

УДК 621.313.8

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77>

EDN AVHESX



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Влияние параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока

А.С. Кривогузова[®],
С.Н. Ткаченко,
А.А. Шпилевой

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, 236041 Россия

[®] Автор для переписки, e-mail: krivoguzova99@bk.ru

• Поступила: 14.11.2024 • Доработана: 11.02.2025 • Принята к опубликованию: 27.05.2025

Резюме

Цели. Цель работы – определение оптимального количества витков в каждой из обмоток и влияния параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока (brushless direct current electric motor, BLDC-двигателя).

Методы. Используются методы натурного эксперимента на испытательном стенде, состоящем из модернизированного BLDC-двигателя, источника питания и регулятора скорости. Также использовались методы математического моделирования, решения задачи линейного программирования и аппроксимации.

Результаты. В ходе экспериментов получены зависимости пускового тока и числа оборотов на старте от числа витков в каждой из обмоток для модернизированного BLDC-двигателя. Экспериментально установлено, что количество витков в обмотках имеет предельное значение, признаками чего является пересечение кривых пускового тока и стартовых оборотов или исчезновение функциональной зависимости между пусковым током и оборотами двигателя. Разработана математическая модель модернизированного BLDC-двигателя, которая хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Используя математическую модель, можно определить оптимальное количество витков в каждой из обмоток двигателя, а также уровень коэффициента полезного действия BLDC-двигателя. Предложена параметрическая модель, которая позволяет определить значение стартовых оборотов двигателя по значению пускового тока и напряжению батареи для диапазона витков в обмотке от 8 до 14. Данные модели позволяют определять характеристики двигателя на стадии его проектирования.

Выводы. Выявлено, что существует интервал для количества витков в каждой из обмоток BLDC-двигателя, в котором будет наблюдаться оптимум коэффициента полезного действия двигателя. Также выявлено, что для определения базовых пусковых характеристик BLDC-двигателя достаточно двух параметров, которые легко измерить на практике: пусковой ток и уровень напряжения источника питания.

Ключевые слова: BLDC-двигатель, пусковые характеристики двигателя, обмотки двигателя, количество витков в обмотках двигателя, математическая модель

Для цитирования: Кривогузова А.С., Ткаченко С.Н., Шпилевой А.А. Влияние параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):69–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77>, <https://www.elibrary.ru/AVHESX>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless DC motor

Alexandra S. Krivoguzova [@],
Sergey N. Tkachenko,
Andrey A. Shpilevoy

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, 236041 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: krivoguzova99@bk.ru

• Submitted: 14.11.2024 • Revised: 11.02.2025 • Accepted: 27.05.2025

Abstract

Objectives. This work is aimed at determining the optimum number of turns in each winding and the effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless direct current motor (BLDC motor).

Methods. A full-scale experiment on a test bench consisting of an upgraded BLDC motor, a power supply source, and a speed controller was conducted. Methods of mathematical simulation, linear programming, and approximation were also applied.

Results. During the experiments, the dependencies of inrush current and starting speed on the number of turns in each winding of the upgraded BLDC motor were obtained. It was experimentally established that the number of turns in the windings has a limiting value, which is confirmed by either the intersection of the curves of inrush current and starting speed, or the disappearance of the functional dependence between the inrush current and motor speed. A mathematical model for the upgraded BLDC motor was developed, which showed good agreement with the experimental results. Using this mathematical model, the optimum number of turns in each of the motor windings and the efficiency of a BLDC motor can be determined. A parametric model for determining the motor starting speed by the values of inrush current and battery voltage at the number of turns in the winding from 8 to 14 was proposed. The developed models make it possible to determine the motor characteristics at the design stage.

Conclusions. There exists an interval of the number of turns in each of the windings of a BLDC motor, where the motor demonstrates its optimum efficiency. Inrush current and supply voltage were found to be the parameters that are easily measurable in practice and sufficient for determining the basic starting characteristics of a BLDC motor.

Keywords: brushless direct current motor, BLDC motor, motor starting characteristics, motor windings, number of motor winding turns, mathematical simulation

For citation: Krivoguzova A.S., Tkachenko S.N., Shpilevoy A.A. Effect of winding and power supply parameters on the starting characteristics of an upgraded brushless DC motor. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):69–77. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-69-77>, <https://www.elibrary.ru/AVHESX>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Бесщеточные двигатели постоянного тока (brushless direct current electric motor, BLDC-двигатели) находят широкое применение в самых разных отраслях и сферах [1, 2]. На сегодняшний день данный тип двигателя может иметь коэффициент полезного действия (КПД) до 94% при условии минимизации потерь в регуляторе скорости [3, 4] и оптимальном режиме работы батареи питания [5]. Минимальный набор оборудования, необходимый для работы BLDC-двигателя, состоит из регулятора скорости (electronic speed controller, ESC-регулятор) и батареи питания, которая питает регулятор скорости, преобразованное напряжение с которого подается на каждую из 3 фаз двигателя.

Конструктивно BLDC-двигатель представляет собой статор с обмотками и постоянными магнитами и вращающийся в статоре ротор. Одна из наиболее часто встречающихся конструкций BLDC-двигателя – 12N14P: 12 обмоток статора и 14 магнитных полюсов ротора. При этом двигатель является трехфазным и обмоток фактически не 12, а только 3. Один провод навит вокруг 4 магнитов. Для управления подобным двигателем используются трехфазные регуляторы скорости. Подобные устройства чувствительны к пульсациям напряжения, которые в свою очередь приводят к резким изменениям крутящего момента и снижению эффективности [6].

Улучшение контроля каждой отдельной обмотки позволяет уменьшить колебания крутящего момента [7], что повышает стабильность системы и снижает энергопотребление. Таким образом, направлением модернизации BLDC-двигателей является увеличение количества отдельных обмоток. Например, в [8] рассматривается пятифазный двигатель, что требует увеличения количества обмоток. Подобное изменение количества фаз приводит к повышению стабильности и безотказности работы двигателя.

Аналогичные примеры [9] доказывают необходимость как внедрения нового регулятора скорости BLDC-двигателя, так и конструктивного изменения самого BLDC-двигателя. Вместо традиционной схемы с 3 обмотками можно использовать 12 отдельных обмоток. Это позволит регулировать ток в каждой из них по отдельности, обеспечивая более точный контроль магнитного поля и крутящего момента. Такая

модернизация улучшает динамические характеристики двигателя, снижает пульсации, обеспечивает более гибкую адаптацию под различные режимы работы и повышает надежность [10, 11]. Это особенно важно при работе двигателя в сложных эксплуатационных условиях.

Первым этапом подобной работы является модернизация традиционного BLDC-двигателя. При этом необходимо заново изготовить все обмотки двигателя и создать отдельные выводы для каждой из них. Следовательно, возникает вопрос о влиянии количества витков на параметры работы BLDC-двигателя, прежде всего, на пусковые характеристики.

Классически оптимальное число витков в обмотке определяется на основе нескольких параметров [12]: необходимого крутящего момента, рабочей частоты, сопротивления и индуктивности обмоток. При переходе к 12 отдельным обмоткам, важно учитывать увеличение сопротивления из-за увеличения числа витков, а также влияние их взаимной индуктивности.

Таким образом, целью данной работы является определение оптимального количества витков в каждой из обмоток и влияния параметров обмоток и источника питания на пусковые характеристики модернизированного BLDC-двигателя.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку конфигурация BLDC-двигателя 12N14P является одной из наиболее часто встречающихся, то для проведения исследований был выбран подобный двигатель, в частности, Brother Hobby Avenger 2806.5 1300kV (Brotherhobby, Китай), в котором на роторе установлены дуговые магниты N52H, статор выполнен из кремнистой стали Kawasaki 0.2 мм, материал корпуса – алюминиевый сплав Al 7075, а вал является полым и выполнен из титанового сплава. В двигателе используется медная обмотка сечением 0.75 мм.

Два двигателя были разобраны и перемотаны медным проводом того же сечения, после чего получилось 12 отдельных обмоток, каждая со своим отдельным выводом. Каждая из 12 обмоток размещена в отдельном пазе в соответствии со схемой статора. На рис. 1 представлены оригинальный BLDC-двигатель (слева) и модернизированный (справа). Как можно видеть, из оригинального двигателя выходит 3 провода, а из модернизированного – 12.

Измерения проводились на 2 двигателях с целью обеспечения повторяемости получаемых значений. Никаких отличий в работе первого и второго модернизированного двигателей не наблюдалось.



Рис. 1. BLDC-двигатель 2806 + 1350kV до перемотки (слева) и после перемотки с убранным ротором (справа)

В качестве батареи питания использован источник постоянного тока GW INSTEK GPD-73303S (GOOD WILL INSTRUMENT, Китай; погрешность по напряжению $\pm(0.03\% + 10 \text{ е.м.р.})$; погрешность по току $\pm(0.3\% + 10 \text{ е.м.р.})$), позволяющий фиксировать уровень подаваемого напряжения и ограничивать максимальный ток на ESC-регуляторе. Также использовался стандартный трехфазный ESC-регулятор. Подключение регулятора скорости к модернизированному двигателю осуществлялось путем подачи напряжения на каждую из обмоток, причем с каждой из фаз ESC-регулятора напряжение подавалось на 4 обмотки двигателя.

ESC-регулятор имеет следующие параметры: входное напряжение: DC 5–36 В (удельное напряжение равно номинальному напряжению двигателя), выходной ток – в пределах 15 А, ток защиты – 15 А.

Измерения были проведены при различном количестве витков (от 8 до 16) в каждой из обмоток двигателя с шагом в 1 виток. Напряжение питания на источнике изменялось в диапазоне 5–7 В с шагом в 1 В. Ограничение по току на источнике питания было установлено на отметке 1 А. Относительно узкий диапазон напряжений обусловлен тем, что при питании, превышающем 7 В, в процессе пуска возникают большие перенапряжения, и измеряемые значения пускового тока носят случайный характер.

Ток с источника подавался на ESC-регулятор, который уже через специальную развязку питал BLDC-двигатель. Пусковой ток измерялся на входе двигателя при помощи цифрового универсального измерителя Tektronix DMM4020 (Tektronix Corporation, Китай) с базовой погрешностью 0.015%.

На вал двигателя был прикреплен винт с укрепленной на нем светоотражающей полосой для измерения частоты оборотов. Для этого использовался цифровой тахометр лазерного типа DT2234A (Shenzhen Sanpo Instrument, Китай) с разрешением 1 оборот в минуту (revolution per minute, RPM) для всего измеряемого диапазона и точностью $\pm 0.05\%$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения оптимального числа витков были получены зависимости между количеством витков в каждой из 12 обмоток двигателя, пусковым током и начальными оборотами при фиксированном напряжении батареи, питающей двигатель через регулятор скорости (рис. 2–4).

Под пусковым током понимается минимальное значение тока на каждой из фаз двигателя (он же на выходе из ESC-регулятора), при котором происходит его запуск. Стартовые обороты двигателя – это количество оборотов двигателя в минуту при токе, равном пусковому значению.

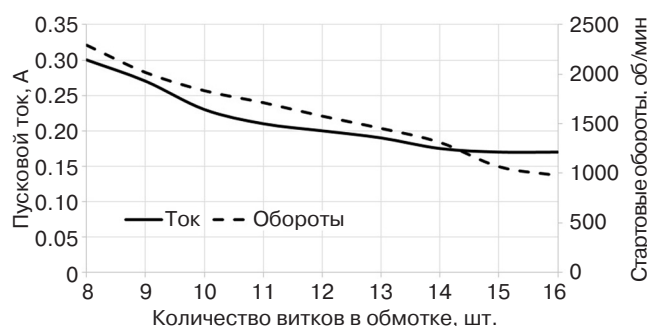


Рис. 2. Зависимость пускового тока и числа оборотов двигателя на старте от числа витков в каждой из обмоток при напряжении батареи 5 В

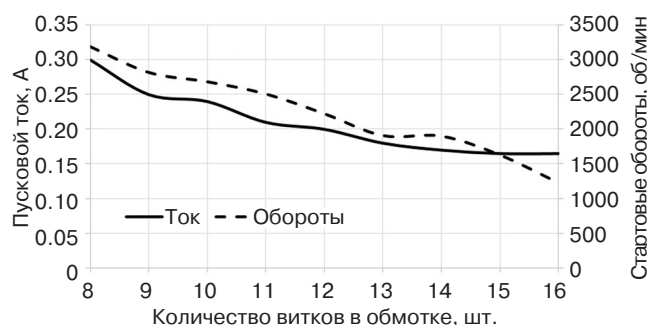


Рис. 3. Зависимость пускового тока и числа оборотов двигателя на старте от числа витков в каждой из обмоток при напряжении батареи 6 В

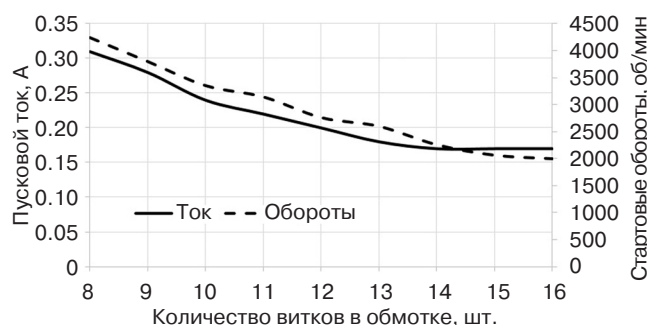


Рис. 4. Зависимость пускового тока и числа оборотов двигателя на старте от числа витков в каждой из обмоток при уровне напряжения батареи 7 В

Как показано на рис. 2–4, после 14 витков пусковой ток стабилизируется, переходя в стационарный режим, а обороты снижаются. Это значение витков является предельно допустимым. Именно при нем исчезает функциональная зависимость между пусковым током и оборотами двигателя. Характерная зависимость между этими величинами приведена на рис. 5. С увеличением количества витков пусковой ток перестает изменяться, а стартовые обороты продолжают снижаться.

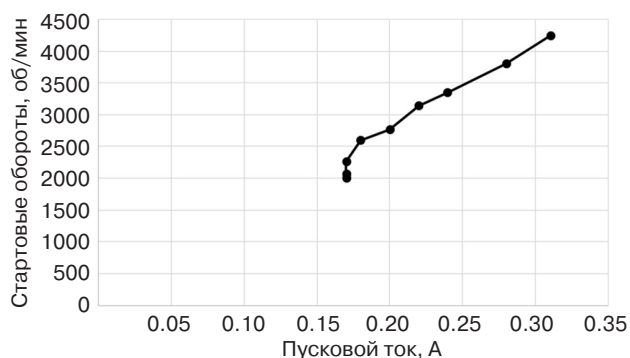


Рис. 5. Зависимость между пусковым током и стартовыми оборотами двигателя при уровне напряжения батареи 7 В

Как видно из рис. 5, имеются 3 точки с одним и тем же значением пускового тока, при этом обороты вращения двигателя снижаются. Аналогичные зависимости получены и при других исследованных уровнях напряжения батареи питания. Данный факт свидетельствует о том, что количество витков в каждой из обмоток, превышающее 14, является нецелесообразным, т.к. это приводит только к росту потерь, а не к увеличению скоростных характеристик двигателя (стартовых оборотов, в частности).

Таким образом, экспериментально установлено, что количество витков в обмотках имеет предельное значение, признаками чего является исчезновение функциональной зависимости между пусковым током и оборотами двигателя (как на рис. 5). Превышение некоторого предельного количества витков в каждой из обмоток (в исследованном случае – 14 витков) ведет к ухудшению характеристик работы BLDC-двигателя.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для объяснения полученных в предыдущем разделе зависимостей в среде *MATLAB*¹ была построена модель BLDC-двигателя с учетом отклонений, вносимых элементами двигателя и ESC-регулятором [13, 14].

Чтобы описать зависимости между пусковым током, стартовыми оборотами двигателя и количеством витков с учетом отклонений, вносимых элементами двигателя и регулятором ESC, создана математическая модель, которая учитывает характеристики элементов системы и взаимосвязь этих параметров. Модель основывается на характеристиках BLDC-двигателя с учетом параметров электромагнитного сопротивления и индуктивности.

Электрические параметры:

1. Сопротивление обмотки на фазу R_{phase} и ее индуктивность L_{phase} , которые зависят от количества витков N .
2. Внутреннее сопротивление R_{ESC} и индуктивность L_{ESC} регулятора.
3. Параметры батареи: напряжение V_{bat} и внутреннее сопротивление R_{bat} .

Пусковые параметры:

1. Пусковой ток I_{start} .
2. Стартовая угловая скорость ω_{start} .

Необходимо построить зависимости следующих параметров от количества витков:

1. Индуктивность обмотки:

$$L_{\text{phase}}(N) = k_L N^2, \quad (1)$$

где k_L – коэффициент индуктивности на виток, зависящий от материала и геометрии обмотки.

2. Сопротивление обмотки:

$$R_{\text{phase}}(N) = k_R N, \quad (2)$$

где k_R – коэффициент сопротивления на виток.

3. Полное сопротивление R_{total} и индуктивность L_{total} цепи:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{phase}} + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}}, \quad (3)$$

$$L_{\text{total}} = L_{\text{phase}} + L_{\text{ESC}}. \quad (4)$$

При запуске двигателя пусковой ток будет определяться полным сопротивлением и индуктивностью, а также напряжением батареи. В момент запуска противо-ЭДС (противодействующая электродвижущая сила) отсутствует, т.к. угловая скорость равна нулю:

$$I_{\text{start}} = \frac{V_{\text{bat}}}{R_{\text{total}}}. \quad (5)$$

Модель для зависимости пускового тока от количества витков.

Поскольку R_{total} и L_{total} зависят от количества витков N , можно выразить I_{start} как

$$I_{\text{start}}(N) = \frac{V_{\text{bat}}}{k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}}}. \quad (6)$$

¹ <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

Модель для зависимости стартовой угловой скорости от пускового тока.

Стартовая угловая скорость ω_{start} зависит от пускового крутящего момента T_{start} , создаваемого пусковым током. При этом крутящий момент определяется как:

$$T_{\text{start}} = K_t I_{\text{start}}, \quad (7)$$

где K_t – постоянная момента двигателя.

Соответственно, стартовая угловая скорость ω_{start} определяется уравнением движения, где силы сопротивления в начальный момент времени не влияют на ее значение:

$$\omega_{\text{start}} = \frac{K_t I_{\text{start}}}{J}. \quad (8)$$

С увеличением момента инерции J стартовая угловая скорость ω_{start} уменьшается, следовательно, двигатель дольше разгоняется до начальных оборотов.

Теперь можно выразить зависимости I_{start} и ω_{start} через количество витков:

$$I_{\text{start}}(N) = \frac{V_{\text{bat}}}{k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}}}, \quad (9)$$

$$\omega_{\text{start}}(N) = \frac{K_t V_{\text{bat}}}{J(k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}})}. \quad (10)$$

Для учета отклонений в системе можно добавить случайные возмущения в значения сопротивлений и индуктивностей:

- сопротивление обмотки $R_{\text{phase}} = (1 + \delta_R)k_R N$, где δ_R – случайное отклонение сопротивления обмотки;
- индуктивность обмотки $L_{\text{phase}} = (1 + \delta_L)k_L N^2$, где δ_L – случайное отклонение индуктивности обмотки.

Теперь с учетом возможных отклонений:

- пусковой ток

$$I_{\text{start}}(N) = \frac{V_{\text{bat}}}{(1 + \delta_R)k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}}}, \quad (11)$$

- стартовая угловая скорость

$$\omega_{\text{start}}(N) = \frac{K_t V_{\text{bat}}}{J((1 + \delta_R)k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}})}. \quad (12)$$

Преобразование угловой скорости в зависимость скорости в оборотах в минуту (RPM) осуществляется следующим образом:

$$RPM_{\text{start}} = \omega_{\text{start}} \frac{60}{2\pi}. \quad (13)$$

Стартовые обороты с учетом отклонений:

$$RPM_{\text{start}}(N) = \omega_{\text{start}}(N) \frac{60}{2\pi} = \frac{K_t V_{\text{bat}} 60}{2\pi J((1 + \delta_R)k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}})}. \quad (14)$$

Модель выражает зависимость стартовых оборотов двигателя RPM_{start} от различных факторов, таких как количество витков N , напряжение питания V_{bat} , сопротивление R , индуктивность обмоток, а также моменты инерции системы. Крутящий момент двигателя T пропорционален току, протекающему через обмотки, с учетом коэффициента K_t , который отражает конструктивные особенности двигателя. При старте двигатель сталкивается с моментом сопротивления, определяемым сопротивлением обмоток, внешних цепей (контроллера R_{ESC} , батареи R_{bat}) и внутренним трением.

В формуле учитываются отклонения в сопротивлении обмоток δ_R , которые могут возникать из-за нагрева или других внешних факторов. Сопротивление всей системы представлено в виде суммы $(1 + \delta_R)k_R N + R_{\text{ESC}} + R_{\text{bat}}$.

Индуктивность обмоток влияет на время реакции двигателя, но в данной модели индуктивность включена косвенно через изменение электрических параметров (сопротивление и падение напряжения). Увеличение количества витков N приводит к снижению стартовых оборотов из-за возрастания общего сопротивления системы. Увеличение напряжения питания V_{bat} повышает стартовые обороты. Отклонения в сопротивлении обмоток δ_R и других элементов системы могут заметно снизить эффективность работы двигателя на старте.

Таким образом, данная модель демонстрирует, как стартовые обороты зависят от электрических и механических параметров системы. Она позволяет учитывать реальное состояние компонентов и помогает оптимизировать конструкцию двигателя для достижения нужных характеристик.

Результаты моделирования пускового тока, соответствующие рис. 2–4, представлены на рис. 6. Здесь приведены экспериментальная и расчетная зависимость пускового тока от числа витков при уровне напряжения батареи 6 В. При других уровнях напряжения батареи наблюдается аналогичное хорошее соответствие расчетных значений с экспериментом. Следовательно, построенная модель достаточно хорошо описывает реальные зависимости пускового тока.

Особый интерес представляют результаты моделирования КПД двигателя, которые представлены на рис. 7. Видно, что при количестве витков менее 8 и более 14 значения КПД – минимальные, особенно, по сравнению с диапазоном витков от 12 до 14. Другими словами, при малом количестве витков в обмотке наблюдается низкая эффективность работы

двигателя ввиду недостаточной интенсивности магнитного поля. При количестве витков более 14 наблюдается низкий крутящий момент из-за высоких потерь мощности на сопротивлении обмотки.

На основании приведенных результатов можно сделать следующий вывод: из рядов данных для пускового тока и стартовых оборотов двигателя необходимо удалить значения, которые соответствуют 15 и 16 виткам. При этом добавлять значения при 6 и 7 витках также нецелесообразно, т.к. соответствующие им КПД слишком низкие. В этом случае получим полноценные функциональные зависимости между стартовыми оборотами и пусковым током. На рис. 8 представлены зависимости числа оборотов от пускового тока и их аппроксимации при 3 уровнях напряжения батареи питания.

Как видно, все три графика можно аппроксимировать линейными зависимостями [15], причем угол наклона этих линий будет одним и тем же.

Наряду с предложенной выше математической моделью разработана параметрическая модель, которая позволяет просто и быстро выполнить инженерные расчеты, а именно, предсказывает значение стартовых оборотов RPM_{start} по значению пускового тока I_{start} и напряжению батареи V_{bat} для диапазона витков в обмотке от 8 до 14.

В результате моделирования получена следующая аналитическая зависимость:

$$\lg RPM_{start} = 1.817I_{start} + \frac{1}{8}V_{bat} + 2.2. \quad (15)$$

Таким образом, становится возможным рассчитать значение стартовых оборотов по легко измеряемым характеристикам пускового тока и напряжению батареи для различного количества витков. Следовательно, возможно конструировать двигатели с заранее ожидаемыми характеристиками.

В таблице приведены значения оборотов двигателя, рассчитанные по формуле (15), в сравнении с величинами, измеренными экспериментально для батареи с напряжением 5 В.

Таблица. Сравнение значений стартовых оборотов двигателя, полученных экспериментально и исходя из расчета по формуле (15) при значении напряжения батареи питания 5 В

Количество витков в каждой из обмоток двигателя, шт.	Стартовый ток, А	Стартовые обороты двигателя, эксперимент	Стартовые обороты двигателя, расчет	Относительное расхождение
8	0.30	2293	2345	2%
9	0.27	2017	2068	3%
10	0.23	1833	1749	5%
11	0.21	1712	1609	6%
12	0.20	1576	1543	2%
13	0.19	1452	1480	2%
14	0.175	1310	1390	6%

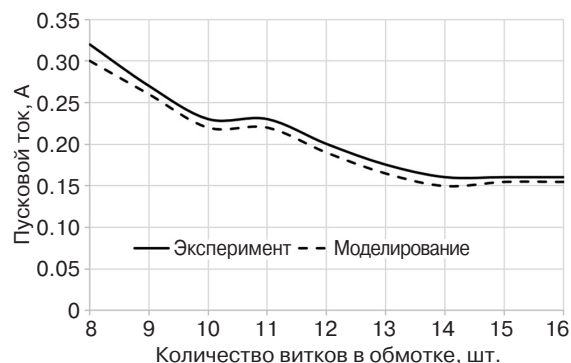


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная зависимости пускового тока модернизированного двигателя от числа витков в каждой из обмоток при напряжении батареи 6 В

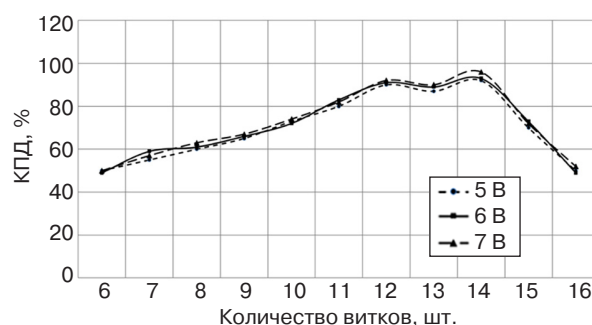


Рис. 7. Зависимость КПД двигателя от количества витков в каждой из обмоток при напряжениях батареи 5–7 В

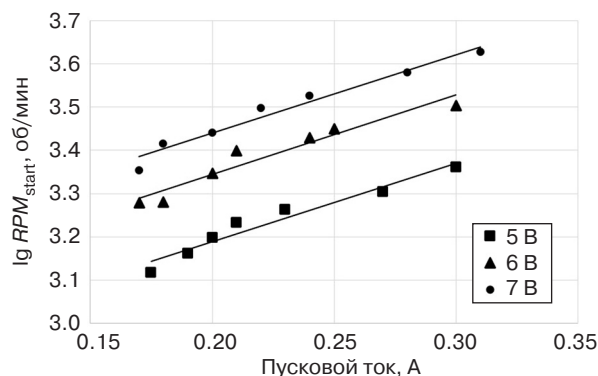


Рис. 8. Зависимости числа оборотов от пускового тока при различном уровне напряжения батареи питания

Как видно из таблицы, относительное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 6%. Для других напряжений батареи относительное расхождение не превышает 9%.

Таким образом, можно утверждать, что предложенная в работе формула позволяет определить стартовые обороты двигателя на стадии проектирования с достаточной для инженерных расчетов точностью.

ВЫВОДЫ

Построена математическая модель модернизированного бесщеточного двигателя постоянного тока, хорошо согласующаяся с реальным прототипом. С помощью данной модели можно определять оптимальное количество витков в каждой из обмоток через расчет КПД двигателя.

Построена параметрическая модель расчета стартовых оборотов BLDC-двигателя по значениям пускового тока и напряжения питающей батареи. Показана взаимосвязь стартовых оборотов модернизированного двигателя с базовыми характеристиками источника питания и ESC-регулятора, которые можно легко измерить. Полученная формула позволит проводить инженерные расчеты на стадии проектирования двигателей.

Для получения аналогичных зависимостей для двигателей других конфигураций необходимы

дальнейшие исследования и построение соответствующих математических моделей. Также наличие постоянного слагаемого «2.2» в формуле (15) позволяет считать, что обнаружены не все фундаментальные зависимости, и, вероятно, обороты двигателя определяются не двумя, а тремя физическими величинами. Для подтверждения данной гипотезы предполагаются дальнейшие исследования.

Вклад авторов

А.С. Кривогузова – литературный обзор, вывод расчетных формул, написание компьютерных программ, проведение модельных расчетов, построение графиков, обсуждение результатов.

С.Н. Ткаченко – постановка задачи, проверка математической корректности вывода расчетных формул, корректура текста статьи, обсуждение результатов.

А.А. Шpileвой – постановка задачи, идея вывода расчетных соотношений, обсуждение результатов.

Authors' contributions

A.S. Krivoguzova – literature review, deriving the calculation formulas, writing the computer programs, conducting the model calculations, plotting, and discussing the results.

S.N. Tkachenko – formulating the problem, verifying the mathematical correctness of the calculation formulas, proofreading the text of the article, and discussing the results.

A.A. Shpilevoy – formulating the problem, the idea of deriving the calculation formulas, and discussing the results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Moosavi S.S., Djerdir A., Amirat Y.A., Khaburi D.A. Demagnetization fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors: A review of the state-of-the-art. *J. Magn. Magn. Mater.* 2015;391:203–212. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.04.062>
2. Mohanraj D., Arulavid R., Verma R., Sathyasekar K., Barnawi A., Chokkalingam B., Mihet-Popa L. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access.* 2022;10:54833–54869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>
3. Nguyen Q., Tran V., Pham Q.D., Giap V.N., Trinh M. Design brushless DC motor control by using proportional-integral strategy for a smart storage cabinet system. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2023;14:708–718. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v14.i2.pp708-718>
4. Carev V., Roháč J., Tkachenko S., Alloyarov K. The Electronic Switch of Windings of a Standard BLDC Motor. *Appl. Sci.* 2022;12(21):11096. <https://doi.org/10.3390/app122111096>
5. Conradt R., Heidinger F., Birke K. Methodology for Determining Time-Dependent Lead Battery Failure Rates from Field Data. *Batteries.* 2021;7(2):39. <https://doi.org/10.3390/batteries7020039>
6. Zhu Z., Leong J. Analysis and mitigation of torsional vibration of PM brushless AC/DC drives with direct torque controller. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2012;48(4):1296–1306. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2199452>
7. Premkumar K., Manikandan B.V. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. *Neurocomputing.* 2014;138:260–270. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2014.01.038>
8. Assoun I., Idkhajine L., Nahid-Mobarakeh B., Meibody-Tabar F., Monmasson E., Pacault N. Wide-Speed Range Sensorless Control of Five-Phase PMSM Drive under Healthy and Open Phase Fault Conditions for Aerospace Applications. *Energies.* 2023;16(1):279. <https://doi.org/10.3390/en16010279>
9. Tapre M., Karampuri R. Design and Comparison of Five-Phase Induction Motors with Different Dimensions for Heavy Duty Electric Vehicles. In: *IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. IEEE; 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SeFeT57834.2023.10245615>
10. Xia K., Li Z., Lu J., Dong B., Bi C. Acoustic noise of brushless DC motors induced by electromagnetic torque ripple. *J. Power Electron.* 2018;17(4):963–971. <https://doi.org/10.6113/JPE.2017.17.4.963>

11. Viswanathan V., Seenithangom J. Commutation torque ripple reduction in the BLDC motor using modified SEPIC and three-level NPC inverter. *IEEE Trans. Power Electron.* 2018;33(1):535–546. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2671400>
12. Varshney A., Gupta D., Dwivedi B. Speed response of brushless DC motor using fuzzy PID controller under varying load condition. *J. Electr. Syst. Inf. Technol.* 2017;4(2):310–321. <https://doi.org/10.1016/j.jesit.2016.12.014>
13. Manda P., Veeramalla S.K. Brushless DC motor modeling and simulation in the MATLAB/SIMULINK software environment. *Adv. Modelling Anal. B.* 2021;64(1–4):27–33. https://doi.org/10.18280/ama_b.641-404
14. Sial M., Sahoo N. Torque ripple minimization and speed control of switched reluctance motor drives using extremum-seeking PI controller. *Electr. Eng.* 2024;106(6):7301–7322. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02427-3>
15. Harris F.E. *Mathematics for Physical Science and Engineering*. Academic Press; 2014. 944 p.

Об авторах

Кривогузова Александра Сергеевна, аспирант, Высшая школа компьютерных наук и искусственного интеллекта, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14). E-mail: krivoguzova99@bk.ru. SPIN-код РИНЦ 6326-2294, <https://orcid.org/0000-0002-4090-662X>

Ткаченко Сергей Николаевич, к.т.н., доцент ОНК «Институт высоких технологий», руководитель Цифровой кафедры, ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14). E-mail: sntkachenko@kantiana.ru. Scopus Author ID 35750902000, SPIN-код РИНЦ 3717-6698, <https://orcid.org/0000-0002-4708-6556>

Шпилевой Андрей Алексеевич, к.ф.-м.н., доцент, заместитель руководителя ОНК «Институт высоких технологий», ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (236041, Россия, Калининград, ул. А. Невского, д. 14). E-mail: ashpilevoi@kantiana.ru. Scopus Author ID 6602332593, <https://orcid.org/0000-0003-2610-6551>

About the Authors

Alexandra S. Krivoguzova, Postgraduate Student, Higher School of Computer Science and Artificial Intelligence, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236041 Russia). E-mail: krivoguzova99@bk.ru. RSCI SPIN-code 6326-2294, <https://orcid.org/0000-0002-4090-662X>

Sergey N. Tkachenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Institute of High Technologies, Head of the Digital Department, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236041 Russia). E-mail: sntkachenko@kantiana.ru. Scopus Author ID 35750902000, RSCI SPIN-code 3717-6698, <https://orcid.org/0000-0002-4708-6556>

Andrey A. Shpilevoy, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Deputy Head, Institute of High Technologies, Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevskogo ul., Kaliningrad, 236041 Russia). E-mail: ashpilevoi@kantiana.ru. Scopus Author ID 6602332593, <https://orcid.org/0000-0003-2610-6551>