

ВВЕДЕНИЕ

Среди механизмов, приводимых в движение асинхронными двигателями, доля вентиляторов составляет 37,7%. Основное их число приходится на вентиляторы санитарно-технического назначения, осуществляющие кондиционирование воздуха в производственно-технических помещениях. Несмотря на относительно небольшую мощность этих вентиляторов (до 100 кВт), на их число приходится значительная суммарная потребляемая энергия. В связи с этим особое значение для вентиляторов имеет применение регулируемого электропривода, так как КПД электрифицированного механизма в этом случае в среднем на 12% выше, чем с нерегулируемым электроприводом.

Вентиляторы как производственные механизмы характеризуются длительным режимом работы с постоянной нагрузкой и с большой продолжительностью работы в течение года. Перегрузки электропривода технологически не возможны, желателен плавный пуск. Необходимый диапазон регулирования скорости для вентиляторов обычно не превышает 2:1.

Перечисленным требованиям наиболее полно соответствует частотно-регулируемый асинхронный электропривод вентилятора. При этом, как правило, можно ограничиться использованием простых и недорогих систем скалярного управления. В данной выпускной квалификационной работе исследован асинхронный электропривод со скалярным управлением вентилятора ВР 80- 75.

1 Технические характеристики вентилятора ВР 80- 75

Общий вид вентилятора приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид радиального вентилятора низкого давления ВР 80 -75

Рабочее колесо вентиляторов содержит 12 загнутых назад лопаток. Лопатки специальной нецилиндрической формы с разворачивающейся поверхностью выполнены с переменными по ширине колеса углами входа. Конический входной патрубок имеет тороидальный выходной участок, что обеспечивает равномерную нагрузку на лопатки по всей ширине и высокий максимальный КПД вентиляторов.

Изготавливаются восемь типоразмеров вентиляторов по схеме с непосредственным соединением с двигателем с номинальными диаметрами рабочих колес $D_n = 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250$ мм и девять типоразмеров вентиляторов по схеме с ременным приводом с номинальными диаметрами рабочих колес $D_n = 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250$ и 1600 мм. Благодаря такому многообразию исполнения аэродинамические характеристики вентиляторов заполняют достаточно равномерно и густо всю область режимов с производительностью от $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $100000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и полным давлением от 100 Па до 1800 Па. Рациональный выбор вентилятора с высоким КПД на любой заданный режим в этой области осуществляют практически без запаса, что дает возможность значительно снизить энергопотребление вентиляторной установкой, уменьшить габариты и массу.

Для комплектации вентиляторов применяются асинхронные трехфазные короткозамкнутые односкоростные двигатели общепромышленного применения серий 4А, АИР, и др., предназначенные для работы от сети переменного тока с частотой 50 Гц и напряжением 220/380 В. Климатическое исполнение двигателя подбирается по условиям заказа по климатическому исполнению вентилятора.

Вентиляторы, в отличие от других турбомеханизмов, всегда работают на сеть без противодавления, вследствие чего зависимость момента

статического сопротивления на валу приводного двигателя от скорости носит квадратичный характер, а подводимая к вентилятору мощность без учета потерь на трение в подшипниках пропорциональна кубу скорости. Вентиляторы имеют большой момент инерции, иногда на порядок и более превышающий момент инерции приводного двигателя, что затрудняет их пуск, а в некоторых случаях требует применения электрического торможения для быстрой остановки рабочего колеса.

Если в простейшем случае в приводе вентилятора используется торможение выбегом, то не требуется установка тормозных резисторов или других устройств для поглощения энергии вращающихся масс.

Область аэродинамических характеристик вентилятора ВР 80-75-6,3 приведена на рисунке 2. Кроме кривых полного давления, на аэродинамических характеристиках приведены линии постоянных значений установочной мощности N_y двигателей с учетом номинального ряда мощностей (штрих-пунктирные линии).

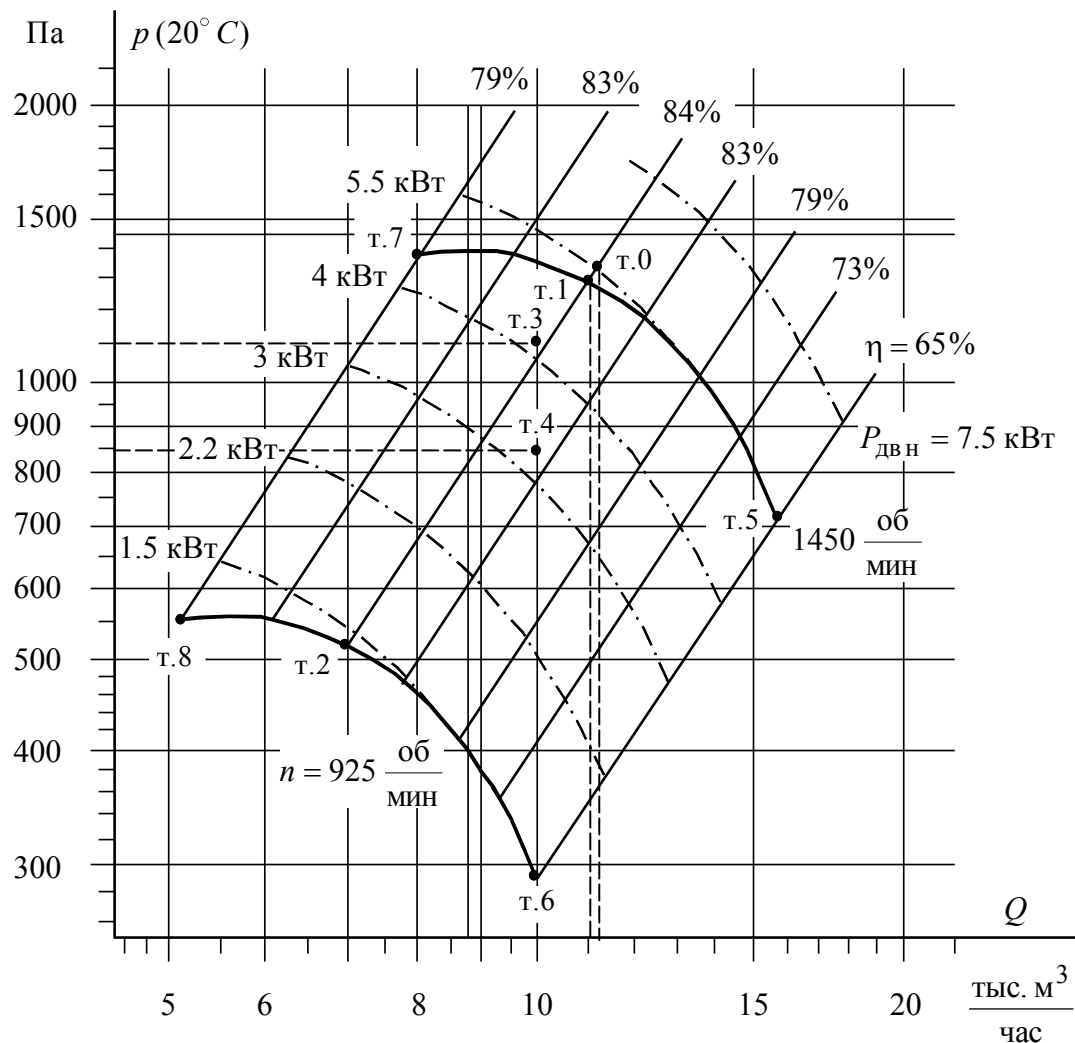


Рисунок 2 – Область аэродинамических характеристик вентилятора ВР 80-75-6,3

Аэродинамические характеристики вентилятора соответствуют нормальной плотности воздуха $\rho_n = 1,2 \text{ кг/м}^3$. Изменение температуры воздуха приводит к изменению его плотности, что не влияет на производительность вентилятора, но влияет на создаваемое вентилятором давление и потребляемую мощность, которые прямо пропорциональны плотности.

Производительность, создаваемое давление и КПД вентилятора для выбранной точки работы i определяются по аэродинамическим характеристикам. Полная и полезная мощность и полный и полезный момент на валу вентилятора, а также скорость вращения приводного двигателя определяются расчетным путем. Предварительно выбирается базовая точка, для которой известна, соответственно, мощность или скорость вращения приводного двигателя. Для расчета мощности может быть выбрана одна общая базовая точка, а для определения скорости вращения двигателя для каждой точки работы i , выбирается своя базовая точка, расположенная на линии постоянного значения КПД вентилятора, проходящей через точку i .

2 Расчет параметров вентилятора

Радиальный вентилятор ВР 80-75-6,3 имеет диаметр рабочего колеса $D_n = 630 \text{ мм}$ и скорость вращения колеса 1450 об/мин, что определяет непосредственное соединение с электродвигателем. Момент инерции вентилятора $J_{\text{вент}} = 0,16 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Характеристики вентилятора приведены для параметров воздуха при нормальных атмосферных условиях:

$p_n = 101320 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт. ст.}$ – барометрическое давление (760 мм рт.ст.);

$t_n = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура воздуха;

$\varphi_n = 50\%$ – относительная влажность.

Расчетные выражения имеют следующий вид:

$$N_{\text{вал}i} = N_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \cdot \frac{p_i}{p_{\text{баз}}} \cdot \frac{\eta_{\text{баз}}}{\eta_i}$$

– полная мощность на валу вентилятора, кВт;

$$N_{\text{пол}i} = N_{\text{вал}i} \cdot \eta_i$$

– полезная мощность на валу вентилятора, кВт;

$$\omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \frac{Q_i}{Q_{\text{баз}}} \quad \text{или} \quad \omega_i = \omega_{\text{баз}} \cdot \sqrt{\frac{p_i}{p_{\text{баз}}}}$$

– скорость вращения приводного двигателя в выбранной точке работы, рад/с;

$$M_{\text{вал}i} = N_{\text{вал}i} / \omega_i$$

– полный момент нагрузки на валу вентилятора, Н·м;

$$M_{\text{полн}} = N_{\text{полн}} / \omega_i$$

– полезный момент нагрузки на валу вентилятора, Н·м.

Вентилятор в зависимости от его прочностных качеств может работать в определенном диапазоне значений частоты вращения. Для вентиляторов с прямым приводом частота вращения колеса соответствует значению частоты вращения двигателя. Фактический режим работы вентилятора зависит также и от нагрузки вентилятора, которая определяется параметрами воздухопровода и режимом работы системы вентиляции. В любом случае система вентиляции должна быть спроектирована таким образом, чтобы работа вентилятора происходила в заданной области его оптимальных параметров. Режим работы вентилятора, соответствующий максимальному значению полного КПД, является номинальным. Выделим на аэродинамических характеристиках предельные точки для заданных в техническом задании режимов работы вентилятора (рисунок - 2).

Регулирование производительности вентилятора наиболее целесообразно осуществлять изменением его скорости вращения при максимальном значении КПД, что соответствует работе вентилятора на линии постоянного и равного номинальному значению КПД $\eta_n = 84 \%$. Этому режиму соответствуют следующие предельные точки, ограниченные допустимым диапазоном регулирования скорости вращения вентилятора.

3 Расчет мощности вентилятора в рабочих точках

Точка 1 – точка номинального режима работы вентилятора. Параметры т. 1 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_n = 11000 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad p_n = 1270 \text{ Па}, \quad \eta_n = 84 \%, \\ n_n = 1450 \text{ об/мин} \quad \text{или} \quad \omega_n = 151.84 \text{ рад/с}.$$

Параметры базовой точки т. 0 (общей для расчета мощности во всех точках работы вентилятора):

$$N_{\text{баз}} = 5.5 \text{ кВт}, \quad Q_{\text{баз}} = 11100 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad p_{\text{баз}} = 1310 \text{ Па}, \quad \eta_n = 84 \%.$$

Расчетные параметры т. 1 (полная и полезная мощность, полный и полезный момент на валу вентилятора):

$$N_{\text{вал.н}} = 5.5 \cdot \frac{11000}{11100} \cdot \frac{1270}{1310} \cdot \frac{0.84}{0.84} = 5.3 \text{ кВт}; \\ N_{\text{полн}} = 5.3 \cdot 0.84 = 4.45 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{вал.н}} = \frac{5.3 \cdot 1000}{151.84} = 34.9 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{полн}} = \frac{4.45 \cdot 1000}{151.84} = 29.3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 2 – точка работы вентилятора с номинальным КПД и минимальной скоростью вращения. Параметры т. 2 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{\text{т.2}} = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{\text{т.2}} = 510 \text{ Па}; \quad \eta_n = 84 \%;$$

$$n_{т.2} = 925 \text{ об/мин} \quad \text{или} \quad \omega_{т.2} = 96.86 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры т. 2:

$$N_{\text{вал т.2}} = 5.5 \cdot \frac{7000}{11100} \cdot \frac{510}{1310} \cdot \frac{0.84}{0.84} = 1.35 \text{ кВт};$$

$$N_{\text{пол т.2}} = 1.35 \cdot 0.84 = 1.134 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{вал т.2}} = \frac{1.35 \cdot 10^3}{96.86} = 13.94 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{пол т.2}} = \frac{1.134 \cdot 10^3}{96.86} = 11.71 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Поддержание заданной постоянной производительности вентилятора $Q = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ целесообразно осуществлять при минимальном значении давления $p = 875 \text{ Па}$. Этому режиму соответствуют следующие предельные точки, ограниченные заданным диапазоном изменения температуры воздуха на стороне всасывания.

Точка 3 – приведенная к нормальным атмосферным условиям точка работы с заданными параметрами $Q = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $p = 875 \text{ Па}$ и фактической температурой воздуха на стороне всасывания $t_{\text{факт}} = -40^\circ \text{С}$. Расчетное значение давления вентилятора с учетом температуры воздуха

$$p_{т.3} = p \cdot \frac{273 + t_{\text{н}}}{273 + t_{\text{факт}}} = 875 \cdot \frac{273 + 20}{273 - 40} = 1100.32 \text{ Па}.$$

Параметры т. 3 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{т.3} = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{т.3} = 1100 \text{ Па}; \quad \eta_{т.3} = 83.9\%.$$

Параметры базовой точки для расчета скорости вращения в т. 3:

$$\eta_{\text{баз}} = 83.9\%; \quad \omega_{\text{баз}} = 151.84 \text{ рад/с}; \quad Q_{\text{баз}} = 10900 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{\text{баз}} = 1300 \text{ Па}.$$

Расчетные параметры т. 3:

$$N_{\text{вал т.3}} = 5.5 \cdot \frac{10000}{11100} \cdot \frac{1100}{1310} \cdot \frac{0.84}{0.839} = 4.2 \text{ кВт};$$

$$\omega_{т.2} = 151.84 \cdot \frac{10000}{10900} = 139.3 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$M_{\text{вал т.3}} = \frac{4.2 \cdot 10^3}{139.3} = 30.15 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 4 – приведенная к нормальным атмосферным условиям точка работы с заданными параметрами $Q = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$, $p = 875 \text{ Па}$ и фактической температурой воздуха на стороне всасывания $t_{\text{факт}} = +30^\circ \text{С}$. Расчетное значение давления вентилятора с учетом температуры воздуха

$$p_{т.4} = 875 \cdot \frac{273 + 20}{273 + 30} = 846.12 \text{ Па}.$$

Параметры т. 4 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{т.4} = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{т.4} = 846 \text{ Па}; \quad \eta_{т.4} = 83.3 \text{ \%}.$$

Параметры базовой точки для расчета скорости вращения в т.4:

$$\eta_{баз} = 83.3 \text{ \%}; \quad \omega_{баз} = 151.84 \text{ рад/с}; \quad Q_{баз} = 11900 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{баз} = 1200 \text{ Па}.$$

Расчетные параметры т. 4:

$$N_{вал т.4} = 5.5 \cdot \frac{10000}{11100} \cdot \frac{846}{1310} \cdot \frac{0.84}{0.833} = 3.22 \text{ кВт};$$

$$\omega_{т.4} = 151.84 \cdot \frac{10000}{11900} = 127.6 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$M_{вал т.4} = \frac{3.22 \cdot 10^3}{127.6} = 25.23 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Скорость вращения вентилятора регулируется электроприводом, нагрузка же вентилятора в общем случае определяется значениями параметров Q и p конкретного технологического процесса, которые могут изменяться в пределах всей области аэродинамических характеристик вентилятора. Наибольшая нагрузка двигателя будет иметь место при работе вентилятора в точках на линии минимального значения КПД при наибольшей производительности (точки т. 5 – т. 7), наименьшая – при работе с наименьшей производительностью (точки т. 6 – т. 7). Определим параметры граничных точек области аэродинамических характеристик вентилятора ВР 80-75-6,3 и оценим степень изменения нагрузки электродвигателя при изменении параметров вентилятора в допустимых пределах.

Точка 5. Параметры т. 5 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{т.5} = 15800 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{т.5} = 710 \text{ Па}; \quad \eta_{т.5} = 65 \text{ \%}; \quad N_{вал т.5} = 5.5 \text{ кВт};$$

$$n_H = 1450 \text{ об/мин} \quad \text{или} \quad \omega_H = 151.84 \text{ рад/с}.$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора при работе в т. 5

$$N_{полт.5} = 5.5 \cdot 0.65 = 3.575 \text{ кВт};$$

$$M_{вал т.5} = \frac{5.5 \cdot 10^3}{151.84} = 36.2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{пол т.5} = \frac{3.575 \cdot 10^3}{151.84} = 23.54 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 6. Параметры т. 6 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{т.6} = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{т.6} = 290 \text{ Па}; \quad \eta_{т.6} = 65 \text{ \%}; \quad N_{вал т.6} = 1.5 \text{ кВт};$$

$$n_{т.6} = 925 \text{ об/мин} \quad \text{или} \quad \omega_{т.6} = 96.86 \text{ рад/с}.$$

Полный момент нагрузки на валу вентилятора при работе в т. 6

$$M_{\text{вал т.6}} = \frac{1.5 \cdot 10^3}{96.86} = 15.48 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 7. Параметры т. 7 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{\text{т.7}} = 7960 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{\text{т.7}} = 1360 \text{ Па}; \quad \eta_{\text{т.7}} = 79\%; \\ n_{\text{н}} = 1450 \text{ об/мин} \quad \text{или} \quad \omega_{\text{н}} = 151.84 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры в т. 7:

$$N_{\text{вал т.7}} = 5.5 \cdot \frac{7960}{11100} \cdot \frac{1360}{1310} \cdot \frac{0.84}{0.79} = 4.35 \text{ кВт};$$

$$N_{\text{полт.7}} = 4.35 \cdot 0.79 = 3.47 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{вал т.7}} = \frac{4.35 \cdot 10^3}{151.84} = 28.67 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{полт.7}} = \frac{3.47 \cdot 10^3}{151.84} = 22.63 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Точка 8. Параметры т. 8 в соответствии с аэродинамическими характеристиками вентилятора:

$$Q_{\text{т.8}} = 5050 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad p_{\text{т.8}} = 550 \text{ Па}; \quad \eta_{\text{т.8}} = 79\%; \\ n_{\text{т.8}} = 925 \text{ об/мин} \quad \text{или} \quad \omega_{\text{н}} = 96.86 \text{ рад/с}.$$

Расчетные параметры в т. 8:

$$N_{\text{вал т.8}} = 5.5 \cdot \frac{5050}{11100} \cdot \frac{550}{1310} \cdot \frac{0.84}{0.79} = 1.12 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{вал т.8}} = \frac{1.12 \cdot 10^3}{96.86} = 11.53 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4 Выбор приводного электродвигателя

Номинальная мощность приводного двигателя должна быть равна или несколько больше мощности на валу вентилятора во всех его возможных технологических режимах работы. В режиме регулирования производительности вентилятор потребляет наибольшую мощность при работе в т.1, где $N_{\text{вал т.1}} = 5,3 \text{ кВт}$, а в режиме поддержания производительности в т.3 при отрицательной температуре воздуха, где $N_{\text{вал т.3}} = 4,2 \text{ кВт}$.

Согласно [3] при синхронной скорости 1500 об/мин ближайшим большим по мощности является электродвигатель АИР112М4, номинальная мощность которого равна 5,5 кВт.

Паспортные данные электродвигателя АИР112М4:

$P_{\text{н}} = 5,5 \text{ кВт}$ – номинальная мощность двигателя;

$U_{\text{лн}} = 380 \text{ В}$ – номинальное линейное напряжение;

$U_{\text{1ф}} = 220 \text{ В}$ – фазное напряжение;

$n_0=1500$ об/мин – синхронная частота вращения;

$s_H=4,5\%$ – номинальное скольжение двигателя;

$\eta_H=0,855$ – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos\varphi_H=0,86$ – коэффициент мощности;

$k_i = \frac{I_{\Pi}}{I_H} = 7$ о.е. – кратность пускового тока;

$k_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 2$ о.е. – кратность пускового момента;

$k_{\max} = \frac{M_K}{M_H} = 2,5$ о.е. – кратность максимального момента;

$J_{дв}=0,017$ кг·м² – динамический момент инерции.

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальная частота вращения двигателя:

$$n_{\text{дв.ном}} = (1 - s_H) \cdot n_0 = (1 - 0,045) \cdot 1500 = 1433 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

или

$$\omega_{\text{дв.ном}} = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,045) \cdot 157 = 149,935 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{дв.ном}} = \frac{P_{\text{дв.ном}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.ном}}} = \frac{5500}{149,935} = 36,683 \text{ Нм}.$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H) \right)^2}{1 - \left(p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H) \right)^2}} =$$
$$= \sqrt{\frac{8,673^2 - \left(0,75 \cdot 11,333 \cdot (1 - 0,045) / (1 - 0,75 \cdot 0,045) \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot (1 - 0,045) / (1 - 0,75 \cdot 0,045) \right)^2}} = 3,213 \text{ А},$$

где $I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{5500}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,855} = 11,333 \text{ А}$ – номинальный ток статора двигателя;

$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos\varphi_{p*} \cdot \eta_{p*}} = \frac{0,75 \cdot 5500}{3 \cdot 220 \cdot 0,843 \cdot 0,855} = 8,673 \text{ А}$ – ток статора двигателя при частичной нагрузке;

$\eta_{p*} = \eta_H = 0,855$ – КПД при частичной нагрузке;

$\cos\varphi_{p*} = 0,98 \cdot \cos\varphi_H = 0,98 \cdot 0,86 = 0,843$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_n = 0,75$ – коэффициент загрузки двигателя;

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем $\beta=1$ (коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора):

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} =$$

$$= 0,045 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - (1 - 2 \cdot 0,045 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,045 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)} = 0,251 \text{ о.е.}$$

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{3,213}{2 \cdot 7 \cdot 11,333} = 1,02;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,045)}{2 \cdot 1,02 \cdot 2,5 \cdot 5500} = 4,942.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{4,942}{\left(1 + \frac{1}{0,251}\right) \cdot 1,02} = 0,971 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 1,02 \cdot 0,971 \cdot 1 = 0,991 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{0,251^2} - 1^2} = 3,86.$$

Тогда сопротивление короткого замыкания:

$$X_{KH} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 3,86 \cdot 1,02 \cdot 0,971 = 3,825 \text{ Ом.}$$

Для того, чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания сопротивления рассеяния фаз статора и ротора, воспользуемся соотношениями, которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_{KH}}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 3,825}{1,02} = 2,175 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{KH} = 0,42 \cdot 3,825 = 1,607 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_m = \sqrt{(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_H - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1\phi} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - X_{1H} \cdot I_{1H})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,86 - 0,991 \cdot 11,333)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,86^2} - 1,607 \cdot 11,333)^2} = 201,296 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как:

$$X_{\mu n} = \frac{E_m}{I_0} = \frac{201,296}{3,213} = 62,646 \text{ Ом.}$$

По найденным значениям C_1 , R'_2 и $X_{\text{кн}}$ определим критическое скольжение:

$$s_{\text{кл}} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,02 \cdot 0,971}{\sqrt{0,991^2 + 3,825^2}} = 0,251.$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{1,607}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 5,114 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенной к статорной:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{2,175}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 6,922 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu n} = \frac{X_{\mu n}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{62,646}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,199 \text{ Гн.}$$

Т-образная схема замещения асинхронного двигателя для одной фазы приведена на рисунке 3.

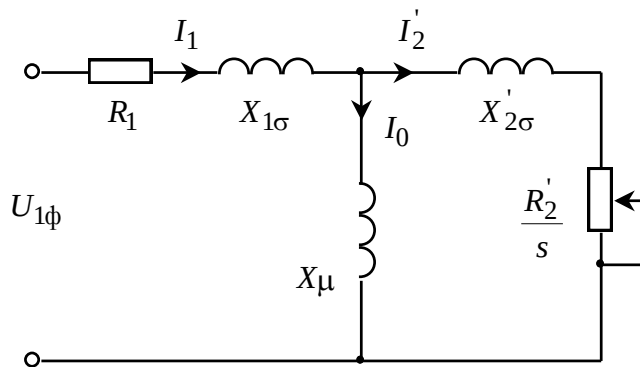


Рисунок 3 – Схема замещения асинхронного двигателя

Параметры схемы замещения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1, \text{Ом}$	$X_{1\sigma}, \text{Ом}$	$L_{1\sigma}, \text{Гн}$	$X_{\mu}, \text{Ом}$	$L_{\mu}, \text{Гн}$	$R'_2, \text{Ом}$	$X'_{2\sigma}, \text{Ом}$	$L'_{2\sigma}, \text{Гн}$	$X_{\text{кн}}, \text{Ом}$
0,991	1,607	$5,114 \cdot 10^{-3}$	62,65	0,199	0,971	2,175	$6,922 \cdot 10^{-3}$	3,825

5 Расчет естественных характеристик двигателя

Для построения естественной механической характеристики двигателя определим критический момент машины в двигательном режиме:

$$M_{\text{к}} = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot C_1 \cdot \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2} \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot 1,02 \cdot \left[0,991 + \sqrt{0,991^2 + 3,825^2} \right]} = 91,66 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задаваясь диапазоном скольжения от 1 до 0, строим механическую характеристику асинхронного двигателя по формуле Клосса:

$$M(s) = \frac{2 \cdot M_K \cdot (1 + a \cdot s_K)}{\frac{s_K}{s} + \frac{s}{s_K} + 2 \cdot a \cdot s_K},$$

где $a = \frac{R_1}{R'_2} = \frac{0,991}{0,971} = 1,02$.

Значения по оси скорости рассчитываются по выражению:

$$\omega(s) = \omega_0 \cdot (1 - s).$$

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя представлена на рисунке 4.

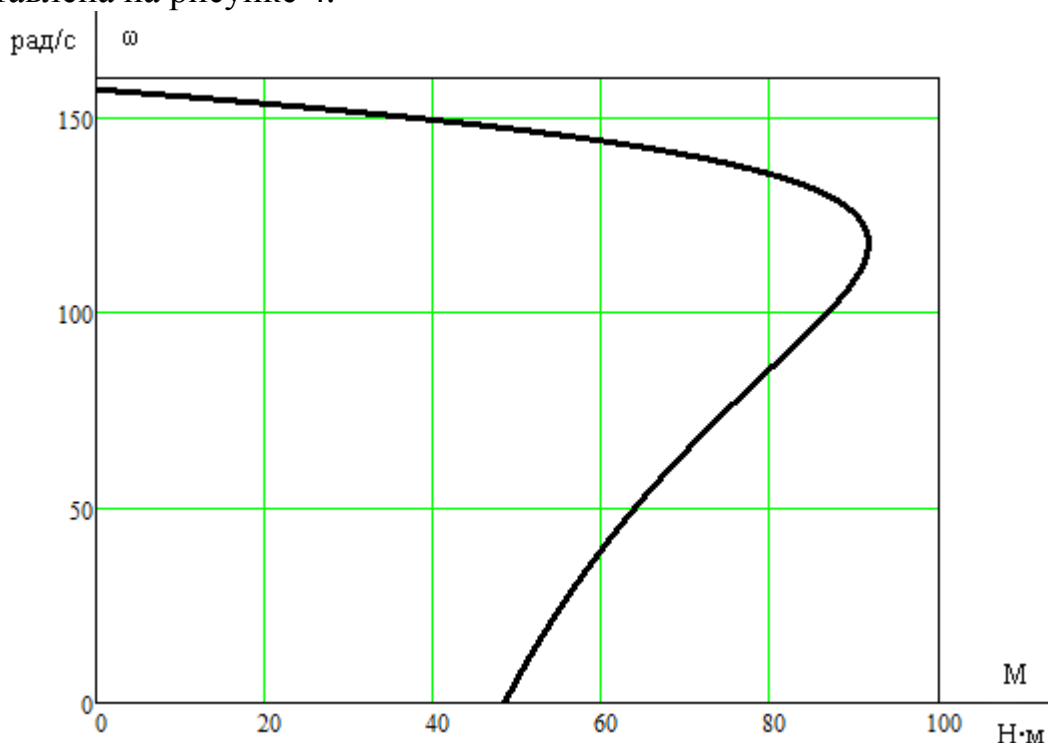


Рисунок 4 – Естественная механическая характеристика двигателя

Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость тока статора от скорости. Полагая ток намагничивания I_0 реактивным ($I_{0A}=0$), ток статора I_1 через приведенный ток ротора можно найти по формуле:

$$I_1(\omega) = \sqrt{I_0^2 + (I'_2(\omega))^2 + 2 \cdot I_0 \cdot I'_2(\omega) \cdot \sin \varphi_2(\omega)},$$

где

$$I_2'(\omega) = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}\right)^2 + X_{KH}^2}};$$

$$\sin \varphi_2(\omega) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}}\right)^2 + X_{KH}^2}}.$$

Задаваясь диапазоном изменения скорости от 0 до ω_0 , строим электромеханическую характеристику асинхронного двигателя по формулам для токов обмоток статора и ротора.

Естественные электромеханические характеристики двигателя приведена на рисунке 5.

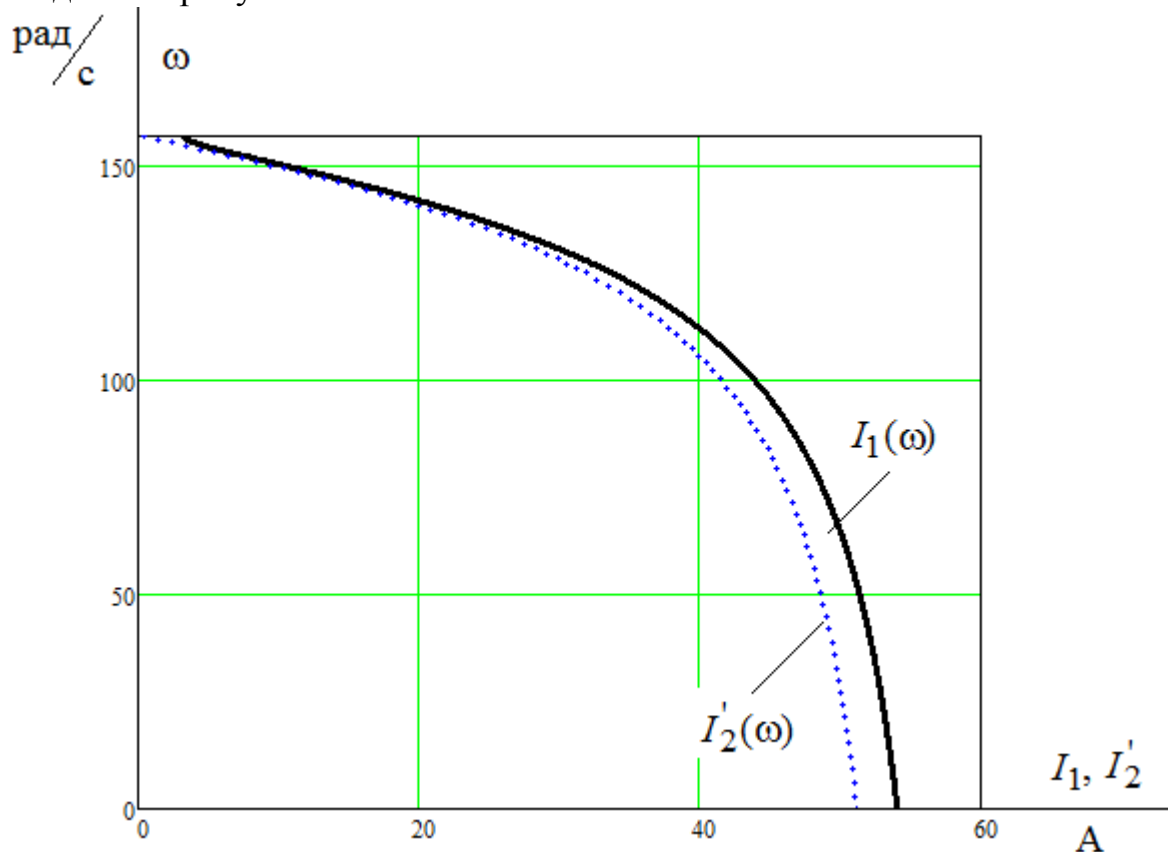


Рисунок 5 – Естественные электромеханические характеристики двигателя

6 Расчёт и построение механических характеристик вентилятора

Номинальный режим работы вентилятора соответствует максимальному значению полного КПД и характеризуется следующими параметрами (рисунок 2, т.1):

- номинальный КПД $\eta_n = 84\%$;
- номинальная скорость вращения $n_n = 1433$ об/мин или $\omega_n = 149,935$ рад/с;
- номинальная производительность $Q_n = 11000$ м³/ч;
- номинальное давление $p_n = 1270$ Па.

Выражение для механической характеристики вентилятора при работе с постоянным значением КПД η_i имеет следующий вид

$$M_{с\text{ вент } i}(\omega) = a_i \cdot M_{пол\ i} + (1 + b_i) \cdot M_{пол\ i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x,$$

где a_i и b_i – коэффициенты постоянных и переменных потерь вентилятора в режиме работы с постоянным значением η_i ;

$$a_i \cdot M_{полн\ i} = \Delta M_{пост} = \text{const}$$

- момент постоянных потерь на валу вентилятора.

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с номинальным КПД $\eta_n = 0.84$ (точки т. 1 – т. 2)

Из условия равенства постоянных и переменных потерь вентилятора в номинальном режиме работы (т. 1) определим значения коэффициентов потерь при работе вентилятора с $\eta_n = 0.84$ (точки работы т.1 – т.2) [6]

$$a_n = b_n = \frac{1 - \eta_n}{2 \cdot \eta_n} = \frac{1 - 0.84}{2 \cdot 0.84} = 0.095.$$

Тогда момент постоянных потерь на валу вентилятора

$$\Delta M_{пост} = a_n \cdot M_{полн} = 0.095 \cdot 29.3 = 2.78 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Из условия

$$M_{вал\ т.2} = \Delta M_{пост} + (1 + b_n) \cdot M_{полн} \cdot \left(\frac{\omega_{т.2}}{\omega_n} \right)^x$$

после подстановки численных значений

$$13.94 = 2.78 + (1 + 0.95) \cdot 29.3 \cdot \left(\frac{96.86}{149,935} \right)^x$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с номинальным значением КПД $\eta_n = 0.84$ $x = 2.35$.

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с номинальным значением КПД $\eta_n = 0.84$

$$M_{с\text{ вент}}(\omega) = 2.78 + (1 + 0.095) \cdot 29.3 \cdot \left(\frac{\omega}{149,935} \right)^{2.35}. \quad (1)$$

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с максимальной производительностью и $\eta = 0.65$ (точки т. 5 – т. 6).

Значение коэффициента постоянных потерь

$$a_{т.5} = \frac{\Delta M_{\text{пост}}}{M_{\text{пол т.5}}} = \frac{2.78}{23.54} = 0.118.$$

Значение коэффициента переменных потерь

$$b_{т.5} = \frac{1 - \eta_{т.5}}{\eta_{т.5}} - a_{т.5} = \frac{1 - 0.65}{0.65} - 0.118 = 0.42.$$

Из условия

$$M_{\text{вал т.6}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_{т.5}) \cdot M_{\text{пол т.5}} \cdot \left(\frac{\omega_{т.6}}{\omega_{т.5}} \right)^x$$

после подстановки численных значений

$$15.48 = 2.78 + (1 + 0.42) \cdot 23.54 \cdot \left(\frac{96.86}{149,935} \right)^x$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с постоянным значением КПД $\eta = 0.65$ $x = 2.15$.

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с постоянным значением КПД $\eta = 0.65$

$$M_{с\text{ вент}}(\omega) = 2.78 + (1 + 0.42) \cdot 23.54 \cdot \left(\frac{\omega}{149,935} \right)^{2.15}. \quad (2)$$

Механическая характеристика вентилятора в режиме работы с максимальным давлением и $\eta = 0.79$ (точки т. 7 – т. 8)

Значение коэффициента постоянных потерь

$$a_{т.7} = \frac{\Delta M_{\text{пост}}}{M_{\text{пол т.7}}} = \frac{2.78}{22.63} = 0.123.$$

Значение коэффициента переменных потерь

$$b_{т.7} = \frac{1 - \eta_{т.7}}{\eta_{т.7}} - a_{т.7} = \frac{1 - 0.79}{0.79} - 0.123 = 0.143.$$

Из условия

$$M_{\text{вал т.8}} = \Delta M_{\text{пост}} + (1 + b_{\text{т.7}}) \cdot M_{\text{полт.7}} \cdot \left(\frac{\omega_{\text{т.8}}}{\omega_{\text{т.7}}} \right)^x$$

после подстановки численных значений

$$11.53 = 2.78 + (1 + 0.143) \cdot 22.63 \cdot \left(\frac{96.86}{149.935} \right)^x$$

и решения уравнения относительно x определим значение показателя степени механической характеристики вентилятора при регулировании производительности с постоянным значением КПД $\eta = 0.79$ $x = 2.41$.

В результате получаем общее выражение для механической характеристики вентилятора в режиме регулирования производительности с постоянным значением КПД $\eta = 0.79$

$$M_{\text{с вент}}(\omega) = 2.78 + (1 + 0.143) \cdot 22.63 \cdot \left(\frac{\omega}{149.935} \right)^{2.41}. \quad (3)$$

Механические характеристики вентилятора, рассчитанные по выражениям (1) – (3) приведены на рисунке 6.

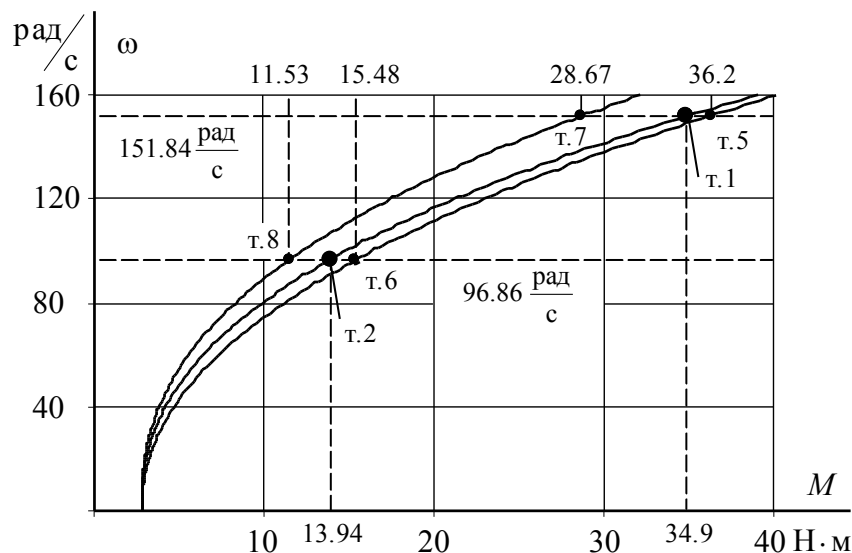


Рисунок 6 – Механические характеристики вентилятора $M_{\text{с вент}} = f(\omega)$

В интервале рабочих скоростей вентилятора выделена область изменения момента сопротивления на валу вентилятора, соответствующая границам заданной области его аэродинамических характеристик (точки т. 1 – т. 5 – т. 6 – т. 2 – т. 8 – т. 7). Из анализа механических характеристик вентилятора делаем вывод, что изменение режима работы вентилятора в пределах заданной области его аэродинамических характеристик не приводит к существенному изменению нагрузки двигателя.

Эквивалентный момент инерции электропривода

$$J_{\text{э}} = 1,1 \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{вент}} = 1,1 \cdot 0,017 + 0,16 = 0,179 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

7 Расчет механической характеристики полной нагрузки на валу двигателя

Полная нагрузка на валу электродвигателя должна учитывать собственный момент трения двигателя. Момент от сил трения на валу электродвигателя можно принять постоянным и равным

$$M_{сдв} = M_{эмн} - M_{двн} = 38,049 - 36,683 = 1,367 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где номинальный электромагнитный момент двигателя равен

$$\begin{aligned} M_{эм.н} &= \frac{3 \cdot U_{1фн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_n \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,971}{157 \cdot 0,045 \cdot \left[3,825^2 + \left(0,991 + \frac{0,971}{0,045} \right)^2 + \left(\frac{0,991 \cdot 0,971}{0,045 \cdot 62,646} \right)^2 \right]} = 38,049 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Тогда выражение для механической характеристики полного момента сопротивления на валу электродвигателя в общем случае имеет вид

$$M_{ci}(\omega) = \Delta M_c + (1 + b_i) \cdot M_{пол i} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{x_i},$$

где $\Delta M_c = M_{сдв} + \Delta M_{пост} = 1,367 + 2,78 = 4,147 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – момент сопротивления от сил трения, приведенный к валу двигателя.

Далее все расчеты будем вести только для одной механической характеристики вентилятора, соответствующей режиму регулирования производительности с номинальным значением КПД $\eta_n = 0.84$ (рисунок 2, точки т. 1 – т. 2)

$$M_c(\omega) = 4,147 + (1 + 0,095) \cdot 29,3 \cdot \left(\frac{\omega}{149,935} \right)^{2.35}.$$

8 Выбор преобразователя частоты

В соответствии с рекомендациями [7] для регулируемого асинхронного электропривода вентилятора целесообразно использовать преобразователи серии VLT 2800 фирмы *Danfoss*.

В соответствии с условием $I_{ин} \geq I_{лн} = 11,333 \text{ А}$

выбираем преобразователь частоты модели VLT 2855, параметры которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры преобразователя частоты

Модель	Число фаз на входе	U_n , В	$I_{ин}$, А	$I_{и макс}$, А	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
2855	3	380 ÷ 480	12	19.2	5.5

Общие технические данные преобразователя частоты серии VLT2800:

- несущая частота 3000–14000 Гц;
- частотный диапазон 0.2–132 Гц;
- разрешение по выходной частоте 0.013 Гц;
- питающая сеть: 380–480В±10%; 48–62 Гц, 3 фазы;
- коэффициент мощности 0,9/1 при номинальной нагрузке;
- перегрузка по току: 160% в течение 1 минуты и 180% в течение 0.5 с;
- диапазон регулирования в разомкнутой системе 1:10.

Защиты:

- электронная тепловая защита двигателя от перегрузки;
- температурный контроль радиатора;
- защита преобразователя от короткого замыкания на клеммах двигателя;
- защита от потери фазы отключением преобразователя;
- постоянный контроль напряжения промежуточной цепи постоянного тока;
- защита от неисправности заземления на клеммах двигателя.

Параметры внешней среды на высоте до 1000 м над уровнем моря:

- максимальная относительная влажность 5% – 93%;
- максимальная температура 45 °С,
- максимальная средняя температура за 24 часа 40 °С;
- минимальная температура при работе с максимальной производительностью 0 °С.

Степень защиты корпуса преобразователя IP 20.

7 Выбор закона регулирования

С учетом того, что диапазон регулирования скорости вентиляторов невелик и механизмы такого класса не требуют обеспечения высокой кратности пускового и максимального моментов, в качестве законов регулирования U_1/f_1 могут быть приняты законы $U_1/f_1 = \text{const}$ и $U_1/f_1^2 = \text{const}$. Последний является более сложным в реализации, но за счет дополнительного снижения напряжения позволяет уменьшить потребляемую из сети энергию. Для повышения пускового момента на малых скоростях до требуемых значений должна быть предусмотрена возможность настройки вольт-частотной характеристики. Определяя параметры вольт-частотной характеристики, нижним частотам ставят в соответствие значения напряжений выше, чем при выбранном законе регулирования.

8 Определение интервала частот инвертора

Максимальную частоту инвертора, соответствующую номинальному режиму работы вентилятора (т.1 на рисунке - 2), определяем из условия обеспечения номинальной рабочей скорости вентилятора $\omega_n = 151.84$ рад/с путем совместного решения уравнений для механических характеристик двигателя и нагрузки (4) относительно частоты f_1

$$\frac{3 \cdot [U_1(f_1)]^2 \cdot R_2'}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} - \omega \right) \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} - \omega} \cdot \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 \right]} =$$
$$= \Delta M_c + (1 + b_n) \cdot M_{пол.н} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^{2.35},$$

Принимаем ближайшее целое значение частоты инвертора

$$f_{и макс} = f_{1н} = 50 \text{ Гц}.$$

Минимальную рабочую частоту инвертора определяем, решая уравнение (5) при условии обеспечения минимальной рабочей скорости вентилятора $\omega_{р.мин} = \omega_{т.2} = 96.86$ рад/с. Принимаем целое значение минимальной рабочей частоты инвертора

$$f_{р.мин} = 33 \text{ Гц}.$$

Для обеспечения пусковой характеристики принимаем минимальную частоту инвертора

$$f_{и мин} = 5 \text{ Гц}.$$

9 Механические характеристики системы преобразователь-двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Механические характеристики $\omega(M)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ для ряда выбранных значений выходной частоты инвертора в интервале от 5 до 50 Гц рассчитываются по выражениям:

$$M(s, f_1) = \frac{3 \cdot U_1^2(f_1) \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot s \cdot \left[\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right]};$$

где

$$U_1(f_1) = U_{1\Phi H} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 = 220 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2; \quad \omega(s, f_1) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1-s).$$

По результатам расчета на рисунке 7 построено семейство механических характеристик $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при изменении частоты.

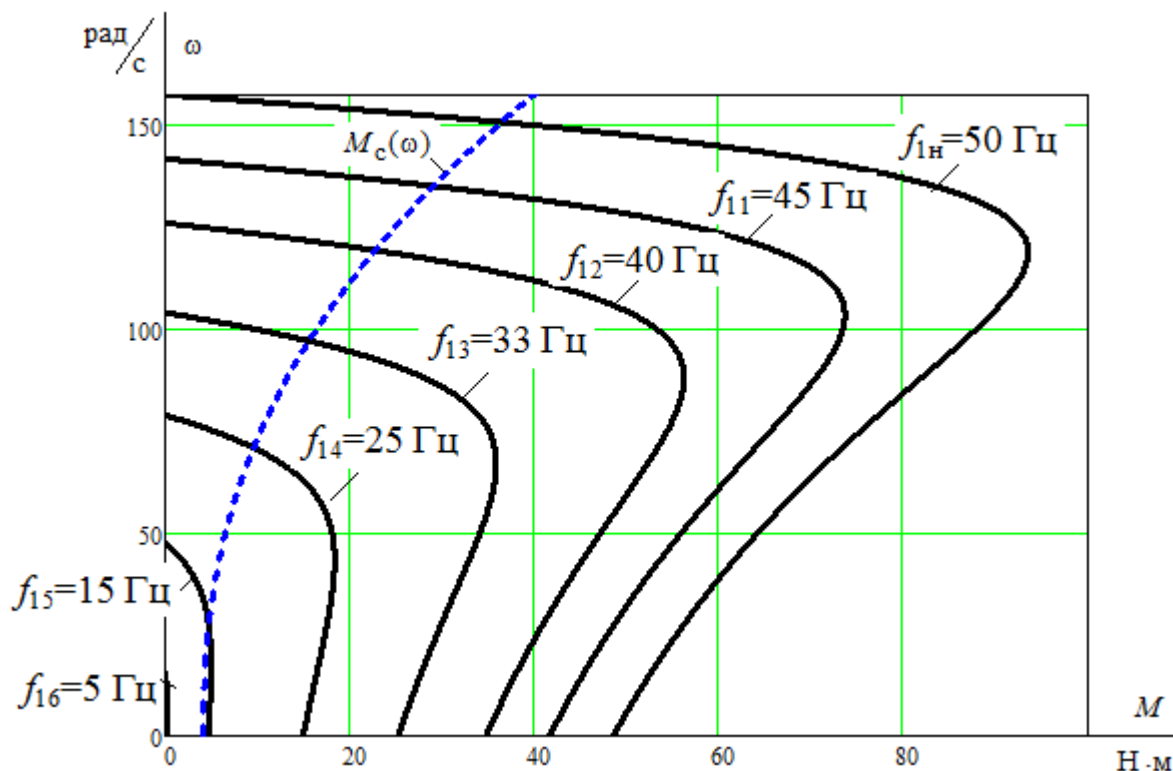


Рисунок 7 – Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$:

Анализ приведенных на рисунке 8 механических характеристик электропривода и нагрузки показывает, что при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ не удастся обеспечить пуск электропривода при выборе начальной частоты инвертора $f_{и.мин} = 5 \text{ Гц}$.

С целью обеспечения двукратного пускового момента экспериментально выполнен подбор параметров начального участка вольт-частотной характеристики преобразователя. Окончательно выбраны для начального участка характеристики следующие параметры (рисунок 8): $U_{1мин} = 10 \text{ В}$, $f_{и.мин} = 3 \text{ Гц}$.

В результате вольт - частотная характеристика представлена зависимостью:

$$U_1(f_1) = U_{1мин} + (U_{1фн} - U_{1мин}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 = 10 + (220 - 10) \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2.$$

Механические характеристики системы преобразователь – двигатель с учетом выбранной настройки вольт-частотной характеристики приведены на рисунке 8.

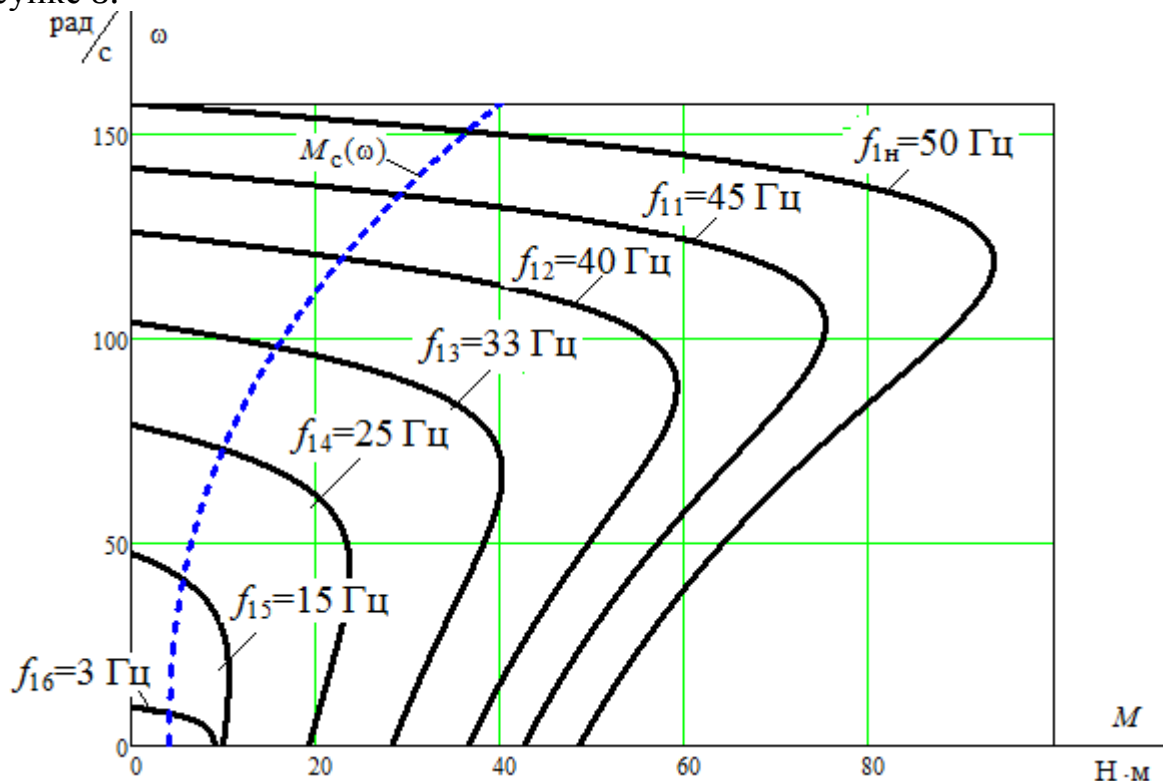


Рисунок 8 – Механические характеристики $\omega(M)$ системы преобразователь – двигатель при настройке вольт - частотной характеристики

Электромеханические характеристики $\omega(I_1)$ разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель после настройки вольт-частотной характеристики преобразователя рассчитываются для выбранных ранее значений частоты по выражениям:

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \varphi_2(s, f_1)};$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}};$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}};$$

$$\sin \varphi_2(s, f_1) = \frac{X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}},$$

где:

$$U_1(f_1) = U_{1\min} + (U_{1\phi H} - U_{1\min}) \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 = 10 + (220 - 10) \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2,$$

$$\omega(s, f_1) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s).$$

По результатам расчета на рисунке 9 построено семейство электромеханических характеристик $\omega(I_1)$ системы преобразователь-двигатель.

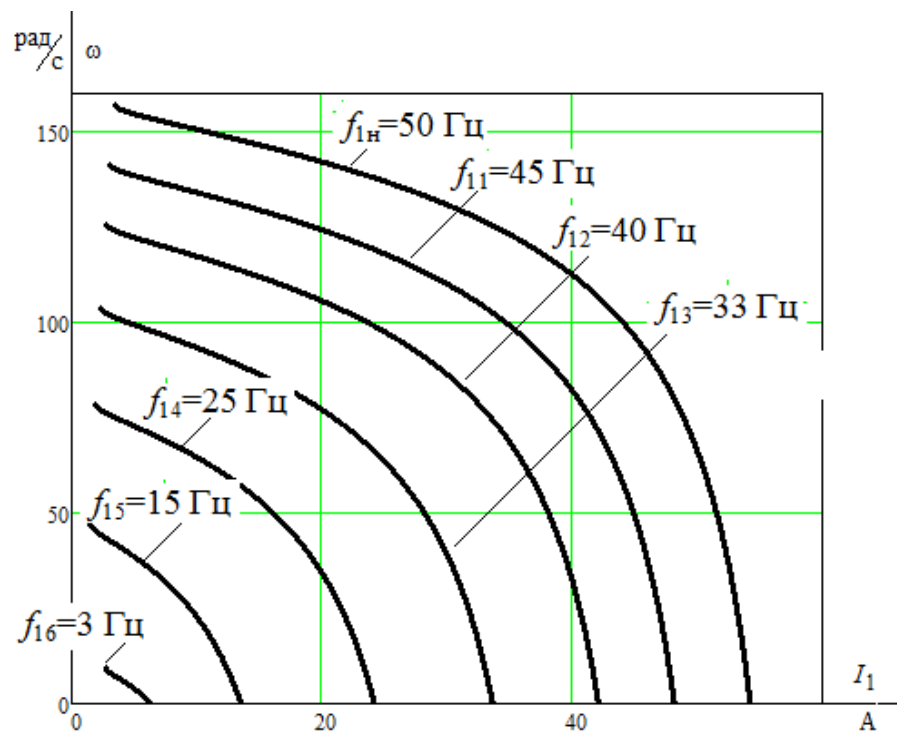


Рисунок 9 – Электромеханические характеристики электропривода $\omega(I_1)$ при скалярном управлении после настройки вольт-частотной характеристики

10 Структурная схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и вентиляторной нагрузкой

Для решения вопросов проектирования асинхронного электропривода вентилятора и последующего его исследования выбрана структурная схема эквивалентного двухфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат. Структурная схема АД с короткозамкнутым ротором в неподвижной системе координат α, β и вентиляторной нагрузкой приведена на рисунке 10. Входными величинами на структурной схеме на рисунке 10 являются напряжения переменного тока – фазные напряжения статорных обмоток двухфазного АД:

$$U_{1\alpha}(t) = U_{1m} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t); \quad U_{1\beta}(t) = U_{1m} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t).$$

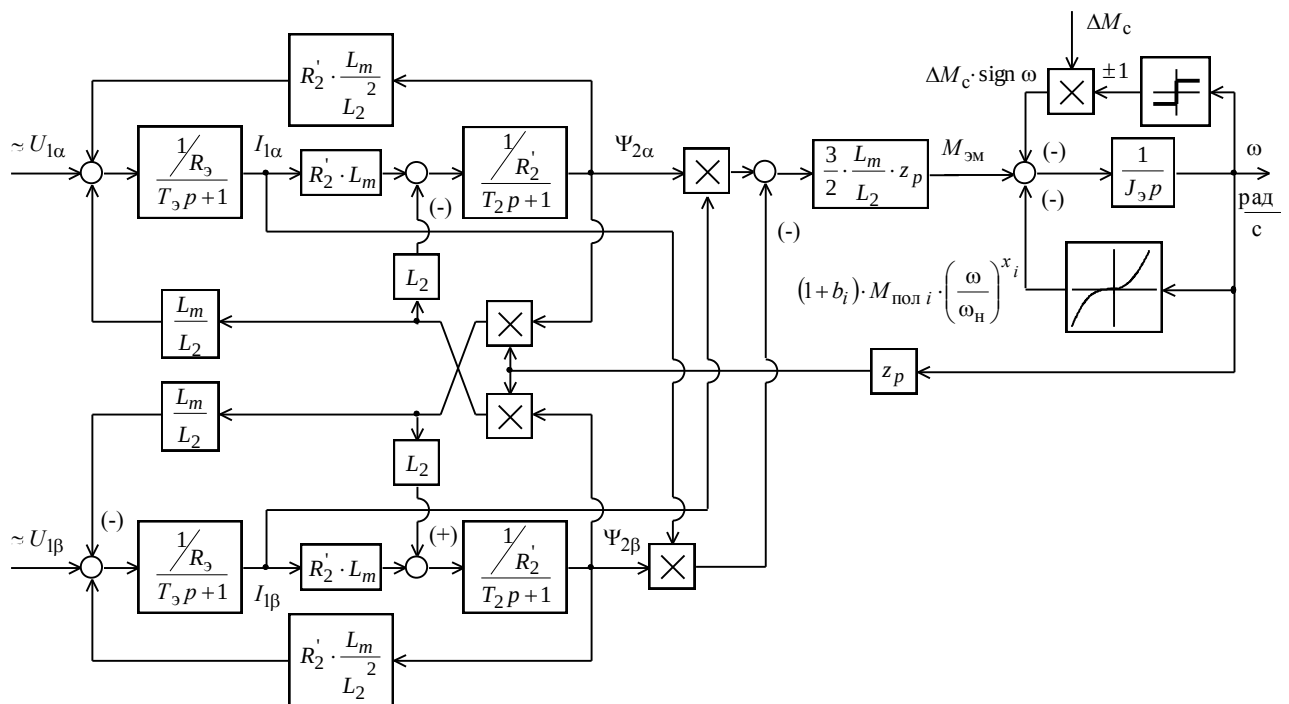


Рисунок 10 – Структурная схема асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат статора α, β

Рассчитаем параметры звеньев структурной схемы двигателя.

Эквивалентные индуктивности обмоток:

– статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_{\mu} = 5,114 \cdot 10^{-3} + 0,199 = 0,205 \text{ Гн};$$

– ротора

$$L_2 = L_{2\sigma}' + L_{\mu} = 6,922 \cdot 10^{-3} + 0,199 = 0,206 \text{ Гн}.$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2'} = 1 - \frac{0,199^2}{0,205 \cdot 0,206} = 0,062.$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_\mu^2}{L_2^2} = 0,991 + 0,971 \cdot \frac{0,199^2}{0,206^2} = 1,898, \text{ Ом}.$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0,062 \cdot 0,205}{1,898} = 0,0067, \text{ с}; \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,206}{0,971} = 0,212 \text{ с}.$$

Для исследования процессов при частотном регулировании в самом электродвигателе и далее в системе регулируемого электропривода вентилятора используем метод имитационного моделирования и в качестве средства моделирования электромеханических систем примем программу *MATLAB*.

11 Имитационная модель силового канала электропривода

Имитационная модель силового канала электропривода представлена на рисунке 11.

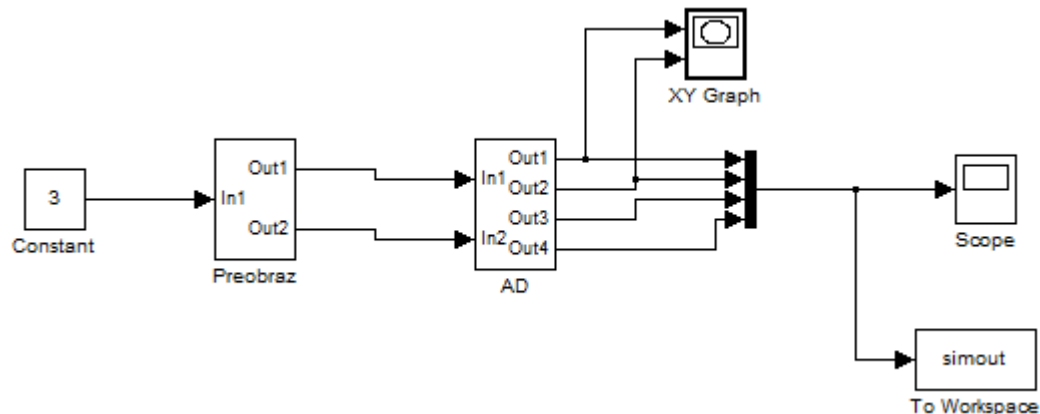


Рисунок 11 – Имитационная модель силового канала электропривода

Схема набора имитационной модели двухфазного преобразователя частоты, представленного подсистемой «Preobraz» представлена на рисунке 12.

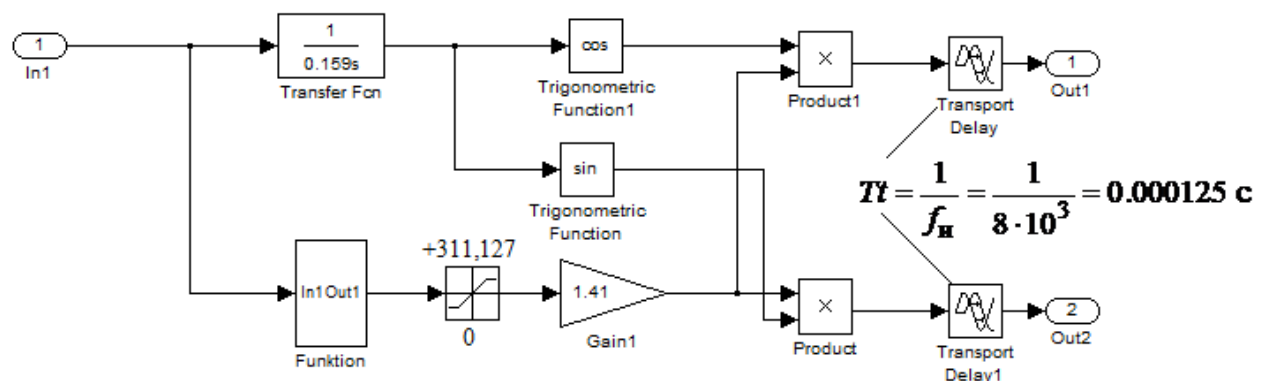


Рисунок 12 – Схема набора имитационной модели двухфазного преобразователя частоты

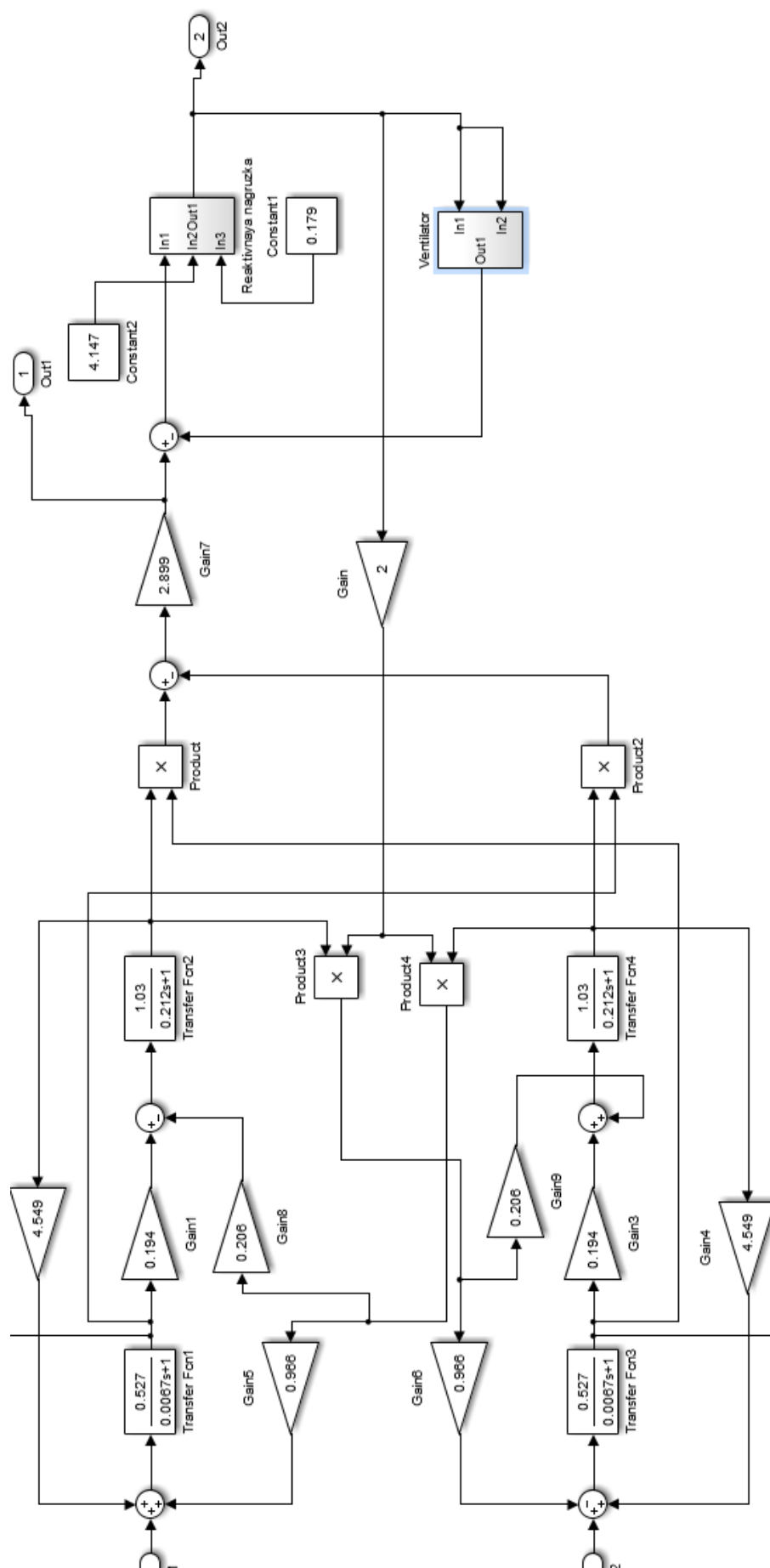


Рисунок 13 – Имитационная модель асинхронного двигателя

Подсистема «Funktion» реализует математическую функцию

$$U_{1\text{мин}} + (U_{1\text{фн}} - U_{1\text{мин}}) \cdot \frac{f_1^2}{f_{1\text{н}}^2} = 10 + (220 - 10) \cdot \frac{x^2}{50^2} \text{ В}$$

при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и принятой ранее настройке вольт-частотной характеристики.

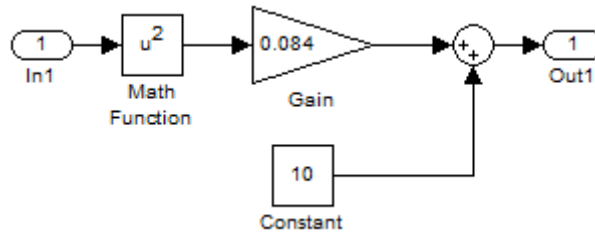


Рисунок 14 – Подсистема «Funktion» при законе регулирования

$$U_1/f_1^2 = \text{const}$$

Подсистема «Ventilator» (рисунок 15) осуществляет математическую функцию

$$\left[(1 + b_{\text{н}}) \cdot \frac{M_{\text{пол.н}}}{\omega_{\text{н}}^{2,35}} \right] \cdot \text{abs}(x) \cdot x^{1,35} = 2.4 \cdot 10^{-4} \cdot \text{abs}(x) \cdot x^{1,35},$$

где

$$b_{\text{н}} = 0,095, \quad M_{\text{пол.н}} = 29,3 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad \omega_{\text{н}} = 149,935 \text{ рад/с},$$

что соответствует симметричной характеристике $M_{\text{с}}(\omega)$ вентилятора при смене направления вращения.

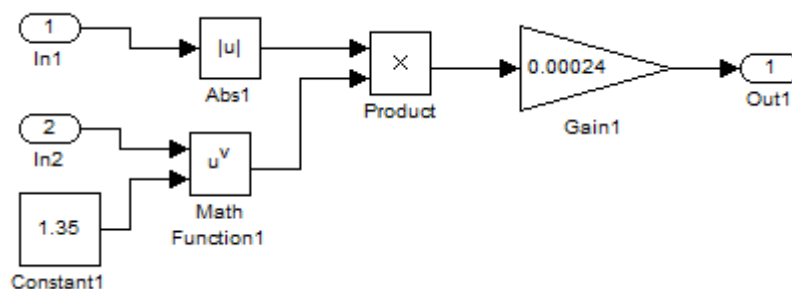


Рисунок 15 – Подсистема «Ventilator»

12 Исследование переходных процессов в асинхронном электроприводе с законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$

На рисунках 16–21 представлены переходные процессы скорости вала и электромагнитного момента асинхронного электропривода, а также динамические механические характеристики при пуске на частоты $f=50$ Гц; $f=33$ Гц; $f=3$ Гц.

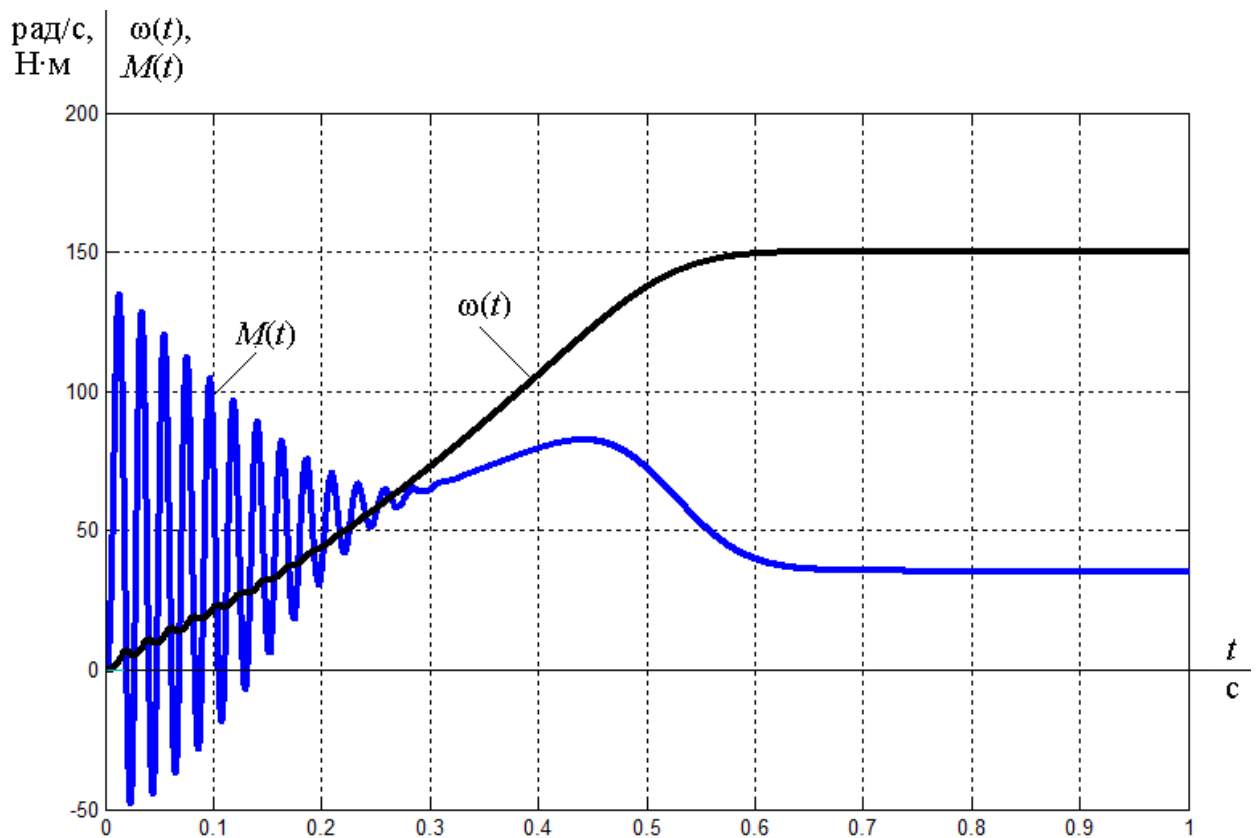


Рисунок 16 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ при значении частоты $f=50$ Гц

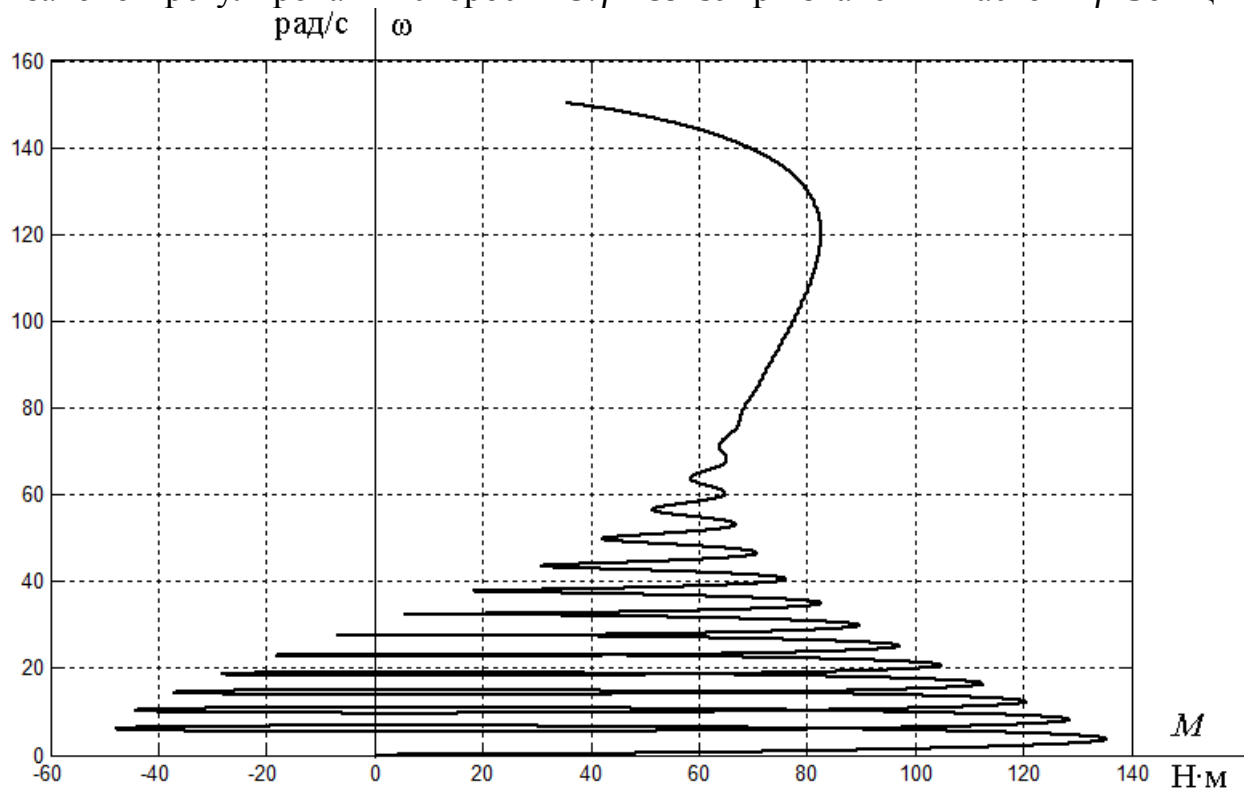


Рисунок 17 – Динамическая механическая характеристика при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ при значении частоты $f=50$ Гц

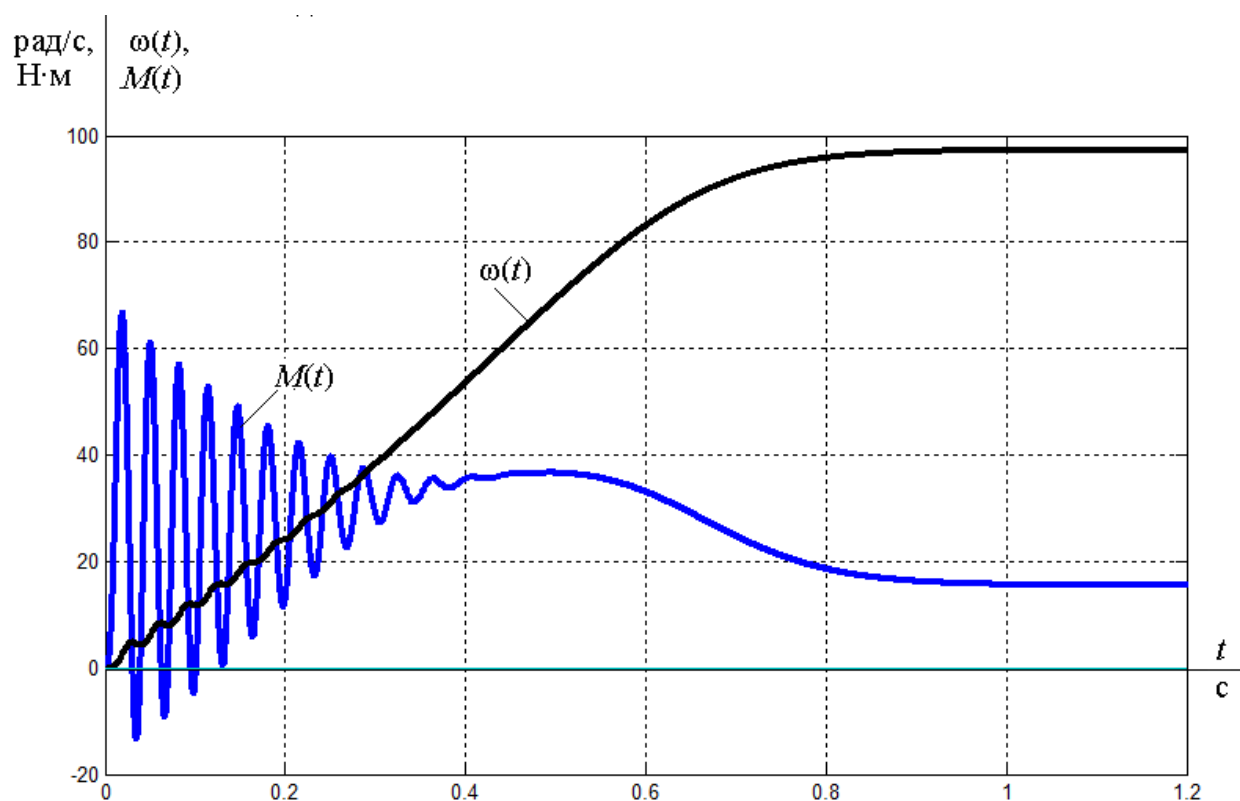


Рисунок 18 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ при значении частоты $f = 33$ Гц

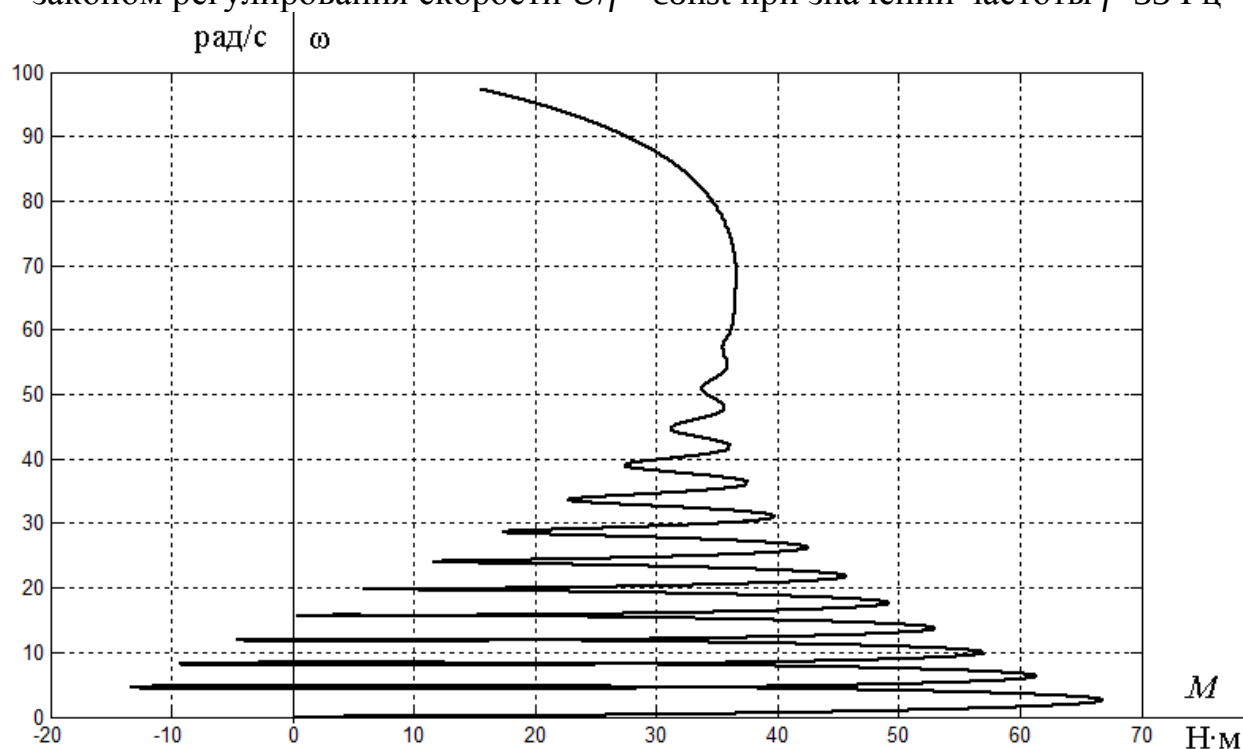


Рисунок 19 – Динамическая механическая характеристика при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ при значении частоты $f = 33$ Гц

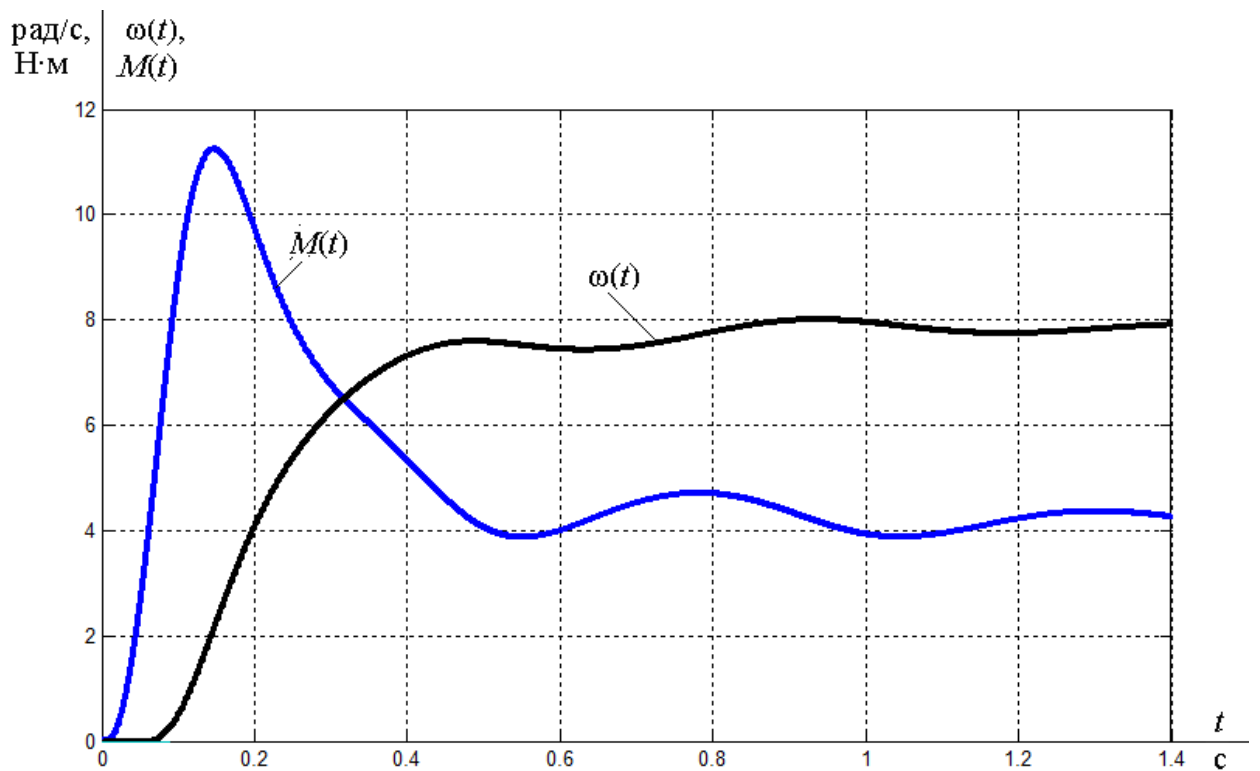


Рисунок 20 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ при значении частоты $f = 3$ Гц

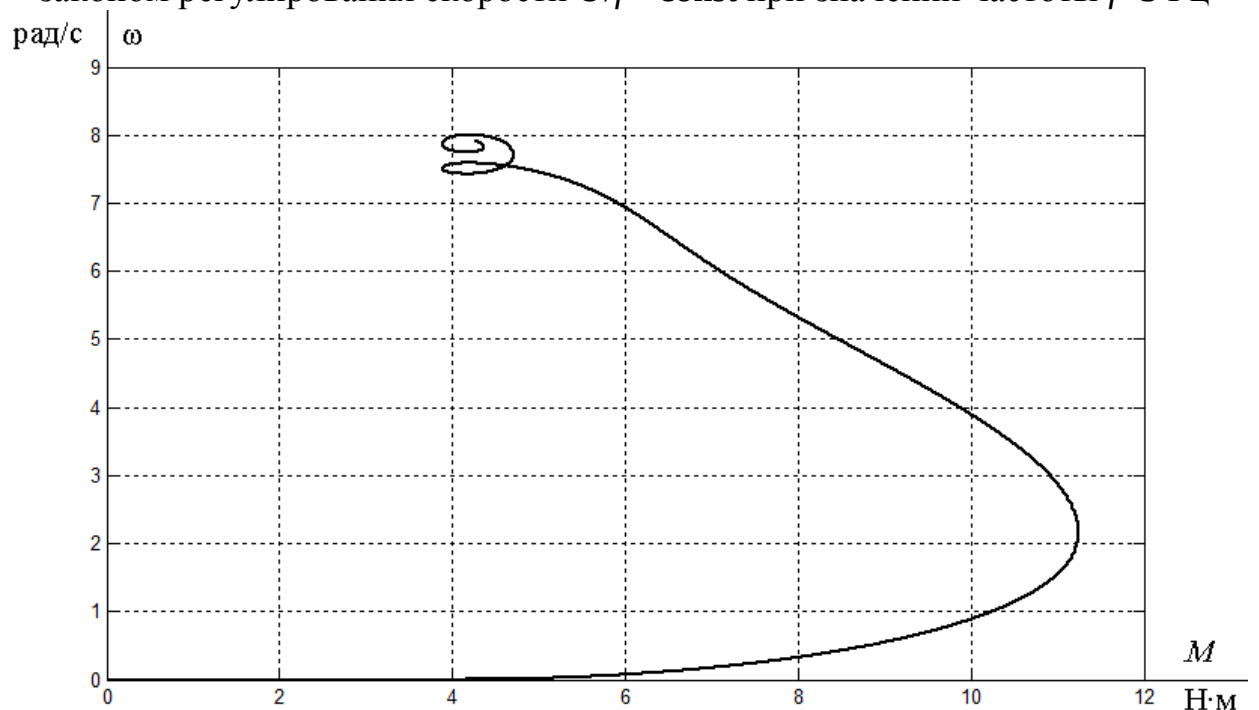


Рисунок 21 – Динамическая механическая характеристика при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ при значении частоты $f = 3$ Гц

Полученные результаты прямого пуска электродвигателя вентилятора показывают, что прямой пуск приводного двигателя не позволит получить удовлетворительного качества переходные процессы и определяют необходимость организации плавного пуска вентилятора с ограничением

величины и улучшением характера временной зависимости динамического момента электропривода.

Ограничение момента двигателя в пусковых режимах в разомкнутых системах регулируемого электропривода может быть достигнуто применением задатчика интенсивности скорости во входной цепи управления электропривода.

13 Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением приведена на рисунке 22. В состав электропривода входят: преобразователь частоты VLT 2855, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором АИР112М4 и радиальный вентилятор низкого давления ВР 80-75-6,3. Настраиваемыми параметрами электропривода являются: тип и параметры задатчика интенсивности скорости (ЗИС), значение минимальной частоты преобразователя $f_{\text{и мин}}$, закон регулирования U_1/f_1 и коррекция вольт-частотной характеристики.

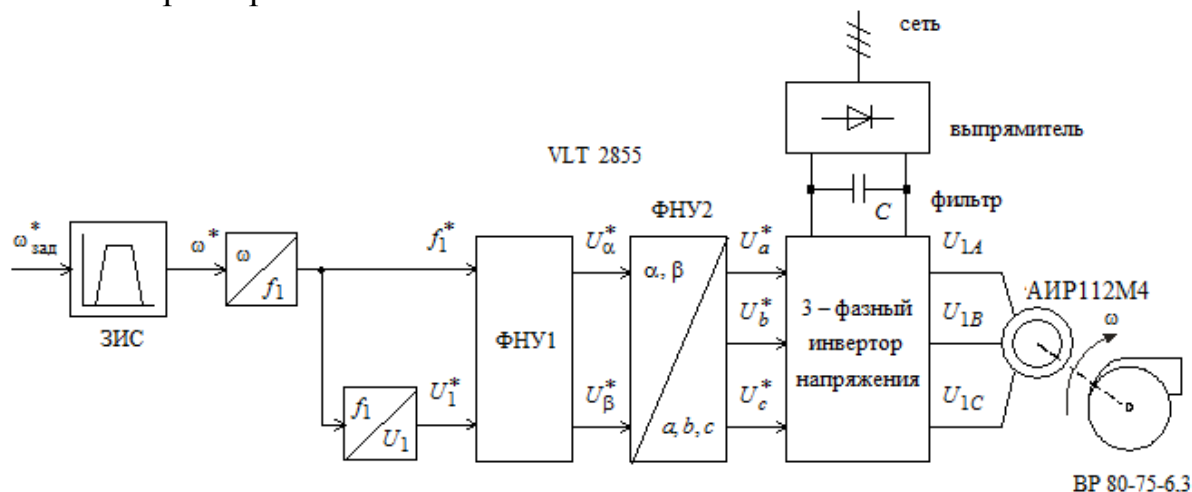


Рисунок 22 – Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением

14 Имитационные исследования частотно-регулируемого асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Схема набора имитационной модели асинхронного частотно-регулируемого электропривода вентилятора со скалярным управлением приведена на рисунке 23.

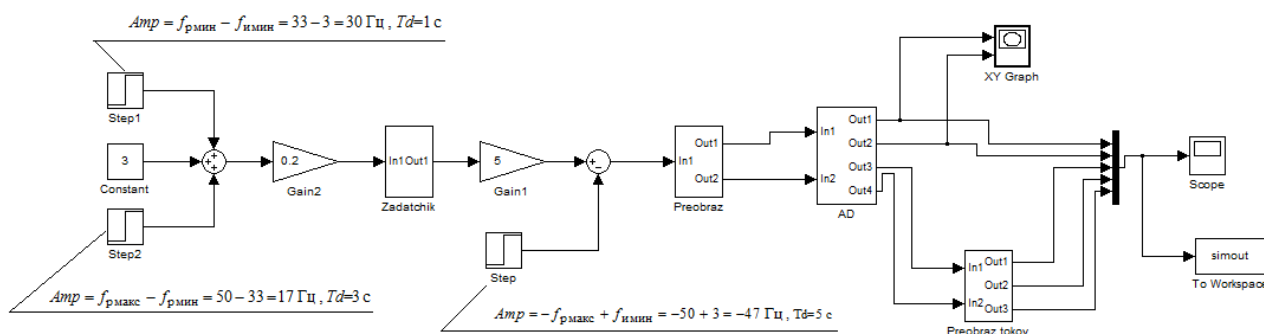


Рисунок 23 – Схема набора имитационной модели асинхронного электропривода вентилятора со скалярным управлением

Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с S-образной характеристикой [10] представлена на рисунке 24. Принята S-образная характеристика задатчика $U_{\text{зад}}(t)$ с параметрами (рисунок 25): $t_1 = 0.5 \text{ c}$, $t_2 = 1 \text{ c}$, $T_{\text{зи}} = 2 \cdot t_1 + t_2 = 2 \cdot 0.5 + 1 = 2 \text{ c}$.

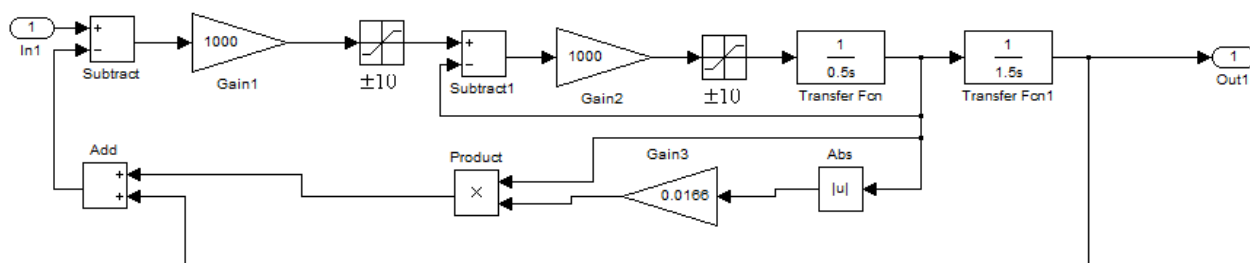


Рисунок 24 – Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с s-образной характеристикой (подсистема «Zadatchik»)

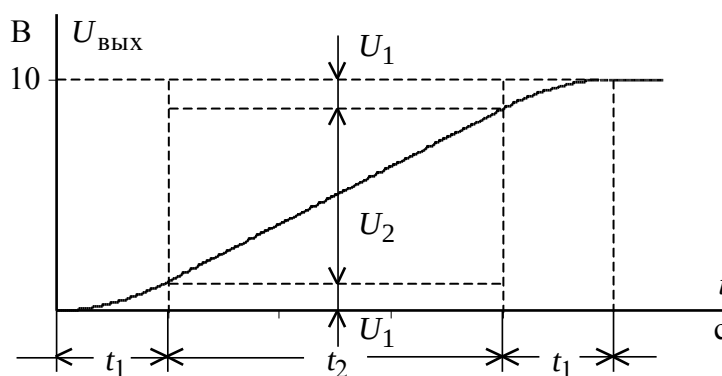


Рисунок 25 – Временная характеристика s-образного задатчика интенсивности

К электроприводу вентилятора не предъявляется жестких требований к динамическим показателям. Поэтому при выборе параметров настройки задатчика интенсивности скорости прежде всего следует исходить из условия обеспечения мягкого пуска электропривода. В ходе имитационных экспериментов установлено, что для обеспечения мягкого пуска вентилятора достаточно принять постоянную времени задатчика $T_{\text{зи}} = 2 \text{ c}$.

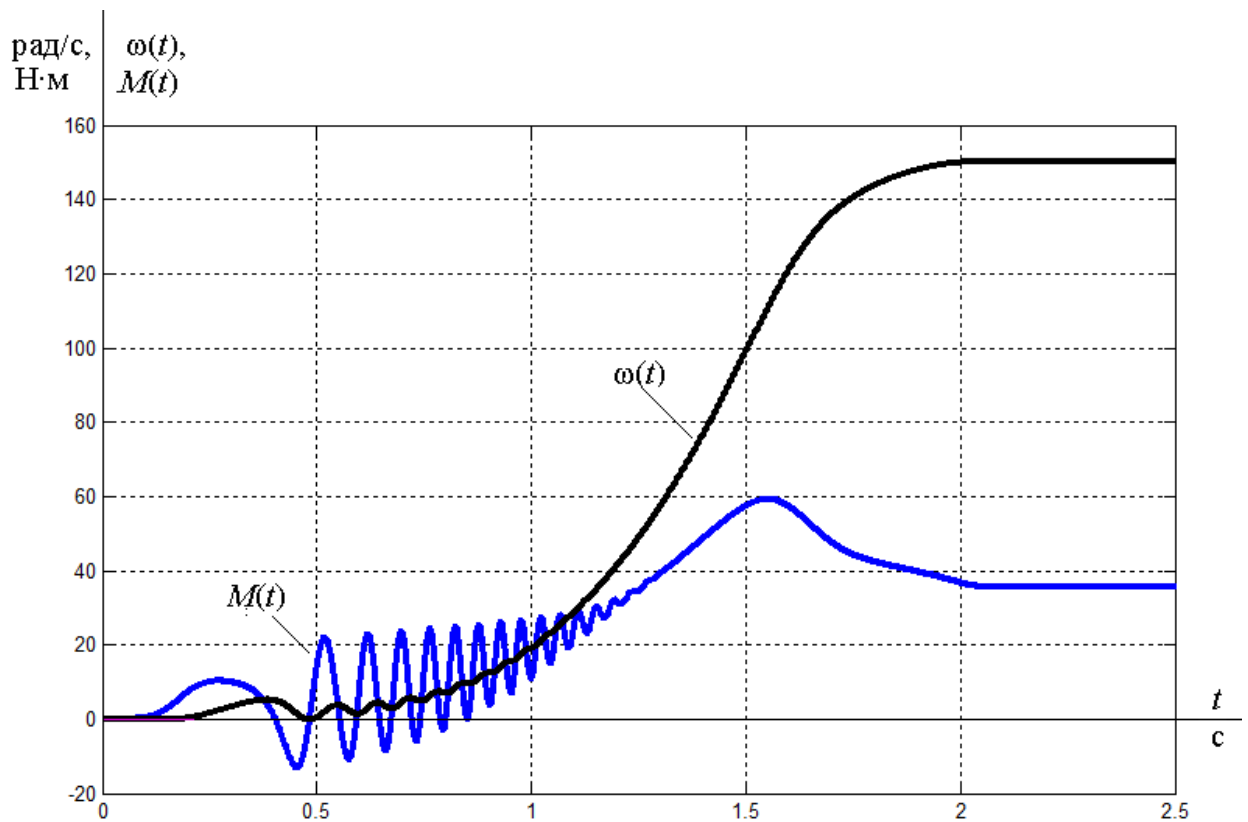


Рисунок 26 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности на входе при значении частоты $f = 50$ Гц

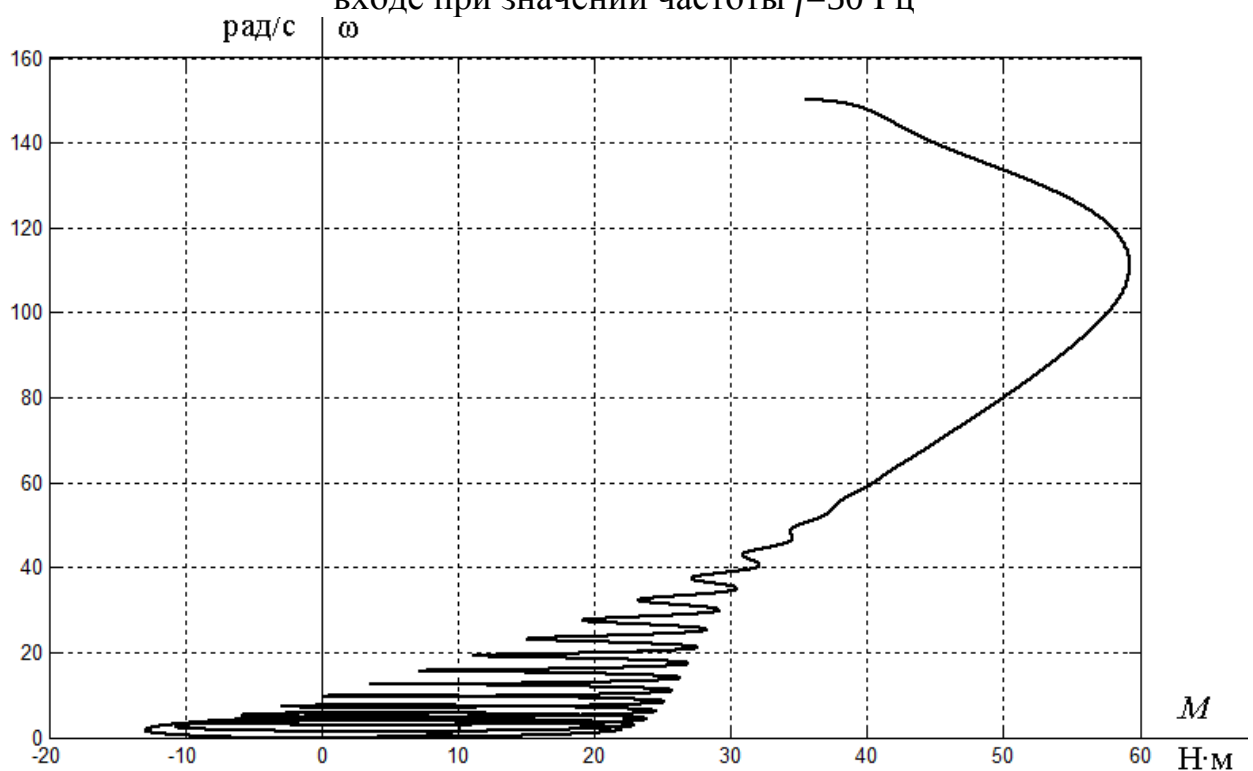


Рисунок 27 – Динамическая механическая характеристика при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности на входе при значении частоты $f = 50$ Гц

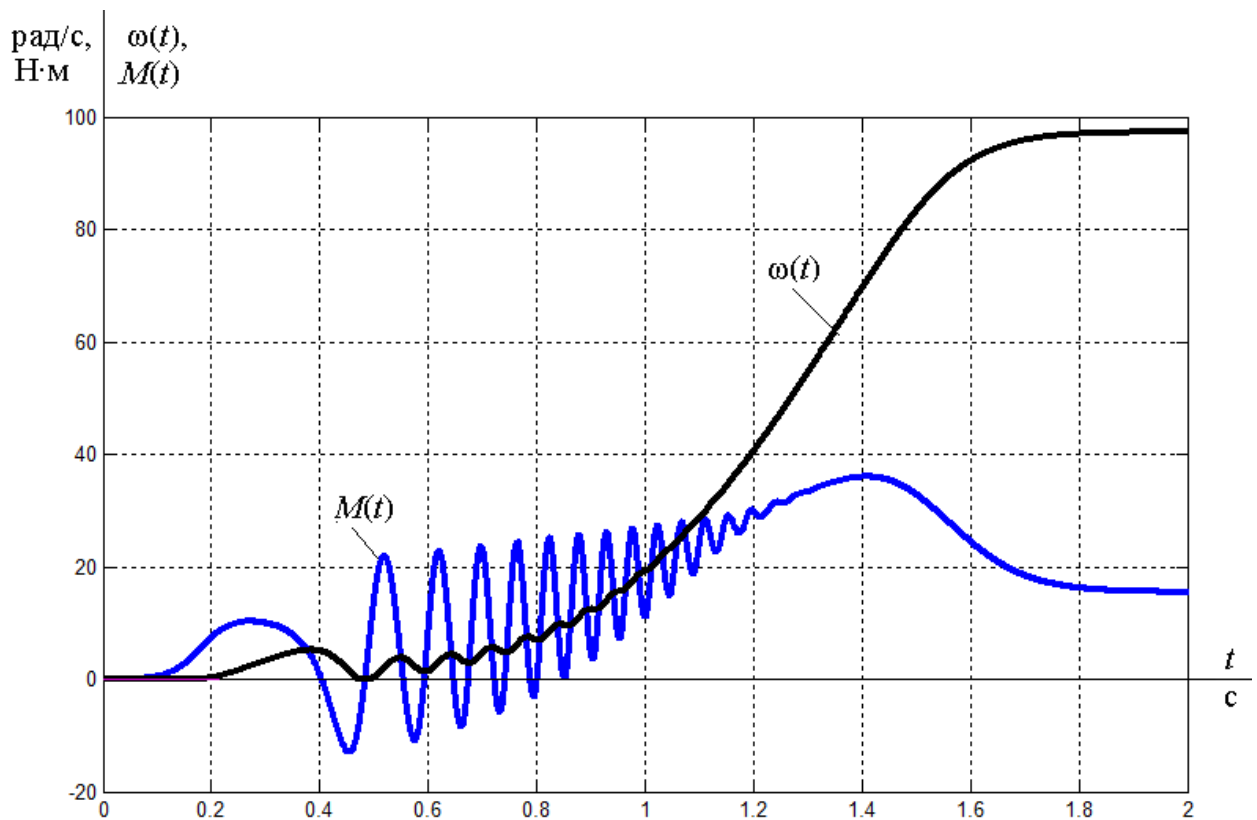


Рисунок 28 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности на входе при значении частоты $f = 33$ Гц

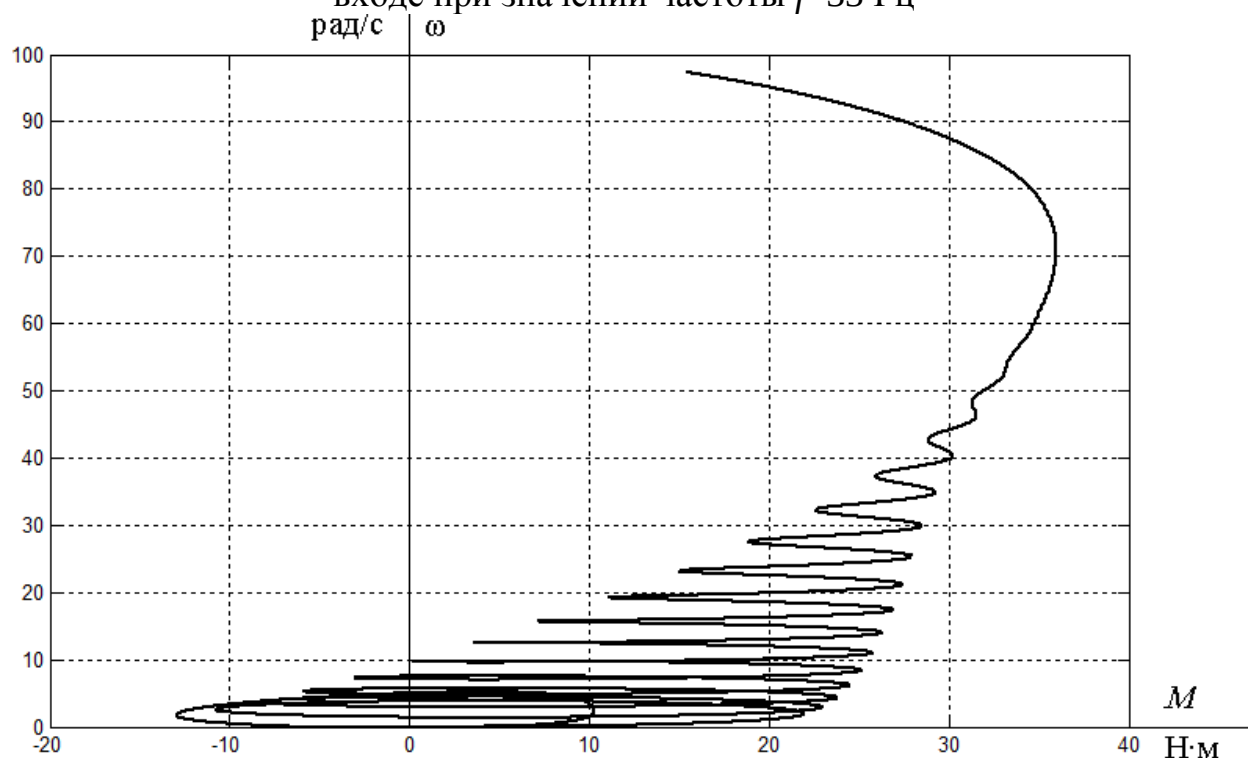


Рисунок 29 – Динамическая механическая характеристика при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности на входе при значении частоты $f = 33$ Гц

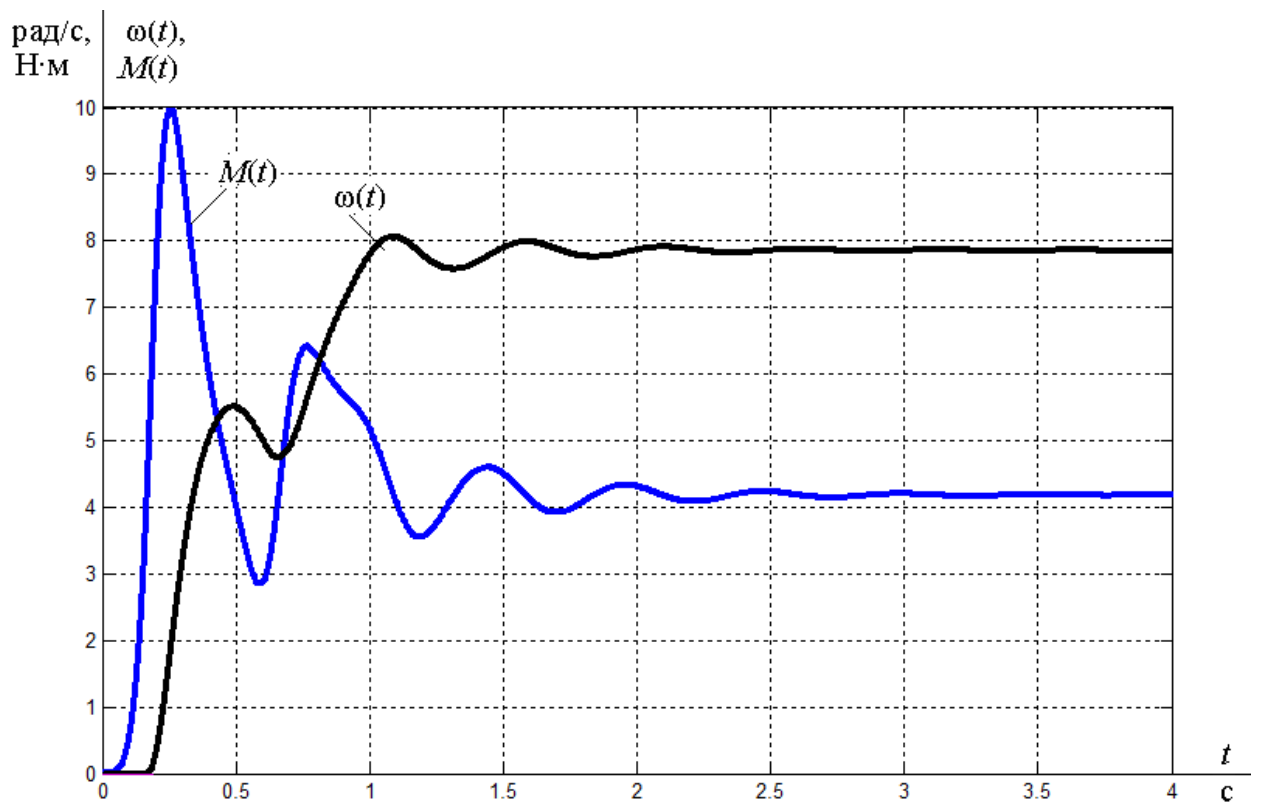


Рисунок 30 – Переходные процессы при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности на входе при значении частоты $f=3$ Гц

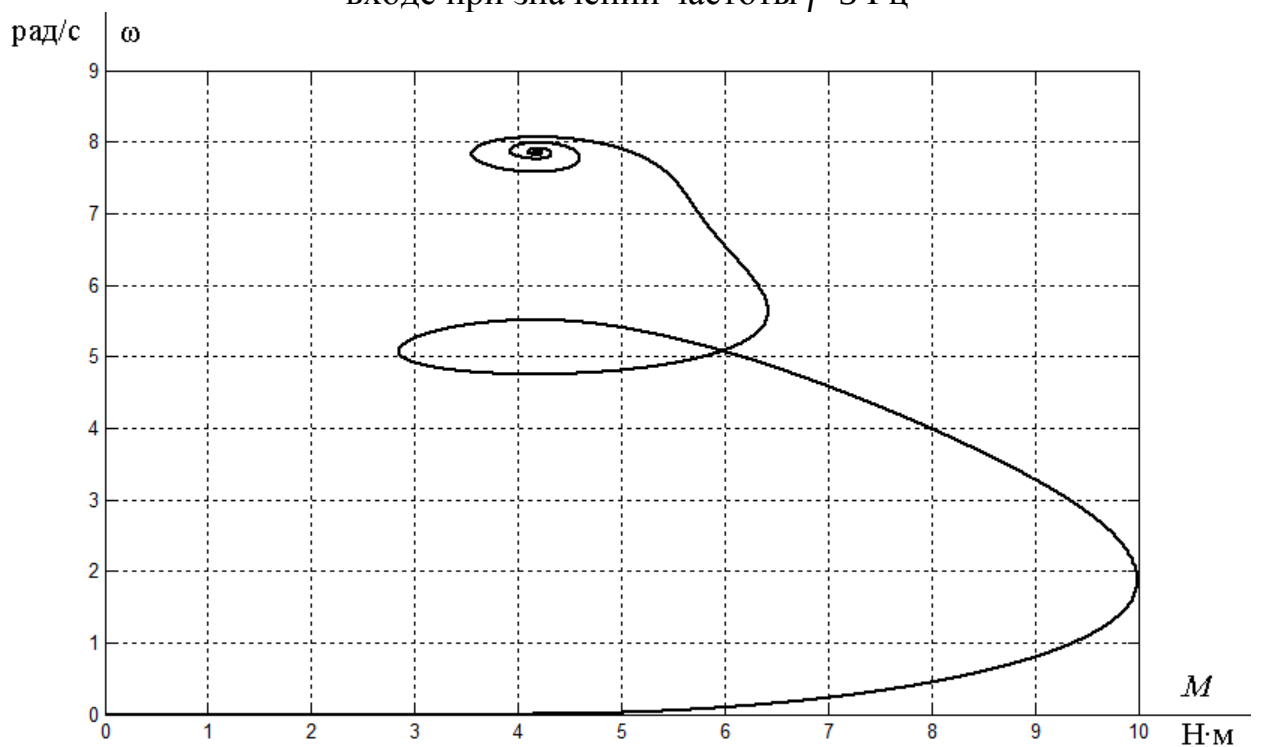


Рисунок 31 – Динамическая механическая характеристика при пуске электропривода с частотным законом регулирования скорости $U/f^2 = \text{const}$ и задатчиком интенсивности на входе при значении частоты $f=3$ Гц

Имитационные исследования электропривода вентилятора проводятся с целью проверки его работоспособности в следующих основных технологических режимах: пуск на любую рабочую скорость вентилятора; переход с одной рабочей скорости вентилятора на другую и останов вентилятора в режиме электрического торможения. В процессе имитационных исследований достаточно рассмотреть следующие режимы работы системы электропривод – вентилятор:

- пуск электропривода на минимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода на максимальную рабочую скорость;
- пуск электропривода с минимальной рабочей скорости на максимальную;
- торможение электропривода с максимальной скорости до минимальной;
- останов электропривода.

В качестве примера рассмотрена отработка электроприводом вентилятора следующего цикла:

- пуск на минимальную частоту $f_{и. мин} = 3$ Гц
- переход на минимальную рабочую скорость вентилятора ($f_{р. мин} = 33$ Гц)
- переход на максимальную рабочую скорость вентилятора ($f_{р. макс} = 50$ Гц)
- переход на минимальную частоту $f_{и. мин} = 3$ Гц.

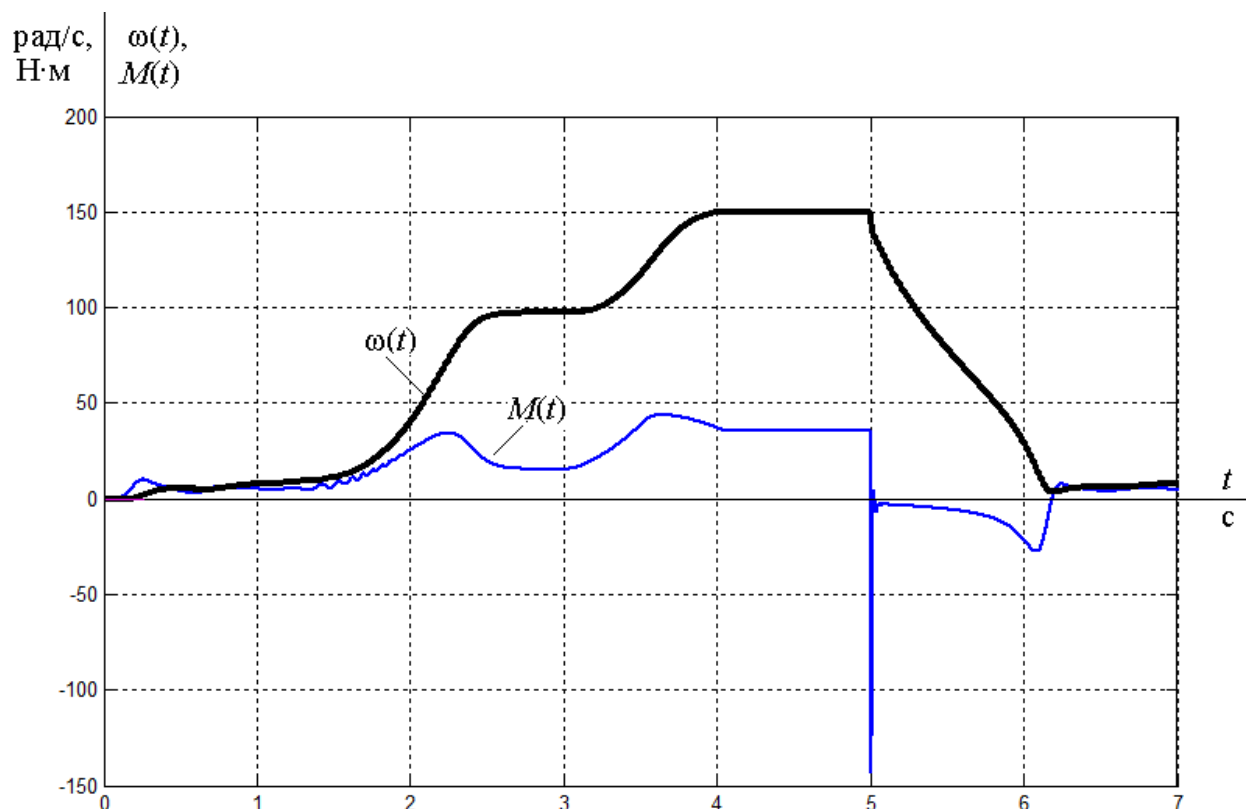


Рисунок 32 – Графики переходных процессов при отработке электроприводом вентилятора заданного цикла при законе регулирования $U_1/f_1^2 = \text{const}$

Выводы. Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что частотно-регулируемый асинхронный электропривод вентилятора при скалярном управлении с законом управления $U_1/f_1^2 = \text{const}$ и корректировкой вольт-частотной характеристики в соответствии с (7) и при законе управления $U_1/f_1 = \text{const}$ обеспечивает пуск электропривода с начальной частоты $f_{\text{и. мин}} = 3 \text{ Гц}$ и требуемый диапазон регулирования скорости вентилятора. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя. Время пуска и электрического торможения электропривода определяется и может быть изменено путём выбора значения постоянной времени задатчика скорости.