

УДК 621.311.6

Методика проектирования помехозащищенных шин электропитания

Николаев И. И., Комнатнов М. Е.

Постановка задачи: электропитание потребителей высокой мощности в авиакосмической технике и радиотехнических системах чаще всего осуществляется с применением силовых шин электропитания (ШЭП). Существующие конструкции ШЭП изготавливаются преимущественно с прямоугольным поперечным сечением, а уменьшение погонной индуктивности и массы конструкции первоочередно и возможно за счёт изменения геометрической формы, размеров и материалов проводников и изоляторов. При этом, в научных источниках не уделено достаточного внимания разработке методик проектирования подобных конструкций, позволяющих на основе известных поперечных сечений выбрать оптимальное решение для требуемой ШЭП, учитывающее материалы проводников и диэлектриков, а также крепление проводных отводов к ней. **Цель работы:** разработать методику проектирования помехозащищенных ШЭП, с возможностью учёта электрофизических параметров проводников и диэлектриков, а также крепления проводных отводов к ней и её созданием. **Используемый метод:** квазистатический анализ методом моментов. **Новизна:** научная новизна заключается в разработке методики проектирования помехозащищенных ШЭП, отличающаяся выбором оптимального поперечного сечения на основе известных поперечных сечений линий передачи, а также учётом проводных отводов в конструкции ШЭП. **Результат:** разработаны методика проектирования помехозащищенных ШЭП и алгоритм оптимизации её геометрических и электрофизических параметров. Методика совместно с алгоритмом позволяют минимизировать волновое сопротивление, индуктивность и массу конструкции, а также увеличить ёмкость, что обеспечивает целостность питания. На основе методики разработан способ изготовления ШЭП, который позволил создать однофазную помехозащищённую ШЭП с гибкими проводными отводами. **Практическая значимость:** на основе предложенной методики разработан и запатентован способ изготовления многофазной помехозащищённой ШЭП с возможностью получения малой массы и повышенной электрической прочности, а также устойчивости к излучаемым электромагнитным воздействиям и электростатическому разряду. Способ позволил изготовить и запатентовать ШЭП с низкими паразитными параметрами. Проведены электрические испытания лабораторного макета ШЭП в организации, занимающейся созданием космических аппаратов (КА), показавшие её применимость для бортовой кабельной сети КА.

Ключевые слова: силовая шина электропитания, погонные параметры, электромагнитная совместимость.

Актуальность

Электропитание потребителей высокой мощности в авиакосмической технике и радиотехнических системах зачастую осуществляется с применением шин электропитания (ШЭП) [1]. По сравнению с кабельными системами они имеют более низкие импеданс и массу, а также высокую надёжность [2]. При их

Библиографическая ссылка на статью:

Николаев И. И., Комнатнов М. Е. Методика проектирования помехозащищенных шин электропитания // Системы управления, связи и безопасности. 2025. № 4. С. 68-90. DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-068-090

Reference for citation:

Nikolayev I. I., Komnatnov M. E. Methodology for designing EMI-protective power bus bars. *Systems of Control, Communication and Security*, 2025, no. 4, pp. 68-90 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2025-4-068-090

проектировании особое внимание уделяется устойчивости к электростатическому разряду [3] и преднамеренным электромагнитным воздействиям [4, 5], массе конструкции (m_k), погонной индуктивности (L) и рассеянию тепла по поверхности, которые зависят от конфигурации и геометрических размеров поперечного сечения ШЭП [6–8]. Высокое значение L может существенно влиять на функционирование потребителя электроэнергии: возникновением перенапряжений, падений напряжения, дисбалансов токов, резонансов в конденсаторах и пр. [9, 10]. Также стоит учитывать скругления кромок и добавление апертур в конструкции ШЭП для крепления проводных отводов, которые существенно влияют на её погонные параметры [11].

Классической конструкцией ШЭП является несимметричная линия передачи (ЛП), имеющая прямоугольное поперечное сечение проводников и простая в изготовлении [12]. В [13] она сравнивается с симметричной ЛП без диэлектрика по краям и с ним, а также с коаксиальной ЛП. Показано, что минимизация L возможна за счёт роста отношения ширины проводников ШЭП к их толщине. Кроме того, уменьшение L возможно за счёт использования слоёных структур проводников ШЭП [14]. Другим способом уменьшения L является использование коаксиальных конструкций ШЭП [15, 16], особенностями которых являются отсутствие магнитного поля в окружении ШЭП, низкие значения элементов матрицы L , а также более эффективное рассеяние тепла.

Уменьшение m_k ШЭП возможно за счёт использования U- или Е-образных форм поперечного сечения [17], а также гибридных ШЭП, состоящих из алюминия и меди [18]. Применение D-образной формы поперечного сечения ШЭП позволяет не только уменьшить m_k конструкции, но и увеличить рассеяние тепла на её поверхности [19].

Таким образом, существующие конструкции ШЭП изготавливаются преимущественно с прямоугольным поперечным сечением, а уменьшение L и m_k первоочередно и возможно за счёт изменения геометрической формы, размеров и материалов проводников и изоляторов. При этом, в научных источниках не уделено достаточного внимания разработке методик проектирования подобных конструкций, позволяющих на основе известных поперечных сечений выбрать оптимальное решение для требуемой ШЭП, учитывающее материалы проводников и диэлектриков, а также крепление проводных отводов к ней. Цель работы – разработать методику проектирования помехозащищённых ШЭП, с возможностью учёта электрофизических параметров проводников и диэлектриков, а также крепления проводных отводов к ней и её созданием.

Постановка задачи

Разработанный в АО «Решетнёв» лабораторный макет ШЭП для бортовой кабельной сети (БКС) космического аппарата (КА) (рис. 1а), с максимальным потребляемым током $I_{\max} = 200$ А каждой пластины и площадью их поперечных сечений $S_m = 50 \text{ мм}^2$, предназначен для обеспечения электроэнергией бортовых систем с суммарной потребляемой мощностью до 20 кВт. Геометрическая модель поперечного сечения такой ШЭП (рис. 1б) представлена в виде двух параллельных металлических пластин 1 шириной $w = 10$ мм и толщиной

$t_1 = 5$ мм, между которыми расположен многослойный диэлектрик, обеспечивающий повышенную электрическую прочность ШЭП: слой стеклотекстолита 2 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4,3$ и толщиной $t_d = 2$ мм, а также дополнительные слои, сформированные оксидированием алюминиевого проводника 3 ($\epsilon_r = 20$, $t_2 = 50$ мкм), нанесением лакового покрытия ЭП 730 4 ($\epsilon_r = 4$, $t_3 = 18-20$ мкм) и намоткой изоляционной пленки 5 ($\epsilon_r = 2,3$, $t_4 = 200$ мкм).

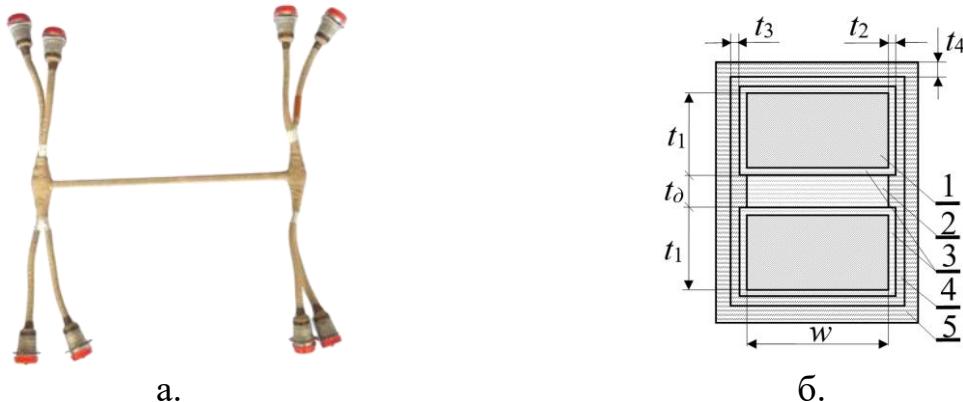


Рис. 1. ШЭП КА (а) и геометрическая модель её поперечного сечения (б)

В программном обеспечении (ПО) TUSUR.EMC (основано на TALGAT [20]), по модели из рис. 1б вычислены её погонные индуктивность и ёмкость (L и C), а также волновое сопротивление (Z_∞): 177,3 нГн/м, 217,5 пФ/м и 28,6 Ом. Проанализировано влияние диэлектрических слоёв ШЭП на Z_∞ , при их поочерёдном исключении. Получено, что пленка 5, лак 4 и оксидирование 3 несущественно ($\pm 0,4$ Ом) влияют на Z_∞ , а материалы проводников и основного изолятора (стеклотекстолит 2) больше влияют на погонные параметры ШЭП.

Для анализа влияния размеров, вычислены L и C (рис. 2а), а также Z_∞ (рис. 2б) при изменении w/t_1 от 2 до 200 при $t_d = 2$ мм и $\epsilon_r = 1$ с сохранением $S_m = 50$ мм² и одинаковой плотности (ρ_m) металла (алюминий) (рис. 2). При этом t_1 изменялась от 5 до 0,5 мм с шагом 0,5 мм, а $w = S_m/t_1$.

Из рис. 2 видно, что рост w/t_1 от 2 до 200 уменьшает L от 177,3 до 23,3 нГн/м, Z_∞ от 28,6 до 3,5 Ом и увеличивает C от 217,5 до 1937,6 пФ/м. В результате, рост w с одновременным уменьшением t_1 значительно уменьшает L , что является положительным эффектом для проектирования ШЭП. Однако это также вызывает увеличение общей площади поперечного сечения ($w(2t_1+t_2)$) на 250% (с 120 до 300 мм²), что увеличивает m_k ШЭП. При этом, в связи с тем, что $S_m = 50$ мм², основной вклад в m_k вносит рост ширины слоя изолятора (2) (в 10 раз), что приводит к росту m_k на 203% из-за роста площади поперечного сечения изолятора с 20 до 200 мм². Следовательно, рост C , а соответственно уменьшение Z_∞ , с сохранением S_m , возможен за счёт роста w/t_1 .

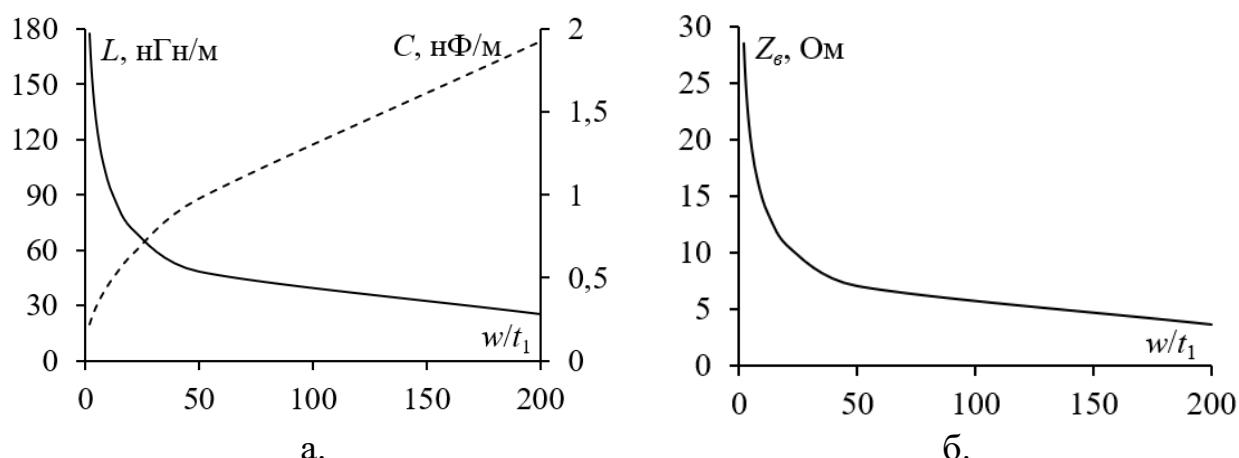


Рис. 2. Зависимости L (—) и C (--) (а), а также Z_e (б), от w/t_1 для модели ШЭП КА

Известно, что увеличение C возможно за счёт использования изолятора с высокой ϵ_r , который может существенно влиять на m_k и надёжность ШЭП за счёт электрической прочности. Так, для тонких материалов с высокой ϵ_r выше C и электрическая прочность, но подобные материалы (керамика, полиамид, стекло) имеют высокую плотность. Повысить электрическую прочность изолятора можно за счёт применения неоднородного изолятора, например, состоящего из слоёв с разной ϵ_r , что также увеличит C . При этом для разных форм поперечного сечения будет изменяться площадь диэлектрика (S_d), что повлияет на m_k .

В результате, для оптимального поперечного сечения ШЭП необходим компромисс между массогабаритными и электрофизическими параметрами конструкции ШЭП для уменьшения m_k , L и Z_e и увеличения C . Для этого необходимо создать методику проектирования ШЭП, позволяющую минимизировать Z_e и m_k , значения которых определяются геометрическими и электрофизическими параметрами её проводников и изоляторов, влияющими на ослабление кондуктивных помех в ШЭП с учётом крепления проводных отводов к ней.

1. Методика проектирования ШЭП

Разработана методика проектирования ШЭП с учётом крепления к ней проводных отводов (рис. 3). Исходными данными для методики являются ток потребителя (нагрузки ШЭП) (I_h), номинальное прикладываемое напряжение (U_{nom}) к ШЭП, её длина (L_g), падение напряжения на ней (U_{nad}), а также требования к напряжению пробоя (U_{np}), погонная индуктивность в дифференциальном ($L_{диф}$) и синфазном ($L_{синф}$) режимах и область применения (наземное, воздушное, космическое).

Этапы методики:

1. Задаются I_h и U_{nom} , на основе которых вычисляются площади (S_m) поперечных сечений каждого полюса токопроводящей шины, указанной длины L_g .
2. Выполняется корректировка S_m для требуемого U_{nad} , с учётом заданных m_k и удельного сопротивления металла ρ_m .
3. Учитывается изолятор для требуемого U_{np} – указываются число (n) слоёв и ϵ_r каждого слоя диэлектрика и вычисляются их толщины (t_d).

4. Нормируется ширина w относительно возможных толщин металла (t_m) и указывается диапазон изменения w/t_m для выбора оптимальной формы поперечного сечения в виде ЛП (несимметричная, симметричная, коаксиальная, экранированная).



Рис. 3. Методика проектирования ШЭП с проводными отводами

5. Создаются геометрические модели различных форм поперечных сечений при изменении w/t_m с постоянными значениями t_d и ϵ_r .

6. Вычисляются зависимости L , C и Z_e , соответствующие дифференциальному режиму для различных форм поперечного сечения ШЭП, при изменении w/t_m .

7. Исключаются геометрические формы, не соответствующие $L_{\text{диф}}$.

8. По известной S_m создаются модели проводных отводов с учётом указанной площади каждого провода и вычисляется их необходимое число.

9. Вычисляются L , C и Z_e проводных отводов.

10. Создаются трёхмерные модели отрезков ШЭП для учёта неоднородностей в виде вырезов вдоль конструкции, возникающих при её изготовлении в местах крепления проводных отводов ШЭП, что позволяет учесть на стыках переходные сопротивления, возникающие, например, в результате пайки медного провода к алюминиевой шине.

11. Учитываются частотные зависимости ϵ_r и $\text{tg}(\delta)$ каждого слоя диэлектрика и неоднородности изолятора в местах крепления проводных отводов ШЭП.

12. Создаётся трёхмерная модель ШЭП длиной L_g .

13. Оптимизируется w/t_m по алгоритму на рис. 4 при изменении t_d и ϵ_r по критерию минимизации Z_e , L и t_k .

14. Вычисляется $L_{\text{синф}}$ и сравнивается с требуемой. Для этого на основе n , ϵ_r и $\text{tg}\delta$ вычисляется U_{np} между проводником обратных токов (полюс отрицательной полярности) и корпусной «землёй», которой является металлизирован-

ная лента, покрывающая ШЭП в целом для защиты от токов ЭСР, что повышает её помехозащищённость. Для металлизированной ленты задаются её толщина и число слоёв.

15. В случае несоответствия требованиям по U_{np} , корректируется t_δ с учётом частотных зависимостей ϵ_r и $\operatorname{tg}\delta$ изолятора. Оптимизируется трёхмерная модель с использованием электродинамического анализа. Критерием является уменьшение L , Z_e и m_k при изменении w и t_δ с учётом частотных зависимостей ϵ_r и $\operatorname{tg}\delta$.

16. Вычисляются S -параметры ШЭП для $Z_e = 50 \Omega$, на основе которых устанавливаются полосы пропускания и заграждения, частота среза (f_{cp}) и крутизна. При необходимости дополнительной помехозащиты устанавливается электрический фильтр на компонентах с сосредоточенными параметрами и с требуемыми характеристиками.

17. Создаётся трёхмерная модель ШЭП заданной длины L_g , которая в соответствии с методикой используется в модуле МОМ3Д ПО TUSUR.EMC или электродинамическом анализе. Используя МОМ3Д, согласно методике, выполняется анализ неоднородности изолятора из разных слоёв, а электродинамический анализ может быть использован при комплексной оптимизации для минимизации L , Z_e и m_k , а также вычислении S -параметров или анализе помехозащищённости ШЭП.

Для выбора оптимальной формы поперечного сечения по требуемым значениям геометрических параметров в составе методики используется алгоритм из рис. 4, который заключается в следующем.

Шаг 1. Задаётся I_h и вычисляется площадь поперечного сечения S_m для каждой токопроводящей шины. Корректируется S_m для требуемого U_{nad} , с учётом заданного ρ_m . Также на основе заданных U_{nom} и ϵ_r вычисляются минимальная t_δ и U_{np} исходя из требований по напряжению пробоя изолятора.

Шаг 2. Нормируется w относительно возможных t_m и выбираются формы поперечного сечения (несимметричная, симметричная, экранированная) при изменении w/t_m для прямоугольного или d/t_m для коаксиального. Создаются геометрические модели различных форм поперечного сечения, при изменении w/t_m (d/t_m) с постоянными значениями t_δ и ϵ_r . Вычисляются, например, в модуле МОМ2Д системы TUSUR.EMC и отображаются зависимости L , C и Z_e от w/t_m (d/t_m) в дифференциальном режиме для различных форм поперечного сечения.

Шаг 3. Устанавливаются поперечные сечения, удовлетворяющие требуемой L_{dif} .

Шаг 4. Вводятся число слоёв изолятора n и диапазон изменения их ϵ_r , а также требуемая m_k . Вычисляется t_δ для каждого n и m_k конструкции ШЭП в целом.

Шаг 5. Оптимизируются геометрические параметры для достижения минимума L , Z_e и m_k при изменении w/t_m (d/t_m), t_δ и ϵ_r . Вводится длина L_g ШЭП и выполняется конечный расчёт L , Z_e и m_k .

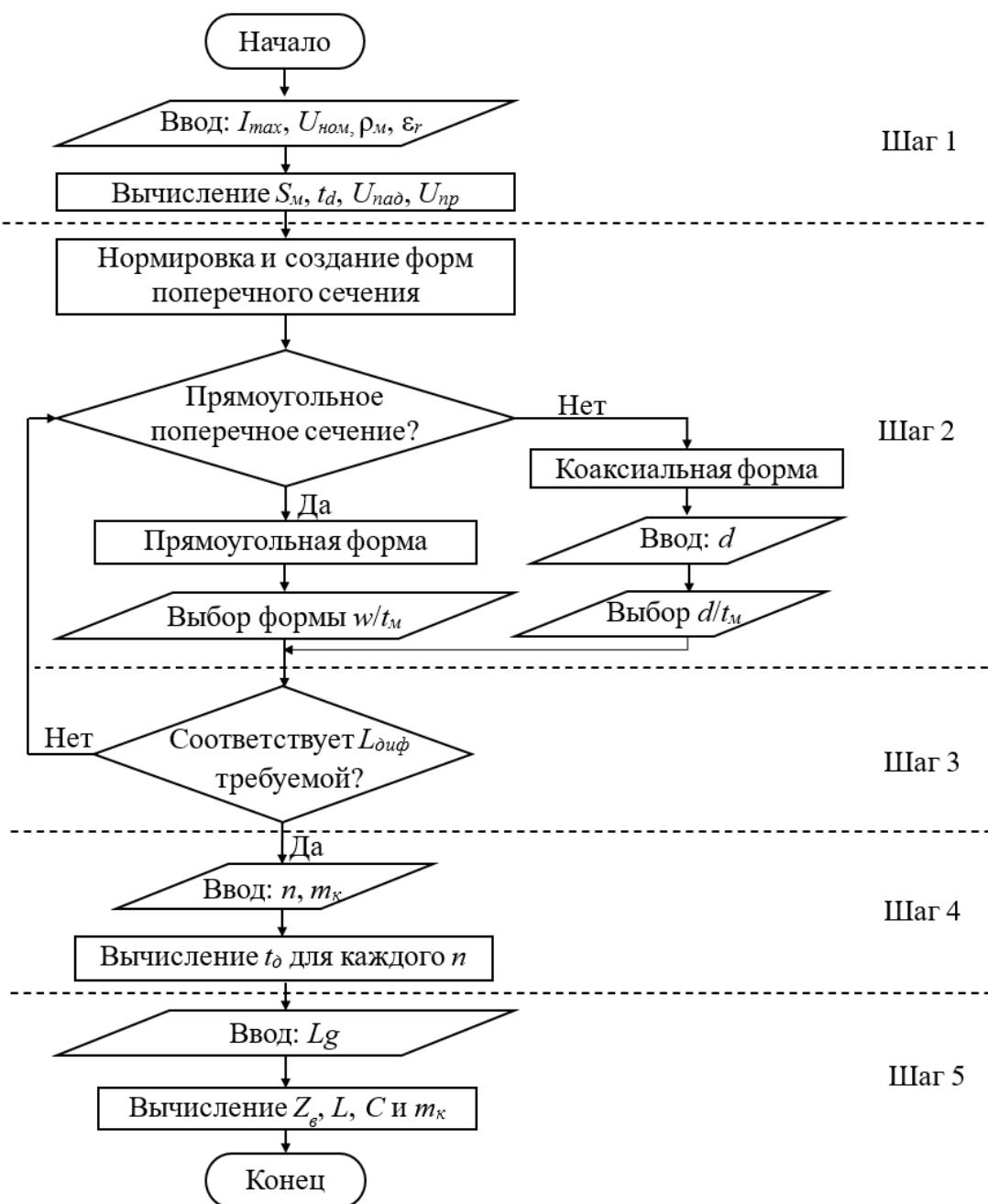


Рис. 4. Алгоритм выбора оптимальной формы поперечного сечения

Алгоритм (рис. 4) также применяется и при создании моделей проводных отводов и вычислении их L и C . Для этого на этапе создания поперечных сечений выбирается коаксиальная форма поперечного сечения, а d устанавливается в соответствии с диаметром выбранного провода. Создаётся модель проводного отвода в виде группы токопроводящих жил в жгуте из известных S_m и d . Каждой токопроводящей жиле присваивается прямое или обратное протекание тока. Если все жилы одной полярности, вычисляются L и C в синфазном режиме, относительно корпуса или экрана, например металлизированной ленты. Если жилы имеют разные полярности, и они расположены в экране, то вычисляются L и C в дифференциальном режиме. L и C для разных режимов вычисляются при помощи квазистатического анализа в MOM2D. Из технических данных вводятся t_d и погонная масса провода и вычисляется m_k на основе L_g жгута.

В результате, разработаны методика проектирования помехозащищённых ШЭП и алгоритм оптимизации её геометрических и электрофизических параметров. Отличиями методики являются выбор оптимального поперечного сечения на основе известных поперечных сечений линий передачи и учёт проводных отводов в конструкции ШЭП. Отличиями алгоритма для выбора оптимальной формы поперечного сечения ШЭП является учёт электрических и электрофизических параметров материалов и его применимость для создания проводных отводов, входящих в состав ШЭП. Методика совместно с алгоритмом позволяют минимизировать Z_ϕ , L и t_κ , и увеличить C , что позволяет снизить амплитуды синфазных и дифференциальных помех протекающих от источника/потребителя к потребителю/источнику.

2. Применение методики проектирования ШЭП

2.1 Исходные данные для проектирования ШЭП

На основе предварительного анализа исходной конструкции ШЭП, являющейся лабораторным макетом для БКС КА, и её документации разработаны основные рекомендации для оптимизации конструкции разрабатываемой ШЭП:

1. Для электропроводящих пластин должен быть выбран лёгкий металл с плотностью $\rho_m \leq 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$, удельной проводимостью $\sigma \geq 37 \cdot 10^6 \text{ См}/\text{м}$, теплопроводностью $Q > 200 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Требуется суммарное падение напряжения ($U_{\text{сум.пад.}}$) не более 0,5 В при номинальном напряжении ($U_{\text{ном}}$) 100 В и токе нагрузки (I_n) не менее 200 А.

2. Требуется L не более 100 нГн/м в дифференциальном режиме и 50 нГн/м – в синфазном.

3. Изоляционный материал должен быть выбран с низкой массой и напряжением пробоя (U_{np}) не менее 450 В для постоянного тока и 600 В – для переменного.

4. ШЭП и отводы должны быть длиной не менее 0,5 м. Отводы в начале и конце каждого полюса должны быть с одинаковыми площадями поперечного сечения.

2.2 Выбор оптимальной формы поперечного сечения

Исходя из исходных данных для проектирования ШЭП создан ряд упрощённых геометрических моделей (рис. 5) на основе несимметричной ЛП, симметричной ЛП без диэлектрика по краям и с ним, коаксиальной ЛП, экранированной ЛП с прямоугольным и круглым центральными проводниками. Модели ШЭП с поперечными сечениями из рис. 5 состоят из двух идеально проводящих пластин 1, разделённых изолятором 2. Геометрическими параметрами являются ширина (w), толщины (t_1, t_2) и длины (L_g) проводников, а также толщина (t_δ) изолятора. Внешний контур геометрических моделей окружён воздухом.

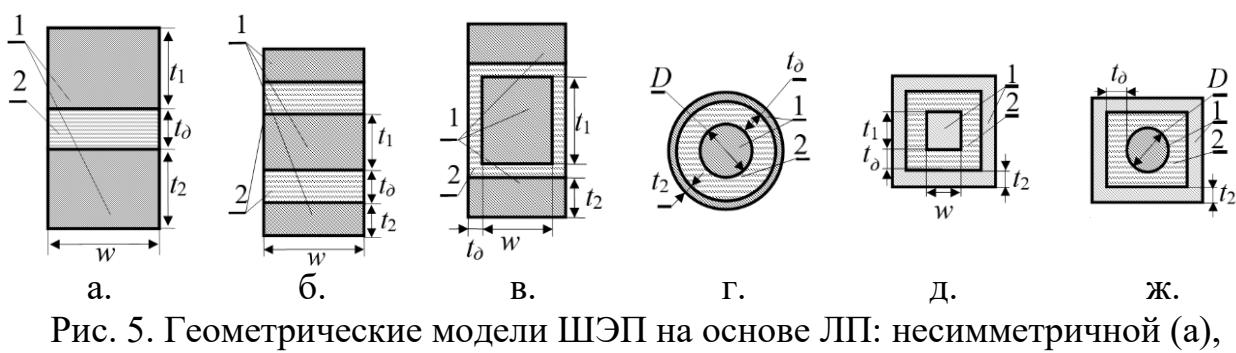


Рис. 5. Геометрические модели ШЭП на основе ЛП: несимметричной (а), симметричной без диэлектрика по краям (б) и с ним (в), коаксиальной (г), экранированных с прямоугольным (д) и круглым (ж) центральным проводником

Анализировалось влияние формы поперечного сечения ЛП на электрические и массогабаритные характеристики ШЭП [21]. Выбрана площадь поперечного сечения (S_m) каждого проводника 50 mm^2 для токов в 200 A , что соответствует исходным данным для проектирования ШЭП. Вычислены L и C при изменениях w/t_1 от 2 до 200, t_δ от 10 до 0,1 мм и ϵ_r от 1 до 10 с сохранением площади поперечного сечения каждого проводника и одинаковой плотностью ρ_n металла (алюминий). При вычислении, потери в металле и диэлектрике не учитывались. Методом численного моделирования в ПО TUSUR.EMC показано, что для поперечного сечения ШЭП наиболее предпочтительны коаксиальная ЛП и экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником. При этом коаксиальная конструкция ШЭП сложна при изготовлении из-за крепления или пайки боковых проводных отводов к центральному проводнику и невозможности его внесения в конструкцию внешнего проводника обратных токов, но может быть рассмотрена в дальнейшем. Таких недостатков лишена экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником.

В результате, для дальнейшего проектирования ШЭП целесообразно применение поперечного сечения в виде экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником. Вычислены L и C (рис. 6) для моделей в виде несимметричной ЛП (рис. 5а) и экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником (рис. 5д) при изменении w/t_1 от 2 до 200.

Из рис. 6 видно, что есть точки пересечения L и C при $w/t_1 = 46$ и 10, которые имеют близкие значения: $L = 46 \text{ нГн/м}$ и $C = 240 \text{ пФ/м}$ для несимметричной ($S_\delta = 100 \text{ mm}^2$) и $L = 45 \text{ нГн/м}$ и $C = 255 \text{ пФ/м}$ для экранированной ($S_\delta = 115 \text{ mm}^2$) ЛП. При этом S_δ для экранированной выше на 15%. Уменьшение w/t_1 в 2 раза для экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником приведёт к уменьшению S_δ до $94,7 \text{ mm}^2$ при несущественном росте L до 57 нГн/м и снижению C до 193 нФ/м , что удовлетворяет условию по максимальной L в дифференциальном режиме. В результате, целесообразно применение экранированной ЛП (рис. 5д) с прямоугольным поперечным сечением при $w/t_1 = 5\text{--}6$, обладающей оптимальными L , C и m_κ .

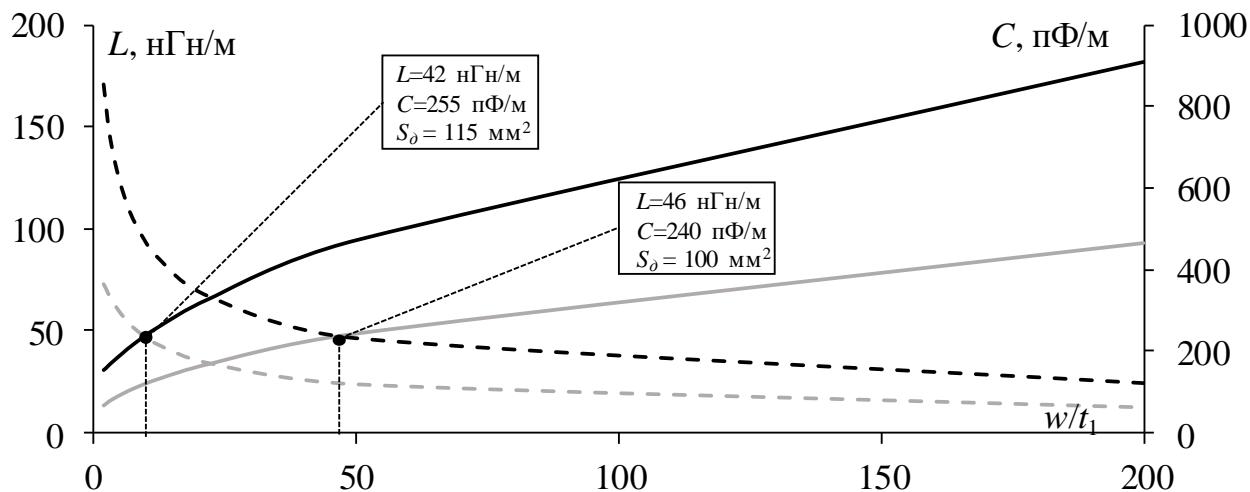


Рис. 6. Зависимости L (—) и C (—) от w/t_1 ШЭП для несимметричной (—) и экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником (—)

Дальнейшее проектирование ШЭП проведено на экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником с $w/t_1 = 5,6$, для которой учтены реальные толщины металла t_1 и выполнены кромки под 45° для повышения стойкости ШЭП к электрическому пробою и повреждению изолятора. Так, с учётом четырёх кромок по 0,5 мм S_m составила 50 мм^2 , а геометрические размеры центрального проводника составили $w = 17$ мм, $t_1 = 3$ мм.

Выполнен анализ C при исключении верхней стенки экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником для возможности крепления к ней проводных отводов. Для этого в модуле МОМ3Д программы TUSUR. EMC созданы модели экранированной ШЭП с прямоугольным центральным проводником при $\epsilon_r = 4$ длиной $L_g = 0,5$ м с верхней стенкой и без неё (рис. 7а, б).

Вычислена C созданных моделей при изменении w/t_1 (рис. 7в). Выявлено что исключение верхней стенки уменьшает C , а при $w/t_1 = 5,6$ C уменьшается на 33% (с 0,39 до 0,26 нФ/м), увеличивая Z_e ШЭП, поэтому использована экранированная ЛП со стенкой сверху.

Модель из рис. 7а применена для анализа влияния на C и L продольных нерегулярностей ШЭП, образованных пайкой к ней проводных отводов, показавшего, что они не приводят к существенному снижению C и повышению L .

Далее вычислены C и L экранированной ШЭП с прямоугольным центральным проводником при $w/t_1 = 5,6$ с разнородным изолятором из стеклотекстолита СТФ 4 ($\epsilon_r = 4$) толщиной $t_1 = 0,5$ мм, выбранной исходя из U_{np} , и полиимида ($t_o = 200$ мкм, $\epsilon_r = 2,3$). Получены $L = 57,4$ нГн/м и $C = 0,67$ нФ/м. В результате, разнородный изолятор повысил надёжность ШЭП и снизил массу (m_k) конструкции за счёт минимальных t_o .

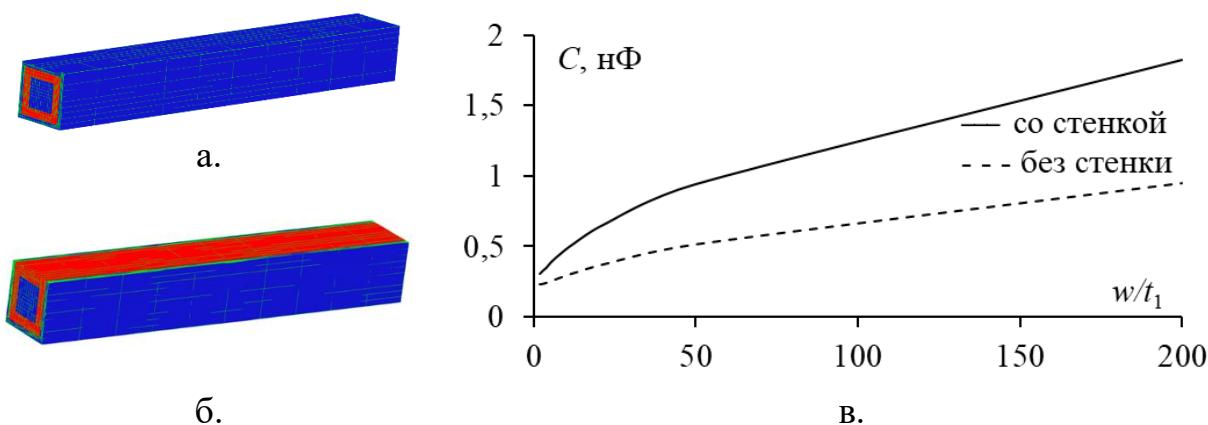


Рис. 7. Модели ШЭП экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником со стенкой сверху (а) и без неё (б) в ПО TUSUR.EMC и зависимости C от w/t_1 (в) для них

Для вычисления C экранированных N -проводных отводов с поперечными сечениями из рис. 8, включающими проводник 1, диэлектрик 2 и экран 3 (опорный проводник), необходимо изначально вычислить матрицу погонных коэффициентов электростатической индукции [22] и из неё вычислить C как

$$C = \sum_{i=1}^N C_{ii} + \sum_{i,j=1}^N C_{ij}, i \neq j. \quad (1)$$

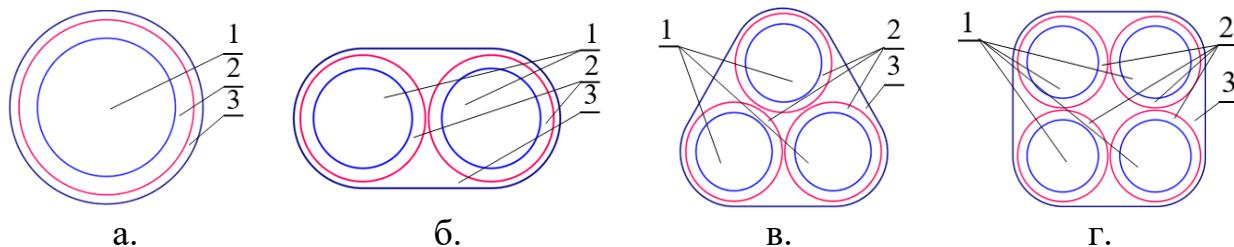


Рис. 8. Поперечные сечения экранированных N -проводных отводов марки «БС 35-1298» при $N = 1$ (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г)

Таблица 1 – Матрицы погонных коэффициентов электростатической индукции (\mathbf{C} , пФ/м) и вычисленных ёмкостей (C , пФ/м) экранированных N -проводных отводов

$N = 1$ (рис. 8а)	$N = 2$ (рис. 8б)	$N = 3$ (рис. 8в)	$N = 4$ (рис. 8г)
268,2	$\begin{matrix} 222,6 & -32,1 \\ -32,1 & 222,6 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 202,7 & -30,3 & -30,3 \\ -30,3 & 202,7 & -30,3 \\ -30,3 & -30,3 & 202,7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 190,7 & -33,6 & -33,6 & -2,1 \\ -33,6 & 190,7 & -2,1 & -33,6 \\ -33,6 & -2,1 & 190,7 & -33,6 \\ -2,1 & -33,6 & -33,6 & 190,7 \end{matrix}$
268,2	381	426,3	485,6

Из таблицы 1 видно, что с ростом N от 1 до 4 C увеличилась с 268,2 до 485,6 пФ/м (1,8 раза). В результате, рост числа проводов в жгуте увеличивает C , что необходимо учитывать при разработке ШЭП. Между тем, рост числа про-

водов в жгуте приведёт к повышению массы отвода (до 4 раз) и конструкции ШЭП в целом. Поэтому, целесообразно использовать меньшее число проводов с минимальной длиной и максимально возможным поперечным сечением.

Дополнительно выполнен анализ помехозащищённости ШЭП с использованием N -норм [23]. Для этого, созданы геометрические модели ШЭП (рис. 9) на основе несимметричной ЛП и экранированной ЛП, содержащие положительную («+»), отрицательную («-») шины и металлизированную ленту (« \perp »), необходимую для протекания токов электростатического разряда на корпусную землю.

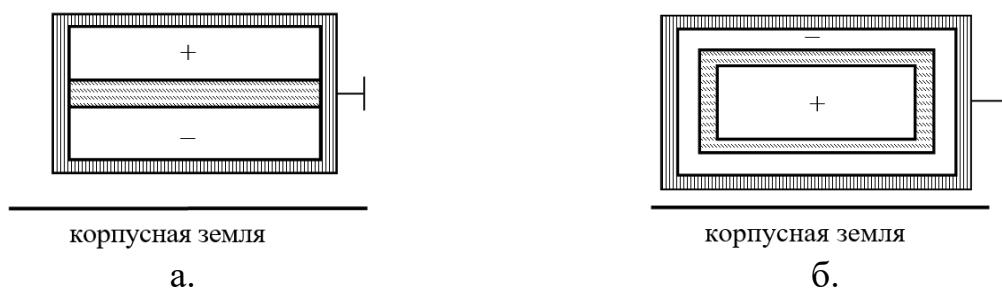


Рис. 9. Геометрические модели ШЭП на основе

несимметричной (а) и экранированной (б) ЛП

для анализа помехозащищённости ШЭП с использованием N -норм

Вычислялись нормы $N1$ (рис. 10) и $N3$, определяющие образование электрической дуги и пробоя изолятора, соответственно. Воздействовал электростатический разряд (ЭСР) на положительную шину («+») или металлизированную ленту (« \perp »), относительно корпусной земли. Значения норм $N1$ и $N3$, вдоль длины (l) конструкции ШЭП протяжённостью $L_g = 0,5$ м определяли опасность.

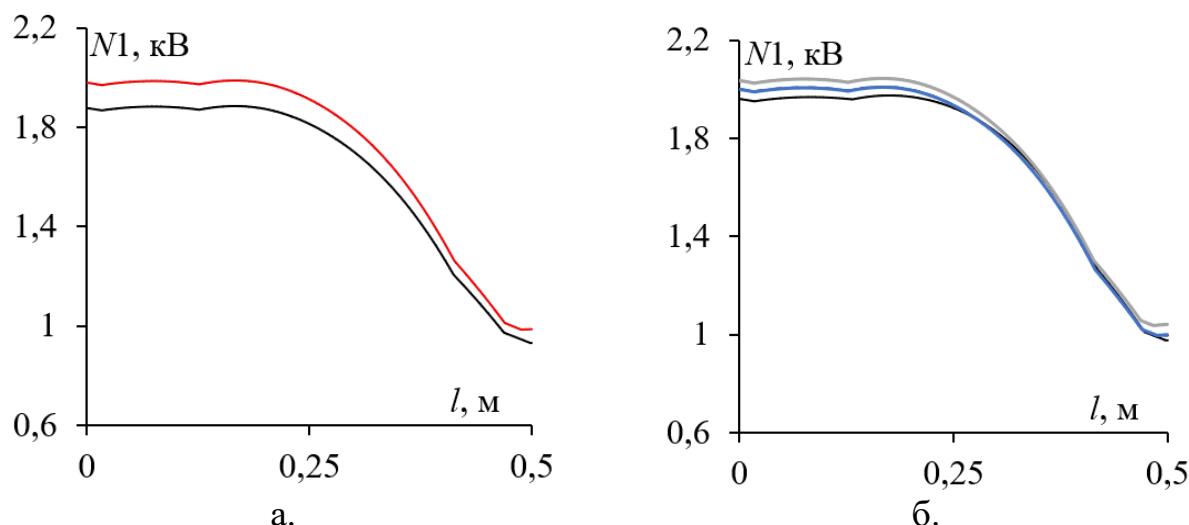


Рис. 10. Зависимости нормы $N1$ от l ШЭП с поперечными сечениями в виде экранированной (—, —) и несимметричной (—, —) ЛП, вычисленные на « \perp » (—, —) и шине «-» (—, —) при воздействии ЭСР на шину «+» (а) и ленту « \perp » (б)

Из рис. 10а видно, что при воздействии ЭСР на шину «+» возможность образования электрической дуги между ней и шиной «-» для экранированной ЛП ниже, чем для несимметричной. При этом для шин «-» экранированной (1885 В) и несимметричной (1985 В) ШЭП, значения в обоих случаях совпадают с полученными для ленты «±». При воздействии ЭСР на ленту «±» у экранированной ЛП наблюдается несущественный рост $N1$ на 75 В (рис. 10б) на шине «+» и 150 В – на «-». Для ШЭП в виде несимметричной ЛП это значение повышается (на 15 В) до 2 кВ. Рост l снижает $N1$ для всех случаев, при расстояниях более $l/2$, что вызвано уменьшением амплитуды ЭСР вдоль ШЭП.

Значения $N3$ неизменны при разных l . Так, при воздействии ЭСР на шину «+» экранированной ШЭП $N3$ на ленте «±» составила 22,3 мкВ/м/Гц, а на шине «-» – 25,7 мкВ/м/Гц, что ниже на 27,3 мкВ/м/Гц и на 6,1 мкВ/м/Гц, соответственно, чем для несимметричной ШЭП. При воздействии ЭСР на ленту «±» экранированной ШЭП $N3$ на шине «-» составила 82,3 мкВ/м/Гц, а «+» – 23,3 мкВ/м/Гц. При этом для несимметричной ШЭП для обеих шин это значение одинаково (50,1 мкВ/м/Гц). В результате, при таких $N3$ пробой изолятора невозможен, и во всех случаях, кроме шины «-» при воздействии на ленту «±», $N3$ для экранированной ШЭП меньше, чем для несимметричной.

Для защиты от сверхкоротких импульсов создан гибридный помехозащитный фильтр на элементах с сосредоточенными параметрами с двухкаскадным модальным фильтром [24]. При эксперименте частоты среза $|S_{21}|$ составили 73,8 МГц в дифференциальном и 93,8 МГц в синфазном режимах.

3. Способ изготовления ШЭП с прямоугольным поперечным сечением

На основе предложенной методики разработан способ изготовления многофазной помехозащищённой ШЭП [25], позволяющий получить малую массу и повышенную электрическую прочность, а также устойчивость к излучаемым воздействиям и ЭСР. Способ позволил изготовить сборную ШЭП с низкими паразитными параметрами и повышенным ослаблением кондуктивных синфазных и дифференциальных помех от источника/потребителя к потребителю/источнику. Это достигается за счёт уменьшения L и увеличения C при размещении разнородных изоляционных материалов вокруг одной или нескольких токопроводящих шин, проводящих прямые токи, внутри замкнутых вместе оснований из П-образных в поперечном сечении токопроводящих шин и крышки, проводящих обратные токи, а также за счёт нанесения внешнего электромагнитного экрана из металлизированной ткани.

Способ заключается в следующем:

1. Изготавливаются основания из электропроводящего материала в виде П-образных в поперечном сечении токопроводящих шин, которые в совокупности являются электрическим проводником обратных токов.

2. Изготавливаются прямоугольные в поперечном сечении токопроводящие шины, каждая из которых является электрическим проводником прямых токов.

3. Изготавливаются углубления в П-образных и прямоугольных в поперечном сечении токопроводящих шинах для механического и/или паяного

крепления гибких электрических проводников, необходимых для электрического подключения к источнику и/или потребителю.

4. Механическим и/или паяным креплением соединяются противоположные концы проводников с лепестками одного и/или группы соединителей для электрического соединения с источником и/или потребителем электрической энергии.

5. По завершению всех электрических соединений токопроводящих шин изготавливается изолятор из группы разнородных диэлектриков:

5.1 Оксидируются токопроводящие шины до появления оксидной плёнки.

5.2 Наносится лак.

5.3 Наносится kleевая плёнка.

6. Токопроводящие шины с прямоугольным поперечным сечением совместно с изоляционным материалом помещаются внутрь токопроводящей шины с П-образным поперечным сечением.

7. Скрепляются электропроводящим kleem в паз группа токопроводящих шин с П-образным поперечным сечением.

8. Воздушные полости между токопроводящими шинами с прямоугольным и П-образным поперечными сечениями заполняются электроизоляционным материалом, используя стеклотекстолит и заливку эпоксидного пенокомпаунда под давлением в барокамере.

9. Сборная ШЭП покрывается изолятором из группы разнородных диэлектриков, для чего её покрывают лаком, а после – kleевой плёнкой.

10. Сборная ШЭП обматывается металлизированной тканью совместно с гибкими электрическими проводниками, образуя на ней единый электропроводящий экран.

11. Экран электрически соединяется с кожухом соединителя и/или общим проводом источника и потребителя.

12. Изготавливается помехозащитный фильтр для ослабления синфазных и/или дифференциальных помех в собственном электромагнитном экране.

13. Размещается помехозащитный фильтр в непосредственной близости к источнику и/или потребителю электроэнергии.

14. Каждая токопроводящая шина соединяется проводными отводами с источником и/или потребителем электроэнергии, через дополнительный помехозащитный фильтр.

На основе методики проектирования и способа изготовления создана помехозащищённая ШЭП [26] (рис. 11), включающая основание 1 с пазом для электрического соединения при помощи электропроводящего kleевого слоя 2 и крышки 3, образуя замкнутый корпус, внутри которого размещается токопроводящая шина положительной полярности 4 заданной ширины w и толщины t . Шина положительной полярности отделена от основания разнородным диэлектриком, состоящим из оксидной плёнки 5, слоя лака 6 и kleевой плёнки из электроизоляционного материала 7 «НИИКАМ-ПМ-ЛС», стеклотекстолита 8 и эпоксидного пенокомпаунда 9. Шина отрицательной полярности также покрыта изолятором в виде оксидной плёнки 5, слоя лака 6 и kleевой плёнки из электроизоляционного материала 7. Места пайки проводных отводов к токопрово-

дящим шинам покрыты лаком, вырезы 5 в основании 1 залиты герметиком, а для протекания ЭСР ШЭП совместно с гибкими проводными отводами покрыта металлизированной тканью 10.

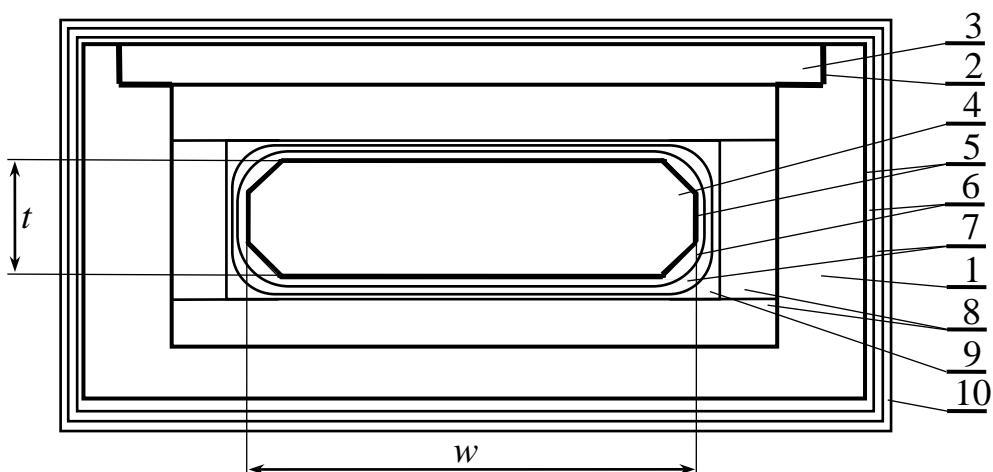


Рис. 11. Поперечное сечение помехозащищённой ШЭП

Таким образом, П-образное в поперечном сечении основание 1 с крышкой 2, образующие токопроводящую шину отрицательной полярности в виде корпуса (рис. 12а) является замкнутым электромагнитным экраном, внутри которого устанавливается изолированная токопроводящая шина (с фаской) положительной полярности 4 (рис. 12б).

Токопроводящие шины изготавливаются из алюминия и имеют углубления 11 для пайки с двух противоположных сторон гибких проводных отводов, соответствующих полярностей. В основании 1 имеются прорези 12 для вывода с двух сторон гибких проводных отводов от токопроводящей шины положительной полярности 4. Для компенсации продольного расширения вследствие нагрева шины 4, в основании 1 конструкции ШЭП выполнены открытые стенки 13.

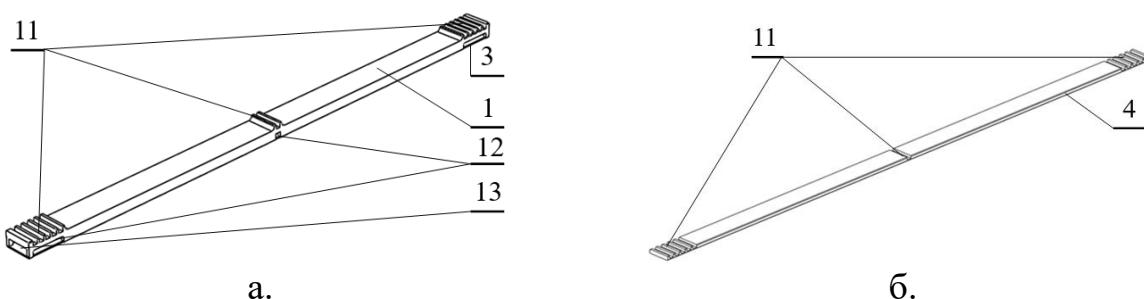


Рис. 12. Изометрические виды П-образного основания с крышкой отрицательной полярности (а) и внутренний токопроводящий проводник положительной полярности (б)

Такая конструкция ШЭП (рис. 13) при необходимости может устанавливаться на панель 14 при помощи кронштейнов 15 с держателями 16 и планками 17. Для дополнительной помехозащищённости устройства в целом, на

кронштейны 15 с держателями 16 может быть установлен помехозащитный фильтр в собственном электромагнитном экране 18. Фильтр может быть выполнен на компонентах с сосредоточенными и распределёнными параметрами и позволяет ослабить амплитуду кондуктивных помех от потребителя.

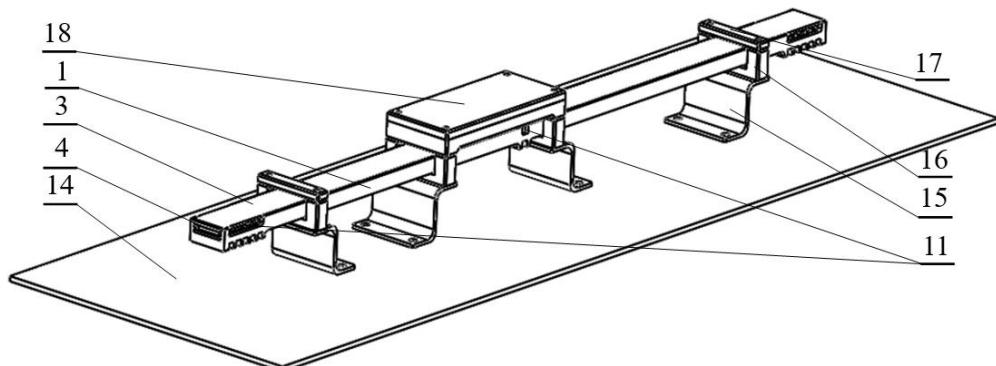


Рис. 13. Изометрический вид ШЭП без проводных отводов, установленной на панель посредством кронштейнов с держателями совместно с помехозащитным фильтром

В ШЭП имеются углубления для гибких проводных отводов положительной 19 и отрицательной 20 полярностей, которые расположены так, что сверху имеют положительную полярность, а снизу – отрицательную (рис. 14а, б).

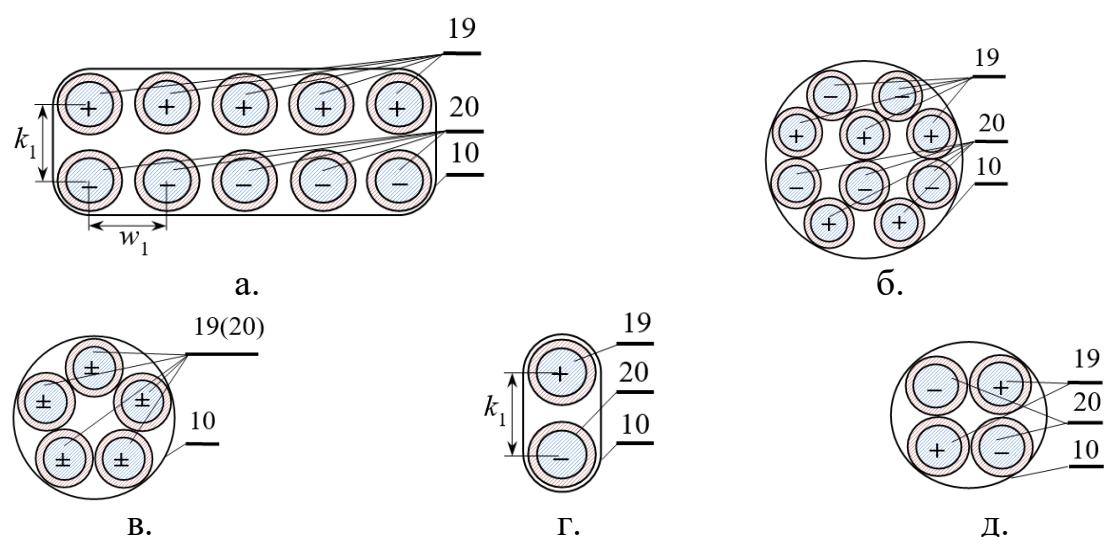


Рис. 14. Поперечные сечения гибких проводных отводов

Провода располагаются на расстояниях w_1 и k_1 друг от друга для протекания лака и герметика между ними. Провода собираются в жгут (рис. 14в) и после соединителей разветвляются по полюсам соответствующей полярности (рис. 14г), что повышает взаимную электромагнитную связь между полюсами, а при разветвлении и подключении к проводным отводам соответствующего полюса повышает надёжность ШЭП. Аналогичным способом выполнены проводные отводы положительной и отрицательной полярностей (рис. 14д) для под-

ключения к шине одного и/или группы потребителей, которые могут быть подключены через помехозащитный фильтр 18.

Создана конструкция помехозащищённой ШЭП (рис. 15) с гибкими проводными отводами 24–27, на каждом конце которых имеются соединители положительной и отрицательной полярности 21 для их подключения к источнику/потребителю электроэнергии. В центре к помехозащищённой ШЭП, через проводные отводы 28 и 29 подключён дополнительный помехозащитный фильтр 18, потребитель к которому подключается через собственные проводные отводы 30 с расположенным на концах соединителями 22. При этом гибкие проводные отводы могут быть припаяны к соединителям 21, 22, образуя положительную и/или отрицательную клеммы для подключения источника/потребителя. Корпус каждого соединителя изнутри покрывается лаком, заливается компаундом и имеет электрический контакт с металлизированной тканью 20.

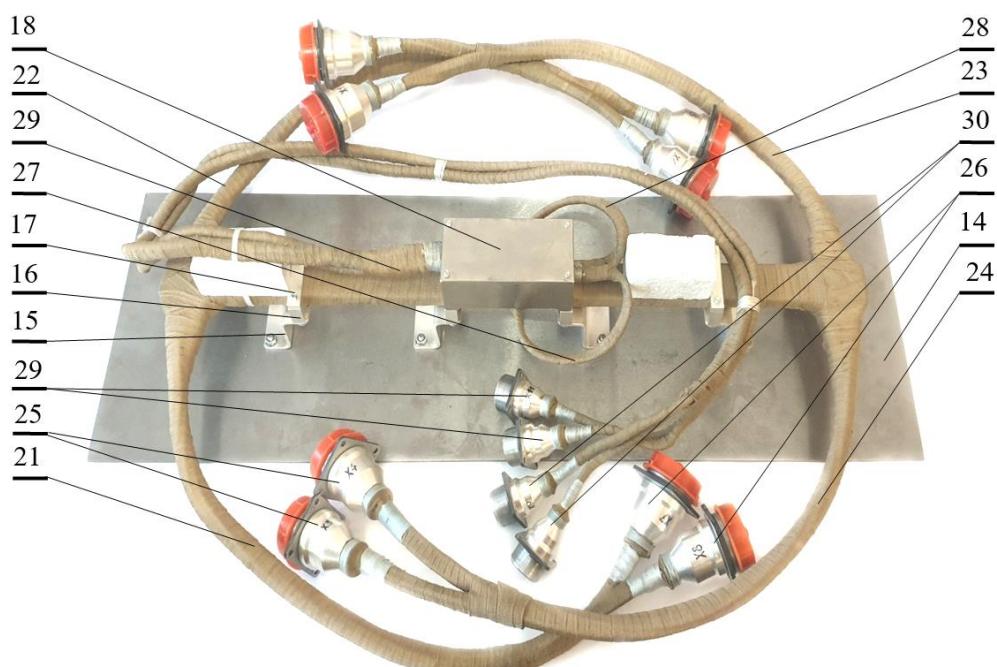


Рис. 15. Помехозащищённая ШЭП с гибкими проводными отводами, установленная на панель посредством кронштейнов с держателями совместно с помехозащитным фильтром

Конструкция помехозащищённой ШЭП в виде экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником ($w/t_1 = 5,6$), имеющая по результатам вычислений $L_{\text{диф}} \leq 60 \text{ нГн/м}$, $L_{\text{синф}} \leq 20 \text{ нГн/м}$, $C \geq 0,7 \text{ нФ/м}$ и $m_k \leq 740 \text{ г/м}$. Проведены электрические испытания лабораторного макета ШЭП в АО «Решетнёв», показавшие её применимость для БКС КА.

Заключение

В результате, разработаны методика проектирования помехозащищённых ШЭП и алгоритм оптимизации её геометрических и электрофизических параметров. Отличиями методики являются выбор оптимального поперечного сече-

ния на основе известных поперечных сечений линий передачи, а также учёт проводных отводов в конструкции ШЭП. Отличиями алгоритма для выбора оптимальной формы поперечного сечения ШЭП, является учёт электрических и электрофизических параметров материалов и её применимость для создания проводных отводов, входящих в состав ШЭП. Методика совместно с алгоритмом позволяют минимизировать Z_b , L и t_k и увеличить C , что обеспечивает целостность питания. На их основе разработан способ изготовления ШЭП, отличающийся возможностью получения малой массы и повышенной электрической прочности, а также устойчивости к излучаемым электромагнитным воздействиям и ЭСР. Способ позволил создать однофазную помехозащищённую ШЭП с гибкими проводными отводами, прошедшую электрические испытания. В перспективе предполагается создание лётной помехозащищённой ШЭП для массового применения в составе БКС КА.

Разработка алгоритма, методики и способа изготовления, а также создание макета однофазной помехозащищённой ШЭП выполнены при финансовой поддержке Программы развития ТУСУР на 2025–2036 годы Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030». Анализ помехозащищённости ШЭП выполнен за счёт гранта Российского научного фонда №23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/> в ТУСУРе.

Литература

1. Wang D., Zhou L., Hemming S., An J., Wang Y., Pietrini G. Design and characterization of bus bars for 1MVA three-level ANPC inverters in aerospace applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2025. Vol. 40. No. 1. P. 1135–1152. doi: 10.1109/TPEL.2024.3464233.
2. Srivastava V. R., Poddar P. K., Veena B., Hariharan V. K. Modular power system and bus bar scheme in high power communication satellite // 2014 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symp (EDAPS). 2014. P. 45–48. doi: 10.1109/EDAPS.2014.7030819.
3. Иванов В. А., Кириллов В. Ю., Морозов Е. П. Модельные и стендовые исследования электризации космических аппаратов: Монография. М: Издательство МАИ, 2012. 168 с.
4. Кириллов В. Ю., Томилин М. М. Воздействие преднамеренных электромагнитных помех на бортовые кабели космических аппаратов // Труды МАИ. 2013. № 66. С. 1–12.
5. Кириллов В. Ю., Клыков А. В., Нгуен В. Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета // Труды МАИ. 2013. № 71. С. 1–14.
6. Dorneles A. C., Guo J. Bus bar design for high-power inverters // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018. Vol. 33. No. 3. P. 2354–2367. doi: 10.1109/TPEL.2017.2691668.
7. Varzaneh M. G., Emar W., Iranshahi M., Kamali-Omidi N., Panah A. S. DC link capacitors selection and arrangement procedure in high power inverters: a general review // 2023 2nd International Engin. Conf. on Electrical, Energy, and

- Artificial Intelligence (EICEEA). 2023. P. 1–8. doi: 10.1109/EICEEA60672.2023.10590523.
8. Куксенко С. П. Моделирование помехозащищенной сети электропитания космического аппарата // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 1–20.
9. Qiu Z., Zhang H., Chen G. Study and design of noninductive bus bar for high power switching converter // 2006 CES/IEEE 5th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. 2006. Vol. 2. P. 1–4. doi: 0.1109/IPEMC.2006.4778100.
10. Huiqing W., Jun L., Xuhui Z., Xuhui W. Electric vehicle drive inverters simulation considering parasitic parameters // 13th Power Electronics and Motion Control Conf. 2008. P. 417–421. doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635301.
11. Venugopal A., Robert F. Effect of frequency, materials and structural variations on stray parameters of laminated busbars // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2023. Vol. 18. No. 2. P. 1447–1456. doi: 10.1007/s42835-022-01202-3.
12. Guichon J., Aime J., Schanen J., Martin C., Roudet J., Clavel E., Arpilliere M., Pasterczyk R., Le Floch Y. Busbar design: how to spare nanohenries? // Industry Applic. Conf. 2006. P. 1865–1869. doi: 10.1109/IAS.2006.256790.
13. Ternov S., Demakov A. V., Komnatnov M. E. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters // Moskow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). 2018. P. 1–4. doi: 10.1109/MWENT.2018.8337219.
14. Wang J., Yang B., Zhao J., Deng Y., He X., Zhixin X. Development of a compact 750KVA three-phase NPC three-level universal inverter module with specifically designed busbar // Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC). 2010. P. 1266–1271. doi: 10.1109/APEC.2010.5433338.
15. Ehrich M., Fichte L. O., Luer M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar // Proc. Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics. 2000. P. 11–16. doi: 10.1109/CEEM.2000.853888.
16. Yu X., Shang D., Zhao L., He C., Li H., Jiang M. Simulation of the short circuit of the insulated tubular busbars in high voltage test room // 2024 7th Int. Conf. on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). 2024. P. 277–282. doi: 10.1109/CEEPE62022.2024.10586413.
17. Гаврюшов М. В., Ефремов С. В. Применение технологии силовых алюминиевых шин Busbar на КА ОАО «ИСС» // Решетнёвские чтения. 2013. № 17. С. 213–216.
18. Sampaio R. F., Zwicker M. F., Pragana J. P., Braganca I. M., Silva C. M., Nielsen C. V., Martins P. A. Busbars for e-mobility: State-of-the-art review and a new joining by forming technology // Mechanical and industrial engineering: historical aspects and future directions. 2021. P. 111–141. doi: 10.1007/978-3-030-90487-6_4.
19. Kim M. J., Bak S. H., Jung W. C., Hur D. J., Ko D. S., Kong M. S. Improvement of heat dissipation characteristics of Cu bus-bar in the switchboards through shape modification and surface treatment // Energies. 2019. Vol. 12. No. 1. P. 146. doi: 10.3390/en12010146.
20. Куксенко С. П., Газизов Т. Р., Квасников А. А., Демаков А. В., Иванов А. А., Клюкин Д. В., Алхадж Хасан А., Максимов А. Е., Осинцев А. В.

Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР // Наноиндустрия. 2023. № S9–1(119). С. 170–178.

21. Николаев И. И., Комнатнов М. Е. Влияние формы поперечного сечения шины электропитания на её электрические и массогабаритные параметры // Доклады ТУСУР. 2025. № 1. С. 20–26.

22. Николаев И. И. Оценка погонной ёмкости экранированных N-проводных отводов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2021. № 1-2. С. 73–76.

23. Giri D. V. High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications. – Harvard University Press, 2004. – 224 p.

24. Костелецкий В. П., Черникова Е. Б., Жечев Е. С., Заболоцкий А. М. Разработка устройства защиты от сверхкоротких импульсов для цепей электропитания бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Журнал радиоэлектроники. 2022. №. 8. С. 1–19.

25. Комнатнов М. Е. Способ изготовления многофазной помехозащищенной силовой шины электропитания // Патент на полезную модель RU 2823271 C1, опубл. 22.07.2024; бюл. № 21.

26. Комнатнов М. Е., Дроздова А. А., Николаев И. И., Газизов Т. Р. Помехозащищенная силовая шина электропитания // Патент на полезную модель RU 2822924 C1, опубл. 16.07.2024; бюл. № 20.

References

1. Wang D., Zhou L., Hemming S., An J., Wang Y., Pietrini G. Design and characterization of bus bars for 1MVA three-level ANPC inverters in aerospace applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, vol. 40, no. 1. pp. 1135–1152. DOI: 10.1109/TPEL.2024.3464233.
2. Srivastava V. R., Poddar P. K., Veena B., Hariharan V. K. Modular power system and bus bar scheme in high power communication satellite. *2014 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symp (EDAPS)*, 2014, pp. 45–48. DOI: 10.1109/EDAPS.2014.7030819.
3. Ivanov V. A., Kirillov V. Yu., Morozov E. P. *Model'nye i stendovye issledovaniya elektrizacii kosmicheskikh apparatov* [Model and Bench Studies of Spacecraft Electrification]. Moscow, MAI Publ., 2012. 168 p. (in Russian).
4. Kirillov V. Yu., Tomilin M. M. *Vozdeistvie prednamerennykh elektromagnitnykh pomekh na bortovye kabeli kosmicheskikh apparatov* [Impact of Intentional Electromagnetic Interference on Spacecraft Onboard Cables]. *Trudy MAI*, 2013, no. 66, pp. 1–12 (in Russian).
5. Kirillov V. Yu., Klykov A. V., Nguyen V. H. *Modelirovanie vozdeistviia moshchnykh elektromagnitnykh pomekh na elektrotehnicheskii kompleks samoleta* [Simulation of High-Power Electromagnetic Interference Impact on Aircraft Electrical System]. *Trudy MAI*, 2013, no. 71, pp. 1–14 (in Russian).

6. Dorneles A. C., Guo J. Bus bar design for high-power inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 2354–2367. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2691668.
7. Varzaneh M. G., Emar W., Iranshahi M., Kamali-Omidi N., Panah A. S. DC link capacitors selection and arrangement procedure in high power inverters: a general review. *2023 2nd International Engin. Conf. on Electrical, Energy, and Artificial Intelligence (EICEEA)*, 2023, pp. 1–8. DOI: 10.1109/EICEEA60672.2023.10590523.
8. Kuksenko S. P. Modelirovanie pomekhozashchishchennoi seti elektroritaniia kosmicheskogo apparata [Modeling of a Spacecraft Protected Power Supply Network]. *Trudy MAI*, 2019, no. 105, pp. 1–20 (in Russian).
9. Qiu Z., Zhang H., Chen G. Study and design of noninductive bus bar for high power switching converter. *2006 CES/IEEE 5th Int. Power Electronics and Motion Control Conf*, 2006, vol. 2, pp. 1–4. DOI: 0.1109/IPEMC.2006.4778100.
10. Huiqing W., Jun L., Xuhui Z., Xuhui W. Electric vehicle drive inverters simulation considering parasitic parameters. *13th Power Electronics and Motion Control Conf.*, 2008, pp. 417–421. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635301.
11. Venugopal A., Robert F. Effect of frequency, materials and structural variations on stray parameters of laminated busbars. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2023, vol. 18, no. 2, pp. 1447–1456. doi: 10.1007/s42835-022-01202-3.
12. Guichon J., Aime J., Schanen J., Martin C., Roudet J., Clavel E., Arpilliere M., Pasterczyk R., Le Floch Y. Busbar design: how to spare nanohenries? *Industry Applic. Conf.*, 2006, pp. 1865–1869. DOI: 10.1109/IAS.2006.256790.
13. Ternov S., Demakov A. V., Komnatnov M. E. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MWENT.2018.8337219.
14. Wang J., Yang B., Zhao J., Deng Y., He X., Zhixin X. Development of a compact 750KVA three-phase NPC three-level universal inverter module with specifically designed busbar. *Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC)*, 2010, pp. 1266–1271. DOI: 10.1109/APEC.2010.5433338.
15. Ehrich M., Fichte L. O., Luer M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar. *Proc. Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics*, 2000, pp. 11–16. DOI: 10.1109/CEEM.2000.853888.
16. Yu X., Shang D., Zhao L., He C., Li H., Jiang M. Simulation of the short circuit of the insulated tubular busbars in high voltage test room. *2024 7th Int. Conf. on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, 2024, pp. 277–282. DOI: 10.1109/CEEPE62022.2024.10586413.
17. Gavryushov M. V., Efremov S. V. Application of technology of power aluminum tires bus bar on KA of JSC "ISS". *Reshetnev conference*, 2013, vol. 1, no. 17, pp. 213–216 (in Russian).
18. Sampaio R. F., Zwicker M. F., Pragana J. P., Braganca I. M., Silva C. M., Nielsen C. V., Martins P. A. Busbars for e-mobility: State-of-the-art review and a new joining by forming technology. *Mechanical and industrial engineering*:

historical aspects and future directions, 2021, pp. 111–141. DOI: 10.1007/978-3-030-90487-6_4.

19. Kim M. J., Bak S. H., Jung W. C., Hur D. J., Ko D. S., Kong M. S. Improvement of heat dissipation characteristics of Cu bus-bar in the switchboards through shape modification and surface treatment. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 146. DOI: 10.3390/en12010146.

20. Kuksenko S. P., Gazizov T. R., Kvasnikov A. A., Demakov V. A., Ivanov A. A., Klyukin D. V., Alkhadzh Khasan A., Maksimov A. E., Osintsev A. V. Developing software for modelling radioelectronic equipment with respect to electromagnetic compatibility in TUSUR. *Nanoindustry*, 2023, vol. 16, no. S9-1 (119), pp. 170–178 (in Russian).

21. Nikolayev I. I., Komnatnov M. E. Influence of the cross-section forms of a power bus bar on its electrical and mass-dimensional characteristics. *Proceedings of TUSUR Universit*, 2025, vol. 28, no 1, pp. 20–26 (in Russian).

22. Nikolayev I. I. Otsenka pogonnoy emkosti ekranirovannykh N-provodnykh otvodov [Estimation of Linear Capacitance of Shielded N-Wire Branches]. *Sbornik izbrannyykh statei nauchnoi sessii TUSUR*, 2021, no. 1-2, pp. 73-76 (in Russian).

23. Giri D. V. *High-power electromagnetic radiators: nonlethal weapons and other applications*. Harvard University Press, 2004. 224 p.

24. Kosteletskii V. P., Chernikova E. B., Zhechev Y. S., Zabolotsky A. M. Development of an ultrashort pulse protection device for the power supply circuits of on-board radio-electronic equipment. *Journal of Radio Electronics*, 2022, no. 8, pp. 1–19.

25. Komnatnov M. E. Method of manufacturing multiphase noise-immune power bus. Patent Russia, no. RU 2823271 C1. Publish. 22.07.2024, bul. no. 21 (in Russian).

26. Komnatnov M. E., Drozdova A. A., Nikolayev I. I., Gazizov T. R. Noise-proof power supply bus. Patent Russia, no. RU 2822924 C1. Publish. 16.07.2024, bul. no. 20 (in Russian).

Статья поступила 21 октября 2025 г.

Информация об авторах

Николаев Илья Игоревич – соискатель учёной степени кандидата технических наук. Младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область научных интересов: электромагнитная совместимость; целостность сигналов и электропитания. E-mail: nikolaev.727@yandex.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич – доктор технических наук, доцент. Ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Безопасность и электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. Область

научных интересов: электромагнитная совместимость; электромагнитное экранирование. E-mail: maxmek@mail.ru

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40.

Methodology for designing EMI-protective power bus bars

I. I. Nikolayev, M. E. Komnatnov

Purpose. Power supply to high-power consumers in aerospace equipment and radio engineering systems is most often implemented using power busbars. Existing power busbar designs are predominantly manufactured with a rectangular cross-section. A primary and achievable reduction in per-unit-length inductance and structural mass can be attained by altering the geometric shape, dimensions, and materials of the conductors and insulators. However, scientific literature has not paid sufficient attention to the development of design methodologies for such structures that would allow for selecting an optimal solution for a required busbar from the known cross-sections, while accounting for conductor and dielectric materials, as well as the attachment of wire taps. **Purpose of work** is to develop a design methodology for EMI-protective power busbars, which enables the consideration of the electrophysical parameters of conductors and dielectrics, the attachment of wire taps, and their fabrication. **Method.** The main method employed is quasi-static analysis based on the method of moments. **Novelty.** The scientific novelty lies in the development of a design methodology for EMI-protective power busbars, which is distinguished by the selection of an optimal cross-section based on known transmission line cross-sections and the incorporation of wire taps into the busbar design. **Results.** We developed the methodology for designing EMI-protective power busbars and an algorithm for optimizing its geometric and electrophysical parameters. The methodology, combined with the algorithm, enables the characteristic impedance, inductance, and mass to be minimized, and the capacitance to be increased, which ensures power integrity. Based on this methodology, we also developed a manufacturing process for the busbar, which allowed creating a single-phase EMI-protective power busbar with flexible wire taps. **Practical relevance.** Based on the proposed methodology, we developed and patented a method for manufacturing a multi-phase EMI-protective power busbar. This method enables low mass, increased dielectric strength, and enhanced resilience to radiated electromagnetic interference and electrostatic discharge. This technique allowed us to fabricate and patent a busbar with low parasitic parameters. Electrical tests of a busbar laboratory prototype were conducted at an organization specializing in spacecraft development and demonstrated its applicability for onboard spacecraft cable networks.

Key words: power busbar, per-unit-length parameters, electromagnetic compatibility.

Information about Authors

Ilya Igorevich Nikolayev – Postgraduate Student. Research Assistant of the Research Laboratory of "Security and Electromagnetic Compatibility of Electronic Systems". Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility (EMC); signal integrity (SI) and power integrity (PI). E-mail: nikolaev.727@yandex.ru

Maxim Evgenievich Komnatnov – Advanced Doctor in Engineering Sciences, Associate Professor. Senior Research Scientist of the Research Laboratory of "Security and Electromagnetic Compatibility of Electronic Systems". Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. Field of research: electromagnetic compatibility (EMC); electromagnetic shielding. E-mail: maxmek@mail.ru

Адрес: 634050, Russia, Tomsk, Lenina prospect, pr. 40.