

# ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ ЗА ХИБРИДНИТЕ АВТОМОБИЛИ

Цветомир Стоянов

***Резюме:** Настоящата публикация представлява обзор на развитието на хибридните автомобили, тяхното разпространение, бъдещото им развитие, техните предимства и недостатъци. Представени са данни за хибридните модели на основните автомобилни производители.*

*Направен е обзор на електрическите машини използвани при задвижване на хибридните автомобили и са обобщени изискванията към тях. Описани са и различните структури на хибридните автомобили.*

***Ключови думи:** хибридни автомобили, електрозадвижвания.*

## ELECTRICAL MACHINES USED IN HYBRID CARS

Tsvetomir Stoyanov

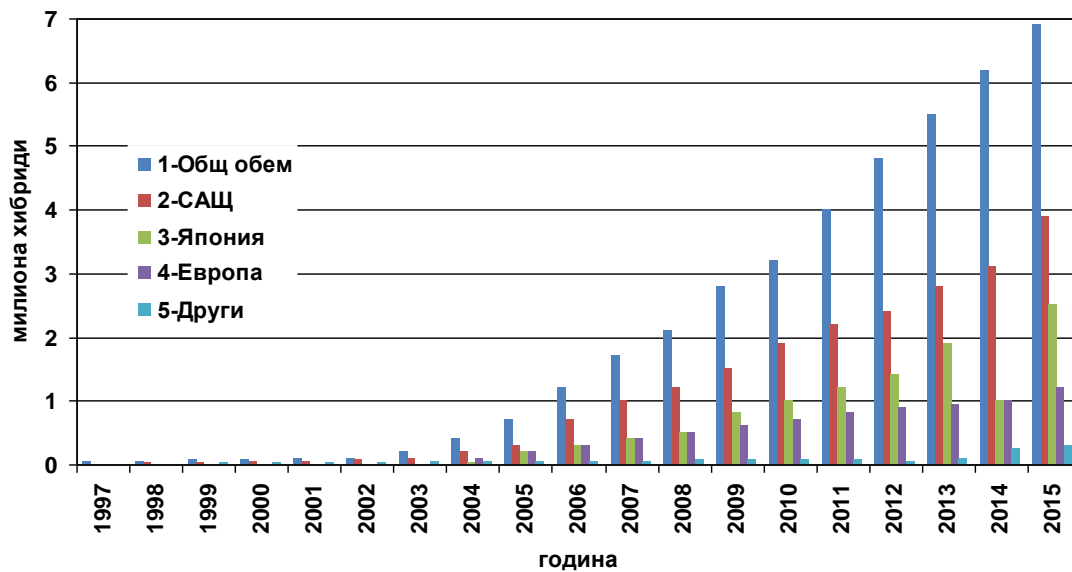
***Abstract:** The current publication presents a survey of the hybrid cars distribution, future, development and their advantages and disadvantages. The article describes data on hybrid cars model of the major automotive manufactures.*

*In the article also give information about the different types of the traction motors used in hybrid cars and requirements to them. The hybrid car's structures are described.*

***Key words:** hybrid cars, traction motors*

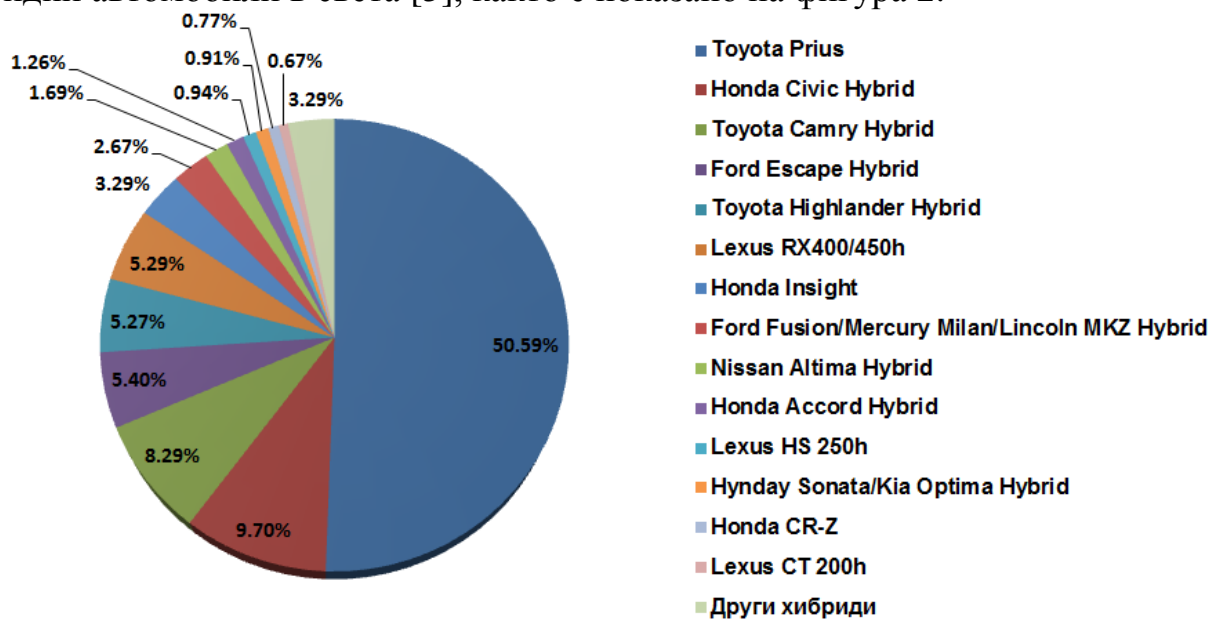
### 1. Въведение

Хибридните автомобили получават голямо разпространение през последните години и набират все по-голяма популярност. От появата на първия сериен хибриден автомобил Toyota Prius преди двадесет години до днес, броя на хибридните автомобили нараства непрекъснато. Фигура 1 представя количеството продадени хибридни автомобили в световен мащаб и в отделните страни [5], като по прогнозни данни [8] през 2020 година количеството продадени хибридни автомобили ще бъде около 30 милиона автомобила.



Фиг. 1. Количество продадени хибридни автомобили

Редица автомобилни производители Toyota, Honda, Ford, Nissan, Hyundai, Kia [15], произвеждат хибридни автомобили. Като абсолютен лидер е Toyota Prius (с нейните четири поколения [6]), с дял от над петдесет процента от всички хибридни автомобили в света [5], както е показано на фигура 2.



Фиг. 2 Разпределение на хибридните автомобили по марки и модели

Заедно с това автомобилните производители не само се стремят да имат в гамата си хибриден автомобил, а също така той да има същите а и по-добри характеристики, оборудване и комфорт от конвенционалните автомобили [4]. Нарастващата популярност и търсене на хибридни автомобили се дължи на следните няколко причини:

- ресурсни- поради непрекъснатото промяна цената на петрола повишава-не или понижаване, достигане в най-близко време на недостиг на изкопаеми горива или най мрачните прогнози за изчерпване на петролните залежи до петдесет години.

- екологични- едно от основните изисквания към автомобилите на двадесет и първи век е да са екологично чисти [17], поради тази причина екологичните норми към автомобилния транспорт стават все по строги. Според директива 93/116 на ЕС количеството на CO<sub>2</sub> в отработените газове изхвърляни от автомобилите през 2012 трябва да е 120-130 г/км. [4] (което отговаря на въведения през 2015 екологичен стандарт Euro 6). Като според програмата на ООН Global Fuel Economy Initiative през 2050 тази норма трябва да е намалена на половина.

- технически- те могат да се разделят на няколко групи:

- първа група- хибридните автомобили имат по- нисък разход от стандартните им аналози таблица 1 [4] .

Автомобил	Маса	Обем	Мощност на ДВГ	Мощност на електродвигателя	Разход на гориво при Европейски цикъл	Понижение на разхода на гориво при хибрид	CO <sub>2</sub>
	[кг]	[л]	[KW]	[KW]	[л]	[%]	[г/км]
Honda Civic хибрид	1249 1720	1,34	70	15	5,2/4,3/4,6	59/46/49	109
Honda Civic аналог	1265 1700	2	148	-	12,7/7,9/9,1	-	215
Toyota Corolla хибрид	1380 1805	1.8	73	60	3,8/3,8/3,8	56/31/24	89
Toyota Corolla аналог	1250 1750	1.8	108	-	8,7/5,5/6,7	-	155
Honda Insight хибрид	1200 1650	1.34	65	10	4,2/4,6/4,4	-/151	101
Honda Insight аналог	1610	3.47	206	-	-/19,0	-	-
BMW 7 хибрид	2045 2635	4.4	330	15	12,6/7,6/9,4	26/15/21	219
BMW 7 аналог	1945 2575	4.4	300	-	17,1/8,9/11,9	-	279
Porsche Cayenne хибрид	2240 2910	3	245	34	8,7/7,9/8,2	45/6,0/27	193
Porsche Cayenne аналог	1995 2765	3.6	220	-	15,9/8,4/11,2	-	263
Cadillac Escalade хибрид	2780 3400	6	248	60	11,6/10,7/11,0	42/5,0/24	264
Cadillac Escalade аналог	2580 3310	6.2	301	-	20,1/11,3/14,5	-	339

Таб. 1 Сравнителна таблица на хибриди и стандартните им аналози

Това се постига по няколко начина. Съчетава се използването на ДВГ и електродвигателя всеки работи при благоприятни за него условия. ДВГ работи при високи обороти с максимален момент, а при градски условия работи електродвигателя. Наличието на две електрически машини в хибридният автомобил [10], позволява едната електрическа машина да се проектира да работи в режим на генератор, задвижвана от ДВГ при неговите оптимални ус-

ловия за работа. И не на последно място електрическата машина има над два пъти по-високо КПД от ДВГ.

- втора група-създаването на активни, конструктивни и изолационни материали обезпечавщи работата на електрическите машини при високи електромагнитни и топлинни натоварвания [15]. Допустимата токова плътност за стандартно изпълнение на електрическа машина и конструктивни материали внедрен преди 20-30 години варира в следните граници:  $5 \text{ A/mm}^2$  за АД и до  $15 \text{ A/mm}^2$  за синхронни генератори с принудително водородно охлаждане. За сравнение допустимата токова плътност при СДПМ е в интервала  $20\text{-}50 \text{ A/mm}^2$ . Бързото развитие и наличието на база от електронни компоненти е способна да осигури създаването на инвертори за управлението на тези машини [15].

Освен горните причини за бързите темпове на разпространение на хибридните автомобили, други фактори благоприятстващи разпространението им са техните предимства:

- максимален въртящ момент от състояние на покой и нисък разход на гориво в градски условия.
- наличието на електрическа машина в задвижването на автомобила позволява преминаването ѝ в режим на генератор и рекуперирането на енергия. Кое от своя страна позволява повишаването на КПД на автомобила, но това води до по-сложни алгоритми за управление на инверторите.

Наред с многото предимства хибридните автомобили притежават редица недостатъци:

- по-висока цена от стандартните автомобили, поради наличието на батерии и инвертор.
- необходимост от наличието на тягова акумулаторна батерия. Кое от своя страна води до няколко проблема, поради характеристиките и свойствата на акумулаторните батерии:
  - срок на експлоатация до пет години
  - ограничен брой цикли заряд-разряд (до хиляда за някои видове батерии)
  - ниска плътност на енергията на акумулаторната батерия до  $150 \text{ Wh/kg}$ , което води до увеличаване на теглото на батерията и на автомобила като цяло.

Въпреки горните недостатъци на химичните източници на енергия, в тази област се работи много и активно. Съществуват разработки на литиево въздушни батерии с плътност на енергията от  $1500 \text{ Wh/kg}$  и способни да осигурят пробег от 500 километра.

-утилизацията на акумулаторните батерии.

- техническото обслужване на хибридните автомобили в сервизите не е добре организирано към този момент и поради тази причина сервизите нямат възможност за извършване на качествен ремонт.

- наличието на много електронни компоненти събрани на едно място и работата им с високи честоти, създават електромагнитно поле опасно за човешкото здраве[7].

## 2. Задвижване на хибридния автомобил

Задвижването на един хибриден автомобил се състои от ДВГ, електродвигател и трансмисия. Връзката между ДВГ и електродвигателя и предаването движението на водещите колела може да се осъществи по няколко начина, както е показано на фигура 3 до 5 [9]. Всеки начин на връзка влияе на избора на структура на хибридния автомобил и вида на използвания електродвигател.



Фиг. 3 Електродвигател присъединен към вала на ДВГ



1-ДВГ 2-Стартираща и спираща система 3-Електродвигател 4-Скоростна кутия 5-Инвертор и изправител 6-Управляваща система

Фиг.4 Независими електродвигател и ДВГ



1-Ротор  
2-Вал лагер  
3-Статор  
4-Гума

Фиг.5 Електродвигател монтиран в задвижващата гума

Функции и изисквания към задвижването на хибридният автомобил [3] :

- сумиране на въртящия момент от два източника на енергия и предаването му на колелата на транспортното средство
- обезпечават движението на автомобила на определен източник на енергия
- обезпечават безстепенно изменение на предавателното отношение
- има относително малки загуби

Структурата на хибридният автомобил бива няколко вида [3, 11]:

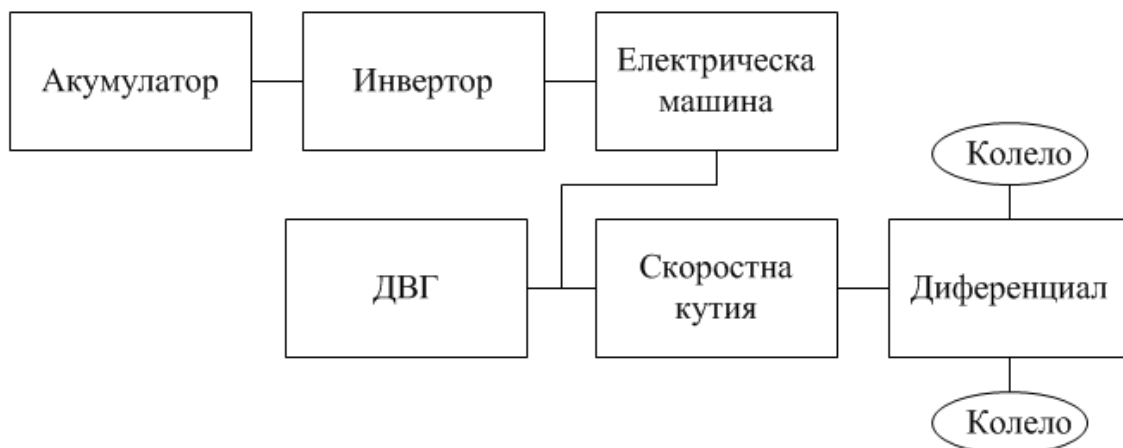
-последователна - показаната на фигура 6 структура има двойно преобразуване на енергията от механична в електрическа и после пак в механична, което води до намаляване на КПД. Електрическата машина трябва да е същата по мощност като ДВГ. Това условие води до увеличаване теглото на трансмисията и превозното средство.



Фиг. 6 Последователна хибридна структура

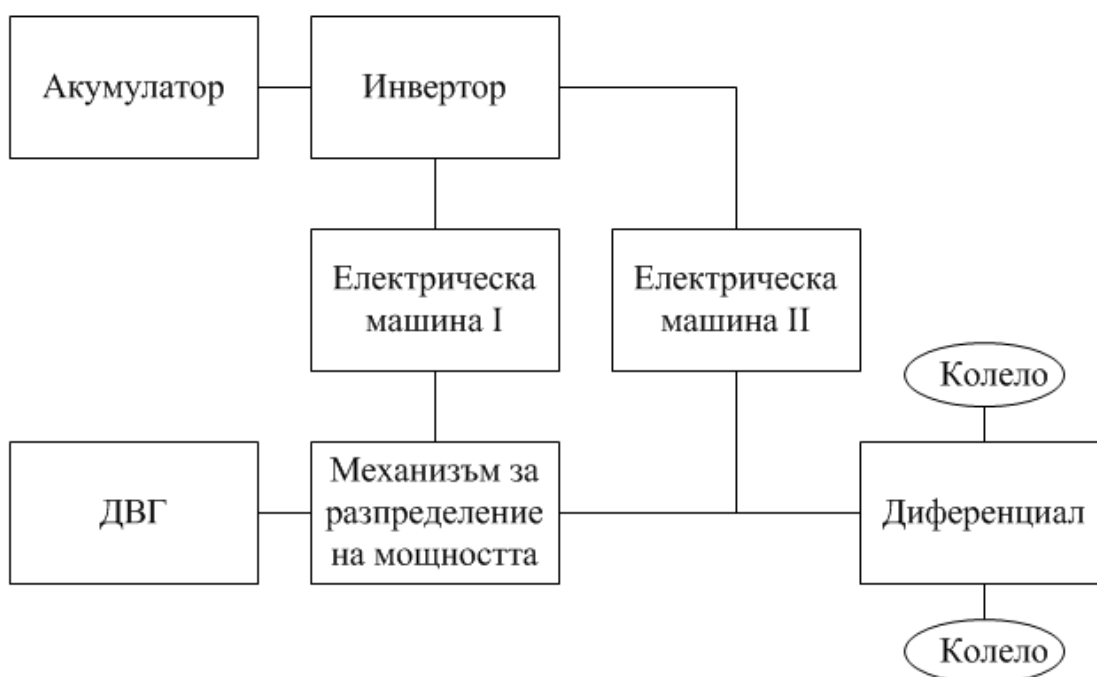
- паралелна - електрическата машина може да бъде обединена с ДВГ (фигура 7). Регулирането на предавателното число се осъществява с механична скорост-

на кутия, а регулирането на мощността чрез електродвигателя. Електрическата машина е с мощност около 15 % от мощността на ДВГ. Има механична връзка между ДВГ и водещите колела на автомобила.



Фиг. 7 Паралелна хибридна структура

- с разпределяне на мощността на ДВГ- представлява електромеханично устройство, което осигурява безстепенно изменение на предавателното число, но са необходими две електрически машини (фигура 8).



Фиг. 8 Хибридна структура с разпределение на мощността на ДВГ

### 3. Електродвигатели използвани за задвижване на хибридни автомобили

Към електродвигателите използвани за задвижване на хибридни автомобили се налагат следните изисквания [2], [16] :

- лесна и технологична изработка;
- лесна обслужваемост;
- лесна регулируемост;
- надеждност;
- работа при високи обороти 10000-15000;
- висок момент в целия скоростен диапазон;
- възможност за рекуперация;
- висок КПД;
- високо съотношение маса/мощност
- способност за кратковременни претоварвания- два пъти по мощност и до четири пъти по момент;
- минимална маса;
- минимална цена;

Неразделна част от електрозадвижването на един хибриден автомобил е електронния преобразувател, осигуряващ токове и напрежения със съответната големина, форма и честота. Друга важна функция на преобразувателя е управлението на електрическата машина. Поради тези причини, изискванията към електродвигателя се определят и от преобразувателя.

Съществува голямото разнообразие при класификацията на електрическите машини, базирано на различни фактори - скорост на въртене на магнитното поле създадено от котвата и индуктора, вид и форма на захранващото напрежение, начин на възбуждане на магнитното поле в индуктора, закони и начини за управление на електрическите машини. От друга страна сливането на тези разграничения, до определена степен поради използването на електронен преобразувател, създава нови възможности за управление и свойства на електрическите машини. Поради тези факти, класификацията на електрическите машини използвана за задвижване на хибридни автомобили, ще бъде аналогична на литературните източници за такива автомобили [12], [1], където машините са разделени на асинхронни двигатели (АД), постояннотокови двигатели (ПД), синхронни двигатели, най-често с постоянни магнити (СДПМ) и реактивни двигатели. Друг факт подкрепящ тази класификация е употребата на тези типове електродвигатели от водещи автомобилни производители в серийните им хибридни автомобили и произведените от тях единични бройки или малки серии: асинхронни двигатели - Ford, постояннотокови двигатели -Toyota най-вече при електромобили, синхронни двигатели най-често с постоянни магнити(СДПМ)-Toyota, Honda, реактивни- BMW, Land Rover.

Сравнени с останалите типове електродвигатели, всеки има следните предимства и недостатъци.

1. Асинхронните машини [17]:

- предимства- лесна изработка, ниска цена, най-добра надеждност
  - недостатъци сложни алгоритми за управление, по-голяма маса за единица мощност



2. Постояннотоковите двигатели (разглеждат се само безколекторни двигатели) [17]:
  - предимства- лесна изработка и управление, ниска цена
  - недостатъци-по-голяма маса за единица мощност, най- енергонеефективни
3. Реактивни двигатели [17] :
  - предимства- лесна изработка и ниска цена, поради липсата на намотка в ротора няма загуби там
  - недостатъци-консумацията на голям реактивен ток при стартиране и работа
4. Синхронни двигатели с постоянни магнити [14] :
  - предимства- имат най-високо КПД, масата им за единица мощност е най-малка
  - недостатъци- най-висока цена, главно поради постоянните магнити, отсъствието на намотка в ротора, позволява контролирането на магнитното поле само от страна на статора.

#### **4. Анализ и изводи**

- 1.От появата на първия сериен хибриден автомобил Toyota Prius преди двадесет години до днес, броя на хибридните автомобили нараства непрекъснато. Това се дължи на редицата предимства, които имат хибридните автомобили пред конвенционалните им аналози: по-нисък разход на гориво, по-високо КПД, висок въртящ момент в целия скоростен диапазон и други. Наред с предимствата хибридните автомобили имат и редица недостатъци- висока цена, по-сложна сервизна поддръжка.
2. Структурата на хибридният автомобил бива няколко вида и тя определя мощността и конструкцията на електрическата машина използвана в електрозадвижването на хибрида .
- 3.Съществува разнообразие от електрическите машини използвани в хибридните автомобили, но също така към тях се налагат и редица изисквания.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Бербиренков, И. , В. Лохнин, Винтильные тяговые двигатели в электроприводе, МАМИ, 2011.
- [2] Бербиренков, И. , В. Лохнин, Тяговые двигатели на постоянных магнитах в электроприводе автомобиля, Электротехнические и информационные комплексы 10 и системы № 2, т. 7, 2011.
- [3] Котиев, Г. , С. Харитонов, М. Нагайцев, ОБЗОР КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ ПОСТРОЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ТРАНСМИССИЙ, Журнал автомобильных инженеров, 2010.
- [4] Ломакин, В. , А. Шабанов, А. Шабанов, К вопросу выбора мощности ДВС энергетической установки гибридного автомобиля, Журнал автомобильных инженеров, 2013.

- [5] Раков, В. , Развитие парка гибридных автомобилей, Мир транспорта, 2011.
- [6] Смирнов, О. , О. Дубас, Т. Матвієнко, ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ГИБРИДНОМ АВТОМОБИЛЕ TOYOTA PRIUS, Харьковский Национальный Автомобильно - Дорожный Университет, 2011.
- [7] Селиванов, С. , В. Филенко, В. Каразина, А. Бажинов, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ БИОСФЕРЫ АВТОТРАНСПОРТОМ (АВТОМОБИЛИ, ЭЛЕКТРОМОБИЛИ, ГИБРИДНЫЕ АВТОМОБИЛИ), Харьковский Национальный Автомобильно - Дорожный Университет, 2009.
- [8] Шаньгин, А. , ЭЛЕКТРОМОБИЛИ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ВИД ТРАНСПОРТА, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012.
- [9] Шабанов, А. ,В. Ломакин, А. Шабанов, ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА, Журнал автомобильных инженеров, 2014.
- [10] Adsani, A. , HYBRID PERMANENT MAGNET MACHINES FOR ELECTRIC VEHICLES, University of Manchester, September 2011.
- [11] Mi, C. , M. Masrur, D. Gao, HYBRID ELECTRIC VEHICLES PRINCIPLES AND APPLICATIONS WITH PRACTICAL PERSPECTIVES, John Wiley & Sons, Ltd, 2011
- [12] Chen, L. , J. Wang, P. Lombard, P. Lazari, V. Leconte, High Efficiency Motor Design for Electrical vehicles, University of Sheffield, 2012.
- [13] Heikkila, T. , Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analysis and design, Lappeenranta University of Technology, 2002.
- [14] Li, J. , S. Li, X. Chen, Adaptive speed control of a PMSM servo system using an RBFN disturbance observer, Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2011.
- [15] Miller, J. , Propulsion Systems for Hybrid Vehicles, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2008.
- [16] Narita, K. , T. Yamada, Y. Sakashita, K. Akatsu, Coupled Analysis Technique Involving Magnetic-Field-Control/Circuit Simulation and Loss Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machine, Electrical Engineering in Japan, Vol. 183, No. 3, 2013.
- [17] Yabumoto, M. , С. Kaido, Т. Wakisaka, Т. Kubota, N. Suzuki, Electrical Steel Sheet for Traction Motors of Hybrid/Electric Vehicles, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 87 July 2003.

**Автор:** инж. **Цветомир Методиев Стоянов** докторант от ТУ-София, катедра „Електрически машини“, e-mail [cmetodiev@tu-sofia.bg](mailto:cmetodiev@tu-sofia.bg)