

ЕЛЕКТРОМАГНИТНА СЪВМЕСТИМОСТ 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

Резюме: Изложена е методика на изследване и подобряване на параметрите на EMC на ВЕС при съвместната им работа в комплекса от научна апаратура при различни циклограми на полета, според техническата документация за EMC на аерокосмическия апарат (с цел преминаване на приемните изпитвания по електромагнитна съвместимост); изследвани са закономерности, взаимодействия, свойства и стойности на фактори и параметри на отделните ВЕИ с цел подобряване на електромагнитната съвместимост на ВЕС при съвместната им работа с бордната апаратура. Разглеждат се взаимодействията на ВЕС с ПЕС и БАА в EMC план. Основен обект на изследване в този проект са процесите и параметрите на EMC на бордни ВЕС.

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SECONDARY POWER SYSTEMS FOR ONBOARD AEROSPACE EQUIPMENT

Pavlin Gramatikov

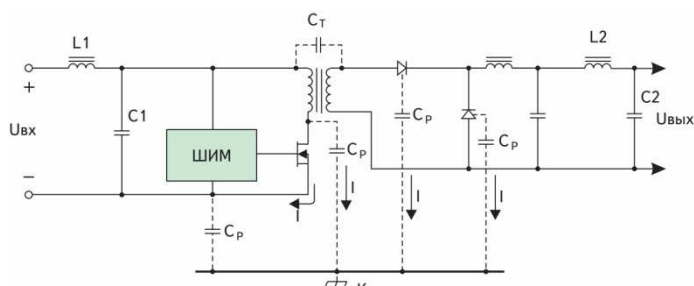
Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg

Keywords: *Switching Power Supply Design; Electromagnetic Compatibility.*

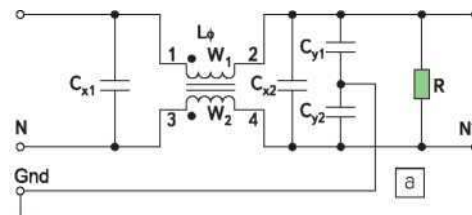
Abstract: *methodology of the study and improvement of the parameters of EMC of SES in their work in the complex of scientific devices at different cyclogram flight, according to the technical documentation of EMC aerospace apparatus (for passing the entrance tests for electromagnetic compatibility); detect patterns, interactions, properties and values of the factors and parameters of individual SEU in order to improve the electromagnetic compatibility of SES in their work with boarding facilities. Are considered interactions between SES, FES and BAA in EMC plan. Main object of study in this project are the processes and parameters of EMC of boarding SES.*

Въведение

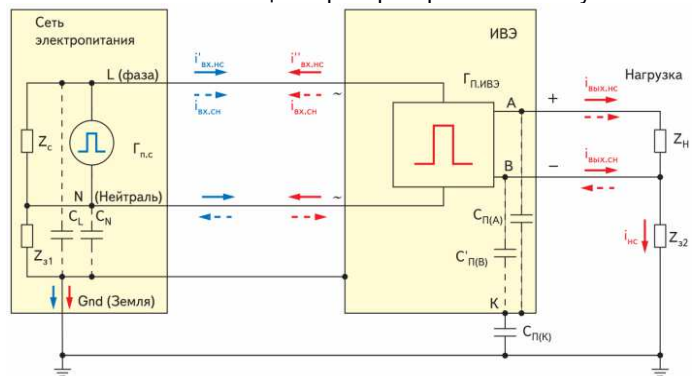
Обект на изложението е съвкупността от научни дейности по вторични електрозахранващи системи (ВЕС, SES) за бордна аерокосмическа апаратура (БАА, ВАА), извършвани с цел подобряване на техните EMC-параметри. ВЕС са функционално звено от БАА, което: приема електрическата енергия от първичната електрозахранваща система (ПЕС, FES) преобразува, стабилизира и управлява (чрез телеметрията) нейните параметри съгласно енергийните особености на БАА и задачите на научния експеримент. Обсъдени са методи на проектиране на ВЕС, съобразени с EMC; конструкция на дросели и трансформатори с подобрена EMC; специфични методи за измерване на радиоизлъчване на отделен електронен градивен блок на ВЕС с последващи анализ и технически мерки за преминаване на EMC-изпитванията. Изложени са авторски методи и средства за разрешаване на EMC проблеми на вторични електрозахранващи източници (ВЕИ, SEU). Те могат да се трансферират за разрешаване на EMC проблеми на безпилотни летателни апарати (БЛА) и наземни цели. При въздухоплавателните ВЕС има ограничения на схемния и елементния избор, но основният проблем остава теглото на крайното изделие. Тези фактори и технологично-финансовите ограничения при БЛА затрудняват синтезирането и оптимизирането на EMC.



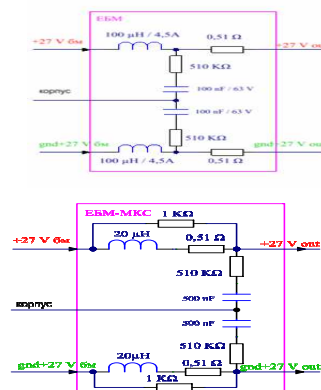
Фиг. 1. Основни пътища на разпространение на шумовете



Фиг. 2. Входен филтър

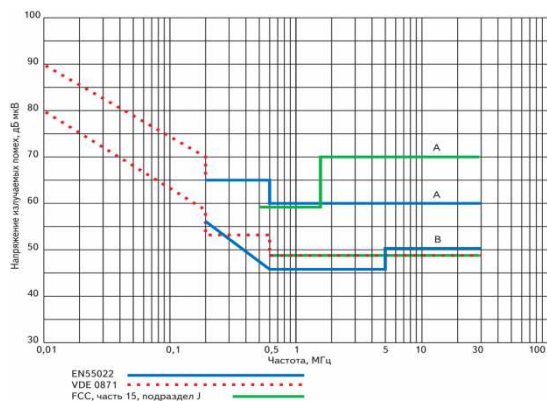


Фиг. 3. Симетрични и несиметрични EMI

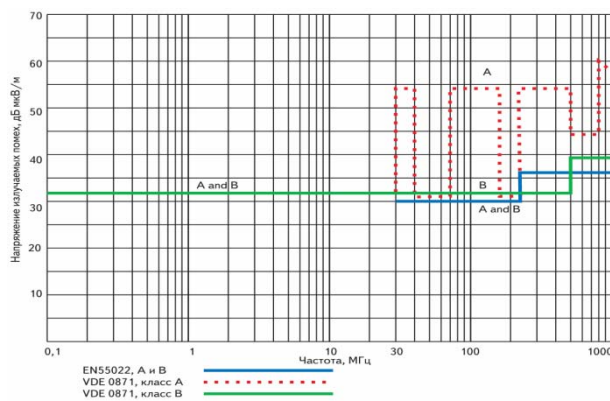


Фиг. 4. Еквивалент на БМ на „Мир“ и БМ на МКС

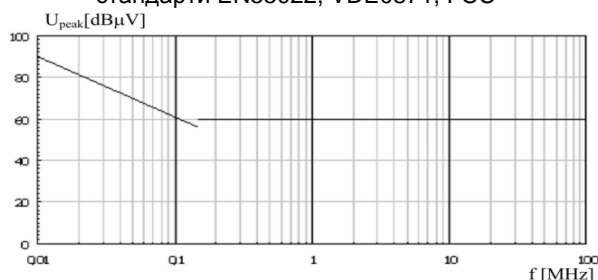
Във ВЕС високата честота на преобразуване $100-500\text{ KHz}$, високите значения на dV/dt и dI/dt водят до възникване на високочестотни шумове. На фиг. 1 е дадено разпространението на EMC вътре в кутията на ВЕИ. Паразитните капацитети C_T и C_P (C_T е между намотките на трансформатора, а C_P е между металните тела на ключовите елементи и корпуса на БАА в ролята на радиатор) водят до влошаване на EMC. Основните мерки за подобряване на EMC са: опроводяване на печатната платка с цел намаляване на шумовете, генерирани от силовите елементи; използване на вътрешни пасивни филтри и употреба на външни за ВЕИ шумоподтискащи филтри (фиг. 2). За БАА се правят две основни проверки: за устойчивост към външни EMI и за генериране на EMI. Терминът EMC (ElectroMagnetic Compatibility) е способността на ВЕИ ефективно да функционира със зададено качество без да създава недопустими електромагнитни шумове за ПЕС и БАА. Под EMI (ElectroMagnetic Influence) се разбират електромагнитни явления, които намаляват качеството на функциониране на БАА и ПЕС. Под ниво на EMI се има в предвид величината на шума, измерена по регламентирани условия. Според средата на разпространение EMI са два вида: в проводяща среда (проводници, проводящи повърхности) се наричат кондуктивни явления, а в пространството се разпространяват електромагнитни излъчвания, тук наричани некондуктивни процеси. Кондуктивните процеси се делят на симетрични (differential mode) и несиметрични (common mode). При ВЕИ за БАА симетричните EMI се разпространяват аналогично на протичането на тока между плюсовия и минусовия проводник, а несиметричните - между проводниците и корпуса (или шината за заземяване). На фиг. 3 с пунктир са дадени симетричните, а с цели линии - несиметричните. В син цвят е даден генераторът на EMI от ПЕС, а в червен цвят - генераторът на EMI от ВЕИ. Според честотния си диапазон EMI се делят на следните: нискочестотни ($0 - 9\text{ KHz}$); високочестотни ($9 - 150\text{ KHz}$) и радиощумове ($0,15\text{ MHz} - 1\text{ GHz}$). При измерване на кондуктивни и некондуктивни EMI на ВЕИ, се използват еквиваленти на БМ (виж фиг. 4), различни за отделните космически апарати (КА). На фиг. 5 и фиг. 6 са дадени различни граждански стандарти, които може да се сравнят с аналогичните космически от фиг. 7 и фиг. 8, като БАА и НА не трябва да създават шумове над тези норми. При калибрирано измерване на EMC в специализирани и нестандартни лаборатории по фиг. 7 лентата на измерване трябва да бъде: 1 KHz в диапазона $0,01 - 0,15\text{ MHz}$; 10 KHz в диапазона $0,15 - 30\text{ MHz}$ и 100 KHz в диапазона от $30 - 100\text{ MHz}$. Над 30 MHz се извършват измервания с калибрирани приемни антени както за хоризонтално, така и за вертикално поляризовани вълни. Лентата на измерване трябва да бъде: 1 KHz в диапазона $0,01 - 0,15\text{ MHz}$; 10 KHz в диапазона от $0,15 - 30\text{ MHz}$; 100 KHz в диапазона от $30 - 100\text{ MHz}$ и 1 MHz в диапазона $0,1 - 1\text{ GHz}$.



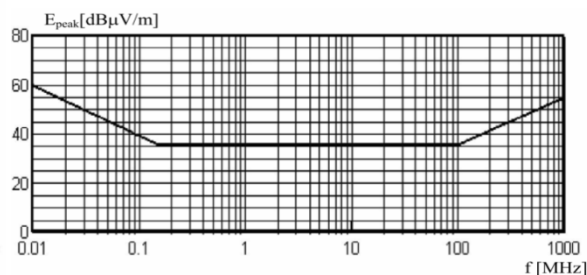
Фиг. 5. Ограничение за кондуктивни шумове в стандарти EN55022, VDE0871, FCC



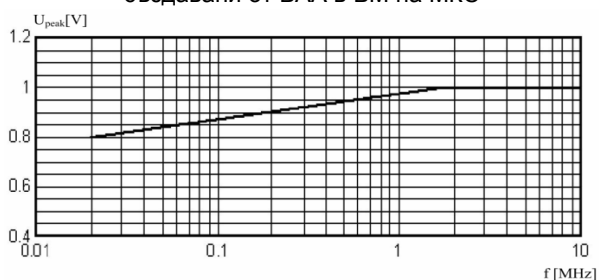
Фиг. 6. Ограничение за излъчени радиошумове в EN55022, VDE0871, FCC



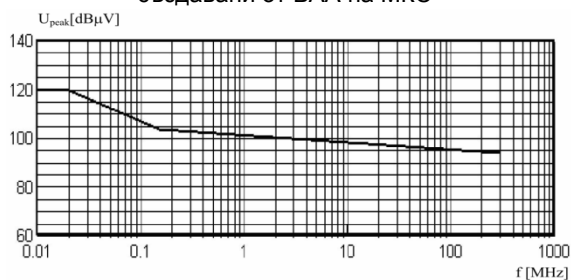
Фиг. 7. Ограничение за кондуктивните шумове, създавани от БАА в БМ на МКС



Фиг. 8. Ограничение на излъчени радиошумове, създавани от БАА на МКС



Фиг. 9. Нискофреkwентни EMI, от БМ на МКС

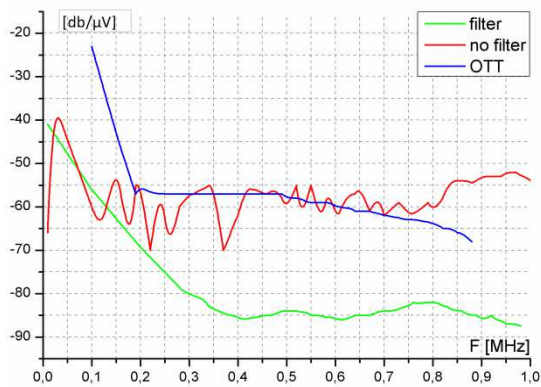


Фиг. 10. Индустрални EMI, от БМ на МКС

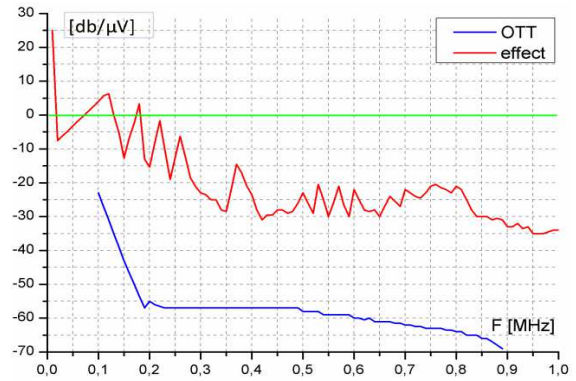
ВЕИ и ВЕС като всяка техническа апаратура са уязвими, особено в областта на своята схема на управление на въздействието на силни външни високочестотни магнитни полета. ВЕИ и ВЕС за МКС трябва нормално да функционират при въздействието на пикови значения на радиошумовете, генерирани вътре в МКС (фиг. 9 и фиг. 10). Нормите от фиг. 7 и фиг. 8 са дадени при определено разстояние на приемната антена от БАА и затова е трудно да бъдат сравнени с кривите от фиг. 5 и фиг. 6. По стандарт EN55022 за клас А и В разстоянията са 30 m и 100 m съответно, докато при VDE0871 EMI се измерват на 10 m и 30 m. Когато ВЕИ е в отделна метална кутия, намираща се в металната кутия на една БАА, сравнително лесно се изпълняват изискванията на фиг. 7 и фиг. 8. В този случай ВЕИ преминава изпитванията в състава на БАА.

Методики за подобряване на EMC

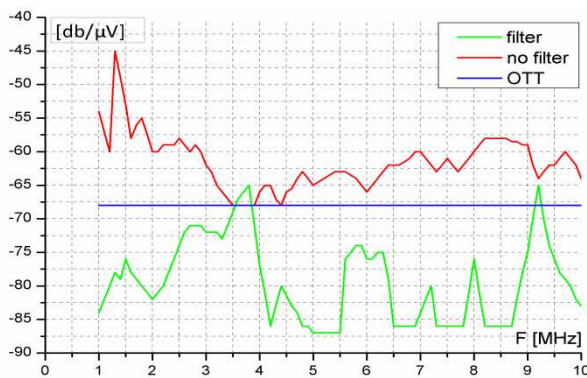
При проблеми с външните EMI може да се предприемат следните мерки: екраниране на чувствителните възли; правилно заземяване и минимизация на площта на контурите. При превишаване на вътрешните за ВЕИ и ВЕС EMI кондуктивни шумове подходящи са следните методи: изменение на работната честота на ВЕИ; ограничаване на скоростта на нарастване с RC и RCVD вериги (като демпфери, snabbers); ограничаване на пиковите нива на паразитните процеси с VDRC фиксатори; употреба на подходящи TVS -диодни (Transient-voltage-suppression) и оптимален подбор на компоненти и разположение. При превишаване на вътрешните за ВЕИ и ВЕС некондуктивни EMI помагат следните способности: минимизация на паразитните капацитети между първичната и вторичната намотка; намаляване на индуктивността на разсейване на



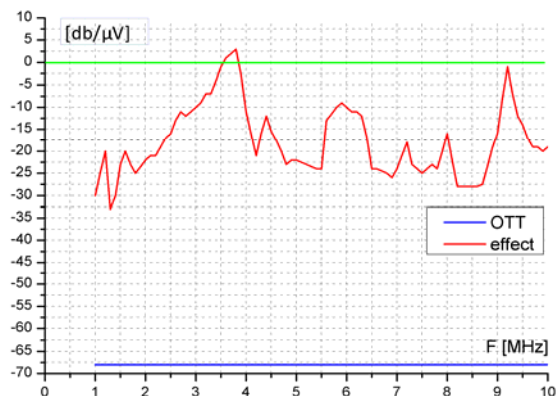
Фиг. 11. EMC на БО за 0,01-1MHz



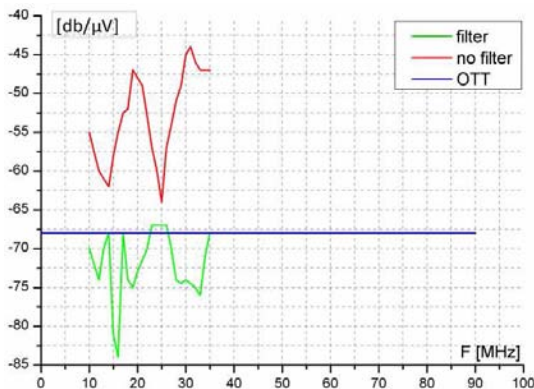
Фиг. 12. Ефект от филтър за БО 0,01-1MHz



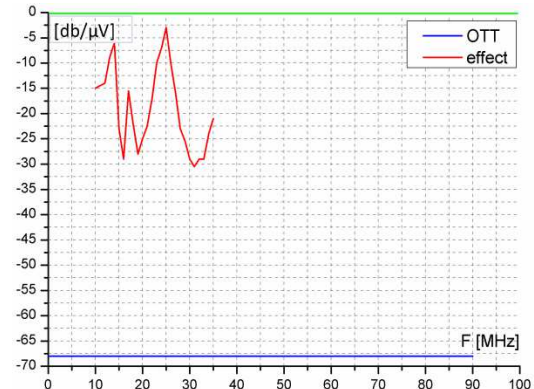
Фиг. 13. EMC на БО за 1-10MHz



Фиг. 14. Ефект от филтър за БО 1-10MHz



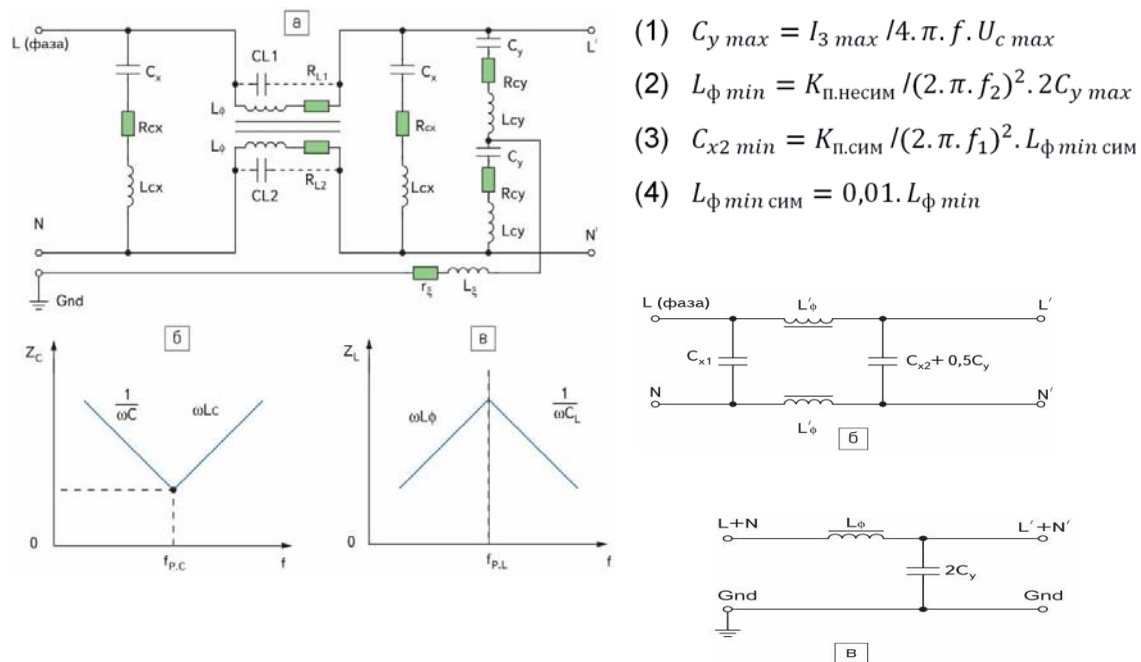
Фиг. 15. EMC на БО за 10-100MHz



Фиг. 16. Ефект от филтър за БО 10-100MHz

силовия трансформатор; екраниране на силовите индуктивни компоненти (особено тези с въздушна междина); оптимизация на конструкцията на високочестотните силови трансформатори. Когато в изходните напрежения имаме недопустими по нива кондуктивни шумове, може да се използват: квазирезонансен метод на преобразуване, ограничаване на скоростта на нарастване с RC вериги; демпфери за силовите диоди; високочестотни дросели с минимален паразитен капацитет; шунтиране на електролитните кондензатори с високочестотни кондензатори; използване на проходни кондензатори в изходните шини; оптимизация на свързването на електрическите „земи“. При наличие на големи нискочестотни *EMI* с честота по-ниска от работната за ВЕИ трябва: да се повиши работната честота; да се подобрят параметрите на обратната връзка на ВЕИ или да се смени законът на регулиране с по-оптимален. Когато имаме недопустими нива на първа, втора (и близките до тях) хармонични на основната работна честота, помага използването на двузвучен филтър в БМ.

Даденият на фиг. 17 филтър подтиска с 30 - 90 dB шумове, намиращи се в честотния диапазон 0, 15-30 MHz. Кондензаторите C_{x1} и C_{x2} заедно с диференциалния дросел L_{ϕ} са



Фиг. 17. Еквивалентни схеми на входен филтър

предназначени за филтрация на кондуктивните симетрични шумове, а кондензаторите C_{y1} и C_{y2} служат за филтрация на кондуктивните несиметрични шумове на *EMI*. Дроселът L_{ϕ} е с феритен материал с висока магнитна проницаемост и има две еднакви намотки. На фиг. 11, 13 и 15 са дадени реални данни за ВЕС на бордна българска космическа оранжерия: без филтър (червен цвят); след употреба на авторски филтър (зелен цвят) и космически норми (син цвят). На фиг. 12, 14 и 16 е показан диференциално ефектът от филтъра (червен цвят) и прагът (зелен цвят) на подобрение (надолу) и влошаване (нагоре).

Методиката е приложена и проверена при серийно производство на хиляди екземпляри от четири наземни ВЕИ, произведени в България. Положителните резултати от приложението на авторската методика са потвърдени при калибрирани измервания по европейски стандарти в сертифицирани лаборатории в Германия, Холандия, Сърбия и България.

Литература:

1. Протокол №01 Квалификационных испытаний (Этап 2), ГНЦ РФ-ИМБП, Проект „Нейролаб“, система „Нейролаб-Б“, КМ 01.055.00.00 зав. №01, Оцениваемые показатели: Электромагнитная совместимость, 10.11.1995 г.
2. 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.
3. Sketo e J. G. "Integrated circuit electromagnetic immunity handbook", Tech. Rep. NASA/CR-2000-210017, Boing Information, Space and Defense Systems, Seattle, WA, 2000.
4. Estienne, J. P., Ferrante J. G. "Geometrical & Electromagnetic Modeling for Aerospace Engineering". Proc „2nd Conference on Advances and Applications of GiD“, 18-20 February 2004, Barcelona, Spain.
5. Граматиков П. А., Р. Г. Шкевов, "Изследване на електромагнитното излъчване на микропроцесорна система с космическо предназначение". В: Scientific conference with international participation „Space, Ecology, Safety“ С., Space Research Institute, 10-13 June 2005, p. 51-122, ISBN 954-438-484-7. <http://www.space.bas.bg/SENS/Ses2005/AT3.pdf>
6. Cleyton, P. "Introduction to Electromagnetic Compability", Second Edition, Department of Electrical and Computer Engineering, School of Engineering, Mercer University, Macon, Georgia and Emeritus Professor of Electrical Engineering, University of Kentucky, Lexington, Kentucky. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006, pp. 1-983.
7. Граматиков, П. А., Р. Г. Шкевов, "Оптимизация на електромагнитното излъчване на цифрови модули с космическо предназначение", SENS'2006 Second Scientific Conference with International Participation „Space, Ecology, Nanotechnology, Safety“, Space Research Institute, 27 – 29 June 2007, Varna, Bulgaria.
8. Шкоркин, В. В., Ю. М. Казанцев, "Снижение помехо эмисии силовых дроселей тороидальной конструкции", журнал „Известия Томского Политехнического Университета“, выпуск № 4, том 316, 2010 г.