

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ МАШИН ИЗ ОПЫТОВ ВКЛЮЧЕНИЯ ИХ В СЕТЬ НА ДВЕ ФАЗЫ

Ларин А.М., к.т.н., доц., Наумов О.Е.

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 експериментального визначення частотних характеристик провідності з боку обмотки статора асинхронної машини і відповідних ним електромагнітних параметрів. Метод засновано на дослідних даних, які реєструються при ввімкненні нерухомої електричної машини до мережі на дві фази. Наведені результати досліджень для асинхронного двигуна типу 4A904LU3*

*Изложены основные положения метода экспериментального определения частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора асинхронной машины и соответствующих им электромагнитных параметров. Метод основан на опытных данных, регистрируемых при включении неподвижной электрической машины в сеть на две фазы. Приводятся результаты исследований для асинхронного двигателя типа 4A904LU3.*

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросам определения электромагнитных параметров (ЭМП) машин переменного тока специалистами уделяется большое внимание [1-4]. Разрабатываются методы, позволяющие определять эквивалентные электромагнитные параметры, адекватно учитывающие сложные явления вытеснения тока и насыщения [5-8]. Такой учет возможен только при отражении электромагнитных свойств ротора совокупностью параметров в виде частотных характеристик (ЧХ) или многоконтурных схем замещения.

В последние годы определение ЭМП направлено на использование исходной информации рабочих и нормальных переходных процессов, протекающих в условиях питания машины от сети рабочего напряжения. В [9] предложен метод определения ЧХ проводимости со стороны обмотки статора электрической машины (ЭМ) с симметричной конструкцией ротора, основанный на данных измерений токов и напряжений при включении в сеть заторможенной машины.

Недостатки указанного способа связаны со сложностью реализации опытов, требующих применения специального устройства для затормаживания ротора, проверки и регулировки коммутационного устройства с целью обеспечения одновременной подачи напряжений на три обмотки статора.

В настоящей работе предлагается метод определения ЧХ асинхронных машин (АМ), соответствующих заданному уровню насыщения магнитной цепи, по данным переходного процесса при подаче испытательного напряжения на две фазы обмотки статора.

Этим самым исключается необходимость в выполнении подготовительных работ по затормаживанию ротора двигателя и регулировки коммутирующего устройства.

### ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Метод основан на установленных в [4] и уточненных в [10] связях между составляющими переходного тока статора при включении ЭМ в сеть и их частотными характеристиками или токовыми диаграммами.

В соответствии с [4] при подаче напряжения на

две фазы обмотки статора неподвижной ЭМ требуется рассмотреть по методу наложения процесс включения машины на системы напряжений прямой и обратной последовательности. Величины напряжений при этом должны быть одинаковыми и равными половине напряжения, подводимого к обмотке статора.

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

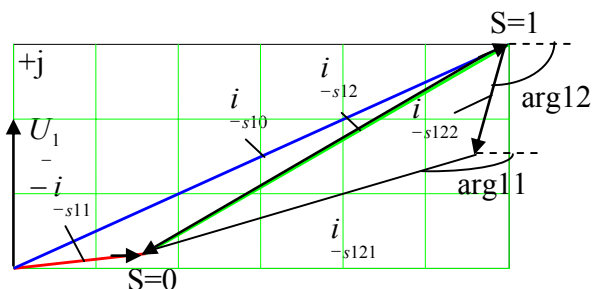


Рис. 1. Векторная диаграмма составляющих прямой последовательности в начальный момент подключения к сети неподвижного АД на две фазы

Закон изменения изображающего вектора переходного тока статора прямой последовательности во времени в неподвижных осях описывается следующим уравнением [10]:

$$i_{-s1}(t) = i_{-s10(t=0)} e^{j\omega t} + i_{-s11(t=0)} e^{j\omega_a \omega t} e^{-t/T_a} + \sum_{k=1}^N i_{-s12rk} e^{-t/T_{rk}} \quad (1)$$

где  $i_{-s10(t=0)}$  - вектор установившегося тока статора;

$i_{-s11(t=0)}$  - вектор аperiodической составляющей переходного тока в начальный момент времени;

$T_a, \omega_a$  - постоянная времени затухания и собственная частота вращения вектора аperiodического тока статора;

$i_{-s12rk}, T_{rk}$  - начальные значения и постоянные времени затухания составляющих периодического тока с

учетом влияния активного сопротивления обмотки статора;  $N$  - количество контуров на роторе.

При подаче на АД системы напряжений обратной последовательности возникают составляющие токов, векторы которых являются комплексно-сопряженными соответствующим векторам прямой последовательности (рис.1). При этом направления вращения векторов аperiodического и установившегося токов статора должны быть изменены на противоположные. С учетом этого изменение модуля изображающего вектора тока статора обратной последовательности будет описываться следующим соотношением:

$$i_{-s2}(t) = i_{-s10(t=0)}^* e^{-j\omega t} + i_{-s11(t=0)}^* e^{-j\omega_a t} e^{-t/T_a} + \sum_{k=1}^N i_{-s12rk}^* e^{-t/T_{rk}} \quad (2)$$

В соответствии с принципом наложения изображающий вектор полного тока статора представляет собой сумму отдельных составляющих:

$$i_{-s}(t) = i_{-s1}(t) + i_{-s2}(t). \quad (3)$$

Полученные математические соотношения (1) – (3) представляют собой модель изображающего вектора тока обмотки статора при включении неподвижного АД в сеть на две фазы. В соответствии с нею может быть предложена методика определения ЧХ проводимости со стороны обмотки статора по данным опыта подачи напряжения на две фазы неподвижной машины.

#### АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АМ

Предполагаются известными следующие параметры АМ: индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора  $x_{\sigma}$ ; активное сопротивление обмотки статора  $r_s$  и индуктивное сопротивление ветви намагничивания  $x_{\mu}$ . В опыте регистрируются мгновенные значения одного фазного тока и подведенного напряжения. Будем предполагать, что напряжение подается на фазы  $B$  и  $C$ .

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

$$I_{s\bar{i}}(t_l) = \sqrt{\frac{2}{3}(i_b^2(t_l) + i_c^2(t_l))}, \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $n$  - количество измерений переходных токов.

По данным измерения тока и напряжения в установившемся режиме после подключения машины к источнику напряжения определяется модуль ( $I_{sr0}$ ) и аргумент ( $\alpha_{r0}$ ) векторов токов  $i_{-sr10}$  и  $i_{-sr20}$ , которые отражают влияние активного сопротивления обмотки статора  $r_s$ .

Рассчитываются начальные значения векторов аperiodических составляющих прямой  $i_{-sr11(t=0)}$  и обратной  $i_{-sr21(t=0)}$  последовательностей, постоянная времени их затухания  $T_a$  и собственная частота вра-

щения  $\omega_a$ :

$$i_{-sr11(t=0)} = \frac{0,5U}{x_{\sigma} + x_{\mu} + \frac{r_s}{j}}, \quad i_{-sr21(t=0)} = i_{-sr11(t=0)}^*,$$

$$T_a = \frac{1}{\text{Re}[i_{-sr1(t=0)}] \cdot r_s \omega}, \quad \omega_a = \text{Im}[i_{-sr1(t=0)}] \cdot r_s. \quad (5)$$

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

В соответствии с методикой, описанной в [10], определяется модуль  $I_{sr20}$  и аргумент  $\alpha_{r2}$  векторов полных токов  $i_{-sr12(t=0)}$  и  $i_{-sr22(t=0)}$  в начальный момент времени:

$$i_{-sr12(t=0)} = I_{sr20} e^{j\alpha_{r2}}, \quad i_{-sr22(t=0)} = I_{sr20} e^{-j\alpha_{r2}}. \quad (6)$$

Представим составляющие векторов  $i_{-s12rk}$  и  $i_{-s22rk}$  через значения модулей и аргументов. С учетом того, что векторы составляющих обратной последовательности являются комплексно-сопряженными соответствующим векторам прямой последовательности, имеем:

$$i_{-s12rk} = I_{s2rk} e^{j\arg_k}; \quad i_{-s22rk} = I_{s2rk} e^{-j\arg_k}, \quad (7)$$

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

Тогда, в уравнениях (2) и (3) неизвестными будут начальные значения модулей  $I_{s2rk}$  и аргументы  $\arg_k$ , а также постоянные времени  $T_{rk}$  затухания составляющих периодических токов  $i_{-s12}$  и  $i_{-s22}$ . 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:

$$I_s(t, I_{s2rk}, \arg_k, T_{rk}) = \text{Mod}[I_{sr0} e^{j\alpha_{r0}} e^{i\alpha_{r0} t} + I_{sr0} e^{-j\alpha_{r0}} e^{-j\alpha_{r0} t} + I_{sr1} e^{j\alpha_{r1}} e^{j\omega_a t} e^{-t/T_a} + I_{sr1} e^{-j\alpha_{r1}} e^{-j\omega_a t} e^{-t/T_a} + \sum_{k=1}^N I_{s2rk} e^{i\arg_k} e^{-t/T_{rk}} + \sum_{k=1}^N I_{s2rk} e^{-i\arg_k} e^{-t/T_{rk}}]$$

Для отыскания неизвестных в работе использовалась функция универсального математического пакета MathCad 7.0 “Civen.....Minerr”.

С помощью этой функции определяются значения  $I_{s2rk}$ ,  $\arg_k$  и  $T_{rk}$ , входящие в правую часть уравнения (8), при которых модуль рассчитываемой правой части минимально отличается от модуля экспериментально полученной в соответствии с (4) левой части ( $I_{son}(t)$ ) для всех заданных значений времени, т.е.

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

$$k = 1, 2 \dots N; \quad l = 1, 2, 3 \dots n. \quad (9)$$

Таким образом, в результате оптимизации функ-

ции (9) находим векторы составляющих переходного периодического тока статора с учетом влияния активного сопротивления:  $i_{-s2rk} = I_{s2rk} e^{j \arg k}$ .

Дальнейший расчет ЧХ и эквивалентных параметров схем замещения производится в соответствии с методикой, изложенной в [10].

Проведение серии опытов при различных значениях напряжения позволит, как и в случае подачи трехфазного напряжения, получить семейство ЧХ, соответствующих различным уровням насыщения путей магнитных потоков.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АД

Достоверность предложенных в работе теоретических положений метода оценивалась путем проведения математического эксперимента (МЭ). В МЭ эталонным сигналом являлись кривые изменения фазных токов, вычисленные методом симметричных составляющих по заданным значениям параметров общепринятой (Т-образной) схемы замещения АД типа АО-51-4 путем численного интегрирования дифференциальных уравнений Парка-Горева.

Расчетная схема замещения для определения составляющих прямой последовательности приведена на рис.2. По данной схеме замещения рассчитывались составляющие прямой последовательности фазных токов и через них - полные фазные токи при включении АД на две фазы. Полученные зависимости использовались в качестве эталонного сигнала для проверки достоверности предложенного алгоритма определения ЧХ асинхронных машин. Исследования показали, что с учетом и без учета влияния активного сопротивления обмотки статора рассчитанные и исходные ЧХ оказались близкими между собой. Максимальная погрешность во всем диапазоне скольжений не превышает 11,3%. При этом во временной области несовпадение модулей изображающих векторов не превысило 6,5%.

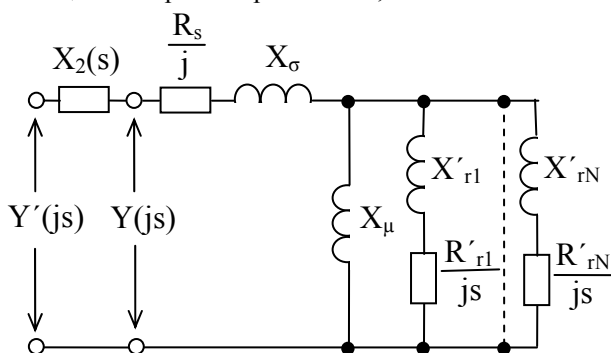


Рис. 2. Схема замещения для расчета токов прямой последовательности

Экспериментальным путем определялось семейство ЧХ асинхронного двигателя типа 4А90Л4У3 ( $P_{ном} = 2,2$  кВт;  $U_{ном} = 380$  В;  $I_{ном} = 4,9$  А;  $\cos\phi = 0,83$ ;  $n_{ном} = 1420$  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 десять опытов подачи напряжения на две фазы неподвижного АД. Значения напряжений изменялись в пределах от 0,115 о.е. до 0,525 о.е. с шагом примерно равным 0,065 о.е. Значения установившихся токов в обмотках статора изменялись в пределах от 0,512 до 2,67 номинального. В опытах с помощью цифрового регистратора фирмы "РЕКОН" измерялись ток и фазное напряжение.

В качестве примера на рис.3 приведены зависимости изменения модулей изображающего тока статора, полученных для случая подачи напряжения, равного  $0,326 U_{ном}$ .

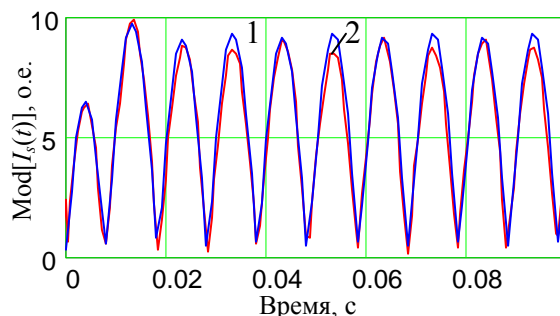


Рис. 3. Изменение модуля изображающего вектора тока статора при включении АД на две фазы

Как следует из рис.3, отличие экспериментальной зависимости (кривая 2) от рассчитанной по (1) - (3) после операции оптимизации (8) (кривая 1) не превышает 7,5% на всем интервале регистрации переходного процесса.

Полученные по предложенной методике ЧХ проводимости со стороны обмотки статора для некоторых значений напряжений (0,115 - кривая 1; 0,326 - кривая 2; 0,511 - кривая 3) приведены на рис.4. Во всех исследуемых случаях АД удалось представить одним демпферным контуром.

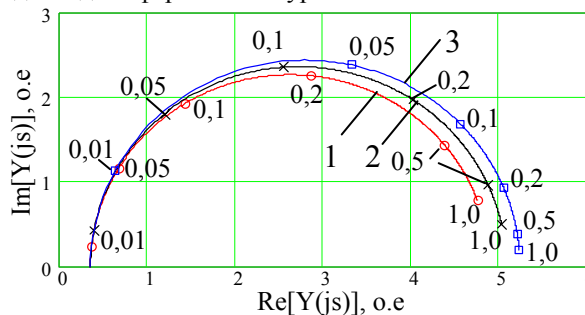


Рис. 4. ЧХ АД типа 4А90Л4У3

Анализ полученных ЧХ позволил установить, что имеет место тенденция к увеличению относительных амплитудных значений тока статора с увеличением подаваемого на АД напряжения. Величина максимального отличия модулей комплексной проводимости для исследуемого диапазона напряжений составляет 5,3 раза при скольжении 0,018 о.е. Увеличение амплитудных значений пусковых токов ( $Mod[y(js)_{s=1}]$ ) происходит значительно в меньшей степени и составляет всего 1,1 раза.

Аргумент комплексной проводимости более существенно зависит от величины насыщения. При этом характер изменения оказывается различным в различных областях скольжений. Так, в диапазоне скольжений от 0,001 до 0,018 о.е. фаза увеличивается при увеличении степени насыщения. В области значений скольжений от 0,018 до 1 о.е имеет место обратное влияние насыщения. При изменении напряжения в опытах от 0,115 о.е. до 0,525 о.е. фаза при скольжении  $s=1$  уменьшилась в 7,3 раза, при  $s=0.001$  – примерно со столько же раз увеличилась. Это свидетельствует о существенном изменении шкалы скольжений частотных характеристик (круговых диаграмм).

Зависимость изменения сверхпереходного сопротивления  $x''$  исследуемого АД в функции пускового тока статора практически совпала с аналогичной зависимостью, полученной в [10] по данным опытов включения неподвижного АД на три фазы.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости индуктивных и активных сопротивлений Г-образной (кривые 1 и 3 соответственно) и Т-образной (кривые 2 и 4 соответственно) схем замещения АД от величины установившегося тока статора. Указанные зависимости получены в предположении, что сопротивление рассеяния статора не зависит от тока.

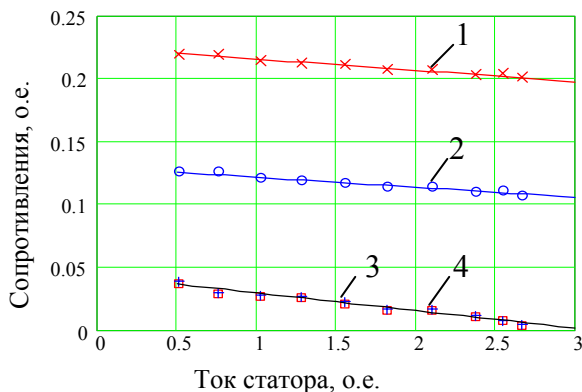


Рис.5 Зависимости сопротивлений схем замещения от установившегося тока статора

Проведенный анализ показал, что зависимости индуктивных сопротивлений от тока статора можно аппроксимировать следующими линейными зависимостями:

$$X_g(I) = 0.225 - 0.009 \cdot I ; \quad (10)$$

$$X_t(I) = 0.13 - 0.008 \cdot I . \quad (11)$$

Зависимости активных сопротивления Г-образной и Т-образной схем замещения практически совпали между собою:

$$R(I) = 0.044 - 0.014 \cdot I . \quad (12)$$

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод позволяет по данным измерений токов и напряжений при включении в сеть неподвижных асинхронных машин на две фазы определять их частотные характеристики с учетом многоконтурности ротора и насыщения путей магнитных потоков.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Новые экспериментальные методы. – К.: Техніка, 1992. – 168 с.
- [2] Артишевская С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин // Электричество. – 1999. – №11. – С. 21-23.
- [3] Попов В.И., Макаров Л.Н. К экспериментальному определению параметров схемы замещения асинхронной машины // Электричество. – 1993. – № 1. – С. 49-52.
- [4] Казовский Е.Я., Рубисов Г.В. Переходные процессы в синхронных машинах при аномальных режимах в энергосистеме. – СПб.: Наука, 1994. – 172 с.
- [5] Рогозин Г.Г., Пятлина Н.Г. Способ идентификации асинхронной машины по экспериментальным данным ее динамического режима // Электричество. – 1981. – № 4. – С. 47-49.
- [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.
- [10] Ларин А.М., Абдессалем Ламари, Ларина И.И. Экспериментальное определение частотных характеристик асинхронных машин при различных уровнях насыщения // Електротехніка і Електромеханіка.– 2003.- №4. – С.52-58.

Поступила 08.09.2004