

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УРОВНЯХ НАСЫЩЕНИЯ

Ларин А.М., к.т.н., доц., Ламари Абдессалем, Ларина И.И., к.т.н., доц.
Донецкий национальный технический университет
Украина, 83000, Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра “Электрические системы”
тел. (0622) 91-03-07, E-mail: lam@elf.dgtu.donetsk.ua

Викладені основні положення методу визначення частотних характеристик провідності з боку обмотки статора асинхронної машини, які відповідають різним значенням насичення магнітного кола. Метод засновано на експериментальних даних, які реєструються при підключенні нерухомої електричної машини або машини, що обертається, до трифазного джерела живлення при різних величинах напруги.

Изложены основные положения метода определения частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора асинхронной машины, соответствующих различным значениям насыщения магнитной цепи. Метод основан на экспериментальных данных, регистрируемых при подключении неподвижной или вращающейся электрической машины к трехфазному источнику питания при различных величинах напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее прогрессивных путей повышения надежности и технико-экономической эффективности электрических машин (ЭМ) следует признать использование для исследований их математических моделей, адекватно отражающих реальные физические процессы [1]. Проводимые для этого расчеты должны основываться на уточненном описании электромагнитных свойств ЭМ переменного тока, обусловленных вытеснением тока в роторных контурах и насыщением путей магнитных потоков. Это обуславливает актуальность задачи совершенствования существующих моделей ЭМ в направлении большей их физической обоснованности, а также создания алгоритмов моделирования переходных процессов, обеспечивающих быстрое и наглядное получение результатов с заданной точностью решения практических задач. Современные методы анализа позволяют рассматривать переходные процессы с учетом многих контуров на роторе с помощью частотных методов, основанных на свойствах интеграла Фурье и преобразования Лапласа [2-4]. Под частотными характеристиками (ЧХ) здесь понимается зависимость комплексных значений проводимости со стороны обмотки статора $y(js) = 1/x(js)$ от скольжения или частоты тока в роторе. Применение (ЧХ) позволит также повысить точность учета насыщения на параметры переходного режима. При таком подходе к расчету нет ограничения на необходимость сохранения ЧХ определенного вида. Поэтому для расчетов с учетом влияния насыщения может быть использовано семейство экспериментальных ЧХ, учитывающих насыщение в функции тока при заданном напряжении на статоре в исходном режиме. Определение такого семейства характеристик требует проведения серии однотипных экспериментов, отличающихся вариацией начальных условий.

В настоящее время имеются методики определения электромагнитных параметров (ЭМП) и ЧХ с учетом насыщения путей магнитных потоков ЭМ [5-8]. К неточностям указанных методик следует отнести то, что условия проведения опытов либо отличаются от

реальных условий эксплуатации (ЭМ неподвижна) [5, 8], либо соответствует различным магнитным состояниям электрических машин [6], поскольку токи в обмотках статора и роторных контурах изменяются в несколько раз.

В [9] предложен метод определения ЧХ проводимости со стороны обмотки статора ЭМ с симметричной конструкцией ротора, основанный на данных измерений токов и напряжений при включении в сеть заторможенной машины. Условия проведения опытов практически обеспечивают условие постоянства периодической составляющей тока статора. Следовательно, можно утверждать, что получаемые этим методом ЧХ соответствуют заданному уровню насыщения в зависимости от величины приложенного напряжения. Однако, имеет место погрешность в определении ЧХ и ЭМП даже в условиях идеализированного (математического) эксперимента. Это свидетельствует о неполном соответствии между принятой в [9] математической моделью асинхронной машины (АМ) и реальным объектом.

Целью настоящей работы является уточнение метода экспериментального определения ЧХ АМ, соответствующих заданному уровню насыщения магнитной цепи, по данным опытов подключения их к источнику трехфазного напряжения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ТОКА СТАТОРА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЭМ В СЕТЬ

В [9] принята математическая модель, в соответствии с которой, изменение изображающего вектора тока обмотки статора $(i_{-s}(t))$ в синхронно вращающихся координатах при включении заторможенного асинхронного двигателя (АД) в сеть, определяется уравнением:

$$i_{-s}(t) = i_{-s0}(t=0) + (i_{-s1}(t=0) e^{-t/T_a} + \sum_{k=1}^N I_{s2k} e^{j\alpha_2} e^{-t/T_k}) e^{-j\omega t} \quad (1)$$

В (1) приняты следующие обозначения:

$i_{-s0(t=0)}$ - вектор установившегося тока статора,

который определяется по ЧХ для значения скольжения $s=1$:

$$i_{-s0(t=0)} = y(js)_{s=1}; \quad (2)$$

$i_{-s1(t=0)}$ - вектор аperiodической составляющей

переходного тока в начальный момент времени: определяется по точке ЧХ при скольжении $s=0$:

$$i_{-s1(t=0)} = -y(js)_{s=0}. \quad (3)$$

T_a - постоянная времени затухания аperiodической

тока статора; I_{s2k}, T_k - начальные значения и постоянные времени, составляющих свободного периодического тока статора; N - количество контуров на роторе; α_2 - аргумент вектора полного периодического тока $i_{-s2(t=0)}$ в начальный момент времени.

Неточность принятой в [9] модели обусловлена допущением того, что векторы всех составляющих переходного периодического тока статора в начальный момент совпадают по фазе с результирующим вектором $i_{-s2(t=0)}$. Модули их определяются как проекции

действительных векторов i_{-s2k} на направление вектора

$i_{-s2(t=0)}$. Кроме того, предложенный в [9] метод может

быть применен только для случая включения в сеть заторможенной асинхронной машины (АМ).

Рассмотрим более универсальную математическую модель, позволяющую определять переходные токи статора при включении в сеть АМ, вращающейся с любым заданным скольжением.

На рис.1 приведена векторная диаграмма в начальный момент подключения к источнику трехфазного напряжения неподвижного АД.

Расчет с учетом влияния активного сопротивления в цепи обмотки статора производится в следующей последовательности.

Рассчитывается ЧХ с учетом влияния активного сопротивления обмотки статора $y_r(js)$:

$$y_r(js) = \frac{j}{r_s + jx(js)}. \quad (4)$$

Определяется вектор установившегося тока статора по характеристике $y_r(js)$ для заданного скольжения s , в момент включения:

$$i_{-s0(t=0)} = y_r(js) \quad (5)$$

В дальнейшем этот вектор будет вращаться с синхронной скоростью, т.е.

$$i_{-s0}(t) = i_{-s0(t=0)} \cdot e^{j\omega t}. \quad (6)$$

Аperiodическая составляющая переходного тока $i_{-s1(t=0)}$ в момент $t=0$ определяется по точке характе-

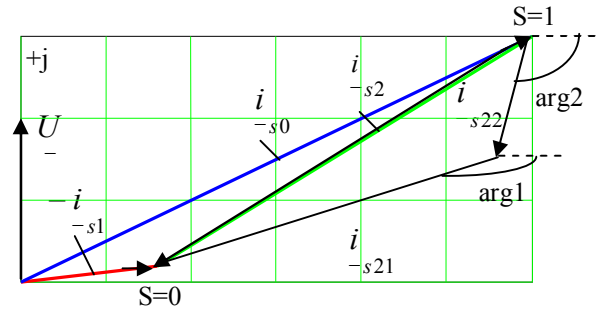


Рис 1. Векторная диаграмма в начальный момент подключения к сети неподвижного АД

ристики $y_r(js)$ при скольжении $-(1-s)$:

$$i_{-s1(t=0)} = -y_r(js)_{s=-(1-s)}. \quad (7)$$

Изменение во времени аperiodического тока подчинено следующему закону

$$i_{-s1}(t) = i_{-s1(t=0)} e^{j\omega_c \omega t} \cdot e^{-t/T_a}. \quad (8)$$

Собственная частота вращения ω_c и электромагнитная постоянная времени T_a определяются по ЧХ для того же значения скольжения $-(1-s)$:

$$\omega_c = \text{Im}[y_r(js)_{s=-(1-s)}] \cdot r_s. \quad (9)$$

$$T_a = \frac{1}{\text{Re}[y_r(js)_{s=-(1-s)}] \cdot r_s \cdot \omega}. \quad (10)$$

Начальное значение вектора переходного периодического тока $i_{-s2r(t=0)}$ рассчитывается из условия

$$i_{-s0(t=0)} + i_{-s1(t=0)} + i_{-s2r(t=0)} = 0, \text{ поскольку до включения ЭМ в сеть ток в обмотке статора отсутствовал.}$$

Следовательно,

$$i_{-s2r(t=0)} = -i_{-s1(t=0)} - i_{-s0(t=0)}. \quad (11)$$

Закон изменения периодического затухающего тока во времени с учетом влияния активного сопротивления в обмотке статора будет таким

$$i_{-s2r}(t) = \left(\sum_{k=1}^N i_{-s2rk} \cdot e^{-t/T_{rk}} \right) \cdot e^{j(1-s)\omega t}, \quad (12)$$

где i_{-s2rk}, T_{rk} - начальные значения и постоянные времени затухания составляющих периодического тока с учетом влияния активного сопротивления обмотки статора.

Начальные значения комплексов i_{-s2rk} составляющих тока i_{-s2} вычисляются следующим образом:

$$i_{-s2rk} = i_{-s2k} \frac{i_{-s2r(t=0)}}{i_{-s2(t=0)}}, \quad (13)$$

где i_{-s2k} - составляющие, определяемые без учета

активного сопротивления в обмотке статора:

$$\begin{aligned} i_{-s2k} &= i_{-s2k(s=-(1-s))} - i_{-s2k(s=s)} = \\ &= \frac{r_k}{(jr_k + (1-s)x_k)(r_k + jsx_k)}; \quad (14) \\ i_{-s2(t=0)} &= \sum_{k=1}^N i_{-s2k} \end{aligned}$$

Постоянные времени T_{rk} затухания соответствующих составляющих равны

$$T_{rk} = \frac{1}{\alpha_{rk}}; \quad \alpha_{rk} = \frac{r_k}{x_k} \left(1 + r_s \frac{x_k}{\left(\frac{r_k}{x_k} \right)^2 + (1-s)^2} \right), \quad (15)$$

где r_k, x_k - параметры эквивалентной схеме замещения Г-образного типа (рис.2), адекватной частотной характеристике $y(js)$ без учета активного сопротивления статорной обмотки.

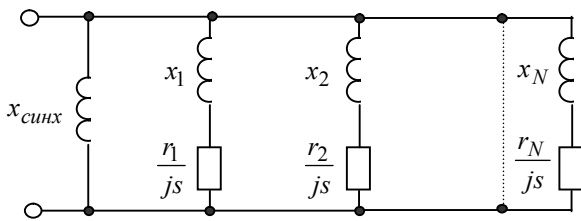


Рис.2. Схема замещения АМ Г-образного типа

Тогда, закон изменения изображающего вектора переходного тока статора во времени в неподвижных осях при условии постоянства скольжения описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} i_{-s}(t) &= i_{-s0(t=0)} e^{j\omega t} + i_{-s1(t=0)} e^{j\omega_c \omega t} e^{-t/T_a} + \\ &+ \sum_{k=1}^N i_{-s2rk} e^{j(1-s)\omega t} e^{-t/T_{rk}} \end{aligned} \quad (16)$$

Полученное математическое соотношение позволяет по ЧХ проводимости со стороны обмотки статора и соответствующим параметрам схемы замещения (рис.2) аналитически представлять переходную функцию тока статора при включении в сеть АМ, вращающей с постоянным скольжением. Следовательно, задача может иметь и обратное решение, т.е. по экспериментальной переходной функции тока статора можно рассчитывать параметры схемы замещения Г-образного типа и соответствующей ей ЧХ.

Однако, практическое осуществление экспериментальных исследований, при включении АМ в сеть с заданным неизменным скольжением даже в условиях испытательных стендов электромашиностроительных заводов и НИИ крайне затруднительно. Поэтому правомочна постановка задачи рассмотрения частных случаев, связанных с включением в сеть неподвижных АМ с заторможенным ротором или вращающихся

с синхронной скоростью.

В последнем случае метод целесообразно использовать, например, для определения электромагнитных параметров асинхронных генераторов ветровых электростанций. Автоматика управлением асинхронными генераторами ветровых ЭС настроена таким образом, чтобы включение их в сеть происходило при синхронной скорости вращения.

Для определения закона изменения переходного тока статора при подключении неподвижной или вращающейся с синхронной скоростью АМ к источнику трехфазного напряжения используется изложенный выше алгоритм. При этом необходимо иметь в виду, что значение скольжения $s=1$ в первом случае, и $s=0$ - во втором. Скорости вращения ротора соответственно равны $\omega_r = (1-s) = 0$ и $\omega_r = (1-s) = 1$.

Таким образом, уравнение (16) представляет собой математическую модель изображающего вектора тока в обмотке статора при включении в сеть неподвижной ($s=1$) или вращающейся с синхронной ($s=0$) скоростью АМ. В соответствии с этой моделью могут быть предложены алгоритмы определения параметров схемы замещения, приведенной на рис.2 и соответствующей ей частотной характеристике $y(js)$ по данным опытов включения в сеть неподвижной или вращающейся с синхронной скоростью АМ.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ МАШИН

Рассмотрим вначале случай включения в сеть неподвижной машины, имеющей несколько обмоток на роторе.

Предполагаются известными следующие параметры АМ: индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора x_σ ; активное сопротивление обмотки статора r_s и индуктивное сопротивление ветви намагничивания x_μ , которые могут быть взяты из каталожных данных, или определены экспериментально. В опыте необходимо регистрировать мгновенные значения трех фазных токов и одного напряжения.

По данным измерения мгновенных величин токов в трех фазах определяются значения модуля обобщенного вектора переходного тока статора для различных моментов времени:

$$\begin{aligned} I_{son}(t_l) &= \sqrt{\frac{2}{3} (i_a^2(t_l) + i_b^2(t_l) + i_c^2(t_l))}, \\ l &= 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (17)$$

где n - количество измерений переходных токов.

По данным измерений фазных токов и напряжений в установившемся режиме после включения машины в сеть определяется модуль (I_{sr0}) и аргумент (α_{r0}) вектора тока i_{-sr0} , которые отражают влияние активного сопротивления обмотки статора r_s .

Рассчитывается начальное значение вектора апериодической составляющей тока включения неподвижной машины на источник трехфазного напряже-

ния $i_{-sr1(t=0)}$ и постоянная времени его затухания T_{ra} :

$$i_{-sr1(t=0)} = \frac{U}{x_{\sigma} + x_{\mu} + \frac{r_s}{j}},$$

$$T_{ra} = \frac{1}{\operatorname{Re}[i_{-sr1(t=0)}] \cdot r_s \omega}, \quad (18)$$

где U – напряжение, подводимое к обмотке статора в опыте включения.

В соответствии с (11) определяется модуль I_{sr20} и аргумент α_{r2} вектора тока $i_{-sr2(t=0)}$ в начальный момент времени:

$$i_{-sr2(t=0)} = I_{sr20} e^{j\alpha_{r2}}. \quad (19)$$

Представим составляющие его векторы i_{-s2rk} следующим образом:

$$i_{-s2rk} = I_{s2rk} e^{j\arg_k}, \quad (20)$$

где I_{s2rk} , \arg_k – модуль и аргумент вектора k -ой составляющей переходного периодического тока статора (рис. 1).

Тогда, в уравнении (16) неизвестными будут начальные значения модулей I_{s2rk} и аргументы \arg_k , а также постоянные времени T_{rk} затухания составляющих периодического тока i_{-sr2} .

В общем случае, при наличии на роторе N числа контуров, их нахождение требует решения оптимизационной задачи.

Оптимизации подлежит функция, которая определяет значения модулей изображающего тока статора для различных моментов времени:

$$I_s(t, I_{s2rk}, \arg_k, T_{rk}) = \operatorname{Mod}[I_{sr0} e^{i\alpha_{r0}} + (i_{-sr1(t=0)} e^{-t/T_{ra}} + \sum_{k=1}^N I_{s2rk} e^{i\arg_k} e^{-t/T_{rk}}) e^{-j\omega t}]. \quad (21)$$

Для отыскания неизвестных может быть использована функция универсального математического пакета MathCad “Civen.....Minerr”.

С помощью этой функции определяются значения I_{s2rk} , \arg_k и T_{rk} , входящие в правую часть уравнения (21), при которых модуль рассчитываемой правой части уравнения (21) минимально отличается от модуля экспериментально полученной в соответствии с (17) левой части ($I_{son}(t)$) для всех заданных значений времени, т.е.

$$I_s(t_l, I_{s2rk}, \arg_k, T_{rk}) = I_{son}(t_l);$$

$$k = 1, 2 \dots N; \quad l = 1, 2, 3 \dots n. \quad (22)$$

Таким образом, в результате оптимизации функции (22) находим векторы составляющих переходного периодического тока статора с учетом влияния активного сопротивления: $i_{-s2rk} = I_{s2rk} e^{j\arg_k}$.

Дальнейший расчет заключается в определении

параметров Г-образной эквивалентной схемы замещения и соответствующей ей ЧХ. Для этого:

Вычисляется изображающий вектор установившегося тока статора без учета активного сопротивления.

$$i_{-s0(t=0)} = \frac{1}{\frac{1}{I_{sr0} e^{j\alpha_{r0}}} - \frac{r_s}{j}}. \quad (23)$$

Этот вектор представляет собою значение комплекса частотной характеристики $y(js)$ без учета активного сопротивления статора при значении $s = 1$.

Рассчитывается вектор апериодической слагаемой тока статора, соответствующий значению ЧХ $y(js)$ при $s = 0$.

$$i_{-s1(t=0)} = -\frac{1}{x_{\mu} + x_{\sigma}}. \quad (24)$$

Находится значение вектора переходного периодического тока статора в начальный момент времени без учета активного сопротивления в цепи обмотки статора $i_{-s2(t=0)}$, представляющий собою комплекс-

ную проводимость роторных контуров при скольжении $s = 1$.

$$i_{-s2(t=0)} = -(i_{-s0(t=0)} + i_{-s1(t=0)}). \quad (25)$$

Векторы отдельных составляющих тока $i_{-s2(t=0)}$

без учета r_s определяются пересчетом соответствующих слагаемых, учитывающих влияние активного сопротивления, умножением на комплексный коэффициент, характеризующий отношение полных векторов $i_{-s2(t=0)}$ и $i_{-s2r(t=0)}$, т.е.

$$i_{-s2k} = i_{-s2rk} \frac{i_{-s2(t=0)}}{\sum_{k=1}^N i_{-s2rk}}. \quad (26)$$

Определяются значения индуктивных и активных сопротивлений Г-образной эквивалентной схемы замещения:

$$x_k = -\frac{\operatorname{Im}[i_{-s2k}]}{\operatorname{Mod}[i_{-s2k}]^2}; \quad r_k = \frac{x_k}{T_k \omega}, \quad (27)$$

где $T_k = \frac{1}{\alpha_k \omega}$; $\alpha_k = \frac{1}{T_{rk} \omega} - \operatorname{Mod}[i_{-s2k}] r_s$.

Выражение для определения ЧХ в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис.2, имеет вид:

$$y(js) = \frac{1}{x_{\mu} + x_{\sigma}} + \sum_{k=1}^N \frac{js}{r_k + jsx_k}. \quad (28)$$

Проведение серии опытов при различных значениях напряжения, позволит получить семейство ЧХ, соответствующих различным уровням насыщения путей магнитных потоков.

Рассмотрим теперь включение в сеть АМ, вращающейся с синхронной скоростью.

Отличие от опыта включения неподвижной АМ заключается в том, что модуль и аргумент вектора

апериодической составляющей тока статора I_{sr10} , α_{r1} , определяемые, в рассматриваемом случае, комплексом проводимости при значении скольжения $s = -1$, экспериментально не могут быть определены и, следовательно, являются неизвестными. Неизвестными являются также модули I_{s2rk} , аргументы \arg_k и постоянные времени T_{rk} векторов отдельных слагаемых переходного периодического тока статора i_{-s2r} , которые входят в правую часть уравнения (21).

Тогда, при пренебрежении вращением апериодической составляющей тока статора ($\omega_c = 0$) оптимизации подлежит функция, которая определяет значения модулей изображающего тока статора для различных моментов времени:

$$I_s(t, I_{sr10}, \alpha_{r1}, T_a, I_{s2rk}, \arg_k, T_{rk}) = \\ = \text{Mod}[I_{sr0}e^{i\alpha_{r0}} + I_{sr10}e^{j\arg_1}e^{-t/T_{ra}}e^{-j\omega t} + \\ + \sum_{k=1}^N I_{s2rk}e^{j\arg_k}e^{-t/T_{rk}}]. \quad (29)$$

В результате определяются значения I_{sr10} , α_{r1} , T_{ra} , I_{s2rk} , \arg_k и T_{rk} , входящие в правую часть уравнения (29), при которых модуль рассчитываемой правой части уравнения минимально отличается от модуля экспериментально полученной по (17) левой части ($I_{son}(t)$) для всех заданных значений времени.

Таким образом, в результате оптимизации функции (29) находятся векторы составляющих переходного периодического тока статора с учетом влияния активного сопротивления: $i_{-s2rk} = I_{s2rk}e^{j\arg_k}$.

Дальнейший расчет ведется в следующей последовательности.

Определяется изображающий вектор установившегося тока статора без учета активного сопротивления.

$$i_{-s0(t=0)} = \frac{1}{\frac{1}{I_{sr0}e^{j\alpha_{r0}}} - \frac{r_s}{j}}. \quad (30)$$

Этот вектор представляет собою значение комплекса ЧХ $y(js)$ без учета активного сопротивления статора при значении скольжения $s = 0$.

Вычисляется вектор апериодической слагаемой тока статора, соответствующий значению ЧХ $y(js)$ при $s = -1$.

$$i_{-s1(t=0)} = \frac{1}{\frac{1}{I_{sr10}e^{j\alpha_{r1}}} - \frac{r_s}{j}}. \quad (31)$$

Значения вектора переходного периодического тока статора в начальный момент времени без учета активного сопротивления в цепи обмотки статора $i_{-s2(t=0)}$ и векторов отдельных составляющих без уче-

та r_s определяются аналогично случаю включения неподвижной ЭМ по соотношениям (25) и (26).

В соответствии с выражением (27) определяются значения индуктивных и активных сопротивлений Г-образной эквивалентной схемы замещения:

При этом, активные сопротивления могут рассчитываться с учетом допущения, что активное сопротивление в обмотке статора не влияет на значения постоянных времени роторных контуров электрической машины, вращающейся с синхронной скоростью, т.е. $T_k \approx T_{rk}$.

Предложенные способы экспериментального определения ЧХ при включении в сеть машины без внешних индуктивных сопротивлений могут быть использованы и в том случае, если в цепи обмотки статора имеются дополнительные индуктивности. В реальных электрических системах такими внешними индуктивными сопротивлениями могут быть трансформаторы, питающие линии электропередачи, сопротивления системы, имеющей ограниченную мощность короткого замыкания.

В этом случае рассчитывается ЧХ характеристика проводимости $y_{x_{вн}}(js)$ АМ с учетом дополнительного внешнего сопротивления $x_{вн}$, т.е.

$$y_{x_{вн}}(js) = \frac{1}{\frac{1}{y(js)} + x_{вн}}. \quad (32)$$

Из (32) может быть найдена ЧХ $y(js)$ собственно асинхронной машины:

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АМ

Достоверность изложенных в работе теоретических положений метода оценивалась путем проведения идеализированного (математического) эксперимента (ИЭ). В ИЭ эталонным сигналом являются кривые изменения трех фазных токов и одного напряжения, вычисляемые по заданным значениям параметров общепринятой (Т-образной) схемы замещения АД путем численного интегрирования дифференциальных уравнений равновесия напряжений в контурах машины (уравнения Парка-Горева) методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Исследования проводилось для АД типа ДАЗО 1914-10/12А (850 кВт; 6 кВ; 118 А), имеющего три контура на роторе. Определялись ЧХ по данным математического моделирования переходного процесса при пуске заторможенной и вращающейся с синхронной скоростью машины. Исследования показали, что без учета влияния активного сопротивления обмотки статора рассчитанные и исходные ЧХ практически совпали. При учете активного сопротивления максимальная погрешность в области значений скольжений от 0,001 до 0,03 о.е. составляет 12,6%. В области частот от 0,03 до 1,0 отличие исходной и рассчитанной частотных характеристик не превышает 6,4%.

Экспериментальным путем определялось семейство ЧХ асинхронного двигателя типа 4А90Л4У3 ($P_{ном} = 2,2$ кВт; $U_{ном} = 380$ В; $I_{ном} = 4,9$ А;

$\cos\varphi = 0,83$; $n_{ном} = 1420$ об/мин), соответствующих различным уровням насыщения. В качестве исходных данных принимались следующие паспортные данные (о.е.): $x_{\sigma} = 0,083$; $r_s = 0,057$; $x_{\mu} = 2,708$. Было произведено восемь опытов включения заторможенного АД в сеть при разных напряжениях. Последние изменялись в пределах от 0,131 о.е. до 0,549 о.е. с шагом примерно равным 0,065 о.е. В опытах с помощью цифрового регистратора фирмы "РЕКОН" измерялись три фазных тока и одно фазное напряжение.

Полученные по предложенной методике амплитудные логарифмические частотные характеристики для некоторых значений напряжений (0,252 - кривая 1; 0,423 - кривая 2; 0,549 - кривая 3) приведены на рис.3. Во всех исследуемых случаях АД удалось представить одним демпферным контуром.

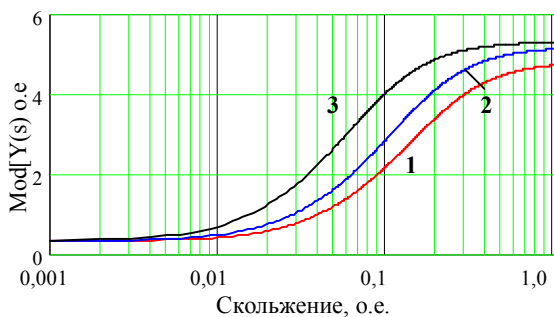


Рис.3. Амплитудные логарифмические частотные характеристики АД 4А90L4У3

Анализ полученных ЧХ позволил установить, что имеет место тенденция к увеличению амплитудных значений тока статора с увеличением подаваемого на АД напряжения. Величина максимального отличия модулей комплексной проводимости для исследуемого диапазона напряжений составляет 2,4 раза при скольжении 0,03 о.е. Увеличение амплитудных значений пусковых токов ($Mod[y(js)_{s=1}]$) происходит в меньшей степени и составляет 1,19 раз.

Анализ фазных частотных характеристик, показанных на рис.4, свидетельствует о том, что с увеличением степени насыщения путей магнитных потоков, фазы комплексных проводимостей при одинаковых значениях скольжения наоборот уменьшаются.

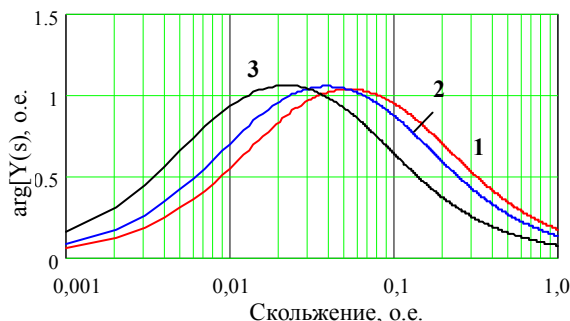


Рис.4. Фазные логарифмические частотные характеристики АД 4А90L4У3

При этом степень уменьшения аргумента проводимости существенно зависит от скольжения. Так в области скольжений от 0,001 до 0,4 о.е. фаза уменьшается по закону близкому к экспоненциальному. В области скольжений от 0,5 до 1 изменение фазы практически отсутствует. При изменении напряжения в опытах от 0,131 о.е. до 0,549 о.е. фаза при скольжении $s=1$ уменьшилась в 2,45 раза.

Изменение аргумента комплексной проводимости приводит к изменению критического скольжения ЧХ (круговой диаграммы). Так в опыте, выполненном при включении АД на напряжение 0,131 о.е., критическое скольжение оказалось равным 0,2 о.е. При подаче на неподвижный двигатель напряжения 0,549 о.е. критическое скольжение снизилось до 0,085 о.е., т.е в 2,35 раза.

На рис.5 приведена зависимость изменения сверхпереходного сопротивления x'' исследуемого АД в функции пускового тока статора.

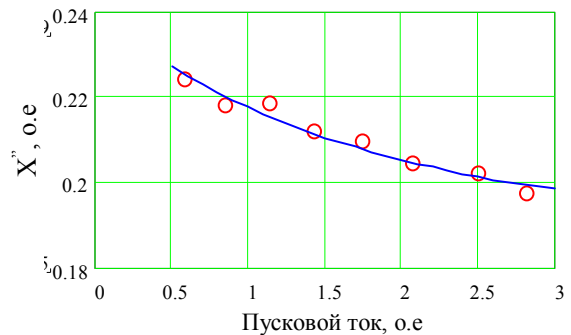


Рис.5

Анализ изменения x'' позволил получить аналитическое выражение в функции тока статора при значении последнего более 0,5 о.е.

$$x''(I) = 0,19 + 0,05e^{-I/1,7}. \quad (34)$$

Опыт включения в сеть вращающейся с синхронной скоростью электрической машины производился для асинхронного генератора Новоозовской ветровой электрической станции типа АГВ-280L4-DM2 ($U_{ном} = 380$ В, $P_{ном} = 110$ кВт, $I_{ном} = 206,7$ А, $\cos\varphi_{ном} = 0,86$, $\eta = 0,94$).

Каталожные данные параметров обмотки статора указанной электрической машины имеют следующие значения: $x_{\sigma} = 0,081$ о.е.; $r_s = 0,014$ о.е.

В цепи обмотки статора в момент включения машины в сеть были включены кабельная линия и трансформатор типа ТМ-1000, имеющие следующие суммарные внешние индуктивное и активное сопротивления (о.е.): $x_{вн} = 0,0139$ и $r_{вн} = 0,026$.

В опыте с помощью цифрового регистратора фирмы "РЕКОН" измерялись токи и напряжения всех трех фаз.

По данным измерения мгновенных токов по (17) рассчитывалось изменение во времени модуля изображающего вектора тока статора (рис.6, сплошная линия).

В соответствии с предложенным методом были найдены параметры двухконтурной Г-образной схемы замещения (рис.2), учитывающие наличие внешнего сопротивления в цепи обмотки статора: $x_1 = 0,193$; $r_1 = 0,012$; $x_2 = 0,381$; $r_1 = 0,127$.

Двухконтурная эквивалентная схема замещения общепринятого Г – образного типа, также учитывающая наличие внешнего индуктивного сопротивления имеет следующие параметры: $x_{\sigma 1} = 0,147$; $r_1 = 0,0165$; $x_{\sigma 2} = 0,035$; $r_2 = 0,027$.

Для полученной схемы замещения по программе, реализующей алгоритм численного интегрирования уравнений Парка-Горева методом Рунге-Кутты четвертого порядка, был рассчитан переходный процесс при включении асинхронного генератора, вращающегося с синхронной скоростью на параллельную работу с сетью с учетом внешних сопротивлений трансформатора связи и кабельной линии. Рассчитанная зависимость изменения модуля изображающего вектора тока статора приведена на рис.6 (штриховая линия). Наибольшая погрешность составляет 13,7 % в области значений времени от 0,07 до 0,1 с. На других интервалах времени погрешность не превышает 6,2 %.

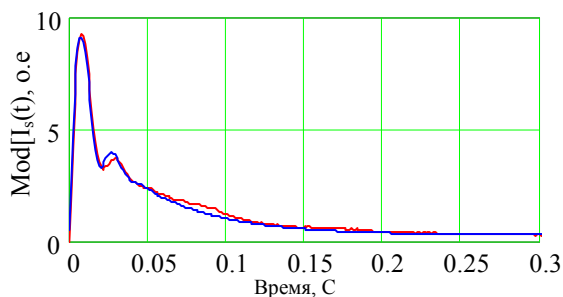


Рис.6. Изменение модуля вектора изображающего тока статора АМ АГВ-280L4-DM2

На рис.7. приведена частотная характеристика асинхронного генератора АГВ-280L4-DM2 без учета внешних сопротивлений.

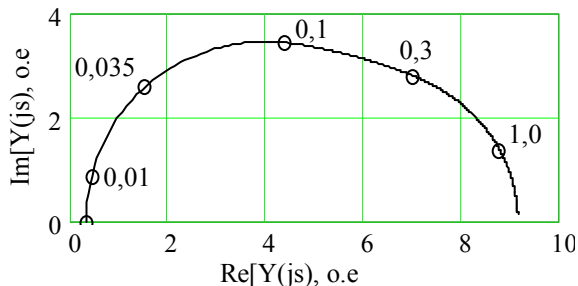


Рис.7. ЧХ асинхронного генератора АГВ-280L4

Вывод. Предложенный метод позволяет по данным измерений токов и напряжений при включении в сеть неподвижных или вращающихся с синхронной скоростью АМ определять их ЧХ проводимости со стороны обмотки статора с учетом многоконтурности ротора и насыщения путей магнитных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Пути повышения технико-экономических показателей и развития теории электрических машин // Вісник НТУ "ХПІ". - 2001. - №17. - С. 24-27.
- [2] Казовский Е.Я., Рубисов Г.В. Переходные процессы в синхронных машинах при аномальных режимах в энергосистеме. – СПб.: Наука, 1994. – 172 с.
- [3] K. Rechberger, H. Koeﬂer. Analytical Approach to Calculate the Transient State of Doubly Fed Synchronous Machines employing the Steady State Circle Diagram of the Machine / 15th International Conference on Electrical Machines “ICEM 2002”, Brugge, Belgium, August 25-28, 2002, Conference Record, CD-disk, paper 629.
- [4] A. Larin, A. Abdessalem. Computer simulation of the transient in AC machines at short-circuits and connections to a network on the basis of the experimental frequency-response characteristics // 9th International Symposium on Short-circuit currents in power systems, SCC’2000, Cracow, October 11-13, 2000. - P. 39-45.
- [5] Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
- [6] Рогозин Г.Г., Ларин А.М., Ларина И.И. Определение зависимости параметров эквивалентного демпферного контура турбогенератора от начального значения тока короткого замыкания // Электротехника. – 1999. - №12. – С. 14-17.
- [7] Donesku V., Charette A., Yao Z., Rajagopalan V. Modeling and simulation of saturated induction motors in phase quantities // IEEE Trans. Energy Convers. – 1999. – 14, 3. – P. 386-393.
- [8] Verbeeck Jef, Pintelon Rik, Lataire Philippe. Influence of saturation on synchronous machine parameters in standstill frequency response test // IEEE Trans. Energy Convers. – 2000. – 15, 3. – P. 277-283.
- [9] Ларин А.М., Абдессалем Ламари. Экспериментальное определение частотных характеристик асинхронных двигателей по данным опытов включения их в сеть // Вісник Східноукраїнського нац. ун.-ту. - 2001. - №3 (37). - С. 175-183.

Поступила 05.09.2003