

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'_t (Ом);
- 2) активное R_k и индуктивное x_k 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·м²);

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_l (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 $M_c = f(s)$ (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 Кирхгофа в данном случае:

$$U_{\text{ш}}(t) = E_c'(t) - (L_r' + L_c') \frac{dI_1}{dt}, \quad (3.5.1)$$

где L_r' и L_c' – индуктивности трансформатора и системы, приведенные к вторичной обмотке трансформатора; $U_{\text{ш}}$ – фазное напряжение на шинах; $E_c'(t)$ – внешняя ЭДС (фазная) системы, приведенная к вторичной обмотке трансформатора (базовая ЭДС).



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

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

б) схема замещения: E'_c – фазная ЭДС, приведенная к вторичной обмотке трансформатора, $U_{ш}$ – фазное напряжение на шинах, I_1 – ток в системе, I_2'' – ток в роторе двигателя, I_{12} – ток в цепи намагничивания $R_{1т}$ и $x_{1т}$ – 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:

$$x_{1т} = \frac{2x_1x_{12}}{x_{12} + \sqrt{x_{12}^2 + 4x_1x_{12}}} \quad (3.5.2)$$

2. Определяется переводной коэффициент, учитывающий влияние контура намагничивания:

$$C_1 = \frac{x_1}{x_{1т}} \quad (3.5.3)$$

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

$$R_{1т} = \frac{R_1}{C_1} \quad (3.5.4)$$

$$R'_{2т} = \frac{R'_2}{C_1^2} \quad (3.5.5)$$

$$x'_{2т} = \frac{X'_2}{C_1^2} \quad (3.5.6)$$

$$R'_{2тк} = \frac{R'_{2к}}{C_1^2} \quad (3.5.7)$$

$$x'_{2тк} = \frac{x'_{2к}}{C_1^2} \quad (3.5.7)$$

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 ($R_{1\Gamma}$ и $x_{1\Gamma}$) добавляются все последовательно включенные сопротивления системы электроснабжения.

Обобщенная схема замещения приведена на рисунке 3.5.2.

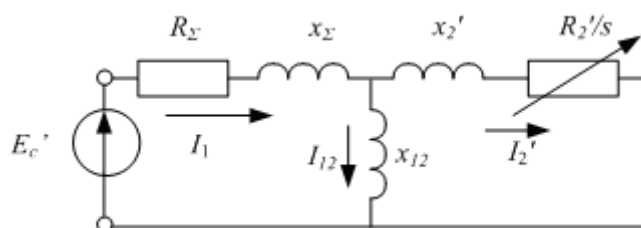


Рисунок 3.5.2 - Обобщенная (преобразованная) схема замещения системы «сеть-трансформатор-АКЗ»

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

$$\omega_c = 2\pi f \quad (3.5.8)$$

где f – частота сети (Гц).

Собственная индуктивность статорной цепи определяется из рис. 1.5 как

$$L_{1\Sigma} = \frac{x'_c + x'_\Gamma + x_k + x_{1\Gamma}}{\omega_c} \quad (3.5.9)$$

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

$$L'_{2\Gamma} = \frac{x'_{2\Gamma}}{\omega_c} \quad (3.5.10)$$

$$L'_{2\Gamma\kappa} = \frac{x_{2\Gamma\kappa}}{\omega_c} \quad (3.5.11)$$

Активное сопротивление статорной цепи

$$R_{1\Sigma} = R_{1\Gamma} + R_k \quad (3.5.12)$$

Активное сопротивление ротора остается без изменений.

Индуктивность цепи намагничивания определяется

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

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

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

$$L'_r = \frac{x'_r}{\omega_c} . \quad (3.5.15)$$

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

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

Приведенная индуктивность определяется из полученных данных (3.5.16) как

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

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:

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

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

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_{1\alpha} = L_1 i_{1\alpha} + L_{12} i_{2\alpha}, \\ \Psi_{1\beta} = L_1 i_{1\beta} + L_{12} i_{2\beta}, \\ \Psi_{2\alpha} = L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}, \\ \Psi_{2\beta} = L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}. \end{array} \right. \quad (3.5.19)$$

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.

$$\vec{\Psi}^T = [i_{1\alpha} \quad i_{1\beta} \quad \Psi_{2\alpha} \quad \Psi_{2\beta}].$$

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

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

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

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

Обозначив приведенную индуктивность как

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

получим выражения для потокосцеплений обмоток статора:

$$\Psi_{1\alpha} = L_{\text{пр}} i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2\alpha}, \quad (3.5.21)$$

$$\Psi_{1\beta} = L_{\text{пр}} i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} \Psi_{2\beta}.$$

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

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

то есть

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1\alpha} = R_{\Sigma} i_{1\alpha} + L_{\text{пр}} s i_{1\alpha} + \frac{L_{12}}{L_2} s \Psi_{2\alpha}, \\ U_{1\beta} = R_{\Sigma} i_{1\beta} + L_{\text{пр}} s i_{1\beta} + \frac{L_{12}}{L_2} s \Psi_{2\beta}, \\ U_{2\alpha} = -\frac{R_2 L_{12}}{L_2} i_{1\alpha} + \frac{R_2}{L_2} \Psi_{2\alpha} + s \Psi_{2\alpha} + \omega \Psi_{2\beta}, \\ U_{2\beta} = -\frac{R_2 L_{12}}{L_2} i_{1\beta} + \frac{R_2}{L_2} \Psi_{2\beta} + s \Psi_{2\beta} - \omega \Psi_{2\alpha}. \end{array} \right. \quad (3.5.22)$$

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

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

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

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

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

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

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

где p – число пар полюсов машины.

Уравнение движения:

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

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

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

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.

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	
r_1	x_1	x_{12}	r_2'	x_2'	$r_{2'k}$	$x_{2'k}$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
0,13	1,902	89,4	0,112	2,962	0,405	1,227

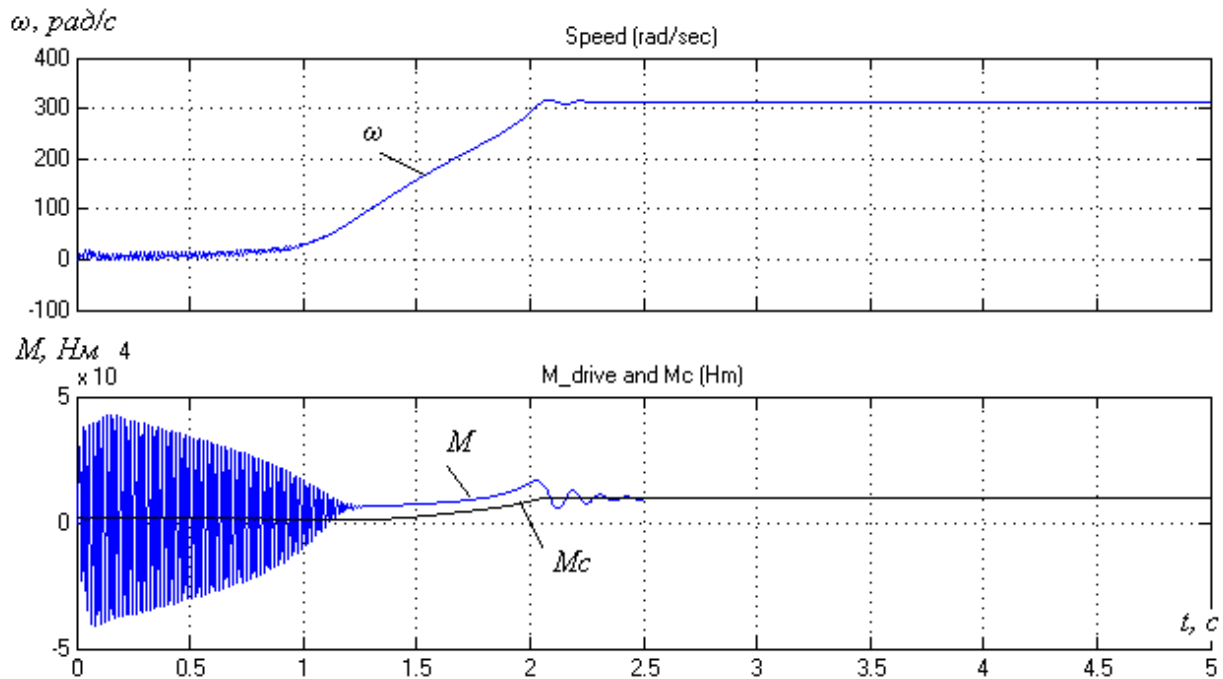


Рисунок 3.5.4 - Переходный процесс: скорость (рад/с), момент на валу и момент сопротивления (Н·м)

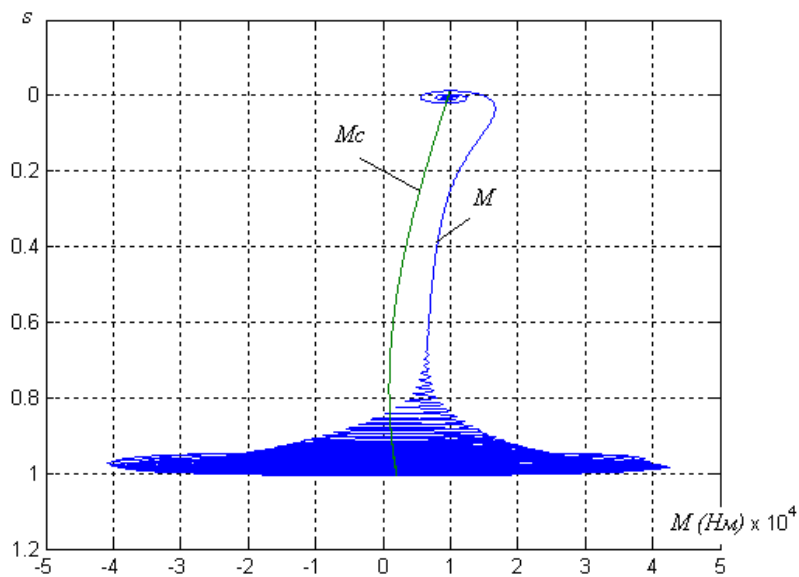


Рисунок 3.5.5 - Фазовая траектория (момент от скольжения) пуска асинхронной машины от трансформатора (прямой пуск)

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.

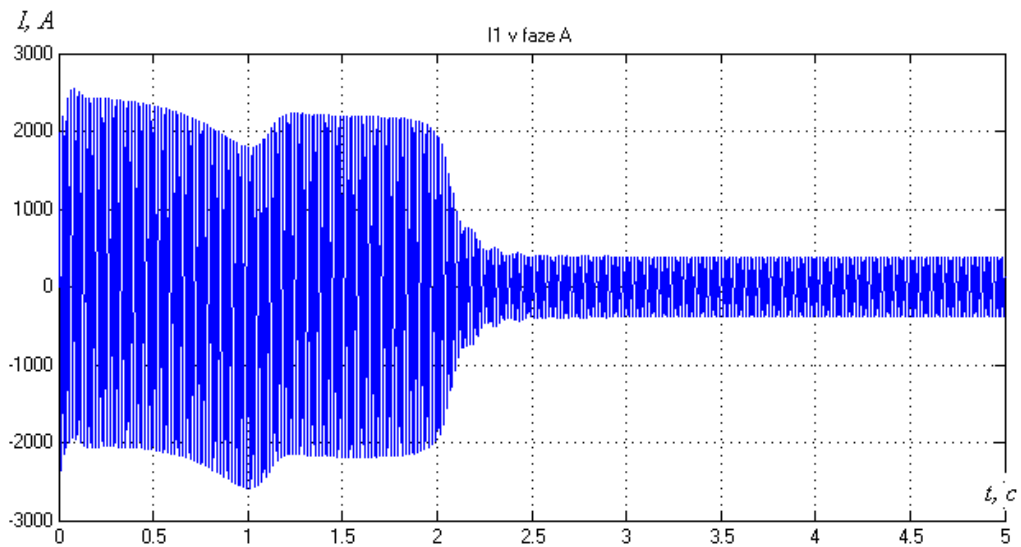


Рисунок 3.5.6 - Ток в фазе А в системе «сеть-трансформатор-АКЗ» при пуске двигателя

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).

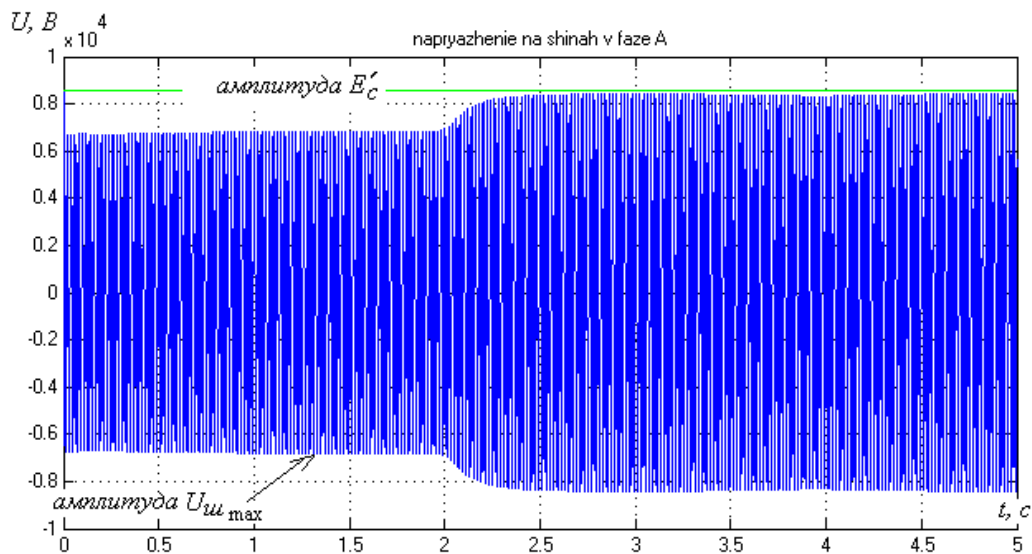


Рисунок 3.5.7 - Напряжения в фазе А (Вольт) в системе «сеть-трансформатор-АКЗ»:

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

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

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).

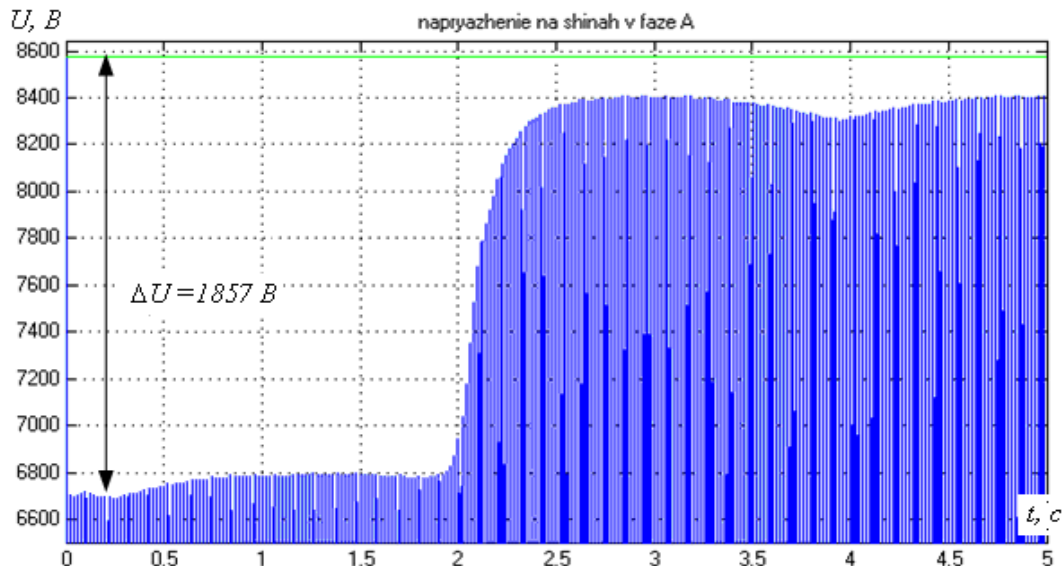


Рисунок 3.5.8 - Увеличенный рисунок 3.5.7

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.

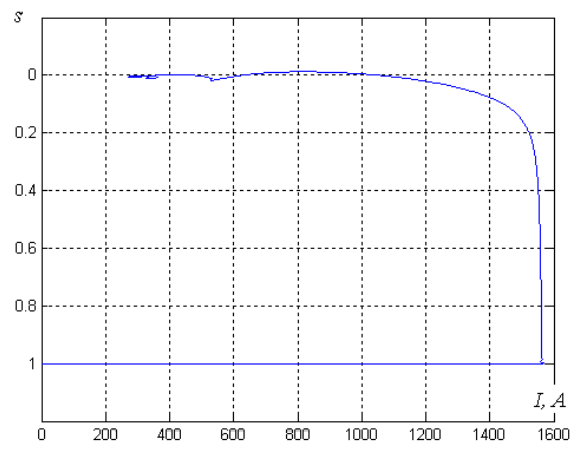
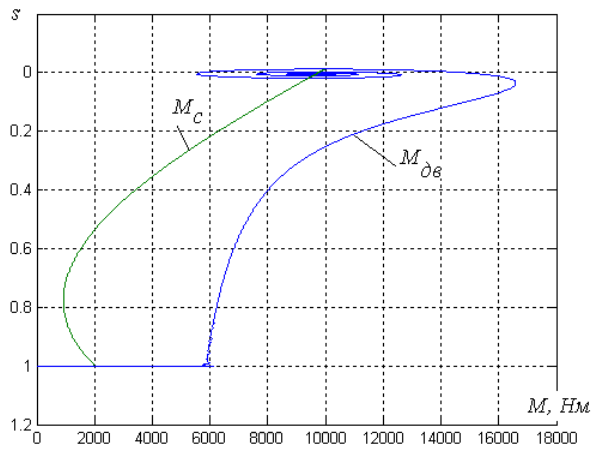


Рисунок 3.5.9 - Момент и действующее значение тока в фазе двигателя при плавном задании напряжения от 0 до номинального значения (плавный пуск)