

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ОПЫТОВ ВКЛЮЧЕНИЯ НА ИСТОЧНИК ОДНОФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

А.М. Ларин, И.И. Ларина, В.Г. Манюра  
Донецкий национальный технический университет

Изложены основные положения метода определения частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора асинхронного двигателя. Метод основан на экспериментальных данных, регистрируемых при включении неподвижной машины на источник однофазного напряжения.

В последнее время получают все большее распространение способы определения электромагнитных параметров машин переменного тока, не требующие выведения их из рабочих условий.

В [1] предложен метод определения частотных характеристик проводимости со стороны обмотки статора асинхронных машин, основанный на данных измерений токов и напряжений при включении в трехфазную сеть заторможенной машины. Существенным недостатком такого способа является необходимость специального устройства для затормаживания ротора, а также тщательная регулировка коммутационного устройства для обеспечения одновременности подачи напряжения на все три фазы.

Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя из опыта несимметричного питания рассматривалось в [2]. В этом случае исключается необходимость в выполнении подготовительных работ по затормаживанию ротора двигателя и регулировке коммутирующего устройства. Однако, описанный в [2] способ предполагает определение параметров только одноконтурной схемы замещения.

В [3] предлагается метод определения совокупности ЭМП в форме частотных характеристик или многоконтурных эквивалентных схем замещения асинхронных или синхронных машин по экспериментальным данным переходного процесса при подаче напряжения на две фазы обмотки статора неподвижного двигателя. Метод основан на допущении, что зависимость от скольжения сопротивления АД токам обратной последовательности принимается равной дискретному значению  $x_2$ .

В настоящей работе предлагается способ определения электромагнитных параметров без учета сопротивления обратной последовательности.

**Математическая модель** для разработки алгоритма основана на том, что для определения переходного тока статора при включении неподвижного АД на источник однофазного напряжения требуется рассмотреть по методу наложения процесс включения на системы напряжений прямой и обратной последовательностей. Значения напряжений при этом должны быть равными половине напряжения, подводимого к обмотке статора, и противоположными по знаку.

В соответствии с [1] закон изменения изображающего вектора переходного тока статора, обусловленного приложением напряжения прямой последовательности, в неподвижных фазных осях А, В, С с учетом активного сопротивления статора будет иметь следующий вид:

$$\dot{i}_1(t) = U_1 \cdot e^{j\gamma_0} \cdot \left( \dot{I}_{01r(t=0)} \cdot e^{j\omega t} + \dot{I}_{11r(t=0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + \sum_{k=1}^N \dot{I}_{21r_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \right). \quad (1)$$

где  $\gamma_0$  - фаза включения;  $\dot{I}_{01r(t=0)}$  - вектор установившегося тока прямой последовательности ( $\dot{I}_{01r(t=0)} = y_r(j\omega)_{s=1}$ );  $\dot{I}_{11r(t=0)}$  - аperiodическая составляющая переходного тока, обусловленная обмоткой статора ( $\dot{I}_{11r(t=0)} = -y_r(j\omega)_{s=0}$ );  $T_a$  - постоянной времени затухания ( $T_a = 1/\text{Re}[y_r(j\omega)_{s=0}] \cdot r_s \omega$ );  $\sum_{k=1}^N \dot{I}_{21r_k} \cdot e^{-t/T_k}$  - переходный ток, обусловленный  $N$ - числом аperiodических составляющих в контурах ротора.

Графические построения для нахождения отдельных составляющих переходного тока статора АД при подаче на нее напряжения прямой последовательности с фазой включения  $\gamma_0 = 0$  показаны на рис. 1.

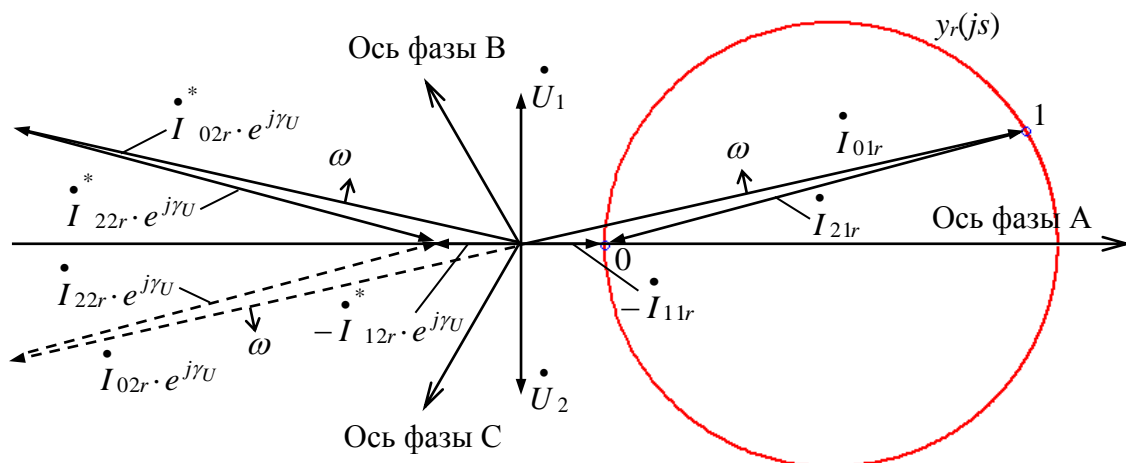


Рис.1 - Определение начальных значений составляющих тока статора асинхронной машины при включении ее в сеть на две фазы

При включении неподвижной АМ на систему напряжений обратной последовательности с учетом фазового сдвига вектора напряжения ОП по отношению к вектору ПП на угол  $\gamma_U$ , выражение для временного изображающего вектора тока обратной последовательности можно записать через составляющие прямой последовательности:

$$\dot{i}_2(t) = U_2 \cdot e^{-j\gamma_0} \cdot e^{j\gamma_U} \cdot \left( \dot{I}_{01r(t=0)} \cdot e^{j\omega t} + \dot{I}_{11r(t=0)} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} + \sum_{k=1}^N \dot{I}_{21rk} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \right). \quad (2)$$

Поскольку при включении двух фазных обмоток статора, соединенных встречно, на источник однофазного напряжения  $\gamma_U = 180^\circ$ , то соответствующие составляющие токов временного обобщенного вектора обратной последовательности будут равны соответствующим векторам прямой последовательности и противоположно им направлены. Временные векторы установившихся токов прямой и обратной последовательности вращаются в одном положительном направлении (против часовой стрелки). Однако для нахождения фазных мгновенных значений результирующие векторы необходимо проектировать на неподвижные оси, имеющие соответственно прямой и обратный порядок чередования осей. Воспользуемся единым пространственным вектором.

Пространственный вектор тока прямой последовательности принимается равным соответствующему временному ( $\dot{i}_{s1}(t) = \dot{i}_1(t)$ ), а пространственный вектор обратной последовательности находится как комплексно-сопряженный временному вектору ( $\dot{i}_{s2}(t) = \dot{i}_2(t)^*$ ). Соответствующие графические представления временных и пространственных векторов показаны на рис.1. Тогда траектория результирующего пространственного вектора тока статора при включении машины на две фазы  $\dot{i}_s(t) = \dot{i}_{s1}(t) + \dot{i}_{s2}(t)$  обращается в прямую. Амплитуда волны пространственного распределения тока статора направлена при принятых условиях вдоль мнимой оси комплексной плоскости и остается неподвижной в пространстве, изменяясь во времени за счет затухания свободных токов и вращения векторов установившихся составляющих. Выражая комплексные значения токов через их модули и аргументы, закон изменения пространственного вектора переходного тока статора можно записать в следующем виде:

$$\dot{i}_s(t) = 2U \cdot \text{Im} \left[ (I_{0r} e^{j\alpha_{or}} e^{j\omega t} + I_{1r} e^{j\alpha_{1r}} e^{-\frac{t}{T_a}} + \sum_{k=1}^N I_{2rk} e^{j\alpha_{2rk}} e^{-\frac{1}{T_k}}) e^{j\gamma_0} \right]. \quad (3)$$

Из соотношений (1), (2) и (3) видно, что при неподвижном роторе АМ апериодические составляющие токов в контурах ротора отражаются также в виде апериодических составляющих в обмотке статора. Следовательно, при подаче на две фазы обмотки статора переменного однофазного напряжения в них будут протекать несколько свободных апериодических токов. Один из них обусловлен обмоткой статора, а остальные отражают изменение токов в контурах ротора. Очевидно, что может иметь место такая фаза включения  $\gamma_0$ , при которой будет отсутствовать апериодический ток, отражающий влияние статора.

Полученное выражение (3) представляет собой модель изображающего вектора тока обмотки статора при включении неподвижного АД в сеть на две фазы. В соответствии с ней может быть предложена методика экспериментального определения ЧХ проводимости со стороны обмотки статора по данным измерений переходного тока в опыте подачи напряжения на две фазы неподвижной машины.

**Методика определения частотных характеристик и параметров схем замещения.** Предполагаются известными следующие параметры АМ: активное ( $r_s$ ) и индуктивное ( $x_\sigma$ ) сопротивление рассеяния обмотки статора, а также индуктивное сопротивление ветви намагничивания ( $x_\mu$ ).

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

$$i_{s,on}(t_l) = \text{Mod}[\dot{i}_s(t_l)] = \sqrt{\frac{2}{3}(i_b^2(t_l) + i_c^2(t_l))}, \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

По данным измерения тока и напряжения в установившемся режиме после подключения машины к источнику напряжения определяется модуль ( $I_{0r}$ ) и аргумент ( $\alpha_{0r}$ ) вектора установившегося тока  $\dot{I}_{0r}$ , которые учитывают влияние активного сопротивления обмотки статора  $r_s$ .

Рассчитывается начальное значение вектора апериодической составляющей  $\dot{I}_{1r(t=0)}$ , и постоянная времени ее затухания  $T_a$ :

$$\dot{I}_{1r(t=0)} = 0,5 / (x_\sigma + x_\mu + r_s / j) = I_{1r} \cdot e^{j\alpha_{1r}}; \quad T_a = 1 / \text{Re} \left[ \dot{I}_{1r(t=0)} \right] \cdot r_s \cdot \omega \quad (5)$$

Таким образом, если в левой части уравнения (3) известны мгновенные значения вектора  $\dot{i}_s(t)$  для различных моментов времени, найденные по (4), то в правой части неизвестными являются начальные значения модулей  $I_{2rk}$ , аргументы  $\alpha_{2rk}$ , а также постоянные времени  $T_{rk}$  затухания составляющих токов, отражающих влияние контуров на роторе в переходном режиме.

В работе рассматривалась процедура поиска неизвестных, для которых выполняется условие минимума интегрального критерия качества вида

$$J(\bar{\alpha}) = \sum_{l=1}^m \left( \text{Mod}[\dot{i}_s(\bar{\alpha}, t_l)] - i_{s, on}(t_l) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $k = 1, 2, \dots, m$  – количество исходных значений тока;

$\bar{\alpha}$  – вектор искомых параметров для заданного количества  $N$  роторных контуров ( $I_{2rk}, \alpha_{2rk}, T_{rk}$ ).

В результате оптимизации определяются значения  $I_{2rk}, \alpha_{2rk}$  и  $T_{rk}$  составляющих переходного тока, отражающих реакцию на возмущение роторных контуров, с учетом влияния активного сопротивления обмотки статора, соответствующие минимуму целевой функции (6).

Дальнейший расчет параметров схемы замещения и соответствующей ей частотной характеристики производится в следующей последовательности.

Рассчитывается вектор установившегося тока статора прямой последовательности:

$$\dot{I}_{01(t=0)} = 1 / (0,5U / I_{0r} e^{j\alpha_{r0}} - r_s / j). \quad (7)$$

Определяется вектор апериодической составляющей тока статора, соответствующий значению ЧХ  $y(js)$  при  $s = 0$ :

$$\dot{I}_{11(t=0)} = U / (x_\mu + x_\sigma). \quad (8)$$

Находится начальное значение вектора переходного тока без учета активного сопротивления статора  $\dot{I}_{21(t=0)}$  при скольжении  $s = 1$ :

$$\dot{I}_{21(t=0)} = -(\dot{I}_{01(t=0)} + \dot{I}_{11(t=0)}). \quad (9)$$

Рассчитываются векторы составляющих тока  $\dot{I}_{21(t=0)}$  без учета  $r_s$ :

$$\begin{aligned} \dot{I}_{21(t=0)} \text{ и } \dot{I}_{2r(t=0)} &= \sum_{k=1}^N \dot{I}_{2rk} = \sum_{k=1}^N I_{2rk} e^{j\alpha_{2rk}} : \\ \dot{I}_{21k} &= \dot{I}_{2rk} \cdot \dot{I}_{21(t=0)} / \dot{I}_{2r(t=0)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Определяются значения активных и индуктивных сопротивлений эквивалентной схемы замещения с вынесенной ветвью намагничивания:

$$r_k = -\operatorname{Im} \left[ \dot{I}_{21_k} \right] / \left| \dot{I}_{21_k} \right|^2; \quad x_k = -\operatorname{Re} \left[ \dot{I}_{21_k} \right] / \left| \dot{I}_{21_k} \right|^2. \quad (11)$$

Частотная характеристика, соответствующая ей, определяется по выражению:

$$y_r(j\omega) = \frac{1}{\frac{r_s}{j} + \frac{1}{x_\mu + x_\sigma + \sum_{k=1}^N \frac{j\omega}{r_k + j\omega x_k}}}. \quad (12)$$

Оценка эффективности предложенной методики расчета и точности получаемых результатов определения осуществлялась путем проведения идеализированного эксперимента.

Исследования проводились для асинхронного двигателя ДАЗО 1910-12, имеющего следующие каталожные данные:  $P_{ном} = 1700$  кВт;  $U_{ном} = 6$  кВ;  $I_{ном} = 216$  А;  $\cos \varphi = 0,793$ ;  $n_{ном} = 496$  об/мин.

Был выполнен расчет токов статора при включении неподвижного двигателя в сеть на две фазы. Расчет производился путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений с использованием метода Рунге-Кутты четвертого порядка.

Выполненные исследования показали, что в области значений скольжений от 0 до 0,1 исходная и расчетная частотные характеристики практически совпали. Наибольшее расхождение по вещественной составляющей не превышает 2,7%, а по мнимой – 6,8%.

**Вывод:** Экспериментальное определение совокупности электромагнитных параметров асинхронных машин по данным опытов включения в сеть на две фазы отличается простотой реализации и малыми затратами времени на подготовку и проведение эксперимента.

1. 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.

2. Мощинский Ю. А. Определение параметров трехфазного асинхронного двигателя из опыта несимметричного питания / Ю. А. Мощинский, И. Л. Осин // Электричество. – 1993. – № 1. – С. 39–43.

3. Ларин А. М. Определение частотных характеристик асинхронных машин из опытов включения их в сеть на две фазы / А. М. Ларин, О. Е. Наумов // Електротехніка і Електромеханіка. – 2005. – № 1. – С. 51–54.