Ким К.И., Ким К.К.
Kim K.I., Kim K.K.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РОТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ХАРАКТЕР ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ
INFLUENCE OF ROTOR SPEED OF ASYNCHRONOUS MACHINE ON THE NATURE OF TRANSIENT ELECTROMAGNETIC PROCESSES

Ким Константин Иванович – д. т. н., профессор, адрес: Россия, 190031 Московский проспект, дом 9, тел. 8 903 096 5770. E-mail: kimkk@inbox.ru
Konstantin I. Kim - Dr. Sc., professor, address: house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru

Ким Константин Константинович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения», адрес: Россия, 190031 Московский проспект, дом 9, тел. 8 903 096 5770. E-mail: kimkk@inbox.ru
Konstantin K. Kim - Dr. Sc., professor, Trinity College, Cambridge University, Great Britain. Proffesor, Dr.habil.ing.; member of IEEE, NYAS, EANS Head of Department " Electrical and heat engineering" Sankt-Petersburg State Transport University, address: house 9, Moskovsky Av. Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматриваются основы теории переходных электромагнитных процессов в асинхронных машинах. Приведены основные аналитические выражения, позволяющие оценивать влияние скорости ротора асинхронной машины на характер их протекания. Проведен анализ существующих подходов применительно к поставленной задаче. Обоснованы допущения и параметры, определяющие электромагнитные постоянные и динамические характеристики электромеханических преобразователей переменного тока в двигательных режимах работы. Определена задача исследования на физическом и аналитическом уровнях, которая решена с учетом вариации определяющих параметров с использованием теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии. Показано, что коэффициенты затухания и их частоты, характеризующие результирующий ток, состоящий из тока стационарного режима и двух затухающих составляющих, зависят от параметров машины и мгновенного значения скорости. Приведены кривые изменения коэффициентов затухания в зависимости от скорости асинхронной машины.

Summary. The article deals with the basics of the theory of transient electromagnetic processes in asynchronous machines. The basic analytical expressions allowing to estimate influence of speed of a rotor of the asynchronous machine on character of their course are resulted. The analysis of existing approaches in relation to the task is carried out. The assumptions and parameters determining the electromagnetic constants and dynamic characteristics of Electromechanical AC converters in motor operating modes are substantiated. The problem of research at the physical and analytical levels is determined, which is solved taking into account the variation of the determining parameters using the theory of a generalized Electromechanical energy Converter. It is shown that the damping coefficients and their frequencies characterizing the resulting current consisting of a steady-state current and two damping components depend on the parameters of the machine and the instantaneous speed value. The curves of the damping coefficients change depending on the speed of the asynchronous machine are given.

Ключевые слова: переходные электромагнитные процессы, асинхронная машина, изменение скорости.
Key words: transient electromagnetic processes, asynchronous machine, speed change.

УДК 621.313

Введение. В практических расчетах переходных процессов в электроприводах с асинхронной машиной, при необходимости определения движения ротора, пользуются общеизвестным соотношением для вращающих моментов, предложенным М. Клоссом.

Применение этой формулы, давая удовлетворительные результаты во многих практических задачах, оказывается, однако, недопустимым в ряде особых случаев. Сюда относятся режимы, при которых вследствие вмешательства сторонних факторов и ввиду специфических особенностей, присущих данной системе (относительно малый маховой момент, большие постоянные времени обмоток), скорость вращения ротора подвергается резкому изменению, а возникающие при этом свободные токи затухают относительно медленно. В таких режимах как фазовое соотношение между статорным и роторным токами, так и значения последних в существенной мере могут отступать от результатов, полученных помощью формул стационарного режима. Не менее значительные расхождения возможны между действительными и подсчитанными на основе формулы Клосса значениями моментов, так что в подобных случаях применение указанной формулы может давать лишь весьма приближенное решение для скорости. В таких режимах не только нельзя пренебречь изменением скорости, но наоборот, это изменение играет принципиальную роль. В связи с этим возникают имеющие существенный практический интерес такие вопросы, как например, влияние изменения скорости на характер протекания переходных электромагнитных процессов и, наоборот, влияние последних на динамику асинхронной машины. Эти вопросы не только фактически, но и в принципе составляют две стороны единой задачи, а возникающие в указанных режимах явления подчиняются системе нелинейных дифференциальных уравнений, включающих в качестве переменных токи и скорость ротора. Среди последних характеристика скорости занимает особое место, а вопрос об ее определении имеет не только самостоятельное, но и прикладное значение. Достаточно подчеркнуть, что даже в тех случаях, когда каким-нибудь образом удается найти решения для токов и вращающих моментов, расчет их возможен лишь при известной характеристике скорости. Между тем, при наличии значительного количества методов расчета характеристики скорости при стационарном режиме, вопрос о таковых в переходных режимах, когда возникает необходимость учета ускорения ротора, остается мало изученным. В некоторых литературных источниках, посвященных анализу указанных режимов [1-9], основное внимание уделяется вопросам определения переходных токов и вращающих моментов, причем характеристика скорости предполагается заведомо известной. Среди этих работ особенного внимания заслуживают исследования Е. Я. Казовского [10] и В. А. Шубенко [11]. Однако, при несомненной ценности полученных ими результатов, использование их при практических расчетах, в силу указанной причины, встречает значительные трудности.

В связи с этим анализ методов расчета характеристики скорости в указанных режимах представляется актуальным, а разработка практических способов ее расчета - весьма целесообразной.

Не менее интересным является также вопрос, каким образом определить максимальное значение ускорения, при котором динамические характеристики машины практически не отличаются от статических. Постановка этого вопроса вызывается необходимостью выяснения целесообразности учета изменения скорости прежде, чем перейти к непосредственным расчетам характеристик (токов, вращающих моментов и др.). Это тем более важно, что расчеты последних с учетом и без учета ускорения представляют задачи различной степени трудности.

В силу изложенных обстоятельств, в настоящей статье основное внимание уделено вопросам определения указанного ускорения и характеристики скорости ротора. Определение других величин, также характеризующих свойства машины в режимах, связанных с резким изменением скольжения, рассматривается как частный вопрос общей задачи расчета характеристики скорости. Такое рассмотрение позволяет получить решения в удобной для практического и теоретического использования форме.

В дальнейшем при анализе этих вопросов принимается, что изменение скольжения происходит в области $0<s<1$ (двигательный режим).

Этот диапазон включает большинство практически существующих режимов указанного рода: разгон двигателя при пуске, внезапное приложение механической нагрузки, резкое торможение и режимы, требующие точного поддержания скорости.

Однако некоторые из полученных результатов могут найти применение не только при анализе указанных режимов, но и в других случаях, когда учет ускорения ротора практически может быть оправдан.

Основные уравнения переходных процессов асинхронной машины. Для решения поставленной задачи необходимо исходить из общих дифференциальных уравнений переходного процесса, включающих в качестве одной из переменных скорость ротора. Эти уравнения, также как и дифференциальные уравнения синхронной машины [12], могут быть получены на основе закона сохранения энергии путем последовательного применения законов Кирхгофа к контурам машины.

Для трехфазной асинхронной машины предполагаются выполненными следующие условия:

- ротор имеет магнитную симметрию, т.е. самоиндукция любой обмотки не зависит от положения ротора, а коэффициент взаимной индукции между любыми фазными обмотками статора и ротора является косинусоидальной функцией угла между осями обеих обмоток;
- потокосцепления отдельных контуров машины имеют линейную зависимость от протекающих по ним токов;
- электрическая нейтраль машины изолирована;
- ротор имеет одну обмотку.

На рис.1 лучи 0A,0B, 0C отображают магнитные оси фазных обмоток. Ось 0α совпадает с осью фазы 0A статора, ось 0β сдвинута относительно нее на 90 эл. град, в пространстве. За положительное направление вращения ротора принимаем вращение по часовой стрелке.

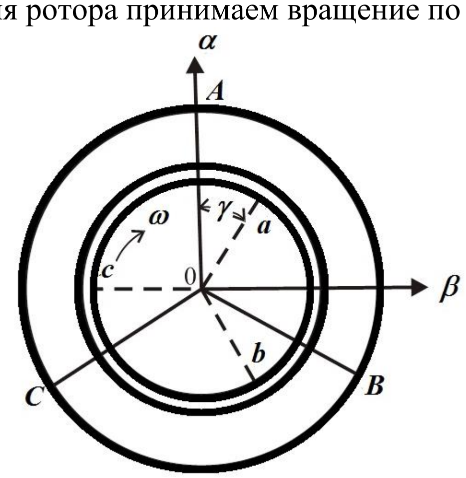

Рис. 1

Уравнения падений напряжения в фазных обмотках будут:

$$u_n = r_1 i_n + \frac{d}{dt}\Psi_n \quad , \qquad (1.1а)$$

где $n = A, B, C$.

$$u_k = r_2 i_k + \frac{d}{dt}\Psi_k, \qquad (1.1б)$$

где $k = a, b, c$.

Потокосцепления

$$\begin{aligned}
\Psi_A &= l_1 i_A + m_1(i_B + i_C) + m_{12}[i_a\cos\gamma + i_b\cos(\gamma+120) + i_c\cos(\gamma-120)],\\
\Psi_B &= l_1 i_B + m_1(i_C + i_A) + m_{12}[i_b\cos\gamma + i_c\cos(\gamma+120) + i_a\cos(\gamma-120)],\\
\Psi_C &= l_1 i_C + m_1(i_A + i_B) + m_{12}[i_c\cos\gamma + i_a\cos(\gamma+120) + i_b\cos(\gamma-120)],
\end{aligned} \qquad (1.2)$$

где l_1, l_2 - коэффициенты самоиндукции фазных обмоток статора и ротора соответственно; m_1, m_2 - коэффициенты взаимной индукции между фазными обмотками; m_{12}, m_{21} - коэффициенты взаимной индукции между фазными обмотками статора и ротора, когда оси их совпадают.

Преобразовать выражения напряжений, токов и потокосцеплений трехфазной системы к системе осей α и β, неподвижно связанных со статором, можно посредством следующих выражений.

Для статора:

$$X_{\alpha_1} = \frac{2}{3}\left[X_A - \frac{1}{2}(X_B + X_C)\right],$$
$$X_{\beta_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}[X_B - X_C]\ , \qquad (1.3а)$$
$$X_{01} = \frac{1}{3}[X_A + X_B + X_C].$$

Для ротора:

$$X_{\alpha_2} = \frac{2}{3}[X_a\cos\gamma + X_b\cos(\gamma+120) + X_c\cos(\gamma-120)],$$
$$X_{\beta_2} = \frac{2}{3}[X_a\sin\gamma + X_b\sin(\gamma+120) + X_c\sin(\gamma-120)], \qquad (1.3б)$$
$$X_{02} = \frac{1}{3}[X_a + X_b + X_c].$$

Здесь: $X = u,\ i,\ \Psi$.

Уравнения падений напряжения в новой системе будут:

$$u_{\alpha_1} = r_1 i_{\alpha_1} + \frac{d}{dt}\Psi_{\alpha_1},\quad u_{\beta_1} = r_1 i_{\beta 1} + \frac{d}{dt}\Psi_{\beta 1}, \qquad (1.4а)$$
$$u_{\alpha_2} = r_2 i_{\alpha_2} + \frac{d}{dt}\Psi_{\alpha_2}\ ,\ u_{\beta_2} = r_2 i_{\beta 2} + \frac{d}{dt}\Psi_{\beta 2}\ . \qquad (1.4б)$$

Подставляя в них выражения для потокосцеплений, найденных по соотношениям (1.2) и (1.3), и произведя некоторые преобразования, можно получить:

$$u_{\alpha_1} = r_1 i_{\alpha_1} + L_1\frac{d}{dt}i_{\alpha_1} + L_{12}\frac{d}{dt}i_{\alpha_2},\ u_{\beta_1} = r_1 i_{\beta_1} + L_1\frac{d}{dt}i_{\beta_1} + L_{12}\frac{d}{dt}i_{\beta_2}\ ,$$
$$u_{\alpha_2} = r_2 i_{\alpha_2} + L_2\frac{d}{dt}i_{\alpha_2} + L_{12}\frac{d}{dt}i_{\alpha_1} + L_2\omega i_{\beta_2} + L_{12}\omega i_{\beta_1}\ , \qquad (1.5)$$
$$u_{\beta_2} = r_2 i_{\beta_2} + L_2\frac{d}{dt}i_{\beta_2} + L_{12}\frac{d}{dt}i_{\beta_2} - L_2\omega i_{\alpha_2} - L_{12}\omega i_{\alpha_1}$$

Здесь: $L_1 = l_1 - m_1$, $L_2 = l_2 - m_2 -$ эквивалентные коэффициенты самоиндукции трехфазной системы статора и ротора соответственно; $L_{12} = \frac{3}{2}m_{12} -$ эквивалентный коэффициент взаимной индукции трехфазной системы; $\omega = \frac{d}{dt}\gamma -$ скорость вращения ротора.

С точки зрения динамики асинхронная машина представляет систему, состояние которой может быть вполне определено значениями пяти переменных, заданных, как функции времени. Здесь и в дальнейшем нулевая точка обмоток предполагается изолированной, поэтому систему (1.5) необходимо дополнить еще одним уравнением, а именно уравнением равновесия моментов системы; т.е.

$$M = M_c + \mathcal{J}\frac{d\omega}{dt} \qquad (1.6)$$

Известно, что вращающий момент машины определяется как производная электромагнитной энергии по углу между осями одноименных фаз обмоток, т. е.

$$M = \frac{\partial T}{\partial \gamma}\ , \qquad (1.7)$$

где $T = \frac{1}{2}\Sigma\Psi_n i_n$.

Так как

$$T = \frac{3}{2}\left[L_1(i_{\alpha 1}^2 + i_{\beta 1}^2) + L_2(i_{\alpha 2}^2 + i_{\beta 2}^2) + 2L_{12}(i_{\alpha 1}i_{\alpha 2} + i_{\beta 1}i_{\beta 2})\right]\ , \qquad (1.8)$$

то

$$M = \frac{3}{2}L_{12}\left[i_{\alpha 2}i_{\beta 1} - i_{\alpha 1}i_{\beta 2}\right]\ . \qquad (1.9)$$

Тогда уравнение (1.6) можно переписать в виде:

$$\frac{3}{2}L_{12}\left[i_{\alpha 2}i_{\beta 1} - i_{\alpha 1}i_{\beta 2}\right] = M_c + \mathcal{J}\frac{d\omega}{dt}\ . \qquad (1.10)$$

При переходе к системе относительных единиц в качестве базисных принимаются:

- для напряжения: амплитудное значение напряжения в номинальном режиме (U_{m_1});
- для тока: амплитудное значение статорного тока в номинальном режиме $\left(J_{m_1}\right)$;
- для сопротивления: величина, равная $\frac{U_{m_1}}{J_{m_1}}$;
- для мощности: $\frac{3}{2}U_{m_1}J_{m_1}$;
- для моментов: $\frac{3}{2}\frac{U_{m_1}J_{m_1}i}{\omega_s}$;
- для скорости: синхронная скорость (ω_S);
- для времени: синхронная секунда ($\frac{c}{\omega_S}$).

Тогда во введенной системе относительных единиц уравнения (1.5) и (1.10) примут следующий вид:

$$\begin{gathered} u_{\alpha_1} = r_1 i_{\alpha_1} + x_1\frac{di_{\alpha_1}}{dt} + x_{12}\frac{di_{\alpha_2}}{dt}, \\ u_{\beta_1} = r_1 i_{\beta_1} + x_1\frac{di_{\beta_1}}{dt} + x_{12}\frac{di_{\beta_2}}{dt}, \\ u_{\alpha_2} = r_2 i_{\alpha_2} + x_2\frac{di_{\alpha_2}}{dt} + x_{12}\frac{di_{\alpha_1}}{dt} + \omega x_2 i_{\beta_2} + \omega x_{12} i_{\beta_1}, \\ u_{\beta_2} = r_2 i_{\beta_2} + x_2\frac{di_{\beta_2}}{dt} + x_{12}\frac{di_{\beta_1}}{dt} - \omega x_2 i_{\alpha_2} - \omega x_{12} i_{\alpha_1}, \\ x_{12}\left[i_{\alpha_2} i_{\beta_1} - i_{\alpha_1} i_{\beta_2}\right] = M_c + H\frac{d\omega}{dt}. \end{gathered} \tag{1.11}$$

Здесь $H=\frac{J\omega_S^2}{3/_2 U_{m1}J_{m1}}$ - инерционная постоянная системы, выраженная в секундах.

Уравнения (1.11) целесообразно подвергнуть дальнейшему преобразованию. Известно, что фазовые токи образуют пульсирующие во времени намагничивающие силы. Пространственное распределение последних, при симметрично выполненной обмотке, можно считать периодическим. Принимая во внимание только основную гармонику в разложении их, можно представить эти намагничивающие силы в виде неподвижных в пространстве векторов, смещенных друг относительно друга на углы, равные сдвигам осей соответствующих фазных обмоток. Очевидно, геометрическая сумма этих векторов даст результирующую намагничивающую силу обмотки, как по величине, так и по положению. Это однозначное соответствие между суммарным значением векторов фазовых токов и результирующей намагничивающей силой целесообразно представить в комплексной форме, как это сделано в работах Щедрина Н.Н., Кантора Р.М. и Казовского Е.Я. [10].

В данном случае оно запишется следующим образом:

$$\bar{i}_1 = i_{\alpha_1} + i_{\beta_1}e^{i\frac{\pi}{2}},\ \bar{i}_2 = i_{\alpha_2} + i_{\beta_2}e^{i\frac{\pi}{2}}. \tag{1.12а}$$

Относя аналогичные представления и к напряжениям, т.е. считая

$$\overline{u_1} = u_{\alpha_1} + u_{\beta_1}e^{i\frac{\pi}{2}},\ \overline{u_2} = u_{\alpha_2} + u_{\beta_2}e^{i\frac{\pi}{2}}. \tag{1.12б}$$

и вводя понятия обобщенных векторов тока и напряжения для величин $\bar{i}$ и $\bar{u}$ соответственно, можно уравнения (1.11) преобразовать в следующие:

$$\begin{gathered} \bar{u}_1 = r_1\bar{i}_1 + x_1\frac{d\bar{i}_1}{dt} + x_{12}\frac{d\bar{i}_2}{dt}, \\ \bar{u}_2 = r_2\bar{i}_2 + x_2\frac{d\bar{I}_2}{dt} + x_{12}\frac{d\bar{I}_1}{dt} - j\omega x_2\bar{i}_2 - j\omega x_{12}\bar{i}_1, \\ \frac{jx_{12}}{2}\left(\bar{i}_2\hat{i}_1 - \hat{i}_2\bar{i}_1\right) = M_c + H\frac{d\omega}{dt}. \end{gathered} \tag{1.13}$$

Полученные уравнения представляют собой дифференциальные уравнения переходных процессов идеализированной асинхронной машины. Допущения, принятые при составлении этих уравнений, практически не только не искажают действительную картину явлений, но вместе с тем позволяют наглядно ее представить и получить при рассмотрении ряда задач количественные связи, пригодные для практических расчетов.

Необходимо заметить, что аналогичные уравнения отличным от изложенного способом были получены независимо друг от друга Н.Н. Щедриным и Р.М. Кантором.

Применение указанных уравнений (1.13) в непосредственном их виде представляет некоторые неудобства. Поэтому их можно преобразовать, вводя в рассмотрение следующие постоянные величины:

$\sigma = 1 - \frac{x_{12}^2}{x_1 x_2}$ - коэффициент рассеяния Блонделя;

$x_1' = x\sigma$ - переходный реактанс;

$\rho_1 = \frac{r_1}{x_1'}$ - коэффициент затухания статорной обмотки при замкнутой роторной;

$\rho_2 = \frac{r^2}{x^2\sigma}$ - коэффициент затухания роторной обмотки при замкнутой статорной.

Тогда положив $\bar{u}_2 = 0$, что означает замкнутость роторной обмотки, можно получить

$$\begin{gathered}\frac{d\bar{I}_1}{dt} - \frac{x_{12}}{x_1'}(\rho_2\sigma - j\omega)\bar{\imath}_2 + \frac{1}{\sigma}[\rho_1 + j(1-\sigma)\omega]\bar{\imath}_1 = \frac{\bar{u}_1}{x_1'}, \\ \frac{d\bar{\imath}_2}{dt} + \frac{1}{\sigma}(\rho_2\sigma - j\omega)\bar{\imath}_2 - \frac{x_{12}}{x_2\,\sigma}(\rho_1\sigma + j\omega]\bar{\imath}_1 = -\frac{(1-\sigma)}{x_{12}\sigma}\bar{u}_1\,, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{jx_{12}}{2H}(\bar{\imath}_2\hat{\imath}_1 - \hat{\imath}_2\bar{\imath}_1) - \frac{M_c}{H}.\end{gathered} \qquad (1.14)$$

Преобразованная система уравнений принципиально не отличается от системы (1.13), однако пользоваться ею более удобно.

Теоретические основы явлений, возникающих при изменении скорости ротора. Прежде, чем перейти к непосредственному рассмотрению приведенных выше уравнений (1.14), необходимо установить некоторые предварительные соотношения на основе простейшей интерпретации явлений, возникающих при изменении скорости ротора. Такое рассмотрение позволяет также выяснить физические стороны этих процессов.

Рассматривая первые два уравнения системы (1.14) предполагается, что зависимость скорости от времени известна. Заменяя действительную кривую скорости ступенчатой, нетрудно получить решение для токов. Последнее для интервала «n» может быть представлено следующим образом

$$\begin{gathered}\bar{\imath}_{kn} = -\frac{[\alpha_{2n}\bar{\imath}_{k(n-1)} - \frac{d}{dt}\bar{\imath}_{k(n-1)}]_{t=\Delta t_{(n-1)}} - (\alpha_{2n} - j)\mathcal{I}_{kn}}{\alpha_{1n} - \alpha_{2n}} e^{\alpha_{1n}t} + \\ + \frac{[\alpha_{1n}\bar{\imath}_{k(n-1)} - \frac{d}{dt}\bar{\imath}_{k(n-1)}]_{t=\Delta t_{(n-1)}} - (\alpha_{1n} - j)\mathcal{I}_{kn}}{\alpha_{1n} - \alpha_{2n}} e^{\alpha_{2n}t} + \mathcal{I}_{kn}e^{jt}\,.\end{gathered} \qquad (1.15)$$

Здесь: k=1, 2 (причем индекс «1» - относится к статору, индекс "2" - к ротору).

$$\alpha_{1n} = -\rho_{\gamma_{1n}} + j\nu_{1n} = -\frac{\rho_1+\rho_2-j\omega_n}{2} - \sqrt{\left(\frac{\rho_1+\rho_2-j\omega_n}{2}\right)^2 - \rho_1(\rho_2\sigma - j\omega_{n)}}\;,$$

$$\alpha_{2n} = -\rho_{\gamma_{2n}} + j\nu_{2n} = -\frac{\rho_1+\rho_2-j\omega_n}{2} + \sqrt{\left(\frac{\rho_1+\rho_2-j\omega_n}{2}\right)^2 - \rho_1(\rho_1\sigma - j\omega_{n)}}\;,$$

$$\mathcal{I}_{1n} = \frac{U_{m1}}{x_1'}\frac{\rho_2\sigma+jS_n}{(j-\alpha_{1n})(j-\alpha_{2n})}; \qquad \mathcal{I}_{2n} = \frac{U_{m1}}{jx_{12}\sigma}\frac{(1-\sigma)S_n}{(j-\alpha_{1n})(j-\alpha_{2n})}.$$

Из приведенного выражения видно, что результирующий ток, кроме тока стационарного режима, содержит две затухающие составляющие (свободный ток). При этом как коэффициенты затухания, так и частоты последних зависят от параметров машины и мгновенного значения скорости. На рис. 2 и 3 представлены кривые изменения этих величин в зависимости от изменения скорости для асинхронной машины АТ-198 1024 со следующими паспортными данными и параметрами (параметры даны в относительных единицах):

P=1000 кВт; $U_1 = 600$ В; $\mathcal{I}_1 = 136$ А; $U_2 = 560$ В; $\mathcal{I}_2 = 1100$ А; n_c =250 $^{об}/_{мин}$; $s_n = 1{,}6$ %; $g\mathcal{D}^2$ = 9,59 тм^2; $r_1 = r_2 = 0{,}0194$; $x_{1\sigma} = x_{2\sigma} = 0{,}114$; $x_{12} = 2{,}04$; $\sigma = 0{,}1$.

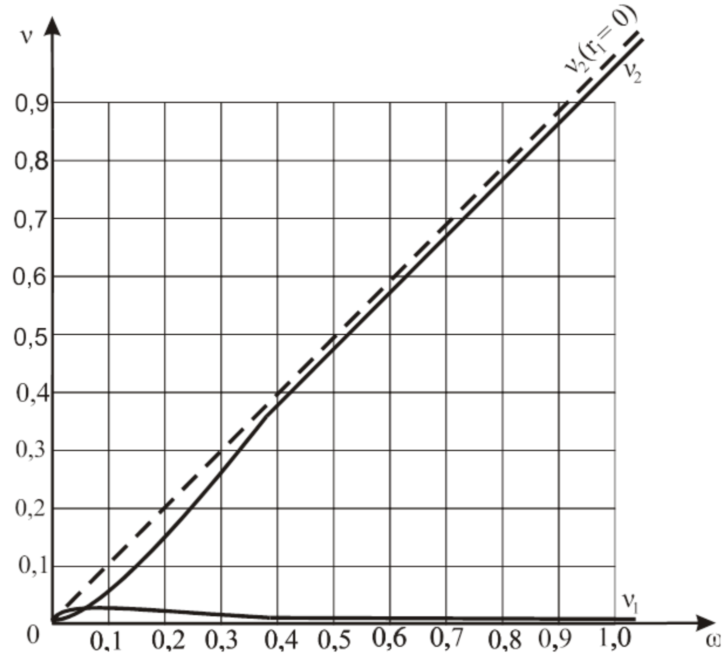

Рис. 2

Из представленных кривых видно, что с изменением скорости коэффициенты затухания и частоты свободных токов, в особенности величина ν_2 претерпевают существенные изменения. Причем частота ν_1 весьма незначительна, тогда как другая частота ν_2 имеет большую величину, весьма близкую к мгновенному значению скорости. В этом отношении за составляющими свободных токов можно сохранить терминологию классической теории переходных процессов асинхронной машины при постоянстве скорости, а именно: за составляющей с частотой ν_1 - апериодическая, за составляющей с частотой ν_2 - периодическая.

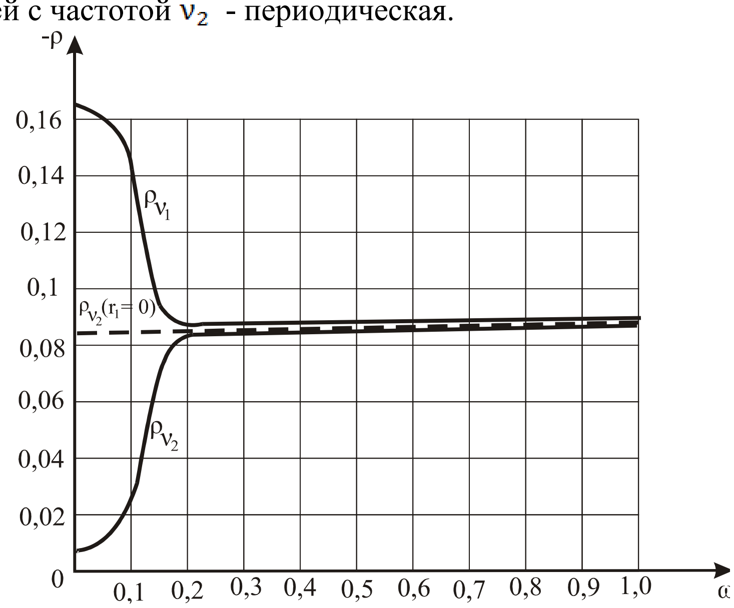

Рис. 3

Необходимо заметить, что выражение (1.15) при k=2 дает роторный ток. В соответствии с уравнениями (1.14) это выражение описывает роторные явления в координатах, неподвижно связанных со статором. Таким образом, в действительности в роторе будут наблюдаться следующие частоты: $\nu_1 - \omega,\quad \nu_2 - \omega\,,\quad s.$

Иными словами, апериодической составляющей статорного тока соответствует периодическая составляющая роторного тока с частотой $\nu_1 - \omega,$ а ответной реакцией периодической составляющей свободных токов статора является апериодическая составляющая тока ротора с частотой $\nu_2 - \omega$.

Так как с изменением скорости изменяются величины α_1 и α_2, то амплитудное значение отдельных слагающих токов будет зависеть от мгновенного значения скорости. При этом очевидно, что изменение тока основной частоты будет происходить по общеизвестной круговой диаграмме. Для приближенной оценки других составляющих обратимся к выражению (1.15). Последнее соответствует случаю, когда начальные условия в интервале «n» определяется не только установившимся током, но и величиной затухающих составляющих в конце интервала (n-1).

Предположив, что эти составляющие в указанный момент времени равны нулю. Тогда соотношение (1.15) примет следующий вид:

$$\bar{i}_{kn} = \left[\frac{\alpha_{2n-j}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{1n}t} - \frac{\alpha_{1n-j}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{2n}t}\right] \Delta\mathcal{J}_{kn} + \mathcal{J}_{kn} e^{jt}, \tag{1.16}$$

где $\Delta\mathcal{J}_{kn} = \mathcal{J}_{kn} - \mathcal{J}_{k(n-1)}$.

Из полученного выражения вытекает совершенно очевидное следствие, что величины свободных токов зависят от разности установившихся токов.

Так как

$$\mathcal{J}_{1n} = \frac{U_{m1}}{jx_1'} \frac{\rho_2\sigma + jS_n}{(\rho_2 + S_n\rho_1) + jS_n}, \quad \mathcal{J}_{2n} = -\frac{(1-\sigma)U_{m1}}{x_{12}\sigma} \frac{S_n}{(\rho_2 + S_n\rho_1) + jS_n},$$

а коэффициенты затухания весьма незначительны, то указанная разность будет тем меньше, чем больше скольжение в интервалах n и (n-1) при прочих равных условиях. Иными словами наибольшие отклонения действительных значений токов от токов стационарного режима, следует ожидать в зоне больших скоростей. При этом величина скольжения, при которой свободные токи достигают максимального значения, зависит от коэффициентов ρ_1 и, главным образом, от ρ_2.

Сравнение выражений для свободных токов (первые два члена в соотношении (1.16)), показывает, что в зоне больших скоростей периодическая составляющая имеет значительно большую величину, чем апериодическая. Так, например, при скольжениях, равных 0,2; 0,1 и 0 отношение этих величин для указанной машины соответственно составляет 0,25; 0,156 и 0,09.

В тех случаях, когда процесс описывается выражением (1.15), свободные токи в любых из интервалов имеют большую величину, чем в предыдущем случае. При этом апериодическая составляющая приближенно равна:

$$\frac{(\alpha_{2n-j})\Delta\mathcal{J}_{kn} + [(\alpha_{2(n-1)} - j)\Delta\mathcal{J}_{kn-1} e^{\alpha_{1(n-1)t}}]_{t=\Delta t_{n-1}+\cdots}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{1n}t},$$

периодическая составляющая:

$$-\frac{(\alpha_{1n} - j)\Delta\mathcal{J}_{kn} + [(\alpha_{1(n-1)} - j)\Delta\mathcal{J}_{kn-1} e^{\alpha_{2(n-1)}t}]_{t=\Delta t_{n-1}^{+\cdots}}}{\alpha_{1n}-\alpha_{2n}} e^{\alpha_{2n}t}.$$

Так как $\alpha_{2n} \gg \alpha_{1n}$, то последняя из указанных составляющих, как и в рассмотренном выше случае, будет больше первой.

Необходимо заметить, что если в интервале (n+1) ток определяется уравнением (1.16), то в интервале (n) при условии, что Δt_n достаточно мало, имеет место стационарный режим.

Таким образом, принимая во внимание только периодическую составляющую свободного тока, условие стационарности режима при изменении скорости можно представить следующим образом

$$\lim_{\Delta t_n \to 0} \mathcal{J}_{\nu 2n} e^{\alpha_{2n}\Delta t_n} = 0. \tag{1.17}$$

Здесь: n=1, 2 …; $J_{\nu_{2n}}$ - амплитудное значение периодической составляющей тока в начале интервала (n).

Так как $J_{\nu_{2n}}$ зависит от величины $\Delta s_n = s_n - s_{n-1}$, а $\alpha_2 \approx -\rho_2 + j\omega$ (см. пунктирные кривые на рис. 2 и 3), то условие стационарности режима будет определяться ускорением ротора и коэффициентом затухания роторной обмотки при замкнутом статоре.

На основании изложенного можно сделать выводы, что:

- при невыполнении условия (1.17) изменение скорости сопровождается образованием свободных токов;

- учет ускорения ротора необходимо производить в области больших скоростей;

- решающую роль в этом области играет периодическая составляющая свободных токов, апериодическая составляющая незначительна;

- наиболее важным параметром, определяющим величину свободных токов, является коэффициент затухания роторной обмотки, коэффициент затухания статорной обмотки играет незначительную роль.

Таким образом, полученные выводов позволяют провести анализ эксплуатационных режимов асинхронных двигателей, когда по условиям задачи скорость является неизвестной величиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, Г. Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 1. Введение. Трансформаторы / Г.Н. Петров // М.: Энергия, 1974. – 240 с.
2. Костенко, М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины, в 2-х частях 3-е издание / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский // М.: Энергия, 1972.
3. Копылов, И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 2-е изд. / И.П. Копылов // М.: Высш. шк., 2000. – 607 с.
4. Беспалов, В.Я. Электрические машины / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец // М.: Академия, 2010. – 314 с.
5. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины. / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов // М.: Альянс, 2016. – 528 с.
6. Кацман, М. М. Электрические машины / М.М. Кацман // М.: Высш. шк., 2003. - 470 с.
7. Иванов, С.Н. Влияние ограничивающих факторов на электромагнитную мощность электрических машин / К.К. Ким, С.Н. Иванов // Ученые записки КнАГТУ – 2016. – № II-1(26). – С.4-8.
8. Ким, К.К. Электромеханические генераторы тепловой энергии [Электронный ресурс] : монография / К. К. Ким, С. Н. Иванов. — Электрон. текстовые данные. — Саратов : Ай Пи Эр Медиа, 2019. — 289 с. — 978-5-4486-0578-9. — Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/85859.html
9. Горев, А. А. Основные уравнения неустановившегося режима синхронной машины / А.А. Горев // Труды ЛПИ № 5, 1936.
10. Казовский, Е.Я. Переходные процессы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях / Е.Я. Казовский // Электричество -1947. - № 6.
11. Шубенко, В.А. Графический метод расчета переходных процессов в асинхронном двигателе / И.С. Пинчук, В.А. Шубенко // Электричество - 1950. - № 2.
12. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины: Учебник для вузов / А.В. Иванов-Смоленский // М.: Энергия, 1980. – 928 с.
13. Ляпунов, А.М. Общая задача об устойчивости движения / А.М. Ляпунов // Череповец : Меркурий - Пресс, 2000. – 386 с.