

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 21. Is. 2. Number 82 (2024). Pp. 17–32
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>
УДК 7822

RISK-ORIENTED PROVISION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

B. Kangozhin¹, D. Insepov²

¹ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan;

²Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz

Bekmuhambet Kangozhin — doctor of technical sciences, professor, ALT University named after Mukhamedzhan Tynyshpaev, Almaty, Kazakhstan

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-1023-9873>;

Dauren Insepov — doctoral student PhD, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: insepov_dauren83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-4824>.

© B. Kangozhin, D. Insepov

Abstract. The modern development of railway transport and the implementation of digital technologies in energy systems impose increased requirements for ensuring electromagnetic compatibility (EMC) of railway energy infrastructure. The relevance of the study is determined by the need to reduce the number of failures in automated control systems (ACS) under electromagnetic interference (EMI) and to increase equipment reliability. The aim of the study is to develop a comprehensive approach to ensuring EMC of railway transport objects using modern monitoring methods and mathematical modeling. The objectives include analyzing existing EMC methods and identifying their limitations, developing a mathematical model of the electromagnetic environment, investigating the effectiveness of hardware-software complexes for monitoring and managing EMC, and proposing methods for equipment protection against EMI. As a result of the research, a mathematical model of the electromagnetic environment at railway facilities was developed, and the software-measuring complex "PIK-EMC" was created to predict the reliability of SMART ACS systems. Experimental surveys of substations with harsh electromagnetic environments were conducted, EMI sources and transmission channels were identified, and the effectiveness of protection using hybrid filters was assessed. Modeling results demonstrated the high efficiency of hybrid filters in reducing current and voltage waveform distortions and damping resonance phenomena in the system. The study concludes that integrating mathematical modeling, hardware-software monitoring, and equipment protection significantly improves the reliability of SMART ACS systems. The results have both theoretical and practical significance: EMC assessment and management methods were refined, new regulatory approaches and software products with high commercialization potential were developed, and implementation on railway facilities is feasible. Future work includes enhancing EMC prediction methods, expanding software functionality, and industrial deployment of the developed technologies.

Keywords: electromagnetic compatibility, SMART systems, ACS, hybrid filters, electromagnetic interference, digitalization, reliability

For citation: B. Kangozhin, D. Insepov. Risk-oriented provision of electromagnetic compatibility//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 82. Pp. 17–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



БҰЗЫЛУ-БАҒДАР ЭЛЕКТРОМАГНЕТТІК ҮЙЛЕСІМДІЛІКТІ ҚАМТАМАСЫЗ ЕТУ

Б. Кангожин^{1}, Д. Инсепов²*

¹Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан;

²Satbayev University, Алматы, Қазақстан.

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz

Бекмұхамбет Кангожин — т.ғ.д., профессор, Мұхаметжан Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-1023-9873>;

Даурен Инсепов — докторант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан

E-mail: insepov_dauren83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-4824>.

© Б. Кангожин, Д. Инсепов

Аннотация. Қазіргі уақытта теміржол көлігінің дамуы және энергетикалық жүйелерге цифрлық технологияларды енгізу теміржол энергетикалық инфрақұрылым объектілерінің электромагниттік үйлесімділігін (ЭМС) қамтамасыз етуге жоғары талаптар қояды. Зерттеудің өзектілігі автоматтандырылған басқару жүйелерінің (АБЖ) электромагниттік кедергілер әсерінен істен шығу санын азайту және жабдық сенімділігін арттыру қажеттілігімен анықталады. Зерттеудің мақсаты – заманауи мониторинг әдістерін және математикалық модельдеуді қолдана отырып, теміржол объектілерінде ЭМС-ті қамтамасыз етудің кешенді тәсілін әзірлеу. Мақсатқа жету үшін қойылған міндеттер: ЭМС бар әдістерді талдау және олардың кемшіліктерін анықтау, электромагниттік жағдайдың математикалық моделін жасау, ЭМС мониторингі мен басқару үшін бағдарламалық-құрылғылық кешендердің тиімділігін зерттеу және жабдықты электромагниттік кедергілерден қорғау әдістерін ұсыну. Зерттеудің нәтижесінде теміржол объектілеріндегі электромагниттік жағдайдың математикалық моделі жасалды, SMART АБЖ сенімділігін болжауға арналған «ПИК-ЭМС» бағдарламалық-өлшеу кешені әзірленді. Қатты электромагниттік ортаға ие электр подстанцияларында эксперименттік тексерулер жүргізіліп, ЭМП көздері мен таралу арналары анықталды, гибридік сүзгілерді қолданудың тиімділігі бағаланды. Модельдеу нәтижелері ток пен кернеудің жоғарғы гармоникалық бұрмалануын азайтуда және жүйеде резонанстық құбылыстарды бәсеңдетуде гибридік сүзгілердің жоғары тиімділігін көрсетті. Зерттеу қорытындысы математикалық модельдеуді, бағдарламалық-құрылғылық мониторингі және жабдықты қорғауды біріктіру SMART АБЖ сенімділігін елеулі түрде арттыратынын дәлелдейді. Нәтижелер теориялық және практикалық маңызға ие: ЭМС бағалау және басқару әдістері жетілдірілді, жаңа нормативтік тәсілдер мен жоғары коммерциялық әлеуеті бар бағдарламалық өнімдер әзірленді, оларды теміржол объектілерінде енгізуге болады. Болашақ зерттеу перспективаларына ЭМС болжамдау әдістерін жетілдіру, бағдарламалық кешендердің функционалдығын кеңейту және әзірленген технологияларды өнеркәсіптік қолдануға енгізу кіреді.

Түйін сөздер: электромагниттік үйлесімділік, SMART жүйелері, АБЖ, гибридік сүзгілер, электромагниттік кедергілер, цифрландыру, сенімділік

Дәйексөздер үшін: Б. Кангожин, Д. Инсепов. Бұзылу-бағдар электромагнеттік үйлесімділікті қамтамасыз ету//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 82. 17–32 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Б. Кангожин^{1}, Д. Инсепов²*

¹АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан;

²Satbayev University, Алматы, Казахстан.

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz

Бекмұхамбет Кангожин — т.г.д., профессор, АЛТ Университет имени Мухамеджана Тынышпаева, Алматы, Казахстан

E-mail: b.kangozhin@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-1023-9873>;

Даурен Инсепов — докторант, Satbayev University, Алматы, Казахстан

E-mail: insepov_dauren83@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7098-4824>.

© Б. Кангожин, Д. Инсепов

Аннотация. Современное развитие железнодорожного транспорта и внедрение цифровых технологий в энергетические системы предъявляют повышенные требования к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) объектов железнодорожной энергетической инфраструктуры. Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения числа отказов автоматизированных систем управления (АСУ) при воздействии электромагнитных помех (ЭМП) и повышением надежности работы оборудования. Цель исследования заключается в разработке комплексного подхода к обеспечению ЭМС объектов железнодорожного транспорта с применением современных методов мониторинга и математического моделирования. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов ЭМС и выявление их недостатков, разработка математической модели электромагнитной обстановки, исследование эффективности программно-аппаратных комплексов для мониторинга и управления ЭМС, а также разработка методов защиты оборудования от ЭМП. В результате проведенных исследований была создана математическая модель электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта и разработан программно-измерительный комплекс «ПИК-ЭМС», позволяющий прогнозировать надежность SMART систем АСУ. Проведено экспериментальное обследование электрических подстанций с жесткой электромагнитной обстановкой, идентифицированы источники и каналы передачи ЭМП, оценена эффективность защиты с использованием гибридных фильтров. Результаты моделирования показали высокую эффективность гибридных фильтров в снижении несинусоидальности тока и напряжения, а также в демпфировании резонансных явлений в системе. Заключение исследования подтверждает, что интеграция математического моделирования, программно-аппаратного мониторинга и защиты оборудования позволяет существенно повысить надежность функционирования SMART систем АСУ. Полученные результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение: уточнены методы оценки и управления ЭМС, разработаны новые нормативные подходы и программные продукты, обладающие высоким потенциалом коммерциализации и внедрения на железнодорожных объектах. Перспективы дальнейшей работы включают совершенствование методов прогнозирования ЭМС, расширение функциональности программных комплексов и внедрение разработанных технологий в промышленную эксплуатацию.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, SMART системы, АСУ, гибридные фильтры, электромагнитные помехи, цифровизация, надежность

Для цитирования: Б. Кангожин, Д. Инсепов. Риск-ориентированное обеспечение электромагнитной совместимости//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 82. Стр. 17–32. (На русс.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.82.02.0002>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Современное развитие железнодорожного транспорта в условиях цифровизации требует обеспечения надежной электромагнитной совместимости (ЭМС) объектов энергетической инфраструктуры. Опыт предшественников показывает, что существующие методы контроля и защиты оборудования не всегда позволяют эффективно предотвращать электромагнитные помехи и аварийные ситуации (Кангожин, 2005: 36; Даутов, 2014: 89–94). При этом появляются новые объекты и системы управления, для которых отсутствуют исследования, направленные на комплексную оценку ЭМС и разработку интегрированных решений (Бадер, 2008: 56–60).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности работы железнодорожного транспорта и внедрения цифровых технологий в энергетические сети. Несмотря на существующие методы мониторинга и защиты, остаются открытые вопросы по повышению точности математического моделирования, применению термовизионных методов контроля состояния изоляции и разработке комплексных программно-аппаратных решений (Kangozhin, 2020: 1585–1590; Кангожин, 2019: 63–67). Теоретическая значимость заключается в уточнении подходов к обеспечению ЭМС, практическая — в возможности внедрения разработанных решений на объектах железнодорожного транспорта.

Объект исследования: электромагнитная совместимость железнодорожной энергетической инфраструктуры. Предмет исследования: методы оценки и обеспечения ЭМС, включая программно-аппаратные комплексы, математическое моделирование и защитные устройства.

Цель исследования: разработать комплексный подход к обеспечению электромагнитной совместимости объектов железнодорожного транспорта с применением современных методов мониторинга и моделирования.

Задачи исследования:

- Проанализировать существующие методы обеспечения ЭМС и выявить их недостатки.
- Разработать математическую модель электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта.
- Исследовать эффективность программно-аппаратных комплексов для мониторинга и управления ЭМС.
- Предложить методы защиты оборудования от электромагнитных помех и аварийных ситуаций.

В исследовании применяются следующие методы:

- математическое моделирование электромагнитной обстановки;
- анализ существующих теоретических и практических решений;
- экспериментальные методы контроля состояния оборудования (термовизионные методы);
- комплексный подход к разработке программно-аппаратных решений для повышения ЭМС.

Эффективное обеспечение ЭМС объектов железнодорожного транспорта возможно при интеграции математического моделирования, программно-аппаратного мониторинга и защитных устройств, что позволит снизить аварийность и повысить надежность работы энергетических систем.

Результаты исследования имеют как теоретическое, так и практическое значение. Теоретически — уточняются методы оценки и управления ЭМС, практическое значение заключается в возможности внедрения разработанных решений на железнодорожных объектах для повышения надежности и энергоэффективности.

Материалы и методы.

Выбор SMART систем и технологий объектов энергетики обусловлен крайне жесткой ЭМО на электрических подстанциях (ЭП), что обеспечит полноту и достоверность проведенных исследований и выводов. Разработка базируется на экспериментальных исследованиях ЭМО и математическом моделировании надежности функционирования SMART систем и технологий на объектах с крайне жесткой ЭМО.

В статье исследованы отказы ТС SMART систем АСТУ при невыполнении требований ЭМС и созданы программные продукты прогнозирования их надежности.

Научная новизна состоит в полученных новых данных и результатов, составляющих основу риск-ориентированного обеспечения ЭМС, что позволит проводить эффективную цифровизацию.

Практическая значимость проекта состоит в получении новых конкретных результатов, имеющих высокий потенциал коммерциализации:

- программный комплекс «ПИК-ЭМС», основанный на алгоритмах расчета надежности SMART систем;
- методики обследования ЭМО и риск-ориентированный метод обеспечения ЭМС;
- новая нормативно-техническая документация (или их проекты);
- отечественные разработки по снижению ЭМВ в системах электроснабжения.

Применение разработанных методов определения ЭМО и оценок эффективности мер защиты от ЭМП окажут положительное влияние на внедрение технологий с использованием SMART систем на предприятиях с неблагоприятной ЭМО и повысит надежность внедряемых информационных технологий.

Проект направлен на решение нижеследующих научно-технических проблем обеспечения ЭМС:

- необходимости перехода к комплексной концепции выполнения требований электромагнитной совместимости с соответствующей переработкой нормативно-технической документации (например, правил устройств электроустановок),
- разработки средств и методов защит от электромагнитных помех, соответствующих современным знаниям об их источниках и уровнях (например, правил устройств молниезащиты и заземления),
- необходимость исследований влияния защитных средств (например, УЗИП) на надежность самих SMART систем и функциональность автоматизированных (автоматических) систем управления,
- необходимость исследований надежности цифровых автоматизированных систем управления в неблагоприятной электромагнитной обстановке,
- предлагаемая системы защиты от электромагнитных волн с помощью гибридных фильтров.

Проведение исследований и разработка научных основ риск-ориентированного обеспечения ЭМС SMART систем на примере цифровых технологий АСТУ объектами электроэнергетики. Выбор SMART систем и технологий энергетики обусловлен крайне жесткой ЭМО на электрических подстанциях. Разработка базируется на экспериментальных исследованиях ЭМО и математических моделях прогнозирования надежности функционирования SMART систем и технологий.

Достижение цели связана с исследованиями источников и уровня электромагнитных помех (ЭМП), средств и методов их ограничения, прогнозирования надежности SMART систем АСТУ при риск-ориентированном обеспечении ЭМС. Применение в АСТУ SMART систем, восприимчивых к воздействию ЭМП ведет к увеличению числа их отказов.

Принятие решений о реализации мер по обеспечению ЭМС: обследование ЭМО, необходимость проектирования и экономический эффект от установки мер защиты от ЭМП, достаточность их выбора, основанных на прогнозировании надежности составляет суть риск-ориентированного подхода обеспечения ЭМС.

Способом достижения цели является проведение исследований и решение нижеследующих задач проекта:

- Обследование объекта с крайне жесткой ЭМО.
- Исследования механизмов возникновения ЭМП.
- Идентификация источников и вероятности появления ЭМП.
- Определение статистических характеристик параметров ЭМП.
- Идентификация ЭМП, приводящих к отказам SMART систем.
- Идентификация каналов передачи ЭМП от источника к ТС SMART систем АСТУ.
- Оценка помехоустойчивости АСТУ ко всем ЭМП.
- Определение степени жесткости испытаний ТС SMART систем АСТУ ЭМП.
- Расчет надежности SMART систем АСТУ конкретного типа.
- Формулирование требований к ЭМС SMART системам.
- Предлагаемые способы защиты от ЭМВ отечественными гибридными фильтрами.

Результаты.

Решения поставленных задач связана с научно-технической проблемой обеспечения ЭМС технических средств цифровизации и является частью решения задач перехода к цифровой индустрии.

В последние десятилетие резко возросла насыщенность производственной сферы деятельности приборами и технологиями, базирующимися на достижениях SMART систем и технологий. По мере развития ТС SMART систем чувствительность, а значит и восприимчивость к различного рода помехам, повышается. Одновременно с этим непрерывно растет амплитудный и частотный диапазон ЭМП. Все это обостряет проблему ЭМС, в особенности на объектах энергетики с крайне жесткой ЭМО. (Кангожин, 2005: 36; Кангожин, 2014: 108–112).

Исключительная значимость вопросов ЭМС на современном этапе развития экономики страны определяется ее цифровизацией. Правительством РК принят технический регламент по ЭМС, который устанавливает требования ЭМС в целях предотвращения опасности жизни и здоровья человека, окружающей среде и исключения недопустимых ЭМП другим техническим средствам и системам (Даутов, 2014: 89–94; Кангожин, 2016: 64–67). Вопросы обеспечения ЭМС сложны, многообразны и должны быть взаимосвязаны и являются предпосылками к разработке проекта (Кангожин, 2019: 63–67; Кангожин, 2018; Kangozhin, 2020: 1585–1590; Бадер, 2008: 56–60; Инсепов, 2008: 17–20; Инсепов, 2013: 33–39).

Высокая чувствительность микропроцессорной техники SMART систем, крайне жесткая ЭМО на ЭП, недостаточная эффективность внедряемых защитных мер от ЭМП являются предпосылками к разработке риск-ориентированного обеспечения ЭМС (Кангожин, 2019: 63–67; Кангожин, 2018).

Принципиальным отличием является то, что новые данные и результаты прогнозирования надежности SMART систем (Рис.1) вводятся в основу риск-ориентированного обеспечения ЭМС (Kangozhin, 2020: 1585–1590).

Проведенный обзор предшествующих научных исследований, проведенных в мире, относящихся к теме проекта выявил ряд проблем:

- недостаточны знания физической природы и уровня ЭМП составляющих ЭМО;
- нет алгоритмов определения необходимости и достаточности мер обеспечения надежности SMART систем при неблагоприятном ЭМО;
- существующая нормативная база по обеспечению ЭМС не отражает достижения современной науки,

- существующие мероприятия улучшения ЭМО не обеспечивают надежность SMART систем и финансово затратны,

- отсутствует комплексное обеспечение ЭМС SMART систем АСТУ.

Решение в настоящем проекте этих проблем определяет его взаимосвязь с ранее проведенными исследованиями. В частности, результаты проекта позволят развить теорию и практику защит от перенапряжений. Такая защита может быть построена на предварительных результатах ТОО «КИТР», имеющих охраняемые документы.

В проекте в качестве источников ЭМП рассматриваются атмосферные и коммутационные перенапряжения. Создаваемые и излучаемые ими ЭМП приведены на рис.1.

Защита ЭП от ЭМП основана на концепции зон защит (ЗЗ): пространство, в котором имеются защищаемые ТС АСТУ, должно разделяться на ЗЗ. Данные зоны являются определенными участками пространства, где уровень ЭМП (H_i, U_i, I_i) совместимы с уровнем жесткости испытаний ТС АСТУ. Граница действия ЗЗ определяется используемыми мерами защиты, ЗЗ различаются значительными изменениями в уровне ЭМП (Рис. 2).

Все металлические устройства, корпуса электрооборудования, экраны кабелей заземляются. Для защиты от кондуктивных импульсных перенапряжений на границах зон устанавливаются ограничители перенапряжений ОПН, ТС АСТУ защищаются устройствами защиты от импульсных перенапряжений ($U_2 \ll U_0$ и $I_2 \ll I_0$). Экраны используются для защиты от излучаемых магнитных полей ($H_2 \ll H_0$).

В предлагаемой статье впервые будут исследованы отказы АСТУ при невыполнении требований риска ЭМС. Полученные при этом новые данные и результаты предопределяет научную новизну работы.

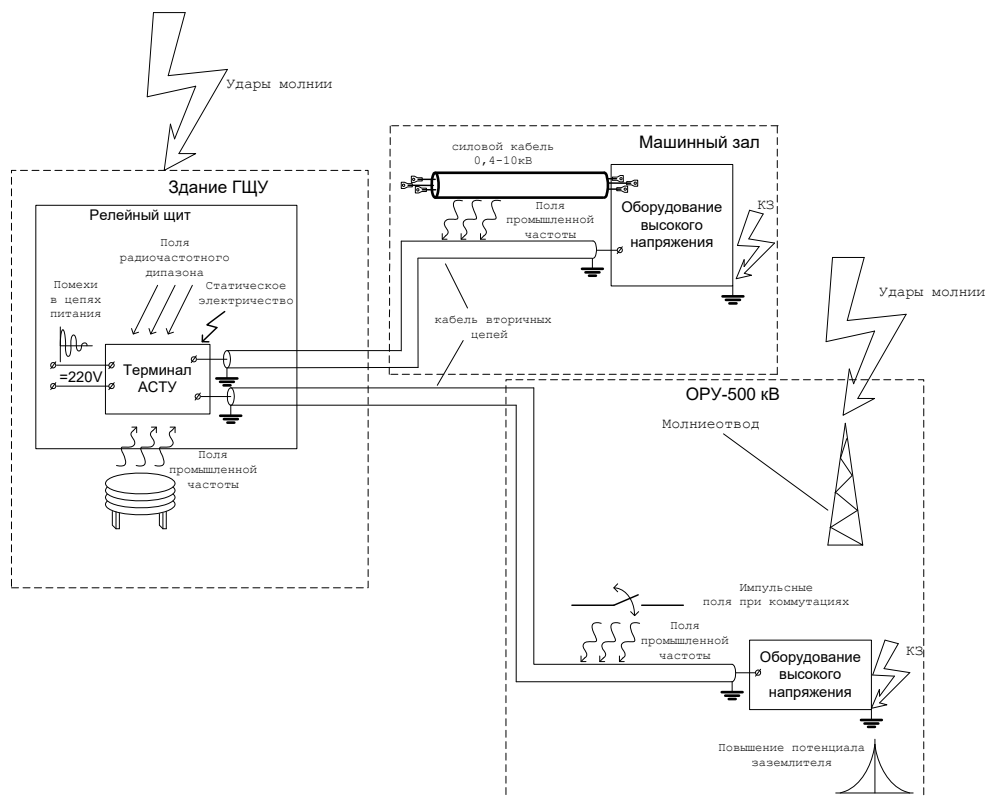


Рис. 1. Источники электромагнитных помех на ЭП

В процессе разработки процедуры определения надежности SMART систем впервые будут идентифицированы всех типы АСТУ и соответствующие им риски от отказа, впервые будет создан механизм оценки защит от ЭМП.

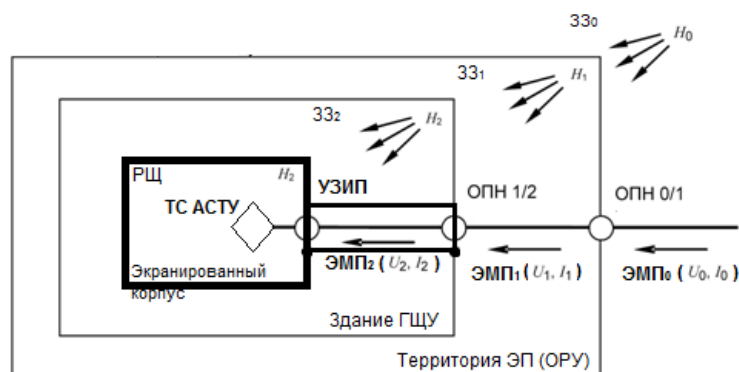


Рис. 2. Зоны защит электрической подстанции

Процедуры обеспечения ЭМС (Рис. 1) базируются на определении ЭМО электрической подстанции (Кангожин, 2005: 36; Кангожин, 2014: 108–112). Как свидетельствует большинство работ, посвященных ЭМС на энергообъектах высокого напряжения, отказ имеет место и после реализации мер по обеспечению ЭМС. Такое положение связано с изменениями ЭМО с течением времени из-за внесения изменений при реконструкции, модернизации ПС, старения оборудования и т.д. Следовательно, риск-ориентированное обеспечение ЭМС связано с контролем ЭМО и соответственно должно осуществляться на всех этапах жизнедеятельности энергетических объектов с этапа проектирования, где принятые проектные решения должны обеспечивать минимальные электромагнитные воздействия в местах установки SMART систем АСТУ и нормативные требования по классам жесткости испытаний на помехоустойчивость ТС SMART систем до осуществления периодического технического надзора уровня ЭМО.

Обсуждение.

Научная и практическая значимость проекта состоит в получении новых конкретных результатов, отвечающих требованиям научной новизны и имеющих потенциал коммерциализации: программный комплекс «ПИК-ЭМС», основанный на прогнозировании надежности SMART систем при неблагоприятной ЭМО; востребованные на практике методики обследования ЭМО и обеспечения ЭМС, разработанные на основе полевых экспериментов на реальных ПС; разработанные инновационные средства (или требования к ним) от ЭМП и методы обеспечения ЭМС, новая нормативно-техническая документация (или их проекты).

Одно из принципиальных отличий проекта от существующих аналогов заключается в следующем: известными зарубежными фирмами производителями защитных устройств в защите от ЭМП продвигается подход защиты УЗИПами, при этом их количество может достигать несколько сотен штук (или даже более тысячи). При средней цене в 1000\$ очевиден коммерческий интерес. При этом совершенно не учитывается их негативное влияние на функциональные характеристики и надежность самих SMART систем АСТУ. Реализация проекта позволит снизить число УЗИП до единиц штук, а в ряде случаев отказаться от них.

Один из конечных результатов проекта будет программно-измерительный комплекс «ПИК-ЭМС» прогнозирования надежности SMART систем АСТУ, основанный на достижениях отечественных и зарубежных производителей, имеет высокую степень коммерциализации.

Кроме оговоренных выше в статье результаты могут войти в основу новых эффективных технологий эксплуатации, диагностики и ремонта электрооборудования электрических станций и подстанций. Результаты исследований найдут отражение в соответствующих научных публикациях и проектах нормативных документов. Использование разработанных методов определения ЭМО и оценки эффективности мер защиты от ЭМП окажут положительное влияние на развитие технологий с использованием

SMART систем, используемой на предприятиях с источниками ЭМП что, безусловно, повысит внедряемость информационных технологий.

Результаты проекта будет представлять интерес для предприятий энергетики, РЭКов и национальной компании АО «KEGOC» для принятия решений необходимости контроля ЭМО действующих энергообъектов и достаточности защитных мер по обеспечению ЭМС. Результаты имеют большую практическая ценность, выраженную в минимизации возможных ущербов из-за не выполнения требований ЭМС, в повышении энергоэффективности действующих ЭП, в принятии управленческих решений, исключающих катастрофические последствия из-за отказов АСТУ при невыполнении требований технического регламента ЭМС.

В процессе реализации выбранного подхода исследований будут проанализированы существующие методики определения ЭМП, при необходимости будут созданы новые программы расчетов и схемы экспериментов, разработаны необходимые дополнительные методики, приборы и программные продукты для определения ЭМО на реальных подстанциях и ОРУ станций. Такой выбранный подход обеспечит минимизацию затрат для достижения целей и достоверность полученных результатов.

В процессе выполнения проекта будет реализован подход одновременного использования надежных экспериментально-расчетных методик определения ЭМО, математическое моделирование электрофизических процессов при воздействии ЭМП и компьютерные расчеты отказа. В целом такой подход является наиболее общим и включает в себя ряд подходов, известных ранее.

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем электроснабжения является повышение качества электроэнергии. Острота данной проблемы во многом связана с бурным развитием преобразовательной техники и ее широким использованием. Нелинейный характер преобразовательной нагрузки приводит к искажению формы (несинусоидальности) кривых тока и напряжения в системе электроснабжения (СЭ). Несинусоидальность кривых тока и напряжения оказывает негативное влияние на работу различных электротехнических устройств в составе СЭ, что значительно сокращает срок службы оборудования СЭ. Таким образом, снижение несинусоидальности кривых тока и напряжения является одной из важнейших и насущных задач современного электроснабжения.

Одним из традиционных способов снижения несинусоидальности кривых тока и напряжения в СЭ является использование пассивных фильтров: LC-цепей, настроенных в резонанс на частоты высших гармоник (Бадер, 2008: 56–60; Инсепов, 2013: 33–39). Главным достоинством пассивных фильтров является низкая стоимость. Однако наличие ряда серьезных недостатков, таких, как низкая добротность, технологический разброс параметров реакторов и конденсаторов фильтра, возможность возникновения опасных резонансных явлений и негативное влияние на переходные процессы в СЭ при установке фильтров, привело к значительному сокращению и ограничению их использования.

С развитием силовой электроники появилась возможность создания активных фильтров высших гармоник (англ. active filters) (Бадер, 2008: 56–60; Инсепов, 2013: 33–39). Имея в своей основе четырехквadrантный преобразователь на полностью управляемых силовых полупроводниковых приборах, активный фильтр обеспечивает высокую эффективность фильтрации высших гармоник. Принцип действия наиболее распространенного активного фильтра параллельного типа заключается в генерации тока высших гармоник в противофазе с током высших гармоник нагрузки (Рис. 3). Таким образом, токи высших гармоник циркулируют между фильтром и нагрузкой, не попадая дальше в питающую сеть. В настоящее время активные фильтры выпускаются серийно на номинальные токи до 450 А (Инсепов, 2013: 33–39). Однако широкое применение активных фильтров ограничивает их высокая стоимость, связанная с большой установленной мощностью.

В связи с этим наиболее перспективным направлением является разработка силовых гибридных фильтров (англ. hybrid filters), представляющих собой комбинацию пассивного фильтра и активного элемента (регулятора) на базе маломощного электронного преобразователя в четырехквadrантной плоскости (Рис. 4).

Наличие регулятора позволяет корректировать частотную характеристику СЭ, повышая эффективность фильтрации на частоте настройки пассивного фильтра и демпфируя резонансные явления в системе СЭ-фильтр. Малая установленная мощность силового электронного регулятора достигается благодаря наличию пассивного фильтра. В результате, в отличие от чисто активного фильтра, регулируемый фильтр становится конкурентоспособным устройством, решающим насущные задачи в СЭ.

На рис. 4 представлены возможные варианты топологии гибридного фильтра. Очевидно, что для получения системой управления регулятора информации о высших гармониках в системе могут быть использованы различные токи и напряжения в СЭ, например, ток сети, ток нагрузки, напряжение на пассивном фильтре и т.д. Таким образом, сочетание отслеживаемого сигнала, содержащего высшие гармоники, места подключения активной части и способа формирования сигнала задания определяют степень устранения недостатков, характерных для пассивной фильтрации. При этом особую важность

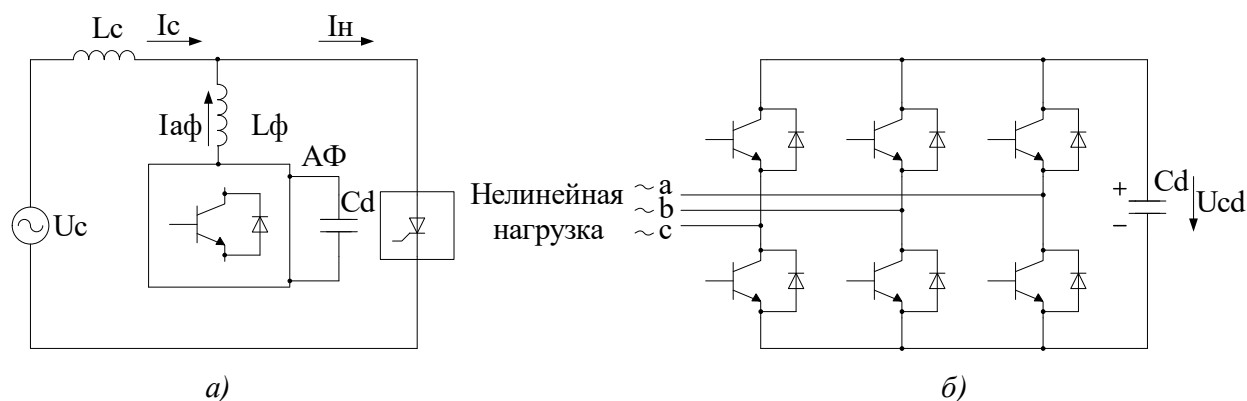


Рис. 3. Однофазная эквивалентная схема СЭ с активным фильтром параллельного типа (а) и схема силовой части преобразователя (б) (L_c - эквивалентная индуктивность сети)

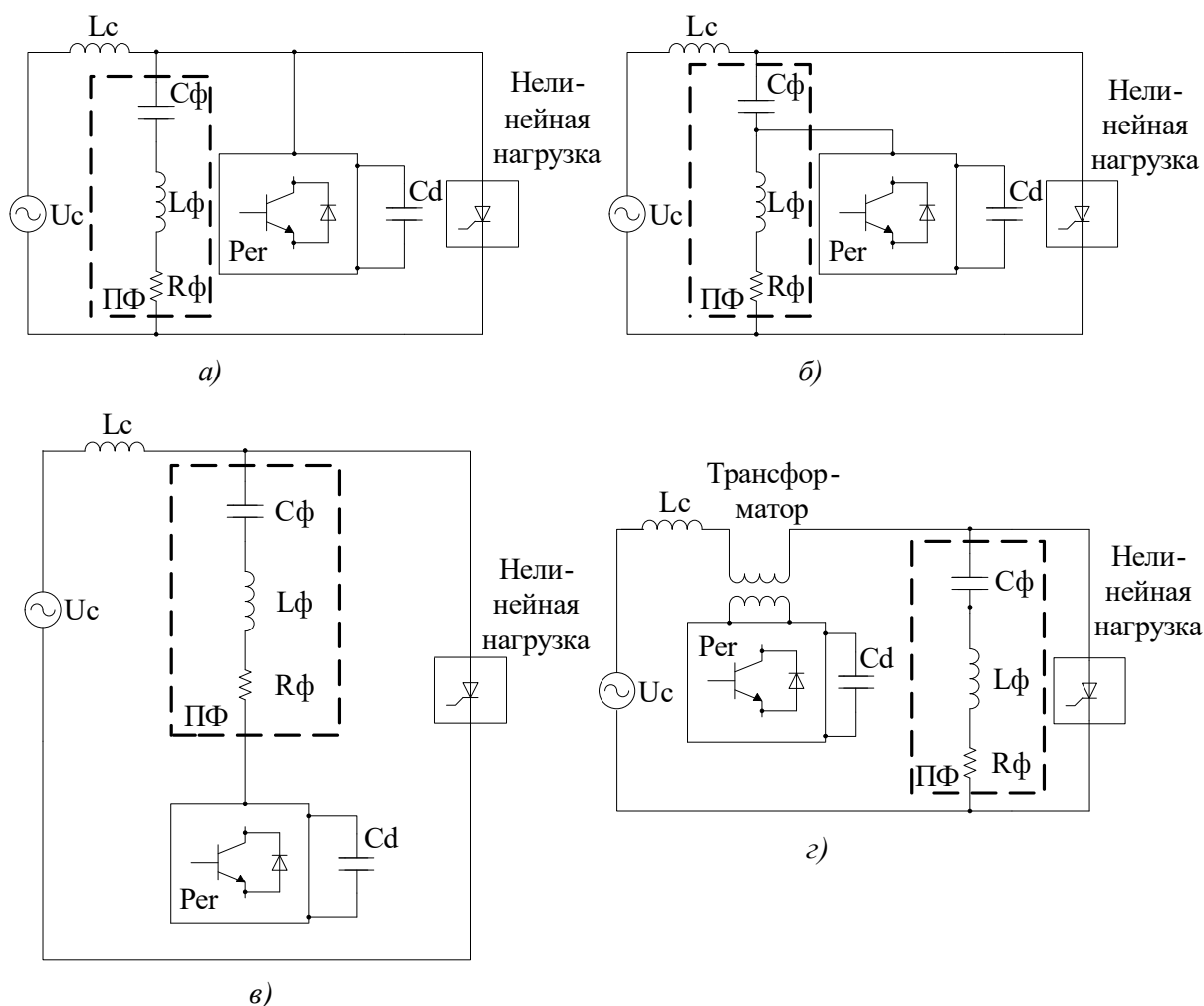


Рис. 4. Топология гибридного фильтра (однофазная эквивалентная схема, L_c - эквивалентная индуктивность сети):

a – параллельно нагрузке; *б* – параллельно реактору пассивного фильтра; *в* – последовательно в цепь пассивного фильтра; *г* – последовательно в сеть представляет тот факт, что положение фиктивного сопротивления, создаваемого регулятором в СЭ, не обязательно совпадает с фактическим местом подключения регулятора.

Анализ силового регулятора, как двухполюсника с управляемым полным входным сопротивлением, позволяет использовать общий подход при рассмотрении гибридных фильтров (Бадер, 2008: 56–60). Функционирование двухполюсника с положительным активным сопротивлением (потребление энергии) и с отрицательным активным сопротивлением (генерация энергии) ограничено энергоемкостью накопителя, в то время как работа с индуктивным или емкостным входным сопротивлением не ограничена. В результате регулятор может создавать полное сопротивление различного характера в СЭ. Таким образом, использование регулятора позволяет изменять положения резонансных частот в системе, а также снижать амплитуды резонансных пиков. Аналогичным образом регулятор может влиять на полное сопротивление пассивного фильтра на частоте настройки. В результате возрастает амплитуда тока высших гармоник на резонансной частоте в пассивном фильтре, т.е. повышается эффективность фильтрации.

На Рис. 5 представлен основной канал регулирования системы управления гибридного фильтра, отвечающий за формирование сигнала задания. Помимо основного, система управления также содержит два вспомогательных канала регулирования, предназначенных для синхронизации с основной частотой напряжения в точке

подключения фильтра и стабилизации напряжения на накопительном конденсаторе преобразователя. Для выделения необходимой гармонической составляющей или области спектра входного сигнала в регуляторе фильтра наиболее широкое распространение получил метод, основанный на преобразовании в синхронных координатах (Рис. 5.) (Бадер, 2008: 56–60). Используя прямое преобразование, векторам трехфазной системы ставим в соответствии проекции единственного вектора в двухфазной системе координат, вращающейся с частотой сети. Преимуществом данного метода является высокая точность выделения необходимого спектра несинусоидального входного сигнала.

Сигналы X^* , получаемые в канале регулирования, являются не чем иным, как входными сигналами X за вычетом составляющей на основной частоте сети. Далее блок формирования сигнала задания реализует один из законов регулирования, создавая определенные характер и значение полного сопротивления силового электронного регулятора на частотах высших гармоник, содержащихся в сигнале X^* .

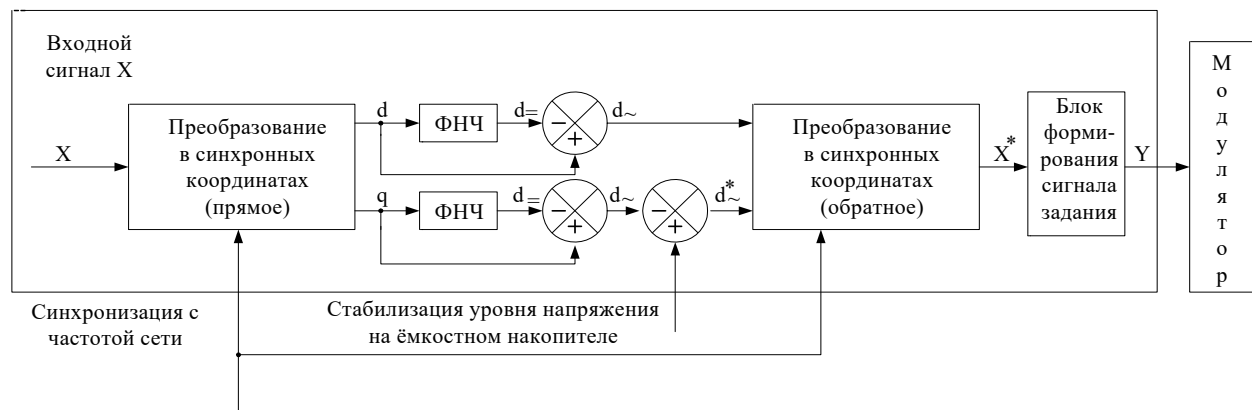


Рис. 5. Обобщенная блок-схема основного канала системы управления силовым регулятором гибридного фильтра в усреднённом состоянии

В качестве входных переменных X регулятора потенциально могут быть использованы любые токи и напряжения в СЭ, имеющие необходимый спектральный состав. Важно отметить, что задачи, решаемые регулятором, зависят от спектрального состава входного сигнала регулятора. Очевидно, что для повышения качества фильтрации пассивным фильтром на частоте настройки достаточно обрабатывать только гармонику входного сигнала данной частоты. В этом случае установленная мощность регулятора значительно меньше, чем в случае использования всего спектра сигнала. Кроме того, в этом случае упрощается задача модуляции сигнала в преобразователе. В то же время демпфирование регулятором резонансных явлений в системе возможно только при использовании широкого спектра входного сигнала регулятора.

В качестве входных сигналов потенциально могут быть рассмотрены следующие напряжения и токи высших гармоник в СЭ (Рис. 3): ток нагрузки I_n , токи сети I_c и пассивного фильтра I_ϕ , напряжение в точке подключения пассивного фильтра и т.д. В целом использование тока в качестве отслеживаемого сигнала более предпочтительно. В первую очередь это связано с существенной разницей в амплитудах высших гармоник и основной гармоники напряжения, что значительно затрудняет выделение необходимой гармонической составляющей. Таким образом, в качестве входных сигналов возможно использование тока нагрузки I_n , токов сети и фильтра I_c и I_ϕ . Необходимо отметить, что использование тока нагрузки имеет существенный недостаток, поскольку не позволяет судить о наличии резонансов в системе СЭ-фильтр. Таким образом, использование тока нагрузки I_n возможно только для повышения качества фильтрации на частоте настройки пассивного фильтра. Однако при этом преимуществом тока нагрузки перед другими

сигналами является практически полная независимость от напряжения высших гармоник сети, повышающая устойчивость регулирования. В то же время использование тока сети или тока фильтра в качестве входного сигнала регулятора теоретически позволяет осуществить как повышение фильтрации на частоте настройки фильтра, так и демпфирование резонансных явлений в СЭ.

Поэтому схемы управления гибридными фильтрами с током сети или током фильтра в качестве входного сигнала являются наиболее перспективными.

При оценке эффективности топологий гибридного фильтра (Рис. 3 а, б) при различных входных сигналах и законах регулирования необходимо учитывать не только несинусоидальность тока нелинейной нагрузки, но и возможную в реальных СЭ несинусоидальность питающего напряжения. Несинусоидальность напряжения СЭ также приводит к возникновению резонансов в системе и дополнительно нагружает пассивный фильтр токами высших гармоник (последовательный резонанс в контуре СЭ-фильтр). Для оценки эффективности различных топологий применяются известные допущения, позволяющие представить нелинейную нагрузку источником высших гармонических составляющих тока нагрузки, а несинусоидальное напряжение питающей сети – источником высших гармонических составляющих напряжения сети. Далее, используя метод эквивалентных источников, можно рассматривать отдельно компоненты тока сети, создаваемые источником напряжения высших гармоник сети и источником тока высших гармоник нагрузки.

Для оценки эффективности топологий гибридного фильтра (Рис. 3 а, б) при различных входных сигналах было проведено математическое моделирование СЭ с нелинейным потреблением и гибридным фильтром в программном комплексе С++ (Инсепов, 2013: 33–39), позволяющем достаточно просто получить необходимые частотные характеристики.

При анализе использовались следующие исходные данные типовой низковольтной трехфазной сети. Эквивалентная индуктивность L_C фазы сети составляет 300 мкГн. Параметры типового пассивного фильтра 5-й гармоники: емкость конденсатора фильтра $C_\phi = 249 \text{ мкФ}$; индуктивность реактора фильтра $L_\phi = 1,6 \text{ мГн}$; сопротивление фильтра $R_\phi = 0,25 \text{ Ом}$ (типичное значение добротности $Q=10$). Моделирование производилось в диапазоне частот 100 Гц – 1 кГц, содержащем наиболее энергетически важные высшие гармонические составляющие.

Результаты моделирования показали, что при наличии несинусоидальности напряжения сети использование регулятора параллельно с пассивным фильтром (Рис. 4а) при токе сети/токе фильтра в качестве входного сигнала регулятора нежелательно, поскольку создает предпосылки для усиления высших гармоник. Это ограничивает применение данного решения. Однако если напряжение сети синусоидально, то наилучший результат дает как ток сети, так и ток фильтра в комбинации с пропорциональным законом регулирования, реализуемым в блоке формирования сигнала задания. В этом случае при работе с током фильтра регулятор эквивалентен включению индуктивного сопротивления последовательно с сопротивлением сети. В случае же работы системы управления с током сети регулятор вносит фиктивное индуктивное сопротивление параллельно сопротивлению пассивного фильтра. В результате в обоих случаях регулятор демпфирует резонанс СЭ-фильтр и повышает качество фильтрации на частоте настройки пассивного фильтра.

Анализ топологии (Рис. 4б) с током фильтра в качестве входного сигнала показал, что в этом случае работа регулятора соответствует включению фиктивного сопротивления последовательно с цепью пассивного фильтра. Очевидно, что в этом случае невозможно одновременно обеспечить демпфирование резонансов и повышение качества фильтрации на частоте настройки пассивной части, как взаимоисключающие друг друга характеристики. Это означает, что обеспечение полной функциональности регулируемого

фильтра в данном случае не представляется возможным.

В этом случае регулятор эквивалентен внесению активно-индуктивного сопротивления последовательно с сопротивлением сети. При этом наибольшее влияние оказывает индуктивная составляющая, обеспечивающая сдвиг резонансной частоты СЭ-фильтра в область низких частот.

Анализ топологии (Рис. 4в) показал, что при работе по току фильтра I_ϕ фиктивное сопротивление регулятора расположено последовательно с цепью пассивного фильтра. Как было отмечено ранее, данное решение не обеспечивает полной функциональности регулируемому фильтру.

Заключение.

Проведённое исследование посвящено проблемам обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) объектов железнодорожной энергетической инфраструктуры с использованием SMART систем и цифровых технологий автоматизированных систем управления (АСУ). Цель работы — разработка комплексного риск-ориентированного подхода к обеспечению ЭМС — была достигнута посредством реализации комплекса научных методов, включающих математическое моделирование электромагнитной обстановки, экспериментальные методы контроля состояния оборудования, а также разработку и апробацию программно-аппаратных комплексов мониторинга и защиты.

Методы исследования позволили выявить основные источники и каналы распространения электромагнитных помех (ЭМП), оценить их влияние на надежность SMART систем, а также создать эффективные средства защиты, включая отечественные гибридные фильтры, обеспечивающие как снижение амплитуд высших гармоник, так и демпфирование резонансных явлений в системе электроснабжения. Проведено моделирование различных топологий гибридных фильтров с учетом входных сигналов регулятора, что позволило определить оптимальные схемы подключения активной части фильтра для повышения эффективности фильтрации и минимизации негативного воздействия ЭМП на оборудование.

В результате работы получены следующие ключевые результаты:

- Разработана методика комплексного риск-ориентированного обеспечения ЭМС, включающая обследование электромагнитной обстановки, идентификацию источников ЭМП, оценку помехоустойчивости АСУ и формирование требований к ЭМС SMART систем.

- Создан программный комплекс «ПИК-ЭМС», позволяющий прогнозировать надежность SMART систем при воздействии ЭМП, с возможностью применения как на действующих объектах, так и при проектировании новых.

- Проведен анализ эффективности различных топологий гибридных фильтров, показавший, что использование обратной связи по току сети обеспечивает оптимальное демпфирование резонансов и высокое качество фильтрации, что практически исключает усиление высших гармоник при несинусоидальности тока нагрузки и питающего напряжения.

- Разработаны рекомендации по минимизации числа защитных устройств УЗИП без снижения надежности АСУ, что снижает затраты на эксплуатацию и повышает эффективность защиты.

Выводы исследования подтверждают истинность выдвинутого автором утверждения о том, что интеграция математического моделирования, экспериментальных методов контроля и программно-аппаратных комплексов позволяет существенно повысить надежность SMART систем и эффективность мер обеспечения ЭМС. Новизна работы заключается не только в разработке инструментов прогнозирования отказов и оптимизации фильтров, но и в комплексной оценке взаимодействия ЭМП с цифровыми системами управления, что ранее в отечественной и зарубежной практике реализовано не было.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением применения

разработанных методов на объекты железнодорожной инфраструктуры различного уровня напряжения и автоматизации, а также с внедрением комплексных программно-аппаратных решений для мониторинга и адаптивной защиты SMART систем. Практическое применение результатов возможно в области эксплуатации и модернизации электрических подстанций, повышении энергоэффективности и безопасности железнодорожного транспорта, а также в разработке новой нормативно-технической документации по ЭМС, соответствующей современным требованиям цифровой индустрии.

Таким образом, проведённая работа формирует научную и практическую основу для развития риск-ориентированного подхода к обеспечению ЭМС, открывает возможности для коммерциализации программно-аппаратных решений, а также служит важным вкладом в повышение надежности и безопасности функционирования SMART систем в условиях жесткой электромагнитной обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

- Бадер, 2008 — Бадер М.П., Инсепов Д.Г. Гибридные фильтры как источник снижения электромагнитных волн в системах электроснабжения // Технологии электромагнитной совместимости. — 2008. — №1(24). — С. 56–60. [Russ.]
- Даутов, 2014 — Даутов С.С., Инсепов Д.Г., Омарова Т.М. Исследование электромагнитной обстановки тяговой подстанции // Вестник КазАТК. — 2014. — №2. — С. 89–94. [Russ.]
- Инсепов, 2008 — Инсепов Д.Г. Математическая модель электромагнитной совместимости // Наука и техника транспорта. — 2008. — №4. — С. 17–20. [Russ.]
- Инсепов, 2013 — Инсепов Д.Г. Способы защиты от электромагнитных помех на железнодорожном транспорте // Алматы: ГУТиП, Промышленный транспорт Казахстана. — 2013. — №2(39). — С. 33–39. [Russ.]
- Кангожин, 2005 — Кангожин Б.Р. Научно-практические аспекты ЭМС АСТУ. Сб.т. «Проблемы развития энергетики и телекоммуникаций в свете стратегии индустриально-инновационного развития Казахстана». — Алматы. — 2005. — С. 36. [Russ.]
- Кангожин, 2014 — Кангожин Б.Р., Даутов С.С., Омарова Т.М. Обеспечение электромагнитной совместимости при проектировании заземляющих устройств тяговых подстанций // Вестник КазАТК. — 2014. — №6. — С. 108–112. [Russ.]
- Кангожин, 2018 — Кангожин Б.Р., Даутов С.С., Исакаев А.К., Гараев Е.Т., Артюхин А.В. Комплекс обеспечения электробезопасности при оперативных переключениях на энергетических объектах. Патент №3357 на полезную модель от 08.11.2018 г. — 2018. — С. 1. [Russ.]
- Кангожин, 2019 — Кангожин Б.Р., Даутов С.С. Программно-аппаратный измерительный комплекс повышения технологической энергоэффективности — инструмент цифровизации электрических сетей // XLIX Международная научно-практическая конференция «Федоровские чтения-2019». — Москва, МЭИ. — 2019. — С. 63–67. [Russ.]
- Кангожин, 2016 — Кангожин Б.Р., Шелофаст В.В. Комплексное математическое моделирование актуальных задач железных дорог // Транс-Экспресс Казакстан. — 2016. — №6. — С. 64–67. [Russ.]
- Kangozhin, 2020 — Kangozhin B.R., Dautov S.S., Zharmagambetova M.S., Kosilov M.A. Thermal-imaging method for monitoring the insulation condition of oil-filled equipment // International Journal of Advanced Science and Technology. — 2020. — Vol. 29. — № 12s. — Pp. 1585–1590. [Eng.]

REFERENCES

- Bader, 2008 — Bader, M.P., Insepev, D.G. (2008). Gibridnye fil'try kak istochnik snizheniya elektromagnitnykh voln v sistemakh elektrosnabzheniya [Hybrid Filters as a Source of Electromagnetic Wave Reduction in Power Supply Systems] // Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti. — 2008. — №1(24). — Pp. 56–60. [in Russ.]
- Dautov, 2014 — Dautov, S.S., Insepev, D.G., Omarova, T.M. (2014). Issledovanie elektromagnitnoi obstanovki tyagovoi podstantsii [Investigation of the Electromagnetic Environment of a Traction Substation] // Vestnik KazATK. — 2014. — №2. — Pp. 89–94. [in Russ.]
- Insepev, 2008 — Insepev, D.G. (2008). Matematicheskaya model' elektromagnitnoi sovmestimosti [Mathematical Model of Electromagnetic Compatibility] // Nauka i tekhnika transporta. — 2008. — №4. — Pp. 17–20. [in Russ.]
- Insepev, 2013 — Insepev, D.G. (2013). Spособы zashchity ot elektromagnitnykh pomekh na zheleznodorozhnom transporte [Methods of Protection Against Electromagnetic Interference in Railway Transport]. — Almaty: GUTiP, Promyshlenniy transport Kazakhstana. — 2013. — №2(39). — Pp. 33–39. [in Russ.]
- Kangozhin, 2005 — Kangozhin B.R. (2005). Nauchno-prakticheskie aspekty EMS ASTU [Scientific and Practical Aspects of EMC ASTU] // Sbornik trudov «Problemy razvitiya energetiki i telekommunikatsii v svete strategii industrial'no-innovatsionnogo razvitiya Kazakhstana». — Almaty. — 2005. — P. 36. [in Russ.]
- Kangozhin, 2014 — Kangozhin, B.R., Dautov, S.S., Omarova, T.M. (2014). Obespechenie elektromagnitnoi sovmestimosti pri proektirovanii zazemlyayushchikh ustroystv tyagovykh podstantsii [Ensuring Electromagnetic Compatibility in the Design of Grounding Devices of Traction Substations] // Vestnik KazATK. — 2014. — №6. — Pp. 108–112. [in Russ.]
- Kangozhin, 2018 — Kangozhin, B.R., Dautov, S.S., Isakov, A.K., Garaev, E.T., Artyukhin, A.V. (2018). Kompleks obespecheniya elektrobezopasnosti pri operativnykh pereklyucheniyyakh na energeticheskikh obektakh [Complex for Ensuring Electrical Safety During Operational Switching at Energy Facilities]. Patent №3357 on a Utility Model dated 08.11.2018. — 2018. — P. 1. [in Russ.]
- Kangozhin, 2019 — Kangozhin, B.R., Dautov, S.S. (2019). Programmo-apparatnyi izmeritel'nyi kompleks povysheniya tekhnologicheskoi energoeffektivnosti — instrument tsifrovizatsii elektricheskikh setei [Hardware-Software Measuring Complex

for Improving Technological Energy Efficiency — Tool for Digitalization of Electrical Networks] // XLIX Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Fyodorovskie chteniya-2019». — Moscow: MEI. — 2019. — Pp. 63–67. [in Russ.]

Kangozhin, 2016 — Kangozhin, B.R., Shelophast, V.V. (2016). Kompleksnoe matematicheskoe modelirovanie aktual'nykh zadach zheleznykh dorog [Complex mathematical modeling of current railway problems]. Trans-Express Kazakhstan. — 2016. — № 6. — Pp. 64–67. [in Russ.]

Kangozhin, 2020 — Kangozhin, B.R. (2020). Thermal-imaging method for monitoring the insulation condition of oil-filled equipment [Thermal-Imaging Method for Monitoring the Insulation Condition of Oil-Filled Equipment] // International Journal of Advanced Science and Technology. — 2020. — Vol. 29. — №12s. — Pp. 1585–1590. [in Eng.]

