

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРНОЙ ЦЕПИ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

**Квашнин В. О., Лазуткина Ю. А., Федченко М. Д.**

В представленной работе проведено исследование влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи на статические характеристики АД в процессе разгона. Для проведения исследований был выполнен анализ существующих схем замещения АД и соответствующих им расчётных соотношений для определения его статических характеристик. Определены и получены аналитические зависимости статических характеристик АД, учитывающих изменение индуктивного сопротивления роторной цепи. На их основе получены и сопоставлены между собой статические характеристики АД с учётом и без влияния изменения индуктивного сопротивления его роторной цепи. Проведен анализ полученных результатов в области характерных точек.

У представленій роботі проведено дослідження впливу зміни індуктивного опору ланцюга ротору на статичні характеристики АД в процесі розгону. Для проведення дослідження було виконано аналіз існуючих схем заміщення АД та відповідних їм розрахункових співвідношень для визначення його статичних характеристик. Визначено та отримано аналітичні залежності статичних характеристик АД з урахуванням зміни індуктивного опору ланцюга ротору. На їх основі отримані та зіставлені між собою статичні характеристики АД з урахуванням і без зміни індуктивного опору його ланцюга ротору. Проведено аналіз отриманих результатів в області характерних точок.

In the presented work, the effect of changing the inductive resistance rotor circuit on the induction motor static characteristics in the process acceleration has been studied. To carry out the research, an analysis were made. The existing replacement schemes for the induction motor and the corresponding design relationships for determining its static characteristics. Analytical dependences motor static characteristics were taken into account the change in the inductive resistance of the rotor chain are determined and obtained. On their basis, the static characteristics of an induction motor with and without the effect of a change in the inductive resistance of its rotor chain have been obtained and compared with each other. The results has been obtained in the field of characteristic points and analyzed.

Квашнин В. О.

канд. техн. наук, доц. каф. ЭСА ДГМА

Лазуткина Ю. А.

канд. филос. наук, доц. каф. языковой подготовки ДГМА

Федченко М. Д.

магистр каф. ЭСА ДГМА  
[tm@dgma.donetsk.ua](mailto:tm@dgma.donetsk.ua)

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 62.311

**Квашнин В. О., Лазуткина Ю. А., Федченко М. Д.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРНОЙ ЦЕПИ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД**

При расчете различных моментов (пусковых, максимальных, номинальных) с применением одного из аналитических методов [1, 2] в каждом случае используются соответствующие параметры схемы замещения.

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния, и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния, уменьшаются индуктивные сопротивления  $x_1$  и  $x_2$ .

При этом, увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора  $r_2$  и  $x_2$ .

Следовательно, при расчете пусковых режимов, в которых токи машины значительно превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, желательно учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

Однако, степень влияния поля рассеяния на  $x_1$  и  $x_2'$  зависит от токов в обмотках. В свою очередь, от этих сопротивлений существенно зависят токи статора и ротора. Поэтому прямой расчет  $x_{1нас}$  и  $x_{2нас}'$  до получения пусковых характеристик невозможен. (Значения  $x_{1нас}$  и  $x_{2нас}'$  необходимо находить для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений, объем расчета этим методом зависит от правильного первоначального задания искомой величины и т. д.).

Учет изменяющихся параметров схемы замещения для определения различных моментов (пусковых, максимальных или номинальных) с применением аналитических методов в каждом случае, требует дополнительного определения параметров электрической машины – ее конструкции, геометрии пазов, электромагнитных свойств и характеристик материалов и т. д., данные, о которых отсутствуют в паспортах.

Для определения степени влияния изменений того или иного параметра на статические характеристики АД удобнее всего отдельно исследовать и проводить учёт изменения только лишь одного из параметров в предположении, что остальные остаются неизменными.

Таким образом, целью данной работы являлось исследование влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи на статические характеристики АД в процессе разгона.

Задачами исследования являлись:

- анализ существующих схем замещения АД и получение на их основе расчётных соотношений для определения его статических характеристик;
- определение вида статических характеристик АД удобного для проведения предполагаемых исследований;
- получение аналитических зависимостей статических характеристик АД учитывающих изменение индуктивного сопротивления роторной цепи;
- получение статических характеристик АД с учётом и без влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи АД;
- обработка полученных результатов и их анализ.

Объектом исследования являлись процессы, происходящие в электроприводе станда статических нагрузок при изменении индуктивного сопротивления роторной цепи, на предмет определения степени влияния индуктивного сопротивления цепи ротора и его учёта.

В качестве методов исследования использовались расчётно-аналитические для получения статических характеристик и определения характерных точек.

Научной новизной стало получение расчётных соотношений статических механических характеристик АД осуществляющих учёт изменения индуктивного сопротивления роторной цепи.

Полученные результаты представляют интерес для представления процессов происходящих в АД с КЗ ротором и могут быть полезными при проектировании современных асинхронных электроприводов и построении их динамических моделей.

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора  $r_1, x_1$ , ротора  $r_2, x_2$  или приведенные к числу витков обмотки статора сопротивления ротора  $r'_2$  и  $x'_2$ , сопротивление взаимной индуктивности  $x_\mu$  и расчетное сопротивление  $r_\mu$ , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Известные из общей теории электрических машин схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной, приведены на рис. 1–2. Физические процессы в асинхронной машине наглядно отражает схема, изображенная на рис. 1 (а). Но для расчетов удобнее использовать схему, показанную на рис. 1 (б), для которой  $r_m$  и  $x_m$  – эквивалентные значения соответствующих сопротивлений  $r_\mu$  и  $x_\mu$  контура магнитной цепи при последовательном соединении, определяемые выражением:

$$\sqrt{r_m^2 + x_m^2} = \frac{r_\mu \cdot x_\mu}{\sqrt{r_\mu^2 + x_\mu^2}}. \quad (1)$$

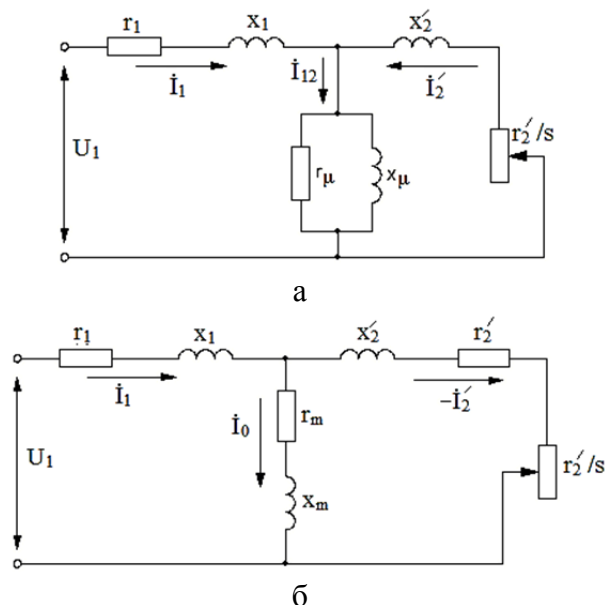


Рис. 1. Т-образная схема замещения (а, б)

При анализе рабочих свойств асинхронного двигателя используют упрощенную схему замещения двигателя с вынесением на зажимы первичной цепи намагничивающего контура (рис. 2 а, б), где из рис. 2 (а) следует:

$$\begin{cases} r_0 = r_1 + r_m; \\ x_0 = x_1 + x_m. \end{cases} \quad (2)$$

При этом намагничивающий ток можно принять постоянным, не зависящим от величины нагрузки двигателя, а также не учитывать вследствие относительной малой величины падения напряжения в обмотке статора, вызванное током намагничивания. Тогда схема примет вид, приведенный на рис. 2 (в).

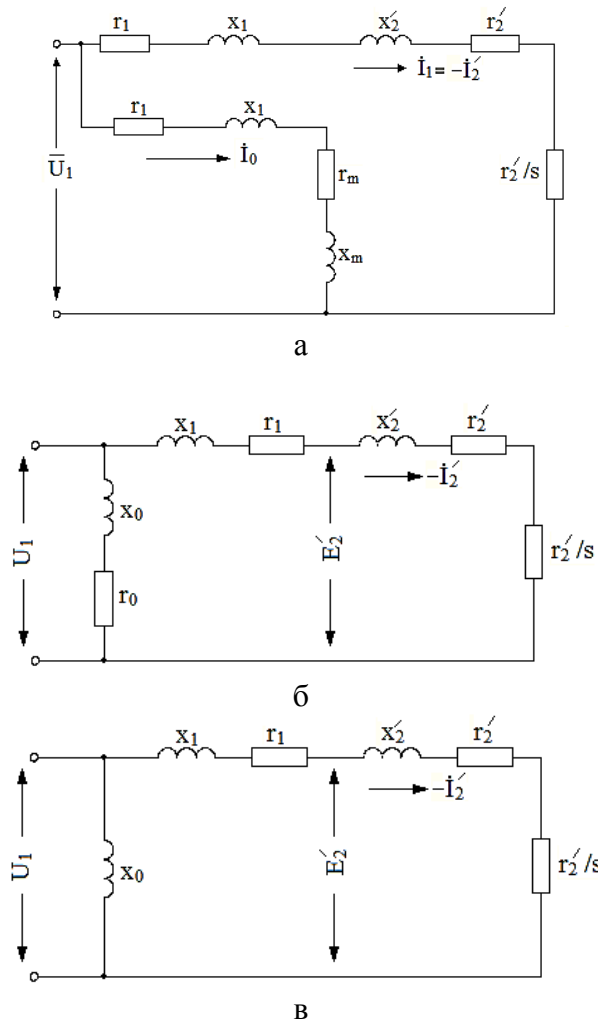


Рис. 2. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя (а, б, в)

Для такой эквивалентной схемы общее сопротивление:

$$z = \sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_k^2}, \quad (3)$$

где  $r_1$  – активное сопротивление фазы статора;

$\frac{r_2'}{s}$  – активное сопротивление фазы ротора, приведенное к напряжению и частоте статора;

$x_k$  – реактивное сопротивление короткого замыкания;

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  – скольжение асинхронного двигателя.

Ток нагрузки, потребляемый двигателем, без учета тока намагничивания:

$$I_1 = I_2' = \frac{U_1}{z} = \frac{U_1 s}{\sqrt{(r_1 s + r_2')^2 + (x_k s)^2}}, \quad (4)$$

т. е. ток двигателя является функцией скольжения.

При  $s = 0$  ток ротора также равен нулю, а при  $s = 1$  ток ротора равен току короткого замыкания.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем:

$$M = \frac{P_2}{\omega_0} = \frac{3U_1^2 r_2' s}{\omega_0 [(r_1 s + r_2')^2 + (x_k s)^2]}, \quad (5)$$

где  $\omega_0$  – угловая синхронная скорость поля статора,

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{p_1}. \quad (6)$$

Выражение (5) представляет собой уравнение механической характеристики асинхронного двигателя, так как дает зависимость между моментом и скольжением, то есть между моментом и скоростью.

Для практических расчетов обычно пользуются моментом двигателя, представленным в долевых единицах по отношению к критическому моменту:

$$\frac{M}{M_{кр}} = \frac{2 + \alpha s_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + \alpha s_{кр}}, \quad (7)$$

$$\alpha = 2 \frac{r_1}{r_2'}$$

Выражение для определения момента из уравнения (7) имеет вид:

$$M = \frac{M_{кр} (2 + \alpha s_{кр})}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + \alpha s_{кр}}. \quad (8)$$

Это выражение представляет собой уточненное уравнение механической характеристики асинхронного двигателя и представляет собой уточнённую формулу Клосса.

В большинстве учебной и справочной литературе по электроприводу [3, 4] для получения статических характеристик АД используют основное расчётное соотношение:

$$M = \frac{2 \cdot M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (9)$$

Расчётное соотношение (9) представляет собой формулу Клосса, которая используется в большинстве инженерных расчётов, когда для АД нет никаких дополнительных данных, кроме паспортных (с щитка электрических машин). В случае, когда известны параметры однофазной эквивалентной схемы замещения –  $r_1$ ,  $r'_2$  и  $x_1$  и  $x'_2$  (активные и индуктивные фазные сопротивления статорной и роторной цепи соответственно) используют расчётное соотношение (4, 5).

Однако, при рассмотрении статических характеристик АД, следует отметить, что они отображают зависимость  $\omega = f(M)$  и  $\omega = f(I_H)$  – для различных режимов работы АД – его пуска, а также его работы на холостом ходу и под нагрузкой.

При этом, сами зависимости  $\omega = f(M)$  и  $\omega = f(I_H)$  представляют собой усреднённые траектории, по которым осуществляется процесс пуска и разгона АД до установившегося значения скорости. В случае отсутствия нагрузки на валу АД, он разгоняется до скорости холостого хода  $\omega = \omega_{х.х.}$ .  $\omega_0$  – представляет собой скорость идеального холостого хода.

Анализируя Г-образную однофазную схему замещения АД, можно обнаружить, что индуктивное сопротивление роторной цепи в процессе разгона до установившейся скорости холостого хода, также изменяется от  $x_1 = x_{1max}$  в начале (при пуске, когда  $\omega = 0$ ) до  $x_1 = x_{1min}$  в конце разгона (когда  $\omega = \omega_{х.х.}$ ). Это объясняется тем, что по законам электротехники индуктивное сопротивление определяется как:  $X = 2\pi fL$ , где  $f$  – частота питающей сети (в данном случае  $f = 50$  Гц) [5]. Однако, это справедливо, когда ротор не вращается. При работе АД на установившейся скорости  $\omega = \omega_{х.х.}$  частота индуцируемого тока в роторе достигает всего лишь нескольких Гц, и определяется следующим соотношением:

$$f_r = f_c \cdot \left( \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \right). \quad (10)$$

Поэтому в процессе разгона АД, его индуктивное сопротивление ротора не остаётся постоянным, а изменяется в широком диапазоне от  $x_1 = x_{1max}$  до  $x_1 = x_{1min}$ . Следует отметить, что в процессе пуска претерпевают изменения и другие параметры. Например, изменение  $r_2$  дополнительно отображает учёт эффекта вытеснения тока в роторе [1, 6–8]. Изменение значений  $r_1$  и  $r'_2$  – происходит из-за нагрева протекающим током. Индуктивное сопротивление магнитной цепи –  $x_0$  является нелинейным и зависит от тока и т. д. [7, 9–10].

В работе отдельно рассмотрен процесс пуска и влияние изменяющегося значения  $x_1$  на вид получаемых статических характеристик, без учёта влияния изменений остальных параметров [11]. Для этого в уравнения статических характеристик вводят переменный параметр  $x_2$  функционально зависящий от скорости:

$$x'_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left( L_2 + \frac{3}{2} \cdot L_0 \right). \quad (11)$$

Расчёт и построение естественной статической механической характеристики АД в программе Mathcad выполнены с учётом и без влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи для двигателя типа 4AA56B4Y3 [12] стенда статических нагрузок. Его внешний вид приведен на рис. 3 в виде габаритно-присоединительных размеров, а его технические характеристики приведены в табл. 1.

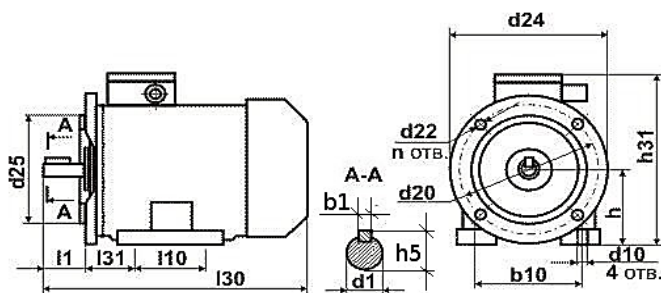


Рис. 3. Габаритно-присоединительные размеры двигателей

Таблица 1

Паспортные данные АД

Тип двигателя	Р <sub>н</sub> , кВт	n <sub>0</sub> , об/мин	КПД, %	Cos φ	I <sub>н</sub> , А	U, В	Мп/Мн	Мк/Мн	Ип/Ин	Jн
4AA56B4У3	0,18	1500	64	0,64	1,15	220	2,1	2,2	5	0,005

Результаты расчётов статических механических характеристик АД с учётом и без учёта влияния индуктивного сопротивления роторной цепи приведены на рис. 4.

$P_n := 180 \text{ Вт}$      $S_n := 0.1$      $r_1 := 34.337 \text{ Ом}$   
 $n_0 := 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$      $S_k := 0.6376$      $r_2' := 30.522 \text{ Ом}$   
 $U_\phi := 220 \text{ В}$      $\lambda_{кр} := 2.2$      $X_k := 49.6 \text{ Ом}$

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ  $X_r$

$X_r := 24.8$      $X_s := 24.8$

$S_2 := 0,00001..1$

$X_k(S_2) := X_r \cdot S_2 + X_s$

РАСЧЁТЫ

$$\omega_0 := \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157.08 \text{ (с}^{-1}\text{)}$$

$$S := 0,00001..1$$

$$M(S) := \frac{3(U_\phi)^2 \cdot \frac{r_2'}{S}}{\omega_0 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (X_k)^2 \right]}$$

$$n_n := n_0 \cdot (1 - S_n) = 1500 \cdot (1 - 0.1) = 1350 \text{ (об/мин)}$$

$$\omega_n := \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 1350}{30} = 141.37 \text{ (с}^{-1}\text{)}$$

$$M_n := \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{180}{141.37} = 1.27 \text{ (Н·м)}$$

$$M_k := \lambda_{кр} \cdot M_n = 2.2 \cdot 1.27 = 2.8 \text{ (Н·м)}$$

$$M_2(S_2) := \frac{3(U_\phi)^2 \cdot \frac{r_2'}{S_2}}{\omega_0 \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{S_2} \right)^2 + (X_k(S_2))^2 \right]}$$

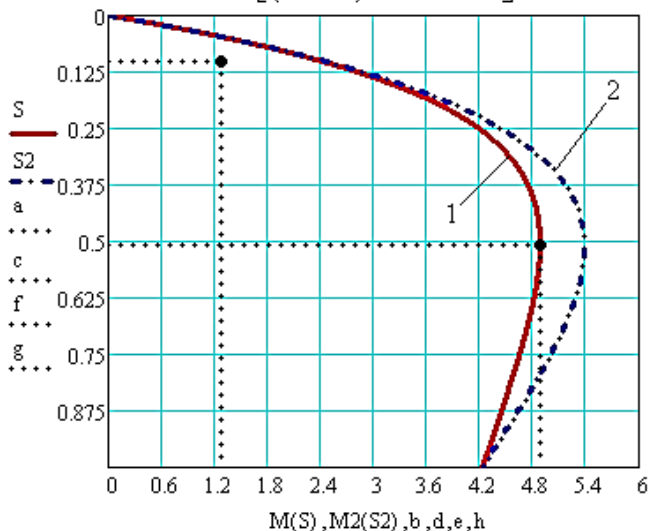


Рис. 4. Результаты расчётов статических механических характеристик АД в программе Mathcad с учётом и без влияния индуктивного сопротивления роторной цепи:

1 – статическая механическая характеристика АД без учёта влияния индуктивного сопротивления роторной цепи; 2 – статическая механическая характеристика АД с учётом влияния индуктивного сопротивления роторной цепи

Расчёт и построение статических электромеханических характеристик АД в программе Mathcad с учётом и без учёта влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи показано на рис. 5.

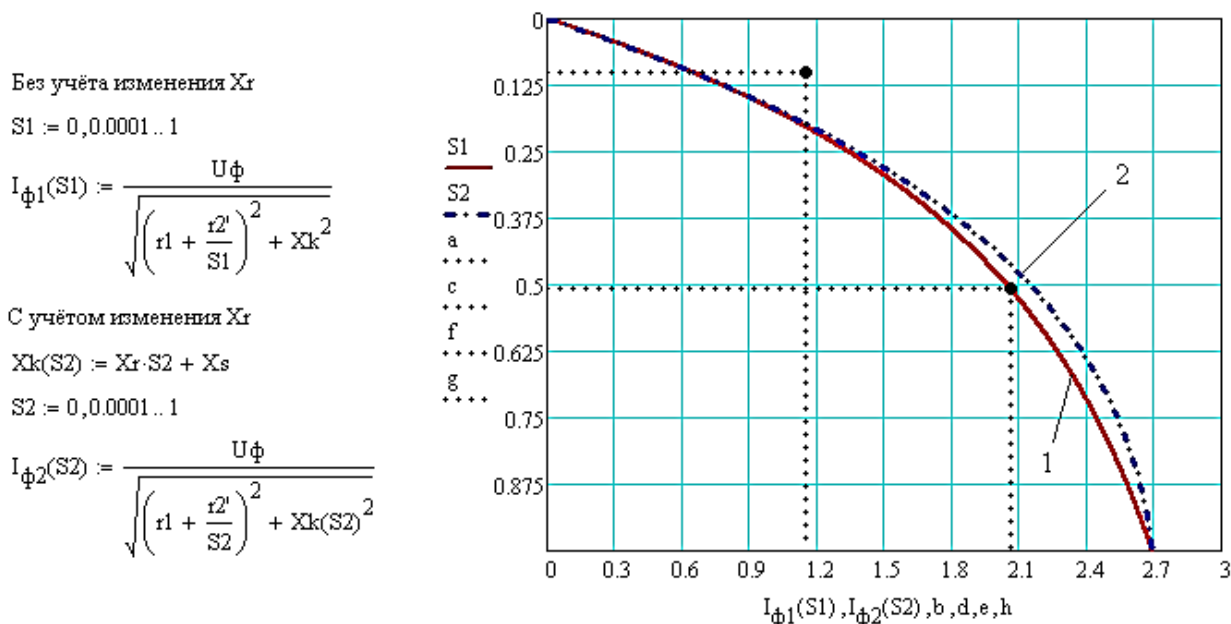


Рис. 5. Статические электромеханические характеристики АД в программе Mathcad с учётом и без влияния индуктивного сопротивления роторной цепи:

1 – статическая электромеханическая характеристика АД без учёта влияния индуктивного сопротивления роторной цепи; 2 – статическая электромеханическая характеристика АД с учётом влияния индуктивного сопротивления роторной цепи

По полученным результатам были определены характерные точки и сопоставлены с аналогичными полученными по паспортным данным.

В табл. 2 приведены результаты значений найденных характерных точек по паспортным данным и расчётным соотношениям для случаев с учётом и без учёта влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи.

Таблица 2

Результаты значений найденных характерных точек по паспортным данным и расчётам

Характерные точки	Без учёта изменения $X_r$		С учётом изменения $X_r$
	Паспортные данные	Расчётные значения	Расчётные значения
Пусковая	$M_{II} = 2.67; \omega_{II} = 0;$ $I_{II} = 2.7$	$M_{II} = 4.23; \omega_{II} = 0;$ $I_{II} = 2.7$	$M_{II} = 4.23; \omega_{II} = 0;$ $I_{II} = 2.7$
Критическая	$M_{KP} = 2.8; \omega_{KP} = 44.5;$ $I_K = 2.07$	$M_{KP} = 4.88; \omega_{KP} = 77.6;$ $I_K = 2.07$	$M_{KP} = 5.4 ; \omega_{KP} = 76.5$ $I_K = 2.18$
Номинальная	$M_H = 1.27; \omega_H = 141.4;$ $I_H = 1.15$	$M_H = 1.27; \omega_H = 141.37;$ $I_H = 1.15$	$M_H = 1.27; \omega_H = 141.4;$ $I_H = 1.15$



## ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы:

- определена Г-образная однофазная эквивалентная схема замещения АД, удобная для проводимых исследований;
- на её основе определён вид расчётных соотношений статических характеристик АД для проведения их дальнейших исследований;
- на их основе получены аналитические зависимости статических характеристик АД с учётом изменяющегося параметра – индуктивного сопротивления роторной цепи двигателя;
- в ходе определения характерных точек по паспортным данным было установлено, что пусковая и критическая точки по величине меньше расчётных на 63 и 57 % соответственно. Это может быть объяснено отсутствием контура магнитной цепи в выбранной Г-образной схеме замещения АД и соответствующих ей расчётных соотношений;
- в ходе анализа полученных статических механической и электромеханической характеристик АД и его характерных точек (пусковой, критической и номинальной) установлено, что учёт влияния изменения индуктивного сопротивления роторной цепи двигателя оказывает влияние на увеличение максимального (критического момента) развиваемого двигателем в процессе пуска.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : учеб. для вузов / И. П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с. : ил.
2. Гольдберг О. Д. Электромеханика : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / О. Д. Гольдберг, С. П. Хелемская ; под ред. О. Д. Гольдберга. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 512 с.
3. Загирняк М. В. Электрические машины Ч. 3. Асинхронные машины : учебное пособие / М. В. Загирняк, Б. И. Невзлин. – К. : ІСДО, 1996. – 196 с.
4. Ключев В. И. Теория электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : Электрические цепи : Учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л. А. Бессонов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 2008. – 528 с.
6. Усольцев А. А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов : учеб. пособ. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2011. – 164 с.
7. Element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters / P. Zhou, J. Gilmore, Z. Badics, Z. J. Cendes Finite // IEEE Trans. on Magn. – Vol. 34. – No. 5, September 1998.
8. Boglietti A. Computational Algorithms for induction motor equivalent circuit parameter determination— Part I / A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari // IEEE Trans. Ind. Electron. – Vol. 58, № 9, September 2011.
9. Квашинин В. О. Разработка методики программного расчета и исследования статических механических характеристик асинхронного двигателя (в среде BORLAND DELPHI) / В. О. Квашинин, А. В. Бабаши // Вестник ДГТУ : сб. науч. тр. – Днепропетровск, ДГТУ, 2009.
10. Miloje M. Kostić Equivalent circuit improvement method for induction motor efficiency / M. Miloje // Electrical Engineering Institute Nikola Tesla. – Belgrade University, Serbia April 2012. – Pp. 31–42.
11. Квашинин В. О. Разработка методики определения статических механических характеристик асинхронных двигателей с повышенным пусковым моментом / В. О. Квашинин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПИ», 2005. – № 45. – С. 378–381.
12. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соколенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с. : ил.