

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

К. О. СОГНЯՆ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ТРЕХФАЗНОГО
 АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ
 НЕСИММЕТРИЧНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТОРМОЗА

Продолжительность испытаний на нагрев трехфазных асинхронных двигателей (АД) мощностью от 0,6 до 100 кВт, которые обычно осуществляются путем непосредственной механической нагрузки на валу, может быть значительно сокращена, если применить режим несимметричного электромагнитного тормоза (НЭТ) двигателя [1]. В этом режиме, после запуска АД на холостом ходу, одна фаза (С) статора отключается от сети и замыкается на добавочное сопротивление $Z_{доб} = R_{доб} + jX_{доб}$, предварительно соединенное с нулевой точкой обмотки статора, а две другие фазы (А и В) остаются включенными в сеть [2, 3]. При производстве или ремонте АД испытание на нагрев в режиме НЭТ, помимо существенного уменьшения стоимости испытаний, позволяет выявить скрытые дефекты АД в межвитковой изоляции обмотки, заливке стержней белячьей клетки ротора, обеспечении заданной величины воздушного зазора и др.

Ниже приводится метод приближенного определения электромагнитных моментов, развиваемых АД при несимметричной схеме включения фаз статора, позволяющий значительно упростить эту задачу по сравнению с классическим методом симметричных составляющих.

В [1] показано, что схема замещения трехфазного АД в режиме НЭТ может быть представлена схемой замещения двух однофазных асинхронных машин — «двигателя АВ» и «двигателя С», имеющих общий ротор и общий магнитопровод статора (рис. 1а). Обмотка W_{AB} «двигателя АВ» состоит из фаз А и В, а обмотка W_C «двигателя С» — из фаз С статора исходного трехфазного АД.

К выводам обмотки W_{AB} приложено напряжение U_{AB} от сети. Напряжение на выводах обмотки W_C является вторичным, оно индуцировано током ротора аналогично напряжению в управляющей обмотке асинхронного тахогенератора [4]. Поэтому электромагнитный момент M_{AB} «двигателя АВ» противоположен электромагнитному моменту M_C «двигателя С».

Непосредственное измерение моментов $M_{длв}$ и $M_{л}$ экспериментальным путем не представляется возможным. Однако наличие указанных моментов в режиме НЭТ АД подтверждается на основании следующих физических представлений и экспериментальных данных. При $U_{1AB} = \text{const}$ и постоянных параметрах АД с уменьшением добавочного сопротивления $Z_{доб}$ увеличиваются скольжение s , ток в фазах АВ и С статора, в роторе и потребляемая из сети активная мощность P_{1AB} .

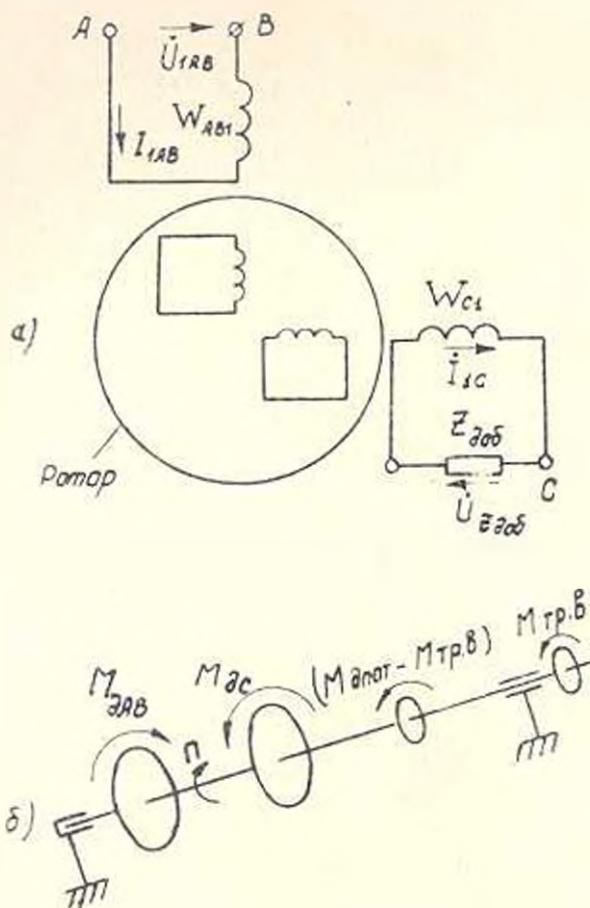


Рис. 1. Схема замещения трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза: а) принципиальная схема; б) схема моментов.

Поскольку в режиме НЭТ механический (внешний) момент на валу АД равен нулю, то увеличение s , P_{1AB} и токов статора и ротора обусловлено наличием в режиме НЭТ тормозных моментов $M_{лс}$ «двигателя С» и $M_{пот}$ от трения, вентиляции, магнитных и электрических потерь и момента $M_{длв}$, уравнивающего $M_{лс}$ и $M_{пот}$. С уменьшением $Z_{доб}$ увеличиваются моменты $M_{лс}$, $M_{пот}$, скольжение s , а следовательно, и момент $M_{длв}$.

Уравнение моментов АД в режиме НЭТ:

$$M_{1AB} - M_{1C} - M_{1\text{пот}} = 0; \quad M_{1AB} = M_{1C} + M_{1\text{тр.в}} \quad (1)$$

или

$$M_{1AB} - M_{1C} - (M_{1\text{пот}} - M_{1\text{тр.в}}) = M_{1\text{тр.в}} \quad (1a)$$

где $M_{1\text{тр.в}}$ — момент трения и вентиляции АД.

Уравнение (1a) показывает, что результирующий момент АД в режиме НЭТ равен моменту трения и вентиляции. На рис. 16 схематически показаны моменты, действующие на валу АД в режиме НЭТ.

В режиме НЭТ скольжение $s = (0,3 \div 0,6) s_n$, где s_n — номинальное скольжение [5]. В этом диапазоне скольжений, как известно, вращающие моменты от обратного поля и высших гармоник оказывают незначительное влияние на результирующий момент однофазного режима трехфазного АД. Задачу определения моментов M_{1AB} и M_{1C} можно значительно упростить, если эти моменты определить приближенно, на основании экспериментальных данных измерений в режиме НЭТ токов и мощностей.

Величины, входящие в (1), можно представить в виде:

$$M_{1AB} = \frac{P_{1AB}}{\omega_1} = \frac{P_{1AB} - P_{\text{м1AB}} - P_{\text{ст1AB}}}{\omega_1}; \quad (2)$$

$$M_{1C} = \frac{P_{2C}}{\omega_1} = \frac{P_{2C} - P_{\text{м2C}} - P_{\text{ст2C}}}{\omega_1} = \frac{P_{Z_{306}} + P_{\text{м1C}} - P_{\text{ст1C}}}{\omega_1}; \quad (3)$$

$$M_{1\text{тр.в}} = \frac{P_{1\text{тр.в}}}{\omega_2}; \quad (4)$$

где

$$P_{1AB} = U_{1AB} \cdot I_{1AB} \cdot \cos \varphi_{AB}; \quad P_{\text{м1AB}} = 2r_1 I_{1AB}^2; \quad P_{\text{м1C}} = r_1 I_{1C}^2; \\ P_{Z_{306}} = I_{1C} U_{Z_{306}} \cdot \cos \varphi_C = I_{1C}^2 (Re[Z_{306}]); \quad (5)$$

$$U_{Z_{306}} = I_{1C} Z_{306}; \quad (6)$$

P_{1AB} , P_{2C} — электромагнитная мощность „двигателя АВ“ и „двигателя С“; $P_{\text{м1AB}}$, $P_{\text{ст1AB}}$, $\cos \varphi_{AB}$ — потери в меди и стали статора и коэффициент мощности „двигателя АВ“; P_{2C} — потребляемая мощность „двигателя С“; $P_{\text{м2C}}$, $P_{\text{ст2C}}$ и $P_{\text{м1C}}$, $P_{\text{ст1C}}$ — потери в меди и стали ротора (первичной цепи) и статора (вторичной цепи) „двигателя С“; $\cos \varphi_C$ — коэффициент мощности вторичной цепи „двигателя С“; $P_{1\text{тр.в}}$ — потери на трение и вентиляцию; $P_{Z_{306}}$, $U_{Z_{306}}$ — потери мощности и падение напряжения на добавочном сопротивлении Z_{306} ; ω_1 , ω_2 — угловая скорость вращения магнитного поля и ротора; r_1 — активное сопротивление одной фазы статора исходного трехфазного АД; I_{1AB} , I_{1C} — ток в фазах АВ и С статора АД в режиме НЭТ.

Электромагнитный момент «двигателя АВ» в долях электромагнитного момента двух фаз трехфазного номинального режима АД равен

$$k_{MAB} = \frac{M_{2AB}}{\frac{2}{3} M_n} = \frac{\frac{P_{1AB2}}{\omega_1}}{\frac{2}{3} \frac{P_{12н}}{\omega_1}} =$$

$$= \frac{P_{1AB} - P_{M1AB} - P_{ст1AB}}{\frac{2}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{M1н} - P_{ст1н} \right)} \approx \frac{P_{1AB} - P_{M1AB}}{\frac{2}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{M1н} \right)} \quad (7)$$

а электромагнитный момент «двигателя С» в долях электромагнитного момента одной фазы трехфазного номинального режима АД:

$$k_{MC} = \frac{M_{2C}}{\frac{1}{3} M_n} = \frac{\frac{P_{2C2}}{\omega_1}}{\frac{1}{3} \frac{P_{12н}}{\omega_1}} =$$

$$= \frac{P_{Z2об} + P_{M1C} + P_{ст1C}}{\frac{1}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{M1н} - P_{ст1н} \right)} \approx \frac{P_{Z2об} + P_{M1C}}{\frac{1}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{M1н} \right)} \quad (8)$$

где $P_{12н} = \frac{P_n}{\gamma_n} - P_{M1н} - P_{ст1н}$ — электромагнитная мощность АД в трехфазном номинальном режиме; M_n , P_n , γ_n , $P_{M1н}$, $P_{ст1н}$ — момент, мощность, к. п. д., потери в меди и стали статора АД в трехфазном номинальном режиме.

Потери $P_{ст1AB}$ и $\frac{2}{3} P_{ст1н}$ примерно одинаковы и по сравнению с $(P_{1AB} - P_{M1AB})$ и $\frac{2}{3} \left(\frac{P_n}{\gamma_n} - P_{M1н} \right)$ составляют незначительную величину (порядка $1-2\%$). Кроме того, $P_{ст1AB}$ находится в числителе, а $\frac{2}{3} P_{ст1н}$ — в знаменателе выражения (7). Поэтому для упрощения расчетов в (7) принимается $P_{ст1AB} \approx \frac{2}{3} P_{ст1н} \approx 0$. Аналогично, в (8) принимается $P_{ст1C} \approx \frac{1}{3} P_{ст1н} \approx 0$.

В таблице приводятся значения кратностей электромагнитных моментов «двигателя АВ» k_{MAB} и «двигателя С» k_{MC} для ряда АД в диапазоне мощности от 2,2 до 10 кВт, с числом полюсов $2p = 2 \div 8$. Величины k_{MAB} и k_{MC} рассчитаны по формулам:

Таблица

Зависимость электромагнитных моментов асинхронных двигателей
в режиме несимметричного электромагнитного тормоза

Двигатель	Добавочное сопротивление, Ом		Кратность тока статора	Потребляемая мощность, Вт	Кратность момента двигателя АД	Кратность момента двигателя С	Отношение моментов
	$R_{доб}$	$X_{доб}$					
МТ012-6	3	—	1,73	4040	1,317	1,201	1,097
2,2 кВт,	4,58	—	1,58	3410	1,241	1,251	0,992
7,5 А	—	3,4	1,71	2180	1,1	0,413	2,663
	—	4,7	1,58	2690	0,944	0,378	2,497
МТ111-6	3,76	—	1,595	4480	1,172	1,114	1,052
3,5 кВт,	6	—	1,381	3800	1,021	1,01	1,01
10,5 А	—	3,94	1,56	3360	0,887	0,373	2,377
	—	5,5	1,376	2850	0,712	0,316	2,253
АО-32-6	6,9	—	1,616	2020	0,970	0,906	1,07
2,2 кВт,	9,2	—	1,432	1780	0,879	0,879	1
5,4 А	—	4,2	1,8	1710	0,81	0,363	2,235
	—	5,7	1,607	1480	0,68	0,328	2,085
АО2-41-6	6,45	—	1,754	3250	1,192	1,186	1,005
3 кВт,	11,7	—	1,44	2620	0,934	1,062	0,88
7,2 А	—	3	1,979	2625	0,86	0,337	2,55
	—	5,25	1,72	2100	0,674	0,279	2,265
4А112М4-У3	7,04	—	1,402	4350	0,953	1,199	0,794
5,5 кВт,	8,55	—	1,233	3780	0,839	1,089	0,77
12 А	—	6,26	1,44	2550	0,487	0,224	2,179
	—	8,27	1,27	2070	0,395	0,185	2,134
АО2-51-4	7,4	—	1,29	4700	0,847	0,972	0,87
7,5 кВт,	8,25	—	1,175	4350	0,76	0,906	0,841
15 А	—	5,4	1,466	2700	0,354	0,142	2,485
	—	8,25	1,113	1925	0,298	0,127	2,34
АО2-52-4	4,3	—	1,36	6930	0,864	1,087	0,813
10 кВт,	6,1	—	1,15	5400	0,721	0,891	0,81
20 А	—	3,87	1,3	3000	0,367	0,149	2,463
	—	4,55	1,22	2775	0,329	0,141	2,33
АО2-32-2	14	—	1,237	2840	0,935	1,105	0,845
4 кВт,	15,7	—	1,15	2460	0,817	0,98	0,833
8 А	—	13,9	1,225	1200	0,344	0,177	0,944
	—	16	1,12	960	0,272	0,141	1,93
4А80В2-У3	11,5	—	1,808	2280	1,169	1,342	0,871
2,2 кВт,	14,9	—	1,537	1920	0,984	1,22	0,806
4,7 А	—	11,9	1,808	1480	0,676	0,34	1,988
	—	18,3	1,468	1040	0,478	0,25	1,911

$$k_{\text{ЛВ}} \approx \frac{P_{\text{ЛВ}} - P_{\text{МЛВ}}}{\frac{2}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}} - P_{\text{Мн}} \right)}, \quad k_{\text{МС}} \approx \frac{P_{\text{Z}_{\text{доб}}} + P_{\text{МС}}}{\frac{1}{3} \left(\frac{P_{\text{н}}}{\tau_{\text{н}}} - P_{\text{Мн}} \right)}$$

на основании экспериментальных данных измерений мощностей, токов и напряжений в режиме НЭТ. При испытании в режиме НЭТ кратности тока статора $k_{\text{ЛВ}} = \frac{I_{\text{ЛВ}} + I_{\text{С}}}{2I_{\text{н}}}$, $I_{\text{ЛВ}} \approx I_{\text{С}}$, где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток статора.

Экспериментальные данные получены при номинальном напряжении 380 В на фазах АВ статора. Потери $P_{\text{Z}_{\text{доб}}}$ в добавочном сопротивлении $Z_{\text{доб}}$ определены ваттметром, т. е. в расчетах учтены потери активной мощности в сопротивлении катушек индуктивности. Температура обмоток 25–30°C.

Электромагнитный момент $M_{\text{ЛВ}}$ («двигатель АВ») аналогичен электромагнитному моменту обычного однофазного режима трехфазного АД с механической нагрузкой на валу, когда к двум (А, В) фазам статора от сети приложено напряжение $U_{\text{ЛВ}}$. Асинхронная машина «двигатель С» работает в режиме электромагнитного тормоза, так как направление электромагнитного момента $M_{\text{С}}$ противоположно направлению вращения ротора АД в режиме НЭТ.

Так как в режиме НЭТ одновременно действуют моменты $M_{\text{ЛВ}}$ и $M_{\text{С}}$, а ротор вращается со скольжением s , то зубцовая зона и обмотка статора подвергаются воздействию тангенциальных сил неизменного направления, в то время как зубцовая зона и обмотка ротора подвергаются воздействию знакопеременных тангенциальных сил.

В режиме НЭТ появляются пульсирующие моменты (среднее значение которых равно нулю), обусловленные влиянием обратного поля и высших гармоник, как и в обычном однофазном режиме трехфазного АД, причем, пульсирующие моменты увеличиваются с увеличением кратности тока $k_{\text{ЛВ}}$ в статоре и зависят от конструктивных особенностей АД.

Наличие пульсирующих моментов и знакопеременных сил в режиме НЭТ вызывает дополнительную вибрацию зубцов, что оказывает дополнительное механическое действие на проводники и изоляцию обмоток. Поэтому в режиме НЭТ условия испытания на нагрев АД более жесткие по сравнению с испытанием на нагрев механической нагрузкой, что способствует выявлению скрытых дефектов в обмотках АД.

Выводы

1. Трехфазный АД в режиме несимметричного электромагнитного тормоза, при вращающемся роторе без механической нагрузки на валу, развивает противоположные по знаку средние электромагнитные моменты $M_{\text{ЛВ}}$ и $M_{\text{С}}$.

2. В этом режиме можно, выбрав соответствующее добавочное активное сопротивление $R_{доб}$ в цепи фазы статора, получить режим испытания, при котором среднее значение электромагнитного момента, развиваемого каждой обмоткой фазы в несимметричном режиме, по абсолютной величине близко к электромагнитному моменту, развиваемому обмоткой фазы при трехфазном номинальном режиме.

3. С точки зрения электромагнитного момента, форсированное испытание на нагрев АД в режиме несимметричного электромагнитного тормоза целесообразно производить при $R_{доб}$ током статора, превышающим номинальный в $1,2 \div 1,5$ раза. При этом выдержка времени испытания (порядка 2—10 мин) определяется по методике, приведенной в [2, 3].

ПО «Арм.электромаш»

Поступило 17.X.1979

Կ. Ն. ՍՈՂԻՅԱՆ

ՆՌԱՅԱԶ ԱՍԻՄԵՐՈՆ ՇԱՐՔԻՉԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ՄՈՐԵՆՆՏԸ ԱՆՀԱՄԱՉԱՓ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԻՍԱԿԱՆ ԱՐԿԵԼԱԿՐԱՆ ՌԵՃԻՄՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ս մ

Ցույց է տրված, որ եռաֆազ ասինխրոն շարժիչի փորձարկումը անհամաչափ էլեկտրամագնիսական արգելակման ռեժիմում, երբ շարժիչը պարալլել թեթացքում թողարկվելուց հետո ստատորի մի ֆազը անջատվում է ցանցից և փակվում յրադուցիչ դիմադրությամբ, որի մի ծայրը նախապես միացված է ստատորի դրուչական կետում, առանց լիսեռի միխանիկական բեռնավորման, հնարավորություն է տալիս նմանեցնել միխանիկական բեռնավորումով փորձարկմանը՝ ֆազերի միջոցով զարգացվող էլեկտրամագնիսական մոմենտի բացարձակ մեծությամբ: Հայտնաբերվել է և փորձարկման մի քանի առանձնահատկություններ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Соликан К. О. Сравнительный анализ испытания на нагрев трехфазного асинхронного двигателя непосредственной нагрузкой и в режиме несимметричного электромагнитного тормоза. «Изв. вузов. Электромеханика», 1977, № 3, с. 271—274.
2. Соликан К. О., Оганян Р. В. Способ испытания на нагрев асинхронных двигателей. Авт. св. СССР Бюлл. № 629605, 1978, № 39, с. 175.
3. Оганян Р. В., Соликан К. О. Метод ускоренного определения перегрева обмоток трехфазных асинхронных двигателей. «Изв. вузов. Электромеханика», 1975, № 1, с. 31—36.
4. Оганян Р. В., Соликан К. О. Уменьшение тока статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза. «Изв. вузов. Электромеханика», 1974, № 7, с. 743—746.
5. Оганян Р. В., Соликан К. О. Уменьшение ранжества токов в фазах статора трехфазного асинхронного двигателя в режиме несимметричного электромагнитного тормоза. «Изв. вузов. Электромеханика», 1974, № 9, с. 977—983.