

ДИНАМИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА ВТОРИЧНИ ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАЩИ ИЗТОЧНИЦИ ЗА БОРДНА АЕРОКОСМИЧЕСКА АПАРАТУРА

Павлин Граматиков

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg*

Ключови думи: проектиране на импулсни захранвания; динамични параметри на вторични електрозахранващи източници.

Резюме: В този труд са изложени методи на изследване и подобряване на динамичните параметри на системите за вторично електрозахранване при тяхната работа в комплекса на космическото научно оборудване, в съответствие с техническата документация на космическата апаратура, с цел преминаване на изпитванията. Изследвани са закономерности, взаимодействия, свойства и стойности на фактори и параметри на вторични източници на електрозахранване за подобряване на техните динамични параметри в комплекса на бордното оборудване. Взаимодествието на системите за вторично електрозахранване с първичната система на електрозахранване в бордовите аерокосмически съоръжения се обсъжда във функционален план.

DYNAMIC PARAMETERS OF SECONDARY POWER SYSTEMS FOR ONBOARD AEROSPACE EQUIPMENT

Pavlin Gramatikov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg*

Keywords: Switching power supply design; Dynamic parameters of secondary power supply.

Abstract: In this paper is exposed methods of investigation and improvement of dynamic parameters of secondary power supply systems in their work in the complex of aerospace scientific equipment, according to the technical documentation of aerospace device in order to be passed entrance tests. Investigated are regularities, interactions, properties and values of factors and parameters of secondary power supply sources in order to be improved their dynamic parameters in the complex of on board equipment. Interdependence of secondary power supply systems with the primary power supply system in the onboard aerospace equipments are discussed in functional plan.

1. Въведение

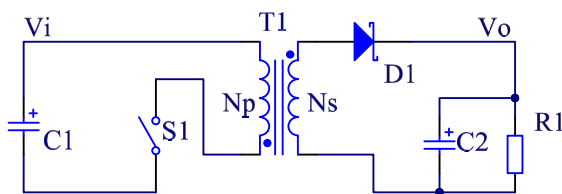
Вторичните електрозахранващи системи (ВЕС) са задължително функционално звено от бордната аерокосмическа апаратура (БАА), което приема електрическата енергия от първичната електрозахранваща система, преобразува, стабилизира и управлява нейните параметри съгласно енергийните особености на БАА и задачите на научния експеримент. Обект на изложението са изследователските дейности, извършвани с цел подобряване на динамичните параметри (ДП) на ВЕС. Обсъдени са методи на проектиране на ВЕС, съобразени с ДП; специфични средства за измерване на ДП на ВЕС с последващи анализ и технически мерки за преминаване на функционалните изпитвания. Описани са специфични параметри на космическия апарат, които обуславят начините на проектиране и проверка на ДП на ВЕС. Разгледаните методи и средства за изследване на проблеми, свързани с ДП могат да се трансферират към ВЕС за безпилотни летателни апарати и наземни апаратури. Изследването в това изложение е свързано с намаляване на динамичните грешки при аналогово-цифрово преобразуване, снижаване на шумовете в телеметрични и видеоканали, дължащи се на ДП на

космически вторични захранвания. Предмет на изследването освен ДП са: защитите на ВЕС; характеристиките на обратните връзки на вторични електрозахранващи източници; подтискането на напреженостите и токовете пулсации, създавани от импулсните процеси в аерокосмическите системи.

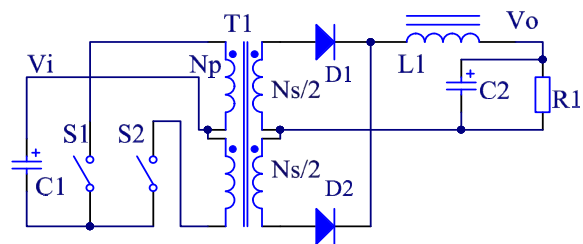
При бордните ВЕС са се наложили трансформаторните обратноходови преобразуватели (виж фиг. 1). От гледна точка на ДП тяхното преимущество се състои в обстоятелството, че натрупващият енергия елемент Т1 се включва към първичния източник и към товара в различни моменти, при което прехвърлянето на високочестотни смущения от входа към изхода и обратно е минимално. С формула (1) се описва зависимостта между входното и изходното напрежение (V_o и V_i) на обратноходов преобразувател с трансформаторна развързка, като е D коефициент на запълване на импулсите. За големи мощности е подходящ двутактния импулсен преобразувател: виж фиг. 2 и формула (2).

$$(1) \quad V_o = \frac{D}{1-D} \frac{N_s}{N_p} V_i$$

$$(2) \quad V_o = D \frac{N_s}{N_p} V_i$$



Фиг. 1. Трансформаторен обратноходов преобразувател



Фиг. 2. Двутактен импулсен преобразувател

2. Проект „Фобос“

Електрическите изисквания към ВЕС (свързани с ДП на ВЕС) за автоматичната междупланетна станция „Фобос“, комплекс „Фрегат“, [3], [5], са следните:

- Входното напрежение е $27 V +1,5/-1,5 V$ и има стъпални пропадания до $-3 V$ за време не по-голямо от $0,05 s$;
- ВЕС да се изключва при напрежение на бордната мрежа (БМ) под $20 V$ или над $34 V$;
- ВЕС трябва да функционира при наличие на синусоидални пулсации на напрежението от БМ с честота от 300 до $30000 Hz$ и амплитуда от $1 V$;
- Входният елемент на филтрите в бордната верига трябва да бъде индуктивност;
- Времетраенето на пусковия ток да не превишава $0,2 s$;
- Пусковите токове на потребители с консумация над $100 W$ да не превишават $1,5$ пъти номиналния ток, а на потребители под $100 W$ - 5 пъти;
- Времето на изключване на елементите за защита от късо съединение да е до $50 ms$;
- Неизправност на прибора да не довежда до повишаване на тока, консумиран от прибора повече от два пъти за време до $15 s$.

3. Орбитална станция „Мир“

Апаратурата, която се използва на борда на пилотируемата орбитална станция „Мир“, се проектира и изпитва съгласно [2]. Част от изискванията, свързани с ДП на ВЕС са:

- Апаратурата трябва да съхрани работоспособност при въздействие на импулси с амплитуда $\pm 4,5 V$ и честота на повторение от 1 до $600 Hz$, когато БМ се изменя от $23 V$ до $34 V$;
- Амплитудата на пусковия ток на ВЕС трябва да е до 5 пъти по-голяма от максималния ток на потребление в работен режим;
- Нивото на пулсациите на тока в БМ, създавани от ВЕС не трябва да превишава величините, посочени в табл. 1;
- ВЕС трябва да съхрани работоспособност при въздействия от БМ, съгласно табл. 2;
- ВЕС трябва да има средства за защита от въздействие на статично електричество;
- Нивото на акустичен шум на ВЕС да не превишава $69 dB$ на разстояние $1 m$.

Табл. 1. Максимално допустими токови пулсации приведени в бордната мрежа на „Мир”

Честота на токовете пулсации	Напрежение [V], ефективна стойност
От 10 до 25 [Hz]	0,25 [V]
От 25 до 60 [Hz]	0,25 [V] - 0,1 [V]
От 60 до 250 [Hz]	0,1 [V]
От 250 до 1700 [Hz]	0,1 [V] - 0,15 [V]
От 1700 до 6500 [Hz]	0,15 [V]
От 6,5 до 150 [KHz]	150 [mV] - 0,5 [mV]
От 0,15 до 1 [MHz]	500 [uV] - 100 [uV]
От 1 до 100 [MHz]	100 [uV]

Табл. 2. Синусоидални напреженови пулсации създавани от бордната мрежа на „Мир”

Честота на напрежените пулсации	Напрежение [V], ефективна стойност
От 10 до 25 [Hz]	0,8 [V]
От 25 до 60 [Hz]	0,8 [V] - 0,3 [V]
От 60 до 250 [Hz]	0,3 [V]
От 250 до 1700 [Hz]	0,3 [V] - 1 [V]
От 1700 до 2000 [Hz]	1 [V]
От 20 до 150 [KHz]	1 [V] - 0,15 [V]
От 0,15 до 1 [MHz]	0,15 [V] - 0,003 [V]

4. Международна космическа станция

Съгласно [6] и [8] част от изискванията към електрозахранването на апаратурата на борда на международната космическа станция (МКС) са:

- Съхраняване на работоспособност при скокообразни изменения на напрежението до +/- 4,5 V с продължителност на предния фронт 100 μ s и честота на повторение до 1 Hz;
- Апаратурата да функционира нормално при наличие на еднократни импулси с амплитуда до 15 V с продължителност 40 +/- 5 μ s от източник с вътрешно съпротивление 10 Ω . Времетраенето на импулсите да е до 20 ms при бордно напрежение в пределите на 23-29 V.
- Пусковият ток да не превишава пет пъти установения максимален работен ток.
- Апаратурата трябва нормално да функционира при нещатно (случайно) попадане на корпус на една от шините на първичното захранване.

Табл. 3. Характеристики на импулсните шумове между: шините на БМ; шините на БМ и корпуса

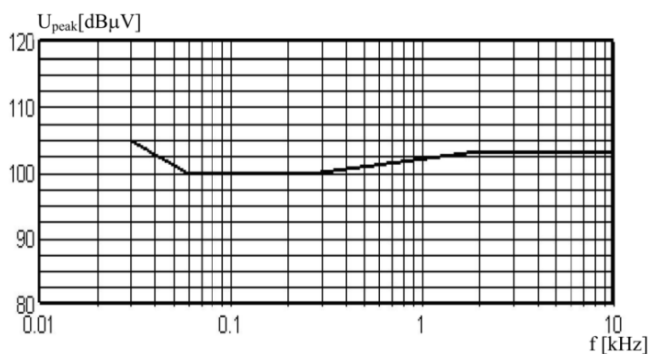
Продължителност [μ s]	50	100	300	500
Амплитуда +БМ / -БМ [V]	+/- 15	+/- 15	+/- 10	+/- 10
Амплитуда БМ / корпус [V]	+/- 35	+/- 35	+/- 10	+/- 10

А) Нискочестотни шумове (Urpeak, low-frequency noise)

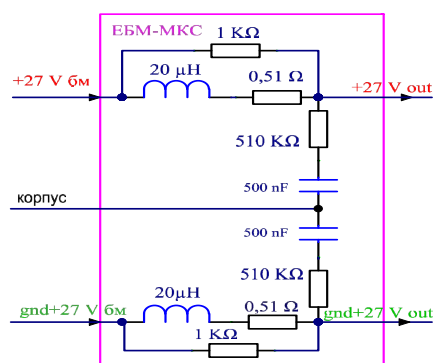
Пиковите значения на напрежението на шумовете, създавани от ВЕС в БМ не трябва да превишава значенията, показани на фиг. 3. Лентата на измерване трябва да бъде 10 Hz в диапазона от 30 Hz до 1 KHz и 100 Hz в диапазона от 1 KHz до 10 KHz. При измерването се използва еквивалент на БМ на МКС (фиг. 4).

Б) Устойчивост на оборудването към индустриални шумове (Industrial RF noise)

Индустриалните радишумове, създавани от БМ (табл. 3), не трябва да нарушават работата на БАА. Продължителността на фронтите трябва да е максимум 5 % от продължителността на импулса. Честотата на повторение е 1 Hz в течение на 60 s.



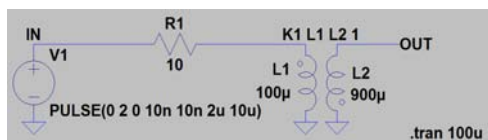
Фиг. 3. Нискофреотен шум, създаван от НА в БМ на МКС



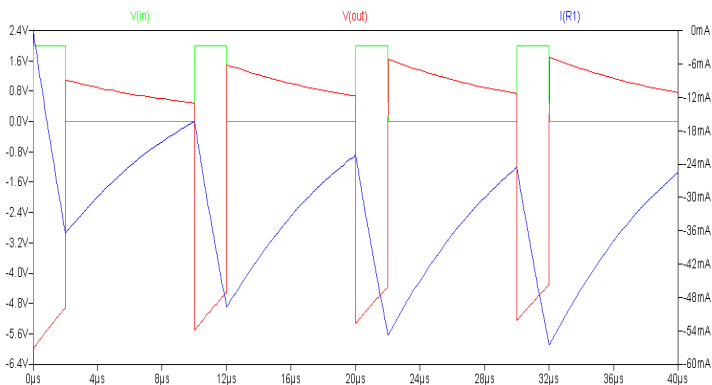
Фиг. 4. Еквивалент на БМ на МКС

5. Симуляционни методи за анализ на ДП на вторични електрозахранващи източници за бордна аерокосмическа апаратура

На фиг. 5 и фиг. 6 са представени модел и симулация на процесите в импулсен трансформатор. Характерно за модела в този режим е, че входното напрежение V_{in} (зелен цвят) е еднополярно, а изходното напрежение V_{out} (червен цвят) е двуполярно. Токът в R_1 (син цвят) след няколко периода се установява, според стойността на времеконстантата.



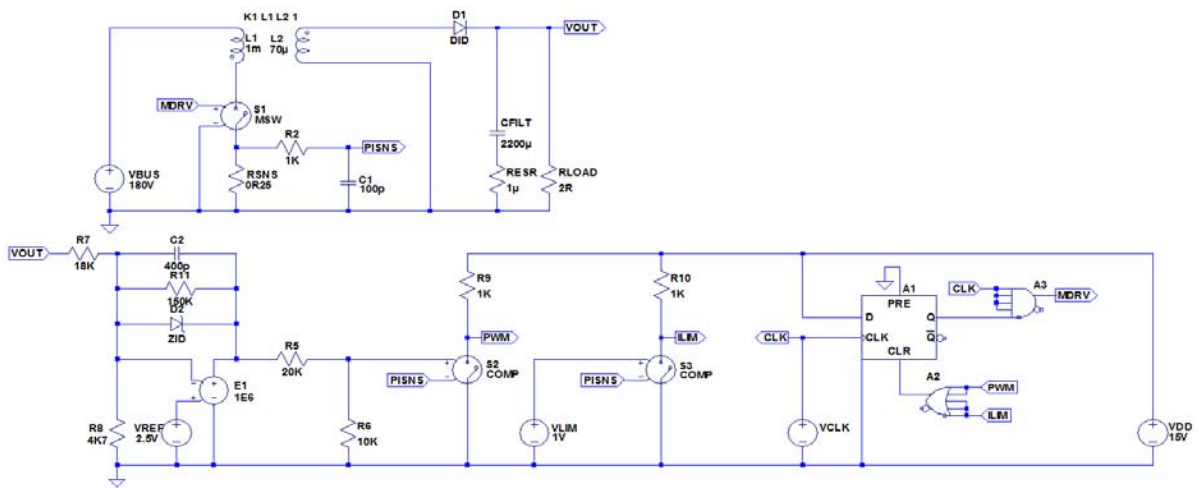
Фиг. 5. Модел на импулсен трансформатор



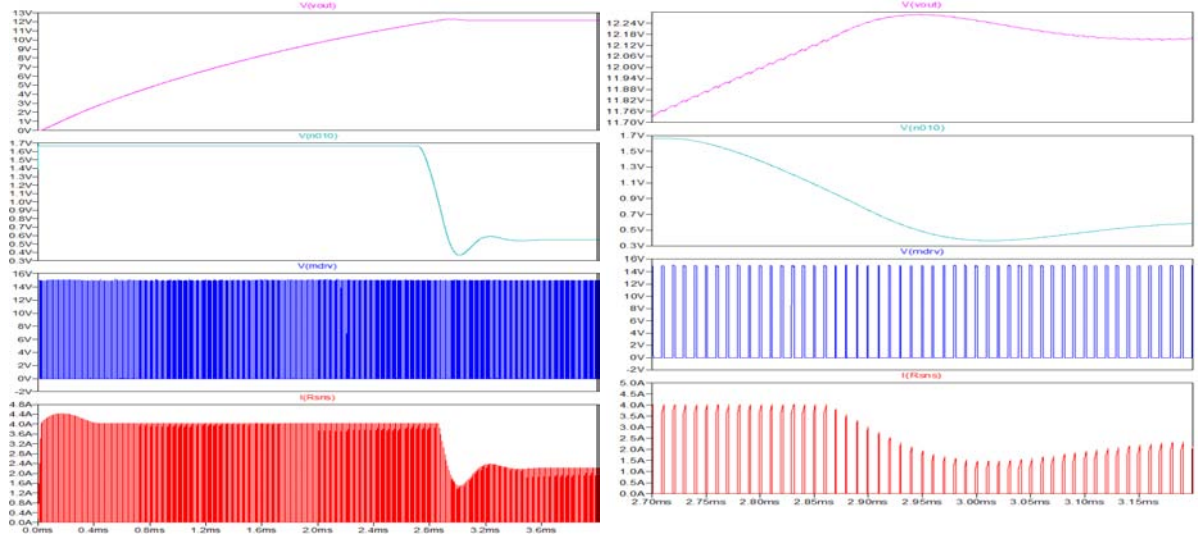
Фиг. 6. Симулация на импулсен трансформатор

На фиг. 7 е дадена симулация на обратноходов преобразувател с две обратни връзки: по изходно напрежение V_{out} и по ток на ключовия транзистор I_{sns} . На фиг. 8 и фиг. 9 са показани следните времедиаграми, характеризиращи динамичните процеси във вторичните електрозахранващи източници: изходното напрежение на преобразувателя е с лилав цвят; сигналът на обратната връзка V_{R6} е със зелен цвят; напрежението на изхода на контролера V_{mdrv} е със син цвят и токът на ключовия транзистор I_{sns} е с червен цвят. За интервала от време $\Delta t_1 = 0 - 7 \text{ mS}$ сигналът $V_{R6} = 1.7 \text{ V}$ има постоянно ниво и задава максимален коефициентът на запълване D , но V_{out} плавно нараства, защото се зарежда изходният кондензатор $C_{flt} = 2200 \mu\text{F}$ с пиков ток на първичната намотка, ограничен от компаратора S_3 до ниво $I_{lim} = \frac{V_{lim}}{R_{sns}} = \frac{1 \text{ V}}{0.25 \Omega} = 4 \text{ A}$. При анализ на сигнала V_{R6} за $t_2 = 3 \text{ mS}$ и $t_3 = 3.2 \text{ mS}$, се забелязват отрицателна и положителна полувълна на пререгулиране в отрицателната обратна връзка за стабилизация на напрежението V_{out} . На фиг. 9 е демонстрирана лупата на софтуера, позволяваща детайлно разглеждане на процесите от фиг. 8.

На фиг. 10 е даден модел на обратен преобразувател, изграден с контролер UC3842 и обратна връзка, следяща не изходното напрежение V_{R9} , а изправеното напрежение U_1 на вторичната намотка L_2 . На фиг. 11 цветовете са разпределени така: червен за I_{R6} ; зелен за V_{comp} ; сив за U_1 и син за I_{R9} . Забелязва се, че когато $U_1 = 16 \text{ V}$ (при $t = 12 \text{ mS}$) се включва контролерът UC3842 и започва разреждането на кондензатора C_6 .

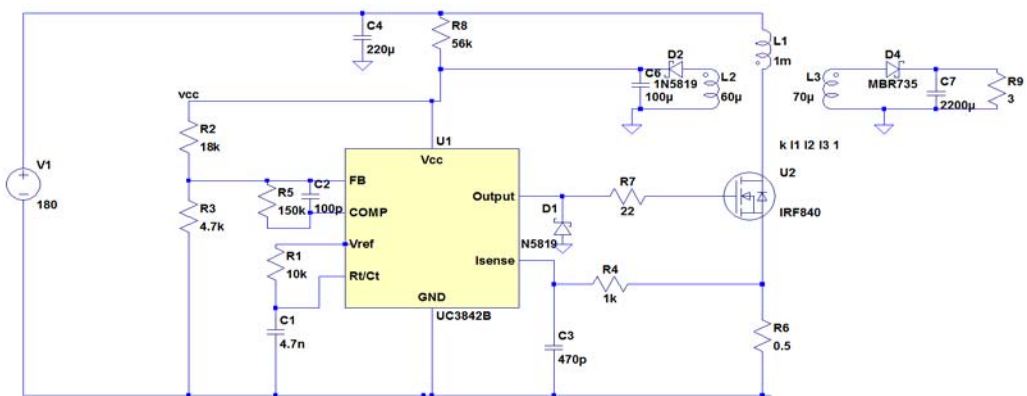


Фиг. 7. Симулация на обратен преобразувател с контролер в токов режим и обратна връзка



Фиг. 8. Стартови процес при $T_s = 0 - 4 \text{ ms}$.

Фиг. 9. Стартови процес при $T_s = 2.7 - 3.2 \text{ ms}$.



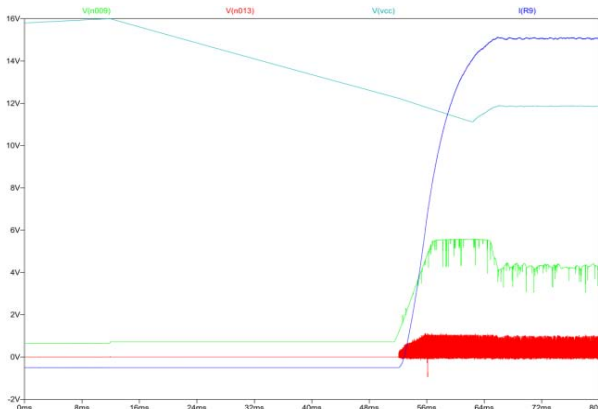
Фиг. 10. Схема на обратен преобразувател с контролер UC3842 и обратна връзка

В момента $t = 64 \text{ ms}$ диодът D_2 се отпушва и започва да се зарежда кондензатора C_6 до напрежение в режим на стабилизация $U_1 = 12 \text{ V}$, зададено от резисторите на обратната връзка R_2 и R_3 . При разглеждане на формата на напрежението V_{comp} се забелязват пет участъка: минимално напрежение, положителен фронт, плато, отрицателен фронт и зона на

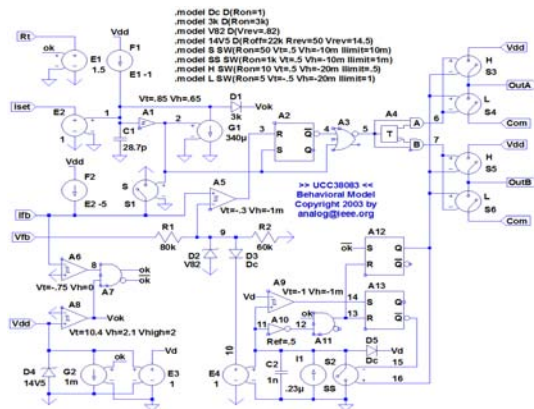
регулиране. До момента от време $t = 56 \text{ mS}$ положителният фронт на V_{comp} задава плавно нарастващ коефициент D , което се отразява в плавното увеличение на амплитудата на тока на транзистора U_2 . В зоната на регулиране и стабилизиране на U_1 от $t = 66 \text{ mS}$ до $t = 80 \text{ mS}$ се забелязват десетина полуувълни на V_{comp} (с резонансна честота $F_{res} \approx 1 \text{ KHz}$).

На фиг. 12 е показана структурата на модела на контролера от ново поколение UCC38083, симулираща неговата вътрешна структура и функции. Този контролер се характеризира с ниска консумация и е подходящ за космически цели.

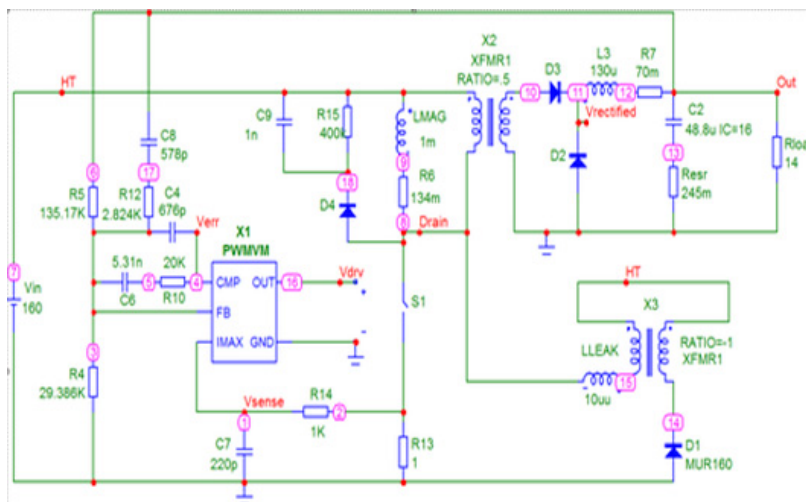
На фиг. 13 е даден модел на трансформаторен правоходов преобразувател, в който е използван обобщен функционален еквивалент на контролера $X1$, работещ в напрежен режим. На фиг. 14 са визуализирани част от параметрите от фиг. 13: гейтовото $V16$ и дрейновото напрежение $V8$ на обобщения функционален еквивалент на MOSFET транзистор $S1$; токът I_{Lmag} ; изходното напрежение V_{out} ; вторичното напрежение $V10$ и напрежението на изхода на усилвателя на грешката $V4$. При анализ на графиката на V_{out} , се забелязва пререгулиране до моментна стойност 35 V , при установена стойност от 24 V , което доказва неоптимален режим на работа на обратната връзка по напрежение и нуждата от допълнителна оптимизация на нейната работа. Показаният на фиг. 15 модел на трансформаторен обратноходов преобразувател съдържа параметри на стандартни произвеждани компоненти, при което симулацията на съвместната им работа е максимално близка до реалните процеси. Дадени са изчислените от софтуера стойности на токовете (син цвят) и разсейваните мощности (червен цвят) на съответните елементи. На фиг. 16 са визуализирани част от параметрите от фиг. 15: гейтово V_{drv} и дрейново напрежение V_{drain} на транзистора $X13$, напрежението на токовия сензор V_{sense} ; токът на вторичната намотка I_{sec} ; вторичното напрежение V_{sec} и изходното напрежение V_{out} . Сравнявайки графиките на последните две напрежения може да се забележи положителния ефект от дросела $L1$ за подтискане на напрежените пулсации.



Фиг. 11. Стартови процес на фиг. 39 за $T_s = 0 - 4 \text{ mS}$



Фиг. 12. Симулация на контролер UCC38083



Фиг. 13. Модел на трансформаторен правоходов преобразувател

Литература:

1. Б у к р е е в, С. С., В. А. Г о л о в а ц к и й и др., Источники вторичного электропитания, М., *Радио и связь*, 1983, 280с.
2. Д у н а е в, А. И., Аппаратура научная, Общие технические требования, ОТТ-87, *Главкосмос*, -М., 1987, 92с.2
3. Вторичный источник питания системы управления, прект „Фобос“, Техническое описание ВИП СУ ВСК, ВСК.30.038.ТО, ВИП СУ ВСК ЛК-1, *ИКИ-БАН*, 1987 г.
4. Г р а м а т и к о в, П., Синтез на импулсно захранване с минимални пулсации, *сборник доклади от юбилейната научна сесия, посветена на 45 години ВНВУ „Г. Бенковски“*, град Долна Митрополия, 21-23 май 1990 г
5. Г р а м а т и к о в, П., Метод за подтискане на нискочестотни токови пулсации в захранването на цифровото видеозапомнящо устройство на видеоспектрометричния комплекс „Фрегат“ от проекта „Фобос“ , *Втора национална конференция „Аерокосмос и екология“*, Шумен, 19-20 април 1990 г
6. International Space Station Program. *NASA/RSA Joint Specifications/Standards Document for the ISS Russian Segment*, SSP 50094, Revision A, NASA, Johnson Space Center Houston, Texas, March 10, 2000. 551p.
7. Б о я з и т о в, С. Ю., В. Ф. В а с т р ю к о в, В. Е. Д е е в, К а т а н о с о в Н. М., М и х а й л о в М. В., Система электропитания корректирующей двигательной установки малого космического аппарата, *журнал „Известия Томского Политехнического Университета“*, выпуск № 4, том 316, 2010 г.
8. S.P. К о г о л е в , Rocket and Space Corporation Energia, ISS Russian Segment User Manual, 1-186p., 2011. http://www.energia.ru/en/iss/researches/iss_rs_guide.pdf
9. Д е м н ь т е в, Д м. Ф., Ю. М. К а з а н ц е в, Коррекция амплитудно-частотной характеристики импеданса выходной шины системы электропитания космических аппаратов, *журнал „Известия Томского Политехнического Университета“*, выпуск № 4, том 320, 2012 г.