

Лебедев Г.Г.¹, Сарваров А.С.², Вечеркин М.В.², Петушков М.Ю.², Косматов В.И.²

¹ ООО «Челябинский тракторный завод – УРАЛТРАК»

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время в связи с устойчивой тенденцией применения АД практически во всех отраслях промышленности часто возникает необходимость в определении параметров двигателя, которых нет в среде справочных данных. Требуются знания параметров АД в различных режимах работы: холостой ход, номинальный режим, произвольный нагрузочный режим, пусковой режим. Их расчет базируется на схемах замещения, точность расчета параметров которых во многом зависит от точности расчета тока и потерь холостого хода. В данной статье рассмотрен ряд известных в теории и практике электрических машин методик расчета тока и потерь холостого хода. Проведено обоснование возможности расчета тока холостого хода на основе баланса реактивной мощности АД для номинального режима по паспортным данным двигателя. Получено рациональное выражение для расчета тока холостого хода. Рассмотрены методы расчета тока холостого хода и данные, приведенные в справочной литературе, исследованы применительно к двум типам АД из группы мощности до 100 кВт и мощностью 1000 кВт. В рамках исследования проведены расчеты тока холостого хода по паспортным данным рассмотренных двигателей и дана оценка полученных результатов. Установлено, что выражение для расчета тока холостого хода, полученное из условия баланса реактивной мощности в номинальном режиме, дает наиболее близкие значения к результатам расчета с использованием базового метода, основанного на данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, параметры, энергетическая диаграмма, номинальный режим, частичная нагрузка, ток холостого хода, методы расчета, расчетные графики, кривые энергетических показателей, табличные данные, баланс реактивной мощности, сопоставление результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Преобладающее применение асинхронных двигателей (АД) практически во всех отраслях промышленности стало неоспоримым фактом. К известным достоинствам АД добавились преимущества, обусловленные применением современных полупроводниковых устройств.

Доля асинхронных электроприводов в 1995 году составляла 75%, а в 2002 году – 85% [1]. На крупнейшем металлургическом предприятии ПАО «ММК» доля электроприводов переменного тока в 2012 году составила 82% [2].

По экспертным оценкам в Российской Федерации число асинхронных двигателей составляет 230–270 млн единиц [3]. На долю трехфазных АД напряжением 380 В приходится около 50 млн единиц. Ежегодный выход асинхронных электродвигателей из строя составляет не менее 10–12% [4] и по информации из других источников может достигать 20–25%. Особенно высока доля выхода АД в сельском хозяйстве, где квалификация электротехнического персонала недостаточно высокая.

Обеспечение надежной эксплуатации электроприводов с асинхронными двигателями, особенно тех, которые прошли многократные ремонты, требует знания параметров в различных режимах работы: холостой ход, номинальный режим, произвольный нагрузочный режим, пусковой режим. Для исследования эксплуатационных режимов АД используются рабочие и механические характеристики, которые определяются экспериментально или рассчитываются на основе схемы замещения. При этом из существующего разнообразия схем замещения АД предпочтение отдается Т-образной схеме.

При отсутствии данных каталога или отклонениях

некоторых из них от паспортных параметры АД могут определяться без проведения полных испытаний на основе аналитических или графоаналитических методов расчета с использованием табличных данных, кривых и коэффициентов, полученных на основе обобщения огромного опыта эксплуатации АД [5–8].

Иногда выдаваемая заводом-изготовителем информация о параметрах АД недостаточна и требует проведения дополнительных исследований. В таких случаях стоимость испытаний АД увеличивается на 10–15% [9]. Действительно, проведение полных испытаний, регламентированных для асинхронных двигателей в ГОСТ 7217-87, является весьма затратным мероприятием с привлечением специализированных организаций с соответствующими лицензиями. Достаточно громоздкими являются также исследования АД в опыте холостого хода [10], где предложено использовать нелинейность кривой намагничивания для расчета параметров схемы замещения. В [11] приведена методика с использованием относительных единиц, что несколько усложняет процедуру расчетов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время существует большое многообразие подходов к определению параметров Т-образной схемы замещения АД и каждый из них дает приближенные значения параметров, точность которых не всегда определена. Для снижения погрешности при определении параметров схемы замещения следует использовать точное значение I_0 . В этой связи в данной статье ставится задача проанализировать известные методы расчета тока холостого хода и на этой основе обосновать наиболее рациональный подход к его определению без проведения специальных опытов.

Величина этого тока является не только одним из базовых параметров для расчета параметров Т-образной схемы замещения, но и одним из главных диагностических признаков технического состояния АД.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагается определить ток холостого хода различными методами для двигателей из разных групп мощностей:

- до 100 кВт с напряжением 0,38 кВ (это двигатели массового применения);
- для мощных двигателей (обычно это высоковольтные двигатели).

Типы и паспортные данные электродвигателей, выбранных для исследования, приведены в табл. 1.

Таблица 1
Паспортные данные АД

Двигатель 4А225М4УЗ	Двигатель А4-450У4ВУЗ
$P_{2н}=55$ кВт	$P_{2н}=1000$ кВт
$n_1=1500$ об/мин	$n_1=1500$ об/мин
$U_{1н}=0,38$ кВт; $S_n=0,02$	$U_{1н}=6$ кВт; $S_n=0,012$
$\eta_n=0,925$; $\cos\varphi_n=0,9$	$\eta_n=0,955$; $\cos\varphi_n=0,89$
$I_n / I_n=7$	$I_{1н}=113$ А
$M_n / M_n=1,2$	$I_n / I_n=5,7$
$M_k / M_n=2,2$	$M_k / M_n=2,1$

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА

1. Метод на основе энергетической диаграммы, паспортных данных и расчетного графика $m=f(\cos\varphi_{1н})$.

В теории электрических машин традиционно сложился подход, основанный на применении энергетической диаграммы. Энергетическая диаграмма АД (рис. 1) дает наглядную картину преобразования и распределения потока потребляемой из сети электрической энергии P_1 .

Суммарные потери в двигателе в номинальном режиме согласно диаграмме представляются выражением

$$P_{\Sigma\text{дв(н)}} = p_{\text{эл1}} + P_M + p_{\text{эл2}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{доб}} \quad (1)$$

По паспортным данным суммарные потери в номинальном режиме определяются с учетом номинального значения КПД:

$$P_{\Sigma\text{дв(н)}} = P_{2н} \left(\frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right) \quad (2)$$

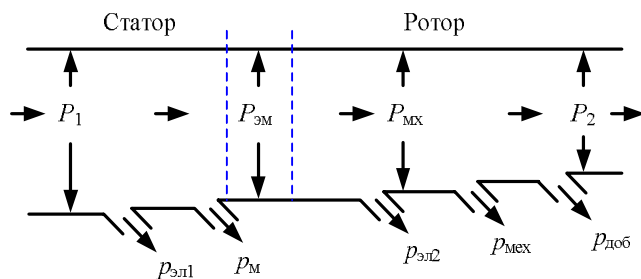


Рис. 1. Энергетическая диаграмма АД: P_1 – активная мощность, потребляемая из сети; $P_{эм}$ – мощность, передаваемая от статора к ротору; $P_{мх}$ – полная механическая мощность; P_2 – механическая мощность на валу двигателя; $p_{эл1}$ – электрические потери в обмотке статора; p_m – потери в сердечнике статора (магнитные потери); $p_{эл2}$ – электрические потери в обмотке ротора; $p_{мех}$ – механические потери; $p_{доб}$ – добавочные потери (принимаются равными $0,005P_{2н}$)

Активные потери холостого хода (мощность холостого хода)

$$P_0 = p_{\text{эл(0)}} + p_m + p_{\text{доб}} \quad (3)$$

Эта мощность составляет определенную долю от суммарных потерь мощности в двигателе [5, 12]:

$$P_0 = 0,4P_{\Sigma\text{дв(н)}} \quad (4)$$

Соотношение (4) получено исходя из того, что для АД основного применения наибольший КПД достигается при нагрузке на 15-20% меньше номинальной [12].

Для АД более ранних серий или в тех случаях, когда характер изменения КПД по каталогу трудно выявить, приближенное значение определяется по данным табл. 2.

Величина реактивной мощности холостого хода может быть рассчитана по выражению [7]

$$Q_0 = P_{2н} \frac{m}{\eta_n} \quad (5)$$

где m – расчетный параметр.

Величина m устанавливает связь между активной составляющей номинального тока статора АД и током холостого хода:

$$m = \frac{I_0}{I_{1н} \cos\varphi_{1н}} \quad (6)$$

Так как величина I_0 в каталожных данных не задается, то предложено пользоваться расчетным графиком $m=f(\cos\varphi_{1н})$, приведенным на рис. 2.

Пользуясь расчетным графиком, по паспортному значению $\cos\varphi_{1н}$ предварительно определяется параметр m , по величине которого на основе (5) и (6) рассчитываются Q_0 и I_0 .

Таблица 2
Определение соотношения $P_0/P_{1н}$

Параметр	Мощность двигателя $P_{2н}$, кВт								
	1,1	2,2	5,5	11	22	37	55	110	220
η_n	0,75	0,8	0,83	0,86	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93
$P_{1н}$	1,5	2,75	6,6	12,8	24,7	41	60,4	119,5	215
$P_0 / P_{1н}$	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,045	0,04	0,035	0,03

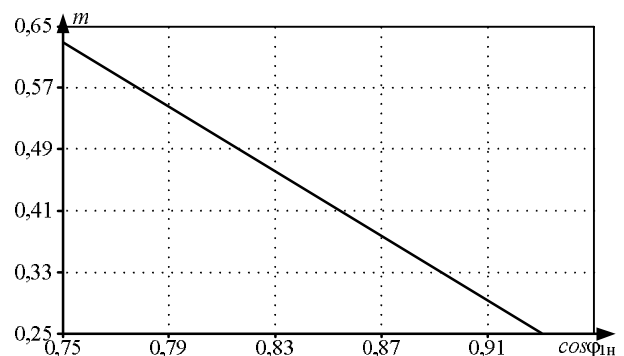


Рис. 2. Расчетный график $m=f(\cos\varphi_{1н})$

2. Метод на основе данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигателях (безитерационная методика).

Заслуживает внимания безитерационная методика определения параметров схемы замещения АД на основе данных каталога для номинального режима (100%) и их величин при частичных нагрузках на двигателях (25 и 50%) [9]. В работе [9] приводится формула для расчета тока холостого хода со ссылкой на [12]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p^*}^2 - \left[I_{1n} p^* (1 - s_n) / (1 - p^* s_n) \right]^2}{1 - \left[p^* (1 - s_n) / (1 - p^* s_n) \right]^2}}, \quad (7)$$

где I_{1n} , I_{1p^*} – номинальный ток двигателя и ток при частичной нагрузке; p^* – относительная величина загрузки двигателя по мощности; s_n – номинальное скольжение.

Следует отметить, что данная формула дает по крайней мере меньшую погрешность [9]. В других работах также приводятся результаты использования расчетной формулы для тока холостого хода АД.

Номинальный ток трехфазного АД рассчитывается по известной в теории электрических машин формуле

$$I_{1n} = \frac{P_{2n}}{3U_{1n}\eta_n \cos \varphi_n}. \quad (8)$$

Определенные сложности возникают при определении I_{1p^*} – тока при частичной нагрузке двигателя по мощности. Её величина в общем виде может определяться по формуле

$$I_{1p^*} = \frac{P_{2p^*}}{3U_{1n}\eta_{p^*} \cos \varphi_{p^*}}, \quad (9)$$

где величины η_{p^*} и $\cos \varphi_{p^*}$ – текущие значения КПД и коэффициент мощности, например, при частичной нагрузке $p^* = 0,25$ или других её значениях.

Примеры расчетов, проведенные по этой формуле, показали возможность её применения в случаях, когда известно значение тока двигателя I_{1p^*} в режиме частичной загрузки p^* , например, при нагрузках 25, 50% или при другой произвольной нагрузке. Однако границы произвольной загрузки, дающие наиболее точные результаты в этой методике, не исследованы. По этой причине специально проведены расчеты, результаты которых для выбранных двигателей приведены в табл. 3.

Расчеты проводились с использованием данных табл. 4, где приведены в относительных единицах значения тока статора АД для относительных значений мощности двигателя при частичной нагрузке.

Таблица 3

Результаты расчетов

Для двигателя 4A225M4Y3 мощностью $P_{2n} = 55$ кВт					
p^*	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
I_0 , А	28,33	28,29	27,8	25,0	21,7
Для двигателя А4450У4ВУ3 мощностью $P_{2n} = 1000$ кВт					
p^*	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
I_0 , А	32,23	31,6	30,95	27,3	23,78

Таблица 4

Данные для определения частичной загрузки по мощности по значениям тока АД

$\kappa_3 = P_2/P_{2n}$	I_1/I_{1n} при $\cos \varphi_{1n}$							
	0,92	0,89	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,69
0	0,2	0,25	0,32	0,37	0,44	0,48	0,54	0,58
0,1	0,24	0,29	0,34	0,39	0,45	0,49	0,55	0,59
0,2	0,3	0,34	0,38	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62
0,3	0,35	0,4	0,43	0,47	0,51	0,55	0,59	0,65
0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,56	0,59	0,64	0,69
0,5	0,5	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,68	0,72
0,6	0,59	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,74	0,77
0,7	0,69	0,7	0,72	0,74	0,75	0,77	0,79	0,82
0,8	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88
0,9	0,87	0,88	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Из полученных результатов следует, что наиболее близкими по своим значениям являются токи холостого хода при частичных нагрузках менее $0,4p^*$. При значениях $p^* \geq 0,5$ происходит заметное снижение расчетных значений тока холостого хода, что позволило уточнить условия использования данного метода.

Для определения частичной загрузки двигателя по мощности можно воспользоваться специальными кривыми, приведенными на рис. 3.

При отсутствии кривых (см. рис. 3) можно воспользоваться данными табл. 4. Кроме этого, в каталогах [13] часто приводятся энергетические показатели при нагрузках АД, равных 25, 75, 50 и 125% от номинальной (рис. 4).

При этом для заданного коэффициента загрузки двигателя по мощности определяется фактическое значение мощности P_{2p^*} , а с использованием кривых энергетических показателей определяют текущие значения КПД η_{p^*} и $\cos \varphi_{p^*}$.

В дальнейшем по формуле (9) рассчитывается ток, потребляемый из сети при частичной нагрузке, что позволяет на основе (7) найти величину тока холостого хода I_0 .

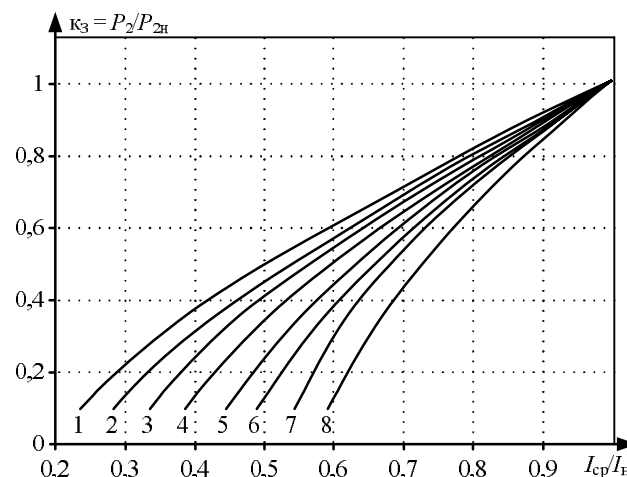


Рис. 3. Кривые для определения частичной загрузки двигателя по мощности в зависимости от относительного значения тока статора АД при различных значениях $\cos \varphi_{1n}$: 1 - 0,92; 2 - 0,89; 3 - 0,86; 4 - 0,83; 5 - 0,79; 6 - 0,76; 7 - 0,73; 8 - 0,69

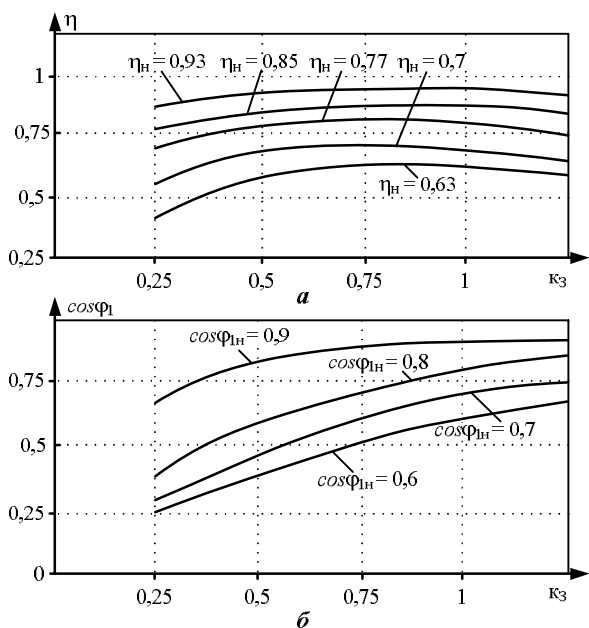


Рис. 4. Кривые энергетических показателей АД

3. Упрощенное выражение с учетом кратности пускового момента.

Номинальное значение намагничивающего тока [14] без учета потерь в стали и пренебрежении активным сопротивлением статора рассчитывается по формуле

$$I_0 \approx I_{1н} \frac{\sin \varphi_{н} - \cos \varphi_{н}}{k_M + \sqrt{k_M^2 - 1}}, \quad (10)$$

где k_M – кратность максимального момента.

В дальнейшем данное выражение можно представить в виде

$$I_0 \approx I_{1н} \left(\sin \varphi_{н} - \frac{S_{н}}{S_{кр}} \cos \varphi_{н} \right). \quad (11)$$

4. Метод с использованием таблиц из справочников.

При отсутствии паспорта и данных каталога для расчета параметров могут быть использованы таблицы, кривые и коэффициенты [5, 15]. Так, например, средние значения величин I_0 в долях от номинального тока для двигателей общего назначения [5] представляются в виде данных, приведенных в табл. 5.

В ряде случаев, особенно для контроля качества ремонтов, необходимо знать примерные средние и допустимые значения токов холостого хода. Ниже в табл. 6 они приведены в относительных единицах в зависимости от номинального коэффициента мощности.

Таблица 5
Средние значения тока холостого хода АД в долях от номинального тока

$P_{2н}$, кВт	Синхронная скорость вращения n_1 , об/мин					
	3000	1500	1000	750	600	500
0,1-0,5	0,55	0,7	0,8	0,9	0,95	-
0,51-1	0,4	0,55	0,6	0,65	0,85	0,9
1,1-5	0,35	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
5,1-10	0,25	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
10,1-25	0,2	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
25,1-50	0,18	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
50,1-100	-	0,3	0,33	0,35	0,4	0,45
>100	-	0,25	0,3	0,33	0,35	0,4

Таблица 6

Значения $I_{0ср}/I_{1н}$ и $I_{0доп}/I_{1н}$ в зависимости от номинального коэффициента мощности $\cos \varphi_{н}$

$\cos \varphi_{н}$	0,69	0,73	0,76	0,79	0,83	0,86	0,89	0,92	0,95
$I_{0ср}/I_{1н}$	0,56	0,53	0,48	0,43	0,38	0,32	0,26	0,23	0,18
$I_{0доп}/I_{1н}$	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2

5. Метод с использованием полиномов 2-го порядка.

Для снижения погрешности при определении параметров схемы замещения в [16] предложено определять точное значение I_0 с использованием полиномов второго порядка для различных групп мощностей АД

$$\begin{cases} I_0 = -1,161 \cdot 10^{-8} P_{н}^2 + 0,001194 P_{н} - 8,85 \\ \text{при } 30 \text{ кВт} \leq P_{н} \leq 45 \text{ кВт;} \\ I_0 = -1,459 \cdot 10^{-8} P_{н}^2 + 0,002663 P_{н} - 80,70 \\ \text{при } 55 \text{ кВт} \leq P_{н} \leq 90 \text{ кВт;} \\ I_0 = -6,688 \cdot 10^{-10} P_{н}^2 + 0,000426 P_{н} - 3,37 \\ \text{при } 110 \text{ кВт} \leq P_{н} \leq 315 \text{ кВт.} \end{cases}$$

Данный метод разработан для ограниченного диапазона мощности – для двигателей средней мощности.

6. Метод на основе баланса реактивной мощности в номинальном режиме.

Уравнение баланса реактивной мощности АД можно представить выражением

$$Q_{н} = \sqrt{3} \cdot U_{1н} I_{1н} \sin \varphi_{н} = 3I_{1н}^2 x_k + 3I_0^2 (x_1 + x_0), \quad (12)$$

или в общем виде

$$Q_{н} = Q_k + Q_0, \quad (13)$$

где x_k , x_1 и x_0 – соответственно индуктивное сопротивление короткого замыкания АД, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и индуктивное сопротивление намагничивания.

Относительное значение индуктивного сопротивления короткого замыкания X_k примерно равно обратной величине от кратности пускового тока $k_i = I_{п} / I_{н}$ [11], т.е. можно записать $X_k = 1 / k_i$. При этом базовая величина сопротивления $R_0 = U_{1нф} / I_{1нф}$.

Таким образом, индуктивное сопротивление короткого замыкания определится по выражению

$$x_k \approx \frac{1}{k_i} \cdot \frac{U_{1нф}}{I_{1нф}}, \quad (14)$$

а величина реактивной мощности короткого замыкания

$$Q_k \approx 3I_{1н}^2 x_k = 3I_{1нф}^2 \frac{1}{k_i} \cdot \frac{U_{1нф}}{I_{1нф}}. \quad (15)$$

После преобразований получено

$$Q_k = \frac{S_{1н}}{k_i}. \quad (16)$$

Выражение для тока холостого хода примет вид

$$I_0 = \frac{\sqrt{3}U_{1н} I_{1н} \sin \varphi_{1н} - \sqrt{3}U_{1н} I_{1н} / k_i}{\sqrt{3}U_{1н}} \quad (17)$$

В итоге получим выражение для расчета тока холостого хода по паспортным данным двигателя:

$$I_0 \approx I_{1н} \left(\sin \varphi_{1н} - \frac{1}{k_i} \right) \quad (18)$$

Данное выражение является наиболее простым из известных, например сравним с формулой (10).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Величины тока холостого хода I_0 , определенные различными рассмотренными методами, сведены в **табл. 7**.

Для сравнительной оценки результатов необходимо осуществить обоснованный выбор базового метода определения тока холостого хода, который является, по мнению многих специалистов, наиболее точным. Анализируя существующие публикации по данной тематике, можно отметить, что **метод, основанный на использовании данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели**, нашел наиболее широкое применение. Весомым аргументом в пользу данного метода является его применение в учебном процессе [17]. Результаты, полученные по данному методу, предлагается принять в качестве базового для оценки точности других рассмотренных в данной работе методов.

Таблица 7

Значения тока холостого хода асинхронных двигателей из различных групп мощностей с использованием различных методов

Наименование метода	Значение тока I_0 , А	
	55 кВт	1000 кВт
1. На основе энергетической диаграммы, паспортных данных и расчетного графика $m=f(\cos \varphi_{1н})$	28,5	34,2
2. На основе данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели (при $p^* = 0,3$)	228,3	331,6
3. Упрощенное выражение с учетом кратности пускового момента $I_0 \approx I_{1н} \frac{\sin \varphi_{1н} - \cos \varphi_{1н}}{k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}}$	222,0	226,1
4. С использованием таблиц (коэффициентов) из справочников: - по табл. 5 - по табл. 6.	330,1 226,1-330,1	228,3 227,2-330,1
5. С использованием полиномов 2-го порядка	221,7	-
6. На основе баланса реактивной мощности в номинальном режиме	229,4	331,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате определения тока холостого хода с использованием рассмотренных методов определения тока холостого хода для АД из разных групп мощности (средней мощности и мощных двигателей) и анализа результатов следует:

1. Метод определения тока холостого хода АД в номинальном режиме, основанный на использовании данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели целесообразно принять в качестве базового, как наиболее точный, по экспертным оценкам специалистов.

2. Базовый метод определения тока холостого хода при использовании табличных данных для определения загрузки по мощности по значениям тока АД дает достаточно близкие своим значениям тока холостого хода при частичных нагрузках менее $0,4p^*$. Расчеты при значениях $p^* \geq 0,5$ показали заметное снижение значений тока холостого хода. Таким образом, на основе проведенных расчетов уточнены условия использования данного метода.

3. Упрощенное выражение с учетом кратности пускового момента (п. 3 в табл. 7) дает наибольшую погрешность свыше 15%, что не позволяет использовать данный метод для расчета параметров схемы замещения АД.

4. Результаты, полученные с использованием таблиц (коэффициентов из справочников), дают достаточно близкие результаты для предварительного определения тока холостого хода, однако не во всех справочниках они приводятся.

5. Наиболее близкие к базовому методу получены значения тока холостого хода по методу на основе баланса мощности для номинального режима. Получено наиболее простое выражение из известных, в котором из паспортных данных использованы $\cos \varphi_{1н}$ и кратность пускового тока k_i . Погрешность для АД из группы средней мощности составила менее 4%, а для АД из группы мощных двигателей результаты практически совпали, что позволяет данный метод использовать в тех случаях когда, нет возможности воспользоваться базовым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И.Я. Браславского. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
- Головин В.В., Разворотнев В.П., Юдин А.Ю. Масштабное внедрение частотно-регулируемых электроприводов в ОАО «ММК» // Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иванов, 2012. С. 448-453.
- Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Энергосберегающие асинхронные двигатели с компенсацией реактивной мощности // Известия академии наук. Энергетика. 2013. №5. С. 30-45.
- Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E., Thakur M., Midence R. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection // Conf. Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Jacksonville, FL, USA, 20-23 June, 2005, pp. 11-28. Doi:10.1109/PAPCON.2005.1502046.

5. Гейлер Л.Б. Справочник электрика промышленных предприятий. Минск: Беларусь, 1963. 588 с.
6. Лебедев Г.Г. Определение параметров асинхронного двигателя напряжением до 1000 В при отсутствии паспорта // Промышленная энергетика. 1981. №2. С. 15-16.
7. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. М.: Госэнергоиздат, 1963.
8. Электротехнический справочник. Т.3, кн.2 / гл. редактор И.Н. Орлов. 6 изд. М.: Энергоиздат, 1982, 560 с.
9. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кириякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. №4. С. 38-42.
10. Шеремет А.И., Шевченко Г.С. Определение параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя на основе опыта холостого хода // Научный Вестник ДГМА. 2017. №3. С. 104-108.
11. Донской Н.В. Определение параметров асинхронных двигателей по паспортным данным и пусковым характеристикам // Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 196-201.
12. Регулируемые асинхронные двигатели в сельскохозяйственном производстве / под ред. Д.Н. Быстрицкого. М.: Энергия, 1975. 399 с.
13. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик и др. М.: Энергоатомиздат, 1982.
14. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: ГЭИ, 1969. 527 с.
15. Справочник по электрическим машинам / под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456с.
16. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки ТГУ. 2013. №1(23). С. 108-112.
17. Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С. Электрический привод: учеб.-метод. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 157 с.

Поступила в редакцию 24 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION OF IDLING CURRENT OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

Gennady G. Lebedev

Engineer, LLC Chelyabinsk Tractor Plant - URALTRAC, Chelyabinsk, Russia.

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anvar@magtu.ru.

Maksim V. Vecherkin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vecherkin@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>.

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electronics and Microelectronics Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: petushkov_m@mail.ru.

Valeriy I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Now in connection with a steady trend of application of asynchronous motors practically in all industries, there is frequently a necessity for calculation of parameters of the motor, which are not present in the reference data. Knowledge of the following asynchronous motor parameters in various operating modes is required: idling mode, nominal mode, arbitrary load mode, starting mode. Their calculation is based on substitution schemes, the accuracy of which depends largely on the accuracy of the calculation of current and no-load losses. In this article, a number of well-known theoretical and practical methods for calculating current and no-load losses of idling speed are considered. The substantiation of a possibility of no-load current calculation is carried out on the basis of reactive power balance of an asynchronous motor for nominal mode according to motor passport data. The rational expression for no-load current calculation is obtained. The considered methods of no-load current calculation and the data given in the reference literature are investigated with reference to two types of boosters from the power group up to 100 kW and power 1000 kW. Within the framework of the research, idle current calculations were carried

out on the basis of passport data of the considered motors and the evaluation of the obtained results was given. It is established that the expression for no-load current calculation obtained from the condition of reactive power balance in the nominal mode gives the closest values to the results of calculation using the basic method based on the data for the nominal mode and their values at partial loads on the engines.

Keywords: asynchronous motor, parameters, energy diagram, nominal mode, partial load, idle current, calculation methods, calculation graphs, energy curves, tabular data, reactive power balance, comparison of results.

REFERENCES

1. Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyi elektropriwod* [Energy saving asynchronous electric drive]. Under the editorship of I. Ya. Braslavskiy. Moscow, Academia, 2004. 256 p. (In Russian)
2. Golovin, V.V., Razvorotnev, V.P., Yudin A.Yu. Large-scale introduction of the variable frequency electric drives in JSC "MMK". *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy)*

- nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu: FGBOU VPO «Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina»* [Proceedings of VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on the automated electric drive: FSBEI HPE "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin"], Ivanovo, 2012, pp. 448-453. (In Russian)
3. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Energy saving induction motors with the reactive power compensation. *Izvestia akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Academy of sciences. Power engineering], 2013, no. 5, pp. 30-45. (In Russian)
 4. Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E., Thakur M., Midence R. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection // Conf. Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Jacksonville, FL, USA, 20-23 June 2005. Pp. 11–28. Doi:10.1109/PAPCON.2005.1502046.
 5. Gailer L.B. *Spravochnik elektriки promyshlennykh predpriyatiy* [Handbook of Industrial Enterprises Electricians], Minsk, Belarus, 1963, 588 p. (In Russian)
 6. Lebedev G.G. Determination of asynchronous motor parameters with voltage up to 1000 V in the absence of passport. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 1981, pp.15-16. (In Russian)
 7. Litvak L.V. *Ratsionalnaya kompensatsiya reaktivnykh nagruzok na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Rational compensation of reactive loads at the industrial enterprises], Moscow, Gosenergoizdat, 1963. (In Russian)
 8. *Elektrotekhnicheskiy spravochnik* [Electrical Engineering Handbook], vol. 3, book 2, Editor-in-Chief I.N. Orlov, 6 ed., Moscow, Energoizdat, 1982, 560 p. (In Russian)
 9. Moshchinskiy Yu.A., Bespalov V.Ya., Kiryakin A.A. Definition of parameters of the asynchronous machine replacement scheme by the catalogue data. *Elektrichestvo* [Electricity], 1998, no. 4, pp. 38-42. (In Russian)
 10. Sheremet A.I., Shevchenko G.S. Definition of parameters of the T-shaped scheme of asynchronous motor replacement on the basis of idling experience. *Nauchnyi Vestnik DGMA* [Scientific bulletin of DGMA], 2017, no. 23, pp. 104-108. (In Russian)
 11. Donskoy N.V. Parameter determination of asynchronous motors on the basis of passport data and starting characteristics. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu: FGBOU VPO «Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina»* [Proceedings of VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drive: FSBEI HPE "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin"]. Ivanovo, 2012, pp. 196-201. (In Russian)
 12. *Reguliruemyye asinkhronnyye dvigateli v sel'skhozhozyistvennom proizvodstve* [Adjustable asynchronous motors in agricultural production] / Under the editorship of D.N. Bystritskiy. Moscow: Energia, 1975, 399 p. (In Russian)
 13. *Asinkhronnyye dvigateli serii 4A. Spravochnik* [Asynchronous motors of the 4A series. Handbook] / A.E. Kravchik et al. - Moscow: Energoatomizdat, 1982. (In Russian)
 14. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Operation modes of the asynchronous and synchronous motors]. M.: GEI, 1969. 527 c. (In Russian)
 15. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Reference book of electric machines] under the general editorship of I.P. Kopylov and B.K. Klovok. Vol.1. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 456 p. (In Russian)
 16. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. Algorithm of calculation of parameters of the asynchronous motor replacement scheme on the basis of the catalogue data. *Vektor nauki TGU* [Vector of Science of TSU], 2013, no. 1 (23), pp. 108-112. (In Russian)
 17. Kachin S.I. *Elektricheskiy privod: uchebno-metodicheskoe posobie* [Electric drive: teaching and methodical manual]. S.I. Kachin, A.Yu. Chernyshev, O.S. Kachin; Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publisher, 2009. 157 p. (In Russian)

Определение тока холостого хода асинхронного электродвигателя / Г.Г. Лебедев, А.С. Сарваров, М.В. Вечеркин, М.Ю. Петушков, В.И. Косматов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 52-58. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-52-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-52-58)

Lebedev G.G., Sarvarov A.S., Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Kosmatov V.I. Calculation of Idling Current of an Asynchronous Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 52-58. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-52-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-52-58)