

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУТЕМ ОЦЕНКИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ВОЗДУШНОМ ЗАЗОРЕ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Ю. Г. Бухгольц, В. В. Жуловян, Ю. П. Рыбкин, Г. А. Шаншуров

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Для расчета характеристик синхронной машины необходимо более точно знать величины синхронных индуктивных сопротивлений по продольной и поперечной осям. Результаты, получаемые аналитическим путем, дают значительную погрешность вследствие целого ряда допущений при выводе уравнений.

Поэтому разработан целый ряд способов определения параметров синхронных машин опытным путем как для машин с электромагнитным возбуждением, так и для машин с возбуждением от постоянных магнитов. Однако известные способы определения индуктивных сопротивлений синхронных машин имеют целый ряд недостатков.

При определении индуктивного сопротивления по продольной оси по характеристикам холостого хода и короткого замыкания (ненасыщенное значение x_d) большая погрешность вносится за счет активного сопротивления обмоток якоря. То же самое наблюдается и при определении индуктивного сопротивления по продольной оси по характеристикам холостого хода и нагрузочной для индуктивной нагрузки (насыщенное значение x_d). Погрешность за счет активного сопротивления обмоток якоря в сильной степени возрастает с уменьшением машины.

При определении индуктивных параметров способом скольжения (по продольной оси x_d и поперечной оси x_q), кроме погрешности от активного сопротивления, вносится также погрешность за счет влияния токов, наводимых в короткозамкнутых контурах ротора, которые искажают поле в зазоре синхронной машины [2].

Способы опытного определения индуктивных сопротивлений синхронных машин с электромагнитным возбуждением совершенно неприменимы для машин с возбуждением от постоянных магнитов вследствие невозможности регулирования потока возбуждения.

Для синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов разработан ряд способов, являющихся видоизменениями выше рассмотренных способов [3]. Эти способы также имеют целый ряд специфических недостатков, заключающихся в следующем:

- 1) необходимо иметь несколько однотипных машин одинаковой мощности,
- 2) необходимо иметь магниты с разной намагниченностью,
- 3) значительное размагничивание магнита в процессе эксперимента.

Известные способы определения индуктивных параметров синхронных машин дают возможность определить синхронные индуктивности по продольной оси x_d и по поперечной x_q , которые слагаются соответственно

из реактивности якоря по продольной оси x_{ad} и по поперечной оси x_{aq} и индуктивного сопротивления рассеяния якоря x_s .

$$x_d = x_{ad} + x_s,$$

$$x_q = x_{aq} + x_s.$$

Следует отметить, что погрешность измерения синхронных индуктивных сопротивлений в машинах с возбуждением от постоянных магнитов за счет влияния активного сопротивления значительно выше, так как величина x_{ad} (а у машин без полюсных башмаков и x_{aq}) значительно меньше, чем у машин с электромагнитным возбуждением, за счет низкой магнитной проницаемости материала постоянного магнита.

Наиболее точное определение параметров синхронной машины возможно на основе оценки картины поля в воздушном зазоре при холостом ходе и нагрузке. Зная кривые поля в зазоре машины на холостом ходе и при нагрузке, можно выделить из кривой результирующего поля (при нагрузке) кривую реакции якоря. Затем, произведя разложение кривой реакции якоря по продольной и поперечной осям, можно найти индуктивные сопротивления реакции якоря x_{ad} и x_{aq} . Данный способ определения указанных величин вытекает непосредственно из классической теории двух реакций [1, 4, 5].

В общем случае кривые поля в воздушном зазоре могут быть несинусоидальными, несмотря на все мероприятия (укорочение обмоток, скос полюсных наконечников, скос пазов и т. д.), которые предусматриваются в машине с целью получения синусоидальной формы поля в зазоре.

В этом случае несинусоидальную кривую поля в зазоре необходимо заменить синусоидой, площадь которой равна площади несинусоидальной кривой. Полученную таким образом синусоиду назовем эквивалентной синусоидой.

Данный способ, следовательно, позволяет определить индуктивные сопротивления реакции якоря в чистом виде. При необходимости получения величин синхронных индуктивных сопротивлений x_d и x_q надо знать сопротивление рассеяния обмотки якоря x_s , которое определяется одним из известных способов.

Сущность способа определения параметров синхронной машины на основе оценки картины поля в воздушном зазоре поясняется на рис. 1, 2, 3 и 4.

На рис. 1 показаны поле на холостом ходе синхронной машины — B_0 и результирующее поле в зазоре машины при нагрузке — B_δ . Из поля в зазоре при нагрузке B_δ графически выделено поле реакции якоря B_a и произведено разложение его на составляющие по продольной оси машины (ось d) B_{ad} и по поперечной оси машины (ось q) B_{aq} .

$$\bar{B}_a = \bar{B}_{ad} + \bar{B}_{aq}. \quad (1)$$

На рис. 2 приведена пространственная диаграмма для синхронной машины, где произведено векторное определение величины поля реакции якоря.

Определение параметров синхронной машины несколько упростится, если перейти от полей в воздушном зазоре к соответствующим электродвижущим силам, вызываемым этими полями.

На рис. 3 приведена упрощенная векторная диаграмма синхронной машины. Вектор E_0 представляет из себя э. д. с. холостого хода, вектор E_δ — э. д. с. в воздушном зазоре. Величины данных э. д. с. определяются соответствующими полями холостого хода и результирующим полем при нагрузке. На диаграмме показано также разложение тока якоря I_a и э. д. с. реакции якоря на составляющие по продольной и поперечной осям.

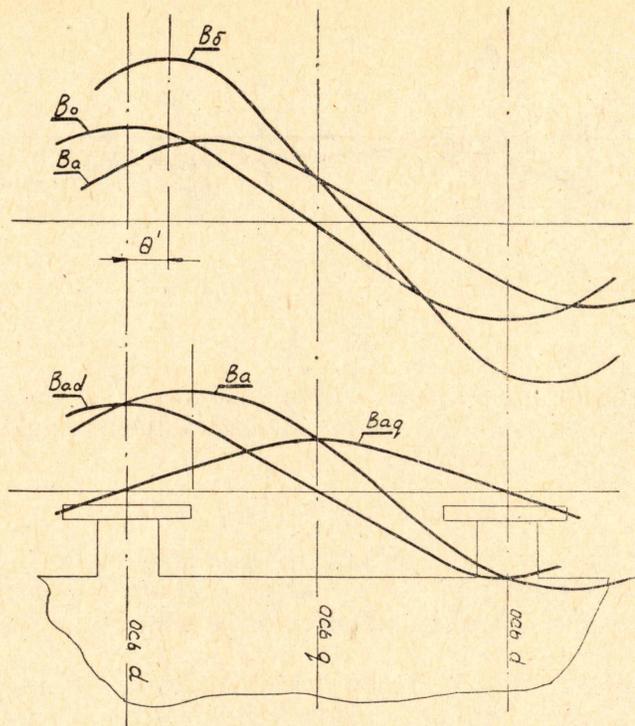


Рис. 1

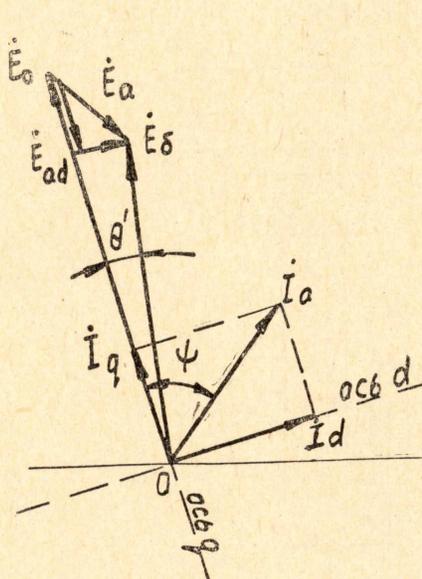


Рис. 2

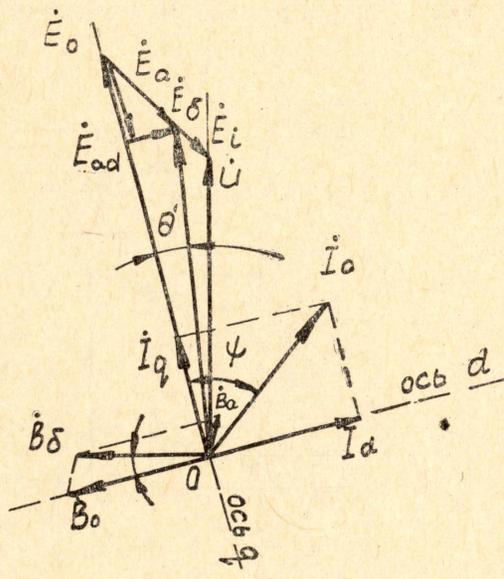


Рис. 3

Указанная векторная диаграмма с целью обеспечения аналитического определения э. д. с. реакции якоря E_a и ее составляющих по продольной и поперечной осям (E_{ad} и E_{aq}) преобразована к виду, показанному на рис. 4. На диаграмме вектор E_0 совмещен с положительным направлением действительной оси, т. е. действительная ось совмещена с осью q , а мнимая — с осью d .

На основе векторной диаграммы можно записать

$$\dot{E}_a = \dot{E}_\delta - \dot{E}_0 \quad (2)$$

или

$$E_a e^{\alpha} = E_\delta e^{\theta'} - E_0 \quad (3)$$

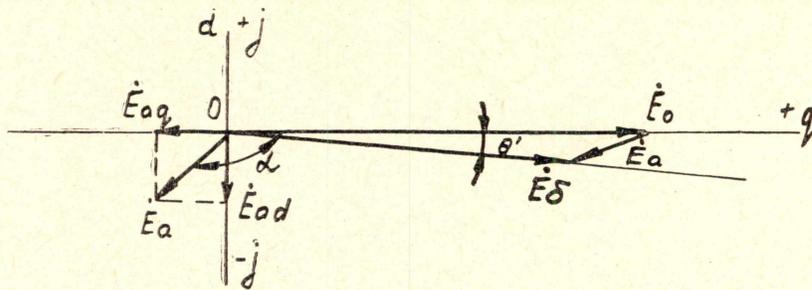


Рис. 4

Таким образом определение составляющих э. д. с. реакции якоря по продольной и поперечной осям сводится к определению мнимой и вещественной части вектора $E_a e^{\alpha}$.

$$E_a e^{\alpha} = E_{aq} + jE_{ad}. \quad (4)$$

Задача определения параметров синхронной машины, как показано выше, сводится к выделению э. д. с. реакции якоря и определению углов сдвига ψ между E_0 и I_0 и θ' — между полем холостого хода и результирующим.

На рис. 5 представлена схема для определения вышеуказанных величин, а следовательно, и индуктивных сопротивлений X_{ad} и X_{aq} .

Гонный двигатель I подключается к источнику питания 2 и вращается с номинальной скоростью. Ротор исследуемой машины 3 и датчик 7 жестко соединены с гонным двигателем и между собой.

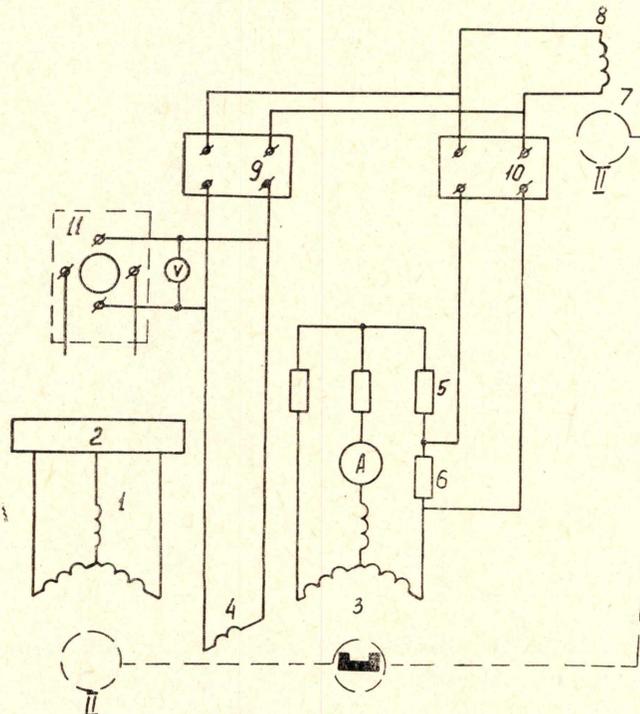


Рис. 5

На холостом ходу производим согласование оси сигнальной обмотки 8 и одной из фаз исследуемой машины 3. Сигнал с проводника 4 поступает на осциллограф II и вольтметр с высоким внутренним сопротивлением. Осциллографируем кривую э. д. с. холостого хода и замеряем величину э. д. с. E_0 . Включаем нагрузку 5, исследуемой машины 3,

исследуемой синхронной машины 3, осциллографируем кривую э. д. с. при нагрузке и замеряем величину э. д. с. E_s . С сигнальной обмотки 8 датчика углового положения 7 сигнал поступает на датчик угла « Θ' » — 9 и « ψ » — 10. С проводника 4 сигнал поступает на датчик угла « Θ' » — 9, а с добавочного сопротивления 6 на датчик угла « ψ » — 10. Датчики выдают значения углов Θ' и ψ — пропорциональные временным сдвигам э. д. с. E_s и токам нагрузки I_a относительно э. д. с. сигнальной обмотки, фиксированной во времени.

Кривые э. д. с. холостого хода проводника и э. д. с. от результирующего поля при нагрузке полностью повторяют кривые поля в воздушном зазоре синхронной машины.

По формуле (4) определяем э. д. с. реакции якоря соответственно по осям d и q .

$$E_{an}e^{\alpha} = E_{aqn} + jE_{adn}, \quad (5)$$

где E_{an} — э. д. с. реакции якоря, наводимая в проводнике 4 полем реакции якоря;

E_{aqn} — э. д. с. проводника 4 от поперечной составляющей реакции якоря в зазоре синхронной машины;

E_{adn} — э. д. с. проводника 4 от продольной составляющей реакции якоря в зазоре синхронной машины.

По известным обмоточным данным машины (числу витков w и обмоточному коэффициенту $k_{об}$) приводим э. д. с. реакции якоря проводника по осям d и q к э. д. с. реакции якоря обмотки по осям d и q .

$$E_{ad} = E_{adn} \cdot k_{об} w$$

$$E_{aq} = E_{aqn} \cdot k_{об} w.$$

Зная величину тока нагрузки и угол сдвига ψ между векторами E_s и I_a (рис. 2 и 3), определяем проекции тока фазы соответственно по осям d и q .

$$I_d = I_a \cdot \sin \psi$$

$$I_q = I_a \cdot \cos \psi$$

По известным значениям э. д. с. реакции якоря и тока фазы по соответствующим осям d и q определяем соответственно величину индуктивных сопротивлений реакции якоря по продольной и поперечной осям

$$\begin{aligned} x'_{ad} &= \frac{E_{ad}}{I_d} \\ x_{aq} &= \frac{E_{aq}}{I_q} \end{aligned} \quad (8)$$

Углы сдвига ψ и Θ' измеряются одним из методов, изложенных в [6]. Выбор метода измерения определяется потребной степенью точности измерения индуктивных параметров синхронной машины.

Данный способ позволяет также определить индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря. Из диаграммы рис. 2 имеем, что

$$\dot{E}_s + \dot{U} = \dot{E}_i. \quad (6)$$

Таким образом, замерив углы сдвига фаз между результирующей э. д. с. в воздушном зазоре E_s и напряжением U и между E_s и током нагрузки I_a , а также величины E_s , U и I_a , можно определить полное сопротивление обмотки статора, а следовательно, и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора x_s .

Опытное определение параметров рассмотренным способом, проведенное для синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов, обеспечило достаточно высокую точность (порядка 2—5%) и может быть рекомендовано для экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины. Ч. II, Госэнергоиздат, 1958.
 2. А. А. Горева. Переходные процессы синхронной машины. Госэнергоиздат, 1950.
 3. А. И. Бертинов, В. Г. Андреев. Определение параметров магнито-электрических генераторов с ротором типа «звездочка». Сб. статей, труды МАИ, вып. 133, Оборонгиз, 1961.
 4. Т. П. Губенко, В. Т. Губенко. Векторные диаграммы и построение статических характеристик синхронных машин. «Энергия», 1966.
 5. Р. Рихтер. «Электрические машины». II том, ОНТИ, 1936.
 6. В. А. Шереметьев. Методы измерения и регистрации угла выбега ротора синхронных машин. Львов, 1957.
-