

© А.К.Малиновский, С.В.Лебедев,
П.В. Ткаченко, С.Н. Решетняк, 2003

УДК 621.313.13.621.874.001.24

А.К.Малиновский, С.В.Лебедев, П.В. Ткаченко,
С.Н. Решетняк

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА
РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ АСИНХРОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ
ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ
С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ**

Режим динамического торможения, как обладающий энергосберегающим свойством, нашел широкое применение в электроприводах переменного тока различных машин и механизмов. Особенно это относится к режиму динамического торможения с самовозбуждением.

Асинхронный двигатель не имеет остаточного магнитного потока. Поэтому для создания режима динамического торможения необходим начальный магнитный поток за счет начального тока возбуждения. С этой целью в цепь выпрямленного тока ротора асинхронного двигателя (АД) включают электролитический конденсатор, который заряжается в период работы асинхронной машины в двигательном режиме, а при создании режима динамического торможения разряжается на обмотки статора, создавая начальный ток возбуждения, и двигатель переходит в режим динамического торможения с самовозбуждением [1, 2]. Однако при разработке схемы электропривода, использующего режим динамического торможения с самовозбуждением, необходимо решить следующие задачи:

- определение минимальной частоты вращения и диапазона регулирования;
- условия выхода асинхронного двигателя из режима самовозбуждения.

Методика расчета минимальной частоты вращения асинхронного двигателя, работающего в режиме динамического торможения с самовозбуждением.

Для определения минимальной частоты вращения воспользуемся схемой включения АД, реализующей режим динамического торможения с самовозбуждением, представленной на рис. 1, для которой приняты следующие условные обозначения: UZ - неуправляемый выпрямитель, включенный в цепь ротора АД; I_2 - переменный ток фазы ротора АД; I_{2d} - постоянный ток на выходе выпрямителя UZ ; I_1', I_2' - соответственно активные сопротивления фазы статора и ротора АД; R_{o2} - резистор в цепи ротора АД.

Минимальная частота вращения АД, работающего в режиме динамического торможения, может быть получена из известного выражения [3];

$$I_2' = \frac{I_{эв} \cdot x_\mu}{\sqrt{\left(\frac{R_{эв}}{U}\right)^2 + (x_2' + x_\mu)^2}}, \quad (1)$$

где I_2' - ток ротора, приведенный к цепи статора; $I_{эв}$ - валентный ток; x_μ - индуктивное сопротивление контура намагничивания АД; $R_{эв}$ - эквивалентное активное сопротивление цепи ротора, приведенное к цепи статора АД; U - скольжение АД в режиме динамического торможения; x_2' - индуктивное сопротивление фазы ротора, приведенное к цепи статора АД.

Решая выражение (1)

относительно скольжения U , получаем

$$U = \frac{n}{n_{ном}} = \frac{R_{эв}}{\sqrt{\left(\frac{I_{эв}}{I_2'}\right)^2 \cdot x_\mu^2 - (x_\mu + x_2')^2}}, \quad (2)$$

где n , $n_{ном}$ - соответственно текущая и номинальная частоты вращения АД.

Для схемы, приведенной на рис.1

$$\frac{I_{эв}}{I_2'} = \frac{k_{cx} \cdot k_e}{\tau_I} = k_{oc}, \quad (3)$$

где k_{cx} - коэффициент, зависящий от схемы соединения обмоток статора ($k_{cx} = 0,816$ - для соединения обмоток статора в звезду); k_e - коэффициент трансформации АД; τ_I - коэффициент схемы выпрямления по току ($\tau_I = 0,815$ - для трехфазной схемы выпрямления); k_{oc} - коэффициент обратной связи по току.

Окончательно выражение для минимального скольжения АД, работающего в режим динамического торможения (ДТ) с самовозбуждением, будет иметь следующий вид:

$$U_{min} = \frac{n_{min}}{n_{ном}} = \frac{R_{эв}}{\sqrt{k_{oc}^2 \cdot x_\mu^2 - (x_\mu + x_2')^2}}, \quad (4)$$

Минимальное скольжение или минимальная частота вращения АД в режиме ДТ с самовозбуждением может быть получено при условии, когда $R_{o2} = 0$. Загрузка двигателя при этом минимальна, а индуктивное сопротивление контура намагничивания максимально $x_\mu = x_{\mu max}$, которое находится из кривой намагничивания АД. Тогда при постоянном коэффициенте k_{oc} , минимальное скольжение U_{min} будет зависеть только от величин активных сопротивлений обмоток статора и ротора и коэффициента трансформации АД, так как

$$R'_{\text{экв}} = r'_2 + \tau_R \cdot R_1 \cdot k_e^2, \quad (5)$$

где r'_2 - активное сопротивление фазы ротора, приведенное к цепи статора АД; τ_R - коэффициент, связывающий активные сопротивления в цепи постоянного тока с цепью переменного тока (для трехфазной мостовой схемы $\tau_R = 0,525$); R_1 - полное активное сопротивление цепи статора (при соединении обмоток статора в звезду $R_1 = 2 \cdot r_1$).

Для крановых двигателей, параметры которых приведены в таблице, рассчитаны величины минимальных скольжений $v_{\min}$, которые занесены в ту же таблицу. Из данных таблицы следует, что величина минимального скольжения снижается от $v_{\min} = 0,278$ до $v_{\min} = 0,06$ с увеличением мощности асинхронного двигателя от $P_{\text{ном}} = 3$ кВт до $P_{\text{ном}} = 55$ кВт. Это объясняется тем, что с увеличением мощности двигателя снижаются величины ак-

тивных сопротивлений обмоток статора и ротора, как это следует из данных таблицы. Следовательно, механическая характеристика динамического торможения с самовозбуждением начинается не со скольжения $v_{\min} = 0$, а со скольжения $v_{\min} > 0$. Это приводит, независимо от типа двигателя, к снижению диапазона регулирования скорости АД в режиме динамического торможения. Для определения диапазона регулирования скорости в режиме динамического торможения с самовозбуждением необходима механическая характеристика $v = f(M)$.

Методика расчета механических характеристик АД, работающего в режиме динамического торможения с самовозбуждением.

Расчет механической характеристики АД, работающего в режиме динамического торможения с самовозбуждением, ведется в следующей последовательности:

- по формулам (3) и (5) находим соответственно k_{oc} и $R'_{\text{экв}}$;

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ И ДИАПАЗОНА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Тип двигателя	P_2 , А	E_2 , В	r_1 , Ом	r_2 , Ом	x_2 , Ом	I_μ , А	k_e	$v_{\min}$	D	$\mu_{\min}$
МТН 111-6	3,0	176	2,25	0,775	0,829	9,65	1,98	0,278	3,3	0,003
МТН 112-6	4,5	203	1,67	0,505	0,905	11,25	1,7	0,229	3,7	0,0045
МТН 211-6	7,0	236	0,835	0,466	0,666	19	1,48	0,21	4,16	0,0047
МТН 311-6	11	172	0,488	0,173	0,241	23,2	2,05	0,13	5,13	0,0076
МТН 312-6	15	219	0,377	0,125	0,254	34,3	1,63	0,135	6,1	0,0072
МТН 411-6	22	235	0,219	0,08	0,233	39,7	1,54	0,09	8,0	0,0112
МТН 412-6	30	255	0,133	0,059	0,173	51,8	1,4	0,075	10	0,0132
МТН 512-6	55	346	0,0553	0,0575	0,199	55	1,1	0,06	10,5	0,017

- задаемся минимальным значением тока I_μ и по кривой намагничивания определяем фазную ЭДС статора $E_{1\phi}$;

- по найденной величине $E_{1\phi}$ и известном I_μ определяем x_μ , а затем по формуле (4) находим $v_{\min}$;

- ток ротора I'_2 находим по формуле

$$I'_2 = \sqrt{\frac{E_{1\phi} \cdot I_\mu}{x_\mu \cdot (k_{oc}^2 - 1) - 2 \cdot x'_2}}, \quad (6)$$

полученной из выражения [2]

$$E_{1\phi} \cdot I_\mu = [I_{эж}^2 - (I'_2)^2] \cdot x_\mu - 2 \cdot (I'_2)^2 \cdot x'_2;$$

- далее находим тормозной момент АД по известной формуле [3]

$$M = \frac{28,6}{n_0} \cdot (I'_2)^2 \cdot \frac{R'_{эж}}{v}, \quad (7)$$

где n_0 - синхронная частота вращения АД.

Полученные значения v и M и нанесенные на плоскость с координатами (v, M) , дают первую точку механической характеристики. Задаваясь новым значением тока $I_{\mu 1} > I_\mu$, определяем последовательно v , I'_2 , M и находим следующую точку механической характеристики и т.д. Откладывая на механической характеристике номинальный момент $M_{ном}$ двигателя, находим минимальную частоту вращения и определяем диапазон регулирования скорости $D = n_{\min} / n_{ном}$. Проведя аналогичным методом расчет механических характеристик других типов двигателей, приведенных в таблице, были определены минимальные скорости $n_{\min}$ и диапазоны регулирования скорости D , величины которых занесены в таблицу.

При расчете механической характеристики динамического торможения с самовозбуждением важно знать не только минимальную частоту вращения, но и минимальный тормозной момент, при котором происходит срыв тормозного момента, т.е. двигатель перестает создавать тормозной момент. Для режима динамического торможения с самовозбуждением это происходит тогда, когда ЭДС ротора E_2 на входе выпрямителя UZ , включенного в цепь ротора АД, становится меньше прямого падения напряжения на его вентилях. Для трехфазной мостовой схемы ЭДС ротора должна быть меньше напряжения, определяемого по формуле

$$E_2 < \frac{\tau_U \cdot n_\phi \cdot \Delta U_\phi}{v_{\min}}, \quad (8)$$

где τ_U - коэффициент схемы выпрямления по напряжению ($\tau_U = 0,427$ - для трехфазной мостовой схемы);

n_ϕ - число последовательно включенных вентилях;
 ΔU_ϕ - прямое падение напряжения на вентиле.

С другой стороны ЭДС ротора E_2 зависит не только от скольжения, но и от ЭДС статора E_1 , которая создается намагничивающим током I_μ . Этот ток находится из кривой намагничивания при известной величине ЭДС статора $E_1 = E_2 \cdot k_e$ (9).

Имея E_1 , I_μ и x_μ , переходим к определению минимального тормозного момента АД, работающего в режиме динамического торможения с самовозбуждением. Для этого сначала по формуле (6) находим ток ротора I'_2 , а затем, при известных I'_2 , $v_{\min}$ и $R'_{эж}$, определяем тормозной момент АД по формуле (7). Полученный тормозной момент является минимальным $M_{\min}$, при котором еще возможен тормозной режим.

При моменте $M < M_{\min}$ двигатель выходит из тормозного режима, так как ток I_μ снижается, а это приводит соответственно к уменьшению ЭДС статора, а следовательно, к снижению ЭДС ротора, которая становится меньше прямого падения напряжения на вентилях выпрямителя UZ .

Минимальное скольжение в режиме ДТ с самовозбуждением зависит, как было показано выше, от величины активного сопротивления цепи ротора АД. Регулировании частоты вращения АД в режиме ДТ производится за счет введения добавочного резистора R_{20} в цепь ротора. Рассмотрим как изменится при этом величина минимального скольжения $v_{\min}$. При том же минимальном токе I_μ величина тока ротора I'_2 согласно (6), остается без изменения. Отсюда минимальное скольжение увеличивается с увеличением $R'_{эж}$, которое определяется по формуле $R'_{эж} = [r'_2 + (\tau_R \cdot R_1 + R_{20})] \cdot k_e^2$. Минимальный тормозной момент АД, при котором еще возможен режим ДТ с самовозбуждением, определяемый по формуле (7), также остается неизменным, так как $R'_{эж} / v_{\min} = const$. Таким образом, рост минимального скольжения с введением добавочного резистора в цепь ротора не приводит к изменению минимального момента. Следовательно, границей режима ДТ с самовозбуждением будет $v_{\min}$ при $M_{\min} = const$.

Заключение

Проведенные исследования режима динамического торможения с самовозбуждением показали, что реализация этого режима приводит к увеличению минимальной частоты вращения, а следовательно, к снижению диапазона регулирования скорости. Величина максимального тормозного момента увеличивается с ростом мощности двигателя и остается постоянной при регулировании частоты вращения введением добавочного резистора в цепь ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малиновский А.К. Электропривод переменного тока с противо-ЭДС в цепи ротора. - М.: РИИС, 1999.
2. Малиновский А.К., С.В. Лебедев, Д.В. Маминов Исследование схемы конденсаторного торможения асинхронного двигателя с фазным ротором. - М.: МГТУ ГИАБ, №5, 2001.
3. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. - М.: Энергия, 1977.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Малиновский Анатолий Кузьмич - профессор, доктор технических наук, Московский государственный горный университет.

Лебедев Сергей Владимирович - аспирант, Московский государственный горный университет.

Ткаченко Павел Викторович - аспирант, Московский государственный горный университет.

Решетняк Сергей Николаевич - аспирант, Московский государственный горный университет.

© А.Т. Ерыгин, В.А. Бондарь, 2003

УДК 621.3.011.1.

А.Т. Ерыгин, В.А. Бондарь

**ОБ ОЦЕНКЕ ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРО-
ОБОРУДОВАНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО ПРИ
ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Современные испытания на искробезопасность электрических цепей осуществляются во взрывных камерах, заполненных испытательной взрывоопасной смесью при давлении 0,1 МПа (760 ± 20 мм рт.ст.) и температуре 20-30 °С. Результаты проведенных испытаний на искробезопасность электрических цепей будут справедливы только для данного диапазона температур окружающей среды, при котором будет эксплуатироваться электрооборудование.

В настоящее время современный стандарт [1] не указывает на недопустимость применения искробезопасного электрооборудования при температуре окружающей среды, превышающей ту температуру, при которой происходили типовые испытания на искробезопасность электрических цепей. Справедливо было бы проведение испытаний на искробезопасность при температуре испытательной взрывоопасной смеси, равной максимальной температуре окружающей среды, при которой будет эксплуатироваться данное электрооборудование. Однако такой метод испытаний имеет недостатки, связанные с технической трудностью выполнения таких испытаний при различной температуре испытательной взрывоопасной смеси.

В настоящее время положение таково, что разработчики искробезопасной аппаратуры применяют ее при максимальной температуре окружающей среды 150 °С и выше после обычных сертификационных испытаний.

Целью данной работы является доказательство чистого влияния температуры испытательной взрывоопасной смеси на снижение искробезопасных параметров электрических цепей и необходимость внесения корректив в современную методику в зависимости от максимальной температуры

окружающей среды, при которой детектируется эксплуатироваться мое электрооборудование. Для ответа на поставленные вопросы воспользуемся исследованиями Н.Д. Гавриленко [2] по минимальным восприимчивым энергиям электрического разряда в зависимости от ряда для 4 представительных взрывоопасных смесей. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что минимальная воспламеняющая энергия электрического разряда при увеличении температуры взрывоопасной смеси до 150 °С снижается практически вдвое, что нельзя не учитывать в процессе испытаний на искробезопасность электрооборудования.

Приняв за единицу минимальные воспламеняющие энергии электрического разряда, установленные при температуре взрывоопасной смеси 25 °С, были определены в относительных единицах минимальные воспламеняющие энергии электрического разряда при других температурах взрывоопасных смесей. Полученные данные затем были обработаны с помощью математической статистики. Результаты анализа сведены в табл. 2.

Полученные результаты анализа могут быть использованы для совершенствования испытаний на искробезопасность электрических цепей с точки зрения учета максимальной температуры окружающей среды, при которой будет эксплуатироваться электрооборудование. Для этого необходимо определить степень снижения тока в испытанной на искробезопасность электрической цепи при нормальных условиях из выражения

$$MTB_d = I/I_0 = (W/W_0)^{0,467}, \quad (1)$$

где MTB_d - дополнительное соотношение токов в сравнении с MTB испытательных взрывоопасных смесей; I_0 - искробезопасный ток в электрической цепи, установленный в цепи при оценке искробезопасности при нормальных условиях; I - искробезопасный ток в той же электрической цепи, установленный в цепи для ее работы при высоких температурах окружающей среды.