

# Проектировочный расчет привода подъемного звена манипулятора (Часть 2)

**Мионов Матвей Максимович** – студент Балтийского государственного технического университета им. Д.Ф. Устинова «ВОЕНМЕХ».

**Матвеева Елизавета Сергеевна** – студент Балтийского государственного технического университета им. Д.Ф. Устинова «ВОЕНМЕХ».

научный руководитель **Савельев Борис Николаевич** --- кандидат технических наук, доцент Балтийского государственного технического университета им. Д.Ф. Устинова «ВОЕНМЕХ».

*Аннотация:* Работа посвящена проектировочному расчету привода подъемного звена манипулятора погрузчика. Произведены разработка и моделирование релейно-контакторной схемы управления подъемного звена манипулятора.

Ключевые слова: Релейно-контакторная схема, управление, пуск, торможение, кинематическая схема.

## Введение

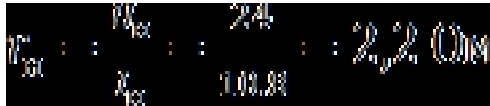
В первой части статьи [1] были получены данные для выбора двигателя и подходящей к нему аппаратуры (редуктора, контроллера, тормоза, энкодера) из каталога Maxon Motors. Была составлена схема построения привода манипулятора, основанная на этой аппаратуре, а также была составлена функциональная схема для данной сборки.

Для управления электродвигателем также возможно использование наиболее дешевой релейно-контакторной схемы управления. Выполняются разработка и моделирование релейно-контакторной схемы управления подъемного звена манипулятора, в результате чего должны быть подобраны оптимальные характеристики элементов разрабатываемой

схемы, реализующие управление звена в соответствии с техническим заданием.

## Расчёт пусковых резисторов

Номинальное сопротивление двигателя:



The screenshot shows a calculation for the nominal resistance of the motor. The result is  $R_{\text{ном}} = 2,2 \text{ Ом}$ .

(1)

Сопротивление якоря двигателя:



The screenshot shows a calculation for the resistance of the motor armature. The result is  $R_{\text{якоря}} = 0,103 \text{ Ом}$ .

(2)

Скорость идеального холостого хода:



The screenshot shows a calculation for the ideal no-load speed of the motor. The result is  $n_{\text{идеальный холостой ход}} = 1590,33 \text{ об/мин}$ .

(3)

Коэффициент э.д.с. двигателя:

$$c_{em} = \frac{U_{ном} \cdot I_{ном}}{P_{ном}} = \frac{220 \cdot 0,0033}{0,0033} = 0,0033$$

. (4)

Коэффициент момент двигателя:

$$c_{mm} = c_{em} = 0,0033$$

. (5)

Электромагнитный момент двигателя при номинальном токе:

$$M_{эм} = c_{mm} \cdot I_{ном} = 0,0033 \cdot 1,0 \cdot 33 = 0,41 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

. (6)

Номинальный момент на валу двигателя:

$$M_{ном} = 0,401 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

. (7)

Момент потерь холостого хода:

$$M_{00} = M_{эм} \cdot \eta_{00} = 0,41 \cdot 0,401 = 0,0004$$

.

(8)

По принятому коэффициенту перегрузки  $k$  находим значение пускового тока:

$$I_{\text{п}} = k I_{\text{н}} = 3 \cdot 10,83 = 32,49 \text{ А}$$

.

(9)

Электромагнитный момент, соответствующий пусковому току:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} = c_{\text{М}} \cdot I_{\text{п}} = 0,0383 \cdot 32,49 = 1,23 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

.

(10)

Полное сопротивление цепи якоря в момент пуска:

$$r_{\text{я}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{п}}} - r_{\text{с}} = \frac{24}{32,49} - 0,174 = 0,54 \text{ Ом}$$

.

(11)

Принимая число пусковых ступеней  $m = 2$ , находим отношение начального пускового тока

к току переключения

:

$$\lambda = \frac{m \cdot I_{\text{пуск}}}{I_{\text{пер}}} = \frac{2 \cdot 0,74}{0,1093} = 2,698$$

(12)

Тогда ток переключения:

$$I_{\text{пер}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{\lambda} = \frac{0,74}{2,698} = 0,2743 \text{ А}$$

(13)

Электромагнитный момент, соответствующий току переключения:

$$M_{\text{дв}} = K_{\text{дв}} \cdot T_{\text{дв}} = 0,0333 \cdot 12,0089 = 0,4001 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

(14)

Находим полное сопротивление:

$$r_{\Sigma} = r_1 + r_2 = 0,74 + 2,631 = 0,27 \text{ Ом}$$

(15)

Находим сопротивление отдельных секций, включаемых на каждой ступени:

$$r_1 = r_1^{\text{II}} + r_2^{\text{II}} = 0,74 + 0,27 = 0,47 \text{ Ом}$$

(16)

$$r_2 = r_2^{\text{II}} + r_3^{\text{II}} = 0,27 + 0,103 = 0,167 \text{ Ом}$$

(17)

## Расчёт тормозных резисторов

Полное сопротивление цепи якоря в момент торможения:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{т}} = 0,74 + 0,0003 = 0,7403 \text{ Ом}$$

(18)

Сопротивление первой ступени торможения:

$$R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{т}} = 0,74 + 0,0003 = 0,7403 \text{ Ом}$$

(19)

где  $R_{\text{я}}$

– сопротивление якоря, вычисленное при расчёте пусковых резисторов разгона

$$R_{\Sigma} = R_{\text{я}} + R_{\text{т}} = 0,74 + 0,0003 = 0,7403 \text{ Ом}$$

(20)

Кратность тока при торможении:

$$\lambda_{tr} = \frac{M_{tr}}{M_{max1}} = \frac{0,574}{0,1003} = 2,681$$

(21)

Сопротивление второй ступени торможения:

$$R_{tr2} = \frac{M_{tr}}{\lambda_{tr}} = \frac{0,574}{2,681} = 0,214 \text{ Ом}$$

(22)

Величины сопротивлений резисторов, выключаемых на каждой ступени:



$$M_{F_2} = \tau_1^T \cdot \tau_2^T = 0,74 \cdot 0,27 = 0,47 \text{ Ом}$$

,

(23)

$$M_{F_1} = \tau_2^T \cdot \tau_3^T = 0,27 \cdot 0,103 = 0,167 \text{ Ом}$$

,

(24)

$$M_{F_1} = \tau_2^T \cdot \tau_3^T = 0,27 \cdot 0,103 = 0,167 \text{ Ом}$$

.

(25)

## Разработка математической модели

### Расчет динамических параметров кинематической цепи

Момент инерции якоря двигателя:

$$J = 1,536 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 = 1,536 \cdot 10^{-7} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

.

(26)

Для нахождения момента инерции грузового барабана определим ряд геометрических размеров по нижеприведённым формулам.

Расчёт параметров грузового барабана

Шаг канавок:

$$t = \delta + \frac{(2 \cdot 3)}{3,14 \cdot 2} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$= 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

(27)

Число витков на барабане лифта:

$$Z_{л} = \frac{2 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,001} \cdot 3,14 \cdot 0,38 \cdot 10^{-3} = 38$$

(28)

Число витков на барабане противовеса:

$$l_{n2} = \frac{z_2}{\pi \cdot d_{f2}} \cdot \frac{1.5}{1000} = 4,007 \approx 4 \text{ мм}$$

(29)

Длина нарезанной части барабана лифта:

$$l_1 = (z_{z1} + z_{z0}) \cdot t = (3 + 2) \cdot 15,1 = 75,5 \text{ мм} = 75,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

(30)

Здесь



– число запасных витков.

Длина нарезанной части барабана противовеса:

$$l_2 = (z_{z2} + z_{z0}) \cdot t = (4 + 2) \cdot 15,1 = 90,6 \text{ мм} = 90,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

(31)

Полная длина барабана лифта:

$$e_1 = l_1 + (2 \div 3)r = 25.5 + 3 \cdot 5.1 = 40.8 \text{ мм} = 40.8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

(32)

Полная длина барабана противовеса:

$$e_2 = l_2 + (2 \div 3)r = 30.6 + 3 \cdot 5.1 = 45.9 \text{ мм} = 45.9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

(33)

Введём величину  $\gamma_{\text{бл}}^{\text{ин}}$

для учёта моментов инерции блока:

$$e_{\text{бл}}^{\text{ин}} = 3r = 3 \cdot 5.1 = 15.3 \text{ мм} = 15.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

(34)

Вес барабана лифта:

$$G_{K1} = \rho \cdot \pi \cdot (R_1^2 \cdot (R_1 \cdot \theta_1)^2) \cdot c_1 \cdot \rho_{сталь}$$

,

(35)

$$G_{K1} = 9,881 \cdot \pi \cdot (717^2 \cdot (717 \cdot 9)^2) \cdot 40,88 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 12,93310$$

.

Вес барабана противовеса:

$$G_{K2} = \rho \cdot \pi \cdot (R_2^2 \cdot (R_2 \cdot \theta_2)^2) \cdot c_2 \cdot \rho_{сталь}$$

,

(36)

$$G_{K2} = 9,881 \cdot \pi \cdot (625^2 \cdot (625 \cdot 9)^2) \cdot 45,9 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 11,93810$$

Вес блоков:

$$C_{\text{ин}} = J \cdot \pi \cdot (R_2^2 \cdot r^2) \cdot C_{\text{ин}} \cdot \rho_{\text{сталь}}$$

(37)

$$C_{\text{ин}} = 9,881 \cdot \pi \cdot (62,5^2 \cdot 2,5^2) \cdot 11,3 \cdot 7850 \cdot 10^{-9} = 14,44 \cdot 10$$

Радиус инерции барабана лифта:

$$I_{\text{л}}^2 = \frac{M_{\text{л}}^2}{2} + (M_{\text{л}} \cdot w_{\text{л}})^2 = \frac{0,00716^2}{2} + 0,00666^2 = 0,000923811 \quad ; \quad 0,000460 \text{ м}^2$$

(38)

Радиус инерции барабана противовеса:

$$I_{\text{п}}^2 = \frac{M_{\text{п}}^2}{2} + (M_{\text{п}} \cdot w_{\text{п}})^2 = \frac{0,006226^2}{2} + 0,006386^2 = 0,00067763816 \quad ; \quad 0,00034 \text{ м}^2$$

(39)

Радиус инерции блоков:

$$I_{00a} = \frac{m_1^2 \cdot r_1^2 + m_2^2 \cdot r_2^2}{2}$$

,

(40)

$$I_{00a} = \frac{62,5 \cdot 0,2^2 + 22,5 \cdot 0,2^2}{2} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

.

Момент инерции барабана лифта:

$$I_{l1} = \frac{G_{l1}}{g} \cdot \rho_{l1}^2 = \frac{121,5 \cdot 9,81}{9,81} \cdot 4,9 \cdot 10^{-3} = 6,26 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

.

(41)

Момент инерции барабана противовеса:

$$J_{2'} = \frac{G_{2'} \cdot \rho_{2'}^2}{g} = \frac{19,438}{9,81} \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} = 4,0913 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

(42)

Коэффициент, с помощью которого мы приведём момент инерции блоков к валу барабана, равен:

$$K_{\text{прив}} = \frac{1}{3} \left( 2 + \frac{R_2^2}{R_1^2} \right) = \frac{1}{3} \left( 2 + \frac{75^2}{62,5^2} \right) = 1,066$$

(43)

Момент инерции блоков:

$$J_{\text{бл}} = \frac{G_{\text{бл}} \cdot \rho_{\text{бл}}^2}{g} = \frac{14,434}{9,81} \cdot 1,96 \cdot 10^{-3} = 2,8881 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

(44)

Момент инерции грузового барабана:



$$J_{об} = J_1 + J_2 + K_{упр}/\omega_{об}^2$$

,

(45)

$$J_{об} = 6,26 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 + 4,013 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 + 1,066 \cdot 2,833 \cdot 10^{-3} / 13,34 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

.

Приведенный к валу двигателя момент инерции объекта и ротора электродвигателя при подъеме:

$$J_{дв} = J_{дв} + \frac{1}{\omega_{дв}^2} \cdot Q_{об} + \frac{1}{\omega_{дв}^2} \cdot J_{р,э}$$

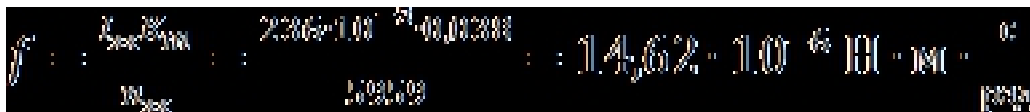
$$= 536 \cdot 10^{-4} + (13,34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2,193}{13,327} + 0,933 \cdot \frac{1,5298}{13,31}) \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

.

(46)

Для вычисления коэффициента вязкого эквивалентного трения  $\beta$

, воспользуемся эквивалентным синусным режимом, исходя из которого:



(47)

### Моделирование привода

С учетом расчетных параметров кинематических цепей и выбором двигателя была построена математическая модель привода с релейно – контактной схемой управления в среде моделирования Matlab Simulink. Математическая модель в виде структурной схемы приведена на рисунке 1.

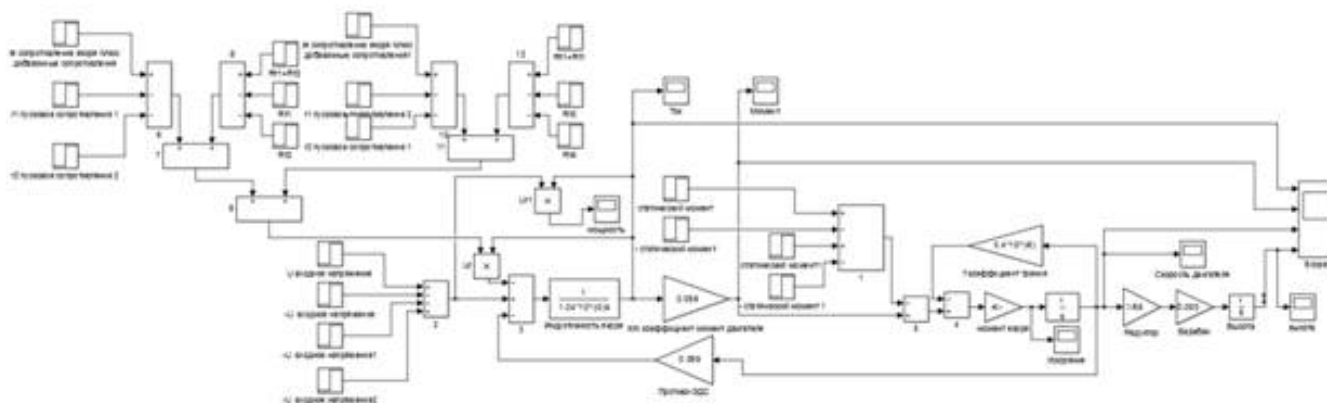


Рисунок 1. Линеаризованная структурная схема СУ с ДПТ при релейно-контакторном управлении.

Было проведено моделирование функционирования системы в заданном режиме работы привода манипулятора. Результаты приведены на осциллограммах, представленных на

рисунках 2 – 4.

## Результаты моделирования

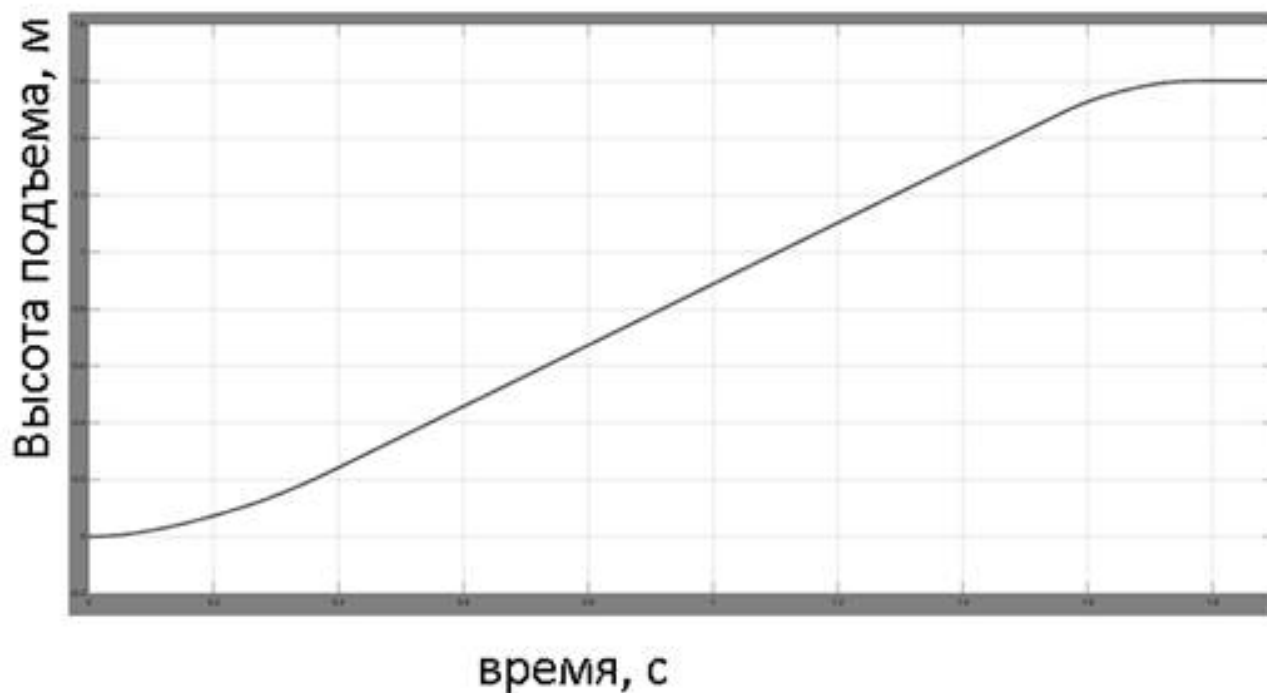


Рисунок 2. Осциллограмма зависимости перемещения подъемника от времени при подъеме.

По осциллограмме на рисунке 2 видно, что подъемник достигает заданной высоты за 1,76 секунды, что удовлетворяет условию



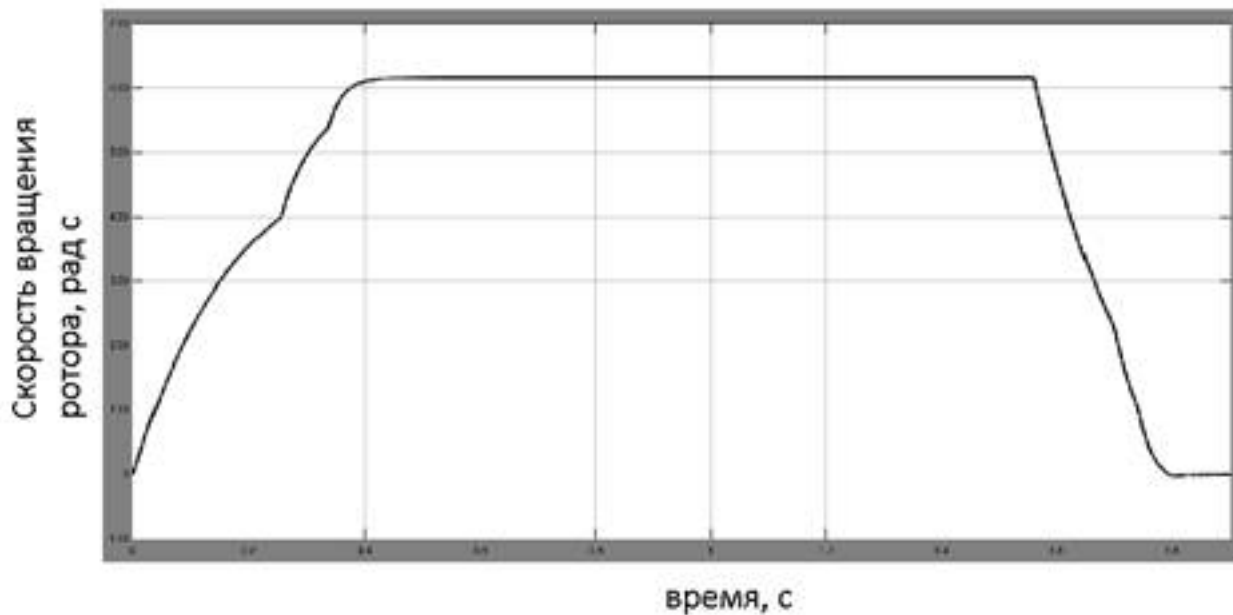


Рисунок 4. Скорость вращения ротора двигателя в зависимости от времени при разгоне, поддержании скорости и торможении

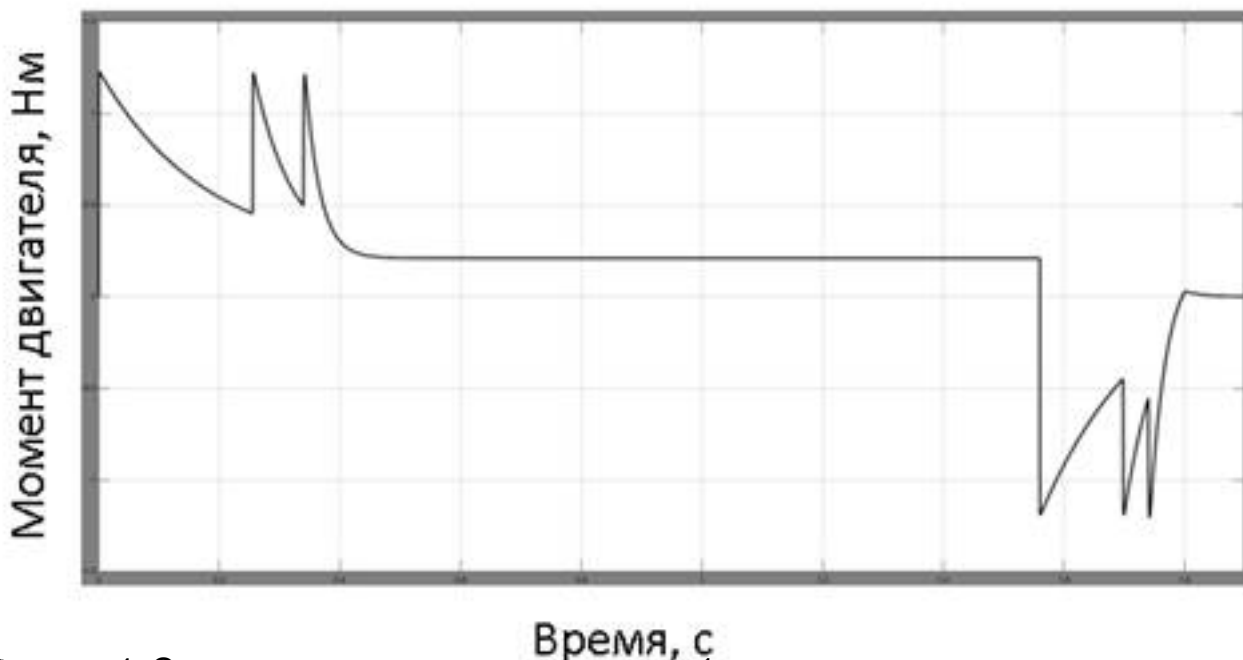


Рисунок 4. Момент двигателя в зависимости от времени при разгоне, поддержании скорости и торможении

модель превышает максимальную величину, рассчитанную при определении параметров

$\omega_{max} = 1,2219 \cdot 100 \text{ рад/с}$   
 $\tau_{max} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$   
 $\tau_{min} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

**Выводы:**

Для релейно-контакторной схемы управления подъемного звена манипулятора были получены расчетные данные для математического моделирования привода в пакете Matlab Simulink, результатом которого стало подтверждение верности расчетных данных, которые находятся в пределах допустимых во всех режимах работы двигателя. Также моделирование подтвердило, что груз поднимается за заданное время на

заданную высоту, и платформа без груза опускается до исходного положения за заданное время.

Данная схема построения привода манипулятора так же, как и схема, рассмотренная в первой части статьи, приводит к необходимому результату, а также двигатель не перегревается и не выходит из строя.

### *Список литературы*

1. Яременко А. М., Миронов М. М., Матвеева Е. С., Савельев Б. Н. «Проектировочный расчет привода звена манипулятора», журнал «Научный аспект», 2019, № 2, том 4, 1747 – 1760 с.
2. С.А. Эсмедляев «Расчёт электропривода подъёмника: Методические указания по курсовому проектированию». — Л.: ЛМИ, 1983. — 59 с.;
3. Илья Черных «Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink». – Москва.: ДМК Пресс, 2011 – 288 с.;
4. ГОСТ 3067-88. Канаты стальные типа ТК конструкции 6х19;
5. Технические таблицы «Таблица коэффициентов трения скольжения» [электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://tehtab.ru/guide/guidephysics/frication/frictionofslicing>.
6. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. «Электрические Машины. Лабораторные работы на ПК». — СПб.: Корона-принт, 2003 — 256 с.

{social}