

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.314

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-101-108>

Способы снижения уровня электромагнитных помех статических преобразователей электроэнергии

О.В. Григораш¹✉, Д.А. Нормов², А.В. Савенко³, Е.А. Денисенко⁴, В.Л. Болотин⁵

^{1,4} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; Краснодар, Россия

^{2,3,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия

¹ grigorash61@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>

² d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>

³ a.savenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>

⁴ Denisenko_88@mail.ru

⁵ bvlener@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>

Аннотация. Статические преобразователи электроэнергии (СПЭ) применяются в системах электроснабжения объектов АПК. Нелинейные силовые полупроводниковые приборы СПЭ во время коммутации создают электромагнитные помехи, которые распространяются по силовым цепям и цепям управления. Помехи приводят к нарушению работы систем управления и защиты энергосистем, выполненных на базе микропроцессорной техники, ухудшению характеристики электротехнических устройств, подключенных к СПЭ, и самих статических преобразователей. Ввиду недостаточной систематизации причин возникновения электромагнитных помех и усложненной методики их расчета затруднена разработка энергоэффективных способов снижения уровня помех СПЭ. Цель исследований – предложить способы и структурно-схемные решения статических преобразователей электроэнергии с пониженным уровнем электромагнитных помех с учетом причин их возникновения. В результате анализа выделили три группы причин возникновения электромагнитных помех по воздействию возмущений, создаваемых источниками электроэнергии, силовыми цепями и системами управления преобразователей. Предложили методику упрощенного расчета напряжения уровня электромагнитных помех, основанной на расчете эквивалентных электрических схем источников помех. Из рассмотренных способов снижения уровня помех предложили наиболее эффективные и реализующие их структурно-схемные решения СПЭ. Установили, что применение трансформаторов со средней точкой и врачающимся магнитным полем позволяет уменьшить количество силовых полупроводниковых приборов (основных источников помех). Результаты данных исследований повысят эффективность предпроектных работ по разработке статических преобразователей электроэнергии с пониженным уровнем электромагнитных помех.

Ключевые слова: системы электроснабжения; статические преобразователи электроэнергии; электромагнитные помехи; электромагнитная совместимость; эквивалентные электрические схемы

Для цитирования: Григораш О.В., Нормов Д.А., Савенко А.В., Денисенко Е.А., Болотин В.Л. Способы снижения уровня электромагнитных помех статических преобразователей электроэнергии // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 101-108. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-101-108>

ORIGINAL ARTICLE

Ways to reduce electromagnetic interference in static electric power converters

O.V. Grigorash¹✉, D.A. Normov², A.V. Savenko³, E.A. Denisenko⁴, V.L. Bolotin⁵

^{1,4} Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin; Krasnodar, Russia

^{2,3,5} Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ grigorash61@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>

² d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>

³ mfsav@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>

⁴ Denisenko_88@mail.ru

⁵ bvlener@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>

Abstract. Static electric power converters (SPEs) are widely used in the power supply systems of agricultural facilities. However, their nonlinear semiconductor power devices generate significant electromagnetic

interference (EMI) during switching. This EMI propagates through power and control circuits, potentially disrupting microprocessor-based control and protection systems, degrading connected electrical devices, and even affecting the SPEs themselves. Current understanding of EMI causes is insufficiently systematized, and existing complex calculation methods hinder the design of energy-efficient EMI reduction solutions. The study aimed to analyze the causes of EMI and propose innovative methods and structural-circuit solutions for SPEs with reduced interference levels. The study systematized EMI causes into three groups based on disturbances originating from electric power sources, power circuits, and converter control systems. The authors introduced a simplified method for calculating EMI voltage levels, based on equivalent circuit analysis of interference sources. Furthermore, the research explored various effective EMI reduction techniques and proposed structural-circuit solutions for SPEs that implement them. These solutions include utilizing transformers with a midpoint and a rotating magnetic field, which effectively reduces the number of power semiconductor devices – the primary sources of interference. The findings will enhance the efficiency of preliminary design work for developing SPEs with significantly reduced electromagnetic interference.

Keywords: power supply systems; renewable energy sources; static electric power converters (SPE); electromagnetic interference (EMI); electromagnetic compatibility; equivalent electrical circuits

For citation: Grigorash O.V., Normov D.A., Savenko A.V., Denisenko E.A., Bolotin V.L. Ways to reduce electromagnetic interference in static electric power converters. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):101-108 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-101-108>

Введение

Статические преобразователи электроэнергии (СПЭ) широко применяются в системах электроснабжения (СЭС) АПК, в том числе в системах бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей (потребителей первой категории) и в автономных системах электроснабжения, выполненных на возобновляемых источниках энергии. СПЭ, как правило, выполняют две функции: преобразование и стабилизацию параметров электроэнергии [1].

Основными функциональными элементами СПЭ являются нелинейные силовые электронные приборы (транзисторы, тиристоры, диоды), во время коммутации которых происходят скачки напряжения и тока, изменяется их форма, увеличивается длительность переходных процессов, создаются электромагнитные помехи (ЭМП) – электромагнитные поля. Эти помехи распространяются по силовым проводам, по которым передается энергия между функциональными элементами СЭС и СПЭ, по цепям управления и в окружающее пространство. Созданные ЭМП могут привести к нарушению работы систем управления и защиты СЭС, выполненных на базе микропроцессорной техники, ухудшению характеристик электротехнических устройств, подключенных с СПЭ к одному источнику, характеристик потребителей электроэнергии, а также самих источников помех – статических преобразователей [2, 3].

Способы снижения уровня электромагнитных помех, создаваемых СПЭ, представлены в работах отечественных и зарубежных ученых [4-7]. Однако в исследованиях не рассмотрены структурно-схемные решения СПЭ с пониженным уровнем помех.

Можно предположить, что при уменьшении количества приборов в структурно-схемных решениях преобразователей электроэнергии будет наблюдаться снижение уровня ЭМП.

Цель исследований: предложить способы и структурно-схемные решения статических преобразователей электроэнергии с пониженным уровнем электромагнитных помех.

Материалы и методы

При проведении исследований применили классические методы статистической обработки, основ теории силовой преобразовательной техники, сравнительный и логический анализ. Объектом исследований являлись статические преобразователи электроэнергии. Задачи исследований: провести анализ причин возникновения электромагнитных помех и систематизировать их по группам; разработать методику упрощенного расчета уровня ЭМП; по результатам анализа известных способов борьбы с ЭМП предложить структурно-схемные решения СПЭ с пониженным уровнем помех.

Результаты и их обсуждение

При работе силовых электронных приборов СПЭ возникают электромагнитные помехи по следующим причинам:

- коммутация больших токов;
- высокочастотные импульсы, генерируемые схемами управления полупроводниковыми приборами;
- нелинейные и реактивные компоненты силовых схем СПЭ;
- быстрые изменения направлений передачи потоков энергии, приводящие к скачкам напряжений и токов.

При оценке ЭМП, создаваемых полупроводниковыми приборами СПЭ, пользуются понятием электромагнитной совместимости основных функциональных элементов и потребителей электроэнергии системы электроснабжения, включающей в себя, кроме СПЭ, источники электроэнергии.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) – это способность системы электроснабжения функционировать, обеспечивать необходимое качество электроэнергии в заданной электромагнитной обстановке и не создавать ЭМП другим техническим средствам [8].

При работе СПЭ в разных режимах уровень ЭМП непрерывно изменяется под воздействием возмущений. Для повышения эффективности предпроектных работ по разработке СПЭ с пониженным уровнем помех данные возмущения систематизировали по трем группам.

В первую группу возмущений включили изменения электрических параметров источников электроэнергии (помимо СПЭ, от этих источников питаются и другие потребители). Напряжение источника питания в нормальных режимах работы может изменяться в пределах $\pm 10\%$ от номинальных значений, а при эксплуатации СПЭ в составе автономных СЭС эти отклонения могут быть больше. Несинусоидальные входные токи СПЭ также вносят искажения в параметры электроэнергии источника.

Ко второй группе возмущений отнесли изменение величины нагрузки. Большие изменения нагрузки (отклонение напряжения больше 10% от номинальных значений) бывают очень редко, в основном в случае, когда источник электроэнергии имеет соизмеримую мощность с нагрузкой. Малые изменения

нагрузки (отклонения меньше 10%) наблюдаются постоянно, так как потребители электроэнергии периодически подключаются или отключаются от источника.

В третью группу возмущений включили возмущения, создаваемые системой управления СПЭ. Работа системы управления синхронизирована с напряжением источника электроэнергии. Для стабилизации напряжения информация о параметрах электроэнергии поступает с выхода преобразователя, эти параметры могут быть нестабильными и иметь искаженную форму. Кроме того, периодически изменяются величина и характер нагрузки. Разброс характеристик силовых полупроводниковых приборов приводит к неточности измерения опорных и ведущих сигналов. Все эти причины являются случайными функциями времени и приводят к изменениям углов управления силовыми полупроводниковыми приборами СПЭ и повышению уровня ЭМП.

При разработке методики упрощенного расчета напряжения уровня ЭМП использовали эквивалентные схемы. Анализ работы этих схем дает возможность изучать ЭМС источников и потребителей ЭМП, уменьшать их уровень путем корректировки структурно-схемных и конструктивных решений СПЭ, используя, в том числе, известные способы борьбы с помехами.

Эквивалентные электрические схемы взаимодействия источника E_{II} с потребителями U_{II} ЭМП через емкостные и индуктивные связи в СПЭ приведены на рисунке 1.

Отметим, что монтажная емкость C_M (рис. 1а, б) возникает между соединительными проводами и элементами схемы, а также между ними и корпусом СПЭ.

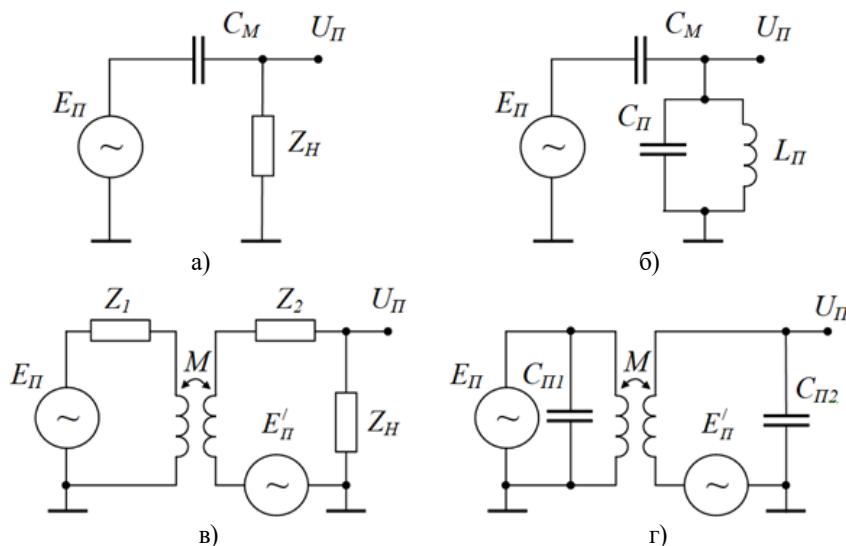


Рис. 1. Эквивалентные электрические схемы емкостного (а, б) и индуктивного (в, г) путей распространения электромагнитных помех

Fig. 1. Equivalent circuits of capacitive (a, b) and inductive (c, d) propagation paths of electromagnetic interference

Полное сопротивление Z_H является нагрузкой для источника электромагнитных помех E_H , характеризует параметры схемы СПЭ, на входе которого образуется напряжение помех U_H :

$$U_H = \frac{E_H Z_H}{(Z_H + 1/j\omega C_M)}, \quad (1)$$

где ω – частота высокочастотного сигнала источника помех E_H .

Из формулы (1) следует, что величина напряжения помех U_H увеличивается с ростом Z_H и C_M .

Если полное сопротивление Z_H имеет емкостной характер (рис. 1б), формула (1) принимает вид:

$$U_H = \frac{E_H C_M}{C_M + C_H}, \quad (2)$$

если выполняется неравенство

$$\frac{1}{\omega C_M} \geq Z_K, \quad (3)$$

где Z_K – сопротивление контура, эквивалентное полному сопротивлению Z_H , определяемое по формуле:

$$Z_K = \frac{1}{\omega C_H K_{3K}}, \quad (4)$$

где $K_{3K} = \Delta f_{0,7} / f$ – коэффициент затухания контура; $\Delta f_{0,7}$ – полоса пропускания контура по уровню 0,7 от резонансной частоты f , соответствующей угловой частоте ω .

Тогда величина напряжения помех (рис. 1б) определяется по формуле:

$$U_H = \frac{E_H Z_H \omega M}{Z_1 Z_2}, \quad (5)$$

где M – взаимная индуктивность.

Таким образом, напряжение помех будет увеличиваться с ростом частоты высокочастотного сигнала источника помех ω , взаимной индуктивности M , входного полного сопротивления источника помех Z_H и будет уменьшаться с увеличением сопротивлений Z_1 и Z_2 .

В случае паразитной (непредвиденной) индуктивной связи двух контуров, имеющих одинаковые частоты (рис. 1г), ток в контуре источника помехи, находящийся под напряжением E_H , будет определяться с учетом $Z_K = \omega L_H$. Волновое сопротивление напряжения E_H равно последовательному активному сопротивлению контура $Z_2 = R$. В этом случае $Z_H = Z_K$ и напряжение помех определяются по формуле:

$$U_H = \frac{E_H K_{CB}}{K_{3K}}, \quad (6)$$

где $K_{CB} = M/L$ – коэффициент вредной связи между индуктивностями контуров; $K_{3K} = R\omega C_H$ – коэффициент эквивалентного затухания контуров.

При анализе и расчете эквивалентных схем, приведенных на рисунке 1, вводится коэффициент связи цепей источника и приемника помех $K_{ИП}$. Этот коэффициент показывает, какая часть напряжения источника помехи E_H содержится в приемнике:

$$K_{ИП} = \frac{U_H}{E_H}. \quad (7)$$

Значение коэффициента связи цепей источника и приемника ЭМП можно получить также, используя формулы (1-4). Значения коэффициента взаимной индуктивности M и монтажной емкости C_M определяются по справочным данным.

Рассмотренная методика может быть использована для всех типов статических преобразователей, применяемых в системах электроснабжения (выпрямителей, инверторов и преобразователей частоты).

При проектировании СПЭ иногда достаточным результатом борьбы с ЭМП является оптимальное расположение функциональных элементов и проводников от источника помех – полупроводниковых приборов.

Большое многообразие вредных связей, трудности их воссоздания в известных технических решениях СПЭ и разные режимы их функционирования не позволяют достаточно точно произвести расчет уровня ЭМП.

Рассмотрим основные способы снижения уровня ЭМП [1, 3, 9], создаваемые полупроводниковыми приборами:

1. Синхронизация работы системы управления полупроводниковыми приборами – коммутация переменных токов – должна осуществляться в момент их минимальных или нулевых значений (при переходе синусоиды через нуль).

2. Применение на входе и выходе статических преобразователей электроэнергии фильтров, способных ослабить помехи на определенных частотах, позволяя «чистым» сигналам проходить далее. Фильтры низких частот изолируют высокочастотные шумы, а фильтры высоких частот уменьшают влияние низкочастотных помех.

3. Встречно-параллельное включение обратных диодов с силовыми полупроводниковыми приборами для снижения уровня перенапряжений, возникающих при их коммутации.

4. Изменение ориентации и разнесение монтажных соединений силовых цепей и цепей управления, исключение пересечения силовых цепей и цепей управления, а также разнесение цепей переменного и постоянного тока.

5. Экранирование – использование проводящих и магнитных материалов, отражающих или

поглощающих электромагнитные волны. Проволочные экраны из медной или алюминиевой проволоки размыкают пути магнитного поля, уменьшая его влияние на электрооборудование. Магнитные экраны поглощают магнитное поле, изолируя устройство от внешних помех.

6. Заземление – защита от статических и индукционных помех.

7. Изоляция компонентов – разделение источников СПЭ и цепей управления ими с целью исключения их взаимовлияния.

Полупроводниковые диоды в неуправляемых схемах выпрямителей создают ЭМП за счет накопления тока в реактивных элементах и практически скачкообразного его уменьшения через диод при его закрытии. Одним из способов снижения мощности высокочастотных колебаний в неуправляемых схемах выпрямителей является уменьшение резонансной частоты и добротности вредного колебательного контура, который получается путем параллельного подключения к диодам последовательной шунтирующей $R_{ш}C_{ш}$ -цепочки. Параметры этого контура определяются по формулам:

$$i(t) \approx I_m e^{-\frac{t}{\tau_3}} \sin \omega t, \quad (8)$$

$$\omega = \sqrt{L_{ш}C_{ш}}, \quad (9)$$

где τ_3 – постоянная времени затухания; $L_{ш}$ и $C_{ш}$ – эквивалентные индуктивность и емкость вредного колебательного контура.

Оптимальная емкость шунтирующего конденсатора –

$$C_{ш} \geq \frac{0,16t_{сп}}{R_{ш}}, \quad (10)$$

где $t_{сп}$ – время спада тока во вредном контуре до нуля; $R_{ш}$ – эквивалентное последовательное сопротивление в цепи вредного колебательного контура.

Как правило, в схемах выпрямителей $R_{ш} = 10 \dots 100$ Ом, а $C_{ш}$ имеет значение тысячи пикофарад.

Применение рассмотренного способа позволяет в несколько десятков раз снизить уровень ЭМП, возникающих на входных и выходных выводах при работе выпрямителей.

Таким образом, для эффективного снижения уровня ЭМП необходимо учитывать особенности работы СПЭ, исследовать источники помех и выбрать соответствующий способ их снижения.

Определение спектрального состава напряжения и тока на входе и выходе СПЭ позволит отрабатывать вопросы электромагнитной совместимости

функциональных элементов преобразователя на этапе его проектирования и работы в составе системы электроснабжения. С учетом электрических параметров и режимов работы СПЭ можно выбрать рациональный способ снижения уровня ЭМП, в том числе разработать энергоэффективные фильтры, и заложить запасы мощности источников и СПЭ.

Наиболее эффективным способом снижения уровня ЭМП, создаваемого статическими преобразователями электроэнергии, является уменьшение количества основных источников помех – силовых полупроводниковых приборов.

Известным способом уменьшения количества силовых полупроводниковых приборов в составе СПЭ является применение трансформаторов с обмотками, имеющими средние точки. Один из вариантов таких схем приведен на рисунке 2. В данном случае электронный силовой преобразователь ЭСП содержит только два транзистора, преобразующих напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока (режим инвертора). СПЭ на трансформаторах со средней точкой имеют повышенные массогабаритные показатели.

Функциональная схема автономного инвертора с промежуточным высокочастотным преобразованием позволяет в несколько раз улучшить массогабаритные показатели СПЭ (рис. 3). Инвертор I посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) преобразует напряжение источника постоянного тока U_{bx} в высокочастотное напряжение (частота преобразования может достигать несколько десятков кГц), а реверсивный выпрямитель РВ посредством кусочной аппроксимации преобразует его до уровня промышленной частоты [1].

Уровень ЭМП можно понизить применением в составе СПЭ однофазно-трехфазных трансформаторов

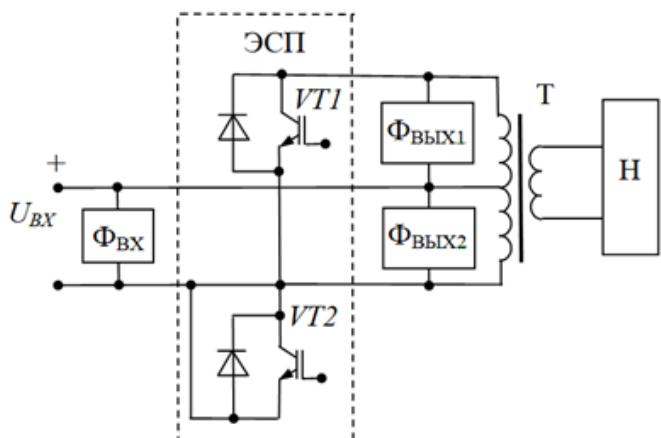


Рис. 2. Функциональная схема автономного инвертора

Fig. 2. Functional diagram of an autonomous inverter

с вращающимся магнитным полем (ТВМП), выполненных на базе электрических машин или тороидальных трансформаторов (рис. 4).

Конструкция трансформатора (ТВМП) позволяет формировать трехфазную симметричную систему напряжений из однофазного напряжения переменного тока, для преобразования напряжения постоянного

тока применяется однофазный инвертор. Рассмотренный СПЭ имеет меньшее количество силовых полупроводниковых приборов и, соответственно, уменьшенный уровень ЭМП.

Гипотеза подтверждена: принимая во внимание особенности работы СПЭ, источники ЭМП и способы их снижения, можно понизить уровень помех.

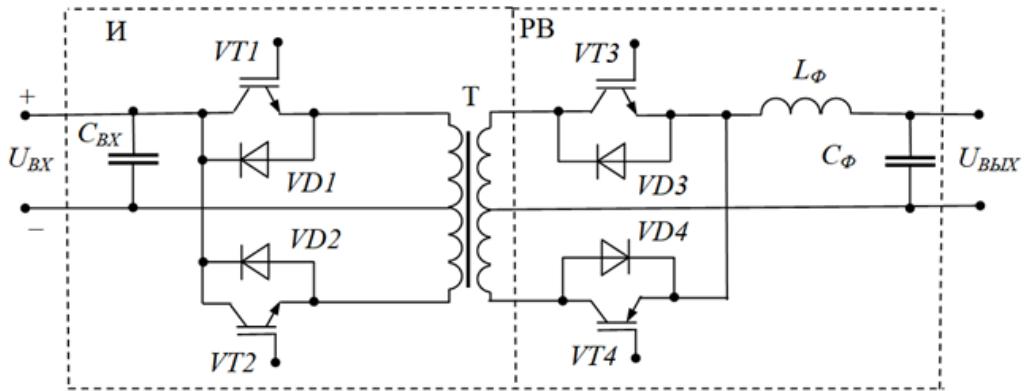


Рис. 3. Функциональная схема автономного инвертора с промежуточным высокочастотным преобразованием

Fig. 3. Functional diagram of an autonomous inverter with intermediate high-frequency conversion

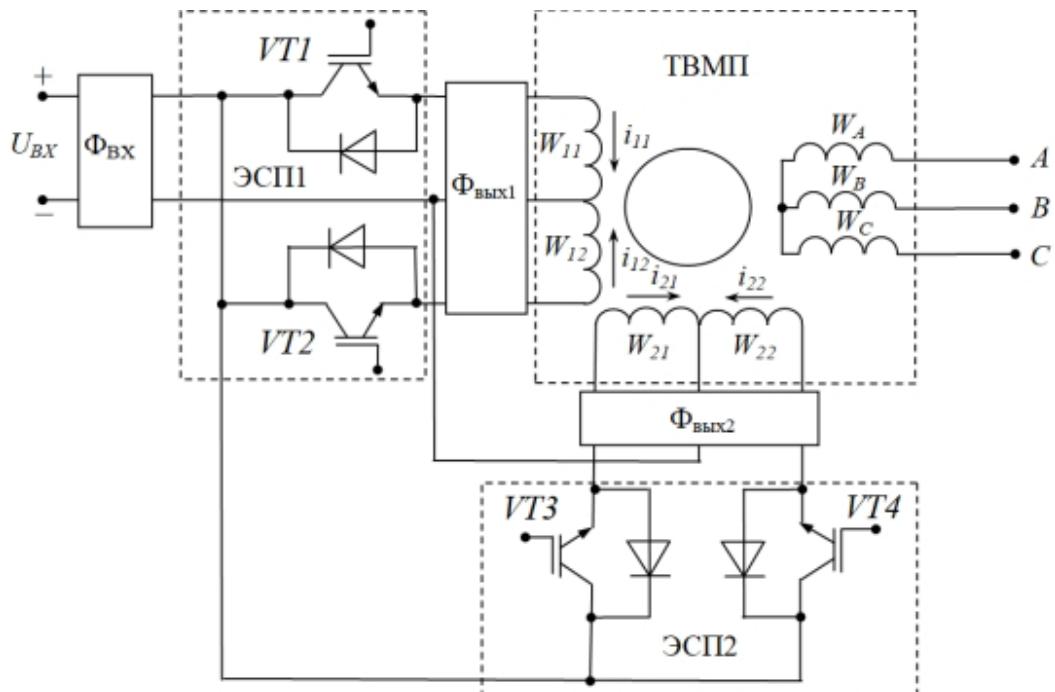


Рис. 4. Функциональная схема трехфазного инвертора на однофазно-трехфазном трансформаторе с вращающимся магнитным полем

Fig. 4. Functional diagram of a three-phase inverter on a single-phase/three-phase transformer with a rotating magnetic field

Выводы

Представленная классификация причин возникновения ЭМП, разработанная методика упрощенного расчета уровня напряжения помех и структурно-схемные решения СПЭ, учитывающие

параметры источников и потребителей электроэнергии сельскохозяйственных предприятий, позволяют повысить эффективность предпроектных работ по разработке СПЭ с пониженным уровнем помех.

Список источников

- Григораш О.В., Оськин С.В., Денисенко Е.А. и др. Мобильные ветро-солнечные электростанции: состояние, перспективы и особенности проектирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 48-55. <https://doi.org/10.14529/power230105>
- Yuan L., Zhang J., Liang Z. et al. EMI challenges in modern power electronic-based converters: recent advances and mitigation techniques. *Frontiers in Electronics*. 2023;4:1274258. <https://doi.org/10.3389/felec.2023.1274258>
- Гизатуллин З.М., Мубараков Р.Р. Анализ излучаемых электромагнитных помех от преобразователей электроэнергии в условиях эксплуатации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14, № 2 (54). С. 29-39. EDN: QOAGMA
- Кечиев Л.Н., Любомудров А.А., Сахаров М.В. и др. Проблемы конструирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости // Технологии электромагнитной совместимости. 2020. № 1. С. 18-30. EDN: PPCCZJ
- Робертс С., Рентюк В. Взгляд на обеспечение требований по ЭМС со стороны блоков питания // Силовая электроника. 2019. № 4 (79). С. 50-53. EDN: BKWHNF
- Нормов Д.А., Белов С.И., Цедяков А.А. Интеграция Rural smart grids в централизованную электрическую сеть в России // Интеллектуальные системы в аграрном и строительном комплексе: Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Орел, 3-4 декабря 2024 г. Орел: Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, 2024. С. 376-384. EDN: SSDVBO
- Ali Abou-Elnour. Modeling and characterization of a smart two-direction MOSFET magnetic sensor. Proceedings. SPIE6166, Smart Structures and Materials 2006: Modeling, Signal Processing, and Control. 2006:61660I (27 March 2006). <https://doi.org/10.1117/12.639154>
- Григораш О.В., Коломейцев А.Э., Джебо С. Электромагнитная совместимость функциональных элементов автономных систем электроснабжения // Сельский механизатор. 2021. № 1. С. 32-33. EDN: YLWESP
- Жданкин В. Подавление электромагнитных помех во входных цепях преобразователей постоянного напряжения // Компоненты и технологии. 2016. № 11. С. 86-98. EDN: ZRTEZT

Информация об авторах

- ¹Григораш Олег Владимирович, д-р техн. наук, профессор; grigorash61@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>; SPIN-код: 4729-2767
- ²Нормов Дмитрий Александрович, д-р техн. наук, профессор; d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>; SPIN-код: 5209-0453
- ³Савенко Алексей Валентинович, канд. техн. наук, доцент; a.savenko@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>; SPIN-код: 6169-5845
- ⁴Денисенко Евгений Александрович, канд. техн. наук; denisenko_88@mail.ru; SPIN-код: 4263-0056
- ⁵Болотин Владимир Леонидович, соискаатель; bvlener@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>

References

- Grigorash O.V., Oskin S.V., Denisenko E.A. et al. Mobile wind and solar power plants: state, prospects, and design features. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2023;23:1:48-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/power230105>
- Yuan L., Zhang J., Liang Z. et al. EMI challenges in modern power electronic-based converters: recent advances and mitigation techniques. *Frontiers in Electronics*. 2023;4:1274258. <https://doi.org/10.3389/felec.2023.1274258>
- Gizatullin Z.M., Mubarakov R.R. Analysis of radiated electromagnetic interference from electric power converters in the workplace. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2022;14(2):29-39. (In Russ.)
- Kechiev L.N., Lyubomudrov A.A., Sakharov M.V. et al. Problems of designing electronic equipment taking into account electromagnetic compatibility. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti*. 2020;1:18-30. (In Russ.)
- Roberts S., Rentuk V. Meeting EMC requirements: power supplies' perspective. *Silovaya elektronika*. 2019;4:50-53. (In Russ.)
- Normov D.A., Belov S.I., Tsedyakov A.A. Integration of Rural smart grids into a centralized electric grid in Russia. *Intellektualnye sistemy v agrarnom i stroitelnom komplekse*: Proceedings the International scientific and practical conference, Orel, December 3-4, 2024. Orel: Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, 2024:376-384.
- Ali Abu-Elnour Modeling and characterization of an intelligent bidirectional magnetic sensor based on a MOS transistor. Proceedings. Intelligent Structures and Materials 2006. *Modeling, Signal Processing, and Control*. 2006:6166. <https://doi.org/10.1117/12.639154>
- Grigorash O.V., Kolomejcev A.E., Djibo S. Electromagnetic capacity of functional elements of autonomous power supply systems. *Selskiy mekanizator*. 2021;1:32-33. (In Russ.)
- Zhdankin V. Suppression of electromagnetic interference in the input circuits of DC voltage converters. *Komponenty i tekhnologii*. 2016;11:86-98. (In Russ.)

Author Information

- Oleg V. Grigorash¹**, DSc (Eng), Professor; grigorash61@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-3894-3616>; Scopus Author ID: 6602105386
- Dmitry A. Normov²**, DSc (Eng), Professor; d.normov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3255-4334>; Scopus Author ID: 57209472770
- Alexey V. Savenko³**, CSc (Eng), Associate Professor; mfsav@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0004-6380-453X>
- Evgeny A. Denisenko⁴**, CSc (Eng); denisenko_88@mail.ru
- Vladimir L. Bolotin⁵**, CSc degree seeker; bvlener@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-0499-8949>
- ^{1,4}Kuban State Agrarian University named after I.T. Trublin; Kalinina Str. 13, Krasnodar, 350044, Russian Federation

- ^{1,4} Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина; 350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13
- ^{2,3,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Григораш О.В. – разработка методики расчета помех и структурно-схемных решений статических преобразователей электротехники, редактирование рукописи;

Нормов Д.А. – концептуализация информации о способах борьбы с электромагнитными помехами, разработка методологии исследований, окончательное редактирование рукописи;

Савенко А.В. – анализ достоинств и недостатков способов уменьшения уровня электромагнитных помех, создаваемых статическими преобразователями;

Денисенко Е.А. – анализ причин возникновения электромагнитных помех и способов их уменьшения, создаваемых сетевыми и автономными инверторами;

Болотин В.Л. – анализ эквивалентных схем путей распространения электромагнитных помех.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за пLAGIAT.

Статья поступила 26.06.2025, после рецензирования и доработки 10.11.2025; принятa к публикации 17.11.2025

- ^{2,3,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contributions

O.V. Grigorash – methodology, writing – review and editing of the manuscript;

D.A. Normov – conceptualization, methodology; writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Savenko – formal analysis, validation;

E.A. Denisenko – formal analysis, data curation;

V.L. Bolotin – investigation, formal analysis.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 26.06.2025; Revised 10.11.2025; Accepted 17.11.2025