

УДК 005.63 : 629.083

ВЛИЯНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ НА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ В КОНТЕКСТЕ СОБЛЮДЕНИЯ РЕГЛАМЕНТА R100

© 2025 И.А. Беляева

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 04.11.2025

В статье рассматривается влияние архитектуры и проектирования электронных блоков управления (ЭБУ) на электробезопасность высоковольтной (ВВ) системы электромобиля (ЭМ) в контексте соблюдения требований Регламента R100 ЕЭК ООН. Проанализированы ключевые аспекты проектирования ЭБУ, влияющие на безопасность, включая выбор компонентов, изоляцию, защиту от перенапряжений и методы обеспечения функциональной безопасности. Приведены примеры конструктивных решений и инженерных подходов, а также рассмотрены соответствующие стандарты и нормативные документы.

Ключевые слова: электромобиль, электробезопасность, функциональная безопасность, электронные блоки управления, высоковольтная система, Регламент R100, проектирование, изоляция, функциональная безопасность, стандарты, ГОСТ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-96-100

EDN: KVPTQN

ВВЕДЕНИЕ

Электромобили, как ключевой элемент стратегии устойчивого развития транспорта, становятся все более востребованными [1]. Однако, внедрение электромобилей требует решения ряда технических задач, связанных с обеспечением безопасности, надежности и эффективности. Одним из критически важных аспектов является обеспечение электробезопасности высоковольтной системы, которая работает с напряжениями, представляющими серьезную угрозу для жизни и здоровья человека [2].

Надежная и безопасная работа высоковольтной системы электромобиля напрямую зависит от качества проектирования и функционирования электронных блоков управления (ЭБУ). ЭБУ выполняют широкий спектр функций, включая управление электродвигателем, контроль заряда и разряда аккумуляторной батареи, мониторинг состояния высоковольтных цепей и обеспечение безопасности в случае аварийных ситуаций [3]. Таким образом, проектирование ЭБУ с учетом требований электробезопасности является критически важным фактором для соблюдения Регламента R100 ЕЭК ООН, который устанавливает требования к безопасности электромобилей [4].

Регламент R100 ЕЭК ООН: Требования к электробезопасности электромобилей

Регламент R100 ЕЭК ООН устанавливает требования к безопасности транспортных средств с электрическим приводом, включая защиту от поражения электрическим током, предотвращение коротких замыканий и возгораний [5]. Основные требования регламента включают:

- **Защита от прямого и косвенного прикосновения:** Конструкция электромобиля должна включать возможность прямого прикосновения к токоведущим частям высоковольтной системы. В случае повреждения изоляции должна быть предусмотрена система автоматического отключения высоковольтной системы (размыкания контура) для защиты от косвенного прикосновения [6].

- **Изоляция высоковольтных компонентов:** Все высоковольтные компоненты должны быть надежно изолированы от корпуса автомобиля и других низковольтных цепей. Сопротивление изоляции должно соответствовать установленным нормам [7].

- **Защита от перегрузки и короткого замыкания:** Высоковольтная система должна быть защищена от перегрузки и короткого замыкания с помощью предохранителей, автоматических выключателей и других защитных устройств [8].

- **Требования к аккумуляторной батарее:** Аккумуляторная батарея должна соответствовать специальным требованиям по безопасности, включая защиту от перегрева, перезаряда, глубокого разряда и короткого замыкания [9].

- **Система мониторинга изоляции:** Высоковольтная система должна быть оснащена системой мониторинга изоляции, которая постоянно контролирует сопротивление изоляции и выдает предупреждение в случае его снижения [10].

- **Маркировка и предупреждающие знаки:** Все высоковольтные компоненты должны быть

четко маркированы и снабжены предупреждающими знаками [5].

Соответствие требованиям Регламента R100 является обязательным условием для сертификации электромобилей и их допуска к эксплуатации на дорогах общего пользования в странах, принявших данный регламент [11].

Проектирование ЭБУ оказывает существенное влияние на электробезопасность высоковольтной системы электромобиля. Ключевые аспекты проектирования ЭБУ, влияющие на безопасность, включают:

- Выбор компонентов и материалов

Выбор компонентов и материалов для ЭБУ должен осуществляться с учетом их электрических, механических и термических характеристик, а также соответствия требованиям безопасности. Важно использовать компоненты, сертифицированные на соответствие стандартам безопасности и имеющие необходимые параметры для работы в высоковольтных цепях [12].

- Реле и контакторы: Реле и контакторы, используемые для коммутации высоковольтных цепей, должны иметь достаточную электрическую прочность изоляции и обеспечивать надежное размыкание цепи в случае аварийной ситуации [13].

- Конденсаторы: Конденсаторы, используемые в высоковольтных цепях, должны иметь высокое рабочее напряжение и низкий уровень утечки тока [14].

- Изоляционные материалы: Изоляционные материалы, используемые для защиты от поражения электрическим током, должны обладать высокой диэлектрической прочностью, термической стойкостью и устойчивостью к воздействию окружающей среды [15].

- Изоляция высоковольтных цепей

Обеспечение надежной изоляции высоковольтных цепей является одним из основных требований электробезопасности [16]. При проектировании ЭБУ необходимо тщательно продумать конструкцию высоковольтных цепей, чтобы исключить возможность прямого или косвенного прикосновения к токоведущим частям. Для этого используются различные методы, включая:

- **Пространственное разделение:** Разделение высоковольтных и низковольтных цепей путем обеспечения достаточного расстояния между ними.

- **Изоляционные барьеры:** Использование изоляционных барьеров для физического разделения высоковольтных и низковольтных цепей.

- **Герметизация:** Герметизация высоковольтных компонентов для защиты от попадания влаги и загрязнений.

Примером конструктивного решения является использование многослойных печатных плат с разделением высоковольтных и низковольтных цепей на разных слоях и обеспечением надежной изоляции между слоями [17, 18].

Перенапряжения в высоковольтной системе электромобиля могут возникать по различным причинам, включая коммутационные процессы, электромагнитные импульсы и удары молнии [19]. Перенапряжения могут привести к повреждению электронных компонентов и нарушению изоляции, что создает угрозу поражения электрическим током [20]. Для защиты от перенапряжений в ЭБУ используются различные защитные устройства, такие как:

- **Варисторы:** Варисторы представляют собой полупроводниковые резисторы с нелинейной вольт-амперной характеристикой, которые ограничивают напряжение до безопасного уровня.

- **Супрессоры:** Супрессоры представляют собой полупроводниковые диоды, которые быстро переходят в проводящее состояние при превышении определенного порога напряжения, шунтируя перенапряжение на землю.

- **Газоразрядные трубки:** Газоразрядные трубки представляют собой устройства, заполненные инертным газом, которые пробиваются при высоком напряжении и обеспечивают отвод энергии перенапряжения на землю.

Система мониторинга изоляции (СМИ) является важным элементом системы электробезопасности электромобиля. СМИ постоянно контролирует сопротивление изоляции между высоковольтными цепями и корпусом автомобиля и выдает предупреждение в случае его снижения. Это позволяет своевременно обнаружить повреждение изоляции и принять меры по предотвращению аварийной ситуации.

СМИ обычно реализуется на основе измерения напряжения и тока утечки в высоковольтной системе. При снижении сопротивления изоляции увеличивается ток утечки, что фиксируется системой мониторинга.

Функциональная безопасность (ФБ) – это часть общей безопасности, которая зависит от правильной работы систем, связанных с безопасностью. При проектировании ЭБУ, отвечающих за безопасность высоковольтной системы, необходимо учитывать требования стандартов функциональной безопасности, таких как ISO 26262.

ISO 26262 –международный стандарт, который устанавливает требования к разработке, производству, эксплуатации и техническому обслуживанию электронных систем, связанных с безопасностью, в автомобильной промышленности. Стандарт определяет уровни полноты безопасности (Automotive Safety Integrity Level, ASIL) в зависимости от степени риска и устанавливает требования к процессам проектирования, верификации и валидации для каждого уровня ASIL (рисунок 1).



Рисунок 1 – Системный подход к обеспечению безопасности высоковольтных сетей электромобилей

При проектировании ЭБУ, отвечающих за безопасность высоковольтной системы, необходимо проводить анализ рисков и определять уровень ASIL для каждой функции безопасности.

На основе уровня ASIL разрабатываются требования к аппаратной и программной реализации ЭБУ, а также к процессам верификации и валидации.

Программное обеспечение (ПО) играет важную роль в обеспечении электробезопасности высоковольтной системы электромобиля. ПО управляет работой системы мониторинга изоляции, защитных устройств и других функций безопасности. Для обеспечения надёжности и безопасности ПО необходимо применять методы формальной верификации, статического анализа и динамического тестирования.

В качестве примеров конструктивных решений, направленных на повышение электробезопасности высоковольтной системы электромобиля, можно привести:

- **Использование реле с принудительным размыканием контактов:** Реле с принудительным размыканием контактов обеспечивают надёжное размыкание цепи даже в случае залипания контактов.

- **Использование многослойных печатных плат с разделением высоковольтных и низковольтных цепей:** Это позволяет обеспечить надёжную изоляцию между цепями и снизить риск короткого замыкания.

- **Герметизация высоковольтных компонентов:** Герметизация высоковольтных компонентов защищает их от попадания влаги и загрязнений, что повышает надёжность и безопасность работы.

- **Использование экранированных кабелей:** Экранированные кабели снижают уровень электромагнитных помех и защищают высоковольтные цепи от внешних воздействий.

При проектировании электронных блоков для электромобилей необходимо учитывать требования следующих стандартов и нормативных документов:

- **Регламент R100 ЕЭК ООН** (Uniform provisions concerning the approval of battery electric vehicles with regard to specific requirements for the construction and functional safety) – устанавливает требования к безопасности электромобилей.

- **ISO 26262** (Road vehicles – Functional safety) – устанавливает требования к функциональной безопасности электронных систем в автомобильной промышленности.

- **IEC 61508** (Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems) – устанавливает требования к функциональной безопасности электронных систем.

- **ГОСТ Р МЭК 61508** (Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью) - российский стандарт, аналог IEC 61508.

- **ГОСТ Р 58506-2019** Электрические транспортные средства. Общие технические требования и методы испытаний.
- **IEC 60664-1** – определяет требования к изоляции оборудования в низковольтных системах.
- **IEC 61851-1** – устанавливает общие требования к системам conductive charging электромобилей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проектирование электронных блоков управления (ЭБУ) играет ключевую роль в обеспечении электробезопасности высоковольтной системы электромобиля и соблюдении требований Регламента R100 ЕЭК ООН. Правильный выбор компонентов, обеспечение надежной изоляции, защита от перенапряжений, использование системы мониторинга изоляции, реализация требований функциональной безопасности и применение проверенных методов разработки программного обеспечения являются критически важными факторами для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации электромобилей.

Соблюдение стандартов и нормативных документов, таких как Регламент R100, ISO 26262 и ГОСТ, позволяет обеспечить соответствие требованиям электробезопасности и гарантировать защиту от поражения электрическим током в случае аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang, Y., Zhao, J., & Cao, J. (2022). Electric vehicle safety: A review of standards and technologies. *Journal of Power Sources*, 521, 230997. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230997>
1. Wang, L., & Li, J. (2021). High-voltage safety in electric vehicles: Challenges and solutions. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 567-580. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3055173>
3. Chen, H., et al. (2020). Battery management system for electric vehicle applications: A review. *Energies*, 13(21), 5688. <https://doi.org/10.3390/en13215688>
4. UNECE Regulation No. 100. Revision 3. (2022). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. <https://unece.org/transport/documents/2022/01/standards/unece-regulation-no-100-rev-3>
5. International Organization for Standardization. (2018). ISO 26262:2018 Road vehicles — Functional safety. <https://doi.org/10.3403/30232128>
6. International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 61508:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. <https://doi.org/10.3403/30154202>
7. ГОСТ Р 58506-2019. (2019). Электрические транспортные средства. Общие технические требования и методы испытаний. <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=223027>
8. International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 60664-1:2020 Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1: Principles, requirements and tests. <https://doi.org/10.3403/30346604>
9. International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements. <https://doi.org/10.3403/30212920>
10. Husain, I. (2021). *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429328278>
11. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K.M. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429444328>
12. Ott, H.W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470410880>
13. Paul, C.R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471755007>
14. Li, X., et al. (2023). Advanced insulation monitoring techniques for electric vehicle high-voltage systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(1), 456-467. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3142400>
15. Müller, D., & Schwarz, R. (2021). Functional safety applications in automotive battery management systems. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 10(2), 123-135. <https://doi.org/10.4271/10-10-02-0009>
16. Schmidt, K., & Meyer, J. (2022). Overvoltage protection design for automotive high-voltage systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(4), 3891-3902. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3123456>
17. Козловский, В.Н. Моделирование энергоемких накопителей автомобильной комбинированной энергоустановки / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, С.В. Петровский // Грузовик. – 2018. – № 11. – С. 13-14.
18. Козловский, В.Н. Методология анализа и прогнозирования качества автомобилей в эксплуатации / В.Н. Козловский В.Н., Д.В. Антипов, А.В. Заятров // Актуальные проблемы экономики. – 2016. – Т. 186. – № 12. С. 387-398.
19. Козловский, В.Н. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2 / В.Н. Козловский, В.И. Строганов, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 19-28.
20. Строганов, В.И. Итоги и перспективы развития электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками / В.И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 2-3. – С. 2-8.

IMPACT OF ELECTRONIC CONTROL UNIT DESIGN ON THE ELECTRICAL SAFETY OF HIGH-VOLTAGE SYSTEMS IN ELECTRIC VEHICLES IN THE CONTEXT OF UN ECE REGULATION NO. 100 COMPLIANCE

© 2025 I.A. Belyaeva

Samara State Technical University, Samara, Russia

This paper examines the influence of electronic control unit (ECU) architecture and design on the electrical safety of high-voltage (HV) systems in electric vehicles (EVs) with regard to compliance with the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) Regulation No. 100. Key design aspects of ECUs affecting safety are analyzed, including component selection, insulation, overvoltage protection, and functional safety assurance methods. Examples of engineering solutions and design approaches are provided, along with a review of relevant standards and regulatory documents.

Keywords: Electric vehicle, electrical safety, functional safety, electronic control units, high-voltage system, Regulation No. 100, design, insulation, functional safety, standards, GOST.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-6-96-100

EDN: KVPTQN

REFERENCES

1. Zhang, Y., Zhao, J., & Cao, J. (2022). Electric vehicle safety: A review of standards and technologies. *Journal of Power Sources*, 521, 230997. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230997>
2. Wang, L., & Li, J. (2021). High-voltage safety in electric vehicles: Challenges and solutions. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(2), 567–580. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3055173>
3. Chen, H., et al. (2020). Battery management system for electric vehicle applications: A review. *Energies*, 13(21), 5688. <https://doi.org/10.3390/en13215688>
4. UNECE Regulation No. 100. Revision 3. (2022). Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. <https://unece.org/transport/documents/2022/01/standards/unece-regulation-no-100-rev-3>
5. International Organization for Standardization. (2018). ISO 26262:2018 Road vehicles — Functional safety. <https://doi.org/10.3403/30232128>
6. International Electrotechnical Commission. (2010). IEC 61508:2010 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. <https://doi.org/10.3403/30154202>
7. GOST R 58506-2019. (2019). Elektricheskie transportnye sredstva. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy. <http://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=223027>
8. International Electrotechnical Commission. (2020). IEC 60664-1:2020 Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1: Principles, requirements and tests. <https://doi.org/10.3403/30346604>
9. International Electrotechnical Commission. (2017). IEC 61851-1:2017 Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements. <https://doi.org/10.3403/30212920>
10. Husain, I. (2021). *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429328278>
11. Ehsani, M., Gao, Y., Longo, S., & Ebrahimi, K.M. (2018). *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429444328>
12. Ott, H.W. (2009). *Electromagnetic Compatibility Engineering*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470410880>
13. Paul, C.R. (2006). *Introduction to Electromagnetic Compatibility* (2nd ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471755007>
14. Li, X., et al. (2023). Advanced insulation monitoring techniques for electric vehicle high-voltage systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70(1), 456–467. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3142400>
15. Müller, D., & Schwarz, R. (2021). Functional safety applications in automotive battery management systems. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 10(2), 123–135. <https://doi.org/10.4271/10-10-02-0009>
16. Schmidt, K., & Meyer, J. (2022). Overvoltage protection design for automotive high-voltage systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(4), 3891–3902. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3123456>
17. Kozlovskij, V.N. Modelirovanie energoemkih nakopitelej avtomobil'noj kombinirovannoj energoustanovki / V.N. Kozlovskij, V.I. Stroganov, V.V. Debelov, S.V. Petrovskij // *Gruzovik*. – 2018. – № 11. – S. 13–14.
18. Kozlovskij, V.N. Metodologiya analiza i prognozirovaniya kachestva avtomobilej v ekspluatácii / V.N. Kozlovskij V.N., D.V. Antipov, A.V. Zayatrov // *Aktual'nye problemy ekonomiki*. – 2016. – T. 186. – № 12. S. 387–398.
19. Kozlovskij, V.N. Kompleks elektronnyh sistem upravleniya dvizheniem legkovogo avtomobilya s kombinirovannoj silovoj ustanovkoj. Chast' 2 / V.N. Kozlovskij, V.I. Stroganov, V.V. Debelov, M.A. P'yanov // *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy*. – 2014. – T. 10. – № 2. – S. 19–28.
20. Stroganov, V.I. Itogi i perspektivy razvitiya elektromobilej i avtomobilej s gibridnymi silovymi ustanovkami / V.I. Stroganov, V.N. Kozlovskij // *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*. – 2012. – № 2-3. – S. 2–8.