

М-образная схема замещения асинхронной машины

НОСКОВ В.А.

Схема замещения асинхронной машины рассматривается в виде логического набора проводимостей для обмоток статора и ротора. По характеристикам проводимостей проводится анализ активных и реактивных составляющих тока статора и ротора.

Ключевые слова: асинхронная машина, схема замещения, проводимость цепи, составляющие тока

Для анализа работы асинхронной машины (АМ) обычно используются Т- и Г-образные схемы замещения. По сути они эквивалентны и получены путем преобразования Т-образной схемы в Г-образную; наиболее предпочтительной принята Г-образная схема замещения. На рис. 1 изображена такая схема, взятая из справочника по асинхронным двигателям (АД) серии 4А¹.

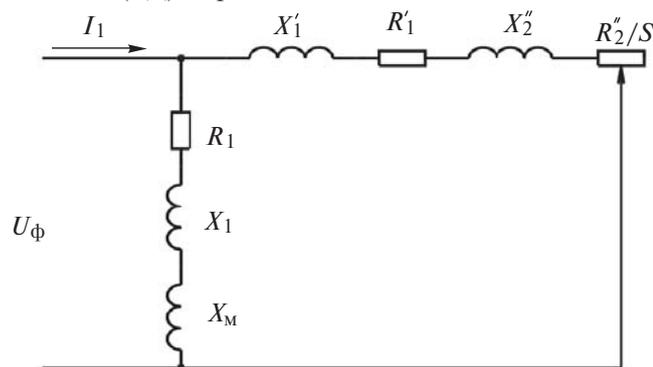


Рис. 1. Г-образная схема замещения одной фазы асинхронной машины для токов прямой последовательности фаз

Г-образная схема замещения позволяет получить характеристики АМ, рассчитать токи ротора и статора, их сдвиги по фазе, построить векторные и энергетические диаграммы, составить аналитическую зависимость электромагнитного момента на валу ротора и мощности.

Перевод серийно выпускаемых АВ в режим генератора недостаточно изучен: остаются не определенными ограничения и пределы регулирования. При анализе работы АМ важно определить не только токи ротора и статора, но и активные и индуктивные составляющие этих токов, их зависимости от параметров схемы замещения, нагрузки на валу, особенно при работе асинхронной машины в режиме генератора.

The equivalent circuit of an asynchronous machine is considered as a logical set of admittances for stator and rotor windings. The active and reactive components of stator and rotor currents are analyzed from the characteristics of admittances.

Key words: asynchronous machine, equivalent circuit, circuit admittance, current components

Для того чтобы перейти к рассмотрению активных и индуктивных составляющих токов ротора и статора и других характеристик, связанных с ними, предлагается методический прием: переход от Г-образной схемы замещения, содержащей активные и индуктивные сопротивления, к новой эквивалентной схеме замещения, содержащей активные и индуктивные проводимости. Переход выполняется на основе известных формул преобразования электрической цепи с последовательным соединением сопротивлений в эквивалентную электрическую цепь с параллельным соединением. При этом не вводится каких-либо дополнительных зависимостей или коэффициентов, поэтому преобразование считается абсолютно эквивалентным, и все допущения, принимаемые для Г-образной схемы, относятся к новой схеме замещения.

Предварительно перед преобразованием Г-образной схемы замещения (рис. 1) в ней выполнены следующие простые изменения:

сопротивления R''_2 / s представлены в виде суммы сопротивлений

$$R''_2 / s = R''_2 + R''_2(1-s) / s$$

с учетом их роли в преобразовании энергии в АМ;

объединены активные и индуктивные сопротивления, включенные последовательно (рис. 1), и введены обозначения:

$$(R'_1 + R''_2) = R''_{2к}, \quad (X'_1 + X''_2) = X''_{2к}, \quad (X_1 + X_M) = X_0.$$

С учетом этих упрощений в схеме осталось только пять сопротивлений: два в цепи намагничивания (R_1 и X_0) и три в цепи ротора (R''_2 , $X''_{2к}$ и $R''_2(1-s) / s$). Введенные изменения позволили преобразовать Г-образную схему замещения, содержащую пять сопротивлений, в новую схему, содержащую пять проводимостей и названную М-образной (рис. 2).

¹ Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболевская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1982.

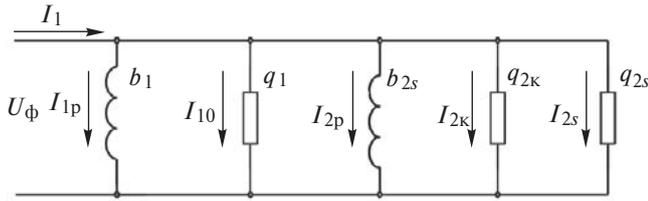


Рис. 2. М-образная схема замещения одной фазы АМ для токов прямой последовательности фаз

Проводимости q_1, b_1 относятся к цепи намагничивания, проводимости $q_{2к}, b_{2к}$ и q_{2s} – к цепи ротора.

Проводимости М-образной схемы замещения определяются по параметрам Г-образной схемы:

активная проводимость цепи намагничивания статора

$$q_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2} = \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad (1)$$

индуктивная проводимость цепи намагничивания статора

$$b_1 = \frac{X_1 + X_M}{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2} = \frac{X_0}{Z_1^2}; \quad (2)$$

активная проводимость цепи ротора

$$q_{2к} = \frac{R'_1 + R''_2}{(R'_1 + R''_2 / s)^2 + (X'_1 + X''_2)^2} = \frac{R''_{2к}}{Z_{2s}^2}; \quad (3)$$

индуктивная проводимость цепи ротора

$$b_{2s} = \frac{X'_1 + X''_2}{(R'_1 + R''_2 / s)^2 + (X'_1 + X''_2)^2} = \frac{X''_{2к}}{Z_{2s}^2}; \quad (4)$$

активная проводимость цепи ротора, по которой определяется активная составляющая тока и мощности в режиме двигателя либо генератора,

$$q_{2s} = \frac{R''_2(1-s)/s}{(R'_1 + R''_2 / s)^2 + (X'_1 + X''_2)^2} = \frac{R''_2(1-s)/s}{Z_{2s}^2}, \quad (5)$$

где s – скольжение ротора АМ.

Проводимости М-образной схемы замещения следует рассматривать как комплексные величины; общая проводимость фазы определяется в комплексной форме:

$$Y = (q_1 + q_{2к} + q_{2s}) - j(b_1 + b_{2к}) = q - jb. \quad (6)$$

По проводимостям рассчитываются соответствующие им токи и мощности фазы. Общий ток фазы определяется как сумма активной I_a и индуктивной $I_{и}$ составляющих:

$$I_1 = U_2 Y = U_1 q - jU_1 b = I_a + I_{и}. \quad (7)$$

Полная электрическая мощность фазы определяется как сумма активной P_1 и индуктивной Q_1 мощностей:

$$S_1 = U_1 I_1 = U_1^2 q - jU_1^2 b = P_1 + Q_1. \quad (8)$$

Следовательно, коэффициент мощности равен отношению проводимостей

$$\cos \varphi = P_1 / S_1 = q / Y. \quad (9)$$

По проводимостям цепи намагничивания статора q_1 и b_1 рассчитываются соответствующие им токи и мощности:

$$I_{1a} = U_1 q_1; P_{1a} = U_1^2 q_1; I_{1p} = U_1 b_1; Q_{1p} = U_1^2 b_1. \quad (10)$$

Проводимости q_1 и b_1 и соответствующие им токи и мощности не зависят от скольжения ротора и нагрузки на валу АМ.

По проводимостям цепи ротора $q_{2к}, b_{2к}$ и q_{2s} рассчитываются соответствующие им токи и мощности:

$$I_{2a} = U_1 q_{2к}; I_{2p} = U_1 b_{2к}; I_{2s} = U_1 q_{2s}; \quad (11)$$

$$P_{2a} = U_1^2 q_{2к}; Q_{2p} = U_1^2 b_{2к}; P_{2s} = U_1^2 q_{2s}. \quad (12)$$

Проводимости $q_{2к}, b_{2к}, q_{2s}$ и соответствующие им токи и мощности зависят от скольжения ротора и нагрузки на валу АМ.

Следовательно, по каждому сопротивлению $R_1, X_0, X''_2, R''_{2к}$ и $R''_2(1-s)/s$ на Г-образной схеме замещения рассчитываются соответствующие им токи и мощности с помощью М-образной схемы замещения.

Проводимости, токи и мощности следует рассматривать в комплексной форме. Индуктивные составляющие тока отстают по фазе от напряжения фазы на 90° . Активные составляющие тока фазы I_{1a} и I_{2a} совпадают по фазе с напряжением. Активная составляющая тока фазы I_{2s} изменяет свой знак в зависимости от скольжения ротора. При положительном своем значении ток I_{2s} совпадает по фазе с напряжением (режим двигателя), при отрицательном – находится в противофазе (режим генератора).

Отмеченные свойства дают основание по-новому строить векторные диаграммы АМ. Отпадает необходимость в расчете углов сдвига токов цепей намагничивания и ротора относительно напряжения фазы. Общий вектор тока можно изображать как сумму векторов его активных и индуктивных составляющих.

Кроме математического представления зависимости проводимостей представляет интерес их графический вид в функции скольжения ротора как обобщенный параметр режима работы АМ.

Для расчета и построения графиков проводимостей фазы в качестве примера выбран АД общего назначения 4А100S4, имеющий следующие номинальные данные: мощность 3 кВт; напряжение 380 В (при схеме обмоток «звезда»); ток 6,55 А; частота вращения 1430 мин⁻¹; КПД 82%; $\cos\varphi_n = 0,83$.

Кроме номинальных данных, в справочнике по АД серии 4А приведены параметры Г-образной схемы замещения в относительных единицах:

$X_M = 2,2$ – главное индуктивное сопротивление; обозначения и значения параметров в номинальном режиме работы двигателя

$$R'_1 = 0,078; \quad X'_1 = 0,079; \quad R''_2 = 0,053; \\ X''_2 = 0,13;$$

обозначения и значения параметров при КЗ

$$R''_{2n} = 0,057; \quad R_{кн} = 0,14; \quad X_{кн} = 0,14.$$

Параметры цепи намагничивания Г-образной схемы замещения (рис. 1) определяются согласно [1]:

индуктивное сопротивление рассеяния

$$X_1 = 2X'_1 X_M / (X_M + \sqrt{X^2 + 4X'_1 X_M}) = 0,076;$$

активное сопротивление обмотки статора, включая магнитные потери в машине,

$$R_1 = R'_1 X_1 / X'_1 = 0,075.$$

Перевод сопротивлений в абсолютные единицы выполняется путем умножения на базовое значение сопротивления:

$$Z_{баз} = U_{фн} / I_{фн} = 220 / 6,55 = 33,59 \text{ Ом.}$$

Для расчета проводимостей в зависимости от скольжения ротора составлена программа с использованием формул (1)–(5) и выполнен расчет по приведенным параметрам двигателя 4А100S4 в пределах изменения скольжения ротора от -1 до $+1$. Сделано допущение о том, что приведенные параметры остаются постоянными.

Результаты расчета представлены на рис. 3. Графический вид проводимостей фазы АМ получен впервые. Проведем анализ графиков рис. 3.

Можно с уверенностью утверждать, что вид графиков проводимостей для двигателя 4А 100S4 может рассматриваться как обобщенный и применимый для любого другого АД общего назначения, так как параметры двигателей хоть и отличаются, но сохраняется закономерность соотношения параметров для каждого двигателя [1].

На рис. 3 при скольжении ротора $0 < s < 1,0$ графики относятся к режиму двигателя;

при скольжении $-1 < s < 0$ – к режиму генератора;

при скольжении $s=0$ – к режиму идеального х.х.;

при скольжении $s=1,0$ – к режиму КЗ.

Все проводимости, кроме q и q_{2s} (кривые 4 и 6 на рис. 3), имеют только положительные значения. Это означает, что токи и мощности, соответствующие этим проводимостям, потребляются машиной из сети и с вала АМ.

Проводимость q_{2s} меняет знак, следовательно изменяется знак и результирующей проводимости q . При положительном значении q_{2s} (режим двигателя) ток I_{2s} и мощность P_{2s} поступают из сети, мощность P_{2s} передается на вал АМ. При отрицательном значении q_{2s} (режим генератора) ток I_{2s} и мощность P_{2s} меняют направление. Мощность P_{2s} поступает с вала АМ, преобразуется в электрическую мощность, одна часть которой теряется в виде тепловых потерь (ей соответствует проводимость $q_{2к}$), другая передается в сеть (ей соответствует проводимость q).

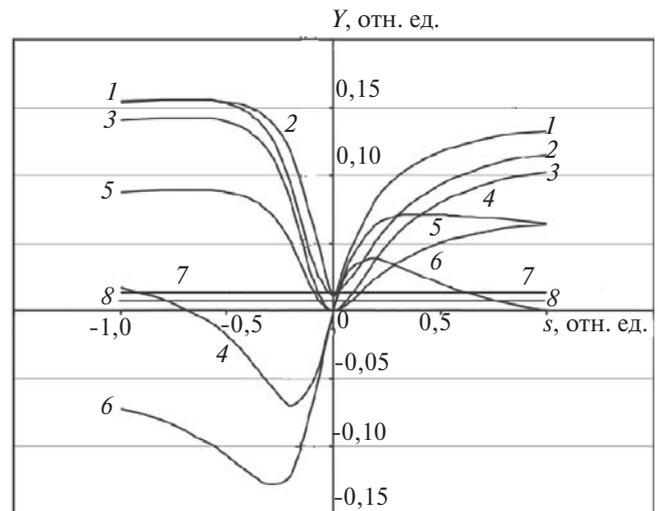


Рис. 3. Зависимости проводимостей одной фазы асинхронной машины от скольжения ротора s : 1 – полная проводимость фазы Y ; 2 – общая индуктивная проводимость фазы b ; 3 – реактивная проводимость цепи ротора $b_{2к}$; 4 – общая активная проводимость фазы q ; 5 – активная проводимость цепи ротора $q_{2к}$; 6 – активная проводимость цепи ротора q_{2s} ; 7 – индуктивная проводимость цепи намагничивания обмотки статора b_1 ; 8 – активная проводимость цепи намагничивания обмотки статора q_1

График q_{2s} имеет критические точки, которые можно определить из уравнения

$$\frac{dq_{2s}}{ds} = 0. \quad (13)$$

Решив (13) найдем зависимость критических значений скольжения ротора:

$$s_{кр} = \pm \frac{R_2''}{Z_k \pm R_2''}. \quad (14)$$

Положительный знак в (14) относится к режиму двигателя, отрицательный – к режиму генератора. Найдены их числовые значения по параметрам схемы замещения двигателя 4A100S 4: $s_{кр1} = +0,18$ и $s_{кр2} = -0,27$, что отражается на характере зависимости q_{2s} (кривая 5 на рис. 3).

В заключение отметим, что представленную в статье М-образную схему замещения, выраженную в виде проводимостей фазы АМ, не следует рассматривать как схему, полностью заменяющую Г-образную; она лишь дополняет известную схему, позволяет получить новые характеристики АМ, особенно при переводе ее в режим генератора.

Автор: Носков Виталий Александрович окончил в 1967 г. Челябинский политехнический институт. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию «Исследование электромеханической передачи с отбором мощности от теплового двигателя». Заведующий кафедрой «Электрические машины» ФГБОУ ВПО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия».