сопротивления двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $f_T$  – коэффициент трения подшипника;  $m_0$  – масса оси установки;  $m_6$  – масса барабана сепаратора;  $m(t)$  – масса сепарируемого продукта;  $d_3$  – диаметры вращения шариков подшипника, м;  $d_6$  – диаметр барабана;  $\eta_{\text{дв.мех}}$  – механический КПД двигателя;  $M_{\text{дин}}(t)$  – динамический момент двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $\Sigma J(t)$  – суммарный момент инерции двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора.

Данная математическая модель была реализована в программном пакете *MatLab Simulink*. На рис. 2 представлен скриншот блок-схемы из программного пакета *MatLab Simulink* цифрового лабораторного стенда исследования режимов работы ДСК ЭС. Данные блок-схемы построены на базе стандартных блоков программного пакета *MatLab Simulink*, выполняющих математические операции, функции ввода и вывода данных [8].

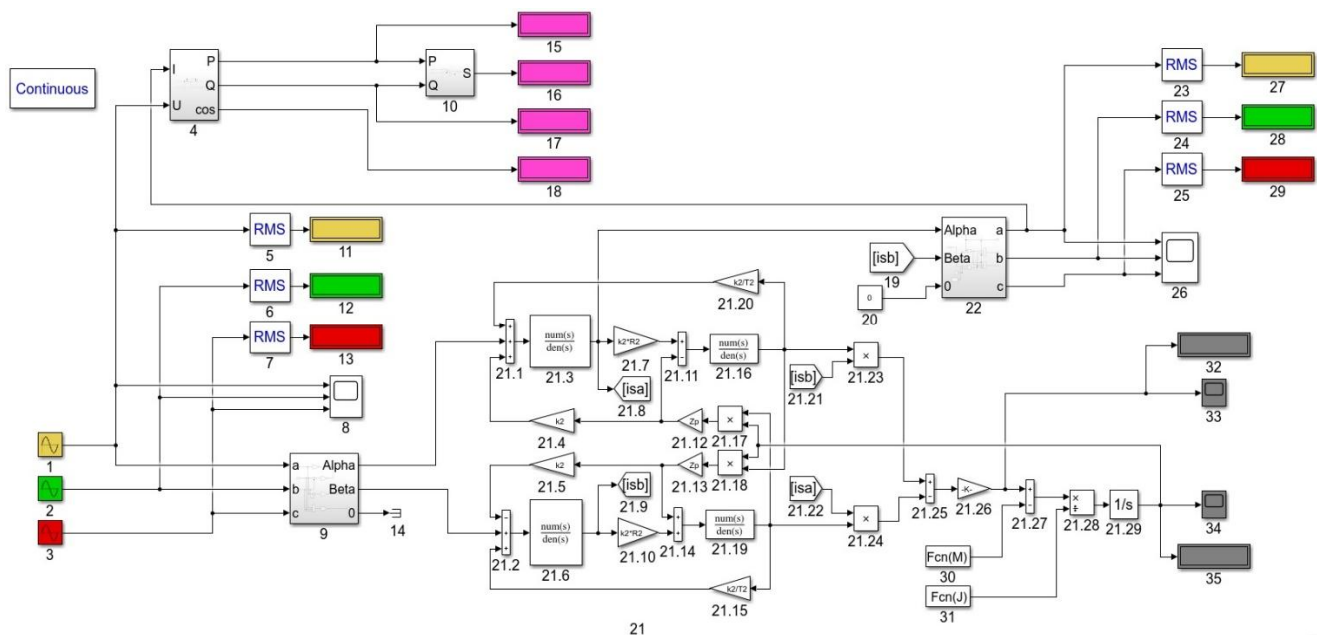


Рис. 2. Блок-схема лабораторного стенда

При анализе работы электромеханической системы двигателя совмещенной конструкции подробно рассмотрим моменты, входящие в уравнение движения двигателя:  $M_{\text{ЭМ}}(t)$  – вращающий момент электродвигателя;  $M_{\text{С}}(t)$  – статический момент сопротивления;  $M_{\text{дин}}(t)$  – динамический момент.

ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На рис. 3 представлена модель ротора-барабана сепаратора.

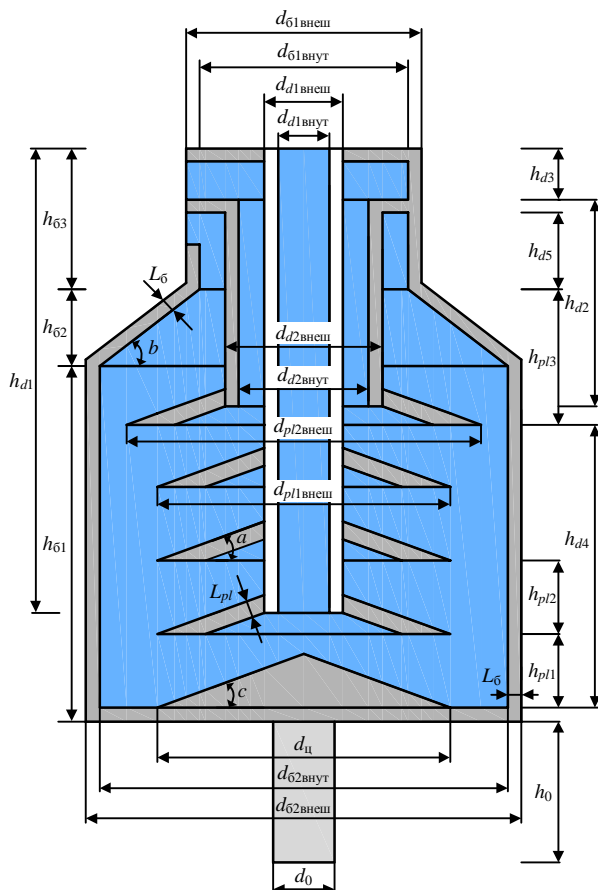


Рис. 3. Модель ротора-барабана сепаратора

При математическом описании двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора, выводе формул для определения масс и моментов инерции элементов конструкции, для уточнения выражений статического момента сопротивления и динамического момента были приняты следующие допущения:

– корпус ротора-барабана состоит из трех частей: нижней, средней и верхней частей. Нижняя часть корпуса ротора-барабана состоит из основания, включающего сплошной однородный цилиндр (обозначение геометрических размеров на рис. 3 и в математических выражениях:  $d_{62\text{внут}}$  – внутренний диаметр ротора-барабана,  $L_6$  – толщина стенки ротора-барабана) и центральный конус (обозначение геометрических размеров на рис. 3 и в математических выражениях:  $d_{\text{ц}}$  – диаметр основания центрального конуса в основании ротора-барабана,  $c$  – угол между основанием и образующей конуса), и боковой стенки, являющейся полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на рис. 3 и в математических выражениях:  $h_{61}$  – высота нижней части ротора-барабана,  $d_{62\text{внеш}}$  – внешний диаметр нижней части корпуса ротора-барабана), средняя часть корпуса ротора-барабана представляет из себя усеченный полый однородный конус (обозначение геометрических размеров на рис. 3 и в математических выражениях:  $h_{62}$  – высота конической части ротора-барабана,  $b$  – угол между основанием и образующей конуса), в верхнюю часть корпуса ротора-барабана входят боковая стенка, являющаяся полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на рис. 3 и в математических выражениях:  $h_{63}$  – высота верхней части ротора-барабана,  $d_{61\text{внеш}}$  – внешний диаметр верхней части корпуса/крышки ротора-барабана,  $d_{61\text{внут}}$  – внутренний диаметр верхней части корпуса ротора-барабана), крышка барабана, являющаяся толстостенным полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на рис. 3 и в математических выражениях:  $d_{d1\text{внут}}$  – внутренний диаметр крышки ротора-барабана/ центрального конуса).

трального канала подачи сепарируемого продукта). Внутри корпуса ротора-барабана присутствуют центральный канал подачи сепарируемого продукта, являющийся толстостенным полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{d1}$  – высота центрального канала подачи сепарируемого продукта,  $d_{d1\text{внеш}}$  – внешний диаметр центрального канала подачи сепарируемого продукта), канал вывода очищенного продукта, являющийся толстостенным полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{d2}$  – высота канала вывода очищенного продукта,  $d_{d2\text{внеш}}$  – внешний диаметр канала вывода очищенного продукта,  $d_{d2\text{внут}}$  – внутренний диаметр канала вывода очищенного продукта), пакет тарелок, являющихся усеченными тонкостенными полыми однородными конусами, сопряженными с цилиндром центрального канала подачи сепарируемого продукта (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{pl1\text{внеш}}$  – внешний диаметр пакета тарелок,  $L_{pl}$  – толщина тарелки,  $a$  – угол между основанием и образующей конуса тарелки), разделительная тарелка, являющаяся усеченным тонкостенным полым однородным конусом, сопряженным с цилиндром канала вывода очищенного продукта (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{pl2\text{внеш}}$  – внешний диаметр разделительной тарелки);

– ось ротора-барабана является сплошным однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_o$  – диаметр оси сепаратора,  $h_o$  – высота оси сепаратора);

– многофазный сепарируемый продукт, протекающий через ротор-барабан, распределен однородно по всему объему ротора-барабана.

Формулы массы и момента инерции сплошных однородных объемных фигур по [9-11] следующие:

$$m_{\text{цилиндр}} = \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 h_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{ц}}$  – диаметр основания цилиндра;  $h_{\text{ц}}$  – высота цилиндра;  $\rho_{\text{ц}}$  – плотность материала цилиндра.

$$J_{\text{цилиндр}} = \frac{1}{2} m_{\text{цилиндр}} \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 \times h_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}} \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^4 h_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}}; \quad (3)$$

$$m_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 h_{\text{к}} \rho_{\text{к}} = \frac{1}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 \times \left[ \frac{d_{\text{к}}}{2} \operatorname{tg} \alpha \right] \rho_{\text{к}} = \frac{1}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{к}}, \quad (4)$$

где  $d_{\text{к}}$  – диаметр основания конуса;  $h_{\text{к}}$  – высота конуса,  $\alpha$  – угол между основанием и образующей конуса;  $\rho_{\text{к}}$  – плотность материала конуса.

$$J_{\text{конуса}} = \frac{3}{10} m_{\text{конус}} \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 = \frac{3}{10} \cdot \frac{1}{3} \pi \times \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 \frac{d_{\text{к}}}{2} \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{к}} \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{10} \pi \times \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{к}}. \quad (5)$$

Многофазность сепарируемого продукта учитывается функцией плотности сепарируемого продукта  $\rho_{\text{ж}}(t)$ .

Введём для компактности коэффициент  $k$ :

$$k = k_{\text{п}} f_{\text{т}} g \frac{d_{\text{б}}}{2} \frac{1}{\eta_{\text{дв.мех}}}. \quad (6)$$

На основании принятых допущений с учетом конструкции (см. **рис. 3**) и (2), (4), (6), формула статического момента сопротивления [9, 12] из системы (1) математического описания двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} M_{\text{с}}(t) = & k \pi \left( \frac{d_o}{2} \right)^2 h_o \rho_{\text{ст}} + k \pi \left( \frac{d_{\text{б}2\text{внут}}}{2} \right)^2 L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{3} k \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} c \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б}2\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{б}2\text{внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{\text{б}1} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б}1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{б}1\text{внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{\text{б}3} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{d1} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{d2} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б}1\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б}1\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{3} \pi k L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} A + n_{\text{pl}} \frac{1}{3} \pi k \rho_{\text{ст}} B - \\ & - \pi k \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \frac{L_{\text{б}}}{\sin a} \operatorname{tg} a + \frac{1}{3} \pi k \rho_{\text{ст}} C - \\ & - \pi k \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^2 \frac{L_{\text{б}}}{\sin a} \operatorname{tg} a + \pi k \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right) h_{d1} \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & - \frac{1}{3} \pi k \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin b} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ h_1 - \frac{d_{\text{ц}}}{2} \operatorname{tg} c \right] \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} c \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right] \times \\
 & \times \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \pi k (n_{pl} - 1) \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl1} - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & -\pi k (n_{pl} - 1) \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right] \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl2} - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d2} \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d3} \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d4} \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right] \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl3} - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d5} \rho_{\text{ж}}(t); \\
 & A = \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{\text{б}}}{\sin b} \right)^3 \operatorname{tg} b - \\
 & - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b + \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{\text{б}}}{\sin b} \right)^3 \operatorname{tg} b; \\
 & B = \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a; \\
 & C = \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a;
 \end{aligned}$$

где  $\rho_{\text{ст}}$  – плотность стали;  $n_{pl}$  – количество разделительных тарелок в барабане;  $\rho_{\text{ж}}(t)$  – плотность сепарируемого продукта. Остальные обозначения, принятые в формуле (7), пояснены выше при описании принятых допущений.

В переходном режиме двигатель совмещенной конструкции электропривода сепаратора переходит от одного установившегося режима к другому, при этом изменяются скорость, момент и ток электродвигателя. В случаях ускорения или замедления электропривода возникает инерционный или динамический момент, который двигатель должен преодолеть. Во время преодоления динамического момента двигатель находится в переходном режиме [12, 13].

В переходном режиме к электромагнитному моменту двигателя  $M_{\text{ЭМ}}$  и статическому моменту  $M_{\text{С}}$  в системе электропривода добавляется динамический момент  $M_{\text{дин}}$ .

Динамический момент увеличивает время пуска и остановки электропривода, а также время достижения установившейся скорости, поэтому для получения в результате моделирования реальных характеристик режимов работы сепаратора с двигателем совмещенной конструкции необходимо рассчитать суммарный момент инерции всех элементов привода:

$$\sum J(t) = J_o + J_k + \sum J_t + J_{\text{ж}}(t), \quad (8)$$

где  $J_o$  – момент инерции оси сепаратора;  $J_k$  – момент инерции корпуса барабана;  $J_t$  – момент инерции пакета тарелок;  $J_{\text{ж}}(t)$  – момент инерции сепарируемого продукта.

На основании принятых допущений с учетом конструкции (см. **рис. 3**) и (3), (5) формула суммарного момента инерции всех элементов привода двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора (8) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum J(t) = & \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_o}{2} \right)^4 h_o \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{б2внут}}}{2} \right)^4 L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^5 \text{tg} c \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{б2внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{б2внут}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{б1}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{б3}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д1внут}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{д1}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{д2внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д2внут}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{д2}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 \right] L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д2внеш}}}{2} \right)^4 \right] L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \quad (9) \\ & + \frac{1}{10} \pi D + n_{pl} E + F + \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{д1внут}}}{2} \right)^4 h_{\text{д1}} \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\ & - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} \right)^4 \left[ h_1 - \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right) \text{tg} c \right] \rho_{\text{ж}}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^5 \text{tg} c \rho_{\text{ж}}(t) + (n_{pl} - 1) G + \\ & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{пл2внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{д2внеш}}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\ & - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 \left( \frac{d_{\text{пл2внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right) \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{пл2внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\ & \times \left[ h_{\text{пл2}} - \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} - \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right) \text{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\ & \times \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} - \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right) \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{д2внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{д2}} \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{д3}} \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{\text{б2внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{\text{пл1внеш}}}{2} \right)^4 \right] h_{\text{д4}} \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{б2внут}}}{2} \right)^5 \text{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^5 \text{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \left[ \frac{d_{b2\text{внут}}}{2} - \frac{d_{b1\text{внут}}}{2} \right] \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{b2\text{внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl3} - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{b2\text{внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{b1\text{внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] h_{d5} \rho_{\text{ж}}(t); \\
 D &= \left( \frac{d_{b2\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b - \left( \frac{d_{b2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_6}{\sin b} \right)^5 \operatorname{tg} b - \\
 & - \left( \frac{d_{b1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b + \left( \frac{d_{b1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_6}{\sin b} \right)^5 \operatorname{tg} b; \\
 E &= \frac{1}{10} \pi \rho_{\text{ст}} \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \operatorname{tg} a \right] - \\
 & - \frac{1}{2} \pi \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \frac{L_6}{\sin a} \operatorname{tg} a; \\
 F &= \frac{1}{10} \pi \rho_{\text{ст}} \left[ \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \operatorname{tg} a \right] - \\
 & - \frac{1}{2} \pi \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^4 \frac{L_6}{\sin a} \operatorname{tg} a; \\
 G &= \frac{1}{10} \pi \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl} - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t).
 \end{aligned}$$

Данная математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора позволяет повысить точность характеристик, получаемых в процессе математического моделирования, благодаря учету геометрических особенностей подвижных элементов двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и возможности определения изменяющихся параметров электропривода, как следствия изменения процентного соотношения фаз сепарируемого продукта.

На рис. 4 и 5 представлены регулировочные характеристики двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора при разных значениях нагрузки, создаваемой многофазным сепарируемым продуктом, полученные в результате вычислительного эксперимента.

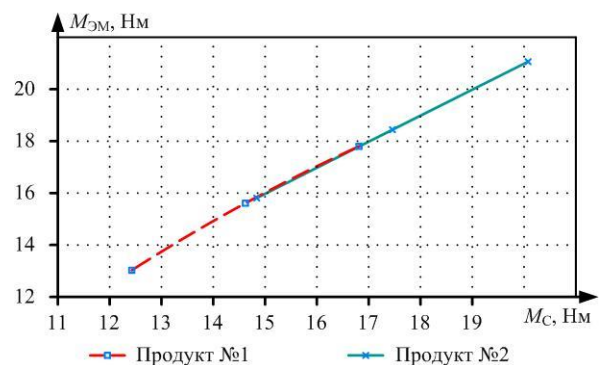


Рис. 4. График зависимости электромагнитного момента двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора от момента сопротивления, создаваемого сепарируемым продуктом

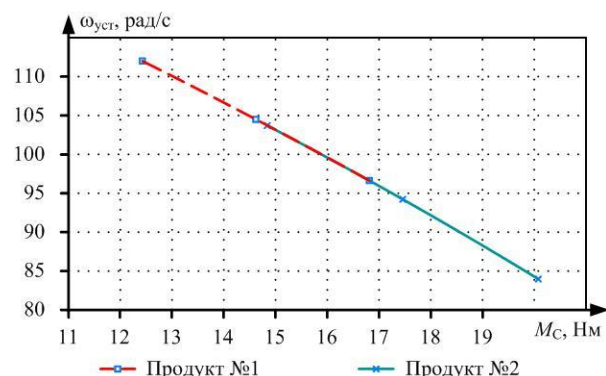


Рис. 5. График зависимости скорости вращения ротора от момента сопротивления, создаваемого сепарируемым продуктом

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании уточненных значений статического момента сопротивления двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и его динамического момента представляется целесообразным дальнейшее проведение вычислительного эксперимента для получения рабочих и регулировочных характеристик электропривода сепаратора с двигателем совмещенной конструкции.

Результатом работы является:

– разработка математической модели двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе совмещенной конструкции электропривода сепаратора, которая позволяет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами, разработанного сепаратора с двигателем совмещенной конструкции;

– получение выражений статического момента сопротивления двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и его динамического момента, в выражения введены параметры, учитывающие геометрические особенности подвижных элементов двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и многофазность сепарируемого продукта;

– реализация математической модели двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора в программном пакете *MatLab Simulink*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 1427501 СССР, H02K9/19, B04B9/02. Сепаратор для жидкости / Гайтов Б.Х., Копелевич Л.Е. Письменный В.Я., Быков Е.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 4228756/24-07, заявл. 09.03.1987, опублик. 30.09.1988.
2. Пат. 2593626 Российская Федерация, МПК7 B04B5/10, B03C5/02, B01D17/06, B01D43/00, B04B9/02. Установка для сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 2015110414/05, заявл. 23.03.2015, опублик. 10.08.2016.
3. Пат. 2706320 Российская Федерация, МПК7 B04B 9/02,

B04B 9/00, B04B 9/04, B04B 15/00. Сепаратор для полидисперсных жидких систем / Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 2019111177, заявл. 12.04.2019, опублик. 15.11.2019.

4. Kashin Y.M., Kopelevich L.E., Kim V.A. Determination of the Parameters of the Electromagnetic System of the Installation for Oil Treatment // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111990.
5. Копелевич Л.Е., Ким В.А., Артеян К.З. Математическая модель электромагнитных и электромеханических процессов установки для сепарирования нефти // Технические и технологические системы: материалы X Международной научной конференции. Краснодар, 2019. С. 60-63.
6. Сепаратор для переработки нефти совмещенной конструкции и его температурное поле / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким, К.З. Артеян // Научные труды КубГТУ. 2019. №5. С. 86-99.
7. Данилов П.Е., Барышников В.А., Рожков В.В. Теория электропривода: учебное пособие. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2018. 415 с.
8. Ershov M., Sidorenko M. The Research of Frequency-Controlled Synchronous Drive Transient Processes // X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571530.
9. Королев А.В. Исследование момента сопротивления вращению и статической грузоподъемности упорного подшипника качения // Вестник СГТУ. 2011. №2(56). Вып. 2. С. 84-92.
10. Масса сплошной детали // tvlad.ru: Математика для ювелиров. URL: <https://tvlad.ru/mass/massa-splushnoy-detal.html> (дата обращения: 21.01.2021).
11. Список моментов инерции // wikipedia.org: Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_моментов\\_инерции](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_моментов_инерции) (дата обращения: 21.01.2021).
12. К вопросу расчета температурного поля энергосберегающей установки для переработки нефти / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 4 (126). С. 7-16.
13. Дьяконов В.П. MatLab. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

Поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### MATHEMATICAL MODEL OF COMBINED CONFIGURATION MOTOR OF SEPARATOR ELECTRIC DRIVE

Yakov M. Kashin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: [jlms@mail.ru](mailto:jlms@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0055-3700>.

Lev E. Kopelevich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: [kklev@mail.ru](mailto:kklev@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4346-4836>.

Aleksandr V. Samorodov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: [alex.samorodoff@gmail.com](mailto:alex.samorodoff@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0465-6798>.



Vladislav A. Kim

Postgraduate student, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: vladk-kub@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-4374>.

Evgeniy A. Marakhovskiy

Student, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: zheka3334@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9152-2397>

The article is concerned with the engine combined design of the electric separator consisting of an electric motor stator and solid rotor that performs the function of the working body of the electric separator drum. An electric drive is an electromechanical system consisting, in general, of interacting electric power converters, electromechanical and mechanical converters, control and information devices. The electric drive of the separator with the motor of the combined design contains the control device and the motor of the combined design. The article presents a mathematical model of the engine combined design of the electric separator based on differential equations describing electromagnetic and Electromechanical processes in the engine combined design of the drive cage, making it possible to obtain a functional relationship between dynamic characteristics and parameters developed by the engine combined design of the electric separator. The article considers the derivation of the expressions of the moment of resistance and the moment of inertia of the electric drive of the separator, which is an integral part of the combined design motor. In the expression of the resistance moment and the moment of inertia of the electric separator combined with the engine design variables are introduced taking into account the geometric features of the mobile elements of the combined design engine of the electric separator and changes in the composition of the multiphase separated piece of the product. The mathematical model is implemented in the software package MatLab Simulink and makes it possible to consider the influence of the parameters of voltage (the supply voltage and frequency supply voltage, the degree of distortion of the sinusoidal waveform of the supply voltage, the highest voltage harmonics, for example, the fifth or seventh); change the torque and moment of inertia generated by the separated piece product, the electromagnetic torque of the motor combined design of the drive cage and the speed of rotation of the working body of the electric separator combined with the engine design.

**Keywords:** electric drive, separator, energy saving, combined construction, massive rotor, mathematical model, block diagram, moment of resistance, moment of inertia.

#### REFERENCES

- Gaitov B.Kh., Kopelevich L.E., Pismenny V.Y., Bykov E.A. *Separator dlya zhidkosti* [Separator for liquids]. Patent SU, no. 1427501, 1988.
- Kopelevich L.E. *Ustanovka dlya separirovaniya nefi* [Oil separation unit]. Patent RF, no. 2015110414/05, 2016.
- Kashin Y.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A. *Separator dlya polidispersnykh zhidkikh system* [Separator for poly-dispersed liquid systems]. Patent RF, no. 2019111177, 2019.
- Kashin Yu.M., Kopelevich L.E., Kim V.A. Determination of parameters of the electromagnetic system of the oil treatment plant. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Application and Production (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111990.
- Kopelevich L.E., Kim V.A., Artenyan K.Z. Mathematical model of electromagnetic and electromechanical processes of the oil separation unit. *Tekhnicheskie i tekhnologicheskie sistemy: materialy desiatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Technical and technological systems. Proceedings of the Tenth International Scientific Conference]. Krasnodar, 2019, pp. 60-63. (In Russian)
- Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Artenyan K.Z. Separator for oil refining of combined design and its temperature field. *Nauchnye trudy KubGTU* [Electronic network polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"], 2019, no. 5, pp. 86-99. (In Russian)
- Danilov P.E., Baryshnikov V.A., Rozhkov V.V. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Berlin, Direct-Media Publ., 2018. 415 p. (In Russian)
- M. Ershov, M. Sidorenko. The Research of Frequency-Controlled Synchronous Drive Transient Processes. 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571530.
- Korolev A.V. Investigation of the moment of resistance to rotation and static load capacity of a thrust rolling bearing. *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU], 2011, no. 2(56), iss. 2, pp. 84-92. (In Russian)
- Mass of a solid part. tvlad.ru: Mathematics for Jewelers. Available at: <https://tvlad.ru/mass/massa-splshnoy-detal.html> (accessed 21 January 2021). (In Russian)
- List of moments of inertia. Wikipedia.org. Free Encyclopedia Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Spicata> (accessed: 21 January 2021). (In Russian)
- Gaitov B.Kh., Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A. On the issue of calculating the temperature field of an energy-saving installation for oil refining // *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and water treatment], 2020, no. 4 (126), pp. 7-16. (In Russian)
- Diakonov V. P. *MatLab. Polnyi samouchitel* [MatLab. Complete tutorial]. Moscow, DMC Press Publ., 2012. 768 p. (In Russian)

Математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким, Е.А. Мараховский // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 30-38. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-30-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-30-38)

Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Marakhovskiy E.A. Mathematical Model of Combined Configuration Motor of Separator Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 30-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-30-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-30-38)