

УДК 621.391.827

В.В. Пилинский, канд. техн. наук, В.А. Попов, канд. техн. наук, Шахрияр Шалилех

О классификации электромагнитных помех преобразователей электроэнергии

Рассмотрены процессы в силовых преобразователях ключевых источников вторичного электропитания (ИВЭП). Составлен обзор непреднамеренных электромагнитных помех (НЭМП), генерируемых ИВЭП, описаны процессы в конкретных узлах, создающих электромагнитные помехи. Проведено сравнение уровней спектральных характеристик последовательностей импульсов, близких к реальным, с регламентируемыми. Показано, что могут быть ситуации, когда уровни НЭМП превышают допустимые. Предложено разработать классификацию преобразовательных устройств в аспектах обеспечения электромагнитной совместимости.

The procedure of energy transformation in the converters of switch-mode power supply (SMPS) as electromagnetic interference (EMI) sources are considered. Analytic survey of the processes of EMI generation from SMPS is given. Spectral levels of real and standard pulses sequences are compared. It's shown that EMI levels sometimes exceed standards, therefore it's necessary to elaborate the classification of SMPS converter as EMI sources.

Ключевые слова: ЭМС, помехообразующие элементы, ИВЭП, полупроводниковый преобразователь, огибающие спектра.

Введение

В шестидесятые - семидесятые годы прошлого столетия возникла проблема существенной миниатюризации источников вторичного электропитания (ИВЭП) [1]. Для ее реализации необходимо было решить пять взаимосвязанных задач [2]:

- структурную,
- энергетическую,
- конструкторско – технологическую,
- системную,
- организационную.

Базовыми в техническом аспекте являются первые три.

Первая - решена разработкой и внедрением ИВЭП с бестрансформаторным входом (БТВ) на основе импульсных полупроводниковых преобразователей [3]. При этом решена также вторая задача - энергетическая, обусловленная работой силовых каскадов в ключевом режиме [4-6] на

повышенной частоте, что приводит к значительному снижению потерь, уменьшению параметров регулярных реактивных элементов и, естественно, повышению удельных массогабаритных показателей. Работа силовых каскадов от выпрямителей, непосредственно подключенных к электрической сети на повышенных частотах, повлекли за собой необходимость разработки и применения новой, специально предназначенной для этой цели, элементной базы (высоковольтных, высокочастотных транзисторов, диодов с быстрым (желательно - плавным) восстановлением запирающих свойств, конденсаторов, допускающих пульсации на повышенной частоте и др.), что обеспечило решение третьей задачи.

Однако работа силовых каскадов в ключевом режиме в связи с формированием высокочастотных помех привела к появлению новой проблемы – необходимости обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) силовых преобразователей с приемниками энергии и электрической сетью [7,8].

Несмотря на ограничение международными, региональными, национальными регламентирующими документами (ДСТУ, IEC, EN,...) уровней помех, распространяющихся в проводящей среде (кондуктивных) и в окружающем пространстве (ближней зоне – индукции и дальней зоне – электромагнитной волны), тенденция повышения чувствительности радиоэлектронной (радиоинформационной) аппаратуры может привести к ситуациям, когда даже соблюдение допустимых уровней помех не обеспечивает штатное функционирование радиоинформационной аппаратуры.

Цель работы состоит в анализе различных процессов, которые могут приводить к образованию помех, сравнении уровней спектральных составляющих последовательностей импульсов напряжения и тока преобразователей с допустимыми регламентирующими документами.

Обзор электромагнитных помех, генерируемых преобразователями

В современной радиоэлектронной аппаратуре специального и бытового назначения практически повсеместно применяют силовые преобразовательные устройства, что приводит к генерации непреднамеренных помех, уровень и спектр которых зависят от типа, мощности и

конструкции преобразовательного устройства.

При проработке вопросов электромагнитной совместимости необходимо принимать комплексные меры для того, чтобы выполнить нормативные требования [9]. Поэтому уже на

начальных этапах проектирования важно иметь информацию об источниках и параметрах помех (уровнях и полосах частот), генерируемых полупроводниковыми преобразователями. Классификация помех приведена в табл. 1.

Таблица 1. Классификация электромагнитных помех, создаваемых преобразователями

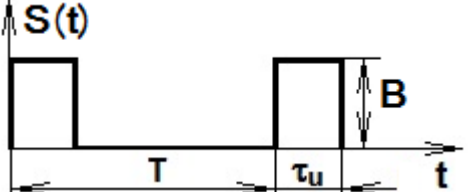
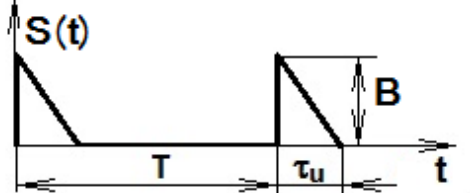
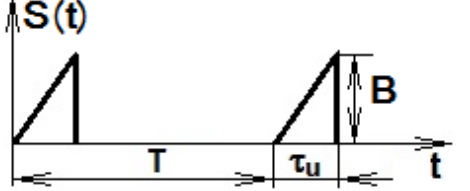
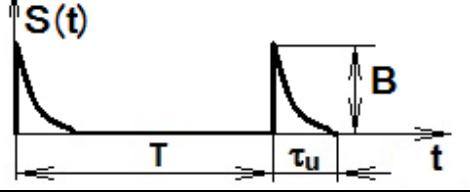
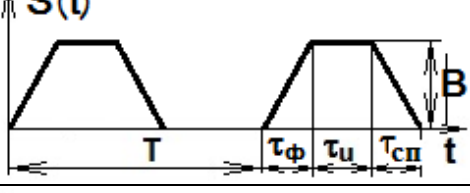
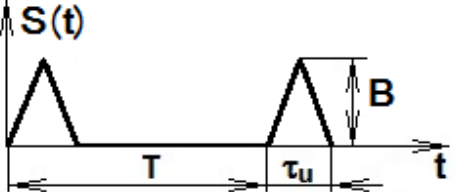
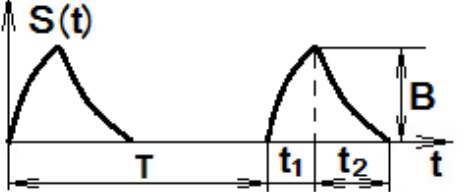
№	Классификационный признак	Характер процесса	Вид помехи
1	Характер электромагнитных процессов в цепи электропитания	Коммутация активных элементов	Коммутационная
		Скачкообразные изменения нагрузки	Вследствие изменения нагрузки
		Резонансные явления, обусловленные наличием паразитных элементов в цепях преобразователей, сети и нагрузки	Резонансная
2	Вид помехообразующего элемента	Транзисторы, тиристоры, диоды	По типу активных элементов: транзисторная тиристорная диодная
		Дросели, конденсаторы, провода, трансформаторы, линии связи компонентов	По типу элементов: от дроселей от конденсаторов от трансформаторов от проводов и линий связи компонентов
		Электрохимические коммутационные устройства	Электрохимическая
3	Место расположения помехообразующего элемента	В середине корпуса преобразователя	Внутрикорпусная
		Вне корпуса преобразователя	Внекорпусная
4	Среда распространения	Провода, шины заземления, элементы конструкции, экраны	Кондуктивная
		Окружающее пространство помехообразующего элемента	Наводимая – для ближней зоны Излучаемая – для дальней зоны
5	Путь распространения кондуктивной помехи	Прямой - обратный провода питания	Симметричная кондуктивная помеха
		Прямой и обратный провода питания - корпус источника («заземление»)	Несимметричная кондуктивная помеха
6	Частотный диапазон	До 9 кГц включительно	Низкочастотная
		Выше 9 кГц	Высокочастотная
7	Характер переходного процесса	Переходный процесс, обусловленный импульсным током и напряжением в силовой цепи, током ударного возбуждения, несимметричным током подмагничивания,	Детерминированная
		Переходный процесс, вызванный подключением или отключением преобразователя от сети, коммутацией напряжения питания и нагрузки с паразитных параметров	Случайная

В зависимости от характера электромагнитных процессов и типа помехообразующего элемента токи и напряжения в элементах преобразователя [7] имеют форму, приведенную в табл. 2.

Реальные формы токов с достаточной точностью могут быть описаны приведенными в [7]

функциями или их линейной комбинацией. Каждой форме соответствует свой спектр гармонических составляющих. Мощность излучения определяется мощностью преобразователя и «качеством» излучающей системы.

Табл. 2. Базовые формы токов и напряжений в помехообразующих элементах

№	Физический процесс	Форма тока(напряжения)
1	Токи и напряжения в цепях ИВЭП (длительность фронтов намного меньше длительности импульсов $\tau_{\phi} \ll \tau_u$), (прямоугольные)	
2	Ток в силовой цепи обратного одноконтурного преобразователя (выходная цепь)	
3	Ток в силовой цепи обратного одноконтурного преобразователя (входная цепь)	
4	Выброс обратного тока диода	
5	Токи и напряжения в цепях при сравнимой длительности фронтов с длительностью плоской вершины импульсов (трапецеидальные)	
6	«Сквозной» ток, токи и напряжения в цепях ИВЭП при работе силовых каскадов без форсирования процессов замыкания и размыкания ключевых элементов: Треугольные, Экспоненциальные	
		

Продолжение табл. 2.

№	Физический процесс	Форма тока(напряжения)
7	Токи и напряжения в цепях ИВЭП, обусловленные резонансными явлениями в силовых и паразитных колебательных контурах	
8	Токи и напряжения в цепях резонансного инвертора	
9	Токи и напряжения в цепях при формировании сигналов специальной формы: Колоколообразный, Косинус-квадратный	

Для разных классов преобразователей характерен свой спектр в зависимости от основного механизма образования помехи.

Таким образом, помехи обусловлены: импульсным током и напряжением на элементах преобразователя ключевого типа; током ударного возбуждения; несимметричностью тока подмагничивания трансформаторов; колебательными процессами в контурах, которые образованы основными реактивными элементами и паразитными параметрами и др.

Помехи, обусловленные импульсным током и напряжением на элементах преобразователей, вызваны работой активных элементов преобразователей в ключевом режиме с короткими фронтами рабочих импульсов напряжения и тока. Это характерно для преобразователей, работающих на повышенной частоте 50...100 кГц и выше. В результате - формируются помехи высокого уровня 70... 120 дБ (в отдельных случаях

до 140 дБ) - с широким спектром частот от единиц-десятков килогерц до десятков-сотен мегагерц. Нижняя граница спектра помех обусловлена частотой коммутации, а верхняя - параметрами фронтов импульсов напряжения и тока транзисторов преобразователя, а также диодов высокочастотного выпрямителя.

Токи ударного возбуждения генерируют помехи вида затухающего колебательного процесса. В низковольтных импульсных преобразователях, как правило, фильтр выходного выпрямителя имеет индуктивный вход, при котором обеспечивается режим непрерывного рабочего тока. В этом случае при прямоугольной форме напряжения трансформатора через выпрямительные диоды в процессе коммутации протекает значительный обратный ток, который обусловлен инерционностью процессов восстановления запирающих свойств диодов. Электромагнитные помехи создаются также током

ударного возбуждения высокой частоты (десятьки мегагерц). Через межобмоточные емкости трансформатора и межвитковые емкости дросселя помехи проникают в электросеть и на выход преобразователя.

Помехи, обусловленные несимметричностью тока подмагничивания трансформатора высокочастотного преобразователя, возникают в процессе одностороннего насыщения магнитопровода силового трансформатора. При этом резко возрастают токи транзисторов одного плеча преобразователя, что приводит к увеличению коммутационных потерь в транзисторах и интенсивному помехообразованию.

Помехи, обусловленные наличием паразитных реактивных параметров преобразователей, трудно поддаются анализу из-за большого разброса их значений [10]. Вследствие паразитных реактивных параметров в преобразователях и соединительных цепях образуются резонансные контуры. Резонансные частоты этих контуров лежат в полосах сотни килогерц - десятки мегагерц.

На рисунке 1 приведены кривые кусочно-линейной аппроксимации огибающих амплитудных спектров моделей процессов в соответствии с таблицей 2: 1- для прямоугольных импульсов, 2- для трапецеидальных импульсов, 3- для треугольных импульсов - с параметрами для прямоугольных и трапецеидальных импульсов: $V = 300$ В, $T = 10$ мкс, $\tau_{И} = 5$ мкс; $\tau_{Ф} = 0,5$ мкс; для треугольных импульсов - максимальное значение силы тока 6 А на сопротивлении 50 Ом, $\tau_{И} = 0,25$ мкс; а также 4- допустимые уровни кондуктивных помех [9].

Естественно, кривые 1...3 - это огибающие теоретических спектров рассматриваемых периодических последовательностей без учета эквивалента сети, с помощью которого осуществляют измерение напряжений помех.

Если ориентировочно влияние эквивалента сети и других компонентов силовой цепи характеризовать ослаблением помехи на 40 - 60 дБ, то несмотря на это, уровни помех, обусловленные процессами, моделированными указанными периодическими последовательностями импульсов, превышают допустимые.

В связи с приведенными данными считаем целесообразным составить классификацию силовых преобразовательных устройств как источников электромагнитных помех с указанием ориентировочных данных по уровню и полосам помех, распространяющихся в кондуктивной среде и окружающем пространстве.

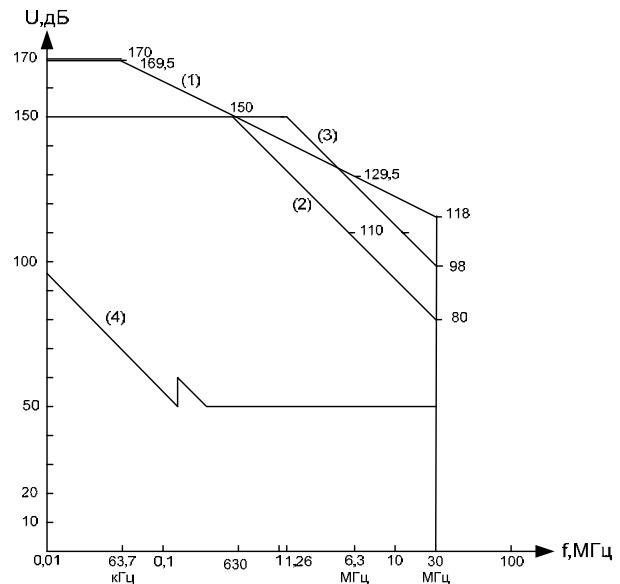


Рис. 1. Кусочно-линейная аппроксимация огибающих амплитудного спектра периодических последовательностей импульсов: прямоугольных - 1, трапецеидальных - 2, треугольных - 3 и допустимые уровни кондуктивных помех - 4

Выводы

Таким образом в работе:

1. Приведена классификация помех, создаваемых полупроводниковыми преобразователями электроэнергии;
2. Предложены модели процессов, обуславивших формирование электромагнитных помех с уровнями в полосах частот работы рецепторов этих помех, превышающих допустимые - установленные регламентирующими документами.
3. Рекомендовано разработать классификацию преобразователей электроэнергии, как источников непреднамеренных электромагнитных помех, для использования на начальных этапах проектирования с учетом требований обеспечения электромагнитной совместимости.

Литература

1. Конев Ю.И. Основные проблемы миниатюризации силовых электронных устройств // ЭТВА: сб.статей / Под ред. Ю.И. Конева. - М.: Сов. радио, 1975 - вып. 7. С. 3-13.
2. Источники вторичного электропитания / В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович, Ю.И. Конев и др.; Под ред. Ю.И. Конева - М.: Радио и связь, 1990. - 280 с.
3. Транзисторные источники электропитания с бестрансформаторным входом / Драбович Ю.И., Комаров Н.С., Марченко Н.Б. - Киев: Наук.думка, 1984. - 160 с.

4. Моин В.С., Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
5. Высокочастотные транзисторные преобразователи / Э.М. Ромаш, Ю.И. Драбович, Н.Н. Юрченко, П.Н. Шевченко. – М.; Радио и связь, 1988. - 288 с.
6. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч. 2/ Ю.П. Гончаров, О.В. Будьонний, В.Г. Морозов, М.В. Панасенко, В.Я. Ромашко, В.С. Руденко. За ред. В.С. Руденко. – Харків: Фоліо, 2000. – 360 с.
7. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г.С. Векслер, В.С. Недочетов, В.В. Пилинский и др. – К.: Техника, 1990.– 167 с.
8. Енергетична електроніка. Підручник / Жуйков В.Я., Пілінський В.В., Терещенко Т.О., Родіонова М.В., Швайченко В.Б. та ін. // Сайт НТУУ “КПІ”, <http://www.fel.ntu-kpi.kiev.ua> (лист МОН України № 1.4/18-Г 113 від 10.01.2009).
9. IEC 61204-3: 2000 Electromagnetic compatibility (EMC) Low-voltage Power Supplies, DC output.
10. Браун М., Источники питания. Расчет и конструирование. М.: МК-Пресс, 2007. – 288 с.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*