



МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ТЯГОВ ИМПУЛСЕН РЕГУЛАТОР ЗА ЕЛЕКТРИЧЕСКО ПРЕВОЗНО СРЕДСТВО

Мартин Димитров Златков

dj_marti79@mail.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”

София, ул. „Гео Милев” № 158

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *електромобил, импулсен регулатор, контролер, широчинно импулсен регулатор, постояннотоков електродвигател, тягово електрозадвижване, ШИМ.*

Резюме: *В доклада е представена методика за изчисляване на силовата, драйверната и управляващата част на импулсен регулатор. Той работи на принципа на широчинно-импулсна модулация. Използва се за регулиране на мощността на всякакви постояннотокови консуматори, включително електродвигатели. В конкретния случай се използва за регулиране на мощността на тягов постояннотоков колекторен електродвигател.*

Контролера е разработен за да бъдат проучени трудностите при работа с големи токове (500A) и да бъде изпитана работоспособността в реални условия в тягова електрическа схема на електрическо транспортно средство. Също така да се провери възможността за паралелно свързване на голям брой MOSFET транзистори (48 броя), което от своя страна да доведе до намаляване цената на изделието.

УВОД

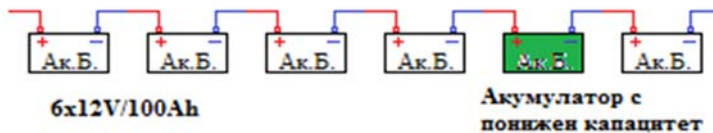
В последните години хибридните и електрическите транспортни средства се налагат все повече. Те могат да бъдат задвижвани с различни видове електродвигатели – постояннотокови, синхронни, асинхронни и други [2][3][4].

Импулсният регулатор намира приложение при регулиране на мощността на постояннотокови електрозадвижвания в много широк диапазон. Например: ръчни електроинструменти, електротротинетки, инвалидни колички, електроскутери, електроциклети, голф колички [1], градинска техника, водими електрокари, високоповдигачи, електрически влекачи, електрокари, електромобили, трамваи, тролейбуси, метромотриси, електровози и др. Импулсният регулатор намира приложение навсякъде, където е необходимо плавно и енергийно-ефективно регулиране на мощността.

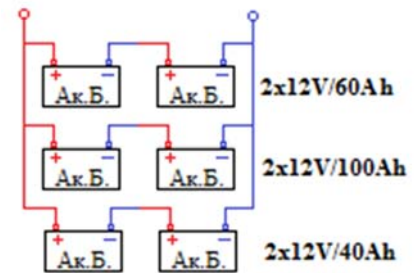
Захранващото напрежение от акумулаторните батерии може да бъде от 24V до 800V. Високото напрежение позволява да се постигнат по-големи стойности на мощността при по-малки стойности на тока през силовите ключове и респективно по-малки загуби в отпушено състояние.

Високото напрежение изисква много на брой последователно свързани акумулатори (фиг. 1), а също така и те да бъдат с еднакъв капацитет, напрежение, марка, партида, дата на производство и т.н. При такава компоновка на акумулаторния блок задължително се изисква и специален BMS [5][6].

Влошаване на състоянието на единия от акумулаторите ограничава общия ток на цялата група (фиг. 1).



Фиг. 1. Схема на свързване на високоволтова тягова батерия.



Фиг. 2. Схема на свързване на нисковолтова тягова батерия.

Доста голф колички, електрокари, влекачи и др., все още използват в електрозадвижването си нисковолтови акумулаторни батерии и постояннотокови електродвигатели, което се явява удачен вариант (фиг. 2). Нисковолтовата батерия се състои от паралелно свързани двойки акумулатори. Капацитета както и състоянието им може да варира в широки граници (фиг. 2).

Проектирането, изграждането и изследването на нисковолтово (24V) тягово електрозадвижване ще покаже неговите предимства и недостатъци.

1. Импулсен регулатор

Проектирането на импулсен регулатор за голям ток не е лесна задача особено когато едно от условията е цената му да не е висока.

Скъп и мощен ключов елемент – MOSFET транзистор ще баде заместен с много на брой евтини транзистори с по-малка мощност.

Скъп и мощен полупроводников елемент – „бърз“ диод, той ще баде заместен с много на брой малки и евтини импулсни диоди.

2. Електротягови изчисления

Мощността на електродвигателя P_{nom} за малко електрическо превозно средство (електрокар, голфколичка, малък електромобил) обикновено е до $P_{nom} = 5kW$, като токовата честота на импулсия регулатор е в диапазона $f = 500 \div 2000$ Hz.

Ако захранването бъде осигурено от оловни акумулаторни батерии с номинална стойност на напрежението $U_{DCnom} = 24$ V (при брой на последователно свързаните клетки $n = 12$ броя). При разряд на акумулаторната батерия минималното напрежение на един елемент, при което трябва да се спре разряда за да не се стигне до сулфатизация е $U_{DC1min} = 1,8V$. Минималното напрежение на батерията U_{DCmin} при което трябва да се задейства защитата максимален разряд на батерията е изчислено по формулата [7] и [8]:

$$(1) U_{DCmin} = n \cdot U_{DC1min} = 12 \cdot 1,8 = 21,6V$$

Продължителна стойност на тока през широчинно импулсия регулатор I_{nom} е определен на базата на необходимата номинална мощност и минималната стойност на захранващото напрежение със следната формула:

$$(2) I_{nom} = \frac{P_{nom}}{U_{DCmin}} = \frac{5000}{21,6} = 231,5A$$

С цел безаварийно преминаване на участъци от пътя с наклон (естакади, преходи от пътя към тротор с цел паркиране в гараж и др.) се предвижда коефициента на запас по ток на регулатора да бъде $k_{\text{ток}} = 2,5$. Максималната стойност на тока I_{max} , който ще премине през инвертора е определена чрез формулата:

$$(3) I_{\text{max}} = k_{\text{ток}} \cdot I_{\text{ном}} = 2,5 \cdot 231,5 = 578,75 \text{ A}$$

3. Избор на транзистор по напрежение

Избора на транзистор по напрежение е необходимо да се съобрази с максималната стойност на напрежението на акумулаторната батерия U_{DCmax} . При максимална стойност на напрежението в един елемент на батерията $U_{\text{DC1max}} = 2,4 \text{ V}$, максималната стойност на напрежението на батерията се изчислява чрез формулата:

$$(4) U_{\text{DCmax}} = n \cdot U_{\text{DC1max}} = 12 \cdot 2,4 = 28,8 \text{ V}$$

Въпреки наличието на диоди за обратен ток е необходимо транзисторите да издържат на по-високо напрежение от това на акумулаторната батерията, тъй като товара е преобладаващо индуктивен. Избран е коефициент на запас по напрежение $k_{\text{ЗУ}} = 2,5$. Стойността на напрежението, което трябва да издържат електронните ключове U_{max} , е изчислена чрез формулата:

$$(5) U_{\text{max}} = k_{\text{ЗУ}} \cdot U_{\text{DCmax}} = 2,5 \cdot 28,8 = 72 \text{ V}$$

При избора на транзистор е спазено правилото $U_{\text{DSS}} \geq U_{\text{max}}$.

Избран е MOSFET транзистор IRF530N със следните параметри [9]:

- максимална стойност на напрежението приложено дрейн-сорс $U_{\text{DSS}} = 100 \text{ V}$;
- максимална стойност на тока през дрейна (при температура на кристала $T_{\text{C}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$) $I_{\text{D}} = 12 \text{ A}$;
- съпротивление на прехода дрейн-сорс в отпушено състояние $R_{\text{DS(on)}} = 90 \text{ m}\Omega$.

Използването на по-високоволтов транзистор е нецелесъобразно, поради по-високото съпротивление на прехода дрейн-сорс и респективно по високите загуби в „отпушено“ състояние.

4. Изчисляване броя на транзисторите според тока

Необходимия брой на транзисторите „ n “, се изчислява на базата на максималната стойност на тока през широчинно импулсния регулатор и максималната стойност на всеки един от тях по формулата:

$$(6) n = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{D}}} = \frac{578,75}{12} = 48,23$$

Поради големия коефициент на запас по ток, резултатът от изчислението е закръглен надолу и широчинно импулсния регулатор е изпълнен с 48 транзистора.

5. Избор на диод за обратния ток

Диодите за обратен ток са избрани по същия начин както транзисторите. За диод за обратен ток е избран КД213А със следните параметри [10]:

- максимално обратно напрежение $- U_{\text{BR}} = 200 \text{ V}$;
- максимален ток в права посока $- I_{\text{f}} = 10 \text{ A}$;
- максимален импулсен ток в права посока $- 100 \text{ A}$.

От каталожните данни е видно, че стойността на максималното обратно пробивно напрежение U_{BR} превишава над два и половина пъти запасената стойност 72V.

Работния ток на диодите е близък по стойност до работния ток на транзисторите. Тъй като ще бъдат използвани 48 броя диоди (колкото са транзисторите), би следвало да издържат, защото обратния ток не може да бъде по-голям от работния. Обратния ток е с импулсен характер, а според каталожните данни импулсния ток на всеки диод е от порядъка на 100A [11]. Обратния ток ще зависи от индуктивността на намотките на електродвигателя и е редно да се провери с осцилоскоп в реални работни условия.

6. Изчисляване на загубите на мощност в съставния транзистор и очаквания к.п.д.

Според каталожните данни за съпротивлението на транзистора, еквивалентното съпротивление на импулсния регулатор в отпушено състояние $R_{регon}$ ще бъде:

$$(7) R_{рег} = \frac{R_{DS(on)}}{n} = \frac{90}{48} = 0,001875, \Omega$$

- вътрешно съпротивление на веригата двигател-регулатор при номинална мощност (респ. номинален ток) и минимално работно напрежение $R_{вер}$:

$$(8) R_{вер} = \frac{U_{DCmin}}{I_{nom}} = \frac{21,6}{231,5} = 0,0933 \Omega = 93,3 \text{ m}\Omega$$

- относителния дял на съпротивлението на съставния транзистор отнесено към съпротивлението на веригата и представено в проценти се изчислява по формулата:

$$(9) \Delta_{рег} = \frac{R_{рег}}{R_{вер}} \cdot 100 = \frac{0,001875}{0,0933} \cdot 100 = 0,020096 \cdot 100 \approx 2, \%$$

Тъй като протичащия ток през товара и съставния транзистор е един и същ, то относителния пад на напрежение, както и разсейваната мощност ще бъдат същите. Следователно загубите на мощност в отпушено състояние на съставния транзистор при номинална мощност в товара, минимално захранващо напрежение и коефициент на запълване на ШИМ $k_z = 1$ ще бъде:

$$(10) \Delta P_{загуби} = \frac{P_{nom} \cdot \Delta_{рег}}{100} = \frac{5000 \cdot 2}{100} = 100, \text{ W}$$

Загубата на мощност в съставния транзистор при номинална мощност в товара, минимално захранващо напрежение и коефициент на запълване на ШИМ $k_z = 1$ ще бъде:

$$(11) \Delta P_{загуби} = R_{рег} \cdot I_{nom}^2 = 0,001875 \cdot 231,5^2 = 0,001875 \cdot 53592,25 = 100,49, \text{ W}$$

Поради относително ниската тактова честота на ШИМ загубите на мощност по време на превключване са пренебрегнати.

Очаквания коефициент на полезно действие на импулсния регулатор без отчитане на консумираната мощност за собствени нужди ще бъде:

$$(12) \eta = \frac{P_{nom}}{P_{nom} + \Delta P_{загуби}} = \frac{5000}{5000 + 100,49} = 0,98$$

- максимална мощност на контролера P_{max} :

$$(13) P_{max} = nT \cdot I_{max} \cdot U_{DCmax} = 48 \cdot 14 \cdot 28,8 = 19353W = 19,3 kW$$

ИЗВОДИ:

- Изчисляването на силов електронен блок дава предварителни ориентировъчни резултати на други параметри за проектираното съоръжение, като например:

- максимален ток;
- запас по напрежение;
- брой на мощните транзистори;
- вътрешно съпротивление на регулатора;
- загубата на мощност в регулатора и др.

- Получените предварителни изчисления опровергават твърдението, че нисковолтовите тягови електрозадвижвания не са рентабилни и реализират големи загуби. Особено на фона на споменатите в уводната част недостатъци по отношение последователно свързване на множество акумулатори.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Миленов И., В. Димитров, Ч. Джамбазки, Г. Червендинев, Проектиране на електрозадвижване за голф-количка, н. сп. "Механика, Транспорт, Комуникации", ISSN 1312-3823, том 11, ID 0905, стр. X-6 – X-12, 2013
- [2] Костадинов П., Определяне на тарировъчната характеристика на двигател за постоянен ток, н. сп. "Механика, Транспорт, Комуникации", ISSN 1312-3823, том 18, ID 2027, стр. X-17 – X-22, 2020
- [3] Dimitrov V., N. Pavlov, Study of the Starting Acceleration and Regenerative Braking Deceleration of an Electric Vehicle at Different Driving Modes, 13th Conference BuleEF-2021, IEEEExplore Digital Library, DOI: 10.1109/BuleEF53491.2021.9690780, 2021
- [4] Павлов Н., В. Димитров, Анализ на различните схеми на задвижване на електро-мобилите, Международна Научна Конференция „Транспорт 2021", н. сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, том 19, ID 2139, стр. X-45 – X-51, 2021
- [5] Мицева Д., Специфични особености, параметри и характеристики на литий-ферофосфатни акумулаторни батерии, н. сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, том 20, ID 2261, стр. IX-53 – IX-58, 2022
- [6] Мицева Д., Специфични особености, параметри и характеристики на литиевойонни акумулаторни батерии, н. сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, том 20, ID 2261, стр. IX-46 – IX-52, 2022
- [7] Костадинов П., В. Димитров, Проектиране на лабораторен стенд за изследване параметрите на четкови и безчеткови постояннотокови електродвигатели. н. сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, том 16, бр. 3/2, статия № 1726, стр. X-75 – X-80, 2018 г.
- [8] Костадинов П., В. Димитров, Лабораторна система за изследване на безчеткови постояннотокови електрически машини, н. сп. "Механика, Транспорт, Комуникации", ISSN 1312-3823, том 17, брой 3/3, статия № 1879, стр. X-75 – X-81, 2019 г.
- [9] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/68169/IRF/IRF530N.html>
- [10] <https://eandc.ru/catalog/detail.php?ID=8682>
- [11] https://eandc.ru/pdf/diod/2d213_kd213.pdf
- [12] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27318/TI/SG3524.html>
- [13] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/75049/MICROCHIP/TC4420.html>

[14] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/838008/TI1/LM7812.html>

[15] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/105712/FAIRCHILD/LM7812.html>

DESIGN METHODOLOGY OF A TRACTION PULSE REGULATOR FOR AN ELECTRIC VEHICLE

Martin Zlatkov
dj_marti79@mail.bg

***Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.,
THE REPUBLIC OF BULGARIA***

Key words: *electric car, pulse regulator, controller, wide pulse, regulator, direct current, electric motor, PWM, electric vehicles, traction electric drive.*

Abstract: *The report presents a methodology for calculating the power, driver and control part of a pulse regulator. It works on the principle of pulse width modulation. It is used to regulate the power of any direct current consumers, including electric motors. In the specific case, it is used to regulate the power of a traction DC collector electric motor.*

The controller was developed in order to study the difficulties of working with large currents (500A) and tested the operability in real conditions of the traction circuit of an electric vehicle. Also to check the possibility of parallel connection of a large number of MOSFET transistors (48 pieces), which in turn will lead to a reduction in the price of the product.