

УДК 53.06

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПОМЕХ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ****Шишка Владислав Евгеньевич,**

студент, Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Пузановский Кирилл Вячеславович,

старший преподаватель, Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Колпаков Владислав Вячеславович,

студент, Кубанский Государственный Университет, г. Краснодар

Аннотация

В работе рассматривается практический подход к изучению электромагнитной совместимости при разработке электронной аппаратуры. Описаны экспериментальные исследования по оценке паразитного излучения силовой электроники в цифровых каналах связи в различных режимах работы нагрузки. Полученные данные позволяют оптимизировать компоновку устройств и предложить меры по снижению уровня электромагнитных помех.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, помехоустойчивость, силовая электроника, широкополосный шум.

**STUDY OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ELECTRONIC
INTERFERENCE OF BRUSHLESS MOTORS****Shishka Vladislav Evgenevich,**

student, Kuban State University, Krasnodar

e-mail: shishkavlad20@mail.ru

Puzanovsky Kirill Vyacheslavovich,

senior lecturer, Kuban State University, Krasnodar

e-mail: puzanovsky.kv@yandex.ru

Kolpakov Vladislav Vyacheslavovich,

student, Kuban State University, Krasnodar

e-mail: vlad40236@gmail.com

ABSTRACT

This paper examines a practical approach to studying electromagnetic compatibility in the development of electronic equipment. Experimental studies assessing the parasitic radiation of power electronics in digital communication channels under various load conditions are described. The data obtained allow for optimizing device layouts and proposing measures to reduce electromagnetic interference.

Keywords: electromagnetic compatibility, noise immunity, power electronics, broadband noise.

Введение

Современные электронные устройства представляют собой сложные системы, насыщенные цифровыми вычислительными средствами и силовыми преобразователями энергии. Высокая плотность компоновки и одновременная работа различных по своему функционалу узлов неизбежно порождают проблему электромагнитной совместимости (ЭМС). Паразитное излучение от импульсных источников питания и тактовых генераторов способно нарушать работу чувствительных измерительных приборов и линий связи, что критически снижает надёжность аппаратуры.

Основная часть

Для решения задач ЭМС на этапе разработки требуется оперативный контроль уровней излучения. Использование профессионального спектрального аналитического оборудования не всегда оправдано из-за высокой стоимости, сложности калибровки и необходимости в квалифицированном обслуживании. В связи с этим актуальной является задача создания простых, надёжных и мобильных средств диагностики, позволяющих проводить сравнительные измерения непосредственно в процессе макетирования и отладки. [1]

Проблема ЭМС возникла практически одновременно с появлением первых электронных устройств, однако особую остроту приобрела во второй половине XX века в связи с бурным развитием полупроводниковой техники и цифровых технологий. Микроминиатюризация, повышение быстродействия и плотности монтажа привели к тому, что даже малые паразитные связи стали оказывать существенное влияние на работу аппаратуры. [2]

Воздействие электромагнитных помех на электронные устройства может проявляться по-разному в зависимости от типа компонентов и характера помехи. В аналоговых трактах помехи проявляются в виде дополнительных шумов, искажений формы сигнала, смещения рабочей точки. В инструментальных усилителях, работающих с сигналами малого уровня, даже незначительные наводки могут полностью маскировать полезный сигнал. Особенно чувствительны к помехам высокоомные цепи, например, входы операционных усилителей с полевыми транзисторами. Цифровые микросхемы обладают более высокой помехоустойчивостью благодаря пороговому принципу работы, однако и они подвержены сбоям. Основные проявления воздействия помех на цифровые устройства: искажение фронтов импульсов и увеличение времени задержек распространения сигнала; появление ложных импульсов на выходах комбинационных схем; сбои в работе триггеров и счетчиков, приводящие к потере данных; ошибки при передаче данных по последовательным и параллельным интерфейсам. Наиболее критичным является воздействие помех на тактовые цепи и цепи сброса, где одиночный ложный импульс способен привести к полной потере работоспособности устройства.

Микроконтроллеры и микропроцессоры. Сложные цифровые устройства также наиболее уязвимы к помехам, проникающим по цепям питания входам и выходам.

Возможны следующие негативные эффекты: сбой в работе арифметико-логического устройства; искажение данных при обращении к памяти; непреднамеренное изменение содержимого регистров; зависание программы.

В рамках исследования электромагнитной совместимости был использован прототип подводного аппарата, были проведены натурные измерения уровня паразитного излучения на цифровых каналах микроконтроллера, генерируемого его силовой подсистемой.[3] Объектом испытаний выступал полностью интегрированный прототип робота, оснащенный пятью независимыми трехфазными двигательными модулями, представляющими собой основную потенциальную источник помех ввиду высоких коммутлируемых токов и скоростей переключения силовых ключей. В целях корреляции наблюдаемого излучения с внутренними электрическими процессами в бортовой сети использовался многоканальный цифровой запоминающий осциллограф, подключенный к ключевым контрольным точкам системы питания и управления.[4]

Методика эксперимента заключалась в проведении серии замеров при различных установившихся режимах работы двигательного комплекса, что позволило исследовать зависимость электромагнитной эмиссии от динамической нагрузки на силовые преобразователи.

Показания осциллографа в режим холостого хода двигателей показано на графике, расположенном на рисунке 1 синим цветом. При отсутствии нагрузки фиксировался базовый уровень помех, создаваемый процессами переключения в регуляторах. Показания осциллографа демонстрируют минимальные пульсации, а анализатор ЭМС показывает незначительный фоновый уровень излучения.

Показания осциллографа в режим холостого хода двигателей показано на графике, расположенном на рисунке 1 оранжевым цветом. Пиковые токи создают наиболее жесткие условия работы полупроводниковых ключей. Осциллограф регистрирует максимальные выбросы напряжения и токовые помехи. Анализатор ЭМС в этом режиме показывает пиковые значения уровня поля, что позволяет количественно оценить зависимость интенсивности помех от потребляемой мощности.[5]

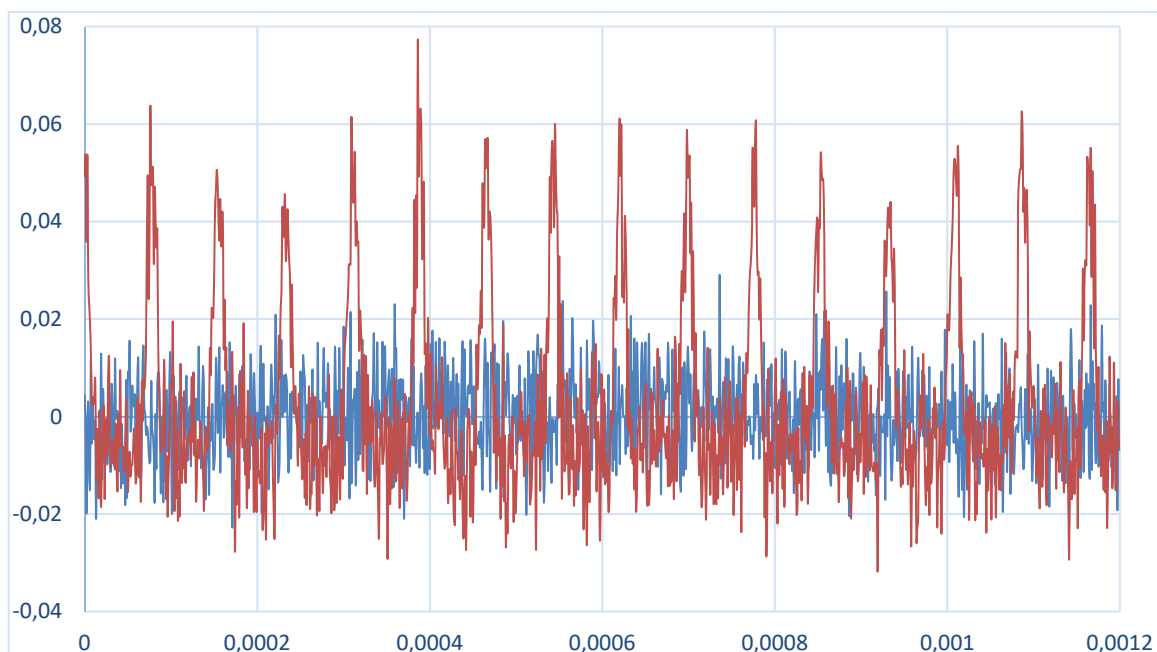


Рисунок 1. График значений

Сравнение полученных данных, позволило построить частотные профили эмиссии и установить прямую корреляцию между мощностью нагрузки и уровнем излучаемых помех.

Это послужило основой для доработки фильтрующих цепей и оптимизации экранирующей архитектуры электронного блока.

Заключение

В ходе выполненного исследования была экспериментально подтверждена эффективность применения методов натурального электромагнитного исследования для оценки помеховой обстановки в сложных электротехнических комплексах, таких как прототип подводного аппарата. Проведенные измерения позволили не только визуализировать картину паразитных излучений в силовых и цифровых трактах, но и установить количественную зависимость интенсивности электромагнитной эмиссии от режима работы движительного комплекса. Выявленная корреляция между ростом коммутируемых токов и увеличением уровня помех подтвердила определяющую роль силовой электроники в формировании внутрисистемной электромагнитной обстановки.

Список литературы:

1. Ромащенко М. А. Основные аспекты современного состояния проблемы обеспечения ЭМС РЭС // Вестник ВГТУ. – 2010. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-aspekty-sovremennogo-sostoyaniya-problemy-obespecheniya-ems-res> (дата обращения: 20.03.2026).
2. Малюков С. П., Куропатка В. И. ЭМС и перспективы его применения в технике // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2005. – № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ems-i-perspektivy-ego-primeneniya-v-tehnike> (дата обращения: 23.03.2026).
3. Шишка, В. Е. Электропотребление бесколлекторных водных движителей / В. Е. Шишка, К. В. Пузановский, М. А. Мавроди // Инновационные технологии : Сборник научных статей по материалам 6-й Международной научно-технической конференции, Бургас, 16 мая 2025 года. – Бургас: Институт гуманитарных наук, экономики и информационных технологий, 2025. – С. 224-228.
4. Эффективное создание печатной платы: от проектирования до готового устройства / С. Е. Калюжная, Р. С. Зубанев, А. Т. Маньшина [и др.] // СОСТОЯНИЕ и ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ современной науки и ОБРАЗОВАНИЯ : Сборник статей VIII Международной научно-практической конференции, Петрозаводск, 04 июня 2024 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. – С. 83-89. – EDN DXOYGL.
5. Пузановский, К. В. Изучение возможности применения датчика mds-60 для детектирования металлосодержащих предметов / К. В. Пузановский, М. В. Ярметова, В. С. Тамахин // Научный аспект. – 2023. – Т. 32, № 11. – С. 3926-3932. – EDN FCSABG.

References:

1. Romashchenko M. A. The main aspects of the current state of the problem of providing EMC distribution zones // Bulletin of VSTU. – 2010. – No. 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-aspekty-sovremennogo-sostoyaniya-problemy-obespecheniya-ems-res> (date of request: 03/20/2026).
2. Malyukov S. P., Kuropatka V. I. EMS and prospects of its application in engineering // Izvestiya SFU. Technical sciences. – 2005. – No. 3. – URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/ems-i-perspektivy-ego-primeneniya-v-tehnike> (date of request: 03/23/2026).

3. Shishka, V. E. Electrical consumption of brushless water propellers / V. E. Shishka, K. V. Puzanovsky, M. A. Mavrodi // Innovative technologies: Collection of scientific articles based on the materials of the 6th International Scientific and Technical Conference, Burgas, May 16, 2025. – Burgas: Institute of Humanities, Economics and Information Technologies, 2025, pp. 224-228.
4. Effective creation of a printed circuit board: from design to a finished device / S. E. Kalyuzhnaya, R. S. Zubanev, A. T. Manshina [et al.] // STATE and PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF modern science and EDUCATION: Collection of articles of the VIII International Scientific and Practical Conference, Petrozavodsk, June 04, 2024. – Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "New Science" (IP Ivanovskaya I.I.), 2024. – pp. 83-89. – EDN DXOYGL.
5. Puzanovsky, K. V. Studying the possibility of using the mds-60 sensor for detecting metal-containing objects / K. V. Puzanovsky, M. V. Yarmetova, V. S. Tamakhin // Scientific aspect. – 2023. – Vol. 32, No. 11. – pp. 3926-3932. – EDN FCSABG.