

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД
«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА
БАЗЕ АД С КЗР»

Работу выполнили:
Будков Ярослав Антонович
Демкин Алексей Игоревич
Ле Ван Хынг
Мовчан Игорь Евгеньевич

Преподаватель: Маматов Александр Геннадьевич

Данные варианта:

$$v = 50 \text{ км/ч}$$
$$f_0 = 0.017$$

Часть 1. Тяговый расчет

В данной задаче мы должны выполнить тяговый расчёт, определить мощность двигателя и передаточное число трансмиссии, а затем убедиться, что пусковой момент выбранного вами двигателя превышает момент сцепления.

В случае статического режима работы ($\omega_m = \text{const}$) достаточно легко определить необходимое значение P_m :

$$P_m = \frac{1}{\eta} \left(\frac{C_d \rho S_f v^2}{2} + G f_{(v, f_0)} \cos \alpha + G \sin \alpha \right) v,$$

где:

- | | |
|--|---|
| 1. C_d - коэффициент силы лобового сопротивления | 5. $f_{(v, f_0)}$ - коэффициент сопротивления качению |
| 2. ρ - плотность среды | 6. α - угол подъема дороги |
| 3. S_f - площадь фронтальной поверхности | 7. η - КПД трансмиссии |
| 4. G - сила тяжести | |

В зависимости от скорости ТС, а также вида и качества дорожного покрытия значения коэффициента $f(v, f_0)$ могут находиться в широком диапазоне. В связи с этим его значение описывает эмпирической зависимостью

$$f_{(v, f_0)} = f_0 \left(1 + \frac{v^2}{2000} \right), \quad (2)$$

где f_0 - коэффициент сопротивления качению на малых скоростях

Таким образом с моими значениями варианта мощность двигателя составляет:

$$P_m = 75.0628 \text{ кВт}$$

По значению P_m выбирается электродвигатель из каталога по мощности близкой к расчетной, желательно наиболее высокооборотный, что позволяет уменьшить общую массу и габариты:

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Нм	Индекс механической характеристики	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг·м ²	Масса ИМ1001, кг	Сервис-фактор
5AM250S2	75	2960	93,6	0,92	132	242	II	2,0	7,5	3,0	0,47	475	1,15

Рисунок 1. Скрин паспортных данных двигателя 5AM250S2

Далее на основе значения максимальной частоты вращения двигателя ω_m^{max} производится расчет передаточного числа i_t трансмиссии

$$i_t = \frac{r \omega_m^{nom}}{v} = 11.1589 \quad (3)$$

Также необходимо удостовериться в том, что выбранный двигатель обладает значением пускового момента M_s , значение которого с учетом трансмиссии превышает момент сцепления шины с дорожным покрытием при скорости $v = 0$

$$[Gf_{(0,f)} \cos a] \leq M_m^{nom} k_{st} i_t, \quad (4)$$

где M_m^{nom} - номинальный момент двигателя, k_s - кратность пускового момента

Часть 2. Исследование статических характеристик АД с КЗР

Уравнение для механической характеристики АД с КЗР

$$M = \frac{m_1 Z_p U_1^2 R'_2}{\omega_1 [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2]}, \quad (5)$$

где m_1 - число фаз, Z_p - число пар полюсов, U_1 - фазное напряжение, ω_1 - угловая частота питающей сети.

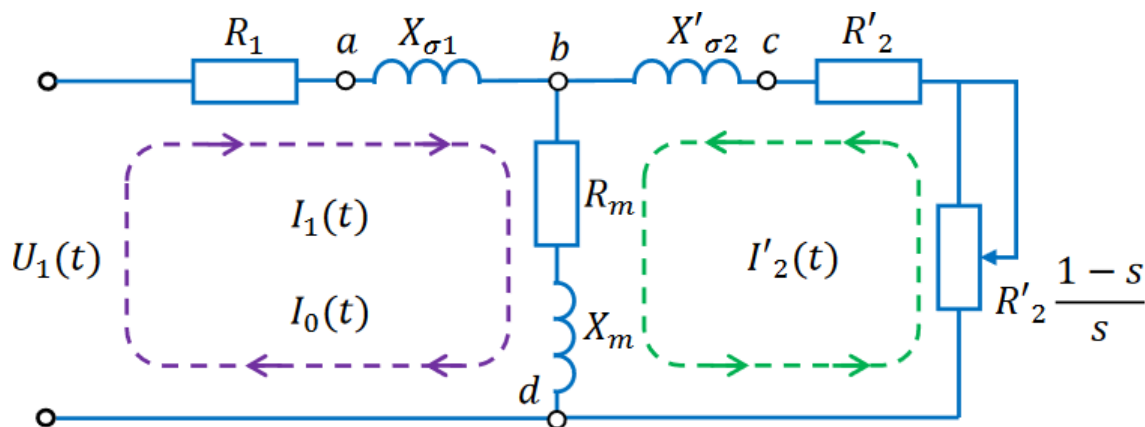


Схема замещения АД с КЗР

Для дальнейшего исследования необходимо рассчитать параметры схемы замещения выбранного двигателя на основе паспортных данных:

1. R_1 - активное сопротивление статора;
2. R'_2 - активное приведенное сопротивление ротора;
3. $X_{\sigma 1}$ - индуктивное сопротивление статора;
4. $X'_{\sigma 2}$ - индуктивное приведенное сопротивление ротора;
5. X_m - индуктивное сопротивление основного потока.

Для достижения цели нам необходимо измерить две механические характеристики при различных значениях напряжения питания и частоты питания. Однако перед этим мы должны получить все необходимые параметры для формулы (5), чтобы вообще иметь возможность начать анализ

$$R_1 = 0.074662 \text{ Ом}$$

$$R'_2 = 0.022878 \text{ Ом}$$

$$X_{\sigma 1} = X'_{\sigma 2} = 0.11504 \text{ Ом}$$

$$X_m = 6.0532 \text{ Ом}$$

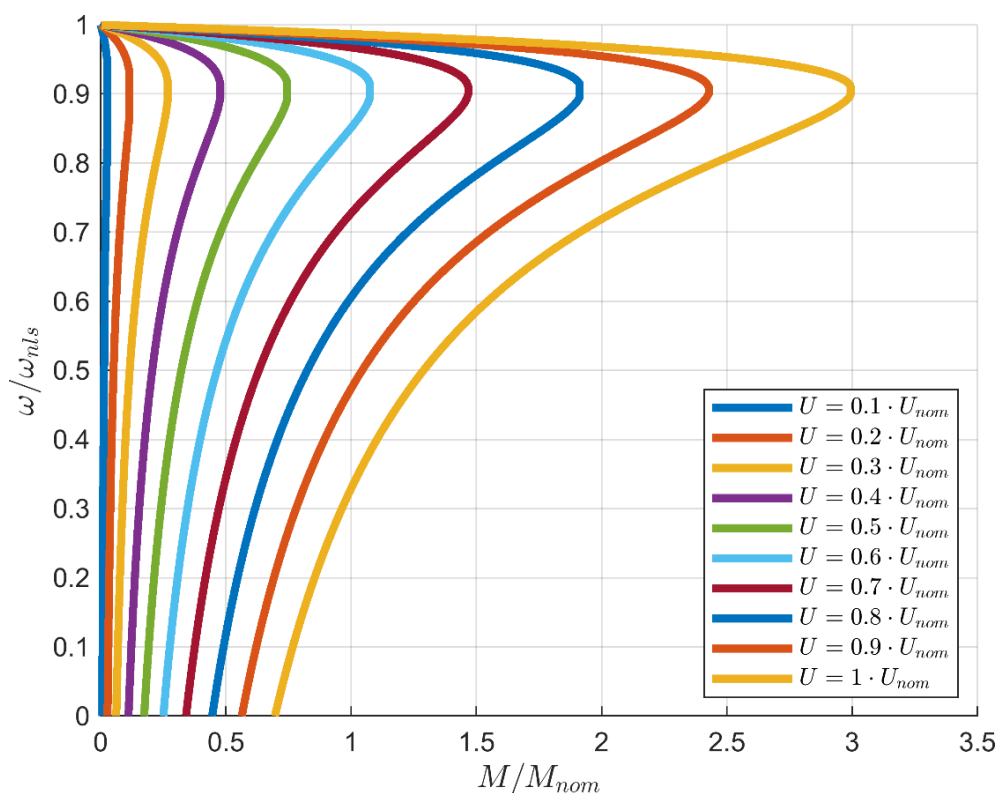


График 1. Механическая характеристика $\omega(M)$ при регулировании напряжения питания

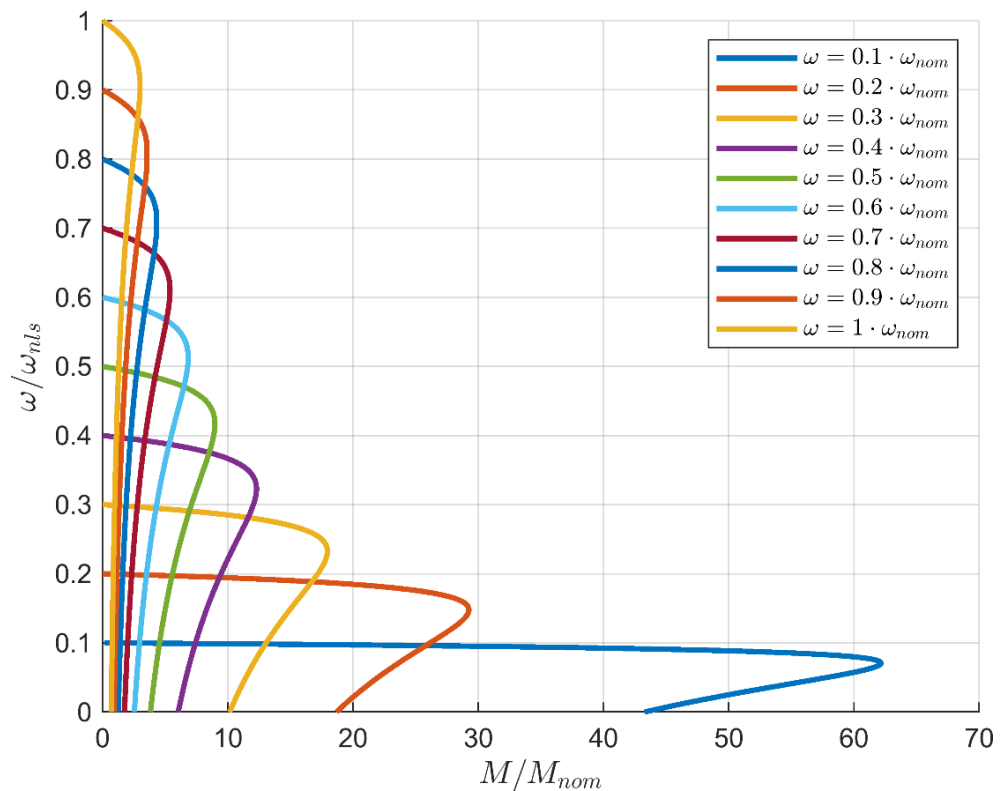


График 2. Механическая характеристика $\omega(M)$ при регулировании частоты питания

Нам нужны построить целых три графика при скалярном частотном управлении.

При статической нагрузке формула имеет вид:

$$M = \frac{m_1 Z_p a U^2 R'_2}{\omega_{1s} [(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2]}, \quad a = \omega / \omega_{1nom}$$

При компенсации IR:

$$M = \frac{m_1 Z_p a^2 U_{adN}^2 R'_2}{\omega_{1s} [(R'_2/s)^2 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2]}, \quad U_{adN} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} - R_1 I_1$$

При использовании IZ компенсации выражение для момента принимает следующую зависимость

$$M = \frac{m_1 Z_p a^2 U_{bdN}^2 R'_2}{\omega_{1s} [(R'_2/s)^2 + (X'_{\sigma 2})^2]}, \quad U_{bdN} = \frac{U_L}{\sqrt{3}} - \{(R_1 + jX_{\sigma 1}) I_1\}$$

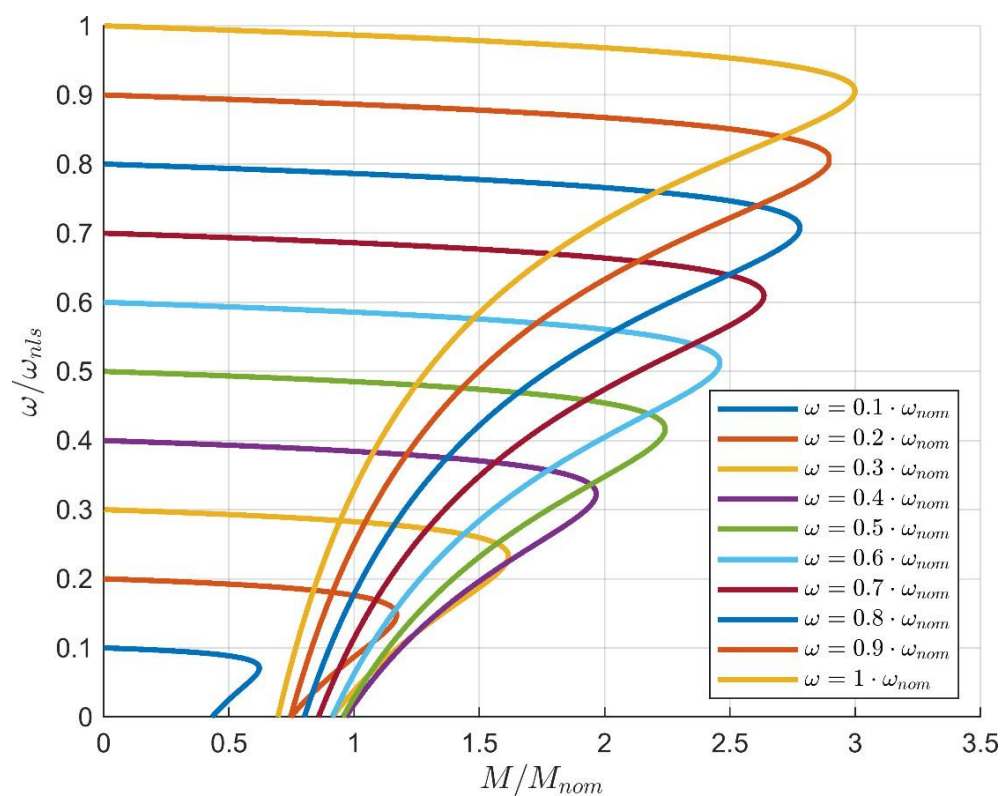


График 3. Семейство механических характеристик при статической нагрузке

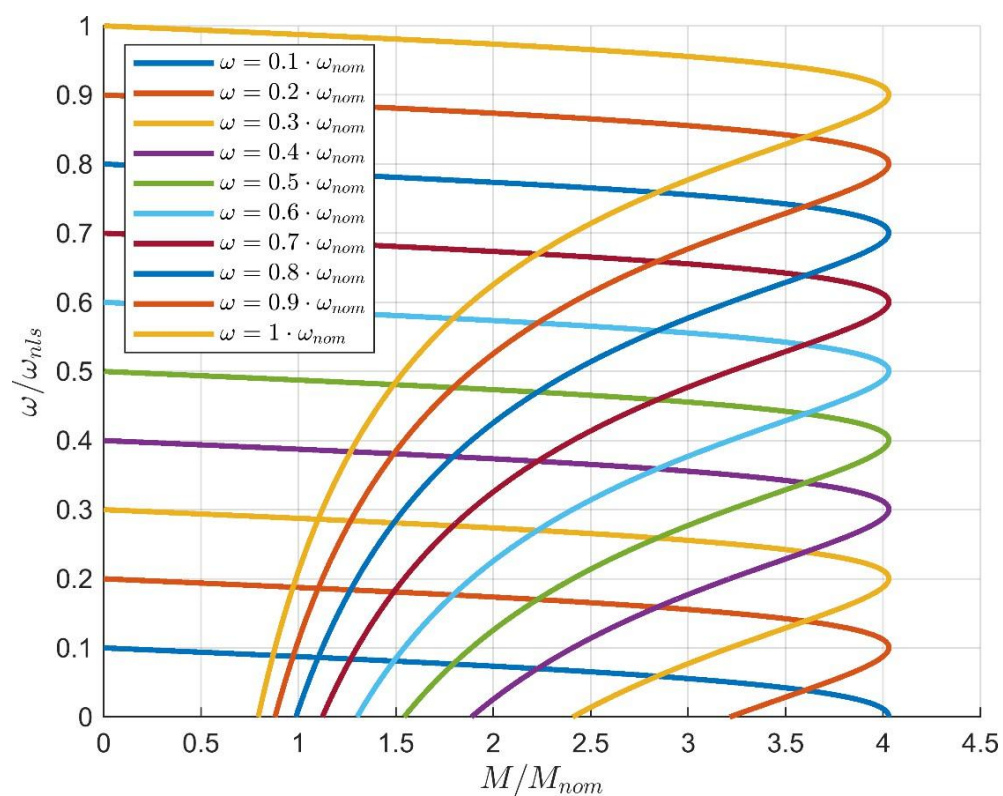


График 4. Семейство механических характеристик при статической нагрузке с IR компенсацией

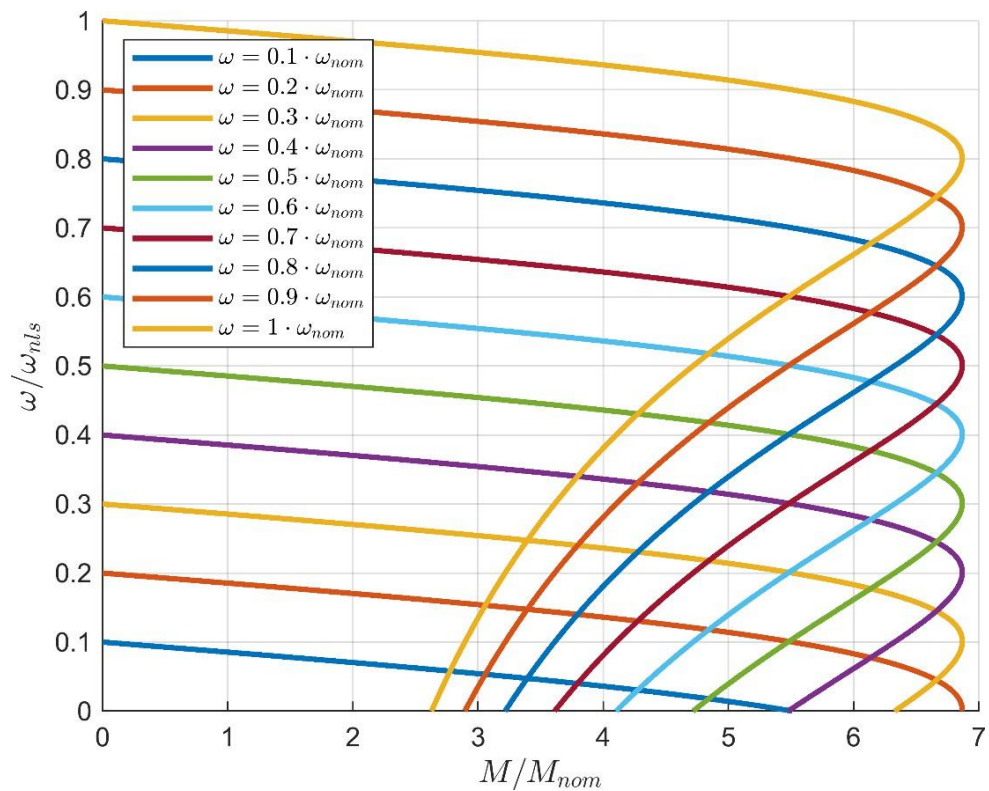


График 5. Семейство механических характеристик при статической нагрузке с IZ компенсацией

Микро вывод:

Мы видим, что с увеличением напряжения увеличивается крутящий момент. При увеличении рычага переключения передач крутящий момент уменьшается. А когда мы убираем R_1 и $X_{\delta 1}$ соответственно, то видим, что крутящий момент увеличивается

Часть 3. Исследование динамических характеристик АД с КЗР

Прежде чем перейти к модели и методам ее упрощения, рассмотрим трёхфазную систему напряжений, которая используется при питании АД с КЗР. Для ее описания используется следующая система уравнений

$$\begin{aligned}u_a(t) &= U_a \sin(\omega_{1nom} t), \\ \{u_b(t) &= U_b \sin(\omega_{1nom} t - 2\pi/3), \\ u_c(t) &= U_c \sin(\omega_{1nom} t + 2\pi/3)\end{aligned}$$

где U_a, U_b, U_c - амплитудные значения фаз, ω_{1nom} - номинальная угловая частота питающей сети

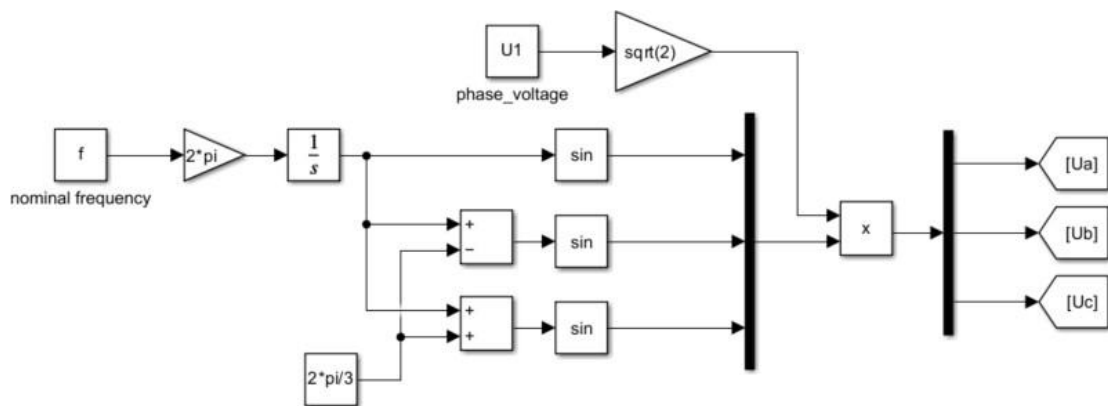


Рисунок 2. Структурная схема генератора трехфазной сети

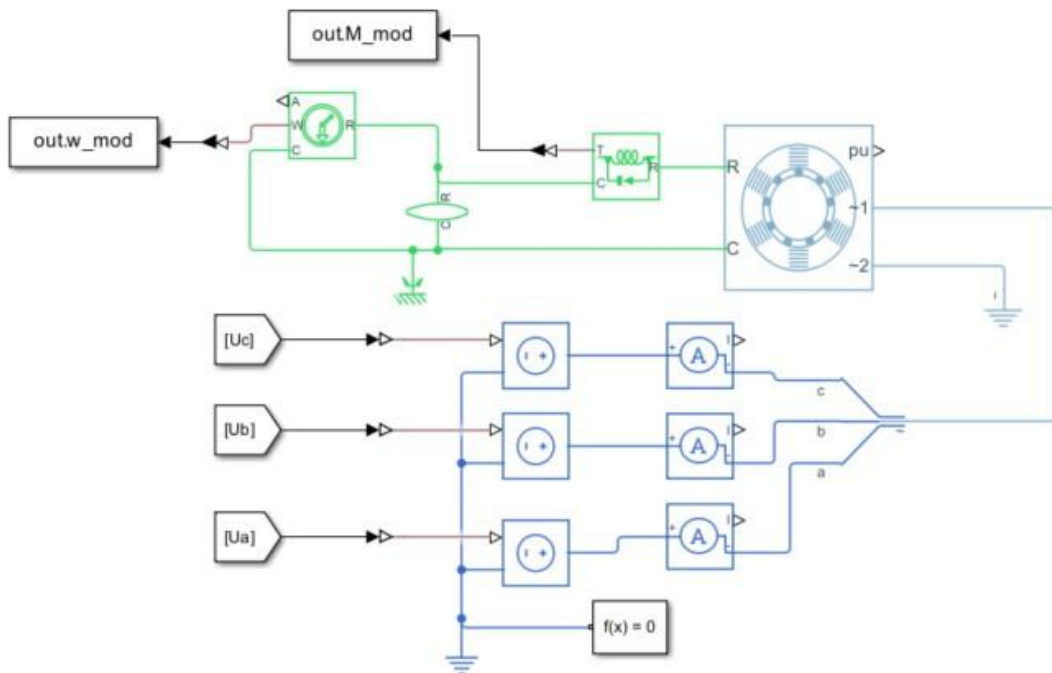


Рисунок 3. Модель АД с КЗР в среде Simscape без нагрузки

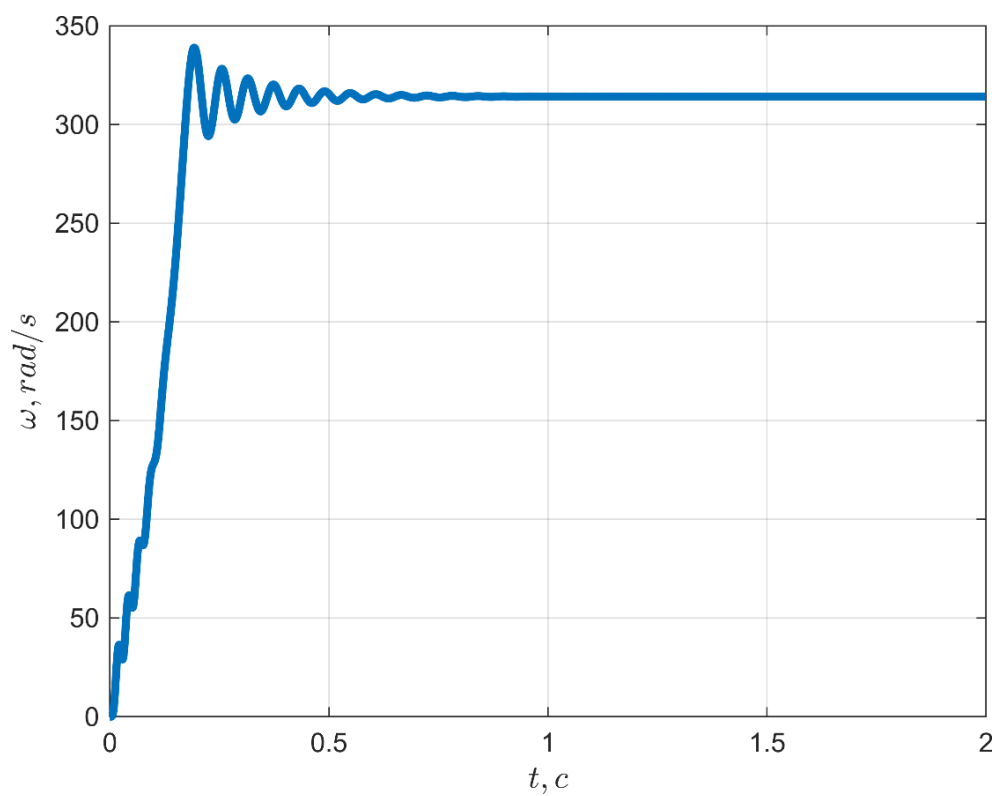


График 6. График скорости без нагрузки

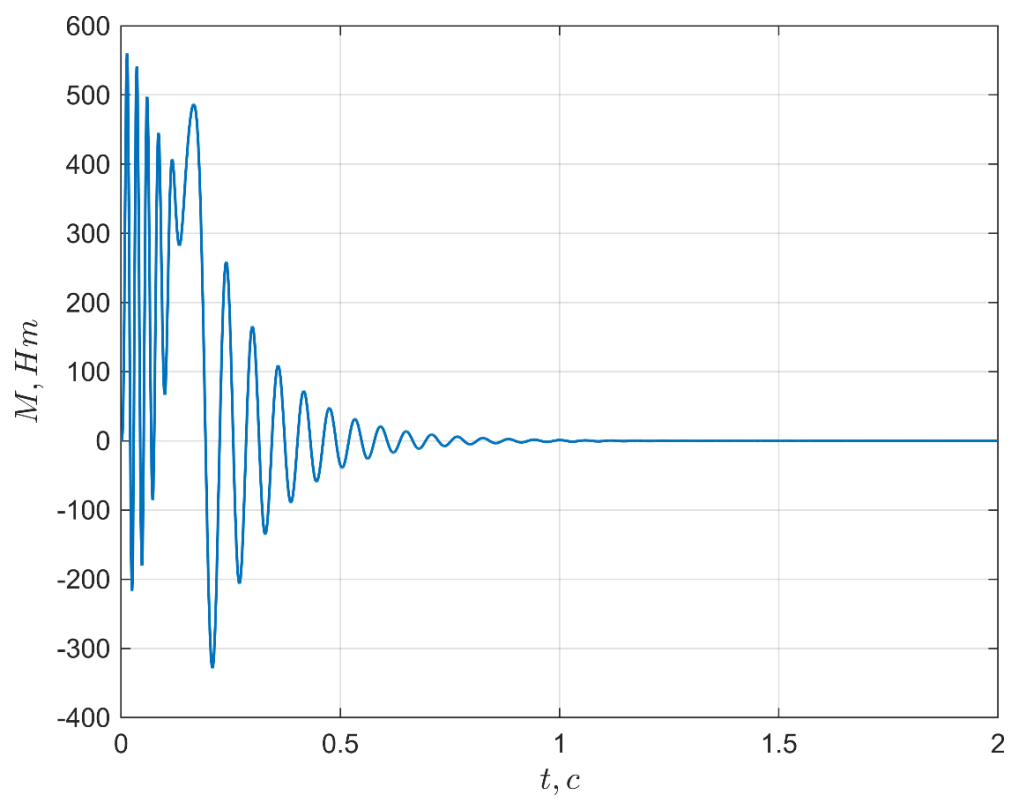


График 7. График момента без нагрузки

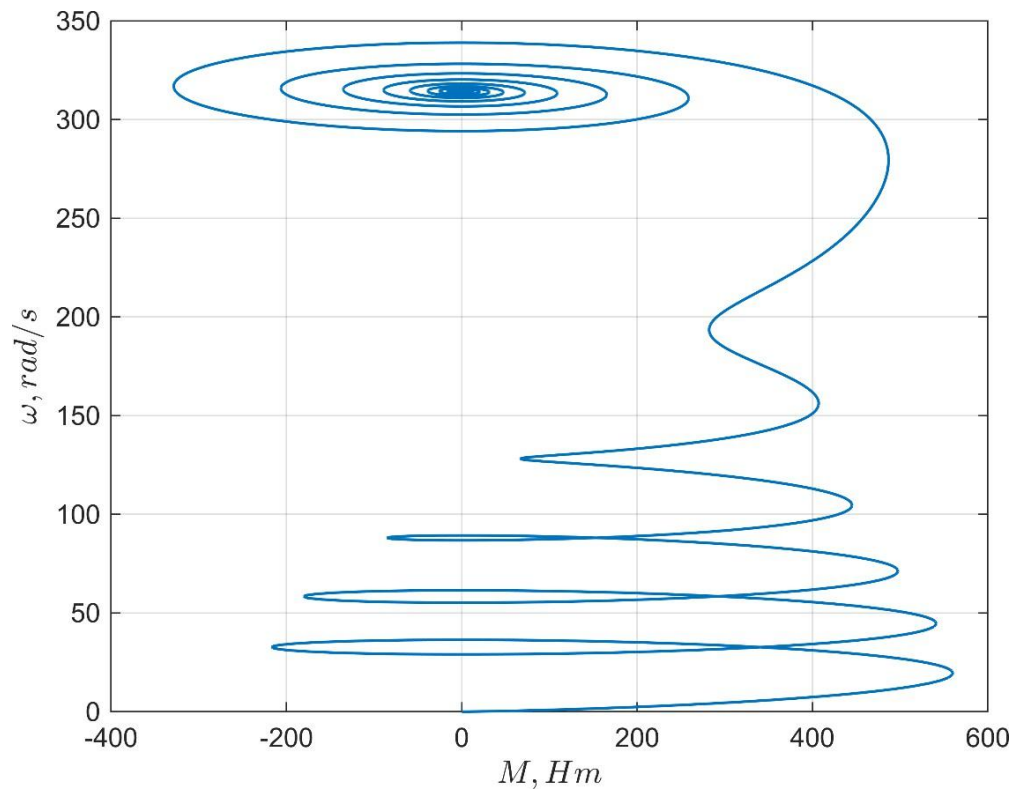


График 8. График фазовой характеристики без нагрузки

Теперь нам надо присобачить к схеме модели АД КРЗ (см рисунок 3) нагрузку в виде троллейбуса.

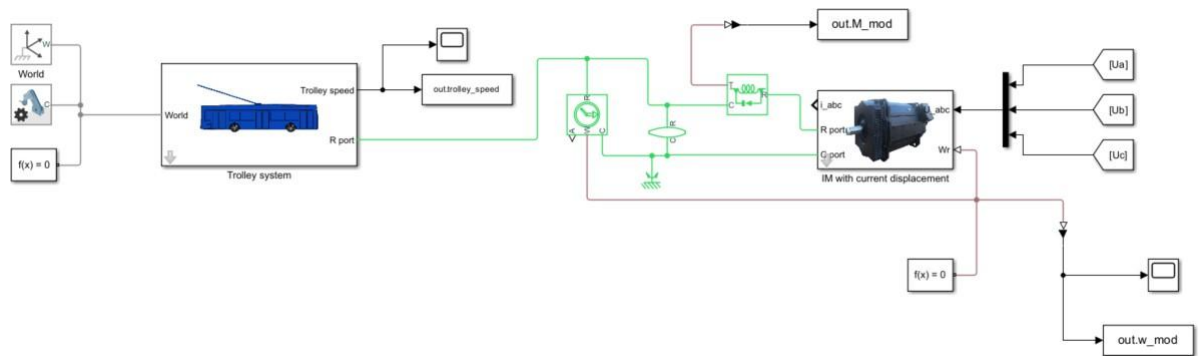


Рисунок 4. Модель АД с КЗР в среде Simscape с нагрузкой

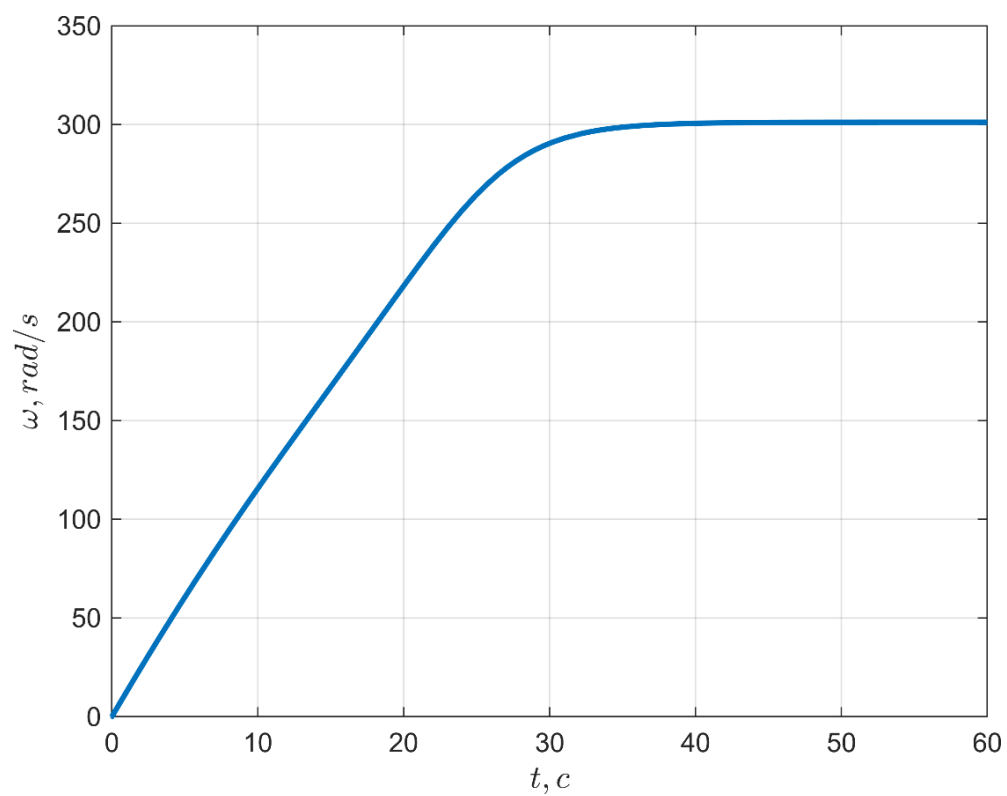


График 9. График скорости с нагрузкой

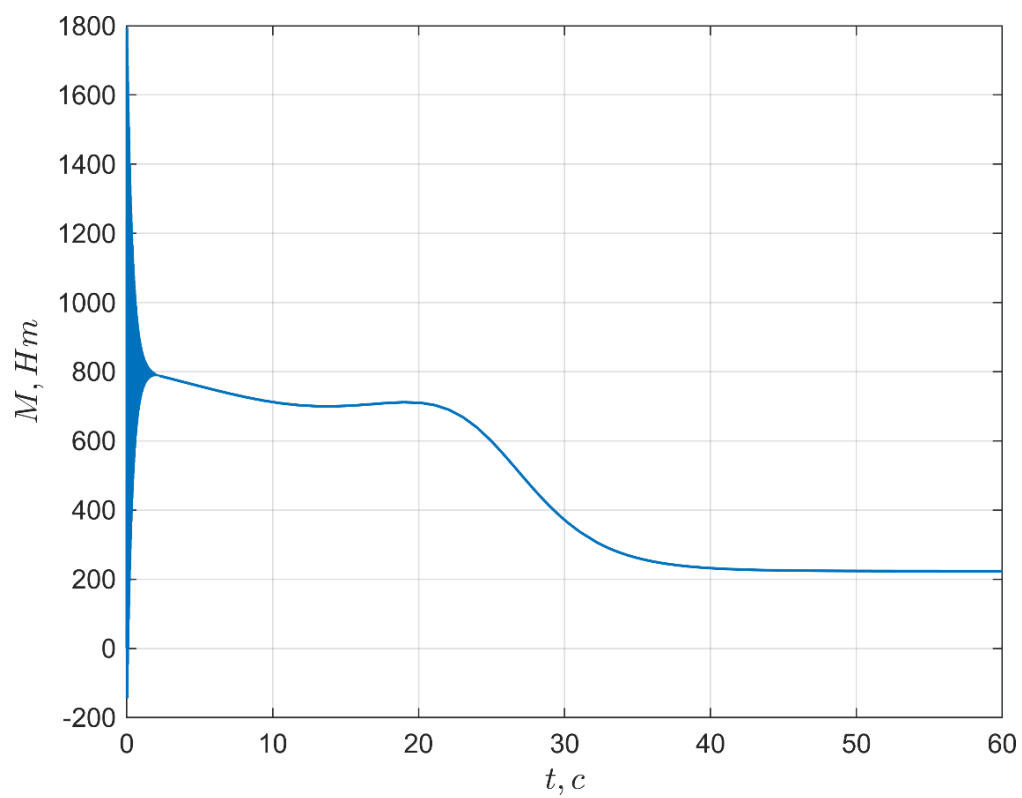


График 10. График момента с нагрузкой

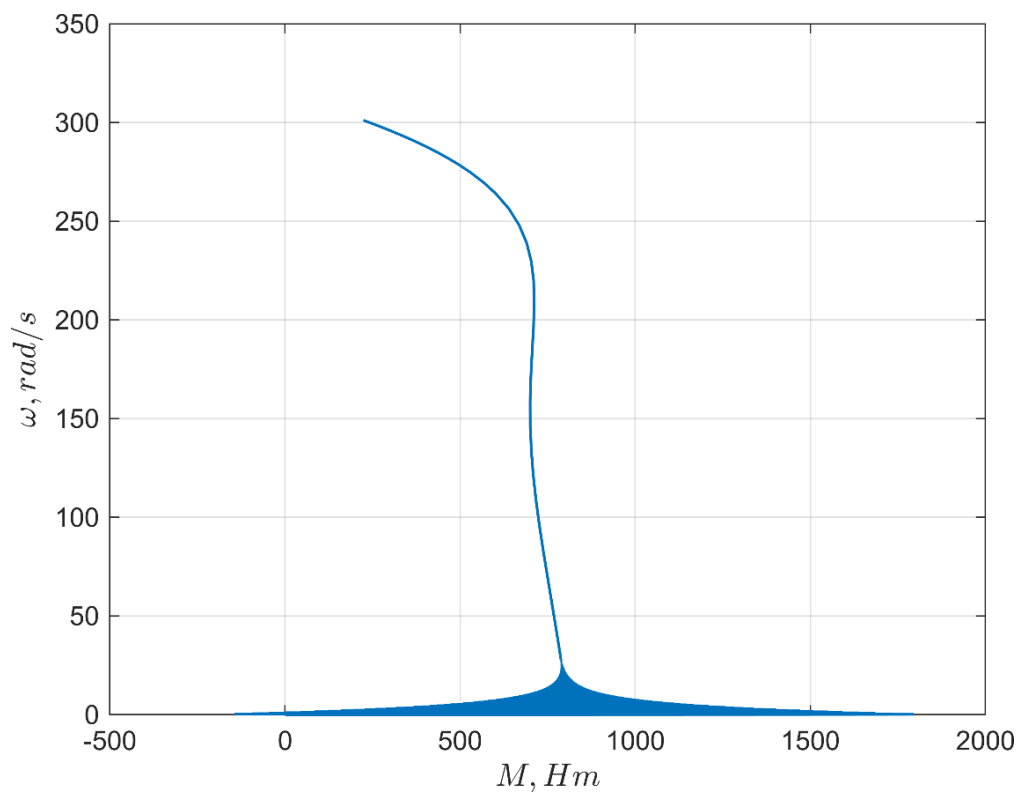


График 11. График фазовой характеристики с нагрузкой

Теперь рассмотрим частотный пуск двигателя, для реализации которого необходимо модифицировать рассмотренный ранее генератор напряжения путем введения функциональной связи между номинальным действующим напряжением U_1 и номинальной частотой питающей сети f_1 , а также включением задатчика интенсивности управляющего сигнала

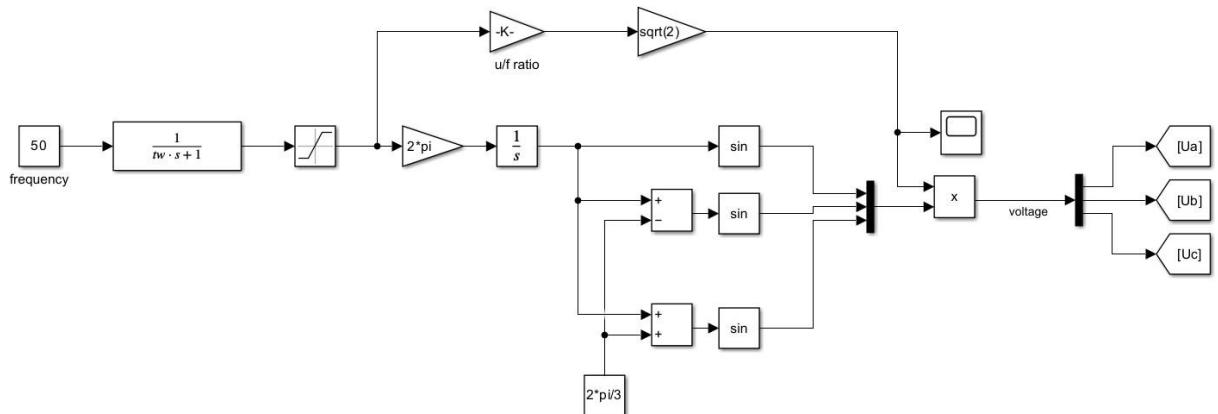


Рисунок 5. График структурной схемы генератора трехфазной сети для частотного пуска

Теперь рассмотрим графики скорости $\omega(t)$, момента двигателя $M(t)$ и фазовой характеристики $\omega(M)$ при моменте нагрузки $M_L = 0$ при различных значениях времени нарастания частоты t_ω :

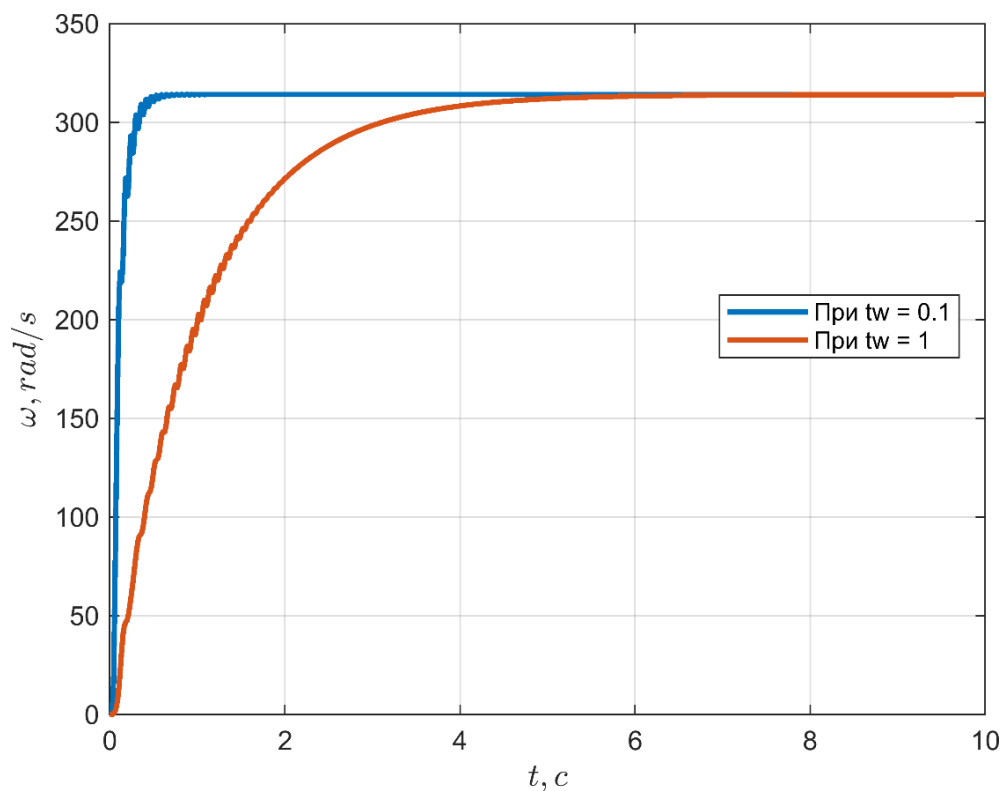


График 12. График скорости без нагрузки

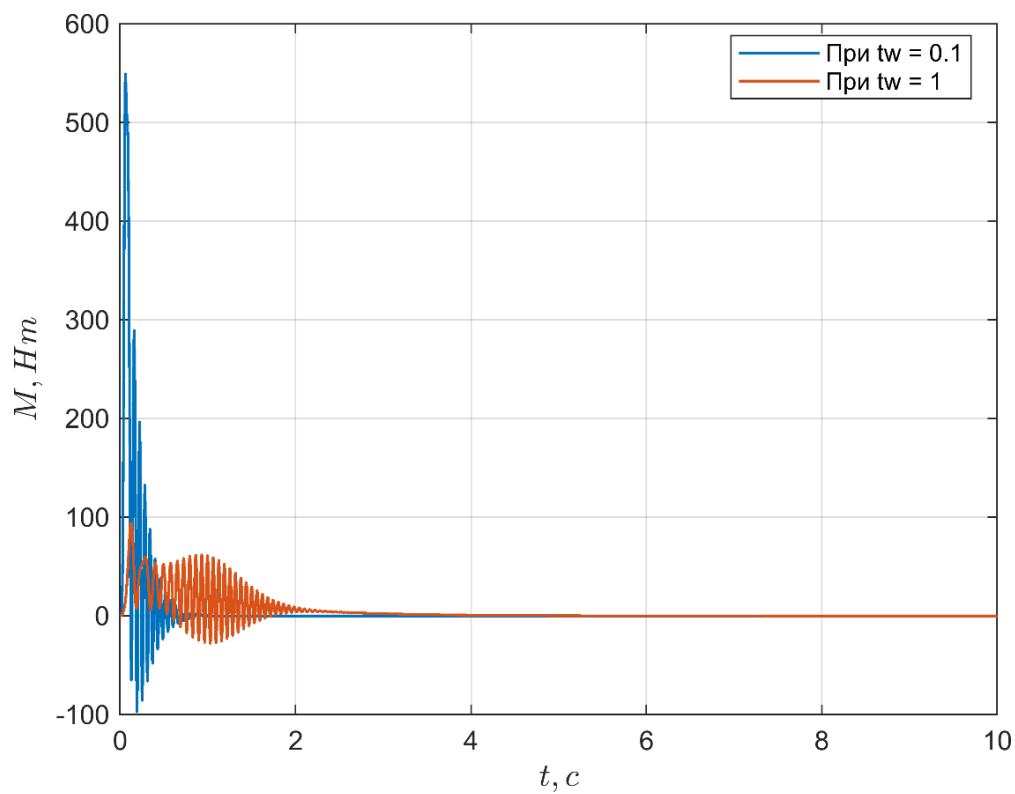


График 13. График момента без нагрузки

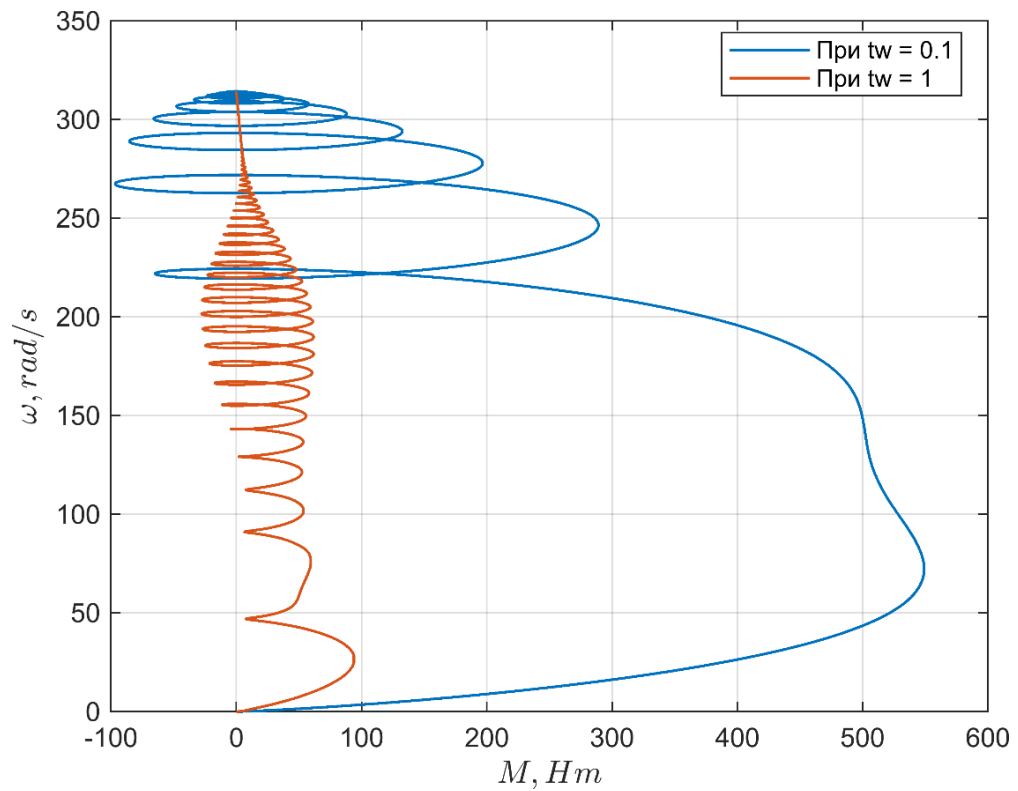


График 14. График фазовой характеристики без нагрузки

Теперь рассмотрим графики скорости $\omega(t)$, момента двигателя $M(t)$ и фазовой характеристики $\omega(M)$ при моменте нагрузки $M_L \neq 0$ при различных значениях времени нарастания частоты t_ω :

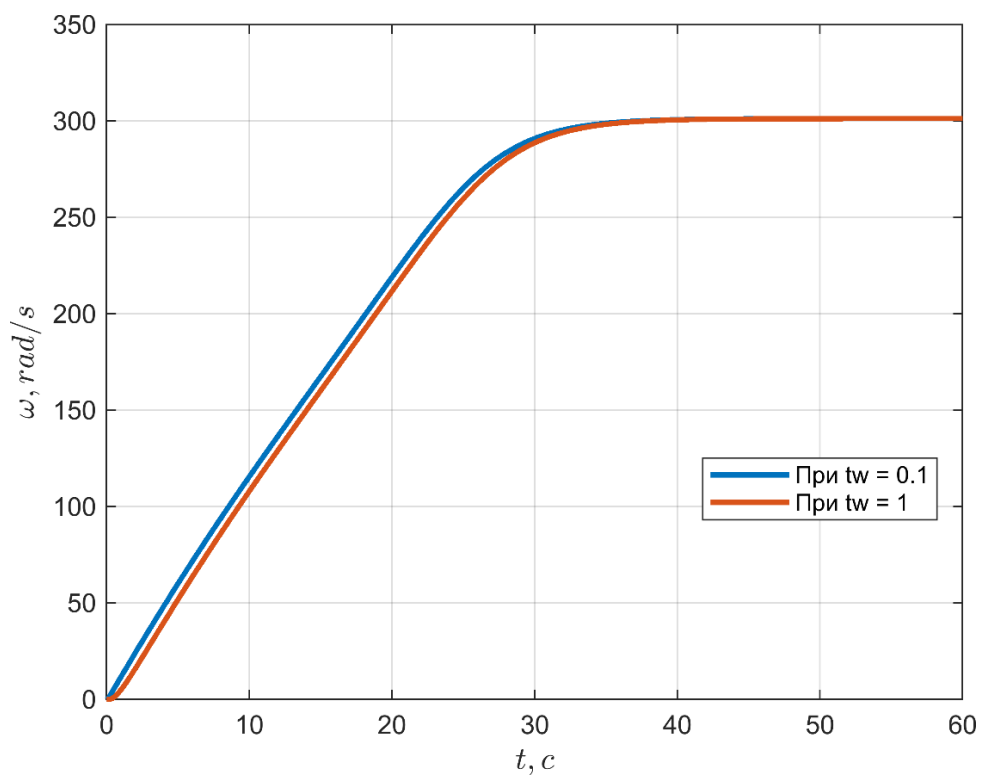


График 15. График скорости с нагрузкой

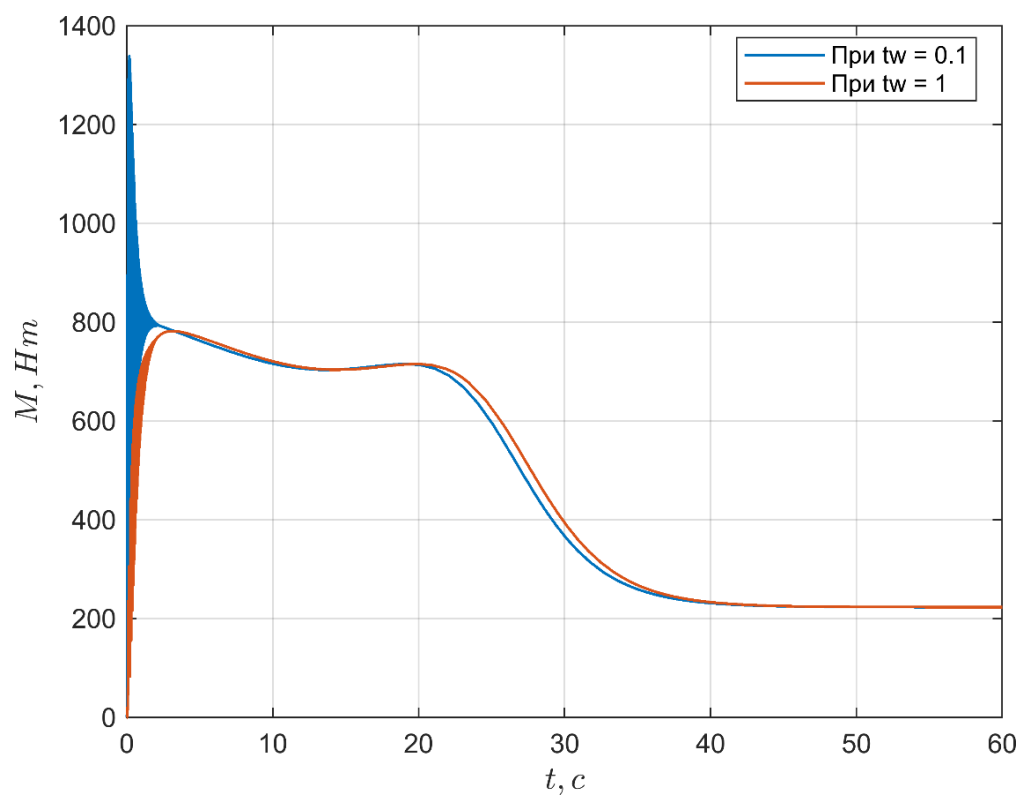


График 16. График момента с нагрузкой

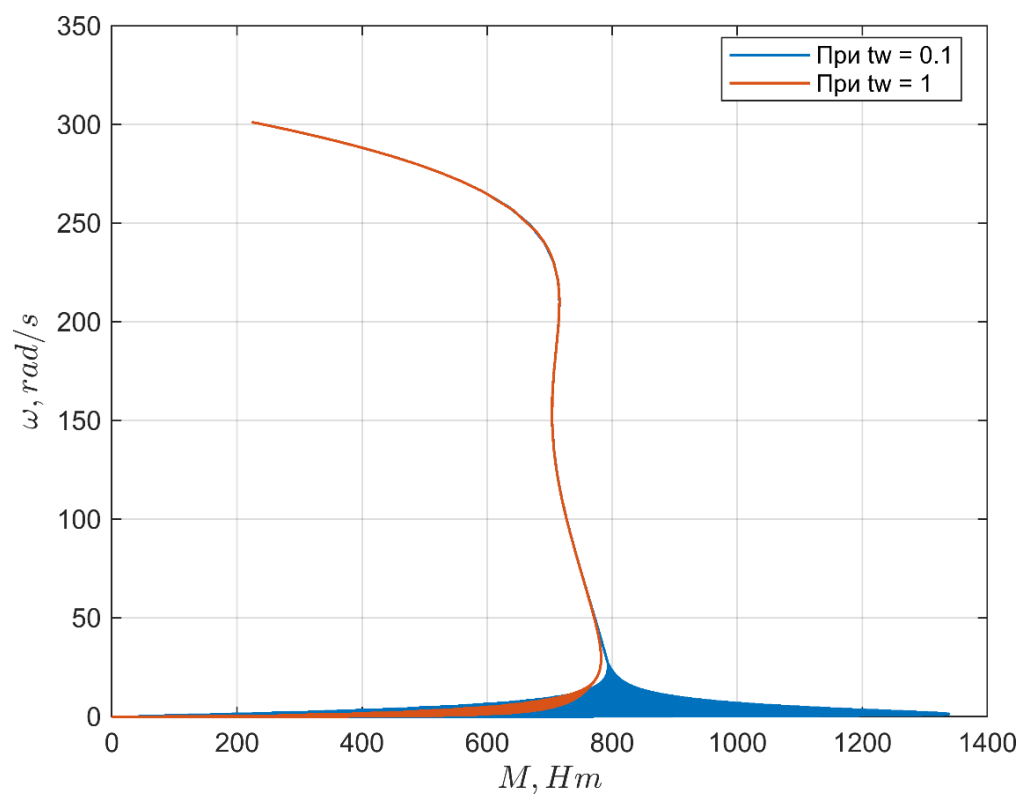


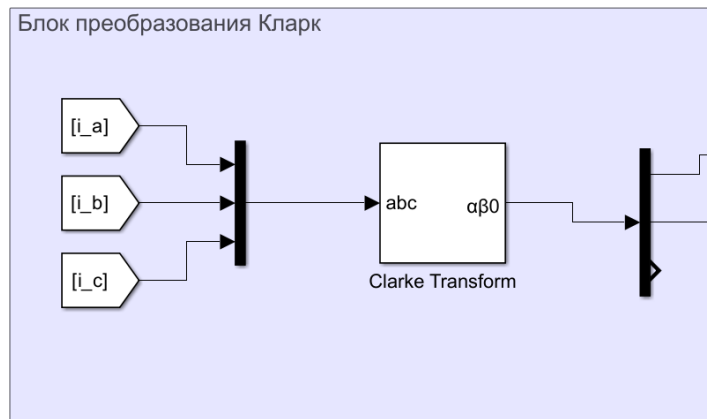
График 17. График фазовой характеристики с нагрузкой

Часть 4. Синтез замкнутой системы управления АД с КЗР

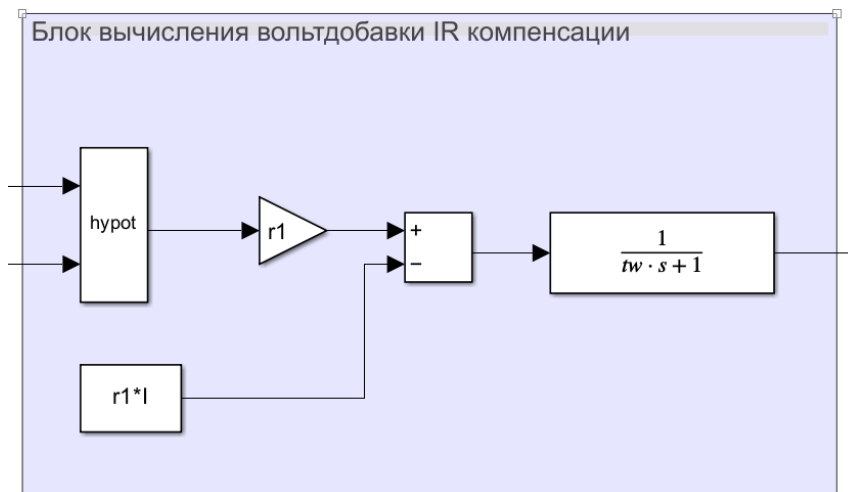
Рассмотренный ранее закон управления $U_1/f_1 = \text{const}$ может быть использован в замкнутой системе, если в систему управления (СУ) ввести отрицательную связь по скорости ротора. Однако данный метод обладает недостатком в виде непостоянства значения момента опрокидывания M_{max} при $f_1 \rightarrow 0$, что не позволяет регулировать скорость в широком диапазоне.

Для того, чтобы нивелировать данное явление необходимо реализовать в СУ режим IR компенсации, который достигается введением положительная связь по току статора. Для упрощения процедуры реализации IR компенсации рассмотрим алгоритм в скалярной (модульной) форме

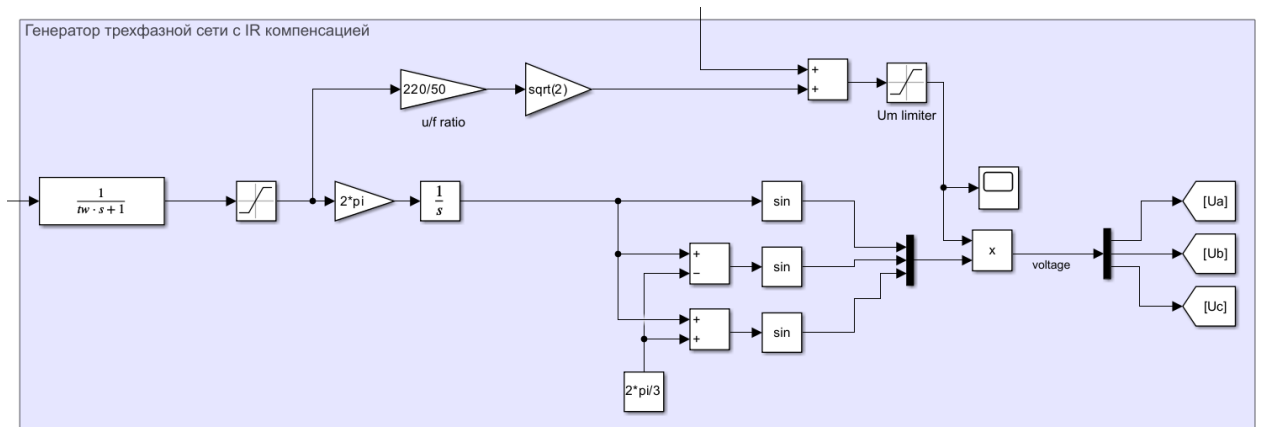
$$\Delta u_1 = R_1 |I_{sm}| = R_1 \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}$$



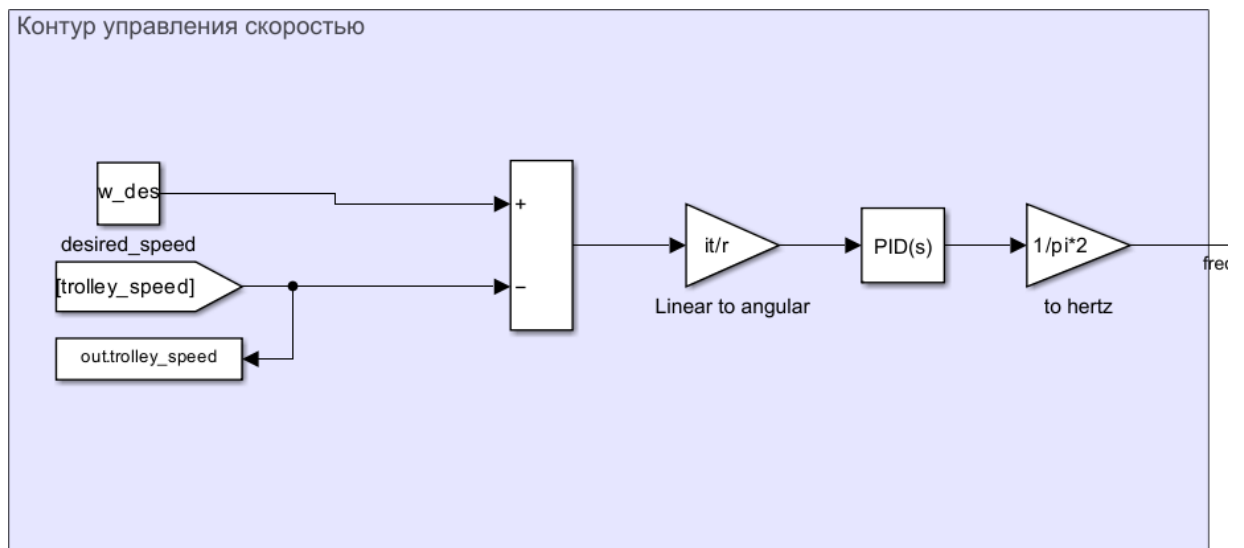
Из-за введения положительной обратной связи по току для обеспечения устойчивости необходимо ввести в контур обратной связи фильтр нижних частот, в качестве которого можно использовать апериодического звено первого порядка с постоянной времени $t_{IR} = 50ms$



Блок генератора трехфазного напряжения с учетом вольтодобавки принимает следующий вид:



В конечном итоге осталось реализовать только контур скорости, который обеспечит необходимую скорость вращения ω_r ротора АД для достижения желаемой скорости v_{des} ТС



В качестве регулятора скорости используется ПИ–регулятор, на вход которому поступает разность скоростей $\Delta v = v_{des} - v_{act}$ предварительно преобразованных из линейной в угловую $\Delta \omega = (i_t \Delta v)/r$. Полученный сигнал управления f_c необходимо преобразовать из рад/с в Гц $f_c = \omega_c/(2\pi)$

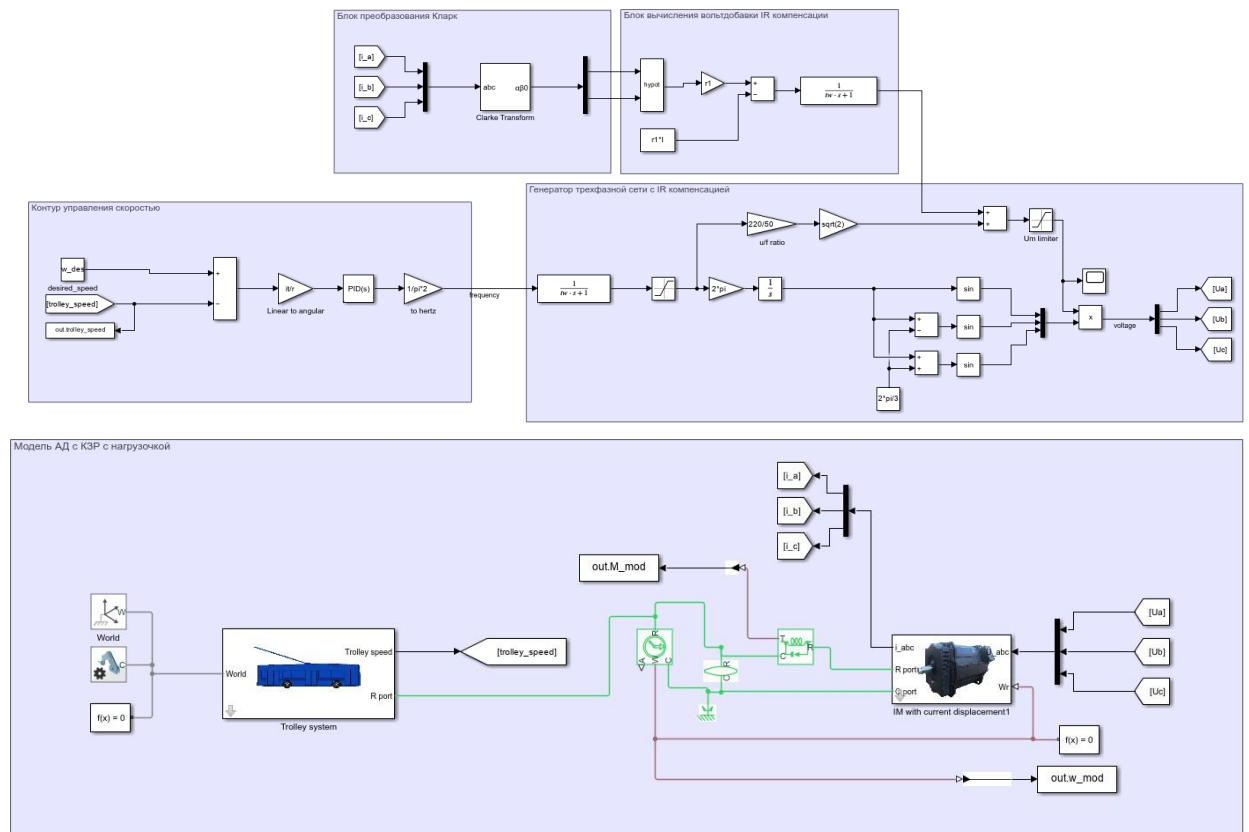


Рисунок 6. Структурная схема генератора с трёхфазной сети с IR компенсацией и моделью АД с КЗР в Simscape и с нагрузкой в виде троллейбуса

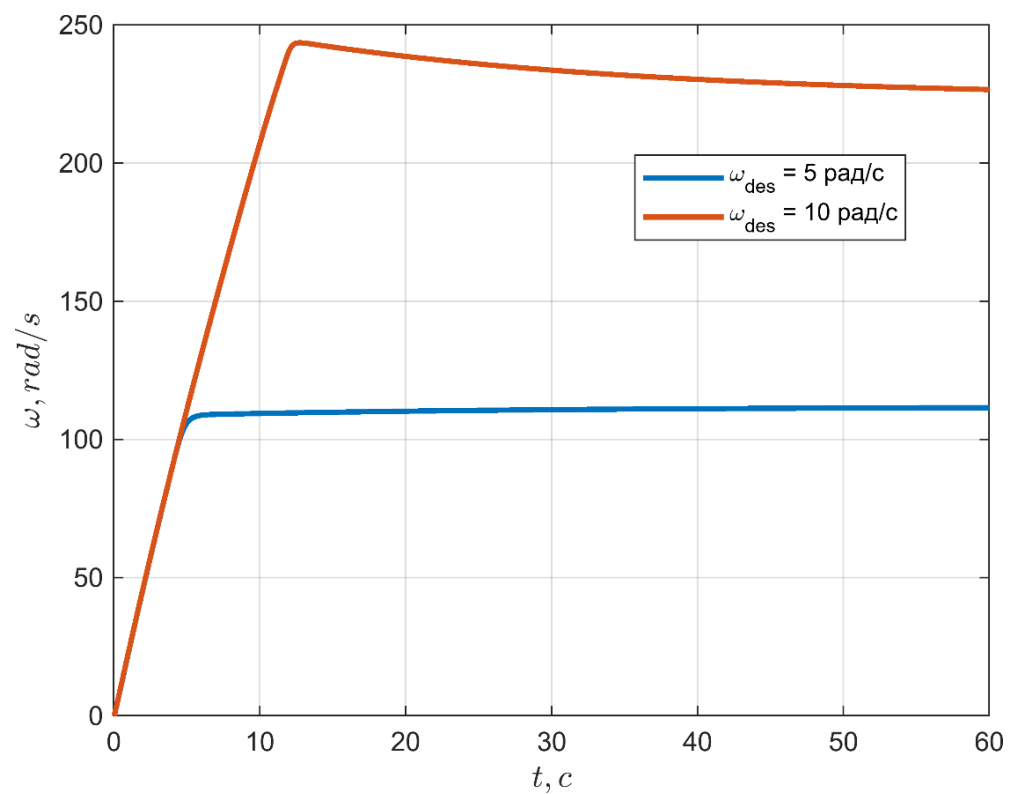


График 18. График скорости

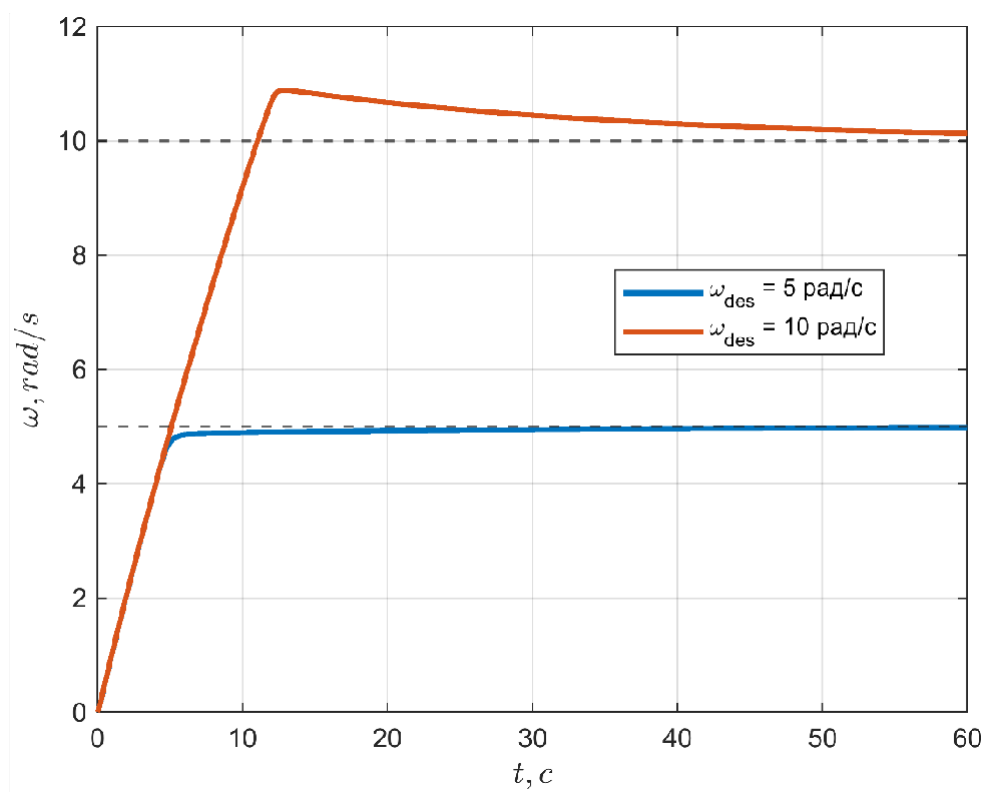


График 19. График скорости троллейбуса

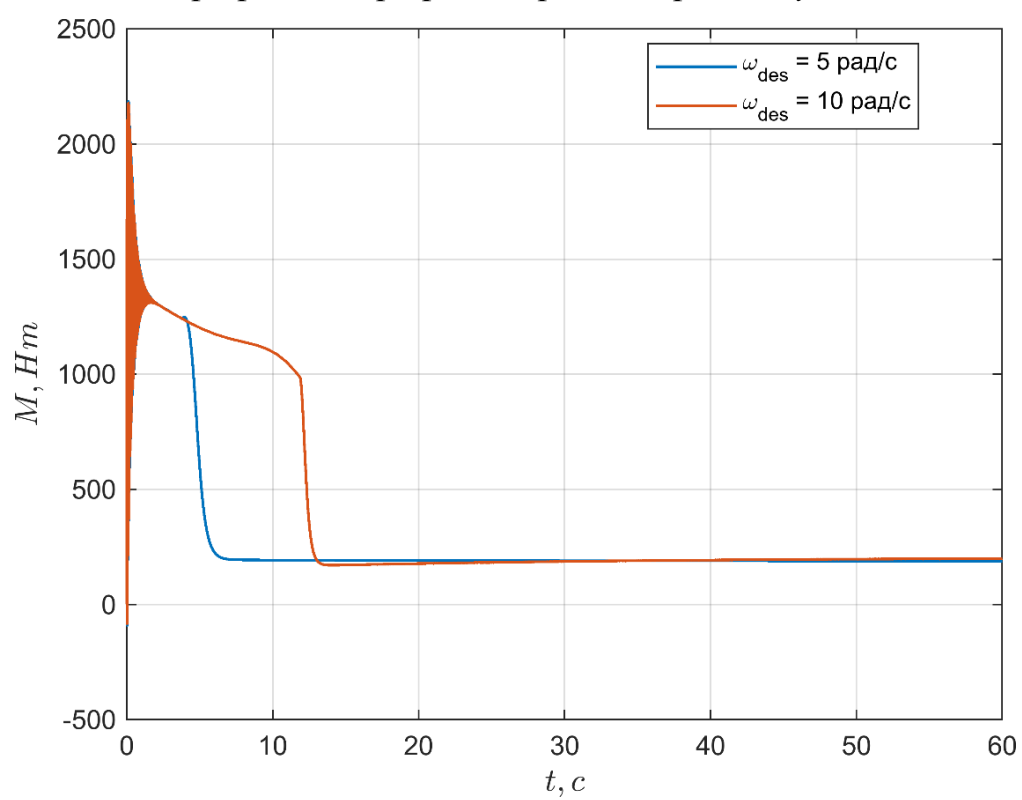


График 20. График момента

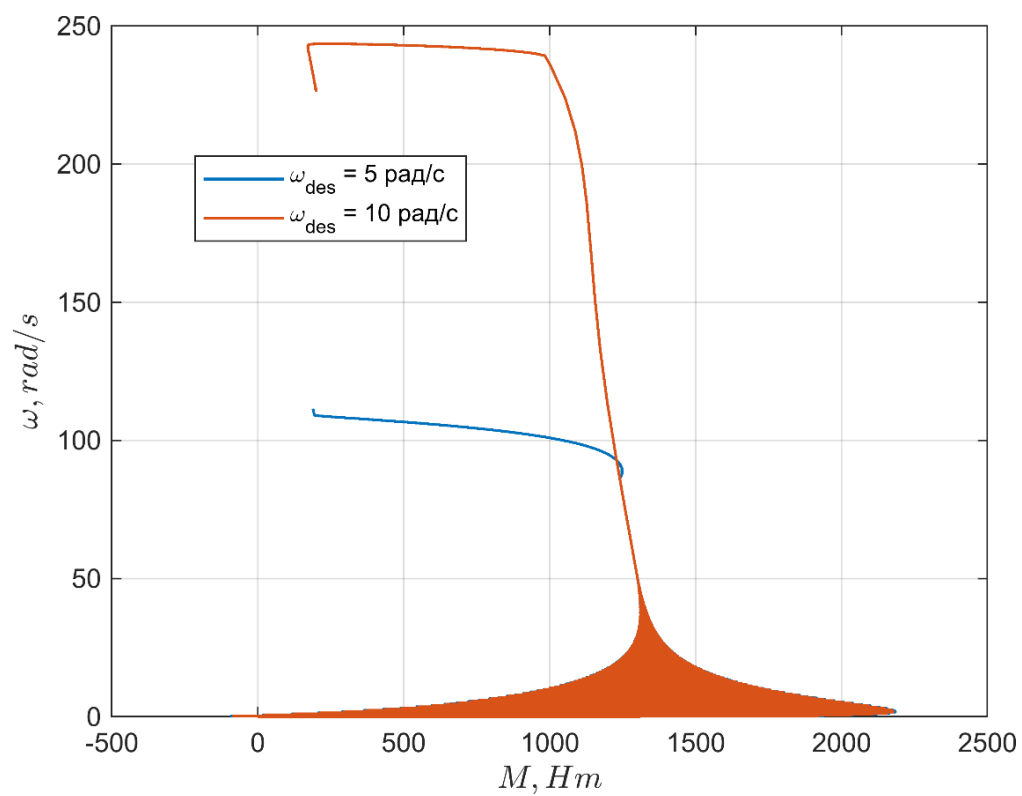


График 21. График фазовой характеристики