

СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ РАЗМЫТИЯ СПЕКТРА

Аннотация.

Актуальность и цели. Проведено снижение электромагнитного излучения электронного устройства посредством применения в процессоре технологии размытия спектра тактовой частоты. Описаны основные параметры размытия спектра. Даны рекомендации и обоснования выбора значений параметров. Несмотря на то, что данная технология запатентована около 80 лет назад, свое широкое распространение она получила только в настоящее время.

Материалы и методы. Представлены результаты опытов по изучению влияния параметров ширины и частоты модуляции размытия спектра на электромагнитное излучение. Опыты проводились на процессоре i.MX6ULL в составе вычислительного модуля макета. Кроме того, представлены графики измерения электромагнитного излучения размытого спектра с разной частотой модуляции.

Результаты. Разработанный алгоритм позволяет изменять параметры функции размытия спектра непосредственно в процессе работы устройства. На основе предложенного алгоритма создан специализированный модуль ядра операционной системы. Приведены плюсы и минусы использования технологии размытия спектра тактовой частоты процессора.

Выводы. Практическая значимость алгоритма состоит в существенном сокращении времени проведения тестирования с различными наборами параметров.

Ключевые слова: размытие спектра, тактирование, электромагнитное излучение, Hershey-Kiss.

N. G. Vostokov, A. S. Gorbunov

REDUCTION OF THE ELECTROMAGNETIC RADIATION OF AN ELECTRONIC DEVICE USING THE SPREAD SPECTRUM TECHNOLOGY

Abstract.

Background. The reduction of electromagnetic radiation of an electronic device through the use of spread spectrum technology of the clock frequency in the processor. The basic parameters of the spread spectrum are described. Recommendations and justifications for the choice of parameter values are given. Despite the fact that this technology was patented about 80 years ago, it has received its wide distribution only at the present time.

© Востоков Н. Г., Горбунов А. С., 2020. Данная статья доступна по условиям всемирной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая дает разрешение на неограниченное использование, копирование на любые носители при условии указания авторства, источника и ссылки на лицензию Creative Commons, а также изменений, если таковые имеют место.

Materials and methods. The results of experiments on the influence of the parameters of the width and frequency of the spread spectrum modulation on electromagnetic radiation are presented. The experiments were carried out on the i.MX6ULL processor as part of the computational module of the layout. In addition, graphs of measuring electromagnetic radiation of a spread spectrum with different modulation frequencies are presented.

Results. An algorithm has been developed that allows you to change the parameters of the spread spectrum function directly during the operation of the device. Based on the proposed algorithm, a specialized operating system kernel module has been created.

Conclusions. The practical significance of the algorithm consists in a significant reduction in the time of testing with various sets of parameters.

Keywords: spread spectrum, clocking, electromagnetic radiation, Hershey-Kiss.

Введение

Современные электронные устройства обычно состоят из набора электронных компонентов, таких как центральный процессор, модули памяти, контроллеры периферийных устройств, работающих на высоких частотах – до нескольких гигагерц. При работе устройств возникает побочное электромагнитное излучение (ЭМИ), которое оказывает нежелательное влияние на другие электронные устройства, рядом расположенные (например, радиоприемники, телевизоры, чувствительные медицинские приборы) [1]. Это же электромагнитное излучение может привести к потенциальной утечке конфиденциальной информации.

При разработке устройств применяют разные методы борьбы с ЭМИ: экранирование, разделение цепей питания, замену электронных компонентов на аналогичные с лучшими характеристиками по ЭМИ, установку фильтрующих компонентов и т.д.

Помимо описанных аппаратных доработок, ЭМИ можно снизить аппаратно-программными средствами с помощью технологии размытия спектра частоты тактирования (Spread Spectrum Clock Generation), также именуемой «тактирование шумоподобным сигналом». Технология размытия спектра была запатентована в 1942 г. для противодействия глушению сигнала, но получила широкое распространение только в настоящее время. Указанная технология позволяет в процессе работы циклически менять рабочую частоту компонента в некотором диапазоне, что приводит к сглаживанию пика частоты до более пологой формы. Технология размытия спектра нашла применение в стабилизаторах питания [2], тактовых генераторах [3–5], микроконтроллерах и процессорах.

Нормативным документом (ГОСТ 30805.22–2013 «Совместимость технических средств электромагнитная») ограничиваются пиковые значения ЭМИ на конкретных частотах, при этом не регламентируется суммарное значение ЭМИ на диапазоне частот. Поэтому технология размытия спектра частоты, снижающая пиковые уровни ЭМИ, хорошо подходит для выполнения требований нормативных документов. Стоит отметить, что суммарная энергия ЭМИ размытого спектра по сравнению с одиночным пиком не уменьшается.

ЭМИ от процессора возникают в результате функционирования встроенных синхронных схем процессора под воздействием тактовых импульсов.

На частоте тактовых импульсов и гармоник будут формироваться характерные пики, уровень которых необходимо снизить для соблюдения нормативов. Размытие спектра может повлиять на стабильность работы системы, а также привести к снижению быстродействия, поэтому требуется всесторонняя проверка функционирования конечного устройства с включенной опцией.

Как правило, аппаратные доработки дают хороший результат, но требуют высокой квалификации схемотехников и конструкторов, большие временные и финансовые затраты на разработку электронных плат и экранированного корпуса для улучшенной версии устройства. В свою очередь, программное использование технологии размытия спектра частоты тактирования, входящей в состав микроконтроллера или микропроцессора, не требует высокой квалификации разработчика, финансовых затрат, но и результат снижения ЭМИ гораздо ниже, чем от применения аппаратных доработок.

Параметры размытия спектра частоты

Главным образом на пиковое значение ЭМИ размытого спектра влияют следующие параметры:

- ширина спектра;
- расположение;
- частота модуляции;
- профиль модуляции.

Увеличение ширины спектра позволяет снизить общее пиковое значение ЭМИ. Необходимо понимать, что слишком большая ширина может привести к нестабильности работы процессора, а также синхронных коммуникационных интерфейсов. Обычно выбирают значение в диапазоне 0,25–5 %.

В зависимости от максимальной рабочей частоты процессора возможны три варианта расположения размытия спектра: центральное, верхнее и нижнее. Центральное размытие используется, когда процессор поддерживает увеличение рабочей частоты (overclocking). При таком расположении производительность процессора не изменяется, так как модулированная частота варьируется симметрично относительно рабочей частоты. Верхнее размытие идентично центральному, но с предварительным увеличением основной частоты на половину ширины спектра размытия. Нижнее размытие используется, когда процессор уже работает на максимально возможной частоте. В таком случае средняя рабочая частота уменьшается на половину ширины спектра, что ведет к снижению производительности (рис. 1).

Большое влияние на результирующий спектр ЭМИ оказывает профиль модуляции (рис. 2). Синусоидальный профиль модуляции обычно не применяется для размытия спектра, потому что при его использовании формируются значительные пограничные пики. Линейный (треугольный) профиль формирует спектр сигнала с менее выраженными пиками по краям. Идеальным профилем модуляции, при котором достигается стабильный уровень ЭМИ по всей ширине размытия спектра, считается кривая Hershey-Kiss [6].

Частота модуляции описывает, как часто сдвигается выходная частота по ширине спектра размытия. При редком шаге в спектре будет присутствовать хорошо различимые пики. Частая смена выходной частоты позволяет добиться более равномерного ЭМИ по всему спектру размытия.

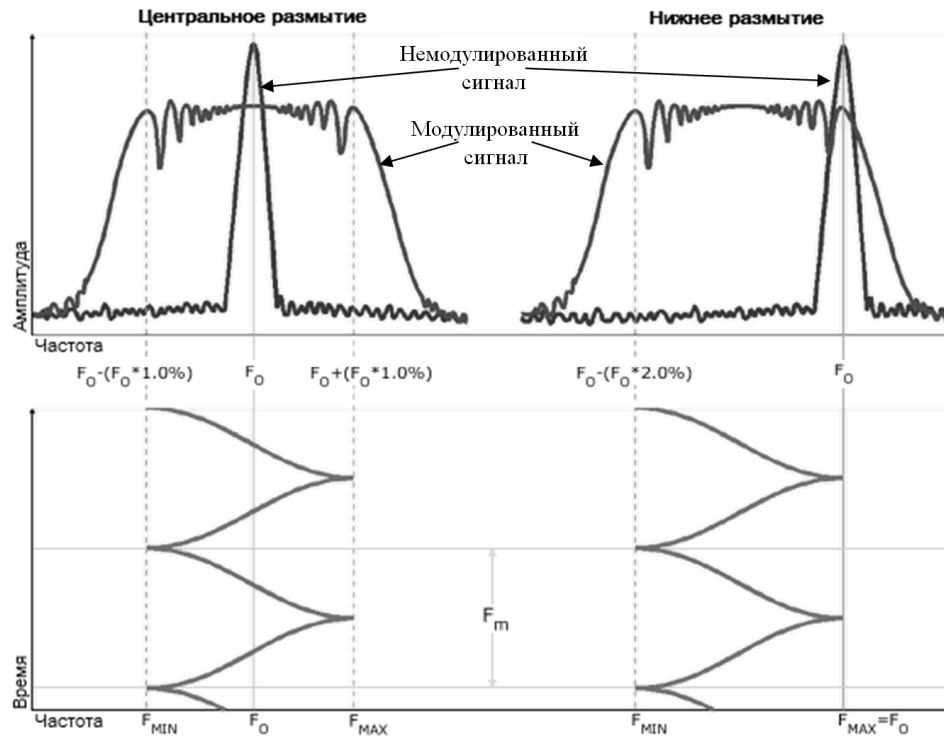


Рис. 1. Центральное и нижнее размытие спектра

Обобщая вышеописанные параметры, модулированную частоту можно представить следующей формулой:

$$F = F_{\text{осн}} + A(f_{\text{mod}}(t) - X),$$

где $F_{\text{осн}}$ – основная частота работы без размытия спектра; A – ширина размытия спектра; $f_{\text{mod}}(t)$ – функция модулирования частоты; X – расположение спектра (0 – верхнее, 1/2 – центральное, 1 – нижнее).

Рассмотрим пример снижения ЭМИ в разработанном устройстве с помощью размытия спектра тактовой частоты в процессоре архитектуры ARM i.MX6ULL от компании NXP.

Для тактирования процессора используется кварцевый резонатор стабильной частоты 24 МГц. Частота входного тактового сигнала повышается в процессоре с помощью умножителя частоты на основе системы фазовой автоподстройки частоты PLL (Phased Locked Loop). Таким образом, ядро процессора тактируется частотой 728 МГц.

Для i.MX6ULL в соответствии с документацией [7] поддерживается только нижнее расположение размытия спектра. Профиль модуляции не указан, но, судя по диаграммам измерений, используется профиль Hershey-Kiss. С помощью конфигурации регистров процессора CCM_ANALOG_PLL_SYS_SS, CCM_ANALOG_PLL_SYS_DENOM можно изменять ширину спектра и частоту модуляции в широких пределах.

В соответствии с рекомендациями производителя параметры размытия спектра необходимо устанавливать в начале старта загрузчика U-Boot до

инициализации контроллера оперативной памяти. В процессе отладки изделия выяснилось, что возможно управление функцией размытия спектра в процессе работы операционной системы (ОС).

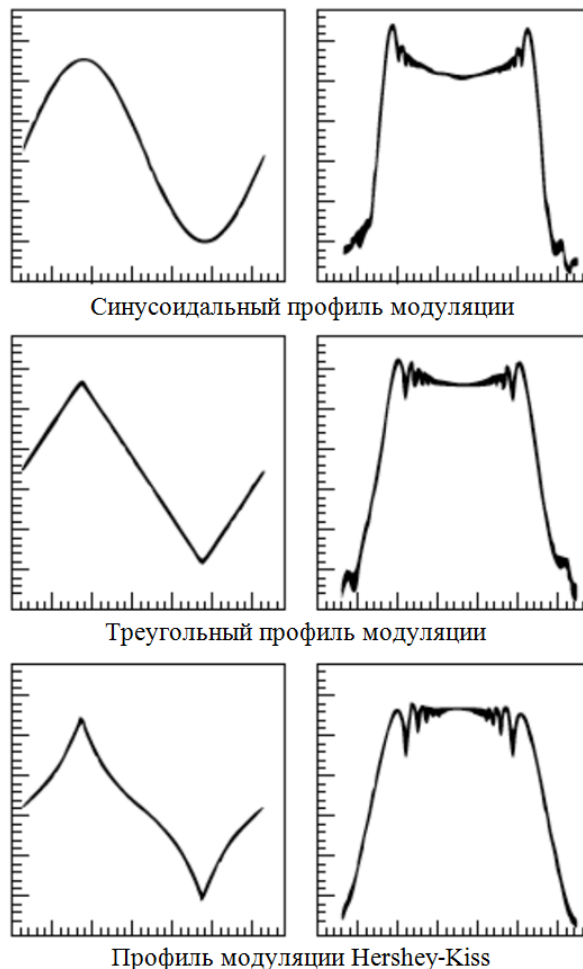


Рис. 2. Форма спектра ЭМИ в зависимости от профиля модуляции

В ходе изучения параметров спектра разработан алгоритм управления функцией размытия (рис. 3), который отличается взаимодействием программного модуля с контроллером процессора через интерфейс ядра Linux, позволяющий изменять параметры функции размытия спектра в процессе работы устройства. На основе алгоритма был создан специализированный модуль ядра, который принимает параметры при загрузке в работу.

При загрузке модуля ядра в регистры процессора записываются указанные в параметрах значения регистров. При выгрузке модуль ядра записывает значения в регистры для отключения функции размытия спектра.

Использование модуля ядра позволило многократно сократить временные затраты на проведение тестирований с разными наборами параметров. Перекомпиляция загрузчика с новыми параметрами, перенос загрузчика в устройство и запуск устройства в рабочий режим занимали порядка 5 мин.

Альтернативный алгоритм позволяет применить новые параметры за несколько секунд. Данный алгоритм также можно использовать при поиске оптимальных параметров размытия спектра для соблюдения нормативных требований.



Рис. 3. Алгоритм управления функцией размытия спектра

Измерения ЭМИ от разработанного устройства производились с помощью комплекса электромагнитного анализа на основе сканера ЭМИ Detectus AB RSE644 и анализатора спектра Keysight N9000B [8]. Для измерения электрического поля был использован специализированный пробник Langer EMV XF-E 04s, который обнаруживает электрические поля в диапазоне от 30 МГц до 6 ГГц (рис. 4).

Для получения наиболее точных результатов измерений пробник размещается над микросхемой процессора в точке наивысшей амплитуды сигнала на частоте 728 МГц (рис. 5). Источником такого сигнала от микросхемы является ядро процессора или схема умножителя частоты.

Для снятия наглядных диаграмм ЭМИ необходимо задавать полосу пропускания, больше значения частоты модуляции, потому что в каждый мо-

мент времени процессор работает на одной частоте из всей ширины размытия спектра [9]. Также для наглядности уровня ЭМИ можно использовать функцию усреднения сигнала. На рис. 6 приведены диаграммы с усреднением и без него.

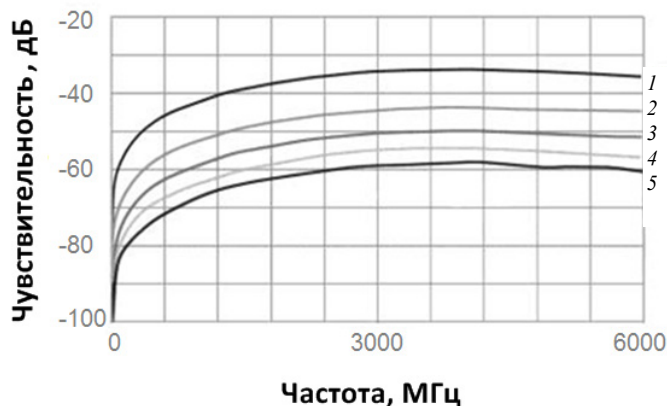


Рис. 4. Частотные характеристики пробника Langer EMV XF-E 04s. Расстояние до пробника (мм): 1 – 0,5; 2 – 2,5; 3 – 5,0; 4 – 7,5; 5 – 1,0

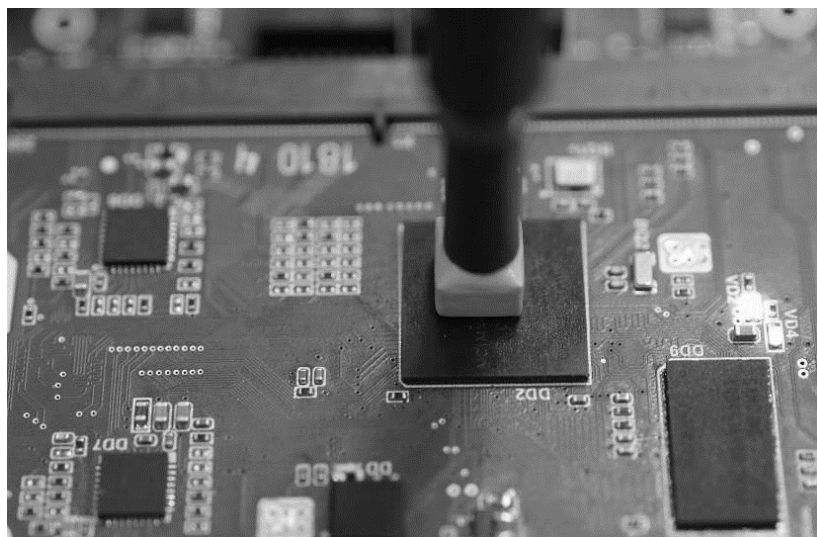


Рис. 5. Размещение пробника над микросхемой процессора

Сначала был проведен опыт с варьированием ширины спектра размытия для изучения зависимости от нее максимального значения ЭМИ. Диаграмма зависимости приведена на рис. 7.

По результатам измерений можно отметить расширение полосы спектра ЭМИ, а также снижение пиков излучений более чем на 15 дБмкВ. При ширине размытия спектра более 100 МГц наблюдались критические ошибки в работе ОС. В итоге была выбрана ширина размытия спектра в 6 МГц как компромисс между падением производительности и необходимым уровнем снижения ЭМИ.

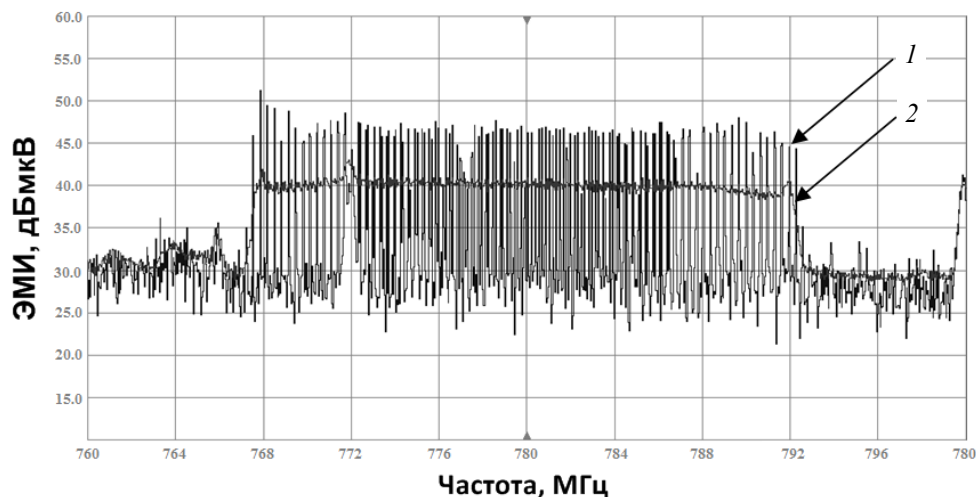


Рис. 6. Измерение ЭМИ размытого спектра с усреднением (1) и без него (2)

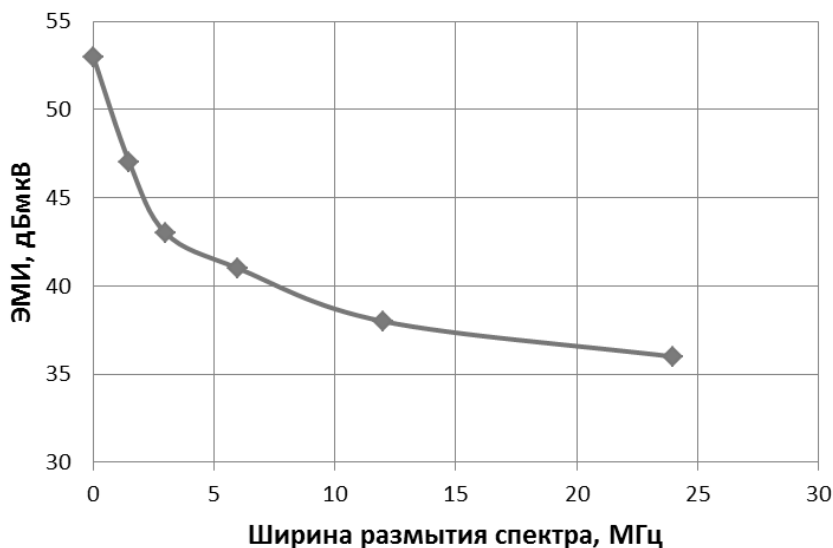


Рис. 7. Диаграмма зависимости ЭМИ от ширины размытия спектра

Дополнительно была проведена серия измерений для изучения влияния частоты модуляции на спектр ЭМИ. На рис. 8 представлены диаграммы спектров ЭМИ при разных значениях частоты модуляции. Можно отметить, что с увеличением частоты модуляции спектр становится менее равномерным, соответственно появляются пики излучений на некоторых частотах. Частота модуляции 12 кГц дает самое равномерное распределение ЭМИ по всей полосе размытия спектра.

Заключение

Результаты проведенных практических опытов показали, что функция размытия спектра, встроенная в процессор, снижает уровень ЭМИ по основ-

ной тактовой частоте. Применение технологии размытия спектра имеет следующие преимущества:

- при минимальных временных затратах позволяет заметно снизить пики ЭМИ;

- может использоваться для уже разработанного устройства.

Использование данной технологии имеет и отрицательные последствия:

- возможны снижение производительности и появление неустойчивости в работе устройства;

- не наблюдается снижение суммарной мощности ЭМИ, в отличие от аппаратных доработок;

- ЭМИ возникают на всей ширине полосы размытия спектра.

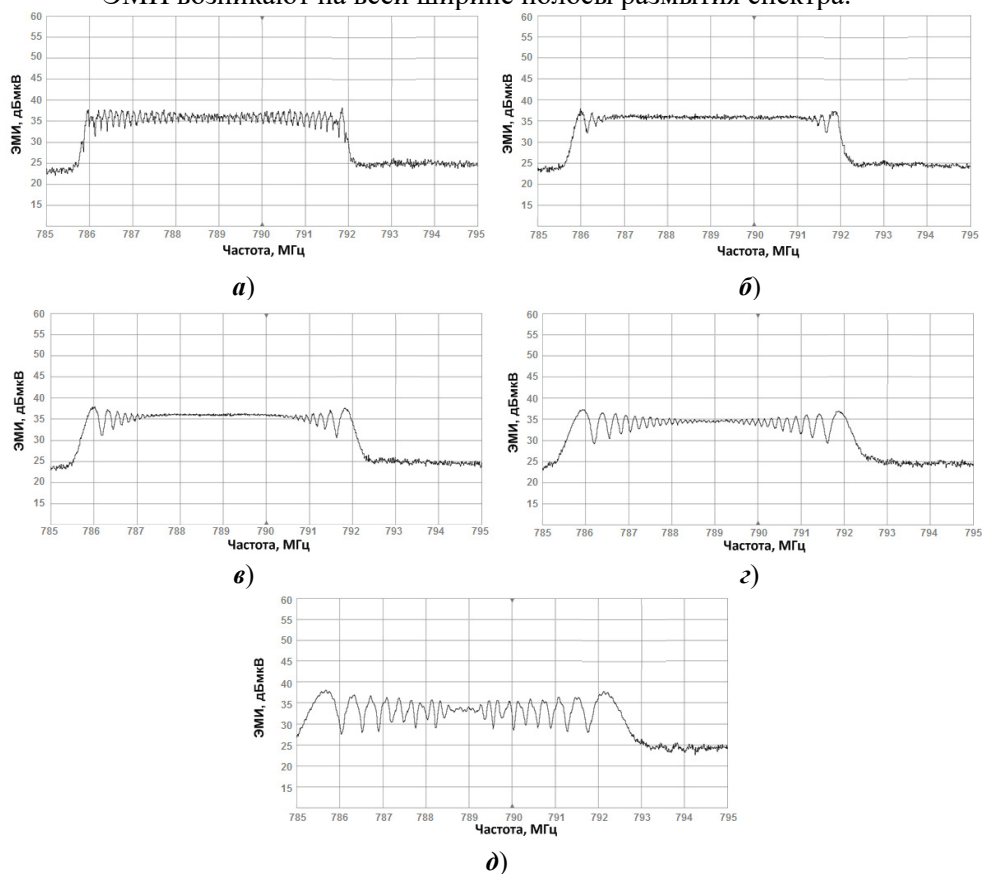


Рис. 8. Серия измерения ЭМИ с разными значениями частоты модуляции размытия спектра. Частоты модуляции:
а – 6 кГц; **б** – 12 кГц; **в** – 24 кГц; **г** – 48 кГц; **д** – 96 кГц

При разработке устройств, подлежащих проверке по нормативам ЭМИ, желательно выбирать электронную компонентную базу (генераторы, стабилизаторы, микроконтроллеры, процессоры) с поддержкой технологии размытия спектра. Их использование может снизить возможные затраты времени и материала на аппаратные доработки или разработку новых ревизий устройств для снижения ЭМИ. Немалую роль в применении технологии играет выбор оптимальных параметров функции размытия спектра.

Библиографический список

1. **Skinner, H. G.** Why spread spectrum clocking of computing devices is not cheating / H. G. Skinner, K. P. Slattery // *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. – 2001. – № 1. – P. 537–540.
2. **Макаренко, В. В.** Анализ эффективности использования технологии Spread Spectrum для снижения уровня кондуктивных помех DC/DC-преобразователей / В. В. Макаренко, В. В. Пилинский // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. – № 24. – С. 97–103.
3. **Кочемасов, В. Н.** Тактовые генераторы с распределенным спектром / В. Н. Кочемасов, Е. Р. Хасьянова // *Электронные компоненты*. – 2013. – № 5. – С. 68–71.
4. **Сысоева, О. В.** Методы проектирования тактовых генераторов с распределенным спектром / О. В. Сысоева, А. Е. Агафонов, П. Г. Кириченко // *Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем* – 2014 : сб. тр. / под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – Москва : ИПИМ РАН, 2014. – Ч. 3. – С. 77–80.
5. **Табатабаи, С.** Управление тактовым сигналом при подавлении электромагнитных помех / С. Табатабаи // *Электронные компоненты*. – 2011. – № 7. – С. 10–13.
6. **Hyung-Min, Park.** SSCG with Hershey-Kiss modulation profile using Dual Sigma-Delta modulators / Park Hyung-Min, Jin Hyun-Bae, Kang Jin-Ku // *IEICE Electronics Express*. – 2010. – Vol. 7, № 18. – P. 1349–1353.
7. *i.MX 6ULL Applications Processor Reference Manual, Rev. 1, 11/2017, NXP Semiconductors.*
8. **Горбунов, А. С.** Использование комплекса электромагнитного анализа корпусированных изделий для оценки электромагнитной совместимости электронных устройств / А. С. Горбунов, Д. М. Зиновьев, Н. Г. Востоков, Ал. С. Горбунов // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2018. – № 12. – С. 29–35.
9. **Deutschmann, B.** Spread spectrum parameter optimization to suppress certain frequency spectral components / B. Deutschmann, B. Auinger, G. Winkler // *Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, 2017, EMCCompo*. – 2017. – № 7998078. – P. 39–44.

References

1. Skinner H. G., Slattery K. P. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2001, no. 1, pp. 537–540.
2. Makarenko V. V., Pilinskiy V. V. *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemi* [Electrical and computer systems]. 2017, no. 24, pp. 97–103.
3. Kochemasov V. N., Khas'yanova E. R. *Elektronnye komponenty* [Electronic components]. 2013, no. 5, pp. 68–71. [In Russian]
4. Sysoeva O. V., Agafonov A. E., Kirichenko P. G. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem – 2014: sb. tr.* [Problems of the development of promising micro- and nanoelectronic systems – 2014: collected works]. Moscow: IPPM RAN, 2014, part 3, pp. 77–80. [In Russian]
5. Tabatabai S. *Elektronnye komponenty* [Electronic components]. 2011, no. 7, pp. 10–13. [In Russian]
6. Hyung-Min Park., Jin Hyun-Bae, Kang Jin-Ku *IEICE Electronics Express*. 2010, vol. 7, no. 18, pp. 1349–1353.
7. *i.MX 6ULL Applications Processor Reference Manual, Rev. 1, 11/2017, NXP Semiconductors.*
8. Gorbunov A. S., Zinov'ev D. M., Vostokov N. G., Gorbunov Al. S. *Voprosy radioelektroniki* [Radio electronics issues]. 2018, no. 12, pp. 29–35. [In Russian]

9. Deutschmann B., Auinger B., Winkler G. *Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits, 2017, EMCComp*. 2017, no. 7998078, pp. 39–44.

Востоков Никита Глебович

инженер-программист, Научное
производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: bcsp@npp-rubin.ru

Vostokov Nikita Glebovich

part-programming engineer, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Горбунов Андрей Сергеевич

инженер-программист, Научное
производственное предприятие «Рубин»
(Россия, г. Пенза, ул. Байдукова, 2)

E-mail: bcsp@npp-rubin.ru

Gorbunov Andrey Sergeevich

part-programming engineer, Research
and Production Enterprise “Rubin”
(2 Baydukova street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Востоков, Н. Г. Снижение электромагнитного излучения электронного устройства с помощью технологии размытия спектра / Н. Г. Востоков, А. С. Горбунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2020. – № 2 (54). – С. 54–64. – DOI 10.21685/2072-3059-2020-2-6.