

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПРИ ОТКЛОНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

Талал Ал Ас

Донецкий государственный технический университет

svf@elf.dgtu.donetsk.ua

*Is offered a mathematical system model of electric provision of own electric power station needs, destined for analysis of establishing and transitional processes attached to effort deviations and frequency. A model of asynchronous motor with shortly reserved rotor and deep slots provides for current forcing out effects calculation in rotor, power losses and saturation magnetic wire on way of main magnetic stream and dispersion streams.*

Главной особенностью систем электроснабжения собственных нужд (с.н.) электростанций является применение трансформаторов рабочего и резервного питания с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также применение асинхронных двигателей (АД) большой единичной мощности (200-8000 кВт), короткозамкнутый ротор которых выполняется глубокопазым с целью улучшения пусковых и рабочих характеристик за счет использования эффекта вытеснения тока.

Для анализа стационарных и переходных процессов в системах с.н. требуется разработка математических моделей как их отдельных элементов (трансформаторов, асинхронных двигателей, шинопроводов и др.), так и системы в целом. Особенно это актуально для прогноза сбалансированного деления узлов нагрузки при глубоких снижениях частоты. Этим вопросам посвящены работы [1,3,5]. К основным недостаткам этих работ относятся возможность применения разработанных моделей для анализа только стационарных [1,5] или только переходных [3] процессов. Приближенный учет эффектов вытеснения тока и насыщения магнитных цепей с помощью эмпирических зависимостей [1,5] вызывает в ряде случаев несоответствие расчетов реальным физическим процессам или несоответствие расчетных данных в синтезированной схеме каталожным [2]. Кроме того, в [2-5] отсутствует возможность выполнения расчетов потребляемой мощности и ее потерь, токов статора, ротора и других параметров двигателей и системы с.н. для важных эксплуатационных режимов, которые сопровождаются отклонением частоты и величины напряжения и др.

В данной работе предлагается математическая модель системы электроснабжения с.н., не имеющая указанных недостатков, что достигнуто за счет более корректного учета указанных выше явлений вытеснения тока и насыщения магнитной системы асинхронного двигателя, а также учета потерь и явлений взаимной индукции между расщепленными обмотками трансформатора. Модель позволяет выполнить анализ

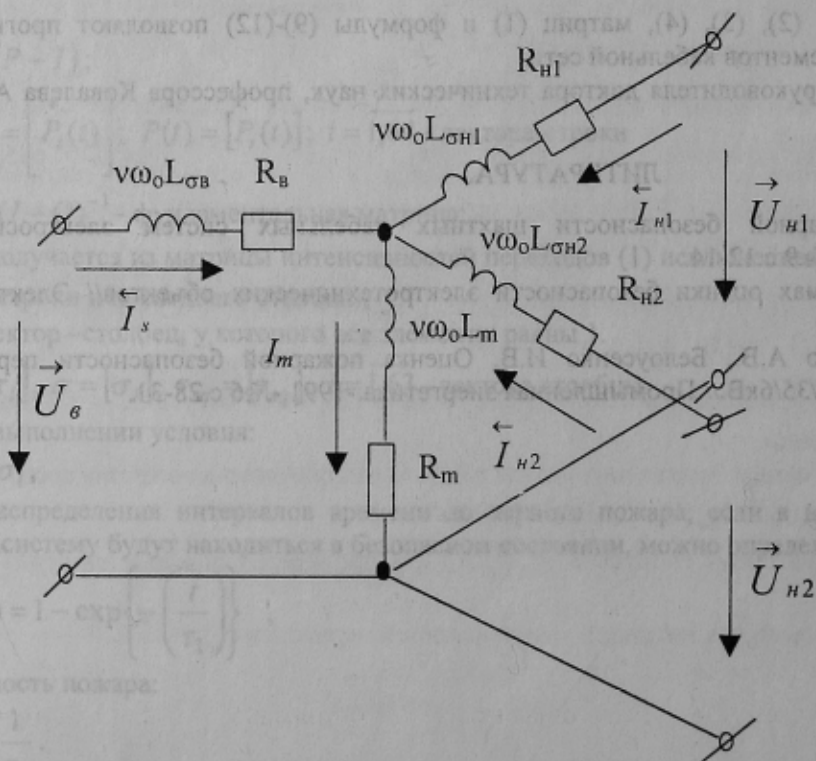


Рисунок 1- Эквивалентная схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой

процессов в системе с.н. для различных напряжений и частоты.

Для типовой схемы электроснабжения с.н. ТЭС математическая модель представлена уравнениями рабочего и резервного трансформаторов, асинхронных двигателей с.н., шинных или кабельных магистралей резервного питания с.н.

Расчетная схема замещения трансформатора с расщепленной обмоткой, приведенная к одной ступени напряжения, показана на рисунке 1.

Уравнения равновесия э.д.с. для контуров, образованных обмотками высшего и низшего напряжений трансформатора, имеют вид.

$$\begin{bmatrix} L_{\sigma\sigma} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_{\sigma\sigma1} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_{\sigma\sigma2} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \vec{i}_\sigma \\ p \vec{i}_{\sigma1} \\ p \vec{i}_{\sigma2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{U}_\sigma - R_\sigma \vec{i}_\sigma \\ \vec{U}_{\sigma1} - R_{\sigma1} \vec{i}_{\sigma1} \\ \vec{U}_{\sigma2} - R_{\sigma2} \vec{i}_{\sigma2} \end{bmatrix},$$

где  $p = d/dt$  для переходных режимов и  $p = j\omega$  – для стационарных режимов.

Параметры схемы (рис. 1), определяем, используя каталожные данные и данные опытов короткого замыкания и холостого хода (хх) трансформатора:

Схему замещения глубокопазного асинхронного двигателя (рис. 2) примем с учетом явления вытеснения тока в роторе путем представления последнего двумя эквивалентными контурами, с учетом насыщения главного магнитного потока, представив индуктивность ветви намагничивания, на основе характеристики хх машины, как нелинейную функцию от тока намагничивания, а насыщение магнитных потоков рассеяния всей машины с помощью нелинейной индуктивности обмотки статора, являющейся функцией тока статора.

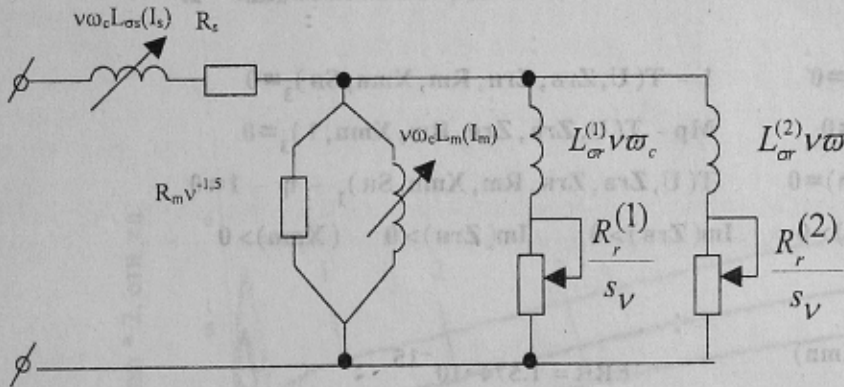


Рисунок 2 - Эквивалентная схема замещения глубокопазной асинхронной машины для стационарных режимов, в которой учтены явления вытеснения тока в роторе и насыщение магнитных цепей

При синтезе параметров указанной схемы замещения будем исходить из известных каталожных данных двигателя, из типовой характеристики хх двигателей с.н. и зависимости сопротивления рассеяния статора от тока, приведенной в [3] и полученной на основе расчетно-экспериментальных исследований. Эта зависимость  $L_\sigma(i)$  может быть представлена, как

$$L_{\sigma s}(i_s) = L_{\sigma s}^{ном} K(i_s, k_0); K(i_s, k_0) = [k_0 - (k_0 - 1)e^{i_s(k_0 - 1)}],$$

где  $i_s$  - ток статора в отн. ед.;  $k_0 = 0,6 - 0,9$  начальное значение коэффициента насыщения при пусковом токе статора с заторможенным ротором и  $U_s = U_{ном}$ ;  $L_{\sigma s}^{ном}$  - значение индуктивности рассеяния при номинальном токе статора.

Влияние частоты питающего напряжения учтено в схеме замещения (рис. 2) с помощью коэффициента  $v\omega_0$ , на который умножаются соответствующие индуктивности. При этом  $\omega_0 = 314,15 \text{ с}^{-1}$ , что соответствует номинальной частоте  $f_0 = 50 \text{ Гц}$ , а  $v$  - это отношение текущей частоты  $f$  к номинальной  $f_0$ .

Как известно [4], отклонение частоты питающего напряжения от номинальной влияет на потери в стали, что в схеме замещения (рис. 2) учтено умножением сопротивления  $R_m$ , соответствующего частоте  $f_0$ , на коэффициент  $v$  в степени  $-1,5$



Зависимость индуктивности ветви намагничивания от тока намагничивания на основе характеристики хх [3] была нами получена с использованием ее аппроксимации отношением двух полиномов. Ниже она приведена в виде аналитической зависимости, справедливой для всех двигателей

$$L_m(i_m) = L_m^{НОМ} \frac{a \left[ \frac{i_m}{i_m^{НОМ}} \right] + b \left[ \frac{i_m}{i_m^{НОМ}} \right]^2 + c}{d \left[ \frac{i_m}{i_m^{НОМ}} \right] + e \left[ \frac{i_m}{i_m^{НОМ}} \right]^2 + f},$$

где  $L_m^{НОМ}$  - значение индуктивности ветви намагничивания при номинальном токе намагничивания  $i_m^{НОМ}$ , имеющем место при номинальном напряжении статора и холостом ходе двигателя.  $a = 583,79$ ;  $b = -183,7$ ;  $c = 0,00275$ ;  $d = 347,7$ ;  $e = 1,034$ ;  $f = 51,966$ .

Для синтеза схемы замещения составим минимизируемую функцию цели, равную сумме квадратов отклонений вращающих моментов двигателя, рассчитанных по схеме замещения, и каталожных для скольжений  $S_{НОМ}$ ,  $S_{кр}$  и 1, токов статора для  $S_{НОМ}$  и 1, к.п.д. двигателя расчетного и каталожного при  $S_{НОМ}$ . Ниже приведен фрагмент MathCad-документа, с помощью которого осуществлялся синтез параметров эквивалентных схем замещения асинхронного двигателя.

GIVEN

$$\begin{aligned} 1 - T(U, Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн}, S_n)_2 &= 0 & 1 - T(U, Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн}, S_n)_3 &= 0 \\ I_p - T(U, Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн}, 1)_2 &= 0 & M_p - T(U, Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн}, 1)_3 &= 0 \\ M_m - M_{max}(U, Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн}) &= 0 & T(U, Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн}, S_n)_1 + \eta - 1 &= 0 \\ \text{Re}(Z_{гв}) > 0 & \quad \text{Re}(Z_{гн}) > 0 & \quad (R_m) > 0 & \quad \text{Im}(Z_{гв}) > 0 & \quad \text{Im}(Z_{гн}) > 0 & \quad (X_{мн}) > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_{гв} \\ Z_{гн} \\ R_m \\ X_{мн} \end{aligned} = \text{Minerr}(Z_{гв}, Z_{гн}, R_m, X_{мн})$$

$$\text{ERR} = 1.574 \cdot 10^{-15}$$

В качестве примера приведем значения в отн.ед. найденных по каталожным данным по изложенной методике параметров схем замещения для трансформатора с.н. типа ТРДНС 40000/110:  $R_s=0,002124$ ;  $X_{сн}=-,045$ ;  $R_{н1}=R_{н2}=0,004247$ ;  $X_{сн1}=X_{сн2}=0,15$ ;  $R_m=28,072$ ;  $X_m=179,68$ , а также для асинхронного двигателя типа ВДД 213/54-16 мощностью 1700 кВт:  $Z_s=0,0054 + j0,093$ ;  $Z_r^{(1)}=0,152 + j0,142$ ;  $Z_r^{(2)}=0,0065 + j0,162$ ;  $R_m=21$ ;  $X_m^{НОМ}=2,225$ . При проверке пусковых токов и моментов, найденных по схеме замещения, они совпали с исходными каталожными с высокой точностью (расхождение менее 0,01 процента). Зависимости от скольжения тока статора и вращающего момента для различных напряжений при  $f = \text{const}$  приведены на рисунке 3, а для различных частот при  $U = \text{const}$  - на рисунке 4. Как видно из рисунков при понижении напряжения или при повышении частоты вращающий момент и ток статора АД снижаются.

Функциональные зависимости критического момента и критического скольжения от величины питающего напряжения (таблица 1) и разных значений частоты (таблица 2) позволяют выявить влияние вытеснения тока и насыщения на эти величины.

Таблица 1- Данные максимального момента и критического скольжения АД типа ВДД 213/54-16 при изменении напряжения питания

Показатель	Кратность напряжения по отношению к номинальному				
	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
$M_{\text{мкс}}$	2,027	2,27	2,5	2,76	3,02
$S_{кр}, \%$	2,586	2,588	2,59	2,6	2,623

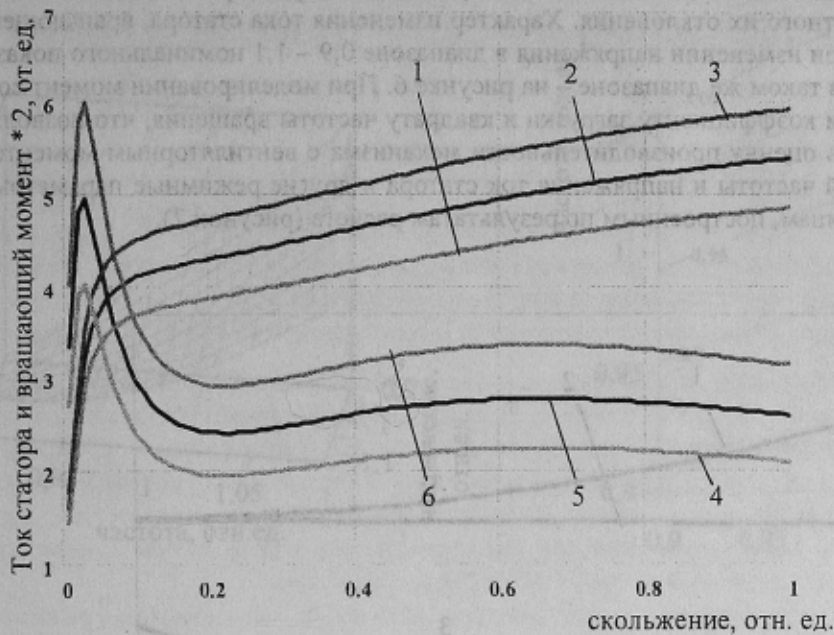


Рисунок 3 – Пусковые характеристики тока статора (1,2,3) и вращающего момента (4,5,6) асинхронного двигателя типа ВДД 213/54–16 при напряжениях соответственно равных 0,9, 1 и 1,1 от номинального

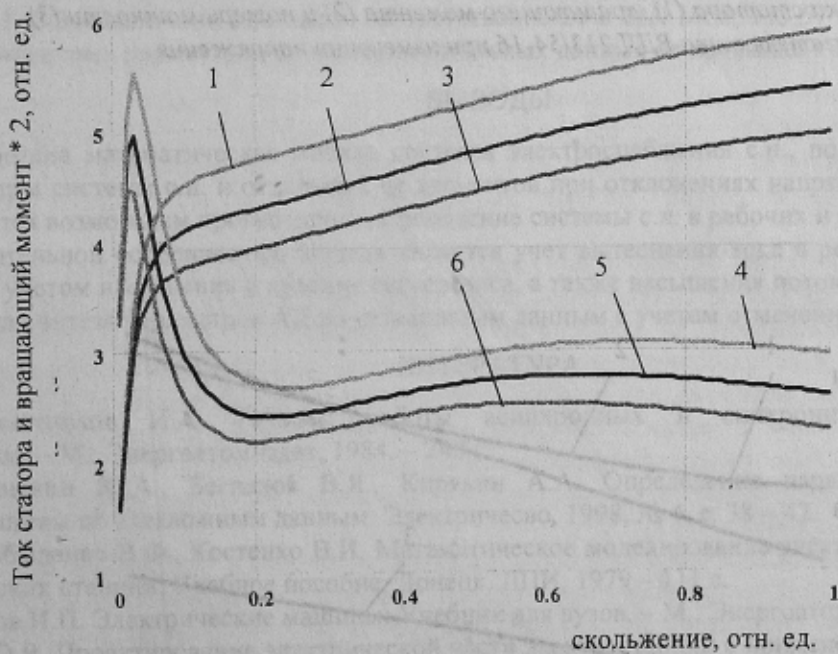


Рисунок 4 – Пусковые характеристики тока статора (1,2,3) и вращающего момента (4,5,6) асинхронного двигателя типа ВДД 213/54–16 при частотах сети соответственно равных 0,9, 1 и 1,1 от номинальной

Таблица 2- Данные максимального момента и критического скольжения АД типа ВДД 213/54–16 при изменении частоты питания

Показатель	Кратность частоты				
	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
$M_{\text{мвкс}}$	2,768	2,627	2,5	2,38	2,28
$S_{\text{кр, \%}}$	2,89	2,75	2,59	2,48	2,36

Разработанная модель позволяет оценить влияние на режимные параметры отклонений частоты, напряжения, а также влияние совместного их отклонения. Характер изменения тока статора, вращающего момента и суммарных потерь двигателя при изменении напряжения в диапазоне 0,9 – 1,1 номинального показан на рисунке 5, а при изменении частоты в таком же диапазоне – на рисунке 6. При моделировании момент сопротивления принимался пропорциональным коэффициенту загрузки и квадрату частоты вращения, что позволяет по значению вращающего момента дать оценку производительности механизма с вентиляторным моментом сопротивления. Для различных значений частоты и напряжения ток статора и другие режимные параметры могут быть найдены по графикам или таблицам, построенным по результатам расчета (рисунок 7).

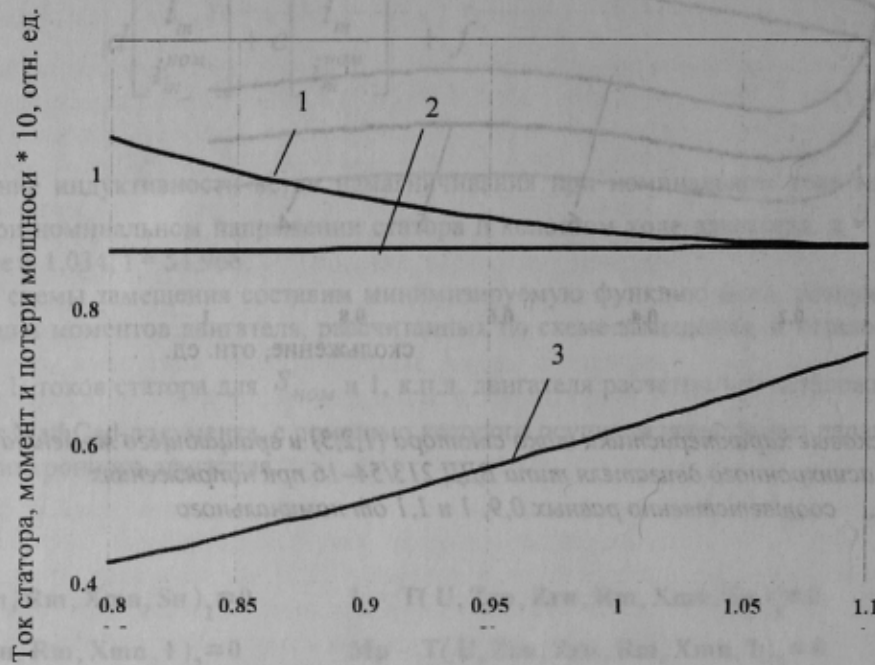


Рисунок 5 - Изменение тока статора (1), вращающего момента (2) и потерь мощности (3) асинхронного двигателя типа ВДД 213/54-16 при изменении напряжения

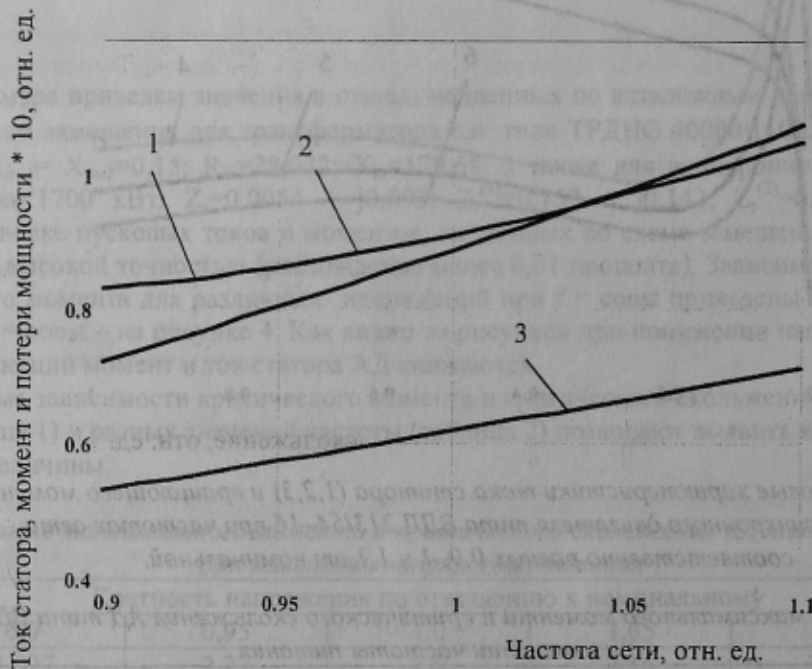


Рисунок 6 - Изменение тока статора (1), вращающего момента (2) и потерь мощности (3) асинхронного двигателя типа ВДД 213/54-16 при изменении частоты



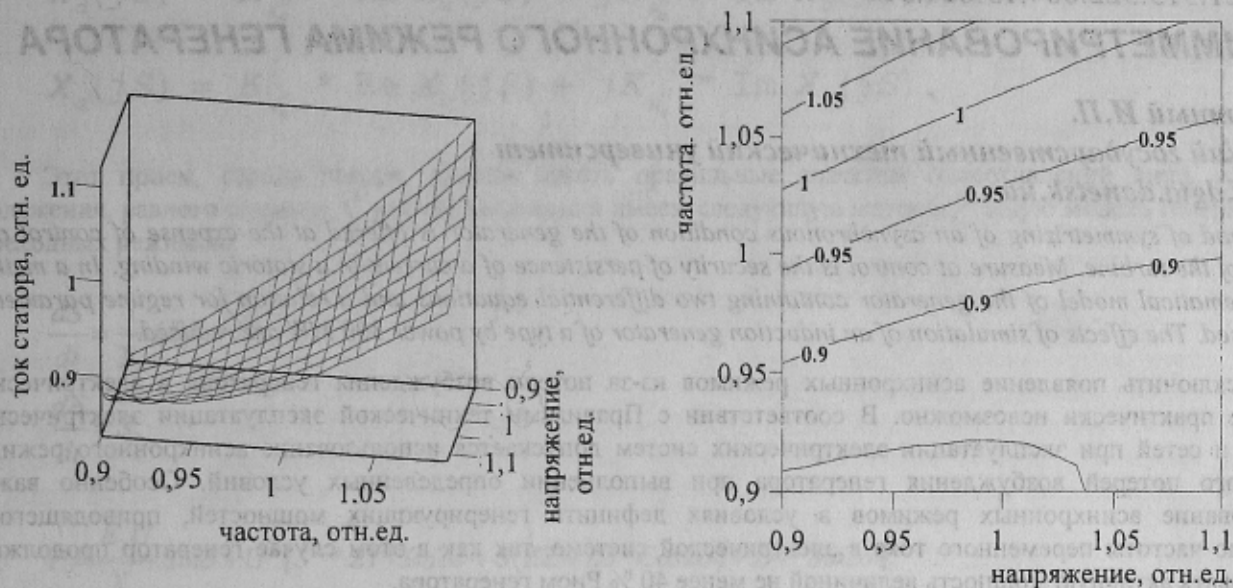


Рисунок 7 - Характер изменения тока статора в функции величин напряжения статора и частоты питающей сети

Приведенная математическая модель позволяют выполнить анализ режимов работы и потерь для оптимальных значений напряжения и частоты как для отдельных элементов, так и для системы с.н. в целом. При моделировании с учетом большого количества двигателей на каждом шаге расчета сначала находим напряжение на сборных шинах, а затем из уравнений для отдельных элементов итерационным методом определяем значения их текущих параметров режима. Приведем результаты расчета потребляемой мощности, тока трансформатора и потерь мощности в системе с.н. блока 300 МВт при номинальном питающем напряжении 115 кВ для частот 50 и 47,5 Гц. Эти величины составили соответственно 26 и 23,9 МВт; 153,57 и 161,65 А; 6,2 и 5,8 %. Отклонение этих расчетных параметров от экспериментальных данных не превышает 2,2%.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель системы электроснабжения с.н., позволяющая определить режимные параметры системы с.н. и отдельных ее элементов при отклонениях напряжения и частоты, в связи с чем представляется возможным прогнозировать поведение системы с.н. в рабочих и аварийных режимах.
2. Отличительной особенностью модели является учет вытеснения тока в роторе глубокопазных АД и потерь в стали с учетом насыщения и явления гистерезиса, а также насыщения потоков рассеяния. Предложен и реализован метод синтеза параметров АД по каталожным данным с учетом отмеченных явлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сыромьятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г.Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. Электричество, 1998, № 4, с. 38 – 42.
3. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. Учебное пособие. Донецк, ДПИ, 1979 – 111 с.
4. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
5. Баков Ю.В. Проектирование электрической части электростанций с применением ЭВМ: Учеб. пособие для вузов – М.: Энергоатомиздат, 1991 – 272 с.