

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ВКЛЮЧЕНИЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН МЕТОДОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Г. А. СИПАЙЛОВ

Введение

Аналитическое исследование переходных процессов в асинхронных машинах представляет известные трудности.

Исходные уравнения равновесия напряжений содержат переменные коэффициенты, так как взаимоиндуктивность между обмотками статора и ротора при вращении ротора периодически изменяется. Кроме того, если в теории синхронных машин основным затруднением является имеющаяся в общем случае магнитная несимметрия в роторе, то в асинхронных машинах затруднение заключается в необходимости учёта несинхронной скорости вращения ротора.

С целью упрощения рассмотрения переходных процессов синхронных и асинхронных машин в современной теории электрических машин разработан ряд методов, к ним прежде всего относятся:

1. Применение относительных единиц, позволяющих освободить уравнение от большого количества коэффициентов.
2. Рассмотрение несимметричных режимов, как совокупности симметричных, с помощью метода симметричных составляющих.
3. Применение метода операторного исчисления.
4. Сведение трехфазной или в общем случае многофазной системы к эквивалентной двухфазной.
5. Преобразование переменных к одной системе координат.

Однако применение перечисленных выше методов анализа возможно только при некоторых допущениях. Во всех работах, рассматривающих переходные процессы в асинхронных машинах на базе современных методов анализа, принимаются, как правило, следующие допущения и приближения:

1. Приложенные напряжения и токи синусоидальны.
2. Учитываются только первые гармоники м.д.с. и потоков.
3. Насыщение учитывается только выбором соответствующих значений индуктивностей.
4. Потери в стали статора не учитываются.
5. Изменение активного сопротивления обмоток от нагревания не учитывается.
6. Все фазы статора и ротора предполагаются расположенными симметрично, и воздушный зазор по окружности статора принимается постоянным.
7. Машина соединена с сетью бесконечной мощности.
8. Взаимоиндуктивности между обмотками статора и ротора изменяются по синусоидальному закону.
9. Исследования ведутся без учёта токов нулевой последовательности.

Но даже при всех перечисленных допущениях аналитические выражения, характеризующие искомые величины при переходном процессе, имеют

довольно сложный вид, а уменьшение количества допущений приводит к ещё большим усложнениям общих уравнений, так что решение практических задач по ним становится затруднительным и не всегда целесообразным.

В условиях работы электропривода некоторые коэффициенты, входящие в дифференциальные уравнения, не являются постоянными, поэтому математический анализ, построенный на допущении постоянства этих коэффициентов, может давать значительные отклонения от величин, характеризующих действительные процессы.

К таким нелинейным коэффициентам относится, прежде всего, индуктивность. Ввиду непостоянства коэффициентов уравнения перестают быть линейными, поэтому приходится прибегать к приближенному решению дифференциальных уравнений.

В. Т. Касьяновым [2] разработана методика решения подобных уравнений для расчёта процессов регулирования магнитных полей, расчёта пуска, торможения, реверса, регулирования скорости и нагрузки двигателей постоянного тока.

В настоящей работе метод последовательных интервалов предлагается для расчёта переходных процессов асинхронных машин. Этот метод не претендует подменить собой метод современного математического анализа, наоборот, он предлагается как дополнение к нему.

Основные уравнения для расчета процессов включения однофазной асинхронной машины

Вопрос о рассмотрении переходных процессов в однофазном асинхронном двигателе с однофазным ротором представляет большой практический и математический интерес. Действительно, с точки зрения математического анализа однофазный асинхронный двигатель представляет наибольшие трудности при исследовании переходных процессов асинхронных машин. До сих пор ещё не дано общего аналитического решения для определения токов и потокосцеплений при внезапных нарушениях нормального режима (при включениях, выключениях, коротких замыканиях и т. д.).

Трудность решения этих задач заключается в том, что при вращающемся двигателе в общих уравнениях равновесия напряжений появляются периодические коэффициенты, от которых, вследствие одноосности однофазной машины, невозможно избавиться посредством каких-либо приёмов, широко используемых в многофазных машинах. Поэтому при аналитических исследованиях приходится рассматривать, в соответствии с физикой явления, пульсирующее поле, состоящим из двух полей, вращающихся с половинными амплитудами и в противоположные стороны.

Таким образом, статор однофазного асинхронного двигателя заменяется двумя последовательно соединёнными трёхфазными статорами с прямой и обратной последовательностью фаз. Прямое поле, вращающееся в сторону вращения ротора, индуцирует в проводниках ротора токи частоты скольжения. Эти токи создают вращающееся магнитное поле, которое, перемещаясь в пространстве со скоростью прямого поля, образует от взаимодействия с ним постоянный по величине вращающий момент. Тогда как обратное синхронное поле будет индуцировать в роторе токи двойной частоты, которые, в свою очередь, вызовут в статоре появление токов тройной частоты и т. д.

Поэтому однофазный асинхронный двигатель с однофазным ротором при аналитическом исследовании с применением современного математического анализа приходится рассматривать как совокупность целого ряда симметричных в электрическом и магнитном отношении систем с различными частотами.

Рассмотрением уравнений с периодическими коэффициентами имеется возможность избежать нагромождения отдельных систем друг на друга, но при этом возникает другая трудность—сложность решения уравнений с переменными коэффициентами.

Однако с применением метода последовательных интервалов эта задача решается сравнительно легко.

Уравнения равновесия напряжений для статора и ротора однофазной асинхронной машины с однофазным ротором в общем случае будут:

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{d}{dt} (M i_2 \cos \Theta), \quad (1)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{d}{dt} (M i_1 \cos \Theta).$$

При условии постоянной скорости

$$\Theta = \int_0^t \omega dt + \alpha_0 = \omega t + \alpha_0, \quad (2)$$

где Θ — угол поворота оси обмотки ротора относительно оси обмотки статора,

α_0 — начальный угол (за исключением особо оговоренных случаев α_0 принимается равным нулю, т. е. при $t=0$ $\alpha_0=0$).

При постоянном амплитудном значении взаимоиндуктивности M и неизменной скорости $\frac{d\Theta}{dt} = \omega$ уравнения (1) можно написать в следующем виде

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \cos \omega t - M \omega i_2 \sin \omega t, \quad (3)$$

$$u_2 = r_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \cos \omega t - M \omega i_1 \sin \omega t.$$

Уравнения (3) являются исходными уравнениями для исследования переходных процессов однофазного асинхронного двигателя с однофазным ротором.

Для того чтобы более наглядно представить сущность расчёта методом последовательных интервалов, можно рассмотреть наиболее простой случай, например, включение однофазного асинхронного двигателя при неподвижном и разомкнутом однофазном роторе.

В этом случае уравнения (3) примут следующий вид:

$$u_1 = r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt}, \quad (4)$$

$$E_2 = M \frac{di_1}{dt}.$$

Здесь $u_1 = U \sin 2\pi f t$ — мгновенное значение синусоидального напряжения сети,

$L_1 = L_{s1} + M = \frac{x_1 + x_m}{2\pi f}$ — полная индуктивность статора,

L_{s1} — индуктивность рассеяния статора.

Для определения тока статора и э.д.с. ротора методом последовательных интервалов нужно написать систему дифференциальных уравнений (4) в форме конечных приращений. Обозначив индексом m средние значения переменных величин в отрезке времени Δt , получим:

$$u_{1m} = r_1 i_{1m} + L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t}, \quad (5)$$

$$E_{2m} = M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}.$$

Эти средние значения можно выразить через начальные и конечные значения величин в рассматриваемом отрезке времени Δt

$$i_{1m} = \frac{i_1' + i_1''}{2} = i_1' + \frac{\Delta i_1}{2}; \quad E_{2m} = \frac{E_2' + E_2''}{2} = E_2' + \frac{\Delta E_2}{2}, \quad (6)$$

где i_1' и E_2' — мгновенные значения тока статора i_1 и э.д.с. ротора E_2 в начале отрезка времени Δt ,

i_1'' и E_2'' — мгновенные значения i_1 и E_2 в конце отрезка времени Δt ,

$\Delta i_1 = i_1'' - i_1'$; $\Delta E_2 = E_2'' - E_2'$ — приращения тока и э.д.с. за время Δt .

Для практических расчётов можно принимать отрезок времени Δt в зависимости от требуемой точности равным $1/12$ или $1/18$ периода, что соответствует при частоте 50 гц $1/600$ или соответственно $1/900$ сек.

Подставляя из уравнений (6) средние значения тока статора i_{1m} и э.д.с. ротора E_{2m} в уравнения (5), получим

$$u_{1m} = \left(i_1' + \frac{\Delta i_1}{2} \right) r_1 + L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t}; \quad E_2' + \frac{\Delta E_2}{2} = M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (7) относительно Δi_1 и ΔE_2 , находим расчётные уравнения:

$$\Delta i_1 = \frac{u_{1m} - r_1 i_1'}{\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t}}, \quad \Delta E_2 = 2 \frac{M}{\Delta t} \Delta i_1 - 2 E_2'. \quad (8)$$

Имея начальные условия (значения U_1' , i_1' и E_2' при $t=0$), которые обычно заносятся в первую строку расчётной таблицы, и подставляя их в первое из уравнений (8), получим приращение тока за выбранный отрезок времени Δt , после чего, подставляя значение Δi_1 во второе из уравнений (8), можно определить приращение э.д.с. ротора ΔE_2 за этот же промежуток времени Δt .

Значения тока статора и э.д.с. ротора в конце первого промежутка Δt находятся из следующих уравнений:

$$i_1 = i_1' + \Delta i_1; \quad E_2 = E_2' + \Delta E_2. \quad (9)$$

Занеся полученные значения тока статора i_1 и э.д.с. ротора E_2 во вторую строку расчётной таблицы, можно приступить к расчету следующей, третьей строки, для которой начальными условиями будут только что найденные данные второй строки и т. д.

Таблица при расчёте методом последовательных интервалов имеет обычно простой вид.

Таблица 1

t	u_{1m}	Δi_1	i_1	ΔE_2	E_2
0			i_1'		E_2'
Δt	$u_{1m(1)}$	$\Delta i_{1(1)}$	$i_1' + \Delta i_{1(1)}$	$\Delta E_{2(1)}$	$E_2' + \Delta E_{2(1)}$
$2 \Delta t$	$u_{1m(2)}$	$\Delta i_{1(2)}$	$i_1' + \Delta i_{1(1)} + \Delta i_{1(2)}$	$\Delta E_{2(2)}$	$E_2' + \Delta E_{2(1)} + \Delta E_{2(2)}$

и т. д.

При расчёте с учётом насыщения целесообразно добавить в расчётную табл. 1 ещё один столбец, отображающий изменение взаимной индуктивности при переходе от одного интервала к другому.

Расчётные значения получаются более близкими к действительным (опытным), если брать среднюю величину u_{1m} не как полусумму значений напряжений в начале и в конце интервала, а как такое напряжение, которое в действительности имеет место в середине интервала. Это напряжение соответствует моменту времени $t + \frac{\Delta t}{2}$ и находится по сред-

нему углу. Например, для первого интервала при $\Delta t = \frac{1}{600}$ сек вместо

$$u_{1m} = \frac{U \sin 0 + U \sin 30^\circ}{2} = 0,25 U$$

получим

$$u_{1m} = U \sin \left(\frac{0 + 30^\circ}{2} \right) = 0,259 U.$$

Для второго интервала вместо

$$u_{1m} = \frac{U \sin 30^\circ + U \sin 60^\circ}{2} = 0,683 U$$

получим

$$u_{1m} = U \sin \left(\frac{30^\circ + 60^\circ}{2} \right) = 0,707 U$$

и т. д.

Аналогичным образом выводятся уравнения для расчёта процессов включения, выключения и короткого замыкания однофазного асинхронного двигателя при неподвижном и вращающемся, разомкнутом и замкнутом, однофазном и трёхфазном роторе.

Так, например, для определения токов статора и ротора при включении однофазного статора при замкнутом вращающемся однофазном роторе нужно подставить в уравнение (3) $u_2 = 0$. Тогда уравнения (3), написанные в форме конечных приращений, после подстановки уравнений (6), примут вид:

$$\left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \Delta i_1 + \left(\frac{M}{\Delta t} \cos \omega t - \frac{M\omega}{2} \sin \omega t \right) \Delta i_2 = u_{1m} - r_1 i_1' + M \omega i_2' \sin \omega t, \quad (10)$$

$$\left(\frac{M}{\Delta t} \cos \omega t - \frac{M\omega}{2} \sin \omega t \right) \Delta i_1 + \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) \Delta i_2 = -r_2 i_2' + M \omega i_1' \sin \omega t.$$

Решение системы уравнений (10) относительно Δi_1 и Δi_2 даёт:

$$\Delta i_1 = \frac{\left(u_{1m} - r_1 i'_1 + M \omega i'_2 \sin \omega t \right) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) + \left(r_2 i'_2 - M \omega i'_1 \sin \omega t \right) \left(\frac{M}{\Delta t} \cos \omega t - \frac{M \omega}{2} \sin \omega t \right)}{\left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M}{\Delta t} \cos \omega t - \frac{M \omega}{2} \sin \omega t \right)^2}, \quad (11)$$

$$\Delta i_2 = \frac{\left(u_{1m} - r_1 i'_1 + M \omega i'_2 \sin \omega t \right) \left(\frac{M}{\Delta t} \cos \omega t - \frac{M \omega}{2} \sin \omega t \right) + \left(r_2 i'_2 - M \omega i'_1 \sin \omega t \right) \left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right)}{\left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M}{\Delta t} \cos \omega t - \frac{M \omega}{2} \sin \omega t \right)^2}.$$

Если в исследуемой машине можно принять равными параметры статора и приведенные параметры ротора, т. е.

$$\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} = \frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} = \frac{r}{2} + \frac{L}{\Delta t},$$

то расчётные уравнения (11) можно привести к следующему виду:

$$\Delta i_1 = \frac{(u_{1m} - r_1 i'_1 + M \omega i'_2 \sin \omega t) + (r_2 i'_2 - M \omega i'_1 \sin \omega t) A \sin(\gamma - \omega t)}{B [C - \sin^2(\gamma - \omega t)]}, \quad (12)$$

$$\Delta i_2 = \frac{(u_{1m} - r_1 i'_1 + M \omega i'_2 \sin \omega t) A \sin(\gamma - \omega t) + (r_2 i'_2 - M \omega i'_1 \sin \omega t)}{B [C - \sin^2(\gamma - \omega t)]},$$

где

$$A = \frac{\sqrt{\left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{M \omega}{2} \right)^2}}{\frac{r}{2} + \frac{L}{\Delta t}}, \quad B = \frac{\left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{M \omega}{2} \right)^2}{\frac{r}{2} + \frac{L}{\Delta t}},$$

$$C = \frac{\left(\frac{r}{2} + \frac{L}{\Delta t} \right)^2}{\left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{M \omega}{2} \right)^2} = \frac{1}{A^2}, \quad \gamma = \operatorname{arctg} \frac{2}{\Delta t \cdot \omega}.$$

Здесь с особенной строгостью должен быть вычислен коэффициент C , который обычно имеет величину, немногим большую единицы. Поэтому при неточном определении величины C при значениях $\sin^2(\gamma - \omega t)$, близких к единице, может получиться, что приращение тока стремится к бесконечности.

Результаты расчёта заносятся в таблицу, которая в этом случае имеет следующий вид:

Таблица 2

t	u_{1m}	$M \omega \sin \omega t_m$	$A \sin (\gamma - \omega t)_m$	$B[C - \sin^2(\gamma - \omega t)_m]$	Δi_1	i_1	Δi_2	i_2

Здесь $\sin \omega t_m$ и $\sin (\gamma - \omega t)_m$ — средние значения коэффициентов в рассматриваемом промежутке времени Δt .

Для ускорения расчёта целесообразно перед началом расчёта заполнить первые пять столбцов табл. 2. Такая операция занимает сравнительно мало времени.

Подставляя в (11) $\omega = 0$, можно получить уравнения для расчёта процесса включения однофазного двигателя при неподвижном замкнутом однофазном роторе:

$$\Delta i_1 = \frac{(u_{1m} - r_1 i'_1) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) + \frac{M}{\Delta t} r_2 i'_2}{\left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2},$$

$$\Delta i_2 = - \frac{(u_{1m} - r_1 i'_1) \frac{M}{\Delta t} + \left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) r_2 i'_2}{\left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2}.$$
(13)

При выполнении числовых расчётов с учётом насыщения уравнения (13) преобразуются таким образом, чтобы, во-первых, не повторялись в каждом интервале операции деления переменной взаимной индуктивности M на величину Δt и, во-вторых, чтобы расчётные уравнения не содержали второй степени переменной величины M

$$\Delta i_1 = K \frac{(u_{1m} - r_1 i'_1) \left(\frac{r_2 \Delta t}{2} + L_{S2} + M_m \right) + M_m r_2 i'_2}{C + M_m},$$

$$\Delta i_2 = -K \frac{(u_{1m} - r_1 i'_1) M_m + \left(\frac{r_1 \Delta t}{2} + L_{S1} + M_m \right) r_2 i'_2}{C + M_m},$$
(14)

где K и C — постоянные коэффициенты, причём

$$K = \frac{\Delta t}{\frac{r_1 \Delta t}{2} + L_{S1} + \frac{r_2 \Delta t}{2} + L_{S2}},$$

$$C = \frac{\left(\frac{r_1 \Delta t}{2} + L_{S1} \right) \left(\frac{r_2 \Delta t}{2} + L_{S2} \right)}{\frac{r_1 \Delta t}{2} + L_{S1} + \frac{r_2 \Delta t}{2} + L_{S2}},$$
(15)

$M_m = \frac{M' + M''}{2}$ — среднее значение переменной взаимоиндуктивности в рассматриваемом интервале,

$L_1 = L_{S1} + M$ и $L_2 = L_{S2} + M$ — полные индуктивности статора и ротора,
 L_{S1} и L_{S2} — индуктивности рассеяния статора и ротора.

Пользуясь уравнениями (14), можно производить расчёт как без учёта насыщения, так и с учётом его. При расчёте с учётом насыщения для каждого рассматриваемого интервала приходится находить по кривой $M=f(i)$ своё значение взаимоиндуктивности, что делает расчёт более трудоёмким. Однако количество вычислительных операций существенно сокращается, если среднее значение переменной взаимоиндуктивности находить не путём последовательных приближений, а путём экстраполяции. В остальном расчёт с учётом насыщения идёт таким же порядком, как и без учёта его.

Основные уравнения для расчёта процессов включения двухфазной асинхронной машины

Двухфазная асинхронная машина представляет собой наиболее простую симметричную во всех отношениях систему. Простота обусловливается наличием как на статоре, так и на роторе всего двух обмоток, расположенных в пространстве под углом в 90 электрических градусов. Это исключает взаимоиндукцию между фазами статора, а также между фазами ротора, что, в свою очередь, приводит к упрощению общих уравнений равновесия напряжений, в которых из всех э.д.с. взаимоиндукции приходится учитывать лишь э.д.с. от взаимоиндукции между обмотками статора и ротора.

Анализ двухфазной машины представляет большой интерес, так как, по существу, любая многофазная машина может быть приведена к двухфазной, поэтому почти все авторы, изучая переходные процессы в трёхфазных или в общем случае многофазных машинах, исследовали, как правило, процессы, происходящие в двухфазной машине, обобщая далее результаты исследования на случай многофазной машины.

Для симметричной двухфазной машины (фиг. 1)

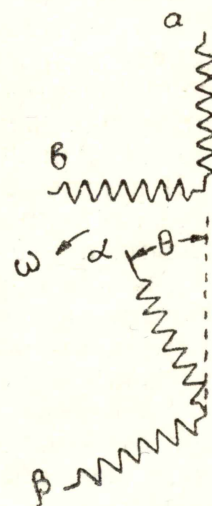
$$L_a = L_b = L_1; \quad r_a = r_b = r_1;$$

$$L_\alpha = L_\beta = L_2; \quad r_\alpha = r_\beta = r_2;$$

$$M_{\alpha_{max}} = M_{\beta_{max}} = M_{\alpha_{max}} = M_{\beta_{max}} = M.$$

Уравнения равновесия напряжений для статора

$$\begin{aligned} u_a &= r_1 i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} (M i_\alpha \cos \theta) - \frac{d}{dt} (M i_\beta \sin \theta), \\ u_b &= r_1 i_b + L_1 \frac{di_b}{dt} + \frac{d}{dt} (M i_\alpha \sin \theta) + \frac{d}{dt} (M i_\beta \cos \theta). \end{aligned} \quad (17)$$



Фиг. 1

(16)

Для ротора

$$\begin{aligned}
 u_a &= r_2 i_a + L_2 \frac{di_a}{dt} + \frac{d}{dt} (Mi_a \cos \Theta) + \frac{d}{dt} (Mi_b \sin \Theta), \\
 u_b &= r_2 i_b + L_2 \frac{di_b}{dt} - \frac{d}{dt} (Mi_a \sin \Theta) + \frac{d}{dt} (Mi_b \cos \Theta).
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Здесь значками a и b обозначены соответственно первая и вторая фазы статора; значками α и β —первая и вторая фазы ротора.

Одним из методов современного математического анализа, позволяющим значительно упростить решение ряда технических задач, является метод преобразования координат. Этот метод даёт возможность перейти от рассмотрения уравнений с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами. Сущность метода заключается в переходе от исследования реальной электрической машины к исследованию преобразованной модели, имеющей уравнение контуров, легче поддающееся математическому анализу. Л. Н. Грузов дал простой способ вывода уравнений в преобразованной системе. Этот способ основан на векторном изображении физических величин, участвующих в физической картине происходящих явлений.

Математически преобразование координат сводится к замене переменных в рассматриваемых уравнениях. В качестве новых переменных принимаются проекции старых переменных на координатные оси. Эти оси выбираются таким образом, чтобы закон изменения проекций рассматриваемых величин был возможно более простой.

Физически преобразование координат равноценно замене всех электрических контуров или части их преобразованными контурами, вращающимися в пространстве со скоростью вращения выбранных координатных осей. При этом для преобразованных контуров применяются такие параметры и к контурам прикладываются такие напряжения, при которых мощность машины и её вращающий момент остаются неизменными.

В настоящей работе принимается система координатных осей неподвижных в пространстве. Оси выбранной координатной системы совпадают с осями a и b статора.

Так как обмотки статора неподвижны, то они остаются непреобразованными, а все роторные величины проектируются на две взаимноперпендикулярные оси статора. Такое преобразование равноценно приведению роторных величин к частоте статора.

Уравнения для роторной цепи в преобразованной системе примут вид (для отличия, величины, относящиеся к ротору в преобразованной системе координат, обозначаются со „штрихом“, например, проекции роторных величин на ось a обозначаются U'_a , i'_a , на ось b — U'_b , i'_b и т. д.).

$$u'_a = u_a \cos \Theta - u_b \sin \Theta, \tag{19}$$

$$u'_b = u_a \sin \Theta + u_b \cos \Theta.$$

Соответственно

$$i'_a = i_a \cos \Theta - i_b \sin \Theta, \tag{20}$$

$$i'_b = i_a \sin \Theta + i_b \cos \Theta.$$

После несложных математических преобразований получим уравнения равновесия напряжений обмоток статора и ротора в преобразованной системе координат:

$$u_a = r_1 i_a + L_1 \frac{di_a}{dt} + M \frac{di'_a}{dt},$$

$$u_b = r_1 i_b + L_1 \frac{di_b}{dt} + M \frac{di'_\beta}{dt}, \quad (21)$$

$$u'_\alpha = r_2 i'_\alpha + L_2 \frac{di'_\alpha}{dt} + M \frac{di_\alpha}{dt} + L_2 \omega i'_\beta + M \omega i_b,$$

$$u'_\beta = r_2 i'_\beta + L_2 \frac{di'_\beta}{dt} + M \frac{di_b}{dt} - L_2 \omega i'_\alpha - M \omega i_\alpha.$$

Как следует из системы уравнений (21), получились уравнения с постоянными коэффициентами.

Так как дальнейшие операции производятся только с преобразованными значениями величин, относящихся к роторной цепи, то для удобства записи значки „штрих“ отбрасываются с тем, чтобы воспользоваться ими при расчёте методом последовательных интервалов для обозначения величин в начале рассматриваемого интервала. Однако следует иметь в виду, что теперь значки α и β соответствуют проекциям роторных величин соответственно на оси a и b статора.

Переходя к конечным приращениям и заменяя средние значения переменных величин подобно тому, как это было сделано для однофазной машины (уравнение 6), размещаем члены уравнения так, чтобы было удобно решить систему с помощью определителей

$$\begin{aligned} \left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \Delta i_\alpha + 0 + \frac{M}{\Delta t} \Delta i_\alpha + 0 &= u_{am} - r_1 i'_\alpha, \\ 0 + \left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \Delta i_b + 0 + \frac{M}{\Delta t} \Delta i_\beta &= u_{bm} - r_1 i'_b, \\ \frac{M}{\Delta t} \Delta i_\alpha + \frac{M\omega}{2} \Delta i_b + \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) \Delta i_\alpha + \frac{L_2\omega}{2} \Delta i_\beta &= \\ &= u_{am} - r_2 i'_\alpha - L_2 \omega i'_\beta - M \omega i'_b, \\ - \frac{M\omega}{2} \Delta i_\alpha + \frac{M}{\Delta t} \Delta i_b - \frac{L_2\omega}{2} \Delta i_\alpha + \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) \Delta i_\beta &= \\ &= u_{\beta m} - r_2 i'_\beta + L_2 \omega i'_\alpha + M \omega i'_\alpha. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь i'_α , i'_b , i'_α и i'_β — мгновенные значения соответствующих токов в начале рассматриваемого отрезка времени Δt ,
 Δi_α , Δi_b , Δi_α и Δi_β — приращения токов за время Δt .

Для сокращения записи при решении системы уравнений (22) вводятся следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A &= u_{am} - r_1 i'_\alpha; \quad C = u_{am} - r_2 i'_\alpha - L_2 \omega i'_\beta - M \omega i'_b; \\ B &= u_{bm} - r_1 i'_b; \quad D = u_{\beta m} - r_2 i'_\beta + L_2 \omega i'_\alpha + M \omega i'_\alpha; \end{aligned} \quad (23)$$

$$x = \frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t}; \quad y = \frac{M}{\Delta t}; \quad z = \frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t};$$

$$u = \frac{M\omega}{2}; \quad v = \frac{L_2\omega}{2}.$$

Раскрыв определители системы (22), находим общие уравнения для определения приращений токов Δi_a , Δi_b , Δi_α и Δi_β переходного процесса.

$$\begin{aligned}\Delta i_a &= \frac{AK_1 + BK_2 - CK_3 + DK_4}{K_9}, \\ \Delta i_b &= \frac{-AK_2 + BK_1 - CK_4 - DK_3}{K_9}, \\ \Delta i_\alpha &= -\frac{AK_5 + BK_6 - CK_7 + DK_8}{K_9}, \\ \Delta i_\beta &= -\frac{-AK_6 + BK_5 - CK_8 - DK_7}{K_9}.\end{aligned}\tag{24}$$

Здесь

$$\begin{aligned}K_1 &= x(z^2 + v^2) - y(uv + zy), & K_5 &= x(yz + uv) - y(y^2 + u^2), \\ K_2 &= y(uz - yv), & K_6 &= x(uz - yv), \\ K_3 &= y(xz - y^2), & K_7 &= x(xz - y^2), \\ K_4 &= y(xv - uy), & K_8 &= x(xv - uy), \\ K_9 &= (xz - y^2)^2 + (xv - uy)^2.\end{aligned}\tag{25}$$

При условии постоянной скорости и без учёта насыщения эти коэффициенты будут постоянными, причём $K_2 \approx 0$ и $K_6 \approx 0$, тогда весь расчёт сводится к вычислению значений A , B , C и D для каждого рассчитываемого интервала.

На основании уравнений (22) и (24), сокращённых обозначений (23) и коэффициентов (25) выводятся уравнения для расчёта процессов включения, выключения и короткого замыкания двухфазного асинхронного двигателя при неподвижном и вращающемся разомкнутом и замкнутом двухфазном роторе.

Например, для определения токов в фазах статора и э.д.с. в фазах ротора при включении двухфазного статора при разомкнутом вращающемся роторе, получим

$$\begin{aligned}\Delta i_a &= \frac{u_{am} - r_1 i'_a}{\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t}}, \\ \Delta i_b &= \frac{u_{bm} - r_1 i'_b}{\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t}}, \\ \Delta E_\alpha &= 2 \frac{M}{\Delta t} \Delta i_a + 2 M \omega \left(i'_b + \frac{\Delta i_b}{2} \right) - 2 E'_\alpha, \\ \Delta E_\beta &= 2 \frac{M}{\Delta t} \Delta i_b - 2 M \omega \left(i'_a + \frac{\Delta i_a}{2} \right) - 2 E'_\beta.\end{aligned}\tag{26}$$

По уравнениям (26) определяются проекции э.д.с. E_α и E_β на оси статора. Для определения действительных э.д.с. ротора нужно совершить

обратный переход от проекций э.д.с. ротора к их действительным величинам. Уравнения для обратного перехода можно получить, решая уравнения (19) или непосредственно из фиг. 1. Они имеют вид:

$$\begin{aligned} u_a &= u'_a \cos\theta + u'_\beta \sin\theta \\ u_\beta &= u'_\beta \cos\theta - u'_a \sin\theta. \end{aligned} \quad (27)$$

Для определения токов статора и ротора при включении двухфазного статора при неподвижном замкнутом роторе, когда оси обмоток статора и ротора совпадают, получим уравнения, во всем сходные с уравнениями для однофазной машины

$$\Delta i_a = \frac{(u_{am} - r_1 i'_a) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) + \frac{M}{\Delta t} r_2 i'_a}{\left(\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} \right) \left(\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M}{\Delta t} \right)^2} \quad (28)$$

и т. д.

Рассчитав токи в фазах статора и ротора, можно определить величину электромагнитного момента по известному уравнению

$$T = \frac{3}{2} x_m (i_\beta i_a - i_a i_\beta). \quad (29)$$

В уравнении (29) все величины даны в относительных единицах.

Основные уравнения процессов включения трёхфазной асинхронной машины

Отличие трёхфазной или, в общем случае, многофазной системы от двухфазной состоит в необходимости учёта взаимоиндукции между обмотками на статоре и на роторе. Это приводит к тому, что число уравнений равновесия напряжений увеличивается, а сами уравнения становятся более сложными.

В предлагаемой работе рассмотрены два метода исследования переходных процессов в трёхфазных асинхронных машинах.

Метод исследования при помощи уравнений в преобразованной системе координатных осей

В этой системе в качестве координатных осей принимаются оси обмоток. Особенностью системы является то, что все частоты токов и напряжений и скорости вращения обмоток и магнитных полей являются реальными физическими величинами, соответствующими физической картине работы машины.

В трёхфазной асинхронной машине с трёхфазным ротором имеется шесть электрических цепей: три на статоре и три на роторе. Уравнения равновесия напряжений для каждой из этих цепей можно написать в следующем виде:

$$u = r i + \frac{d}{dt} (L i) + \sum_{k=1}^n \frac{d}{dt} (M_{ki} i_k). \quad (30)$$

Взаимоиндукция существует между обмотками на статоре и на роторе, а также между обмотками статора и ротора. Пренебрегая насыщением, можно считать, что взаимоиндуктивность между двумя обмотками статора или между двумя обмотками ротора остаётся неизменной вслед-

ствие постоянного воздушного зазора, а между обмотками статора и ротора изменяется пропорционально косинусу угла поворота ротора относительно статора. Самоиндуктивность отдельных обмоток статора и ротора можно принять неизменной.

Выведенное на основе перечисленных допущений общее уравнение для расчёта токов переходного процесса оказалось очень громоздким, а потому мало пригодным для практических расчетов (по этой причине здесь не приводится). Однако им можно воспользоваться для некоторых частных случаев расчёта процессов включения, выключения и короткого замыкания.

Например, для определения пускового тока при включении трёхфазного асинхронного двигателя с трёхфазным ротором, когда обмотки статора и ротора соединены звездой и оси обмоток совпадают, получаются следующие расчётные уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta i_{s1} &= \frac{(u_{23m} + 2u_{12m} - 3r_1 i'_{s1})z + 3r_2 i'_{r1} y}{3(xz - y^2)}, \\ \Delta i_{s2} &= \frac{(u_{23m} - u_{12m} - 3r_1 i'_{s2})z + 3r_2 i'_{r2} y}{3(xz - y^2)}, \\ \Delta i_{r1} &= - \frac{(u_{23m} + 2u_{12m} - 3r_1 i'_{s1})y + 3r_2 i'_{r1} x}{3(xz - y^2)}, \\ \Delta i_{r2} &= - \frac{(u_{23m} - u_{12m} - 3r_1 i'_{s2})y + 3r_2 i'_{r2} x}{3(xz - y^2)}. \end{aligned} \quad (31)$$

Здесь

u_{12m} и u_{23m} — мгновенные значения линейных напряжений в середине рассматриваемого интервала,

$$x = \frac{r_1}{2} + \frac{L_{01}}{\Delta t}; \quad y = \frac{3M}{2\Delta t}; \quad z = \frac{r_2}{2} + \frac{L_{02}}{\Delta t},$$

$L_{01} = L_{s1} + \frac{3}{2}M$ — полная индуктивность трёхфазной обмотки.

Расчётные уравнения получаются ещё более простыми, если исходить из уравнений равновесия фазных напряжений.

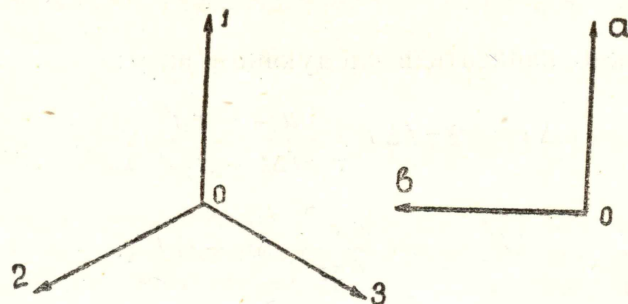
Преимуществом исследования данного переходного процесса в непробразованной системе координатных осей является то обстоятельство, что в результате вычисления по расчётным формулам (31) получаются непосредственно реальные токи в фазах статора и ротора, которые можно проверить по осциллограммам, снятым в момент включения.

Метод преобразования при помощи уравнений в „преобразованной“ системе координатных осей

При помощи метода „двухфазных составляющих“ трёхфазная или, в общем случае, многофазная машина приводится к эквивалентной двухфазной. Сущность преобразования заключается в том, что результирующую м.д.с. представляют не как результат сложения трёх волн м.д.с., соответствующих трём фазам обмотки, а как результат сложения двух эквивалентных волн м.д.с., расположенных под углом в 90 электрических градусов.

Замена трех векторов, расположенных в пространстве под углом в 120° друг к другу, двумя векторами, сдвинутыми друг относительно друга на угол 90° (фиг. 2), производится следующим образом:

Обычно оси новой системы располагают так, чтобы ось a совпадала с осью 1, а ось b была перпендикулярна к оси a и расположена между осями фаз 1 и 2, тогда проекции составляющих токов по новым осям на



Фиг. 2

старые в общем случае, когда сумма мгновенных значений не равна нулю, будут:

$$\begin{aligned} i_1 &= i_a + i_0, \\ i_2 &= -\frac{1}{2} i_a + \frac{\sqrt{3}}{2} i_b + i_0, \\ i_3 &= -\frac{1}{2} i_a - \frac{\sqrt{3}}{2} i_b + i_0. \end{aligned} \quad (32)$$

Соответствующие токи эквивалентной двухфазной системы можно получить, решая систему уравнений (32)

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{2}{3} \left(i_1 - \frac{1}{2} i_2 - \frac{1}{2} i_3 \right), \\ i_b &= \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} i_3 \right), \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_1 + i_2 + i_3). \end{aligned} \quad (33)$$

Уравнения, полученные после преобразования трёхфазной системы к двухфазной, справедливы для любой трёхфазной системы обмоток, расположенных в пространстве под углом 120° , независимо от того, вращаются ли данные обмотки или неподвижны. При этом оси новых обмоток a и b неподвижны относительно осей обмоток 1, 2 и 3.

Полученные после преобразования трёхфазной системы к двухфазной уравнения преобразуются к одной системе координатных осей. Тогда расчёт переходных процессов трёхфазной асинхронной машины можно выполнять по уравнениям, выведенным для двухфазной машины.

Приложение

Пример 1. Определить ток статора и э.д.с. ротора при включении однофазного статора при разомкнутом и неподвижном однофазном роторе. Известно, что оси обмоток статора и ротора совпадают, напряжение в момент включения проходит через нуль, магнитная цепь насыщена $U = 150$ в.

Параметры двигателя: $r_1 = 0,32$ ом, $x_1 = 0,65$ ом, $x_m = f(i)$ (фиг. 3),

$$U_n = 120$$
 в, $I_n = 19,2$ а, $n = 1435$ об/м.

Принимая во внимание, что

$$L_1 = L_{s1} + M = \frac{x_1 + x_m}{2\pi f},$$

уравнения (8) можно написать в следующем виде:

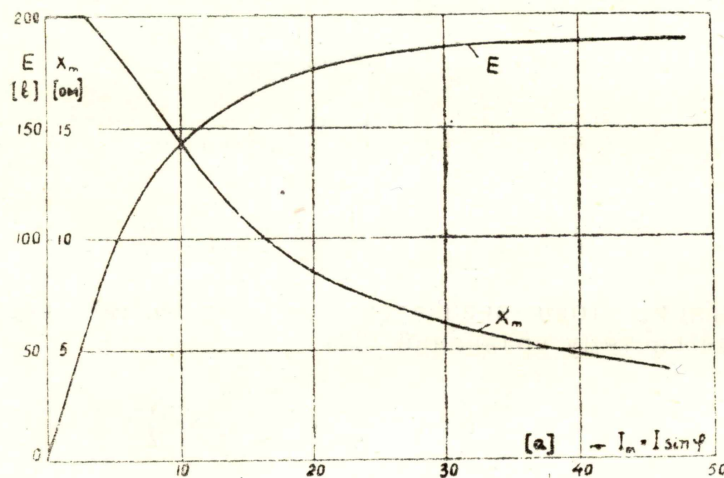
$$\Delta i_1 = 2\pi f \Delta t \frac{u_{1m} - r_1 i'_1}{r_1 \pi f \Delta t + x_1 + x_m},$$

$$\Delta E_2 = \frac{x_m}{\pi f \Delta t} \Delta i_1 - 2 E'_2, \quad (34)$$

где

x_1 — реактивное сопротивление рассеяния,

x_m — реактивное сопротивление от основного потока.



Фиг. 3

Подставляя в уравнение (34) параметры исследуемой машины и выбранный интервал времени $\Delta t = \frac{1}{12}$ периода $\left(\frac{1}{600} \text{ сек}\right)$, получим

$$\Delta i = 0,523 \frac{u_{1m} - 0,32 i'_1}{0,7 + x_{m \text{ ср}}},$$

$$\Delta E_2 = 3,82 x_{m \text{ ср}} \Delta i - 2 E'_2. \quad (35)$$

Здесь

$$x_{m \text{ ср}} = \frac{x'_m + x''_m}{2}, \quad u_{1m} = U \sin 2\pi f t_m.$$

Начальными условиями процесса будут:

$$u'_1 = 0; \quad i'_1 = 0; \quad E'_2 = 0; \quad x'_m = 20 \text{ ом}.$$

Для расчета, который будет выполняться в именованных единицах, составляется табл. 3.

В первый столбец таблицы заносится время отрезками по $\frac{1}{600} \text{ сек}$, во второй столбец — средние значения приложенного напряжения. Так что первые два столбца при выбранном интервале времени, принимая во внимание синусоидальное изменение напряжения, можно заполнить сразу, зная фазу напряжения в момент включения.

Установив закон изменения $x_m = f(t)$ в течение первого полного периода, при дальнейшем расчёте, имея некоторый опыт, можно находить средние значения $x_{m\text{ ср.}}$, не продолжая кривой $x_m = f(t)$.

Таблица 3

t	u_{1m}	$x_{m\text{ ср.}}$	Δi_1	i_1	ΔE_2	E_2
0				0		0
1/600	38,8	20	0,98	0,98	75	75
2/600	106	20	2,67	3,65	54	129
3/600	145	18,2	3,98	7,63	18	147
4/600	145	14,3	4,97	12,60	-22	125
5/600	106	11	4,56	17,16	-58	67
0,01	38,8	9,3	2,04	19,20	-64	6
7/600	-38,8	9,4	-2,33	16,87	-92	-86

и т. д.

По данным табл. 3 на фиг. 4 построены кривые тока и напряжения в функции времени. Для сравнения на этой же фигуре приведены опытные данные.

На фиг. 4 1—расчетная кривая,
2—опытная кривая.

Пример 2. Определить токи статора и ротора при включении однофазного статора при замкнутом однофазном роторе, вращающемся с постоянной скоростью.

Известно, что включение происходит в момент прохождения напряжения через нуль, т. е. при $t=0$, $u'_1 = 50 \sin(2\pi ft + \alpha_0) = 0$, магнитная цепь не насыщена, $\omega = 0,8 \cdot 2\pi f$.

Параметры машины $r_1 = 0,32$ ома, $r_2 = 0,4$ ома, $x_1 = 0,65$ ома, $x_2 = 0,72$ ома, $x_m = 20,0$ ома. При выбранном интервале времени

$$\Delta t = \frac{1}{600} \text{ сек, получим}$$

$$\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} = 0,16 + \frac{0,65 + 20}{2\pi \cdot 50} \cdot 600 = 39,6 \text{ ома.}$$

$$\frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} = 0,2 + \frac{0,72 + 20}{2\pi \cdot 50} \cdot 600 = 39,8 \text{ ома}$$

$$\frac{M}{\Delta t} = \frac{20}{2\pi \cdot 50} \cdot 600 = 38,2 \text{ ома; } \gamma = \arctg\left(\frac{2}{0,8 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot 600\right) = 78^\circ$$

Если принять

$$\frac{r_1}{2} + \frac{L_1}{\Delta t} = \frac{r_2}{2} + \frac{L_2}{\Delta t} = 39,7 \text{ ома,}$$

то можно воспользоваться уравнениями (12). Тогда после подстановки в эти уравнения вычисленных параметров получим следующие расчетные формулы:

$$\Delta i_1 = \frac{(u_{1m} - 0,32 i'_1 + 16 \sin \omega t_m \cdot i'_2) + (0,4 i'_2 - 16 \sin \omega t_m \cdot i'_1) 0,983 \sin(78 - \omega t)_m}{38,4 [1,035 - \sin^2(78 - \omega t)_m]},$$

$$\Delta i_2 = - \frac{(u_{1m} - 0,32 i'_1 + 16 \sin \omega t_m \cdot i'_2) 0,983 \sin(78 - \omega t)_m + (0,4 i'_2 - 16 \sin \omega t_m \cdot i'_1)}{38,4 [1,035 - \sin^2(78 - \omega t)_m]}.$$

Результирующий намагничивающий ток

$$i_1 = 3,65 + 3,65 = 7,3 \text{ а.}$$

Этому току по кривой $x_m = f(i)$ фиг. 3 соответствует $x''_m = 16,4 \text{ ом.}$
Следовательно,

$$x_{m \text{ ср.}} = \frac{20 + 16,4}{2} = 18,2 \text{ ом.}$$

Подставив это значение в формулу (35), находим во втором приближении

$$\Delta i_1 = 3,98 \text{ а,}$$

$$E_2 = 18 \text{ в.}$$

Следовательно,

$$i_1 = 3,65 + 3,98 = 7,63 \text{ а,}$$

$$E_2 = 129 + 18 = 147 \text{ в,}$$

чему по кривой фиг. 3 соответствует $x''_m = 16,3 \text{ ом.}$ Так как расхождения с величинами, найденными в первом приближении не очень велики, то расчет в третьем приближении можно не делать.

Поэтому найденные во втором приближении величины заносим в табл. 3, как окончательные.

Прежде чем приступить к расчету пятой строки, на фиг. 4 по данным табл. 3 строится начальный участок кривой $x_m = f(t)$. Экстраполируя эту кривую на отрезок времени $\frac{\Delta t}{2}$, получим приближенное значение $x_{m \text{ ср}}$ для расчета пятой строки.

Начальные условия для расчета пятой строки:

$$i'_1 = 7,63 \text{ а, } E'_2 = 147 \text{ в; } u_{1m} = 145 \text{ в;}$$

$$x_m = 14,4 \text{ ом (по кривой фиг. 4).}$$

Подставляя эти значения в формулу (35), получим

$$\Delta i_1 = 4,97 \text{ а, } \Delta E_2 = -22 \text{ в.}$$

Следовательно

$$i_1 = 12,60 \text{ а; } E_2 = 125 \text{ в.}$$

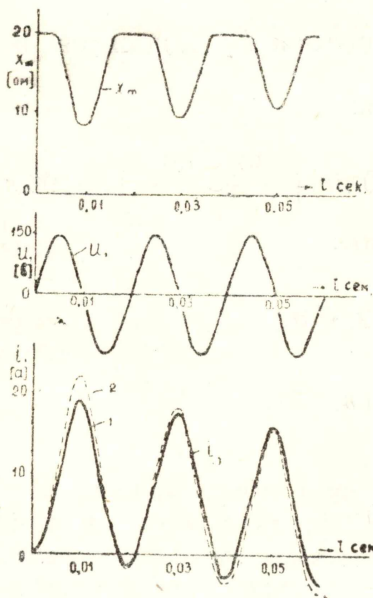
Значению тока $i_1 = 12,6 \text{ а}$ по кривой фиг. 3 соответствует $x''_m = 12,3 \text{ ом.}$

Проверяя правильность среднего значения $x_{m \text{ ср}}$, найденного путем экстраполяции, получим:

$$x_{m \text{ ср}} = \frac{x'_m + x''_m}{2} = \frac{16,3 + 12,3}{2} = 14,3 \text{ ом.}$$

Расхождение получилось незначительным, а потому можно занести вычисленные величины в пятую строку таблицы, как окончательные.

Далее, продолжая кривую $x_m = f(t)$, можно приступить к расчету шестой строки, который производится аналогично расчету пятой строки и т. д.

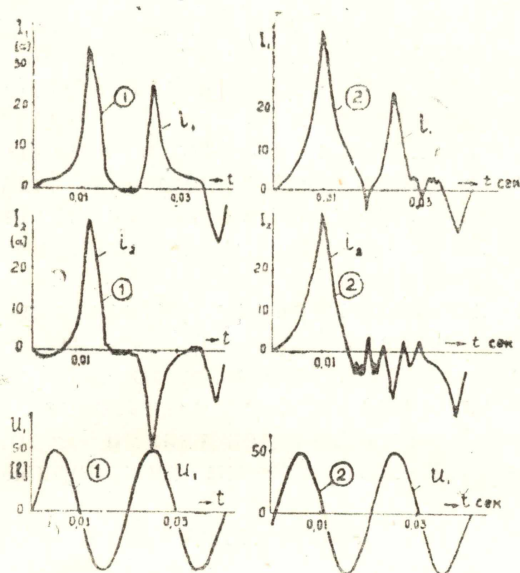


Фиг. 4

нения этих отклонений имеет смысл вычислять подставляемые в расчетные формулы коэффициенты, как среднее между средним арифметическим и действительным средним значением.

Аналогичным образом производятся расчеты для любого заданного режима.

Выполненные по изложенной методике расчеты для токов и э.д.с. при включениях и выключениях двухфазной и трехфазной машин при разомкнутом и замкнутом вращающемся и неподвижном роторе дали очень



Фиг. 5

близкие результаты по сравнению с полученными из опыта, например, для пускового тока трехфазного двигателя с трехфазным ротором наибольшее отклонение расчетной кривой от осциллограммы не превышало 5%.

Выводы

Изложенные исследования процессов включения, выключения и короткого замыкания асинхронных машин показали, что применение метода последовательных интервалов дает возможность в простой и доступной для непосредственного вычисления форме получить основные уравнения для расчета рассматриваемых переходных процессов. Вывод этих уравнений сводится к простым арифметическим и алгебраическим действиям, и решение их не представляет математических затруднений. Точность решения этих уравнений зависит, кроме принятых допущений, от величины выбранного интервала.

Анализируя полученные в настоящей работе уравнения и их применение к решению практических задач, можно сделать следующие выводы.

1. Существующие теории при рассмотрении переходных процессов оперируют переходными параметрами, вычисление, или опытное определение которых в отдельных случаях представляет значительные трудности и вызывает дополнительные погрешности.

При решении этих задач с помощью метода последовательных интервалов приходится оперировать только с основными параметрами: активными сопротивлениями обмоток статора и ротора r_1 и r_2 , индуктивностями рассеяния обмоток статора и ротора L_{s1} и L_{s2} и индуктивностью от основного потока M .

2. Достоинством метода последовательных интервалов является возможность существенного уменьшения количества допущений и приближений, что позволяет уменьшить погрешность расчета, в частности:

а) можно выполнять расчет с учетом насыщения, причем аналитические выражения уравнений для расчета переходных процессов методом последовательных интервалов как без учета насыщения, так и с учетом его имеют один и тот же вид;

б) при расчете переходных процессов часто пренебрегают падением напряжения в активном сопротивлении обмотки статора, тогда как оно оказывает существенное влияние на характер протекания переходного процесса, особенно в машинах небольшой мощности, порядка нескольких киловатт. При расчете методом последовательных интервалов учет указанного сопротивления не вносит в расчет существенных усложнений.

3. Задача расчета переходных процессов однофазного асинхронного двигателя до сих пор не имеет общего решения. Пользуясь методом последовательных интервалов, можно решить эту задачу, причем, как показали проделанные расчеты, получается картина, весьма близкая к действительности.

4. Расчет методом последовательных интервалов требует проделать значительно меньшее количество более простых вычислительных операций по сравнению с другими аналитическими методами расчета.

5. Вследствие замены сложных математических операций простыми арифметическими и алгебраическими действиями метод последовательных интервалов является достаточно удобным инженерным методом расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казовский Е. Я. а) Обобщенное рассмотрение переходных режимов в асинхронных и синхронных машинах, Электросила № 2—3, 1945.

б) Переходные процессы в асинхронных машинах при включениях и коротких замыканиях, Электричество № 6, 1947.

в) Переходные процессы в асинхронных машинах при включении и набросе нагрузки, ВЭП № 2, 1949.

2. Касьянов В. Т. а) Учет влияния поперечной реакции якоря на переходные процессы в некомпенсированных машинах постоянного тока, Электросила № 5, 1948.

б) К расчету внезапного короткого замыкания компенсированной машины постоянного тока, Техотчет, 1949.

в) Асинхронные машины при переменной частоте, Электричество № 2, 1949.

г) Расчет переходных процессов регулирования магнитного потока электрических машин с учетом насыщения, Техотчет, 1949.

д) О расчетном определении скорости нарастания напряжения возбудителя, Техотчет, 1950.