

УДК 621.43.18: 629.113.681.3.601.57

Александр Иванович Фещенко, канд. техн. наук, проф.,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, electro@madi.ru

Иван Алексеевич Кузьмин, магистрант,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, iKuzmin91@yandex.ru

АППРОКСИМАЦИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАРТЕРА С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Аннотация. Предложены полуэмпирические формулы для расчета скоростной и моментной характеристик стартера с возбуждением от постоянных магнитов. Коэффициенты аппроксимации легко определяются на основе опытных данных, так как зависимости частоты вращения и момента стартера от потребляемого тока преобразуются к виду линейных функций.

Ключевые слова: система пуска, стартер, аккумуляторная батарея, цепь питания, вольт-амперная характеристика батареи, приведенная к стартеру, тормозная, скоростная, моментная и механические характеристики стартера, полуэмпирические зависимости, коэффициенты аппроксимации.

Alexander I. Feshchenko, Ph. D., professor,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, electro@madi.ru,

Ivan A. Kuzmin, undergraduate,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, iKuzmin91@yandex.ru

APPROXIMATION OF ELECTROMECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE STARTER MOTOR WITH MAGNETOELECTRIC EXCITATION

Abstract. The semi-empirical formulae for calculation of speed and torque characteristics of starter motor with excitation from permanent magnets are proposed. The approximate coefficient is easily determined on the basis of experimental data as the

dependence of the rotation frequency and torque of the starter from the supply current is transformed to linear functions.

Key words: starting system, starter, battery, power circuit; the current-voltage characteristic of the battery correlated to the starter, brake, speed, torque and mechanical characteristics of the starter, semiempirical dependences, the approximate coefficient.

Важным фактором для обеспечения точности результатов расчета выходных характеристик системы пуска двигателя внутреннего сгорания на ЭВМ [1, 2] является введение в машинную программу реальных электромеханических характеристик стартера на основе аналитического описания.

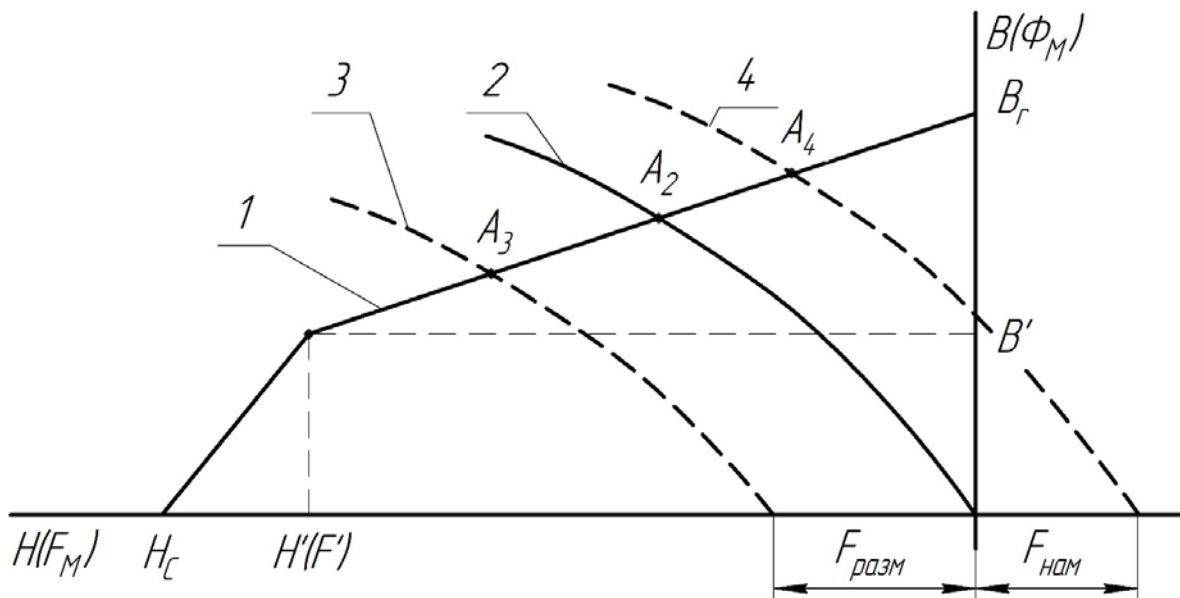


Рис. 1. Положения рабочей точки постоянного магнита на характеристике размагничивания: 1 – характеристики намагничивания стартерного электродвигателя; 2 – при холостом ходе; 3, 4 – под нагрузкой соответственно при размагничивании и подмагничивании магнита; B_r – остаточная магнитная индукция; H_c – коэрцитивная сила

В [3] предложены аналитические выражения скоростной и моментной характеристик стартера с электромагнитным возбуждением. Однако, в настоящее время в большинстве автомобильных стартерах мощностью до 3 кВт применяется магнитоэлектрическое возбуждение. Полюса таких стартеров изготавливают из постоянных магнитов на основе

феррита стронция или сплава железо–неодим–бор. Характеристика размагничивания этих материалов может быть представлена в виде ломаной линии 1 (рис. 1).

В режиме холостого хода рабочая точка A_2 постоянного магнита определяется точкой пересечения характеристики намагничивания 2 ненагруженного стартерного электродвигателя с характеристикой размагничивания магнита 1.

Под нагрузкой ток якоря стартерного электродвигателя создает МДС и обусловленный ею магнитный поток. Рабочая точка магнита при этом смещается в новое положение. При размагничивающем характере МДС якоря $F_{\text{разм}}$ рабочая точка перемещается в точку A_3 . Причем МДС магнита не должна превышать значения F' (см. рис. 1), соответствующее точки $B'(H')$ перегиба кривой размагничивания магнита. В противном случае рабочая точка при размагничивании перейдет на линию возврата с более низкими значениями магнитной индукции и параметры магнита не восстановятся. В случае намагничивающего характера МДС якоря $F_{\text{нам}}$ рабочая точка магнита A_4 на кривой размагничивания находится слева от точки A_2 холостого хода.

Учитывая вышеперечисленные особенности нахождения рабочей точки на линейной характеристики размагничивания магнита при работе стартера под нагрузкой, можно предположить следующие зависимости для магнитного потока в рабочем воздушном зазоре между якорем и полюсом от потребляемого тока I_c :

– при подмагничивании магнита

$$\Phi = a_{\Phi} + b_{\Phi} I_c, \quad (1)$$

– при размагничивании магнита

$$\Phi = a_{\Phi} - b_{\Phi} I_c, \quad (2)$$

– при отсутствии влияния реакции якоря на состояние магнита

$$\Phi = \text{const}, \quad (3)$$

где a_Φ, b_Φ – коэффициенты аппроксимации.

Аналитическое выражение скоростной характеристики стартера, зависимости частоты вращения от потребляемого тока, может быть получено из известного в теории электрических машин уравнения

$$n_c = \frac{E_C}{C_E \cdot \Phi}, \quad (4)$$

где E_C – ЭДС стартера, В; C_E – электрическая постоянная электродвигателя; Φ – магнитный поток, Вб.

ЭДС якоря стартерного электродвигателя при постоянном значении потребляемого тока определяется из уравнения баланса напряжений

$$E_C = U_C - U_T = U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{Щ}} - I_C(R_\delta + R_{\text{ц}} + R_c), \quad (5)$$

где U_C – напряжение на стартере, В; U_T – тормозное напряжение стартера (падение напряжения на внутреннем сопротивлении стартера), В; $U_{\text{нр}}$ – начальное разрядное напряжение аккумуляторной батареи (при $I_C = 0$), В; $\Delta U_{\text{Щ}}$ – падение напряжения в щеточно-коллекторном узле стартера, В; R_δ – внутреннее эквивалентное сопротивление аккумуляторной батареи, Ом; $R_{\text{ц}}$ – сопротивление цепи питания стартера, Ом.

Вольт-амперная характеристика аккумуляторной батареи с учетом падения напряжения в электрической цепи изображается прямой линией (рис. 2), тогда суммарное сопротивление батареи и цепи можно определить по координатам любой точки (U_C, I_C) характеристики

$$R_\delta + R_{\text{ц}} = \frac{U_{\text{нр}} - U_C}{I_C}. \quad (6)$$

В пределах диапазона рабочих токов, потребляемых стартером (от холостого хода I_X до полного торможения I_T) его тормозная характеристика представляет прямую линию (рис. 2), поэтому сопротивление стартерного электродвигателя также определяется по координатам любой точки (U_T, I_C) тормозной характеристики

$$R_C = \frac{U_T - \Delta U_{\text{Ш}}}{I_C} \quad (7)$$

Как правило, при построении электромеханических характеристик стартера его тормозная характеристика проводится из начала координат до точки полного торможения (U_{CT}, I_T), тогда $\Delta U_{\text{Ш}} = 0$.

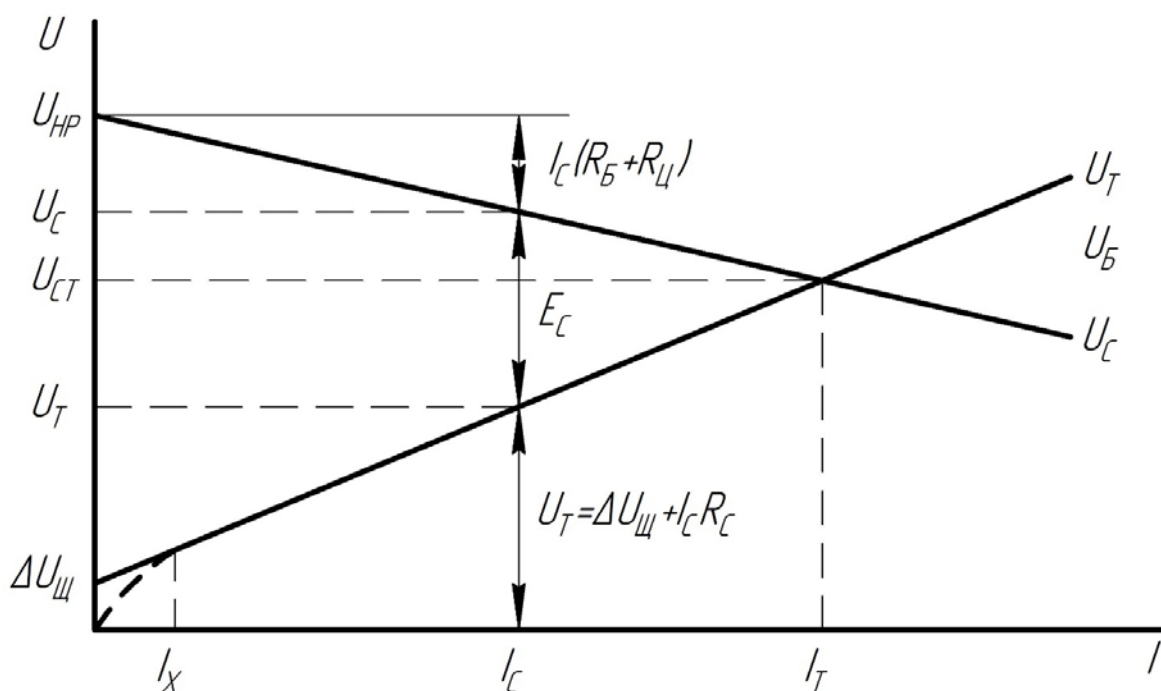


Рис. 2. Совмещение вольт-амперной характеристики батареи, скорректированной на падение напряжения в цепи питания, с тормозной характеристикой стартера

Анализ электромеханических характеристик стартеров с постоянными магнитами различных производителей показал, что зависимость $\Phi(I_C)$ может быть описана уравнением (1).

Подставляя (1) и (5) в (4), получим окончательное выражение скоростной характеристики стартера

$$n_c = \frac{U_{\text{нр}} - \Delta U_{\text{Ш}} - I_C R_{\Sigma}}{(a_n + I_C \cdot b_n)}, \quad (8)$$

где $R_{\Sigma} = R_{\text{б}} + R_{\text{ц}} + R_{\text{с}}$ – суммарное сопротивление системы пуска;

$a_n = a_{\Phi} \cdot C_E$ и $b_n = b_{\Phi} \cdot C_E$ – коэффициенты аппроксимации скоростной характеристики стартера.

Полученное выражение (8) позволяет рассчитать семейство скоростных характеристик стартера для заданных условий пуска двигателя при изменении вольт-амперных характеристик аккумуляторной батареи.

Характер изменения момента на валу стартера M_C от потребляемого тока аналогичен кривой электромагнитного момента $M_{ЭМ}(I_C)$. Моментная характеристика стартера $M_C(I_C)$ в отличие от кривой электромагнитного момента начинается из точки холостого хода $(I_X, 0)$. Подставляя в известное из теории электрических машин уравнение $M_{ЭМ} = C_M \Phi I_C$ (C_M – механическая постоянная стартерного электродвигателя) выражение кривой размагничивания (1), а вместо I_C величину $(I_C - I_X)$ и вводя коэффициент k , учитывающий снижение момента от механических и магнитных потерь, получим зависимость для расчета момента на валу стартера

$$M_C = (a_m - b_m(I_C - I_X))(I_C - I_X), \quad (9)$$

где $a_m = a_\Phi k C_M$ и $b_m = b_\Phi k C_M$ – коэффициенты аппроксимации моментной характеристики стартера.

При выводе уравнения (9) принималось, что характеристика момента стартера для различных вольт-амперных характеристик аккумуляторной батареи неизменна.

Вид уравнений (8) и (9) позволяет получить также аналитическое выражение для расчета механических характеристик стартера, так как данные зависимости имеют совместное решение относительно аргумента обеих функций.

Уравнение скоростной характеристики стартера (8) можно записать

$$I_C = \frac{U_{нр} - \Delta U_{ш} - a_n n_c}{(b_n n_c + R_\Sigma)}. \quad (10)$$

Тогда, подставляя выражение (10) в уравнение (9), можно получить механическую характеристику в виде $M_C(n_c)$.

Аналогичным образом можно найти аналитическое выражение механической характеристики типа $n_c(M_C)$, используя зависимость

$$I_C = I_X - \frac{a_m}{2b_m} + \sqrt{\left(\frac{a_m}{2b_m}\right)^2 + \frac{M_C}{b_m}}. \quad (11)$$

Для практического применения полученных зависимостей (8)...(11) необходимо знать значение постоянных коэффициентов a_n, b_n, a_m, b_m .

Зависимости частоты вращения якоря и крутящего момента стартера от потребляемого тока можно преобразовать к виду линейных функций

$$\frac{E_c}{n_c} = a_n + I_C \cdot b_n, \quad (12)$$

$$\frac{M_C}{(I_C - I_X)} = a_m - b_m(I_C - I_X), \quad (13)$$

которые на графиках изображаются прямыми линиями (рис. 3, 4), что позволяет при наличии опытных данных (электромеханических характеристик, приводимых в каталогах фирм-производителей стартеров) определить коэффициенты аппроксимации в формулах (8)...(11).

В качестве примера рассмотрим нахождение коэффициентов аппроксимации в (8) и (9) для расчета характеристик стартера 21214.3708 «Прамо Электро» с использованием метода избранных точек [4]. По параметрам исходной скоростной характеристике строится зависимость

$$\frac{E_c}{n_c} = f(I_C)$$

(рис. 3), на которой выбираются две точки, расположенные наиболее точно на прямой и достаточно далеко друг от друга. Координаты этих точек: 1(100;0,0029) и 2(400;0,00336).

Используя координаты этих точек, можно составить систему уравнений

$$\begin{cases} 0,0029 = a_n + 100 \cdot b_n \\ 0,00336 = a_n + 400 \cdot b_n \end{cases}$$

решением которой, являются искомые коэффициенты

$$a_n = 2,74 \cdot 10^{-3}$$

$$b_n = 1,56 \cdot 10^{-6}$$

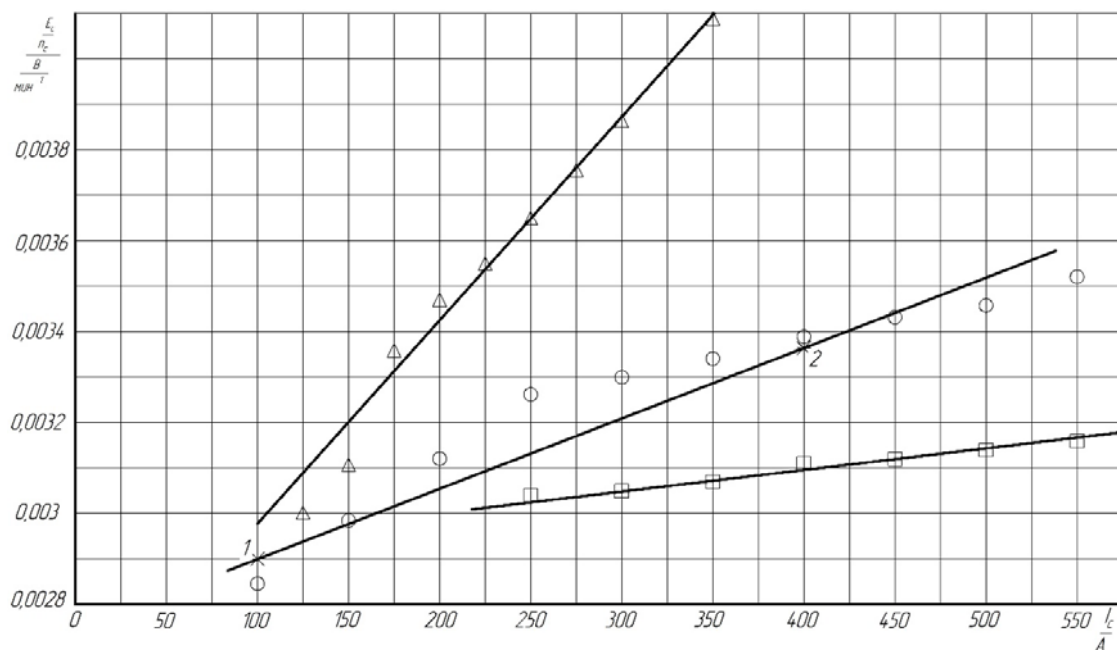


Рис. 3. Аппроксимация скоростных характеристик стартера:
 ○ – 21214.3708 «Примо Электро»; □ – BOSCH DW(R) 12V 1,1kW;
 Δ – ISKRA 12V 0,9kW

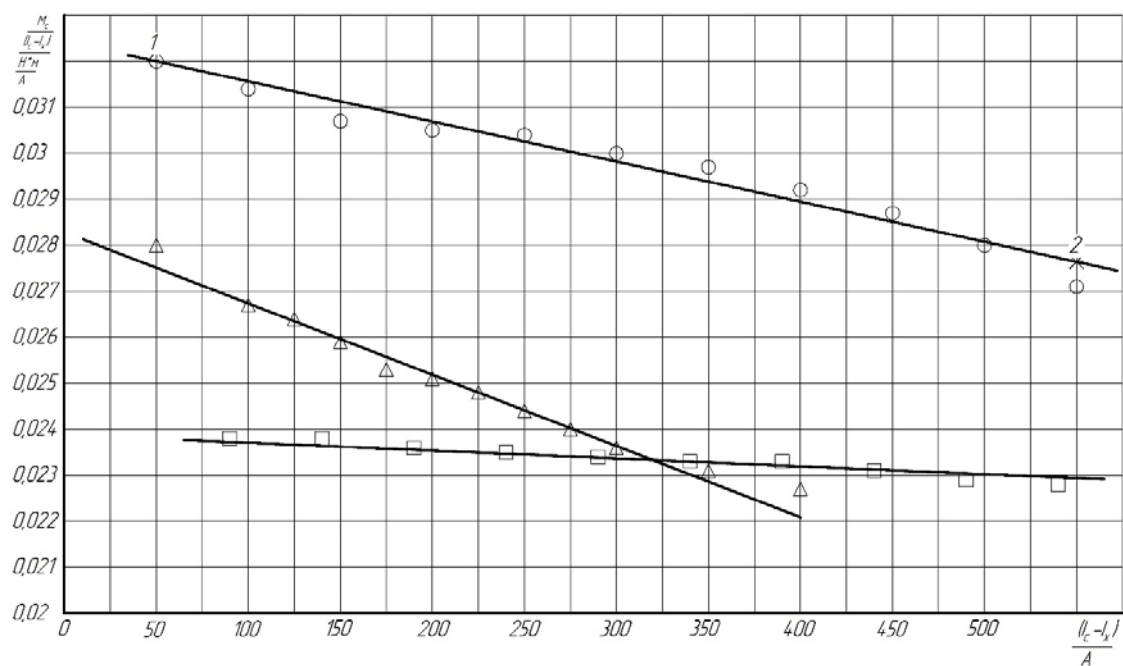


Рис. 4. Аппроксимация моментной характеристики стартера:
 ○ – 21214.3708 «Примо Электро»; □ – BOSCH DW(R) 12V 1,1kW;
 Δ – ISKRA 12V 0,9kW

Для рассматриваемого стартера по исходным характеристикам находим $\Delta U_{\text{Щ}} = 0$ В, $I_X = 50$ А и $R_c = 0,012$ Ом.

Искомая формула скоростной характеристики стартера 21214.3708 имеет следующий вид

$$n_c = \frac{U_{\text{нр}} - I_C(R_{\text{б}} + R_{\text{ц}} + 0,012)}{(2,74 \cdot 10^{-3} + I_C \cdot 1,56 \cdot 10^{-6})} \quad (14)$$

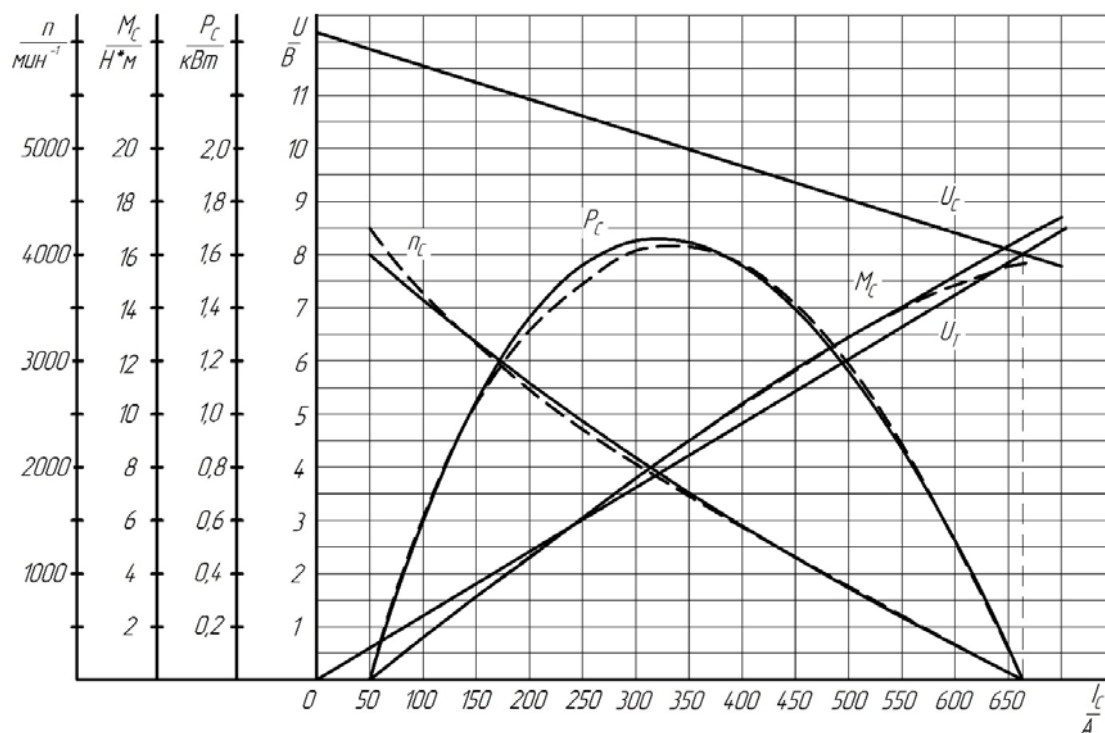


Рис. 5. Электромеханические характеристики стартера 21214.3708 «Прамо Электро»:
 ----- характеристики из каталога [5];
 _____ аппроксимированные характеристики

Аналогичным образом определяются коэффициенты в формуле (9). По параметрам исходной моментной характеристике строится зависимость

$$\frac{M_C}{(I_C - I_X)} = f(I_C - I_X)$$

(рис. 4), по которой выбираются две точки (1, 2) и составляются два уравнения

$$\begin{cases} 0,032 = a_M - 50 \cdot b_M \\ 0,0276 = a_M - 550 \cdot b_M \end{cases}$$

решая которые находим коэффициенты аппроксимации

$$a_M = 0,0324$$
$$b_M = 8,622 \cdot 10^{-6}$$

Тогда моментную характеристику стартера 21214.3708 фирмы «Прамо Электро» можно представить в следующем виде

$$M_C = [0,0324 - 8,622 \cdot 10^{-6}(I_C - 50)](I_C - 50). \quad (15)$$

На рисунке 5 представлены исходные и аппроксимированные электромеханические характеристики стартера 21214.3708. Относительная погрешность вычислений по формулам аппроксимации не превышает 5%, что соответствует точности измерений параметров электромеханических характеристик стартера.

Заключение

Дано обоснование вида полуэмпирических формул для расчета электромеханических характеристик стартера с постоянными магнитами. Приведена методика определения численных значений постоянных коэффициентов в этих формулах.

Применение полученных зависимостей позволяет повысить качество расчётных исследований системы пуска с магнитоэлектрическим стартером.

Список литературы

1. Фещенко А.И., Феофанов С.А. Методические указания к курсовому проекту «Расчет выходных характеристик системы электростартерного пуска ДВС». М.: МАДИ, 2008. 38 с.
2. Купеев, Ю.А., Феофанов С.А., Фещенко А.И. Расчет стартерного электродвигателя и параметров аккумуляторной батареи на повышенное номинальное напряжение 36В // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 3. С. 7–11.

3. Боровских Ю.И., Фещенко А.И. Аппроксимация скоростной и моментной характеристик стартера // Труды НИИ автоприборов. 1983. Вып. 55. С. 180–187.
4. Блох Л.С. Практическая номография. М.: Высшая школа, 1971. 328 с.
5. Официальный сайт компании Прамо Электро // URL: <http://pramo-electro.ru/>

References

1. Feshcenko A.I., Feofanov S.A. *Metodicheskie ukazaniya k kursovomu projektu "Raschet vyhodnyh harakteristik sistemy elektrostarternogo puska DVS"* (Methodological guidelines for the course project "Calculation system output characteristics of the internal combustion engine electric starter activation"), Moscow, MADI, 2008, 38p.
2. Kupleev U.A., Feofanov S.A., Feshcenko A.I. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2008, no. 3, pp. 7–10.
3. Borovskih U.I., Feshcenko A.I. *Trudi NII avtopriborov*, sbornik statei, Moscow, 1983, pp. 180–187.
4. Bloh L.S. *Prakticheskaya nomografiya* (Practical nomography), 1971, 328 p.
5. Oficialnyj sajt kompanii Pramo Elektro, available at: <http://pramo-electro.ru/>