Уточненный расчет провалов напряжения в асинхронном электроприводе при колебаниях нагрузки. Сравнение прямого и плавного пуска электродвигателя.

1) Приведённое полное сопротивление к вторичной обмотке трансформатора $x'_{т}$ (Ом);
2) активное $R_к$ и индуктивное $x_к$ сопротивление кабельной линии от шин к двигателю (Ом);
3) напряжение на шинах $U_ш$ ($кВ$);

2. Технические данные двигателя:
   1) номинальная мощность $P_{ном}$ ($кВт$);
   2) номинальное напряжение $U_{ном}$ ($кВ$);
   3) номинальная скорость вращения вала n (об/мин);
   4) число пар полюсов p;
   5) номинальный фазный ток $I_{ном}$ (А);
   6) номинальное скольжение s (о.е.);
   7) номинальный КПД η (%);
   8) cos $\varphi_{ном}$;
   9) кратность максимального вращающего момента $M_{кр} / M_{ном}$;
   10) кратность пускового вращающего момента $M_{пуск} / M_{ном}$;
   11) кратность пускового толка $I_{пуск} / I_{ном}$;
   12) суммарный момент инерции (момент инерции вала и механизма, приведенного к валу двигателя) J ($кг \cdot м^2$);
3. Именованные параметры Г-образной схемы замещения двигателя при номинальном скольжении:
   1) активное сопротивление статора R_1 (Ом);
   2) активное сопр. ротора, приведенное к статору R_2' (Ом);
   3) индуктивное сопротивление статора x_1 (Ом);

4) индуктивное сопр. ротора, приведенное к статору x_2' (Ом);

5) индуктивное сопротивление рассеяния x_{12} (Ом);

4. Параметры Г-образной схемы замещения двигателя при КЗ (s=1):

1) активное сопр. ротора, приведенное к статору R_{2k}' (Ом);

2) индуктивное сопр. ротора, приведенное к статору x_{2k}' (Ом);

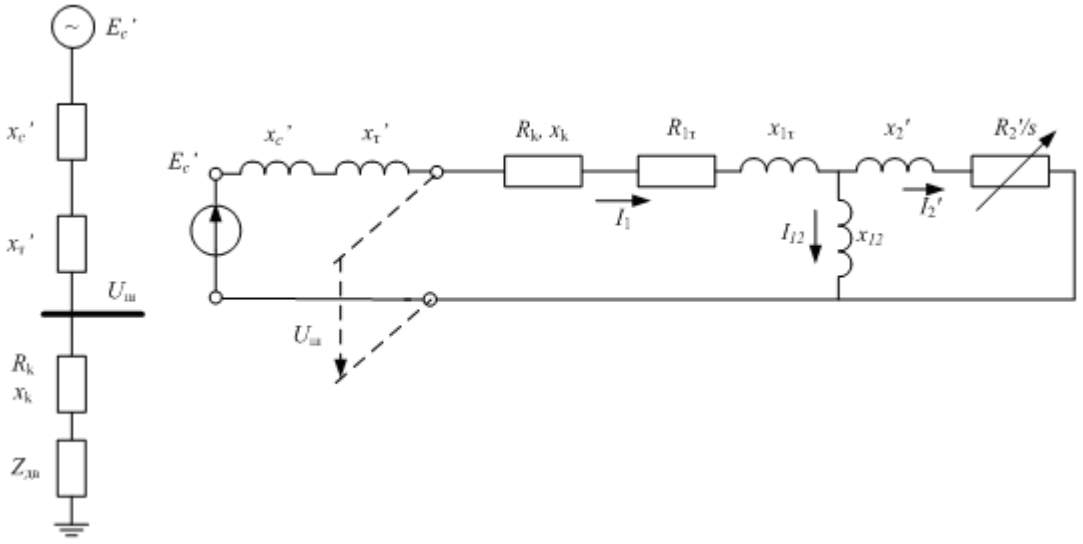
5. Характеристика нагрузки на валу двигателя $M_{\text{с}} = f(s)$ (Нм) в табличном или алгебраическом виде.

В общем виде однолинейная схема и схема замещения системы (рисунок 3.5.1) построена на основе где данных Г-образной схемы замещения двигателя, с последующим преобразованием в Тобразную, что позволяет разделить статорную и роторную цепь двигателя относительно цепи намагничивания.

Расчет провала напряжения на шинах состоит в том, что при найденном токе $I_1(t)$ в системе (рисунок 3.5.1), выделяется падение напряжения на трансформаторе и внешней системе по имеющимся данным их сопротивлений, и в соответствии с 2-м законом Кирхгоффа в данном случае:

$$U_{\text{ш}}(t) = E'_{\text{с}}(t) - (L'_{\text{т}} + L'_{\text{с}})\frac{dI_1}{dt}, \qquad (3.5.1)$$

где $L'_{\text{т}}$ и $L'_{\text{с}}$ – индуктивности трансформатора и системы, приведенные к вторичной обмотке трансформатора; $U_{\text{ш}}$ — фазное напряжение на шинах; $E'_{\text{с}}(t)$ – внешняя ЭДС (фазная) системы, приведенная к вторичной обмотке трансформатора (базовая ЭДС).



а) *б)*

Рисунок 3.5.1 - Электрическая схема системы «сеть-трансформатор-АКЗ»:

а) однолинейная: $E'_{\text{с}}$ – внешняя ЭДС, приведенная к вторичной обмотке трансформатора, $Z_{\text{дв}}$ – полное сопротивление двигателя, $U_{\text{ш}}$ – напряжение на шинах;

б) схема замещения: $E'_{\text{с}}$ – фазная ЭДС, приведенная к вторичной обмотке трансформатора, $U_{\text{ш}}$ – фазное напряжение на шинах, I_1 – ток в системе, I''_2 – ток в роторе двигателя, I_{12} – ток в цепи намагничивания $R_{1\text{т}}$ и $x_{1\text{т}}$ – собственное активное и индуктивное сопротивление статора; R_2’ и x_2’ – собственное активное и индуктивное сопротивление ротора, приведенные к статору

Перерасчет параметров из Г-образной схемы замещения в Т-образную ведется с именованными сопротивлениями в следующем порядке [18]:

1. Определяется собственное индуктивное сопротивление статора:

$$x_{1\text{т}} = \frac{2x_1x_{12}}{x_{12} + \sqrt{x_{12}^{\,2} + 4x_1x_{12}}}. \qquad (3.5.2)$$

2. Определяется переводной коэффициент, учитывающий влияние контура намагничивания:

$$C_1 = \frac{x_1}{x_{1\text{т}}}. \qquad (3.5.3)$$

3. Оставшиеся сопротивления вычисляются по найденному в (3.5.3) переводному коэффициенту как:

$$R_{1\text{т}} = \frac{R_1}{C_1}, \qquad (3.5.4)$$

$$R'_{2\text{т}} = \frac{R_2^{/}}{C_1^{\,2}}, \qquad (3.5.5)$$

$$x'_{2\text{т}} = \frac{X_2{}'}{C_1^{\,2}}, \qquad (3.5.6)$$

$$R'_{2\text{тк}} = \frac{R_{2\text{к}}^{/}}{C_1^{\,2}}, \qquad (3.5.7)$$

$$x'_{2\text{тк}} = \frac{x'_{2\text{к}}}{C_1^{\,2}}. \qquad (3.5.7)$$

4. Сопротивление x_{12} остается неизменным.

Математическая модель всей системы строится на основе полной схемы замещения (рисунок 3.5.1, *б*) и уравнениях обобщенной асинхронной машины [4, 21], с учетом того, что к собственному активному и индуктивному сопротивлению статора ($R_{1т}$ и $x_{1т}$) добавляются все последовательно включенные сопротивления системы электроснабжения.

Обобщенная схема замещения приведена на рисунке 3.5.2.

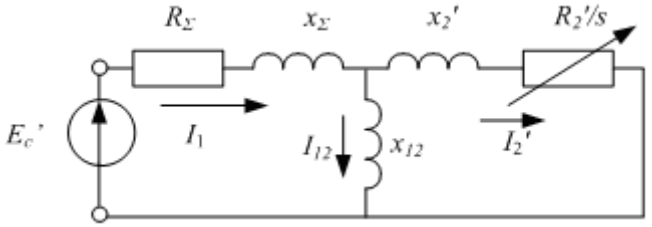


Рисунок 3.5.2 - Обобщенная (преобразованная) схема замещения системы «сеть-трансформатор-АКЗ»

Переход от индуктивных сопротивлений к индуктивностям осуществляется через скорость электрического поля:

$$\omega_с = 2\pi f \quad . \tag{3.5.8}$$

где f – частота сети ($Гц$).

Собственная индуктивность статорной цепи определяется из рис. 1.5 как

$$L_{1\Sigma} = \frac{x_с' + x_т' + x_к + x_{1т}}{\omega_с} \quad . \tag{3.5.9}$$

Собственная индуктивность роторной цепи, приведенная к статору, рассчитывается аналогично для случаев номинального скольжения и КЗ:

$$L_{2т}' = \frac{x_{2т}'}{\omega_с} \quad , \tag{3.5.10}$$

$$L_{2тк}' = \frac{x_{2тт}}{\omega_с} \quad . \tag{3.5.11}$$

Активное сопротивление статорной цепи

$$R_{1\Sigma} = R_{1т} + R_к \quad . \tag{3.5.12}$$

Активное сопротивление ротора остается без изменений.

Индуктивность цепи намагничивания определяется

$$L_{12} = \frac{x_{12}}{\omega_c} . \qquad (3.5.13)$$

Индуктивность внешней системы и трансформатора необходима для выделения падения напряжения в них по (1.43)

$$L'_c = \frac{x'_c}{\omega_c} . \qquad (3.5.14)$$

$$L'_т = \frac{x'_т}{\omega_c} . \qquad (3.5.15)$$

Для введения параметров в модель необходимо получить полную индуктивность статора, ротора и цепи намагничивания соответственно:

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{1\Sigma} + L_{12}, \\ L_2 &= L'_{2т} + L_{12}, \\ L_{2к} &= L'_{2тк} + L_{12}, \\ &L_{12}. \end{aligned} \qquad (3.5.16)$$

Приведенная индуктивность определяется из полученных данных (3.5.16) как

$$L_{пр} = L_1 - \frac{L_{12}^2}{L_{2к}} . \qquad (3.5.17)$$

По рисунку (3.5.2) для неподвижной относительно статора системы координат α, β дифференциальные уравнения электрического равновесия напряжений в обмотках статора и ротора машины записываются как:

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} &= R_\Sigma i_{1\alpha} + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}, \\ U_{1\beta} &= R_\Sigma i_{1\beta} + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}, \\ U_{2\alpha} &= R_2 i_{2\alpha} + \frac{d\Psi_{2\alpha}}{dt} + \omega\Psi_{2\beta}, \end{aligned} \qquad (3.5.18)$$

$$U_{2\beta} = R_2 i_{2\beta} + \frac{d\Psi_{2\beta}}{dt} - \omega\Psi_{2\alpha},$$

где ω — скорость электрического поля.

Четыре уравнения системы (3.5.18) содержат восемь линейно зависимых переменных.

Запишем выражения связи токов и потокосцеплений статора и ротора:

$$\begin{cases} \Psi_{1\alpha} = L_1 i_{1\alpha} + L_{12} i_{2\alpha}, \\ \Psi_{1\beta} = L_1 i_{1\beta} + L_{12} i_{2\beta}, \\ \Psi_{2\alpha} = L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}, \\ \Psi_{2\beta} = L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}. \end{cases} \qquad (3.5.19)$$

Выберем состав компонент вектора $\vec{\Psi}$ так, чтобы результирующее математическое описание электромеханического преобразования энергии в асинхронном двигателе не содержало бы алгебраических уравнений, и следовательно, структурная модель не имела бы безинерционных контуров, т.е.

$$\vec{\Psi}^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} i_{1\alpha} & i_{1\beta} & \Psi_{2\alpha} & \Psi_{2\beta} \end{bmatrix}.$$

Из двух последних уравнений системы (3.5.19) выразим токи ротора:

$$\begin{aligned} i_{2\alpha} &= \frac{1}{L_2}\Psi_{2\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} i_{1\alpha}, \\ i_{2\beta} &= \frac{1}{L_2}\Psi_{2\beta} - \frac{L_{12}}{L_2} i_{1\beta}. \end{aligned} \qquad (3.5.20)$$

Полученные выражения (3.5.20) подставляются в уравнения для потокосцеплений статора, то есть в первые два уравнения системы (3.5.19):

$$\Psi_{1\alpha} = L_1 i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2}\Psi_{2\alpha} - \frac{L_{12}^{\,2}}{L_2} i_{1\alpha} = \left(L_1 - \frac{L_{12}^{\,2}}{L_2}\right) i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2}\Psi_{2\alpha},$$

$$\Psi_{1\beta} = L_1 i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2}\Psi_{2\beta} - \frac{L_{12}^{\,2}}{L_2} i_{1\beta} = \left(L_1 - \frac{L_{12}^{\,2}}{L_2}\right) i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2}\Psi_{2\beta}.$$

Обозначив приведенную индуктивность как

$$L_{\text{пр}} = \left(L_{1\Sigma} - \frac{L_{12}{}^2}{L_2} \right),$$

получим выражения для потокосцеплений обмоток статора:

$$\begin{aligned} \Psi_{1\alpha} &= L_{\text{пр}} i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2\alpha}, \\ \Psi_{1\beta} &= L_{\text{пр}} i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2\beta}. \end{aligned} \qquad (3.5.21)$$

Индуктивность $L_{\text{пр}}$ и активное сопротивление R_Σ определяют постоянную времени статорной цепи, однако, во время пуска машины в случаях синхронной скорости машины 3000 об/мин индуктивность ротора предпочтительнее брать для $s = 1$. При анализе переходных процессов после разгона, следует брать индуктивность ротора при номинальном скольжении.

Далее выражения (3.5.20) и (3.5.21) подставляются в уравнения системы (3.5.19) и с учетом обозначения для операторной формы

$$\frac{d}{dt} \to s,$$

то есть

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = R_\Sigma i_{1\alpha} + L_{\text{пр}} s i_{1\alpha} + \dfrac{L_{12}}{L_2} s \Psi_{2\alpha}, \\ U_{1\beta} = R_\Sigma i_{1\beta} + L_{\text{пр}} s i_{1\beta} + \dfrac{L_{12}}{L_2} s \Psi_{2\beta}, \\ U_{2\alpha} = -\dfrac{R_2 L_{12}}{L_2} i_{1\alpha} + \dfrac{R_2}{L_2} \Psi_{2\alpha} + s \Psi_{2\alpha} + \omega \Psi_{2\beta}, \\ U_{2\beta} = -\dfrac{R_2 L_{12}}{L_2} i_{1\beta} + \dfrac{R_2}{L_2} \Psi_{2\beta} + s \Psi_{2\beta} - \omega \Psi_{2\alpha}. \end{cases} \qquad (3.5.22)$$

Для удобного вида, с точки зрения оптимизации построения структуры, преобразуем уравнения (3.5.22) в виде:

$$i_{1\alpha} = \frac{1}{R_\Sigma + L_{\text{пр}} s} \left(U_{1\alpha} - \frac{L_{12}}{L_2} s \Psi_{2\alpha} \right),$$

$$i_{1\beta} = \frac{1}{R_\Sigma + L_{\text{пр}} s}\left(U_{1\beta} - \frac{L_{12}}{L_2} s\Psi_{2\beta} \right),$$

$$\Psi_{2\alpha} = \frac{1}{s}\left(U_{2\alpha} + \frac{R_2 L_{12}}{L_2} i_{1\alpha} - \frac{R_2}{L_2}\Psi_{2\alpha} - \omega\Psi_{2\beta} \right),$$

$$\Psi_{2\beta} = \frac{1}{s}\left(U_{2\beta} + \frac{R_2 L_{12}}{L_2} i_{1\beta} - \frac{R_2}{L_2}\Psi_{2\beta} + \omega\Psi_{2\alpha} \right).$$

Уравнение электромагнитного момента получается векторным произведением пары векторов (3.5.19), что в конечном итоге дает

$$M = p\frac{L_{12}}{L_2}\left(i_{1\beta}\Psi_{2\alpha} - i_{1\alpha}\Psi_{2\beta} \right). \qquad (3.5.23)$$

где p – число пар полюсов машины.

Уравнение движения:

$$M - M_c = J\frac{d\omega}{dt}. \qquad (3.5.24)$$

Следует отметить, что активное сопротивление и индуктивность ротора по мере разгона изменяются по (3.3.10), и это несколько усложняет уравнения (3.3.22) для визуального восприятия. Поэтому структура системы сначала строится для номинальных значений сопротивлений по (3.5.22) – (3.5.24), затем расширяется с учетом (3.3.10) через скольжение

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}. \qquad (3.3.25)$$

Фактически уравнения (3.5.22), (3.5.23) – (3.5.24) определяют всю структурную схему математической модели. Для решения этих уравнений используется операторная структура, изображенная на рисунке 3.5.3.

При найденном скольжении s легко получить по (3.3.10) текущие значения сопротивления и индуктивности ротора и принять их в расчет, получив тем самым расширенную структуру модели.

В данном конкретном случае при расчете падения напряжения (ΔU) на трансформаторе и системе учитывается только их индуктивное сопротивление.

Эффект вытеснения тока необходимо учесть в расчетных циклах модели по (3.3.10). При значительной величине активного и индуктивного сопротивления кабеля его следует учесть в статорной цепи. Математически это будет представлять собой инерционное звено, добавленное в уравнение (3.5.22) с учетом активной и индуктивной составляющей сопротивления кабеля или иного аналогичного проводника.

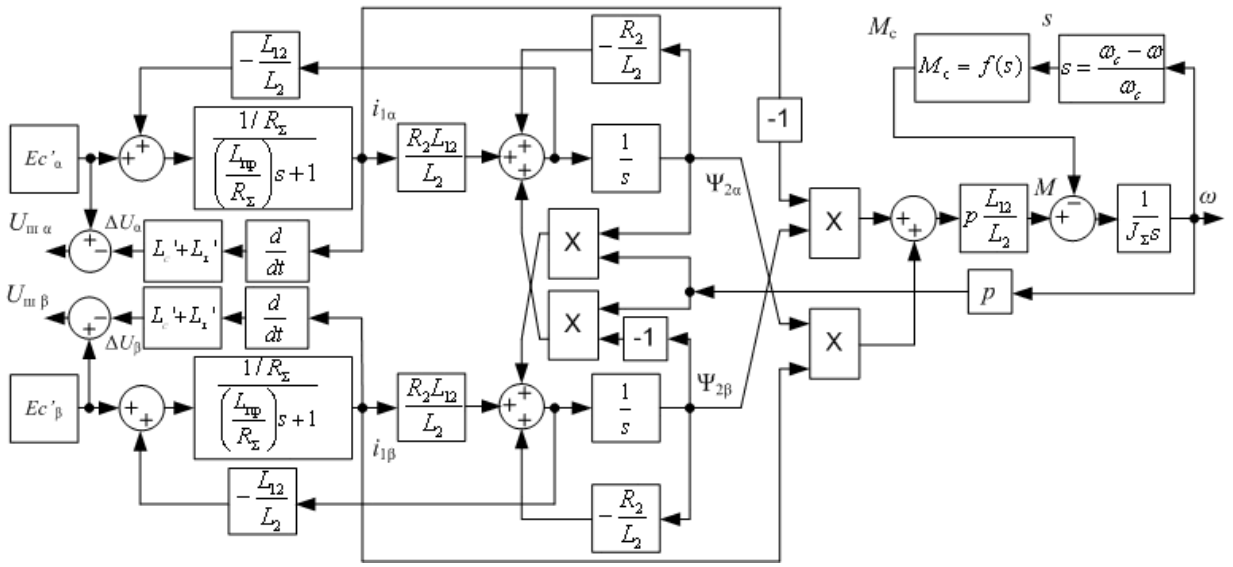


Рисунок 3.5.3 - Структурная схема математической модели «сеть-трансформатор-АКЗ»

При необходимости из модели (рисунок 3.5.3) можно получить кривые токов и напряжений в трехфазной системе координат АВС по известным преобразованиям:

$$i_A = i_\alpha, \qquad U_A = U_\alpha,$$

$$i_B = -\frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta, \qquad U_B = -\frac{1}{2} U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta,$$

$$i_C = -\frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta, \qquad U_C = -\frac{1}{2} U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} U_\beta.$$

С точки зрения анализа работы системы с другими параметрами трансформатора или сети достаточно найти их параметры и получить исходные данные для модели, затем подставить и произвести расчет.

В качестве примера был произведен расчет провалов напряжения для двигателя АКЗ 10кВ, результаты представлены на рисунках 3.5.4 – 3.5.9.

Исходные данные: трансформатор 16МВА, синхронная скорость вала двигателя 3000об/мин, параметры двигателя даны в таблице 3.5.1.

Таблица 3.5.1 Параметры схемы замещения двигателя

Номинальное скольжение					Неподвижный ротор	
r1	x_1	x_{12}	r_2'	x_2'	r_{2k}'	x_{2k}'
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
0,13	1,902	89,4	0,112	2,962	0,405	1,227

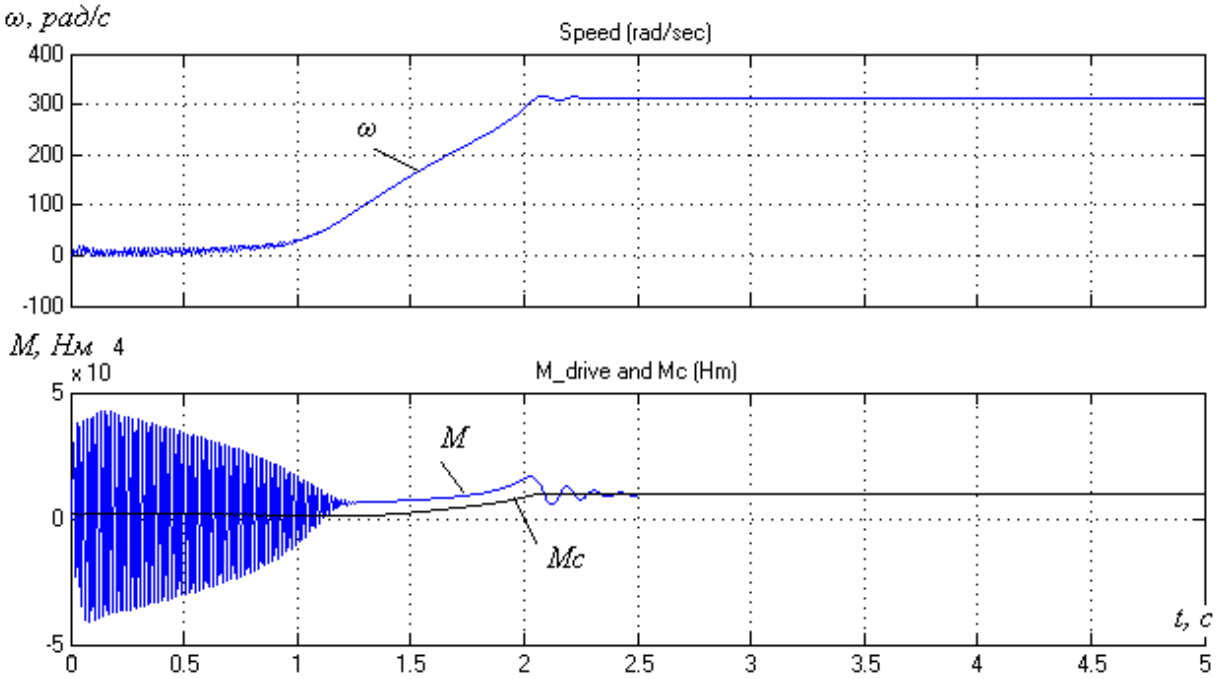


Рисунок 3.5.4 - Переходный процесс: скорость (рад/с), момент на валу и момент сопротивления (Н·м)

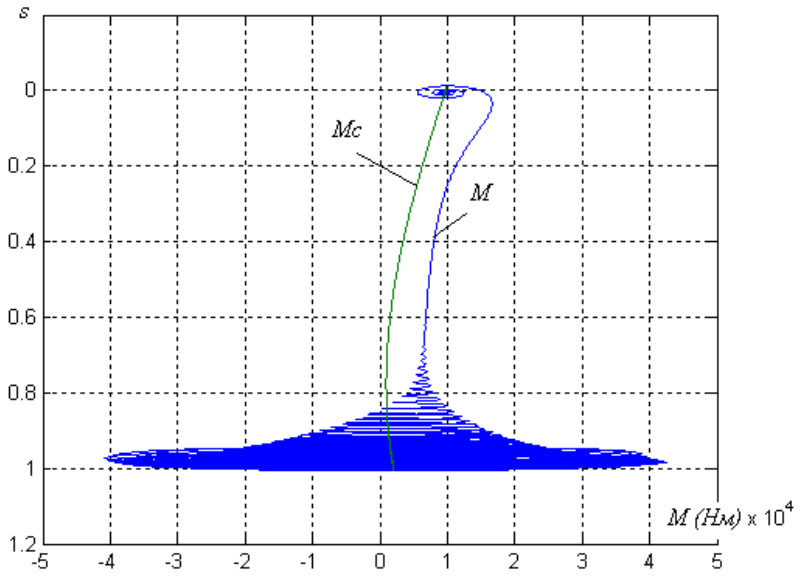


Рисунок 3.5.5 - Фазовая траектория (момент от скольжения) пуска асинхронной машины от трансформатора (прямой пуск)

Диаграммы (рисунок 3.5.4 и 3.5.5) отражают пуск двигателя на открытую задвижку, где двигатель достигает скорости близкой к номинальной. Имеет место значительный запас динамического момента двигателя за все время пуска, но также необходимо отметить знакопеременный момент, который влияет на механизмы привода и сокращает срок их службы.

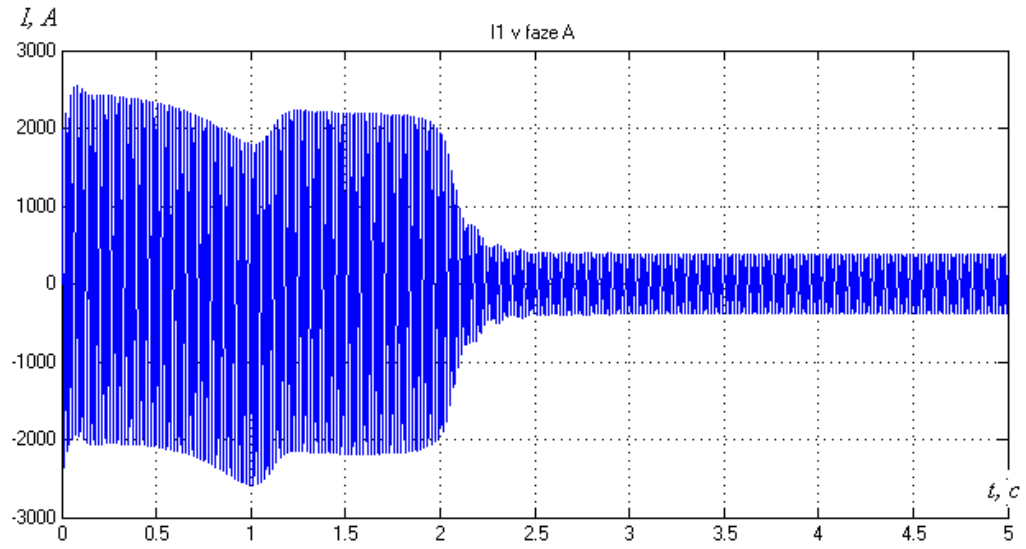


Рисунок 3.5.6 - Ток в фазе А в системе «сеть-трансформатор-АКЗ» при пуске двигателя

Судить о величине провала напряжения предлагается по амплитудам синусоид. Для визуальной оценки провала напряжения уровень фазного ЭДС, подаваемого на схему замещения, представлен максимумами синусоиды фазного напряжения (рисунок 3.5.7).

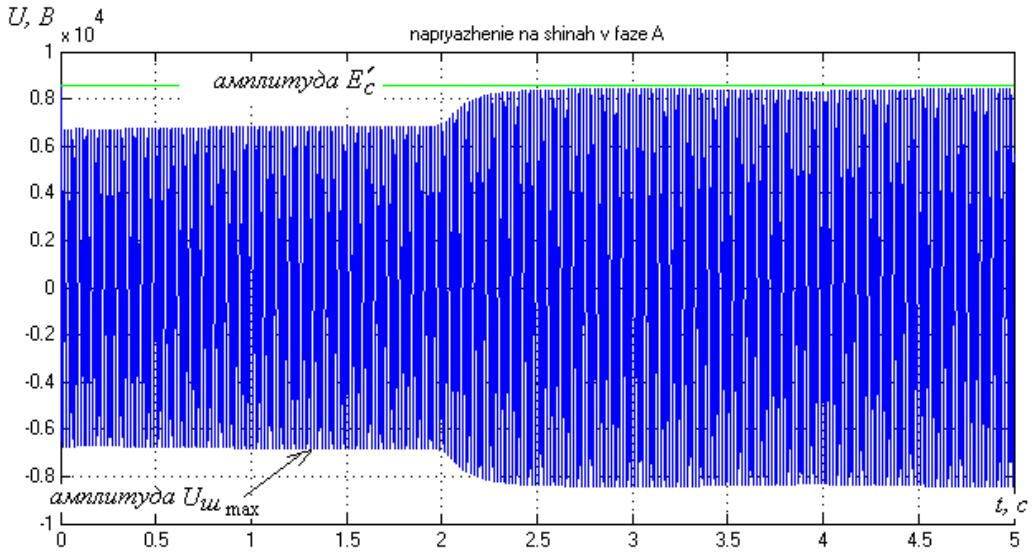


Рисунок 3.5.7 - Напряжения в фазе А (Вольт) в системе «сеть-трансформатор-АКЗ»:

E'_c — амплитуда фазного ЭДС $\sqrt{2}\frac{10500}{\sqrt{3}}$;

$U_{ш\ мах}$ — амплитуда фазного напряжения на шинах

В увеличенном виде диаграммы (рисунок 3.5.7) легко заметить, что в начальный момент пуска провал напряжения максимальный из-за броска тока (рисунок 3.5.8).

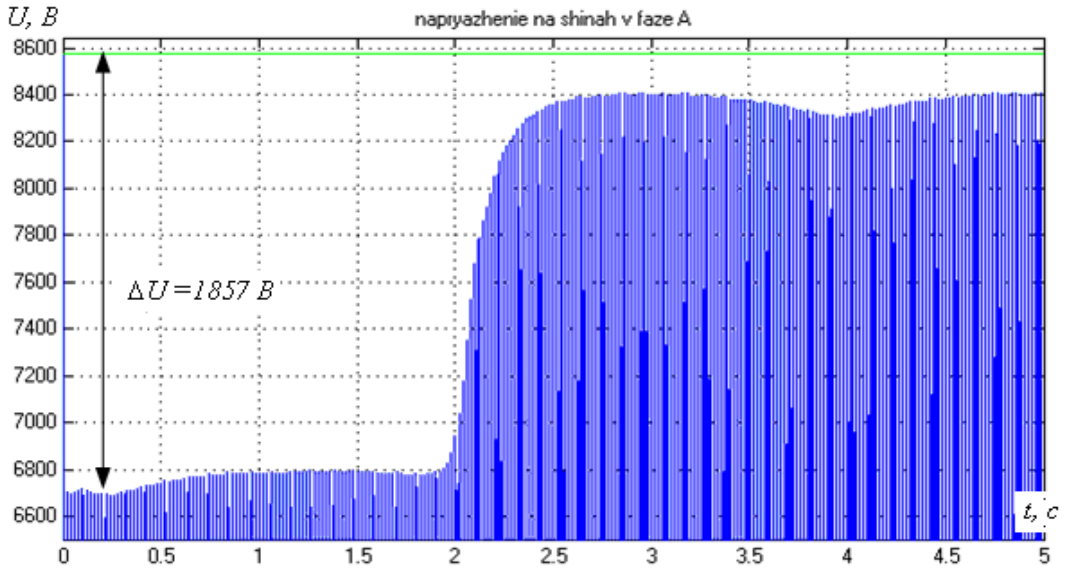


Рисунок 3.5.8 - Увеличенный рисунок 3.5.7

Из рисунка 3.5.8. видно, что провал напряжения превосходит допустимый предел в 2 раза (допустимое отклонение напряжения 10%), т.е. в данном случае провал составил 21,7%.

По упрощенным инженерным расчетам раздела 3.2 провал напряжения составил 22% на основе тех же исходных данных, следовательно упрощенный расчет применим для инженерных расчетов с погрешностью 3-5%.

Достоинством уточненного расчета является оперативность, т.к. используется одна и та же математическая модель, а меняются лишь ее исходные данные.

Математическим экспериментом для модели «сеть-УПП-АКЗ» было задание линейно возрастающего напряжения, где провал напряжения не превосходил допустимый предел в 10%, а пуск двигателя проходил без ударных токов и колебаний момента (рисунок 3.5.9) в отличие от прямого пуска (рисунок 3.5.5). Свободная составляющая тока в переходном процессе исключена.

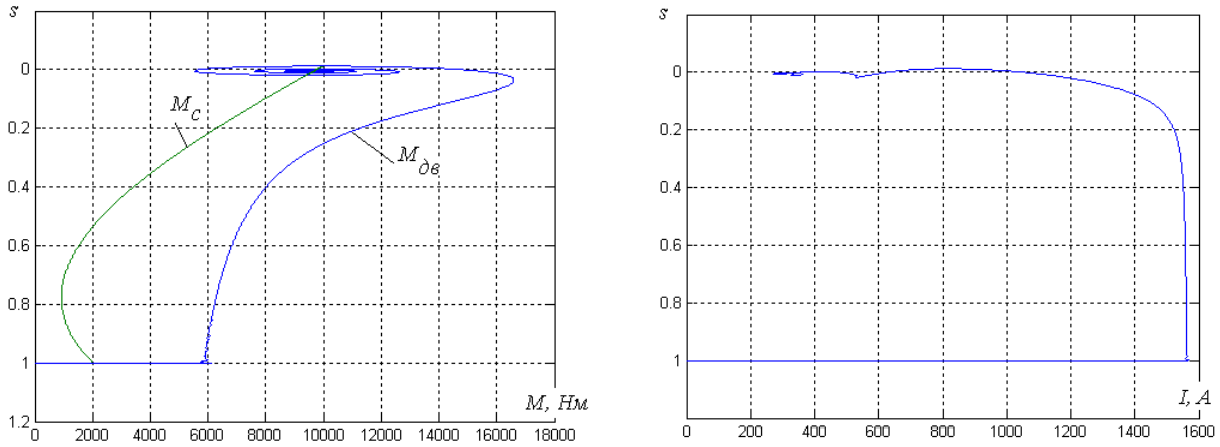


Рисунок 3.5.9 - Момент и действующие значение тока в фазе двигателя при плавном задании напряжения от 0 до номинального значения (плавный пуск)