

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН С УЧЁТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ И ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКОВ В РОТОРЕ

Сивокобыленко В.Ф.

Донецкий национальный технический университет

svf@elf.dgtu.donetsk.ua

The mathematical model of the asynchronous machine in which saturation of the main magnetic stream and streams of dispersion are taken into account with the help static and dynamic inductances, and replacement of currents in a rotor and losses in steel - is developed due to introduction of additional equivalent windings on a rotor and stator. Examples of calculations are resulted.

Как показано в работах [1-4], на современном этапе актуальным является совершенствование математических моделей асинхронных машин (АМ) за счёт сокращения числа допущений, обычно принимаемых для классической модели [5]. Для решения этой задачи в [3] предложено учитывать насыщение путей главного магнитного потока с помощью коэффициентов, обратных статическим и динамическим индуктивностям, а насыщением магнитных потоков рассеяния при этом пренебрегают. Потери в стали статора в [3] учитывают с помощью активного сопротивления, включённого последовательно с главной индуктивностью, а в [4] – путём введения в схему замещения дополнительного фиктивного контура с нелинейным активным сопротивлением, являющимся функцией главного потокосцепления. Для учета эффекта вытеснения тока в стержнях обмотки ротора в [6,7] предложено схему замещения ротора представлять в виде двух-трёх параллельно включённых R, L – звеньев, параметры которых находят из условия совпадения их частотных характеристик с исходными путём решения нелинейной системы уравнений методами минимизации [7]. Насыщение потоков рассеяния в [8] учитывают представлением индуктивности рассеяния статора нелинейной функцией от тока статора.

Однако математические модели для совместного учёта всех указанных выше явлений отсутствуют, что является одной из причин случаев неадекватности осциллограмм натуральных процессов моделируемым [1].

В данной работе ставится задача разработки более совершенной математической модели асинхронной машины, с помощью которой можно было бы моделировать как стационарные, так и переходные режимы работы. Для решения этой задачи рассмотрим возможность учета в модели явлений насыщения главного магнитного потока и потоков рассеяния, вытеснения токов в роторе, а также потерь в стали и в меди обмоток. При этом будем полагать известными зависимости взаимной индуктивности $L_m(i_m)$ от тока намагничивания i_m , индуктивностей рассеяния статора от тока статора $L_{\sigma s}(i_s)$ и индуктивностей рассеяния ротора, например двух эквивалентных контуров глубокопазного ротора $L_{\sigma r1}(i_{r1}), L_{\sigma r2}(i_{r2})$, от соответствующих токов ротора, а также параметры дополнительного фиктивного короткозамкнутого контура на статоре для учёта потерь в стали. Как будет показано далее, более предпочтительно нелинейные индуктивности представлять в виде функциональных зависимостей от токов, а не от потокосцеплений, как это предпринято, например, в работах [3,4]. Исходной информацией для нахождения зависимости $L_m(i_m)$ служит характеристика холостого хода, а для зависимостей индуктивностей рассеяния статора и ротора от токов – характеристики короткого замыкания, полученные при различных напряжениях. Параметры эквивалентных контуров ротора можно определить по экспериментальным зависимостям от скольжения активного и индуктивного сопротивлений ротора или же по известным каталожным данным АМ. Методика расчетов приведена в [7,8]. Преимущество представления ротора эквивалентной многоконтурной схемой заключается в том, что при этом с большей точностью описываются динамические переходные режимы работы АМ.

Для анализа стационарных режимов АМ с учетом потерь в стали обычно в ветви намагничивания предусматривают активное сопротивление R_m , включенное последовательно с взаимной индуктивностью. Однако для анализа динамических режимов более точным будет представление ветви намагничивания в виде двух параллельно включенных ветвей, одна из которых приблизительно равна L_m , а вторая содержит индуктивность рассеяния и активное сопротивление. Значения последних для этого короткозамкнутого контура на статоре можно найти, зная R_m и L_m из решения дополнительной нелинейной системы уравнений.

С учётом указанных явлений схема замещения АМ для переходных процессов принимает вид, показанный на рис.1. Она содержит по две обмотки статора в каждой оси (α, β или x, y): основную- с параметрами R_s и $L_{\sigma s}(i_s)$ и дополнительную- для учёта потерь в стали с параметрами $R_{fe}(i_{fe})$ и $L_{\sigma fe}$. Глубокопазный ротор с целью учета эффекта вытеснения токов заменен эквивалентным с двумя обмотками в каждой оси, имеющими параметры $R_{r1}, L_{\sigma r1}(i_{r1})$ и $R_{r2}, L_{\sigma r2}(i_{r2})$

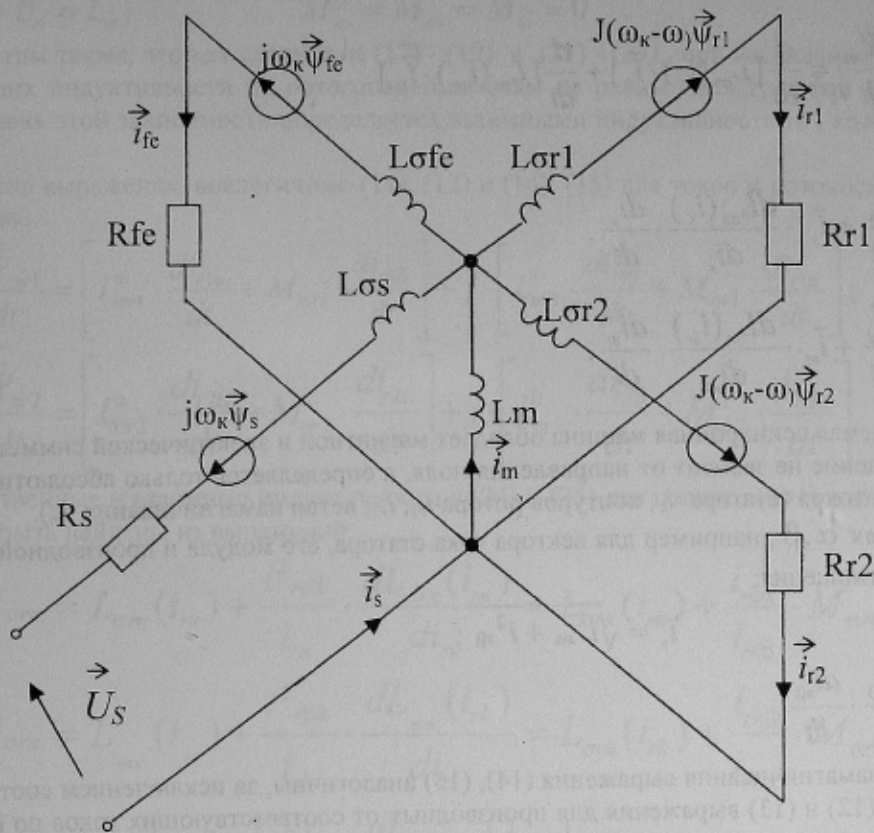


Рисунок 1 - Схема замещения асинхронной машины для переходных процессов

Схеме замещения (рис.1) в системе координат, вращающейся с угловой скоростью ω_k , соответствуют уравнения :

$$\vec{U}_s = R_s \cdot \vec{i}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \cdot \vec{\Psi}_s, \quad (1)$$

$$0 = R_{r1} \cdot \vec{i}_{r1} + \frac{d\vec{\Psi}_{r1}}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \vec{\Psi}_{r1}, \quad (2)$$

$$0 = R_{r2} \cdot \vec{i}_{r2} + \frac{d\vec{\Psi}_{r2}}{dt} + j(\omega_k - \omega) \cdot \vec{\Psi}_{r2}, \quad (3)$$

$$0 = R_{fe} \cdot \vec{i}_{fe} + \frac{d\vec{\Psi}_{fe}}{dt} + j\omega_k \cdot \vec{\Psi}_{fe}, \quad (4)$$

$$\vec{\Psi}_s = L_{\sigma s}(i_s) \cdot \vec{i}_s + L_m(i_m) \cdot \vec{i}_m = \vec{\Psi}_{\sigma s} + \vec{\Psi}_m, \quad (5)$$

$$\vec{\Psi}_{r1} = L_{\sigma r1}(i_{r1}) \cdot \vec{i}_{r1} + L_m(i_m) \cdot \vec{i}_m = \vec{\Psi}_{\sigma r1} + \vec{\Psi}_m, \quad (6)$$

$$\vec{\Psi}_{r2} = L_{\sigma r2}(i_{r2}) \cdot \vec{i}_{r2} + L_m(i_m) \cdot \vec{i}_m = \vec{\Psi}_{\sigma r2} + \vec{\Psi}_m, \quad (7)$$

$$\vec{\Psi}_{fe} = L_{\sigma fe}(i_{fe}) \cdot \vec{i}_{fe} + L_m(i_m) \cdot \vec{i}_m = \vec{\Psi}_{\sigma fe} + \vec{\Psi}_m, \quad (8)$$

$$\vec{\Psi}_m = L_m(i_m) \cdot \vec{i}_m, \quad (9)$$

$$\vec{i}_m = \vec{i}_s + \vec{i}_{fe} + \vec{i}_{r1} + \vec{i}_{r2}, \quad (10)$$

Преобразуем уравнения (1)–(4), подставив в них найденные из (5)–(9) значения производных по времени для соответствующих потокосцеплений. Так, для производной по времени потокосцепления статора из (5) имеем:

$$\frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} = \frac{d\bar{\Psi}_{\sigma s}}{dt} + \frac{d\bar{\Psi}_m}{dt} = \frac{d}{dt}[L_{\sigma s}(i_s) \cdot \bar{i}_s] + \frac{d}{dt}[L_m(i_m) \cdot \bar{i}_m], \quad (11)$$

где

$$\frac{d\bar{\Psi}_{\sigma s}}{dt} = L_{\sigma s}(i_s) \cdot \frac{d\bar{i}_s}{dt} + \bar{i}_s \cdot \frac{dL_{\sigma s}(i_s)}{di_s} \cdot \frac{di_s}{dt}, \quad (12)$$

$$\frac{d\bar{\Psi}_m}{dt} = L_m(i_m) \cdot \frac{d\bar{i}_m}{dt} + \bar{i}_m \cdot \frac{dL_m(i_m)}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt}, \quad (13)$$

Так как рассматриваемая асинхронная машина обладает магнитной и электрической симметрией по ортогональным осям, то насыщение не зависит от направления поля, а определяется только абсолютной величиной модулей соответствующих токов (статора i_s , контуров ротора i_{r1}, i_{r2} , ветви намагничивания i_m).

В ортогональных осях α, β , например для вектора тока статора, его модуля и производной от модуля по времени, справедливы соотношения:

$$\bar{i}_s = i_{s\alpha} + j \cdot i_{s\beta}; \quad i_s = \sqrt{i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2}; \quad (14)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{i_{s\alpha}}{i_s} \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{i_{s\beta}}{i_s} \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt}. \quad (15)$$

Для токов ротора и намагничивания выражения (14), (15) аналогичны, за исключением соответствующих обозначений. Подставив в (12) и (13) выражения для производных от соответствующих токов по времени, найденных с помощью (15), получим сначала для производной потокосцепления рассеяния статора:

$$\frac{d\bar{\Psi}_{\sigma s}}{dt} = [L_{\sigma s}^{\alpha} \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} + M_{\sigma s} \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt}] + j \cdot [L_{\sigma s}^{\beta} \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} + M_{\sigma s} \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt}], \quad (16)$$

где

$$L_{\sigma s}^{\alpha} = L_{\sigma s}(i_s) + \frac{i_{s\alpha}^2}{i_s} \cdot \frac{dL_{\sigma s}(i_s)}{di_s} = L_{\sigma s}(i_s) + \frac{i_{s\alpha}}{i_{s\beta}} \cdot M_{\sigma s}; \quad (17)$$

$$L_{\sigma s}^{\beta} = L_{\sigma s}(i_s) + \frac{i_{s\beta}^2}{i_s} \cdot \frac{dL_{\sigma s}(i_s)}{di_s} = L_{\sigma s}(i_s) + \frac{i_{s\beta}}{i_{s\alpha}} M_{\sigma s}; \quad (18)$$

$$M_{\sigma s} = \frac{i_{s\alpha} \cdot i_{s\beta}}{i_s} \cdot \frac{dL_{\sigma s}(i_s)}{di_s}; \quad (19)$$

а затем для производной потокосцепления ветви намагничивания:

$$\frac{d\bar{\Psi}_m}{dt} = \left[L_m^{\alpha} \cdot \frac{di_{m\alpha}}{dt} + M_m \cdot \frac{di_{m\beta}}{dt} \right] + j \left[L_m^{\beta} \cdot \frac{di_{m\beta}}{dt} + M_m \cdot \frac{di_{m\alpha}}{dt} \right]; \quad (20)$$

где

$$L_m^{\alpha} = L_m(i_m) + \frac{i_{m\alpha}^2}{i_m} \cdot \frac{dL_m(i_m)}{di_m} = L_m(i_m) + \frac{i_{m\alpha}}{i_{m\beta}} M_m; \quad (21)$$

$$L_m^{\beta} = L_m(i_m) + \frac{i_{m\beta}^2}{i_m} \cdot \frac{dL_m(i_m)}{di_m} = L_m(i_m) + \frac{i_{m\beta}}{i_{m\alpha}} M_m; \quad (22)$$

$$M_m = \frac{i_{m\alpha} \cdot i_{m\beta}}{i_m} \cdot \frac{dL_m(i_m)}{di_m}. \quad (23)$$

Как видно из выражений (17) - (19) и (21) - (23) результирующие индуктивности рассеяния и намагничивания содержат статические и, пропорциональные производным по току, динамические составляющие.

При отсутствии насыщения динамические составляющие равны нулю, а статические при неизменном модуле тока равном номинальному постоянны и соответственно равны:

$$L_{\sigma s}^{\alpha} = L_{\sigma s}^{\beta} = L_{\sigma s}; \quad L_{\sigma r}^{\alpha} = L_{\sigma r}^{\beta} = L_{\sigma r};$$

$$L_m^{\alpha} = L_m^{\beta} = L_m; \quad M_{\sigma s} = M_{\sigma r} = M_m = 0.$$

Отметим также, что как следует из (17) - (19) и (21) - (23), при насыщении из-за наличия динамических составляющих индуктивности по ортогональным осям не равны между собой и зависят от токов по обеим осям, а степень этой зависимости определяется взаимными индуктивностями, которые определяются по (19) и (23).

Записав выражения, аналогичные (11), (12) и (14), (15) для токов и потоковцеплений обоих контуров ротора, получим:

$$\frac{d\tilde{\Psi}_{\sigma r1}}{dt} = \left[L_{\sigma r1}^{\alpha} \cdot \frac{di_{r1\alpha}}{dt} + M_{\sigma r1} \cdot \frac{di_{r1\beta}}{dt} \right] + j \cdot \left[L_{\sigma r1}^{\beta} \cdot \frac{di_{r1\beta}}{dt} + M_{\sigma r1} \cdot \frac{di_{r1\alpha}}{dt} \right]; \quad (24)$$

$$\frac{d\tilde{\Psi}_{\sigma r2}}{dt} = \left[L_{\sigma r2}^{\alpha} \cdot \frac{di_{r2\alpha}}{dt} + M_{\sigma r2} \cdot \frac{di_{r2\beta}}{dt} \right] + j \cdot \left[L_{\sigma r2}^{\beta} \cdot \frac{di_{r2\beta}}{dt} + M_{\sigma r2} \cdot \frac{di_{r2\alpha}}{dt} \right]. \quad (25)$$

Собственные и взаимные индуктивности в (24) и (25) для первого ($k=1$) и для второго ($k=2$) контуров ротора могут быть найдены из выражений:

$$L_{\sigma rk}^{\alpha} = L_{\sigma rk}^{\alpha}(i_{rk}) + \frac{i_{r\alpha k}^2}{i_{rk}} \cdot \frac{dL_{\sigma rk}(i_{rk})}{di_{rk}} = L_{\sigma rk}^{\alpha}(i_{rk}) + \frac{i_{rk\alpha}}{i_{rk\beta}} \cdot M_{\sigma rk}; \quad (26)$$

$$L_{\sigma rk}^{\beta} = L_{\sigma rk}^{\beta}(i_{rk}) + \frac{i_{r\beta k}^2}{i_{rk}} \cdot \frac{dL_{\sigma rk}(i_{rk})}{di_{rk}} = L_{\sigma rk}^{\beta}(i_{rk}) + \frac{i_{rk\beta}}{i_{rk\alpha}} \cdot M_{\sigma rk}; \quad (27)$$

$$M_{\sigma rk} = \frac{i_{r\alpha k} \cdot i_{r\beta k}}{i_{rk}} \cdot \frac{dL_{\sigma rk}(i_{rk})}{di_{rk}}. \quad (28)$$

Воспользовавшись теперь (10) для замены в (20) производных тока намагничивания через производные токов статора и ротора и подставив полученный результат в виде (16), (24) и (25) в (1)-(4), получим для АМ окончательную систему дифференциальных уравнений, которая в матричном виде имеет вид:

$$\begin{pmatrix} L^{\alpha} & M \\ M & L^{\beta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} pi_{\alpha} \\ pi_{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{\alpha} \\ U_{\beta} \end{pmatrix}, \quad (29)$$

где

$$L^{\alpha} = \begin{pmatrix} L_{\sigma s}^{\alpha} + L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} \\ L_m^{\alpha} & L_{\sigma r1}^{\alpha} + L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} \\ L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} & L_{\sigma r2}^{\alpha} + L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} \\ L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} & L_m^{\alpha} & L_{\sigma r}^{\alpha} + L_m^{\alpha} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$L^{\beta} = \begin{pmatrix} L_{\sigma s}^{\beta} + L_m^{\beta} & L_m^{\beta} & L_m^{\beta} & L_m^{\beta} \\ L_m^{\beta} & L_{\sigma r1}^{\beta} + L_m^{\beta} & L_m^{\beta} & L_m^{\beta} \\ L_m^{\beta} & L_m^{\beta} & L_{\sigma r2}^{\beta} + L_m^{\beta} & L_m^{\beta} \\ L_m^{\beta} & L_m^{\beta} & L_m^{\beta} & L_{\sigma r}^{\beta} + L_m^{\beta} \end{pmatrix}, \quad (31)$$

$$M = \begin{pmatrix} M_{\sigma s} + M_m & M_m & M_m & M_m \\ M_m & M_{\sigma r1} + M_m & M_m & M_m \\ M_m & M_m & M_{\sigma r2} + M_m & M_m \\ M_m & M_m & M_m & M_m \end{pmatrix}. \quad (32)$$

$$U_{\alpha} = \begin{array}{l} U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} + \omega_k (L_{\sigma s} i_{s\beta} + L_m i_{m\beta}) \\ - R_{r1} i_{r1\alpha} + (\omega_k - \omega) (L_{\sigma r1} i_{r1\beta} + L_m i_{m\beta}) \\ - R_{r2} i_{r2\alpha} + (\omega_k - \omega) (L_{\sigma r2} i_{r2\beta} + L_m i_{m\beta}) \\ - R_{fe} i_{fe\alpha} + \omega_k (L_{\sigma fe} i_{fe\beta} + L_m i_{m\beta}) \end{array} \quad (33)$$

$$U_{\beta} = \begin{array}{l} U_{s\beta} - R_s i_{s\beta} + \omega_k (L_{\sigma s} i_{s\alpha} + L_m i_{m\alpha}) \\ - R_{r1} i_{r1\beta} + (\omega_k - \omega) (L_{\sigma r1} i_{r1\alpha} + L_m i_{m\alpha}) \\ - R_{r2} i_{r2\beta} + (\omega_k - \omega) (L_{\sigma r2} i_{r2\alpha} + L_m i_{m\alpha}) \\ - R_{fe} i_{fe\beta} + \omega_k (L_{\sigma fe} i_{fe\alpha} + L_m i_{m\alpha}) \end{array} \quad (34)$$

$$pi_{\alpha} = [pi_{s\alpha}, pi_{r1\alpha}, pi_{r2\alpha}, pi_{fe\alpha}]^r \quad (35)$$

$$pi_{\beta} = [pi_{s\beta}, pi_{r1\beta}, pi_{r2\beta}, pi_{fe\beta}]^r \quad (36)$$

Уравнение движения ротора:

$$M_{sp}(t) - M_c(\omega) = J \frac{d\omega}{dt} ; \quad M_{sp}(t) = L_m^{\alpha} \cdot i_{m\alpha} \cdot i_{s\beta} + L_m^{\beta} \cdot i_{m\beta} \cdot i_{s\alpha} \quad (37)$$

где J - суммарный момент инерции роторов двигателя и механизма.

Из численного решения системы дифференциальных уравнений (29) и (37) на каждом шаге расчета находим токи, затем уточняем значения элементов матриц L^{α} , L^{β} , M из уравнений (30)-(32) и $R_{fe}(i_{fe})$, являющиеся функциями этих токов, обращаем матрицу L , вычисляем правую часть уравнения (29), используя (33), (34), и вычисляем новые значения токов, вращающего момента и частоты вращения.

В качестве примера приведем результаты анализа (рис.2) с помощью разработанной модели режимов пуска, наброса и сброса нагрузки для асинхронного двигателя номинальной мощностью 320 кВт, напряжением 6 кВ, частотой вращения 590 об/мин, КПД=0,94, $\cos \varphi_n=0,8$, пусковым и максимальным моментами соответственно $M_n=1,1$ и $M_m=2,7$, пусковым током статора $K_f=5$.

Параметры схемы замещения (рис. 1) для номинального режима АД составили в относительных единицах:

$$R_s=0,01 ; R_{r1}=0,0113 ; R_{r2}=0,428 ; R_{fe}=18,94 ;$$

$$L_{\sigma s}=0,1 ; L_{\sigma r1}=0,114 ; L_{\sigma r2}=0,0609 ; L_{\sigma fe}=0,27 ; L_m=2,69$$

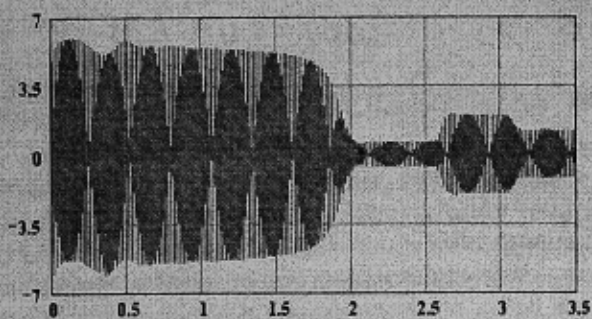
По данным характеристики холостого хода получены (в отн. ед.) нелинейные зависимости взаимной индуктивности и ее производной от тока ветви намагничивания:

$$L_m(i_m) = (0.025 + 0.485i_m + 5.45i_m^2) \cdot (i_m + 0.86i_m^2 + 4.1i_m^3)^{-1},$$

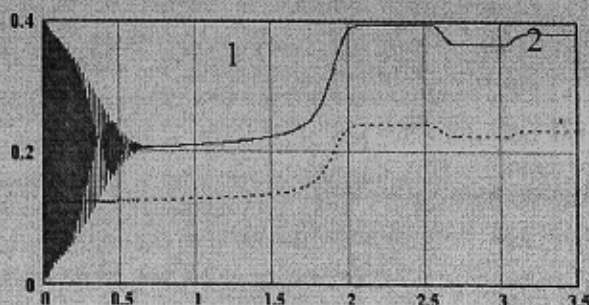
$$\frac{dL_m(i_m)}{di_m} = \frac{(0.485 + 10.9i_m)(i_m + 0.86i_m^2 + 4.1i_m^3) - (0.025 + 0.485i_m + 5.45i_m^2)(1 + 1.72i_m + 12.3i_m^2)}{(i_m + 0.86i_m^2 + 4.1i_m^3)^2}$$

Насыщение путей потоков рассеяния статора и ротора от соответствующих токов учитывалось с помощью аналитических зависимостей для коэффициентов насыщения и их производных ($k_s(i_s)$, $\frac{dk_s(i_s)}{dt}$ - для статора и $k_r(i_r)$, $\frac{dk_r(i_r)}{dt}$ - для ротора):

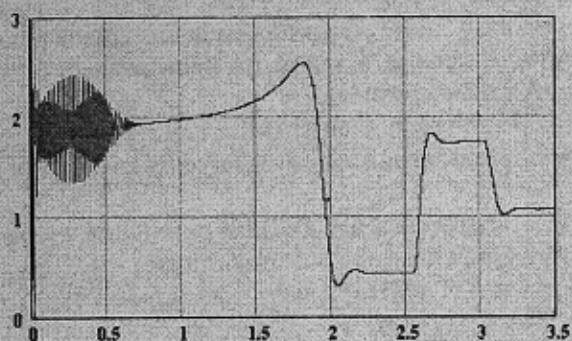
а) ток фазы А статора



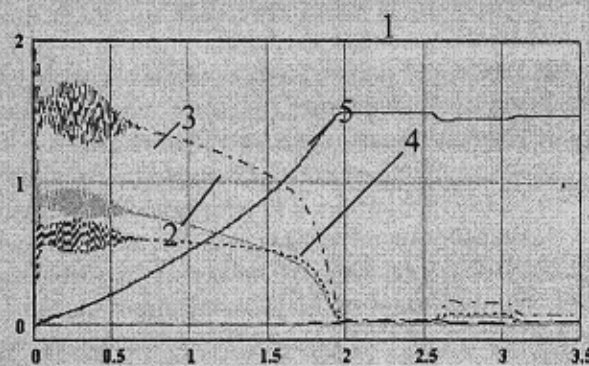
б) ток ветви намагничивания (1) и фиктивной обмотки статора (2)



в) потребляемая активная мощность



г) скорость вращения ротора (1), потери мощности: в меди статора (2), роторе (3), стали статора (4) и суммарные (5)



д) электромагнитный момент



е) потери мощности в режиме наброса и сброса нагрузки (обозначения кривых приняты согласно рис. 2г)

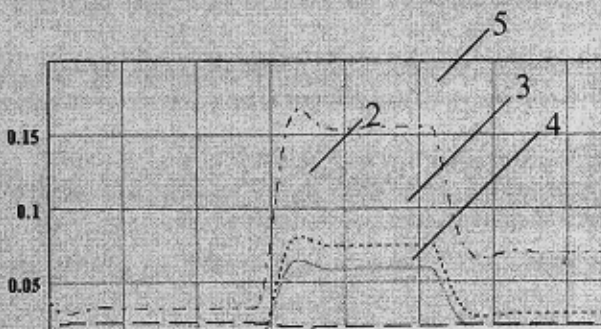


Рисунок 2 – Результаты моделирования режимов пуска, сброса и наброса нагрузки по разработанной математической модели

$$k_{(s,r)}(i) = \frac{k_m - (k_m - 1) \cdot \exp(0.5 \cdot i_{(s,r)} \cdot (k_m - 1))}{k_m - (k_m - 1) \cdot \exp(0.5 \cdot i_{(s,r)} \cdot (k_m - 1))},$$

$$L_{\sigma s}(i_s) = k_s(i_s) \cdot L_{\sigma s};$$

$$\frac{dk_{(s,r)}(i)}{di} = \frac{0.5 \cdot (k_m - 1)^2 \cdot \exp(0.5 \cdot i_{(s,r)} \cdot (k_m - 1))}{(k_m - 1) \cdot \exp(0.5 \cdot (k_m - 1)) - k_m},$$

$$L_{\sigma r}(i_r) = k_r(i_r) \cdot L_{\sigma r};$$

где k_m – начальное значение коэффициента насыщения при протекании пускового тока статора (ротора), который обычно в 5-7 раз превышает номинальный. Этот коэффициент характеризует степень влияния тока на индуктивность. При номинальном токе его значение равно единице, а при пусковом в расчетах принималось для статора равным 0.4, для первой обмотки ротора 0.6, для второй обмотки ротора 0.7.

На рис. 2 приведены расчетные осциллограммы для стационарных и переходных режимов тока статора, электромагнитного вращающего момента, потребляемой активной мощности, частоты вращения, потерь мощности в стали, а также в обмотках статора и ротора, и токов в ветви намагничивания и в фиктивной обмотке статора, с помощью которой учитываются потери в стали. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для режимов пуска при различных уровнях питающего напряжения подтвердило преимущества разработанной модели по сравнению с известными. Для указанного двигателя отклонения от данных эксперимента для токов статора, мощности, частоты вращения, времени пуска и самозапуска не превышают 2-4 %, тогда как для известных моделей (5), (6) отклонения указанных величин достигают 7-10 %.

Выводы.

1. Разработана математическая модель асинхронной машины, в которой учтены явления насыщения магнитных цепей главного магнитного потока и потоков рассеяния, а также эффект вытеснения токов в роторе.
2. Взаимная индуктивность обмоток и индуктивности рассеяния, а также их производные от токов, представлены как нелинейные функции от токов, протекающих в этих обмотках.
3. Потери в стали статора учитываются с помощью дополнительной фиктивной короткозамкнутой обмотки, расположенной на статоре и имеющей общую с другими обмотками взаимную индуктивность, нелинейное активное сопротивление и индуктивность рассеяния.
4. Разработанная математическая модель может быть использована для анализа различных стационарных и переходных режимов работы с учетом потерь мощности в стали и в меди обмоток статора и ротора.
5. Приведенные примеры моделирования режимов работы АМ подтверждают эффективность модели и адекватность полученных результатов реальным процессам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Проблемы моделирования переходных электромагнитных процессов в асинхронных машинах // Техн. электродинамика. Тем. выпуск. Силовая электроника и энергоэффективность, ч.3 - 2004 - С.65-70.
2. Moreria J.C., Lipo T.A. Modeling of saturated ac mashines including air flux harmonic components.-IEEE Transoms Industry Application,1992, vol.28, N.2.
3. Беспалов В.Я., Мощинский Б.А., Петров А.П. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат //Электричество.-2002.-N8.-с.33-39.
4. Джендубаев А.-З.Р. . Математическая модель асинхронного генератора с учетом потерь в стали // Электричество.-2003.-N7.-с.36-45.
5. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. -М.: Высшая школа,1987.- С.212.
6. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций. :Учеб. пособ.-Донецк, ДПИ, 1984.-116с.
7. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин // Электричество.-1979.-N10.-с.35-39.
8. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Математическое моделирование электродвигателей собственных нужд электрических станций. :Учеб. пособ.-Донецк,ДПИ,1979.-110с.

Рекомендовано проф., д.т.н. Рогозиным Г.Г.