А. Н. Бесараб, к. т. н., доц.; В. Н. Невольниченко, к. т. н., доц.; С. П. Савич, к. т. н.; М. Ю. Шабовта, к. т. н.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ КОНТУРОВ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ЕЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

На основании приведенных расчётов переходных процессов в асинхронном двигателе с использованием одно- и многоконтурных схем сделаны выводы относительно их сферы применения.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, многоконтурная схема, переходный процесс, ток короткого замыкания, электромагнитный момент.

Введение

В настоящее время при составлении схем замещения для моделирования переходных процессов в системах электроснабжения с асинхронными двигателями (АД) применяют два различных подхода, в которых по-разному учитывают изменение параметров роторных контуров глубокопазных машин или машин с двойной клеткой. В первом случае АД представляют схемой замещения с одним контуром на роторе. Для учёта насыщения по путям рассеяния и явления вытеснения тока вводят функциональную зависимость параметров (R, X) этого контура от скольжения [1 – 3]. Во втором – изменение параметров учитывают применением многоконтурных схем замещения [4 – 8]. К сожалению, в литературе не приведен сравнительный анализ указанных подходов.

Целью работы является определение сферы применения одно- и многоконтурных схем АД на основе сравнения результатов расчёта электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

Результаты исследования

Для сравнения указанных подходов рассматривают две модели одного и того же двигателя типа A 114-4 со следующими параметрами: $P_{\text{ном}} = 320 \text{ кBr}$; $U_{\text{ном}} = 6 \text{ kB}$; $cos\phi = 0.89$; КПД = 0.928; $n_{\text{ном}} = 2970 \text{ об/мин}$; $I_{\Pi} = 6.6 \text{ o. e.}$; $M_{\Pi} = 1.6 \text{ o. e.}$; $M_{M} = 2.8 \text{ o. e.}$; $T_{i} = 13 \text{ c.}$

По методике, изложенной в [1], определены параметры одноконтурной схемы замещения (рис. 1): $X_s = 0,0714$; $X_m = 3,2028$; $X_{r0} = 0,1547$; $X_{r1} = 0,0731$; $R_s = 0,0192$; $R_{r0} = 0,0085$; $R_{r1} = 0,03173$. Значения $X_r(s)$ і $R_r(s)$ определяют по выражениям:

$$R_r = R_{r_0} + \left(R_{r_1} - R_{r_0} \right) \sqrt{s} , \qquad (1)$$

$$X_r = \frac{X_{r_0} X_{r_1}}{X_{r_1} + (X_{r_0} - X_{r_1}) \sqrt{s}}$$
(2)



Рис. 1. Одноконтурная схема АД

Для расчёта параметров эквивалентной многоконтурной схемы (рис. 2) по выражениям (1), (2) при различных скольжениях были определены сопротивления роторного контура (табл. 1).



Рис. 2. Многоконтурная схема АД

Таблица 1

Сопротивления роторных контуров при различных скольжениях

S	$R_{ m r}$	$X_{ m r}$
0,9	0,030545187	0,075107336
0,4	0,023183133	0,090659567
0,09	0,015443282	0,115887414

Далее составляют систему уравнений (3), из которой находят параметры эквивалентной трёхконтурной схемы замещения (табл. 2).

$$\frac{1}{\frac{R_{r(i)}}{s_{(i)}} + jX_{r(i)}} = \frac{1}{\frac{R_{r1}}{s_{(i)}} + jX_{r1}} + \frac{1}{\frac{R_{r2}}{s_{(i)}} + jX_{r2}} + \frac{1}{\frac{R_{r3}}{s_{(i)}} + jX_{r3}},$$
(3)

где *i* = 1, 2, 3.

Таблица 2

Сопротивления роторных контуров трёхконтурной схемы замещения

JN≌	Rr	Xr
контура		
1	0,111355149	0,124238125
2	0,021299808	0,156805059
3	0,045201967	1,279714058

Применяют три контура, поскольку меньшее число контуров не обеспечивает удовлетворительного совпадения характеристик рассматриваемых моделей, а при большем появляются корни со знаком минус, что вызывает трудности при решении дифференциальных уравнений такой модели численными методами.

Пусковые характеристики обеих моделей показаны на рис. 3 и рис. 4.



Рис. 3. Пусковые характеристики моделей: I = f(s) одно- (а) и многоконтурной модели (б)



Рис. 4. Пусковые характеристики моделей: M = f(s) одно- (а) и многоконтурной модели (б)

Для подтверждения эквивалентности моделей по рассчитанным параметрам был произведен расчёт пуска АД и построены кривые изменения действующего значения тока фазы «А» статора (рис. 5) и кривые изменения скорости вращения ротора (рис. 6) в этом режиме.



Рис. 5. Кривые изменения действующего значения тока фазы «А» статора при пуске АД одно- (а) и многоконтурной модели (б)



Рис. 6. Кривые изменения скорости вращения ротора при пуске одно- (а) и многоконтурной модели (б)

Несмотря на совпадение кривых при пуске, расчёт трёхфазного КЗ на выводах обмотки статора показал различия в изменении параметров режима для рассматриваемых моделей (рис. 7, рис. 8). Расхождение в максимальных значениях тока составил 16 %, электромагнитного момента – 30 %. Также отличается скорость затухания переходного процесса.



Рис. 7. Кривые изменения мгновенного значения тока фазы «А» статора при трёхфазном КЗ на выводах АД одно- (а) и



Рис. 8. Кривые изменения электромагнитного момента при трёхфазном КЗ на выводах АД одно- (а) и многоконтурной модели (б) (начало КЗ в 0,02 с)

Причина такого значительного расхождения в полученных результатах заключается в принятом для одноконтурной модели допущении, что частота тока в роторе в конечном счёте связана со скольжением. При пуске частота тока в роторе изменяется пропорционально скольжению, поэтому модели ведут себя одинаково. Если посмотреть на рис. 9, то можно увидеть, что из-за наличия апериодической составляющей в токе статора при КЗ на выводах АД в токе ротора появляется составляющая, изменяющаяся с частотой, близкой к 50 Гц, в то время как скольжение (рис. 10) за это время практически не изменилось, а значит параметры роторного контура также остались без изменения. На многоконтурную схему указанное допущение не распространяется, поэтому последняя в этом случае ведёт себя более адекватно.



Рис. 9. Кривая изменения мгновенного значения тока эквивалентного контура ротора во время трёхфазного КЗ на



Рис. 10. Кривая изменения скорости вращения ротора при трёхфазном КЗ на выводах АД (начало КЗ в 0,2 с)

Выводы

Рассмотрена одноконтурная модель АД, в которой учёт насыщения по путям рассеяния и вытеснения тока в роторе учитывают путём введения функциональной зависимости между параметрами роторного контура и скольжением. Показано, что одноконтурную модель целесообразно применять в случаях, когда частота тока в роторе пропорциональна скольжению, а именно: режимах пуска и самозапуска. Во время моделирования электромагнитных переходных процессов при КЗ, кратковременных нарушениях электроснабжения указанное условие нарушают, и в этом случае целесообразно применять многоконтурные модели. Очевидно, что эти рекомендации также можно распространить и на синхронные машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамазин С. И. Переходные процессы в системах электроснабжения с электродвигательной нагрузкой / С. И. Гамазин, Т. А. Садыкбеков. – Алма-Ата : Гылым, 1991. – 302 с.

2. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников; под ред. Л. Г. Мамиконянца. – [4-е изд.]. – М.: Энеогоатомиздат, 1984. – 240 с.

3. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е. Я. Казовский. – М. : Изд. АН СССР, 1962. – 624 с.

4. Сивокобиленко В. Ф. Математическое моделирование переходных процессов на электрических станциях / В. Ф. Сивокобиленко, М. А. Меженкова // Электричество. – 2004. – № 4. – С 5 – 9.

5. Сивокобыленко В. Ф. Переходные процессы в многомашинных системах электроснабжения электрических станций / В. Ф. Сивокобыленко. – Донецк : ДПИ, 1984. – 116 с.

6. Сивокобыленко В. Ф. Расчёт параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин / В. Ф. Сивокобыленко, В. А. Павлюков // Электричество. – М. : – № 10 – 1979. – С. 35 – 39.

7. Larin A. Computer simulation of the transient in AC machines at short-circuits and connections to a network on the basis of the experimental frequency response characteristics / A. Larin, A. Abdessalem // 9^{th} International Symposium on Short-circuit currents in power systems, SCC'2000, Cracow, October 11 – 13, 2000. – P. 39 – 45.

8. Рогозин Г. Г. Визначення електромагнітних параметрів машин змінного струму: нові експериментальні методи / Г. Г. Рогозин. – К : Техніка, 1992. – 168 с.

9. Шабовта М. Ю. Повышение эффективности защиты и автоматики на предприятиях с непрерывным технологическим циклом: 05.09.03 / Шабовта Михаил Юрьевич. – Одесса: 2013. – 276 с.

Бесараб Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: al_besarab@ukr.net.

Невольниченко Валентин Николаевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: vn_n@ukr.net.

Савич Светлана Павловна — канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента, , e-mail: savichsp@gmail.com.

Шабовта Михаил Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетического менеджмента, e-mail: poststudent@ukr.net.

Одесский национальный политехнический университет.