

Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость

ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ С АВТОНОМНЫМИ СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА Часть I. Критерии эффективности схемотехнических средств

Главные задачи обеспечения электроэнергетической и электромагнитной совместимости вторичных источников импульсного питания (ВИИП) с автономными системами (АСЭС) электроснабжения переменного тока, в частности транспортными, — это сохранение качества электроэнергии питающей сети и допустимого уровня генерируемых электромагнитных помех. Данная статья открывает цикл работ, посвященных выбору способов и схемотехнических решений, обеспечивающих выполнение этих задач, а именно критериям эффективности схемотехнических средств для ВИИП с емкостным накопителем.

**Станислав Резников, д. т. н.
Владимир Бочаров, к. т. н.
Евгений Парфенов
Николай Гуренков
Александр Корнилов**

Введение

Вторичные источники импульсного питания (ВИИП) с емкостным накопителем, обладающие большой разрядно-импульсной мощностью (десятки мегаватт), находят широкое распространение в системах питания твердотельных лазеров, средств радиоэлектронной борьбы, конденсаторных сварочных аппаратов, антиобледенительных и других вибраторов, источников питания ионных и плазменных двигателей и проблесковых вспышек, имитаторов источников мощных и сверхмощных электромагнитных импульсов (ЭМИ) и других.

К основным проблемам, возникающим при разработке ВИИП с первичным питанием от автономных систем электроснабжения (АСЭС) переменного трехфазного тока, в частности авиационных, авиационно-космических и судовых, относятся обеспечение электроэнергетической и электромагнитной совместимости (ЭЭС и ЭМС) с первичной сетью (обычно 115/200 В, 400 ГЦ или 220/380 В, 50 Гц), снижение массы и габаритов, повышение среднециклического КПД, надежности и точности регулирования выходных параметров.

Главной задачей обеспечения электроэнергетической и электромагнитной совместимости ВИИП с первичной сетью является выбор способа и схемотехнического решения для периодической зарядки емкостного накопителя от нулевого (режим КЗ) до высокого (1–5 кВ) предразрядного напряжения

(режим, близкий к ХХ) при сохранении качества электроэнергии питающей сети, регламентируемое требованиями ГОСТ и другими нормативными документами (обеспечение постоянства амплитуды, частоты и формы кривой напряжения, допустимого уровня помех, а также минимальной загрузки реактивной мощностью).

Проблема сохранения качества электроэнергии питающей сети при работе ВИИП еще более усложняется при наличии предразрядной и послеразрядной пауз в зарядном токе накопительного конденсатора для стабилизации предразрядного напряжения на нем и восстановления электрической прочности (деионизации) импульсной нагрузки. Игнорирование указанной проблемы на всех стадиях проектирования и разработки ВИИП практически всегда приводит к большим неоправданным затратам времени и средств на их доработку и испытания в составе АСЭС.

Построению и анализу ВИИП с первичным питанием от систем электроснабжения переменного и постоянного тока посвящены многие работы. Однако в отечественных и зарубежных публикациях не уделено достаточного внимания исследованию воздействий ВИИП на качество электроэнергии автономных систем электроснабжения переменного тока и разработке универсальных и высокоэффективных схемотехнических средств для его сохранения. В последнее десятилетие получили широкое распространение новые эффективные сильноточные, высоко-

вольтные и относительно высокочастотные ключевые полупроводниковые приборы (IGBT- и MOSFET-транзисторы, а также запираемые тиристоры). Они позволяют пересмотреть известные схемотехнические решения при построении ВИИП с целью повышения их эффективности при сохранении качества питающей электроэнергии, что представляет собой актуальную научно-техническую задачу, имеющую важное значение и способствующую созданию перспективных автономных электротехнических комплексов, например авиационных, авиационно-космических и судовых.

Критерии эффективности схемотехнических средств, применяемых в статических преобразователях для сохранения качества питающей электроэнергии автономных систем электроснабжения (АСЭС) переменного трехфазного тока постоянной частоты

Под качеством электропитания (электроэнергии) на входах сетей понимается совокупность потребительских свойств питающей электроэнергии, выражаемых в отклонениях параметров от номинальных значений и обуславливающих нормальную энергетическую работоспособность потребителей в соответствии с их назначением [1–5]. Оно обычно определяется ГОСТами и отраслевыми нормами отдельно для статических и динамических (переходных) режимов применительно к каждому виду и параметру электропитания или группе потребителей с учетом нормальных и ненормальных режимов, категорий потребителей и т. п. [6, 7].

В соответствии с межгосударственным стандартом на нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения показателями качества являются [6, 7]:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения;
- доза фликера;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;
- коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям;
- отклонение частоты;
- длительность провала напряжения;
- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения;
- значения грозových, коммутационных и других импульсных напряжений (перенапряжений, помех).

В межгосударственных стандартах на нормы качества электроэнергии в различных автономных системах электроснабжения переменного трехфазного тока постоянной частоты показатели качества имеют свою соответствующую специфику. Так, например, для СЭС самолетов и вертолетов (115/200 В, 400 Гц) к таким параметрам относятся [7]:

- Угол сдвига фаз между векторами напряжений соседних фаз (116–124°).

- Диапазон установившегося фазного напряжения любой фазы (при нормальной работе: 108–119 В; при ненормальной работе: 100–127 В; при аварийной работе: 104–122 В).
- Небаланс фазных напряжений (при нормальной работе: ≤ 3 В; при аварийной работе: ≤ 4 В).
- Коэффициент амплитудной модуляции напряжения при импульсно-периодической нагрузке с $\cos\varphi \geq 0,95$ и относительной амплитудой тока в импульсе 7% $I_{п.ном.ист.}$ (не более 1%).
- Частотные составляющие огибающей кривой амплитудной модуляции (в пределах значений таблицы 1).
- Несинусоидальность напряжения в установившемся режиме при трехфазной двухполупериодной трансформаторно-выпрямительной нагрузке, равной 25% $P_{ном.ист.}$ (коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения $\leq 8\%$; $U_{п-й гарм} \leq 0,05 U_{гарм}$ для $f_n < 10$ кГц; коэффициент амплитудного значения напряжения: $1,41 \pm 0,15$; постоянная составляющая напряжения $\leq \pm 0,1$ В).
- Импульсы напряжения при коммутациях, накладываемые на мгновенное значение напряжения шины (от -70 до +70 В длительностью от 0,05 до 5 мкс).
- Диапазон приведенного переходного напряжения при внезапных изменениях нагрузки от 10 до 160% $P_{ном.ист.}$ (определяется по таблице 2).
- Переходные напряжения определяются предельными границами (приведены в приложении к ГОСТ).
- Перерыв электропитания (длительность > 1 мс, но ≤ 80 мс) должен заканчиваться восстановлением переходного напряжения, укладываемого в пределы 2 и 3, указанные в таблице 2.
- При ненормальной работе приведенное переходное напряжение должно укладываться в пределы 1 и 4, указанные в таблице 2.
- Диапазон для установившейся частоты (при нормальной работе: 380–420 Гц; при аварийной работе: 360–440 Гц).
- Скорость изменения частоты ($\leq 2,5$ Гц/с).
- Коэффициент модуляции частоты ($\leq 1\%$ от $f_{ном.}$).

Таблица 1

Напряжение, В	0–0,18	0,18	1,15	1,15	0,18	0,18
Частота, Гц	1,0	1,7	10,0	25,0	70,0	200,0

Таблица 2

Время, с	Напряжение (для предела), В			
	1	2	3	4
0,01	165	155	80	0
0,02				
0,05		119	108	
0,10				
0,20				
0,50	127		0–100	
1,00				
7,00				

Таблица 3

Время, с	Частота (для предела), Гц			
	1	2	3	4
0,01	480	450	350	320
0,10				
0,15		420	380	
0,30				
0,50				
2,00	480–430		320–370	
4,00				
7,00				

- Частотные составляющие огибающей кривой модуляции частоты (в пределах, указанных кривыми $f(t)$).
- Значения переходной частоты при внезапных изменениях нагрузки от 10 до 160% $P_{ном.ист.}$ (Приведены в таблице 3. При ненормальной работе значения переходной частоты должны укладываться в пределы 1 и 4; при снижении частоты менее 360 Гц отношение f/U должно быть $\geq 2,7$).

Основные требования к приемникам электроэнергии переменного тока самолетов и вертолетов [7]:

- Приемники не должны вызывать отклонения характеристик электроэнергии на входных выводах, выходящие за установленные пределы.

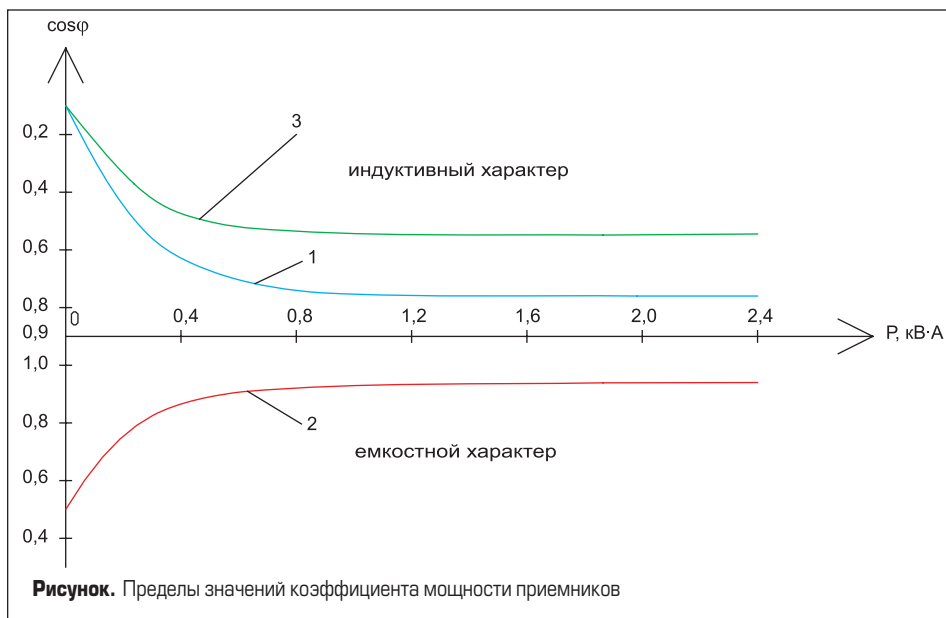


Таблица 4

Неравномерность нагрузок, В·А	100	200	400	500	650	825	900	950	1000
Трехфазная мощность, кВт·А	0,5	1,0	4,0	7,0	12,0	20,0	24,0	27,0	30,0

- Пусковой ток приемника мощностью >200 Вт не должен превышать $5I_{ном}$ в течение $t \leq 0,1$ с.
- Приемники мощностью >50 В·А не должны иметь входных цепей питания с однополупериодным выпрямлением.
- Коэффициент искажения синусоидальности кривой потребляемого тока при $P \geq 500$ В·А не должен превышать 35%; при этом необходимо использовать трехфазное питание.
- Постоянная составляющая силы тока должна быть не более 2% от $I_{ном}$.
- Предел значений неравномерности нагрузок различных фаз трехфазных приемников (определен таблицей 4).
- Для импульсно-периодической нагрузки амплитудное значение модуляции (огibaющей) силы тока должно быть не более 2 А; при превышении этого значения необходимо согласование с разработчиком СЭС и заказчиком.
- Минимальный коэффициент мощности при фазных нагрузках, близких к номинальной, должен быть не менее значений, определяемых пределами 1 и 2; при обосновании для асинхронных двигателей допустим предел 3 (рис.).

Определения и обозначения коэффициентов мощности, несинусоидальности (искажения), гармоник, формы и амплитуды для установившихся (периодических) несинусоидальных токов

Для произвольных периодических токов и напряжений [8]:

Активная мощность:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n,$$

где n — номер гармонических составляющих, φ_n — их фазовый сдвиг.

Полная (кажущаяся) мощность:

$$S = P_k = UI = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t)dt} \times \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt},$$

где U, I — действующие значения:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n^2},$$

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}.$$

Реактивная мощность:

$$Q = P_r = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n.$$

Коэффициент мощности:

$$\chi = KM = P/S.$$

Мощность искажения:

$$T = P_{II} = \sqrt{(S^2 - (P^2 + Q^2))} = \Sigma[(U_n I_n)^2 + (U_q I_n)^2 - 2U_n U_q I_n I_q \cos(\varphi_n - \varphi_q)].$$

Коэффициенты искажения (несинусоидальности) напряжения и тока [8, ГОСТ 23414-79]:

$$K_{IH} = KH_H = U_1/U, K_{IT} = K_{HT} = I_1/U.$$

Коэффициенты гармоник [ГОСТ 23875-79]:

$$K_{GH} = KG_H = \sqrt{(K_{IH}^2 - 1)}, K_{GT} = KG_T = \sqrt{(K_{IT}^2 - 1)}, K_{\Phi H} = U/U_{cp}, K_{\Phi T} = I/I_{cp}.$$

Коэффициенты формы и амплитуды:

$$K_{aH} = U_{max}/U, K_{aT} = I_{max}/I.$$

Для синусоидального напряжения и несинусоидального тока:

$$P = UI \cos \varphi_1, \chi = KM = P/UI = (I_1/I) \cos \varphi_1 = K_{IT} \cos \varphi_1 = \cos \varphi_1 / \sqrt{1 + K_{GT}^2}, K_{aH} = \sqrt{2} \approx 1,41, K_{\Phi H} = (\pi\sqrt{2})/4 \approx 1,11.$$

Среднециклические значения КПД и коэффициента мощности для входных цепей ВИИП

При работе ВИИП в его входной цепи наступает так называемый квазиустановившийся режим, соответствующий циклическому зарядно-разрядному циклу с периодом $T_{ц}$. В большинстве случаев $T_{ц} > T_{сети}$ или $T_{ц} \gg T_{сети}$, при которых можно условно принять отношение $T_{ц}/T_{сети}$ целым, то есть $T_{ц}/T = N$.

Применительно к ВИИП представляется целесообразным ввести понятия среднециклических значений КПД (χ_{cp}) и коэффициента мощности (η_{cp}) в его входной цепи.

Среднециклический КПД ВИИП:

$$\eta_{cp} = W_H / (W_H + \Delta W) = P_{cp} / (P_{cp} + \Delta P_{cp}),$$

где W_H — предразрядная энергия емкостного накопителя (СН), ΔW — энергия потеря в активных сопротивлениях (R_k).

$$W_H = (C_H U_{Hmax}^2) / 2;$$

$$\Delta W = \sum_{k=1}^N \int_0^{T_{ц}} i_k^2(t) \times R_k dt.$$

$T_{ц}$ — время зарядно-разрядного цикла; $P_{cp} = W_H / T_{ц}$, $\Delta P_{cp} = \Delta W / T_{ц}$ — среднециклические мощности нагрузки и потерь.

Среднециклический коэффициент мощности на входе ВИИП:

$$\chi_{cp} = (P_{cp} / \eta_{cp}) / S_{cp}$$

и среднециклический энергетический КПД ВИИП:

$$\eta_{э.ср} = P_{cp} / S_{cp} = \eta_{cp} \chi_{cp},$$

где

$$S_{cp} = \frac{m_{\Phi}}{N} \sum_{k=1}^N U_{\Phi.к.} I_{\Phi.к.} —$$

среднециклическая полная потребляемая мощность;

$N = T_{ц} / T_{сети}$ — число периодов сети, содержащихся в периоде зарядно-разрядного цикла; m_{Φ} — число фаз;

$$U_{\Phi.к.} = \sqrt{\frac{1}{T_{сети} (N-1)T_{сети}} \int_0^{NT_{сети}} u_{\Phi}^2(t) dt},$$

$$I_{\Phi.к.} = \sqrt{\frac{1}{T_{сети} (N-1)T_{сети}} \int_0^{NT_{сети}} i_{\Phi}^2(t) dt} —$$

действующие значения фазного напряжения и фазного тока, вычисленные на k -ом периоде сети, начиная от момента начала зарядного цикла.

Объединенные показатели качества электроэнергии на входе ВИИП

Отдельную позицию в требованиях, предъявляемых к приемникам электроэнергии, занимают требования по параметрам кондуктивных помех, вносимых приемниками в сеть и определяемых ГОСТами по электромагнитной совместимости [5, 9, 10]. Так, например, в серии стандартов MIL STD-460 рассматривается кондуктивная помехоэмиссия в проводах сети электропитания в частотных диапазонах 30 Гц – 20 кГц и выше [5, 9, 10]. Эти условия часто также относятся к требованиям по воздействию на качество электроэнергии питающей сети.

И, наконец, близкую позицию в требованиях, предъявляемых к приемникам электроэнергии, занимают требования к уровню помех, излучаемых приемниками непосредственно и через питающую сеть в виде электрического, магнитного и электромагнитного поля (до 10 ГГц) [5, 9, 10]. Последние также условно можно считать воздействием на качество электроэнергии питающей сети, так как они передаются (излучаются) опосредованно через кондуктивные помехи.

Основные показатели качества электроэнергии первичного бортового электропитания и на входе потребителей (например, ВИИП) объединены и перечислены в таблице 5. В той же таблице в краткой форме отражены причинно-следственные связи этих показателей качества с источниками возмущений (воздействий на него) и характеристиками бортового оборудования.

Таблица 5

Показатели качества электроэнергии	Причины ухудшения показателей (источники возмущения)	Следствие ухудшения показателей (ухудшение параметров электрического оборудования)
I. Отклонения установившегося значения напряжения	1. Нестабильность и неточность регулятора напряжения источника 2. Падение напряжения в системе распределения	Снижение надежности (срока службы), увеличение тепловых потерь и массы стабилизаторов, блоков питания нагрузок, изменение производительности агрегатов с электродвигателями
II. Небаланс (асимметрия) фазных напряжений	1. Пофазная несимметрия в распределении уровня и типа мощности нагрузок и фидеров 2. Несимметрия ЭДС и внутренних параметров источника 3. Аварийные несимметричные обрывы цепей и короткие замыкания	Увеличение тепловых потерь (от токов нулевой и обратной последовательности), следствие п. I для однофазных нагрузок, неровномерность вращения двигателей
III. Искажение формы напряжения	1. Нелинейные и периодические (импульсные) нагрузки 2. Несинусоидальность (пульсация) ЭДС и нелинейность внутренних параметров источника и входных цепей потребителей	Увеличение тепловых потерь (от токов высших гармоник), старение изоляции, увеличение массы фильтров блоков питания нагрузок, опасность возникновения резонанса на высших гармониках
IV. Отклонение установившегося значения частоты напряжения	Нестабильность, неточность регулятора частоты	Увеличение тепловых потерь в магнитопроводах, изменение скорости и момента электродвигателей, изменение реактивных сопровитвлений генератора, двигателей, трансформатора и фидера, ухудшение работы параметрических преобразователей, например резонансных
V. Колебания напряжения и кратковременный (коммутационный) импульс (всплеск) напряжения $U_{имп}$, $t_{имп}$, $T_{фр}$	1. Коммутация и изменение нагрузки (набросы и сбросы электрических или двигательных нагрузок) 2. Короткие замыкания и обрывы цепей (аварийные) 3. Перекоммутация шин системы распределения. Большое динамическое внутреннее сопротивление источника и системы распределения 4. Инерционность системы защиты регулятора напряжения и электромагнитной системы генератора питания	Отказы (сбои) электронного оборудования и компьютеров, повышение установленной мощности (массы и габаритов) блоков питания
VI. Амплитудная модуляция напряжения	1. Большое динамическое внутреннее сопротивление источника и системы распределения 2. Инерционность системы защиты, регулятора напряжения и магнитной системы генератора 3. Циклические (импульсные) нагрузки 4. Нарушение синхронной работы генераторов (биения) 5. Неустойчивость регулятора напряжения	Усиление резонансных колебаний в системе генератор-привод и электроприводных устройствах, следствие п. V
VII. Отклонения и колебания частоты напряжения	1. Коммутация и изменение нагрузки 2. Инерционность системы привод-генератор	Колебания напряжения и токов вследствие изменения реактивных сопровитвлений (п. V), колебания вращающего момента электрических двигателей и частоты вращения
VIII. Модуляция частоты напряжения	1. Циклические (импульсные) нагрузки 2. Неустойчивость системы регулирования частоты	Периодическое изменение параметров (п. IV) с частотой модуляции
IX. Превышение параметров сетевых кондуктивных помех	Неудовлетворительные показатели ЭМС электроэнергетического и электронного оборудования	См. п. V и его следствие
X. Коэффициенты мощности на входе потребителя $\chi = P/S$, $\chi_{ср}$, $\cos\varphi_{1гpm}$	Реактивные и нелинейные нагрузки (например, выпрямительные — без корректоров коэффициента мощности)	Перегрузка первичных источников электропитания, вынужденное снижение мощности потребителей, ухудшения показателей I и III и их следствия

Применительно ко всем бортовым силовым статическим преобразователям следует отметить, что наиболее важными для них узлами в аспекте рассматриваемых критериев являются:

- активные или пассивные входные корректоры коэффициента мощности (КМ), обеспечивающие синусоидальность формы потребляемого из сети тока и его синфазность с напряжением;
- демпфирующие цепи и фильтры для снижения коммутационных диодно-транзисторных помех (dU/dt и dI/dt), а также схемы расщепления коммутируемой мощности;
- для ВИИП и других преобразователей с циклической резкопеременной нагрузкой — активные или пассивные входные буферно-демпфирующие устройства, обеспечивающие постоянство потребляемого тока («стабилизаторы потребляемого из сети тока»).

Для приближенной оценки помехи, излучаемой при включении современного высоковольтного IGBT-транзистора с рабочим напряжением 1200 В при длительности включения 0,5 мкс, прием для наглядности, что излучателем помехи является либо сферическая поверхность радиусом 7 см, либо воздушно-емкостная связь двух проводников с площадью 10 см² и расстоянием между ними 1 мм (печатная плата). При этом амплитуда тока импульсной помехи $i_{имп} = C(dU/dt) \approx 20$ мА более чем достаточна для срабатывания любой микросхемы с микроамперными уровнями сигналов, например управляющего драйвера в цепи затвора того же IGBT-транзистора. В этом случае вместо однократного включения наиболее вероятно высокочастотная генерация схемы с неминуемым выходом из строя.

Аналогичным образом нетрудно продемонстрировать опасность, которую может представлять импульсная помеха $u_{имп} = L(dI/dt)$, индуцируемая даже в относительно коротком проводнике при записании, например, полевого сильноточного транзистора.

Следует также указать на неприемлемость применения в схемах с повышенной частотой простейших резистивных, R-L и R-C демпфирующих цепочек, применяемых в слаботочных электронных устройствах, так как они существенно снижают КПД схем и требуют вспомогательных устройств охлаждения.

Расщепление коммутируемой мощности, то есть помехоэмиссии и помехоизлучения за счет деления напряжения или тока с временным сдвигом в так называемых импульсно-многофазных модуляторах, служит слабым оправданием при снижении амплитуды импульсных помех. Как правило, такие действия применяются для повышения качества выходного и сохранения качества питающего напряжения, а также для повышения надежности (резервирования), улучшения ремонтпригодности (в многомодульном варианте), возможности или экономической целесообразности использования элементов с меньшими номинальными параметрами и т. п. При этом снижение интенсивности помехоэмиссии и помехоизлучения является попутным, но весьма важным достоинством расщепленных схем.

Литература

1. Булеков В. П., Резников С. Б., Болдырев В. Г. и др. Электротехническая совместимость оборудования ЛА. М.: Изд-во МАИ, 1992.

2. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Электротехническая совместимость электрооборудования автономных систем. М.: Энергоатомиздат, 1995.

3. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Электротехническая совместимость электрооборудования ЛА (Электротехническая совместимость): Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 1992.

4. Болдырев В. Г., Бочаров В. В., Булеков В. П., Резников С. Б. Основы теории электроэнергетической совместимости электрооборудования автономных систем: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 1997.

5. Балюк Н. В., Болдырев В. Г., Булеков В. П., Кечиев Л. Н., Кириллов В. Ю., Литвак И. И., Постников В. А., Резников С. Б. Электромагнитная совместимость технических средств подвижных объектов. Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2004.

6. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

7. ГОСТ 19705-89. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.

8. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Часть I. Линейные электрические цепи: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1978.

9. Кириллов В. Ю. Стандарты и методы испытаний электромагнитной совместимости технических средств: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2006.

10. Стандарты MIL STD-460: MIL STD-461. Характеристики ЭМП. Требования к аппаратуре. Метод испытаний на кондуктивную помехоэмиссию в проводах сети электропитания CE01.