

## РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Е. В. КОНОНЕНКО, Г. И. ЛУКИЯНОВ

Синхронные реактивные двигатели (СРД) находят применение в электроприводе с частотным регулированием скорости вращения. Режимы работы СРД при питании от сети с переменной частотой зависят от различных факторов: параметров самого двигателя, величины и характера изменения момента нагрузки, закона регулирования напряжения в зависимости от частоты и т. д. Для оценки свойств двигателя, выявления особенностей проектирования, а также рационального использования спроектированных двигателей в системах частотного регулирования необходимо изучить влияние указанных факторов на режимы работы и различные характеристики СРД.

Основные уравнения, описывающие процессы в СРД при переменной частоте, приведены в [1]. В настоящей работе проводится анализ рабочих характеристик СРД при переменной частоте.

При анализе влияния частоты на рабочие характеристики СРД удобно рассматривать зависимости от частоты токов, к. п. д., коэффициента мощности и углов нагрузки, определенных при постоянном или любом заданном значении момента нагрузки. Эти зависимости также будем называть рабочими характеристиками. Расчетные формулы целесообразно выразить через момент нагрузки. При этом формулы оказываются более простыми, если оперировать углом  $\beta$  между осью намагничивающей силы обмотки статора и продольной осью ротора.

Для удобства аналитические выражения в [1], описывающие синхронный режим работы СРД, преобразуем так, чтобы они содержали одну тригонометрическую функцию угла. Тогда ток статора при любой частоте определяется по следующему выражению (все величины в относительных единицах):

$$I = \frac{\gamma U_n \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}}{\sqrt{r^2 + \alpha^2 x_d^2 + \operatorname{tg}^2 \beta (r^2 + \alpha^2 x_q^2) + 2 r \alpha \operatorname{tg} \beta \cdot (x_d - x_q)}}, \quad (1)$$

где

$\gamma$  и  $\alpha$  — относительные значения напряжения и частоты.

В номинальном режиме  $U_n = 1,0$ ,  $\gamma = 1,0$ ,  $\alpha = 1,0$ ,  $I = 1,0$ . Значение угла  $\beta_n$ , соответствующее номинальному моменту нагрузки при номинальной частоте, может быть найдено из уравнения (1):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}, \quad (2)$$

где

$$a_1 = r^2 + x_q^2 - 1, \quad b_1 = 2r(x_d - x_q), \quad c_1 = r^2 + x_d^2 - 1.$$

Электромагнитный момент при любой частоте равен

$$M = \frac{(\gamma U_n)^2 (x_d - x_q) \cdot \operatorname{tg} \beta}{r^2 + \alpha^2 x_d^2 + \operatorname{tg}^2 \beta \cdot (r^2 + \alpha^2 x_q^2) + 2r\alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot (x_d - x_q)}. \quad (3)$$

или

$$M = I^2 \cdot (x_d - x_q) \cdot \frac{\operatorname{tg} \beta}{1 + \operatorname{tg}^2 \beta}. \quad (4)$$

Значения угла  $\beta$ , соответствующие любому заданному значению момента нагрузки, можно найти из выражения (3)

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{-b_2 \pm \sqrt{b_2^2 - 4a_2c_2}}{2a_2}, \quad (5)$$

где

$$a_2 = M(r^2 + \alpha^2 x_q^2), \quad b_2 = (x_d - x_q) \cdot [2M \cdot r\alpha - (\gamma U_n)^2], \\ c_2 = M(r^2 + \alpha^2 x_d^2).$$

Установившемуся синхронному режиму работы двигателя соответствует меньшее значение угла  $\beta$  по выражению (5). Ток статора определяется из выражения (4) в следующем виде:

$$I = \sqrt{\frac{M(1 + \operatorname{tg}^2 \beta)}{(x_d - x_q) \cdot \operatorname{tg} \beta}}. \quad (6)$$

Коэффициент мощности находится как отношение активной составляющей тока к полному току. Активная составляющая тока статора, выраженная через момент нагрузки, может быть определена по следующей формуле:

$$I_a = \frac{M}{\gamma U_n} \cdot \left[ \alpha + \frac{r(1 + \operatorname{tg}^2 \beta)}{(x_d - x_q) \operatorname{tg} \beta} \right]. \quad (7)$$

Потребляемая двигателем мощность пропорциональна активной составляющей тока и равна

$$P_1 = \gamma U_n \cdot I_a. \quad (8)$$

Потери в меди в относительных единицах равны

$$p_m = rI^2. \quad (9)$$

Согласно [2, 3] можно считать, что механические потери изменяются пропорционально угловой скорости ротора в степени 1,5, т. е.

$$p_{\text{мех}} = p_{\text{мн}} \alpha^{1,5}, \quad (10)$$

где

$p_{\text{мн}}$  — потери механические при  $\alpha = 1,0$  в относительных единицах.

Если потери в стали считать пропорциональными квадрату индукции в стали машины и частоте в степени 1,5, то при изменении частоты их с достаточной точностью можно определить по выражению

$$p_{ca} = p_{cn} \cdot \frac{(\gamma U_n)^2}{\sqrt{\alpha}}, \quad (11)$$

где

$p_{cn}$  — потери в стали при номинальной частоте в относительных единицах.

Зная суммарные потери, можно найти и к. п. д.

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}, \quad (12)$$

где

$\Sigma p$  — суммарные потери в двигателе.

При частотном регулировании скорости вращения одновременно с изменением частоты необходимо также регулировать величину напряжения по определенному закону. Выбор закона регулирования напряжения зависит от множества факторов и требует знания конкретных условий эксплуатации двигателя. Поэтому рассмотрим работу двигателя при двух наиболее характерных законах регулирования напряжения: 1) пропорционально частоте и 2) исходя из постоянства максимального момента, развиваемого двигателем.

Согласно [1] максимальный электромагнитный момент двигателя при любой частоте равен

$$M_m = \frac{(\gamma U_n)^2 (x_d - x_q)}{2(r^2 + \alpha^2 x_d x_q)^2} \cdot [\sqrt{(r^2 + \alpha^2 x_d^2)(r^2 + \alpha^2 x_q^2)} - \alpha r (x_d - x_q)]. \quad (13)$$

Максимальный электромагнитный момент при номинальной частоте  $M_{mн}$  находится из этого же выражения подстановкой  $\gamma = \alpha = 1,0$ . Разделив  $M_{mн}$  на  $M_m$ , находим

$$\gamma = \frac{1}{U_n} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{(r^2 + \alpha^2 x_d^2)(r^2 + \alpha^2 x_q^2)} + r \alpha (x_d - x_q)}{\sqrt{(r^2 + x_d^2)(r^2 + x_q^2)} + r (x_d - x_q)}} \cdot \sqrt{\frac{M_m}{M_{mн}}}. \quad (14)$$

Зависимости (1) ÷ (14) позволяют проанализировать рабочие характеристики СРД при переменной частоте. Для повышения точности расчетов желательно учитывать влияние насыщения на параметры СРД, так как в общем случае с изменением частоты магнитные потоки по осям  $d$  и  $q$  не остаются постоянными. Магнитные потоки изменяются:

- 1) с изменением момента нагрузки;
- 2) при постоянном моменте нагрузки и с изменением частоты, так как при этом изменяется угол  $\beta$ ;
- 3) за счет того, что при регулировании частоты и напряжения не соблюдается постоянство отношения э. д. с. к частоте.

Учет всех перечисленных факторов вызывает значительные вычислительные трудности. Опыт показал, что в диапазоне  $\alpha = 0,5 \div 1,5$  расчеты с достаточной точностью можно провести, если учитывать изменение параметров за счет изменения угла  $\beta$ . В этом случае для расчета рабочих характеристик достаточно найти зависимости  $x_d, x_q = f(\text{tg } \beta)$ , определенные при номинальной частоте. Такие зависимости приведены на рис. 1.

На рис. 2а приведены рабочие характеристики двигателя с номинальной мощностью 2,2 кВт (при частоте 50 гц) и номинальной скоростью вращения 1000 об/мин. Напряжение изменяется пропорционально частоте. Из этих кривых видно, что при изменении частоты в достаточно

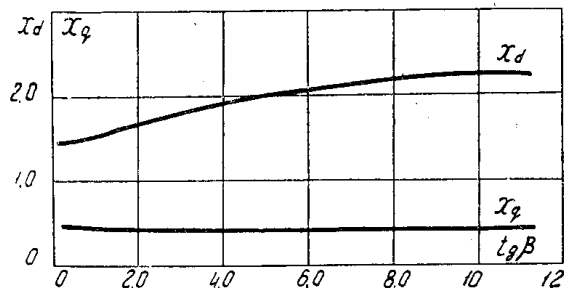


Рис. 1. Зависимости  $x_d$  и  $x_q$  от  $\text{tg}^2 \beta$

широких пределах и  $M_{\text{ст}} = \text{const}$  ток статора изменяется незначительно. Поэтому и потери в меди изменяются мало. С уменьшением частоты потери в стали и механические, а также суммарные потери уменьшаются. Одновременно с этим происходит более быстрое снижение потребляемой мощности, что и обуславливает характер изменения к. п. д. Коэффициент мощности с уменьшением частоты возрастет. На рис. 2а приведены также рабочие характеристики при номинальном моменте нагрузки, определенные экспериментально. Расчетные данные достаточно хорошо совпадают с опытными данными.

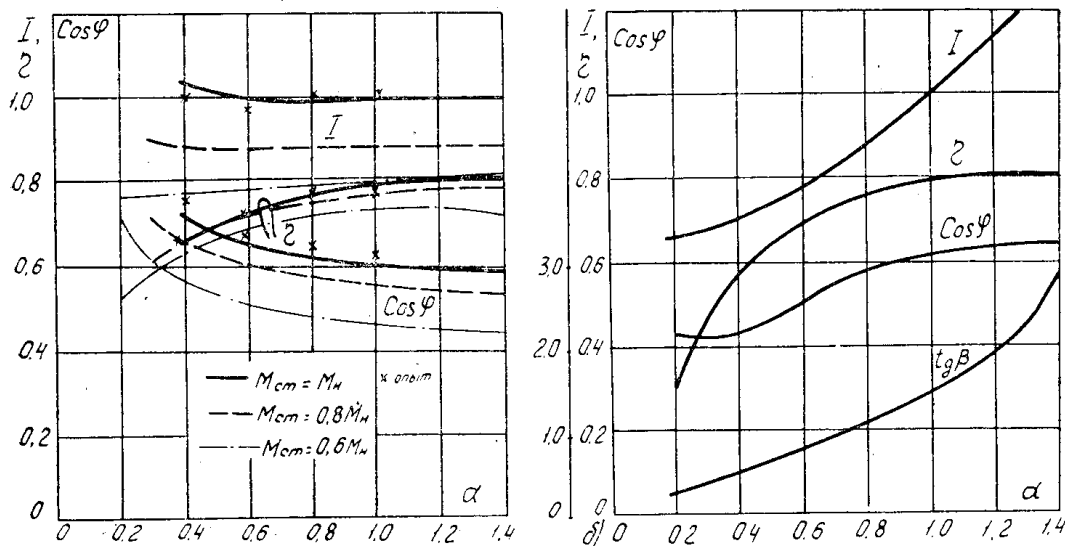


Рис. 2. Рабочие характеристики СРД в зависимости от частоты:  
а)  $M_{\text{ст}} = \text{const}$ ; б)  $M_{\text{ст}} = \alpha$

Если момент нагрузки уменьшается пропорционально скорости вращения (напряжение регулируется пропорционально частоте), то угол  $\beta$ , соответствующий этой нагрузке, также уменьшается (рис. 2б). При этом характер изменения к. п. д. остается таким же, что и при  $M_{\text{ст}} = \text{const}$ . С уменьшением частоты коэффициент мощности ухудшается. Следовательно, в том случае, когда момент нагрузки изменяется пропорционально скорости вращения и напряжение изменяется пропорционально частоте, энергетические показатели двигателя при регулировании скорости вращения вниз от номинальной сильно ухудшаются.

На рис. 3 приведены характеристики СРД при различных законах регулирования напряжения. Момент нагрузки остается постоянным и равным номинальному,  $U_n = 1,0$ . Сравнивая эти характеристики, можно заметить, что в диапазоне  $\alpha = 0,6 - 1,4$  они отличаются незначительно. При регулировании напряжения из условия постоянства максимального момента двигателя и  $\alpha < 1,0$  коэффициент мощности меньше,

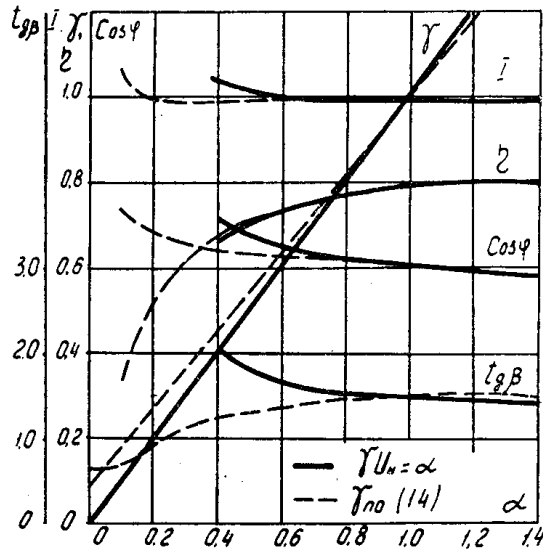


Рис. 3. Сравнение рабочих характеристик СРД при различных законах регулирования

чем при пропорциональном изменении напряжения, так как в первом случае подведенное к двигателю напряжение больше, в связи с чем увеличивается реактивная составляющая тока. К. п. д. практически одинаковы.

Таким образом, при регулировании напряжения в зависимости от частоты из условия постоянства максимального момента в широком диапазоне регулирования скорости вращения энергетические показатели СРД остаются достаточно высокими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко, Г. И. Лукиянов. Уравнения синхронного реактивного двигателя при переменной частоте питающей сети. Изв. ТПИ, т. 229, 1972.
2. А. А. Булгаков. Частотное управление асинхронными электродвигателями. М., Изд. АН СССР, 1966.
3. М. И. Крайцберг, В. И. Иог, В. В. Сигодин. Частотное регулирование асинхронных электродвигателей. М., Информстандартэлектро, 1967.