

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-130-149
УДК 629.113



Научная статья | Эксплуатация автомобильного транспорта

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ-ГЕНЕРАТОРА АВТОМОБИЛЯ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

П.А. Киселёв, А.И. Федотов, О.С. Яньков

Авторами статьи приводится описание и анализ процессов функционирования синхронного электродвигателя-генератора (ЭДГ). Представлен обзор математических описаний синхронного ЭДГ. Предложено упрощенное математическое описание, позволяющее моделировать процесс функционирования ЭДГ гибридной силовой установки (ГСУ) в типовых режимах движения колесных транспортных средств (КТС). Представлены функциональные зависимости силы тока, мощности и крутящего момента от частоты вращения ротора синхронного ЭДГ автомобиля Toyota Prius.

***Цель** – разработать упрощённое математическое описание синхронного электродвигателя-генератора автомобиля с гибридной силовой установкой.*

***Метод или методология проведения работы** – численный метод, основанный на конечно-разностной схеме метода Парка, с использованием специального численно-итерационного метода составления уравнений движения.*

***Результаты** – разработано упрощённое математическое описание, которое позволяет определять функциональные зависимости, необходимые для анализа функционирования КТС с ГСУ.*

***Область применения результатов.** Полученные результаты целесообразно применять при моделировании процессов функцио-*

нирования синхронного электродвигателя-генератора гибридной силовой установки колесных транспортных средств.

Ключевые слова: автомобиль, гибридная силовая установка, синхронный электродвигатель, сила тока, вырабатываемое напряжение, рекуперация, мощностные характеристики, крутящий момент, ротор, статор, магнитное поле, математическое описание

Для цитирования. Киселёв П.А., Федотов А.И., Яньков О.С. Математическое описание процессов функционирования электродвигателя-генератора автомобиля с гибридной силовой установкой // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 2. С. 130-149. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-130-149

Original article | Operation of Road Transport

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESSES OF FUNCTIONING OF THE ELECTRIC MOTOR-GENERATOR OF A CAR WITH A HYBRID POWER PLANT

P.A. Kiselev, A.I. Fedotov, O.S. Yankov

The authors of the article describe and analyze the processes of functioning of a synchronous electric motor-generator (EDG). A review of mathematical descriptions of synchronous EDG is presented. A simplified mathematical description is proposed that makes it possible to simulate the process of functioning of the hybrid propulsion system (GSU) in typical modes of movement of wheeled vehicles (CTS). The functional dependences of the current, power and torque on the rotor speed of the synchronous EDG of the Toyota Prius car are presented.

*The **goal** is to develop a simplified mathematical description of a synchronous electric motor-generator of a car with a hybrid power plant.*

*The **method or methodology** of the work is a numerical method based on the finite – difference scheme of the Park method, using a special numerical-iterative method of composing equations of motion.*

***Results** – a simplified mathematical description has been developed, which allows to determine the functional dependencies necessary for the analysis of the functioning of the CCC with GSU.*

*The **scope of the results**. It is advisable to apply the results obtained when modeling the processes of functioning of a synchronous electric motor-generator of a hybrid power plant of wheeled vehicles.*

***Keywords:** car, hybrid power plant, synchronous electric motor, current strength, generated voltage, recovery, power characteristics, torque, rotor, stator, magnetic field, mathematical description*

***For citation.** Kiselev P.A., Fedotov A.I., Yankov O.S. Mathematical Description of the Processes of Functioning of the Electric Motor-Generator of a Car with a Hybrid Power Plant. International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 130-149. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-2-130-149*

Введение

На сегодняшний день во всем Море активно используются синхронные ЭД, обеспечивающие преобразование электрической энергии в механическую. Наиболее часто они применяются в прокатных станах, поршневых насосах, компрессорах, а также в автомобилях с гибридными и электрическими силовыми установками.

В КТС гибридным силовым приводом под термином ЭДГ понимается синхронный электродвигатель-генератор (см. рис. 1), который помимо тягового режима может работать как генератор (если необходимо зарядить тяговую батарею (ТБ)), а также как стартер, при необходимости запуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) [14]. Такой последовательно-параллельной ГСУ у автопроизводителя Toyota оснащаются автомобили Prius.

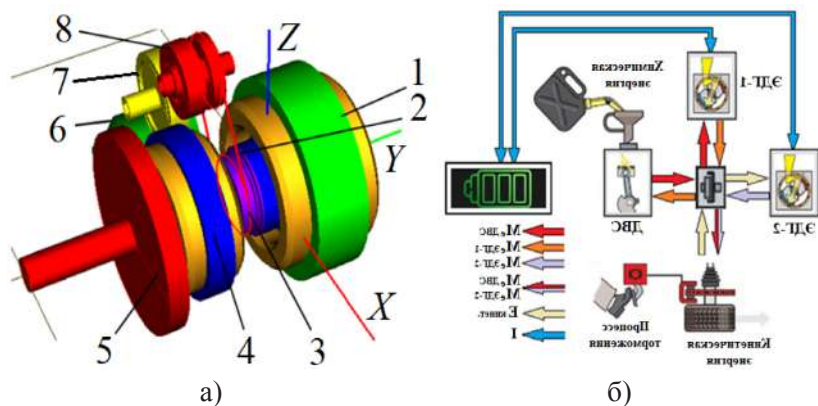


Рис. 1. Гибридная силовая установка КТС:

а) – трехмерная модель последовательно-параллельной ГСУ силовой установки автомобиля Toyota Prius в программной среде «Универсальный механизм»; б) – принципиальная схема функционирования последовательно-параллельной ГСУ Toyota Prius: 1 – тяговый электродвигатель (ЭДГ-2); 2 – цепная передача; 3 – планетарный редуктор; 4 – электродвигатель-генератор (ЭДГ-1); 5 – маховик ДВС; 6 – главная пара; 7, 8 – промежуточные шестерни.

В данной компоновке ГСУ (см. рис 1) распределение потоков мощности и крутящего момента между ДВС, ЭДГ-1 и ЭДГ-2 выполняет планетарный редуктор 3. ЭДГ-1 работает в режиме стартера, когда необходимо запустить ДВС. После запуска он переходит в режим генератора для зарядки тяговой батареи. ЭДГ-2 выполняет функцию тягового электродвигателя, то есть передает крутящий момент на ведущие колеса КТС. В режиме рекуперации ЭДГ-2 так же заряжает тяговую батарею.

Конструкция ЭДГ состоит из статора 6 и ротора 7 (рис. 2). Одним из компонентов статора являются трехфазовая катушка 5, которая соединена при помощи кабеля с системой управления. Ротор 7 жестко связан с выходным валом, который установлен на подшипниках 3, расположенных в боковых крышках 2. В свою очередь боковые крышки 2 крепятся к корпусу электродвигателя 4 соединительными винтами 1.

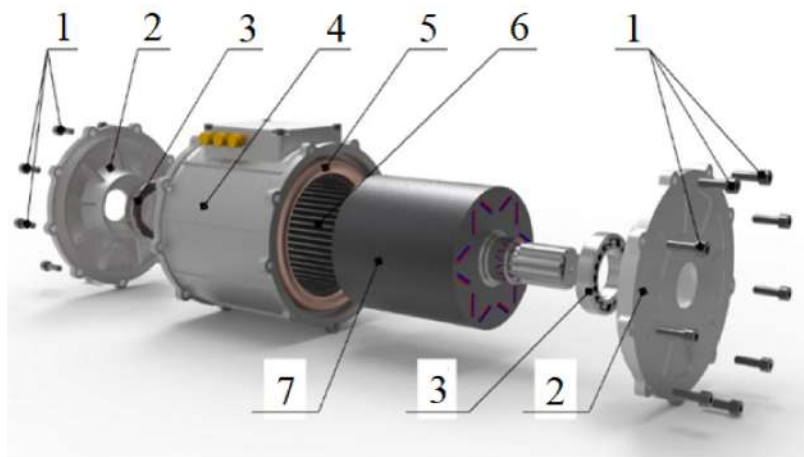


Рис. 2. Трехмерная модель синхронного ЭДГ [14]:

1 – крепёжные винты; 2 – боковая крышка; 3 – подшипник ротора; 4 – корпус ЭДГ; 5 – катушка статора; 6 – статор; 7 – ротор.

Анализ математических описаний ЭДГ

Для контроля технического состояния и эффективной диагностики КТС с ГСУ в условиях эксплуатации, актуальным вопросом является разработка математического описания ЭДГ, позволяющего получать зависимости, характеризующие влияние технического состояния ГСУ на диагностические параметры и параметры, характеризующие тягово-динамические свойства КТС. Решение этой задачи позволит значительно сократить временные и трудовые затраты на поиск неисправностей, и повысить эффективность эксплуатации КТС с ГСУ. В данном разделе статьи для достижения поставленной задачи выполнен анализ трех существующих математических описаний синхронного ЭДГ.

1. Математическое описание выходных характеристик ЭДГ.

Для разработки математического описания синхронного ЭДГ, рассмотрим наиболее упрощённую её модель [11]. Подобно внешней скоростной характеристике ДВС, при расчете крутящего момента на роторе ЭДГ $M_{\text{эд}}$ и мощности $N_{\text{эд}}$ развиваемой ЭДГ будем осно-

вываться на их зависимости от частоты вращения ротора $n_{эд}$ при работе ЭДГ под нагрузкой.

Характеристика крутящего момента $M_{эд}$ при работе ЭДГ под нагрузкой вычисляется по выражению:

$$M_{эд} = \begin{cases} M_{эд\ max} & \text{при } 0 \leq n_{эд} \leq n_{эд\ min} \\ \frac{30N_{эд.ном}}{\pi n_{эд}} & \text{при } n_{эд\ min} < n_{эд} \leq n_{эд\ max} \end{cases}, [\text{Н}\cdot\text{м}] \quad (1)$$

где $M_{эд\ max}$ – крутящий момент ЭД [Нм]; $N_{эд}$ – мощность ЭД [Вт]; $n_{эд}$ – частота вращения ротора электродвигателя [мин⁻¹].

Мощность тягового электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$N_{эд} = \frac{M_{эд}\pi n_{эд}}{30}, [\text{Вт}] \quad (2)$$

По формулам (1,2) получены результаты расчета крутящего момента на роторе ЭДГ $M_{эд}$ и мощности $N_{эд.ном.}$, развиваемой ЭДГ в зависимости от частоты вращения ротора синхронного ЭДГ (рис. 3) при её работе под нагрузкой.

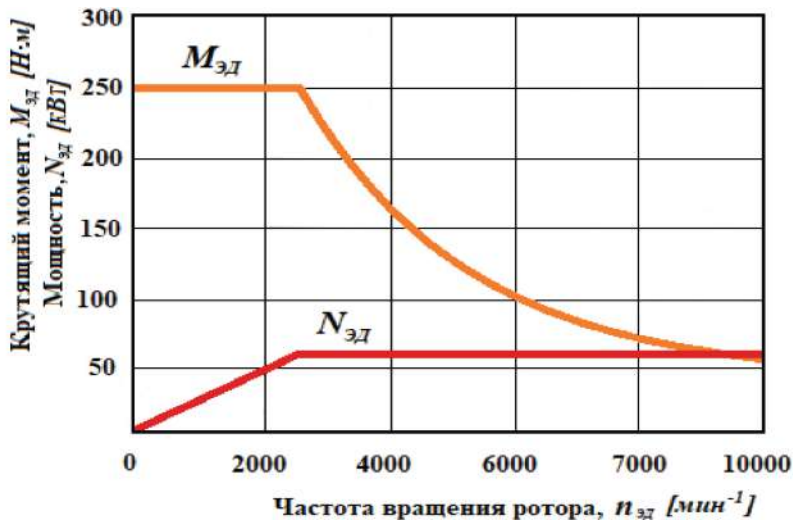


Рис. 3. Функциональная зависимость крутящего момента и мощности от частоты вращения ротора ЭДГ, при разгоне КТС под нагрузкой [11]

Представленное математическое описание ЭДГ просто в описании, так как позволяет вычислять крутящий момент $M_{\text{эд}}$ и мощность $N_{\text{эд}}$ в зависимости от частоты вращения $n_{\text{эд}}$ ротора ЭДГ. Такое решение позволяет значительно сократить время в процессе моделирования. Однако математическое описание не позволяет выполнять анализ энергетических параметров ЭДГ, такие как напряжение $U_{\text{эд}}$ и ток $I_{\text{эд}}$.

Это важные параметры, которые характеризуют эффективность работы и техническое состояние ГСУ, а также эффективность работы тяговой аккумуляторной батареи.

2. Математическое описание ЭДГ с вращающейся системой координат dq . Для разработки математического описания обратимся к рис. 4. Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора. Вектор тока статора $\vec{I}$ вращается, так как образован за счет гармонических токов в катушках (см. рис 4а), равных друг другу по амплитуде, частоте и сдвинутых относительно друг друга на равный угол. При управлении ЭДГ делают упрощение и принимают направление вектора поля статора $\vec{F}_s$ полностью совпадающим с направлением вектора тока $\vec{I}$. Таким образом удобно контролировать вращение вектора поля $\vec{F}_s$, который будет пропорционален вектору тока $\vec{I}$ [14].

Положение ротора (см. рис 4б), при котором между вектором магнитного поля ротора $\vec{F}_r$ и вектором магнитного поля статора $\vec{F}_s$ образуется угол $\Delta\theta_E = \pi/2$ [рад], будет соответствовать такому взаимодействию этих полей, при котором образовывается наибольший крутящий момент ротора. Именно в таком расположении полюса ротора и статора будут наиболее эффективно взаимодействовать друг с другом: одноименные полюса отталкиваются, разноименные притягиваются. Такое положение вектора тока $\vec{I}$ будет являться оптимальным для эффективной работы ЭДГ [14].

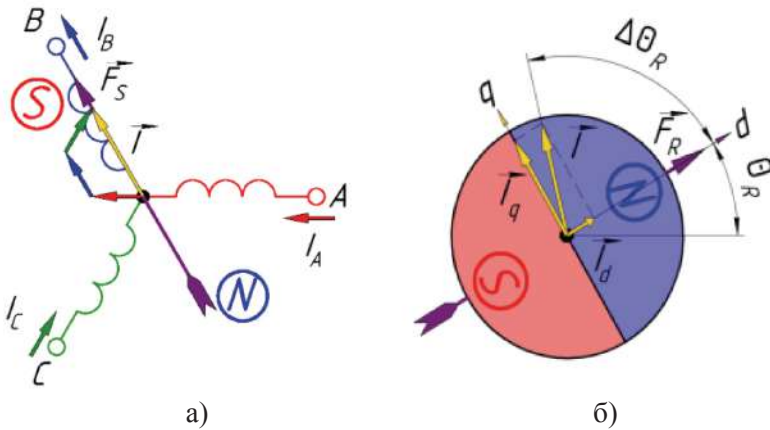


Рис. 4. Схемы, поясняющие принцип работы синхронного ЭДГ [14]:

а) – результирующие векторы тока и вектор магнитного поля статора: A – катушка фазы; B – катушка фазы; C – катушка фазы; I_A – ток, в обмотке A ; I_B – ток, в обмотке B ; I_C – ток, в обмотке C ; $\vec{I}$ – результирующий вектор тока; $\vec{F}_S$ – вектор магнитного поля; б) – результирующий вектор тока и вектор магнитного поля ротора в системе координат dq ; $\vec{I}$ – результирующий вектор тока статора [A]; $\vec{F}_R$ – вектор магнитного поля ротора; $\vec{I}_d$ – составляющая вектора $\vec{I}$ на ось d ; $\vec{I}_q$ – составляющая вектора $\vec{I}$ на оси q [A]; θ_R – угол поворота ротора; $\Delta\theta_R$ – угол регулировки положения вектора $\vec{I}$ [рад].

Для векторов напряжения на статоре синхронного ЭДГ во вращающейся системе координат dq можно записать следующие уравнения [5]:

$$\begin{cases} U_{sd} = L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s I_{sd} - \omega_e L_{sq} I_{sq} \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} + E + R_s I_{sq} + \omega_e L_{sd} I_{sd} \end{cases}, [\text{В}] \quad (3)$$

где: L_{sd} , L_{sq} – индуктивность катушек статора по осям d и q [Гн]; R_s – сопротивление катушек статора [Ом]; E – амплитуда вектора ЭДС; I_{sd} , I_{sq} – векторы тока статора по осям d и q [A]; ω_e – угловая скорость ротора [рад⁻¹]; $\frac{dI_{sd}}{dt}$ и $\frac{dI_{sq}}{dt}$ – скорость изменения тока по осям d и q .

Запишем уравнение относительно дифференциалов токов, [5]:

$$\begin{cases} pI_{sd} = \frac{1}{L_{sd}} \cdot (U_{sd} - R_S I_{sd} + \omega_e L_{sq} I_{sq}) \\ pI_{sq} = \frac{1}{L_{sd}} \cdot (U_{sq} - R_S I_{sq} - \omega_e L_{sd} I_{sd} - \psi_f \omega_e) \end{cases}, [\text{A}] \quad (4)$$

где: p – символ дифференцирования, тождественно равный d/dt (оператор дифференцирования).

Потокосцепление статора формируется током в катушке, которая имеет индуктивность и магнитным потоком ротора. Во вращающейся системе координат оно будет иметь следующий вид [5]:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} I_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} I_{sq} \end{cases}, [\text{Вб}] \quad (5)$$

где: ψ_{sd}, ψ_{sq} – составляющие вектора потокосцепления по осям d и q [Вб]; ψ_f – амплитуда потокосцепления между ротором и фазной катушкой.

С учетом формул (3-5) уравнение для вычисления развиваемого ЭДГ крутящего момента примет вид [5]:

$$M_{\text{эд}} = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq} \psi_{sd} - I_{sd} \psi_{sq}) = \frac{3Z_p}{2} (I_{sq} \psi_f + I_{sd} I_{sq} (L_{sd} - L_{sq})), [\text{Н}\cdot\text{м}] \quad (6)$$

где: Z_p – число пар полюсов магнита электродвигателя; ψ_f – амплитуда потокосцепления ротора и фазной катушки.

Данное математическое описание ЭДГ с вращающейся системой координат dq позволяет описать энергетические параметры (напряжение U_{sd}, U_{sq} ; токи I_{sd}, I_{sq} ; потокосцепление ψ_{sd}, ψ_{sq}) протекающие в ЭДГ на разных режимах движения КТС с ГСУ. С их помощью можно с довольно высокой точностью рассчитать характеристики крутящего момента $M_{\text{эд}}$ и мощности $N_{\text{эд}}$ ЭДГ под нагрузкой (рис 5).

3. Математическое описание ЭДГ в неподвижной системе координат А, В и С. Для описания такого математического описания ЭДГ возникает необходимость вычислять мгновенные значения токов I_A, I_B, I_C [А], протекающих в фазных катушках [5, 15]:

$$\left\{ \begin{aligned} I_A &= \left(\frac{k}{T_p + 1} \right) \cdot (2U_A - U_B - U_C + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1B} + E_{1C} - 2E_{1A})) \\ I_B &= \left(\frac{k}{T_p + 1} \right) \cdot (2U_B - U_C - U_A + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1C} + E_{1A} - 2E_{1B})) \\ I_C &= \left(\frac{k}{T_p + 1} \right) \cdot (2U_C - U_A - U_B + \psi_f Z_p \omega_R (E_{1A} + E_{1B} - 2E_{1C})); \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{3R_{\phi i}}$$

$$T_p = \frac{L_{\phi i} - L_{\phi \phi i}}{R_{\phi i}};$$

где U_A, U_B, U_C – напряжение инвертора, поступающие на вход фаз A, B, C [В]; ψ_f – амплитуда потокосцепления между ротором и фазной катушкой, ω_R – угловая скорость вращения ротора электродвигателя [рад⁻¹]; Z_p – количество полюсов статора; T_p – постоянная времени инерционного звена первого порядка [с]; k – коэффициент усиления инерционного звена первого порядка, описывающий сопротивление катушек статора; $R_{\phi i}$ – активное сопротивление i -той фазной катушки статора [Ом]; $L_{\phi i}$ – индуктивность i -той фазной катушки статора, [Гн]; $L_{\phi \phi i}$ – взаимная индуктивность двухфазных катушек статора [Гн]; E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} – единичные функции форм ЭДС [5,15].

Единичные функции форм ЭДС определяются из выражений [5,15]:

$$E_{1A} = \sin(\theta_E + \delta_A), [\text{В}] \quad (8)$$

$$E_{1B} = \sin(\theta_E + \delta_B); \quad (9)$$

$$E_{1C} = \sin(\theta_E + \delta_C); \quad (10)$$

где θ_E – угол поворота поля статора, [рад]; $\delta_A, \delta_B, \delta_C$ – углы сдвига фаз A, B и C соответственно:

$$\theta_E = \Theta_R \cdot Z_p, [\text{рад}] \quad (11)$$

где Θ_R – угол поворота ротора, [рад]; Z_p – количество полюсов статора.

Угловая скорость ротора электродвигателя определяется выражением [5, 15]:

$$\omega_R = \frac{1}{J} \int (M_e - M_c) dt, [\text{рад}^{-1}] \quad (12)$$

где M_c – момент сопротивления $[\text{Н} \cdot \text{м}]$; J – момент инерции подвижных частей электропривода, $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$.

Мгновенные ЭДС E_A , E_B и E_C в фазах статора ЭДГ можно определить, используя единичные функции формы ЭДС, в соответствии с выражениями, [5,15]:

$$E_A = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1A}, [\text{В}] \quad (13)$$

$$E_B = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1B}; \quad (14)$$

$$E_C = \psi_F \cdot Z_P \cdot \omega_R \cdot E_{1C}; \quad (15)$$

где ψ_F – амплитуда потокосцепления между ротором и фазной обмоткой, $[\text{Вб}]$; ω_R – угловая скорость вращения ротора электродвигателя, $[\text{рад}^{-1}]$.

Крутящий момент $M_{\text{эд}}$ на роторе синхронного электродвигателя рассчитывается по формуле [5,15]:

$$M_{\text{эд}} = \frac{I_A E_A + I_B E_B + I_C E_C}{\omega_R}, [\text{Н} \cdot \text{м}] \quad (16)$$

Данное математическое описание ЭДГ в неподвижной системе координат A , B и C позволяет описать энергетические параметры (токи I_A , I_B , I_C ; мгновенные ЭДС E_A , E_B и E_C в фазах статора) протекающие в ЭДГ на разных режимах движения КТС с ГСУ. С их помощью можно с довольно высокой точностью рассчитать характеристики крутящего момента $M_{\text{эд}}$ и мощности $N_{\text{эд}}$ ЭДГ под нагрузкой (рис. 5).

По расчетным формулам (3-16) получены результаты зависимостей крутящего момента $M_{\text{эд}}$ и мощности $N_{\text{эд}}$ от частоты вращения ротора $n_{\text{эд}}$ синхронного ЭДГ [15], которые представлены на рис. 5.

При моделировании исследуемых процессов с использованием таких математических описаний ЭДГ необходимы большие вычислительные мощности электронно-вычислительных машин (ЭВМ).

В связи с этим было принято решение оптимизировать математическое описание, то есть создать его упрощенную версию.

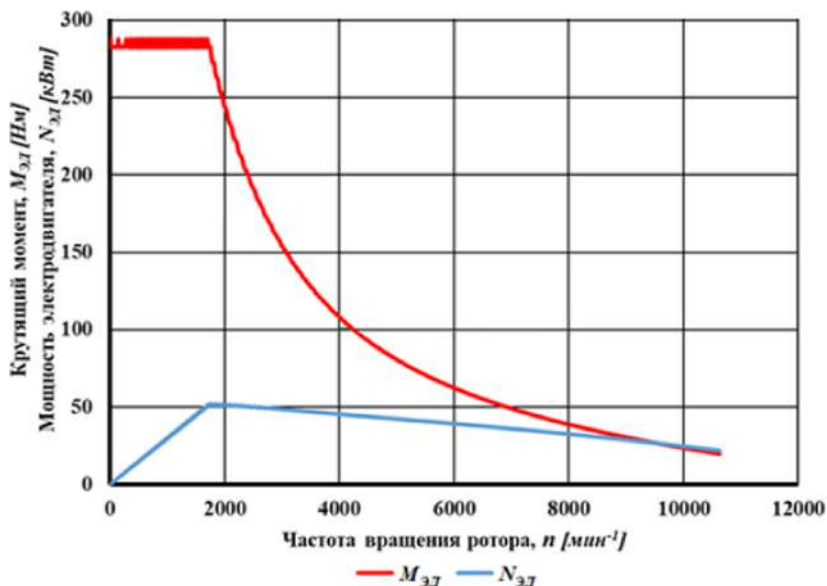


Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика синхронного ЭДГ [15].

Материалы и методы

Упрощённое математическое описание. Для разработки упрощенного математического описания ЭДГ были использованы уравнения, описывающие вырабатываемые им крутящий момент и эффективную мощность в зависимости от силы тока, проходящего через катушки статора.

Расчет тока, поступающего от инвертора на ЭДГ:

$$I_D = \frac{U_D \cdot \beta + U_R \cdot (1 - \beta)}{R_S + Z \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{n}{30}}, [A] \quad (14)$$

где: $U_D \cdot \beta$ – составляющая напряжения от инвертора [В]; $U_R \cdot (1 - \beta)$ – составляющая генерируемого напряжения [В]; R_S – активное сопротивление катушек статора и системы высоковольтных соединений [Ом]; $Z \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{n}{30}$ – индуктивное сопротивление катушек статора.

Расчет вырабатываемого ЭДС выполняли с использованием уравнения:

$$U_R = \frac{Z \cdot \Psi \cdot \pi \cdot n}{30}, [\text{В}] \quad (15)$$

где: Z – число пар полюсов двигателя; Ψ – потокосцепление магнитной системы двигателя; n – частота вращения ротора двигателя $[\text{мин}^{-1}]$.

Расчет тока в статоре двигателя выполняли по формуле:

$$I_{\text{эд}} = \begin{cases} I_{\text{max}} & \text{если } I_D > I_{\text{max}} \\ I_D & \text{если } I_D < I_{\text{max}} \end{cases} [\text{А}] \quad (16)$$

где: I_{max} – ток, ограниченный блоком управления силовой установкой $[\text{А}]$.

Расчет крутящего момента выполняли по формуле:

$$M_{\text{эд}} = \frac{I}{K_{\text{исп}}}, [\text{Н}\cdot\text{м}] \quad (17)$$

где: $K_{\text{исп}}$ – коэф. использования тока, учитывающий тепловые, магнитные, механические потери в двигателе.

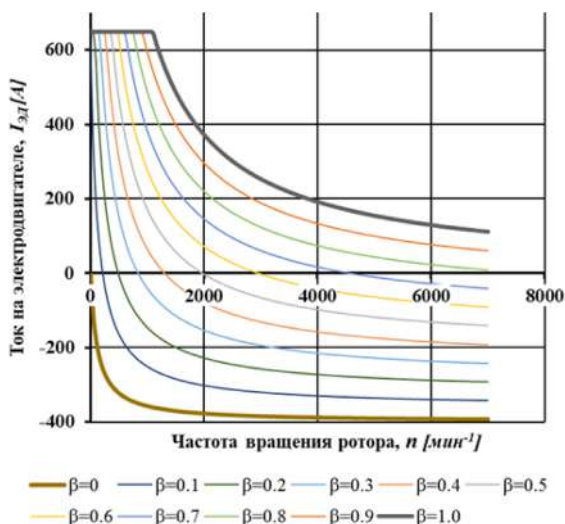


Рис. 6. Функциональная зависимость тока $I_{\text{эд}}$ в статоре от частоты вращения ротора $n_{\text{эд}}$ ЭДГ в тяговом режиме при варьировании коэффициента β

По вышеперечисленным формулам была рассчитана токоскоростная характеристика ЭДГ автомобиля Toyota Prius. В качестве исходных данных были приняты: $n_{MAX} = 6000 \text{ мин}^{-1}$; $M_{eMAX} = 400 \text{ Нм}$; $n_{mMAX} = 1200 \text{ мин}^{-1}$; $N_{MAX} = 50000 \text{ Вт}$; $U_{max} = 330 \text{ В}$; $I_{max} = 650 \text{ А}$; $w = 0.615$; $\psi = 0.4 \text{ Вб}$; $z = 4$; $L = 0.001 \text{ Гн}$; $R_s = 0.05 \text{ Ом}$; $E = 1 \text{ В}$. В процессе расчетов варьировали величиной управляющего параметра – бета β .

В зависимости от тока ЭДГ была построена частичная характеристика под нагрузкой крутящего момента $M_{эд}$ и мощности $N_{эд}$ при коэффициенте $\beta = 1$ – тяговый режим и при $\beta = 0$ – режим выбега (рекуперации).

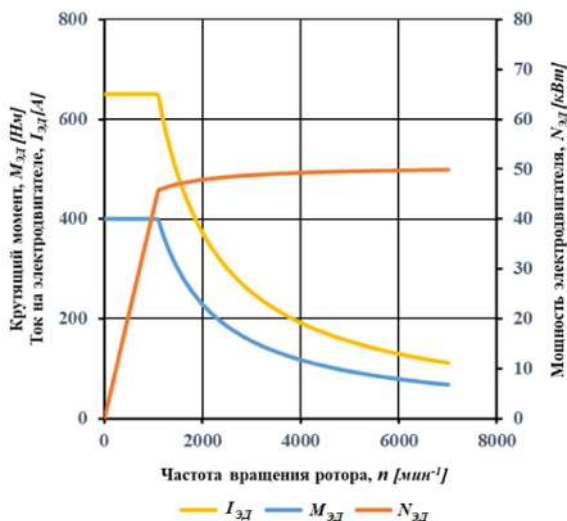


Рис. 7. Функциональная зависимость тока $I_{эд}$, крутящего момента $M_{эд}$ и мощности $N_{эд}$ от частоты вращения ротора $n_{эд}$ ЭДГ под нагрузкой при $\beta = 1$

Упрощённое математическое описание ЭДГ позволяет описать характеристики крутящего момента $M_{эд}$ и мощности $N_{эд}$ ЭДГ в зависимости от тока $I_{эд}$ в его статоре. Такое решение значительно сокращает время в процессе моделирования, а также позволяет выполнять анализ энергетических параметров ЭДГ, такие как напряжение $U_{эд}$ и ток $I_{эд}$.

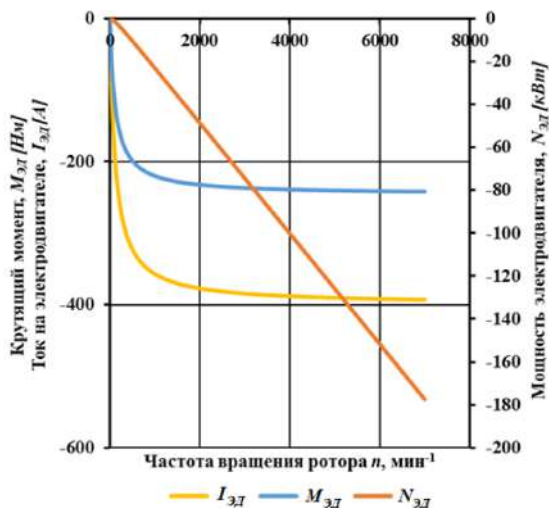


Рис. 8. Функциональная зависимость тока $I_{эл}$, крутящего момента $M_{эл}$ и мощности $N_{эл}$ от частоты вращения ротора $n_{эл}$ ЭДГ под нагрузкой при $\beta=0$

Выводы

Математическое описание выходных характеристик ЭДГ просто в описании, что позволяет значительно сократить время в процессе моделирования. Однако математическое описание не позволяет выполнять анализ энергетических параметров ЭДГ, такие как напряжение $U_{эд}$ и ток $I_{эд}$.

В процессе моделирования ЭДГ с помощью математического описание ЭДГ с вращающейся системой координат dq и в неподвижной системе координат А, В и С требуется значительно большое количество машинного времени. Кроме того, при моделировании ЭДГ необходимо использовать большое количество дополнительных расчетных блоков, таких, как преобразователи координат $ABC \Rightarrow dq$, модель инвертора, ПИ-регуляторы, аппаратура широтно-импульсной модуляции (ШИМ), формирователи способа модуляции (ФСМ) и др. [5].

Разработанное математическое описание ЭДГ позволяет получить характеристику крутящего момента $M_{эд}$, мощности $N_{эд}$ и тока $I_{эд}$ от частоты вращения ротора $n_{эд}$ как в тяговом, так и в тормозном

режиме (рекуперации). Такое описание не требует энергетических параметров, протекающих в ЭДГ, а также математических описаний дополнительных расчетных блоков, которые свойственны физическим моделям ЭДГ, что значительно облегчает математические расчеты при моделировании КТС с ГСУ и электромобилями.

Заключение

Автопроизводители всего Мира активно используют синхронные ЭДГ, в качестве силовых установок выпускаемой ими продукции. В данной статье представлен анализ математических описаний ЭДГ, в результате которого разработано упрощённое математическое описание ЭДГ. Оно позволяет моделировать его выходные характеристики при работе в составе электромобиля и автомобиля с гибридной силовой установкой.

Данное математическое описание планируется использовать при моделировании процессов функционирования гибридного автомобиля Toyota Prius на стенде с беговыми барабанами.

Список литературы

1. Астафьев Е. А. Моделирование электропривода электромобиля с возможностью рекуперации электрической энергии / Е. А. Астафьев, А. Ю. Афанасьев // Развитие концепции современного образования в рамках научно-технического прогресса: Сборник научных трудов. – Казань: ООО «СитИвент», 2020. – С. 121-130.
2. Бахмутов С. В. Расширение функциональных возможностей - необходимый шаг в развитии конструкции гибридных автомобилей / С. В. Бахмутов, А. В. Круташов, О. В. Маликов // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6(77). – С. 43-46.
3. Гусаков С.В., Абдель Муним Музхер Хашем. Перспективы развития силовых установок гибридных автомобилей – Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2004. № 1. С. 38-42.
4. Калачёв Ю.Н. SimInTech: моделирование в электроприводе. – М.: ДМК Пресс, 2021.-106 с.

5. Куликов И. А. Моделирование гибридного электромобиля параллельного типа / И. А. Куликов, В. В. Селифонов // Труды НАМИ. – 2009. – № 242. – С. 67-84.
6. Ломакин В. В. Критерии выбора основных параметров силовой установки гибридных автомобилей при проектировании / В. В. Ломакин, А. А. Шабанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 2(113). – С. 151-157.
7. Милюшенко С.А., Лосев К.М., Бралинов С.М., Данилина А.Е. перспективы развития гибридных силовых установок на автомобильном транспорте/ Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2019. С. 25-29.
8. Руководство пользователя «Универсальный механизм: Редактор структурных схем». URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/24_um_blockeditor.pdf.
9. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности 140604 «Электропривод и автоматика пром. установок и технол. комплексов» направления подгот. 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / Г. Г. Соколовский; Г. Г. Соколовский. – Москва: Академия, 2006. – (Высшее профессиональное образование. Электротехника).
10. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб БХВ – Петербург, 2022. – 576 с.
11. Филькин Н.М. Оптимизация параметров конструкции энергосиловой установки транспортной машины: дис. д-ра техн. наук. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2001. – 430 с.
12. Чернышков А. С. Повышение качества контроля тягово-динамических свойств электромобилей на стендах с беговыми барабанами / А. С. Чернышков // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов, посвященный 85-летию кафедры ЭАТиС МАДИ, по

материалам 79-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 26–27 января 2021 года. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – С. 196-202.

13. Яньков О. С. Колёсные транспортные средства с электрическим и гибридным приводом: учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2022. – 246 с.
14. Яньков, О. С. Математическое описание силовой установки электромобиля / О. С. Яньков, А. С. Чернышков // Грузовик. – 2022. – № 9. – С. 15-21. – <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2022-9-15-21>

References

1. Astaf'ev E. A. Modelirovanie elektroprivoda elektromobilya s vozmozhnost'yu rekuperatsii elektricheskoy energii / E. A. Astaf'ev, A. Yu. Afanas'ev // Razvitie kontseptsii sovremennogo obrazovaniya v ramkakh nauchno-tekhnicheskogo progressa: Sbornik nauchnykh trudov. – Kazan': ООО "SitIvent", 2020. – S. 121-130.
2. Bakhmutov S. V. Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostey - neobkhodimyy shag v razvitii konstruktssii gibridnykh avtomobiley / S. V. Bakhmutov, A. V. Krutashov, O. V. Malikov // Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov. – 2012. – № 6(77). – S. 43-46.
3. Gusakov S.V., Abdel' Munim Muzkher Khashem. Perspektivy razvitiya silovykh ustanovok gibridnykh avtomobiley – Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. 2004. № 1. S. 38-42.
4. Kalachev Yu.N. SimInTech: modelirovanie v elektroprivode. – M.: DMK Press, 2021.-106 s.
5. Kulikov I. A. Modelirovanie gibridnogo elektromobilya parallel'nogo tipa / I. A. Kulikov, V. V. Selifonov // Trudy NAMI. – 2009. – № 242. – S. 67-84.
6. Lomakin V. V. Kriterii vybora osnovnykh parametrov silovoy ustanovki gibridnykh avtomobiley pri proektirovanii / V. V. Lomakin, A. A. Shabanov // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. – 2016. – № 2(113). – S. 151-157.

7. Milyushenko S.A., Losev K.M., Bralinov S.M., Danilina A.E. perspektivy razvitiya gibridnykh silovykh ustanovok na avtomobil'nom transporte/ Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Sbornik materialov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2019. S. 25-29.
8. Rukovodstvo pol'zovatelya «Universal'nyy mekhanizm: Redaktor strukturnykh skhem». URL: http://www.universalmechanism.com/download/90/rus/24_um_blockeditor.pdf.
9. Sokolovskiy G. G. Elektropivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: ucheb. dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsial'nosti 140604 "Elektropivod i avtomatika prom. ustanovok i tekhnol. kompleksov" napravleniya podgot. 140600 "Elektrotekhnika, elektromekhanika i elektrotekhnologii" / G. G. Sokolovskiy; G. G. Sokolovskiy. – Moskva: Akademiya, 2006. – (Vysshee professional'noe obrazovanie. Elektrotekhnika).
10. Tarasik V.P. Teoriya dvizheniya avtomobilya. – 2-e izd., pererab. i dop. – SPb BKhV – Peterburg, 2022. – 576 s.
11. Fil'kin N.M. Optimizatsiya parametrov konstruktсии energosilovoy ustanovki transportnoy mashiny: dis. d-ra tekhn. nauk. – Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2001. – 430 s.
12. Chernyshkov A. S. Povyshenie kachestva kontrolya tyagovo-dinamicheskikh svoystv elektromobiley na stendakh s begovymi barabanami / A. S. Chernyshkov // Problemy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobil'nogo transporta : Sbornik nauchnykh trudov, posvyashchennyy 85-letiyu kafedry EATiS MADI, po materialam 79-y nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoy konferentsii MADI, Moskva, 26–27 yanvarya 2021 goda. – Moskva: Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet (MADI), 2021. – S. 196-202.
13. Yan'kov O. S. Kolesnye transportnye sredstva s elektricheskim i gibridnym privodom: ucheb. posobie. – Irkutsk: Izd-vo IRNITU, 2022. – 246 s.
14. Yan'kov, O. S. Matematicheskoe opisaniye silovoy ustanovki elektromobilya / O. S. Yan'kov, A. S. Chernyshkov // Gruzovik. – 2022. – № 9. – S. 15-21. – <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2022-9-15-21>

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Киселёв Павел Алексеевич, аспирант

ИРНИТУ

*ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Российская Фе-
дерация*

pavel.kiselev.97.97@mail.ru

Федотов Александр Иванович, д.т.н., профессор

ИРНИТУ

*ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Российская Фе-
дерация*

Яньков Олег Сергеевич, канд. техн. наук, доцент каф. автомо-
бильного транспорта

ИРНИТУ

*ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск, 664074, Российская Фе-
дерация*

info@istu.edu

DATA ABOUT THE AUTHORS

Pavel A. Kiselev, graduate student

Irkutsk National Research Technical University

83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

pavel.kiselev.97.97@mail.ru

Alexander I. Fedotov, Doctor of Technical Sciences, Professor

Irkutsk National Research Technical University

83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Oleg S. Yankov, Ph.D., Associate Professor

Irkutsk National Research Technical University

83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074, Russian Federation

info@istu.edu

Поступила 22.03.2023

После рецензирования 10.04.2023

Принята 13.04.2023

Received 22.03.2023

Revised 10.04.2023

Accepted 13.04.2023