

УДК 621.391.31

И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов

Влияние формы поперечного сечения шины электропитания на её электрические и массогабаритные параметры

Исследуется влияние формы поперечного сечения шины электропитания (ШЭП) на её электрические и массогабаритные параметры с целью определения оптимальной формы для минимизации электромагнитных помех. Рассмотрены варианты поперечных сечений ШЭП на основе несимметричной и симметричной, а также экранированных линий передачи (ЛП). Моделировалось влияние размеров проводников и относительной диэлектрической проницаемости изолятора на погонные индуктивность (L), ёмкость (C) и волновое сопротивление ($Z_в$) ШЭП. Оценены уменьшение L и рост C за счёт роста отношения ширины проводников к их толщине, а также изолятора с более высокой диэлектрической проницаемостью и меньшей толщиной. Показана предпочтительность ШЭП в виде экранированной линии передачи с прямоугольным центральным проводником.

Ключевые слова: силовая шина электропитания, численное моделирование, погонные параметры.

DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-1-20-26

Электропитание от источника к потребителю повышенной мощности осуществляется, используя шины электропитания (ШЭП). В сравнении с кабельными системами они имеют более низкие волновое сопротивление и массу, а также высокую надёжность [1]. В основном распространена конструкция с прямоугольным поперечным сечением близко расположенных проводников [2]. Применимость таких ШЭП в силовых преобразователях представлена в [3].

Особое внимание при проектировании ШЭП уделяется погонной индуктивности (L), оказывающей существенное влияние на амплитуду напряжения помех, протекающих от источника к потребителю и наоборот [4]. Так, при высокой L ШЭП возможны: падение напряжения за счёт роста индуктивного сопротивления, дисбаланс токов, резонанс в конденсаторах и пр. [5, 6]. Поэтому при проектировании ШЭП уменьшают погонную L , используя различные методы и способы.

Применение на предварительном этапе проектирования аналитических выражений для экранированной, несимметричной и симметричной линий передачи (ЛП) [7–11] позволяет оценить погонную L и погонную ёмкость C , а также волновое сопротивление ($Z_в$) ШЭП. Моделированием ШЭП с использованием эквивалентных схем [12, 13] вычисляют амплитуды переходных процессов при заданной геометрической форме поперечного сечения ШЭП или известных её L и C . Расчёт электрических параметров ШЭП проводят, используя метод конечных элементов [14, 15], метод эквивалентных схем из частичных элементов [16] и пр.

Оценки влияния геометрической формы поперечного сечения проводников и изоляторов на электрические параметры ШЭП, в частности на погонную L , а также на рассеяние тепла по поверхности, остаются актуальными задачами [17]. Скругление кромок [18] и добавление торцевых апертур и изоляторов в конструкцию ШЭП оказывают существенное влияние на электрические параметры слоистых ШЭП [19]. Другим способом уменьшения L является использование коаксиальных конструкций ШЭП [20,

21], ослабляющее магнитное поле в её окружении. Малая L и высокая C в конструкции с коаксиальным поперечным сечением достигаются за счёт добавления дополнительных концентрических проводников, что повышает её эффективность.

Уменьшение массы конструкции m_k ШЭП возможно за счёт использования различных форм поперечного сечения проводников и изоляторов [22], а также их материалов [23]. Применение D-образных проводников в поперечном сечении ШЭП позволяет не только уменьшить m_k , но и увеличить рассеяние тепла на её поверхности [24].

В результате геометрическая форма поперечного сечения ШЭП оказывает существенное влияние на её погонные параметры. При этом m_k ШЭП зависит от плотности материала проводников (ρ_n) и их длины (l). Для неизменных ρ_n , l , площади проводников (S_n) и при изменении формы поперечного сечения будут изменяться потоки векторов магнитной индукции (Φ_B) и напряжённости электрического поля (Φ_E), что повлияет на взаимные индуктивные и ёмкостные связи, а соответственно, и амплитуды напряжения и тока электромагнитной помехи в ШЭП. Между тем эти вопросы исследованы недостаточно.

Цель работы – оценить влияние формы поперечного сечения ШЭП на электрические и массогабаритные параметры.

Повышение C , а соответственно уменьшение $Z_в$, достижимо за счёт утоньшения и увеличения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r изолятора, что повлияет на m_k и надёжность ШЭП. 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 необходимо минимизировать $Z_в$ и m_k ,

значения которых определяются геометрическими и электрофизическими параметрами её проводников и изолятора, влияющими на ослабление кондуктивных помех в ШЭП.

Оптимальное поперечное сечение ШЭП может быть выбрано исходя из известных ЛП, применяемых в радиотехнических устройствах. Так, наиболее простым и известным конструкторским решением для ШЭП являются слоистые структуры в виде несимметричной (рис. 1, а), симметричной ЛП без диэлектрика по краям (рис. 1, б) и с ним (рис. 1, в) [12]. При этом конструкции ШЭП с симметричным поперечным сечением имеют гальваническое соединение между верхней и нижней пластинами, образуя единый полюс электропитания с заданной площадью S_n .

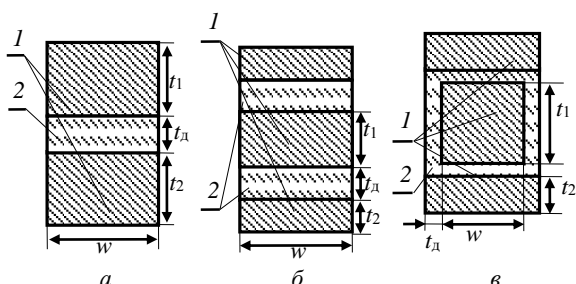


Рис. 1. Геометрические модели поперечных сечений ШЭП в виде несимметричной (а) и симметричной ЛП без диэлектрика по краям (б) и с ним (в)

Конструкции ШЭП с поперечными сечениями из рис. 1 состоят из двух идеально проводящих пластин 1, разделённых изолятором 2 с ϵ_r . Геометрическими параметрами являются ширина (w), толщины (t_1, t_2) и длины (l) проводников, а также толщина (t_d) изолятора. Внешний контур геометрических моделей окружён диэлектрической средой в виде воздуха с $\epsilon_r = 1$.

Для оценки влияния геометрических размеров поперечных сечений на L и C созданы в программном обеспечении (ПО) TUSUR.EMC (основан на TALGAT [25]) геометрические модели ШЭП в виде несимметричной и симметричной ЛП без диэлектрика по краям и с ним. Выбрана площадь поперечного сечения (S_n) каждого проводника 50 мм^2 для токов в 200 А в соответствии с [26, 27]. Вычислены L и C при изменении отношения w/t_1 от 2 до 200 при $t_d = 2 \text{ мм}$ и $\epsilon_r = 1$ с сохранением площади поперечного сечения каждого проводника и одинаковой плотностью ρ_n (рис. 2, а, б) металла (алюминий). При вычислении потери в металле и диэлектрике не учитывались.

Из рис. 2, а, б видно, что рост w/t_1 увеличивает C и уменьшает L в 7,1–7,7 раза, что увеличивает S_d от 20 до 418 мм^2 , а соответственно и m_k .

Максимальной L (170,8 и 23,9 нГн/м) и минимальной C (65,1 и 463,7 пФ/м) обладает несимметричная ЛП, что делает нецелесообразным её применение для ШЭП.

Минимальной L (88,7 и 12,3 нГн/м) и максимальной C (125,4 пФ/м и 906,1 пФ/м) обладает ШЭП в виде симметричной ЛП с изолятором по краям. Рост w/t_1 уменьшает разницу L и C от 7,2 до 0,5% для ШЭП

в виде симметричной ЛП без диэлектрика по краям и с ним.

В результате из рассмотренных предпочтительна по критерию минимальной L симметричная ЛП с диэлектриком по краям.

Оценено влияние на L и C изменения t_d от 10 до 0,1 мм с неизменными $S_n = 50 \text{ мм}^2$ и $\epsilon_r = 1$ при $w/t_1 = 2$ (см. рис. 2, в, г).

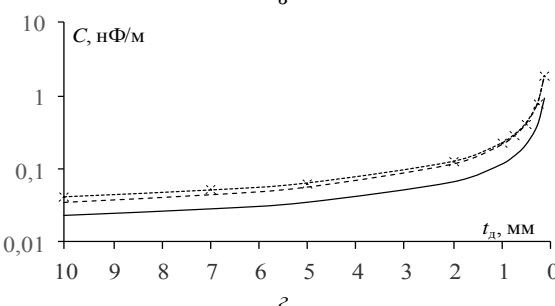
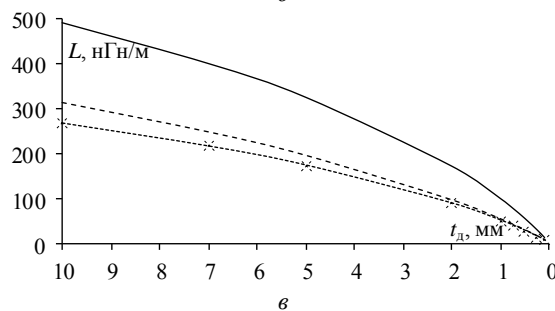
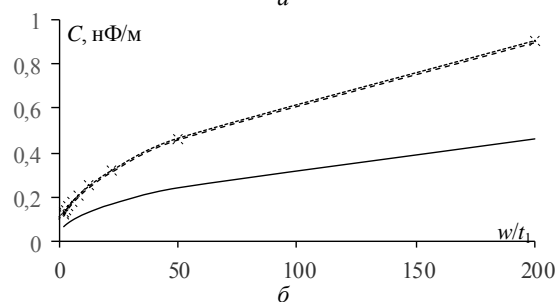
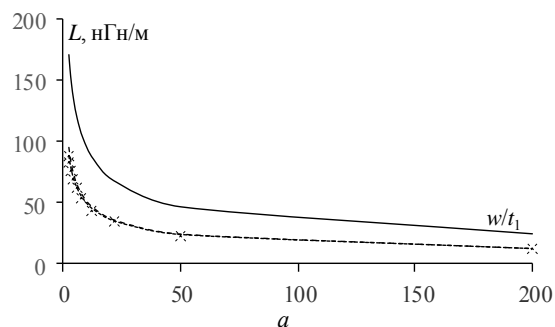


Рис. 2. Зависимости L и C от w/t_1 – а, б; от t_d – в, г; для несимметричной ЛП (—); симметричной ЛП без диэлектрика (---) по краям и с ним (-·-)

Из рис. 2, в, г видно, что при уменьшении t_d от 10 до 0,1 мм C растёт, а L уменьшается в 41, 52 и 44 раза для несимметричной и симметричной ЛП без диэлектрика по краям и с ним соответственно. При этом S_d уменьшается от 100 до 1 мм^2 ; от 200 до 2 мм^2 ; от 700 до $3,04 \text{ мм}^2$. Таким образом, наибольшее уменьшение L достигается у симметричной ЛП без диэлектрика по краям, однако S_d существенно больше (в 2 раза) по

сравнению с несимметричным поперечным сечением, что может привести к увеличению m_k конструкции ШЭП в целом.

Максимальной L (490,4 и 12,1 нГн/м) и минимальной C (22,7 и 921,9 пФ/м) обладает несимметричная ЛП, при этом S_d минимальна по сравнению с симметричной, что делает нецелесообразным её применение для ШЭП.

Минимальной L (268,7 и 6,1 нГн/м) и максимальной C (41,4 и 1,8 нФ/м) обладает симметричная ЛП с изолятором по краям. При этом разница значений погонных параметров симметричной ЛП с диэлектриком по краям и без него уменьшается от 16,6 до 0,7%, а S_d больше в 1,5 и 3,5 раза для $t_d = 0,1$ мм и $t_d = 10$ мм.

Таким образом, целесообразно использовать симметричную ЛП без диэлектрика по краям с минимальной разницей L и C (до 16,6% при $t_d = 0,1$ мм) по сравнению с симметричным поперечным сечением и диэлектриком по краям.

В результате из рассмотренных ЛП предпочтительна по критерию минимальной L симметричная ЛП без диэлектрика по краям.

Дополнительно увеличить C и уменьшить Z_b можно за счёт роста ϵ_r . При этом стоит учитывать, что большинство материалов с высокой ϵ_r обладают высокой плотностью ρ_d , что увеличит m_k конструкции ШЭП. Для оценки влияния ϵ_r на C и Z_b вычислены размеры проводников ШЭП при $t_d = 2$ мм и $\epsilon_r = 1$ для исходного $Z_b = 50$ мм. Вычислены C и Z_b с ростом ϵ_r от 1 до 10. Так, C линейно увеличилась до 7,3; 5,8 и 7,5 раза при $S_d = 21; 16; 37,2$ мм² для несимметричной, симметричной ЛП без диэлектрика по краям и с ним соответственно, при этом Z_b уменьшилась до 2,7 раза для всех ЛП.

Наибольшие рост C (66,7 и 0,5 нФ/м) и уменьшение Z_b (49,9 и 18,3 Ом) наблюдаются у симметричной ЛП с диэлектриком по краям. При этом разница для несимметричной ЛП и симметричной ЛП с диэлектриком по краям минимальна, но S_d в 1,8 раза выше для симметричной ЛП. Таким образом, целесообразно использовать несимметричную ЛП.

В итоге анализ вычисленных значений показал, что минимальной m_k обладает несимметричная ЛП, однако её L существенно (в 2 раза) выше, а C ниже во всех случаях, чем у симметричной ЛП. Также её существенным недостатком является то, что оба полюса ШЭП открыты, что снижает надёжность. Кроме того, без боковых рёбер увеличение w/t_1 для симметричной и несимметричной ЛП приведёт к прогибу вдоль конструкции. Это также существенно снижает их надёжность. От данных недостатков избавлены замкнутые формы поперечного сечения ЛП, имеющие более высокую механическую прочность за счёт замкнутого контура. Частным случаем исполнения таких ЛП является симметричное поперечное сечение ЛП без диэлектрика по краям и с ним.

Созданы геометрические модели ШЭП (рис. 3) в виде коаксиальной ЛП и экранированных ЛП с прямоугольным и круглым центральными проводниками [28].

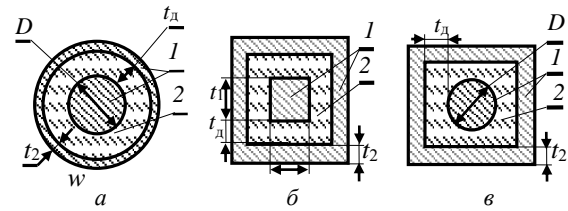


Рис. 3. Геометрические модели поперечных сечений в виде коаксиальной ЛП (а); экранированных ЛП с прямоугольным (б) и круглым (в) центральными проводниками

Вычислены погонные параметры (табл. 1) при $S_m = 50$ мм² каждого проводника. Для экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником (рис. 3, б) w/t_1 изменялось от 2 до 200, а для поперечных сечений из рис. 3, а, в диаметр ($D = 8$ мм) центрального проводника не изменялся.

Таблица 1
Значения погонных параметров ШЭП

Параметр	w/t_1	Значение	S_d , мм ²	Поперечное сечение
C , пФ/м	–	136,9	62,7	рис. 3, а
L , нГн/м	–	81,3		
C , пФ/м	2	152,6	76	рис. 3, б
L , нГн/м		72,9		
C , пФ/м	200	908,6	418	рис. 3, в
L , нГн/м		12,2		
C , пФ/м	–	115,6	93,5	рис. 3, в
L , нГн/м	–	96,2		

Из табл. 1 видно, что максимальной L (96,2 нГн/м) и минимальной C (115,6 пФ/м) обладает экранированная ЛП с круглым центральным проводником, что делает её непригодной для ШЭП.

Минимальной L (72,9 нГн/м) и максимальной C (152,6 пФ/м) обладает экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником при $w/t_1 = 2$. Её отличительной особенностью является изменение w/t_1 для дополнительного уменьшения L и увеличения C до 12,2 нГн/м и 908,6 пФ/м при $w/t_1 = 200$ с ростом S_d , а соответственно и m_k в 5,5 раза. Предпочтительна по критерию минимальной m_k является коаксиальная ЛП.

Вычислены L и C при $S = 50$ мм² каждого проводника с изменением t_d от 10 до 0,1 мм (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что при уменьшении t_d от 10 до 0,1 мм C увеличивается, а L уменьшается в 51, 44 и 20 раз для коаксиальной ЛП, экранированных ЛП с прямоугольным и круглым центральными проводниками, соответственно. При этом S_d уменьшается от 565 до 2,5 мм², от 700 до 3 мм² и от 733 до 17 мм².

Минимальной L (250,9 и 4,9 нГн/м) и максимальной C (44,3 пФ/м и 2,53 нФ/м) обладает коаксиальная ЛП. Таким образом, по критерию минимальных L и m_k лучше коаксиальная ЛП, а если необходимо уплощение конструкции ШЭП, то экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником.

Вычислены C и Z_b при увеличении ϵ_r от 1 до 10. Выявлено, что с ростом ϵ_r C одинаково увеличива-

ется, а Z_b одинаково уменьшается в 10 и 3,2 раза соответственно, при этом $S_d = 31,8; 42,4; 42,6$ мм² для рассматриваемых ЛП. В результате целесообразно использовать коаксиальную ЛП, так как она имеет минимальную S_d , а соответственно и m_k .

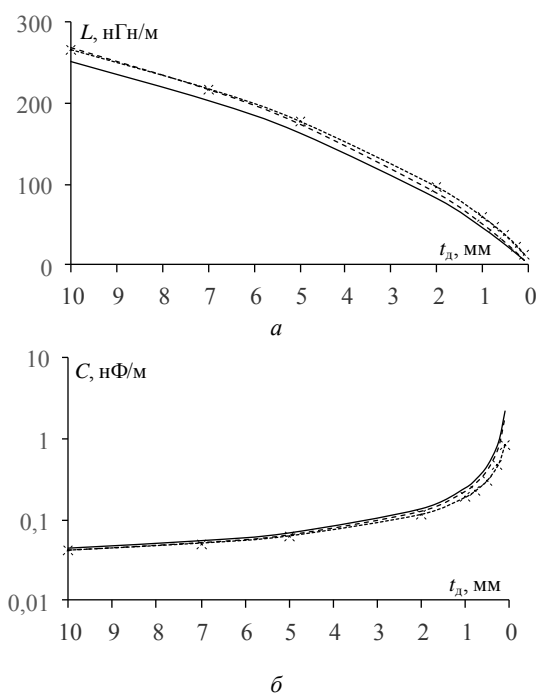


Рис. 4. Зависимости L (а) и C (б) от t_d для коаксиальной ЛП (—) и экранированных ЛП с прямоугольным (---) и круглым (-·-) центральными проводниками

Таким образом, для проектирования ШЭП предпочтительна коаксиальная ЛП, но для неё нет возможности варьирования геометрических параметров с сохранением S_n без добавления внутренней полости. Кроме того, на конструкции коаксиальной ШЭП сложно изготовить крепления и выполнить монтаж боковых проводных отводов. Таких недостатков лишена экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником.

Сведены в табл. 2 значения Z_b и S_d для всех исследуемых поперечных сечений ЛП. Анализ их значений показал, что минимальным Z_b обладает экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником при $w/t_1 = 2$, а минимальной S_d , а соответственно и m_k – несимметричная ЛП. При этом она обладает наибольшим значением $Z_b = 51,2$ Ом, что делает нецелесообразным её применение для ШЭП по сравнению с другими поперечными сечениями. Значения Z_b и S_d коаксиальной ЛП близки к экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником, что делает целесообразным сравнение их погонных параметров и m_k с реальными материалами проводников и диэлектриков.

Проведено детальное сравнение коаксиальной и экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником. Для этого вычислены погонные L , C и m_k при изменении w/t_1 с учётом реальных материалов: в качестве диэлектрика с плотностью ρ_d выбран

стеклотекстолит ($\epsilon_r = 4$, $\rho_d = 1,8$ кг/м³), а проводника – алюминий ($\sigma = 37 \times 10^6$ См/м, $\rho_m = 2,7$ кг/м³).

Таблица 2
Значения Z_b для всех поперечных сечений ШЭП

Поперечное сечение	w/t_1	Z_b , Ом	S_d , мм ²
рис. 1, а	2	51,2	20
	200	7,2	200
рис. 1, б	2	28,5	40
	200	3,7	400
рис. 1, в	2	26,6	76
	200	3,7	418
рис. 3, а	–	24,4	62,7
рис. 3, б	2	21,9	76
	200	3,7	418
рис. 3, в	–	28,9	93,5

Для экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником C увеличилась от 0,61 до 3,63 нФ/м, а L уменьшилась от 72,9 до 12,2 нГн/м, при этом масса конструкции m_k увеличилась в 2,5 раза (от 406,8 до 1022,4 г). Для коаксиальной ЛП L , C и m_k составили 81,3 нГн/м, 0,55 нФ/м и 382,6 г. В результате целесообразно применение ШЭП в виде прямоугольной ЛП с прямоугольным экраном, обладающих оптимальными L , C и m_k , как описано выше.

Заключение

Исследовано влияние формы поперечного сечения ЛП на электрические и массогабаритные параметры ШЭП. Методом численного моделирования в ПО TUSUR.EMC показано следующее.

Увеличение отношения ширины проводника к его толщине приводит к снижению L и росту C для всех рассмотренных конфигураций ШЭП. Наиболее значительны изменения L и C для ШЭП на основе симметричной ЛП с изолятором по краям.

Снижение толщины изолятора также способствует уменьшению L и увеличению C . При этом наименьшая L и наибольшая C наблюдаются в ШЭП на основе коаксиальной ЛП.

Использование изолятора с более высокой ϵ_r дополнительно увеличивает C и снижает Z_b , что является благоприятным фактором для ШЭП.

Вычислены погонные параметры для ШЭП в виде коаксиальной ЛП и экранированной ЛП с прямоугольным центральным проводником с реальными материалами.

Сравнение значений Z_b исследуемых конструкций показало, что для основания ШЭП наиболее предпочтительными поперечными сечениями являются коаксиальная ЛП и экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником. При этом коаксиальная конструкция ШЭП сложна при изготовлении за счёт крепления или пайки боковых проводных отводов к центральному проводнику и невозможности его внесения в конструкцию внешнего проводника обратных токов. Таких недостатков лишена экранированная ЛП с прямоугольным центральным проводником. При их детальном сравнении с учётом реальных материалов можно сделать вывод о целесообразности применения ШЭП в виде прямоугольной ЛП с прямоугольным экраном.

Работа выполнена в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

Литература

1. Simulation and Experimental Study of High-Power Power Conditioning Unit / W. Lu, B. Wang, C. Zhao, H. Chen, K. Wang, T. Zhang // 2019 European Space Power Conference (ESPC). – 2019. – P. 1–4.
2. DC Link Capacitors Selection and Arrangement Procedure in High Power Inverters: A General Review / M. G. Varzaneh, W. Emar, M. Iranshahi, N. Kamali-Omidi, A.S. Panah // 2023 2nd International Engineering Conference on Electrical, Energy, and Artificial Intelligence (EICEEAI). – IEEE, 2023. – P. 1–8.
3. Busbars Stray Parameters Optimization for Double Pulse Test Platform of High Voltage IGCT / Z. Kang, Y. Tang, C. Zhan, W. Wang, L. Zhu, H. Sun, S. Ji // 2024 CPSS & IEEE International Symposium on Energy Storage and Conversion (ISESC). – IEEE, 2024. – P. 190–195.
4. Dorneles A.C. Bus bar design for high-power inverters / A.C. Dorneles, J. Guo // IEEE Trans. on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, No. 3. – P. 235–2367.
5. Wang D. Design and Characterization of Bus Bars for 1MVA Three-level ANPC Inverters in Aerospace Applications / D. Wang, L. Zhou, S. Hemming, J. An, Y. Wang, G. Pietrini // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2025. – Vol. 40, No. 1. – P. 1135–1152.
6. Laminated busbar optimization concerning physical aspects, materials, and structural modifications / A. Venugopal, F. Robert // 2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). – 2022. – P. 1–5.
7. Hammerstad E. Accurate models for microstrip computer-aided design / E. Hammerstad, O. Jensen // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 1980. – P. 407–409.
8. Gupta K.C. Computer aided design of microwave circuits (Book) / K.C. Gupta, R. Garg, R. Chadha // Research sponsored by the Department of Electronics of India, 1981. – 426 p.
9. Fusco F. Microwave Circuits: Analysis and Computer-Aided Design. IL: Prentice Hall. – 1987.
10. Chen T.S. Determination of the capacitance, inductance, and characteristic impedance of rectangular lines // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1960. – Vol. 8, Iss. 5. – P. 510–519.
11. Frankel S. Characteristic impedance of parallel wires in rectangular troughs // Proceedings of the IRE. – 1942. – Vol. 30, Iss. 4. – P. 182–190.
12. Review of Modeling and Analysis of Parasitics in Power Electronic Converters / J. Wang, M. Chen, S. Yu, X. Zhang // Chinese Journal of Electrical Engineering. – 2025. – Vol. 11, No. 1. – P. 151–173.
13. Chen Z. Q. Busbar Design for High-Power SiC Converters / Z. Chen, A. Huang // Electronics. – 2024. – Vol. 13, No. 23. – P. 4758.
14. Mitsui K. Design of a laminated bus bar optimizing the surge voltage, damped oscillation, and switching loss / K. Mitsui, K. Wada // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2021. – Vol. 57, No. 3. – P. 2737–2745.
15. George N. Rectangular busbar with circular sensing part for wideband current measurement / N. George, P. Ripka // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 1–8.
16. Busbars Structural Requirements for DC Link in High Power Inverters: A Systematic Review / M.G. Varzaneh, M. Iranshahi, W. Emar, N. Kamali-Omidi, A.S. Panah // 2023 2nd International Engineering Conference on Electrical. – IEEE, 2023. – P. 1–6.
17. Белоусов А.О. Подходы к обеспечению электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств в составе комплекса функционального поражения беспилотных летательных аппаратов мощным электромагнитным излучением // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 134–196.
18. Ternov S. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters / S. Ternov, A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – 14–16 March, 2018. – P. 1–4.
19. Venugopal A. Effect of Frequency, Materials and Structural Variations on Stray Parameters of Laminated Busbars / A. Venugopal, F. Robert // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2023. – Vol. 18, No. 2. – P. 1447–1456.
20. Ehrich M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar / M. Ehrich, L.O. Fichte, M. Luer // Proc. Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics. – Shanghai, China, 7 May. – 2000. – P. 11–16.
21. Yu X. Simulation of the Short Circuit of the Insulated Tubular Busbars in High Voltage Test Room / X. Yu, D. Shang, L. Zhao, C. He, H. Li and M. Jiang // 2024 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). – 2024. – P. 277–282.
22. Гаврюшов М.В., Ефремов С.В. Применение технологии силовых алюминиевых шин Bus bar на КА ОАО «ИСС» // Решетневские чтения. – 2013. – Т. 1, № 17. – С. 213–216.
23. Busbars for e-mobility: State-of-the-art review and a new joining by forming technology / R.F.V. Sampaio, M.F.R. Zwicker, J.P.M. Pragana, I.M.F. Braganca // Mechanical and industrial engineering: historical aspects and future directions. – 2021. – P. 111–141.
24. Improvement of heat dissipation characteristics of cu bus-bar in the switchboards through shape modification and surface treatment / M.J. Kim, S.H. Bak, W.C. Jung, D.J. Hur, D.S. Ko, M.S. Kong // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – P. 146.
25. Разработка программного обеспечения для моделирования радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости в ТУСУР / С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.А. Квасников, А.В. Демаков, А.А. Иванов, Д.В. Ключкин, А. Алхадж Хасан, А.Е. Максимов, А.В. Осинцев // Наноиндустрия. – 2023. – Т. 16, № S9–1 (119). – С. 170–178.
26. ГОСТ В 23584–79. Монтаж электрический радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 1981. – 15 с.
27. ECSS-Q-ST-30-11C. Rev 1, Space product assurance. Derating – EEE components, Developed by ECSS Secretariat. – Noordwijk, The Netherlands, 2001. – 71 p.
28. Журавлев С.А. Распределительные системы на основе прямоугольной коаксиальной линии // Успехи современной радиоэлектроники. – 2021. – Т. 75, № 9. – С. 69–80.

Николаев Илья Игоревич

Мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
 ORCID: 0000-0002-5710-8528
 Тел.: +7-999-619-01-12
 Эл. почта: Nikolaev.727@yandex.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич

Канд. техн. наук, с.н.с. НИЛ ФИЭМС ТУСУРа

Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050

ORCID: 0000-0002-6463-2889

Тел.: +7-952-888-38-96

Эл. почта: maxmek@mail.ru

Поступила в редакцию: 31.01.2025.

Принята к публикации: 14.04.2025.

Nikolayev I.I., Komnatnov M.E.

Influence of the cross-section forms of a power bus bar on its electrical and mass-dimensional characteristics

The article investigates the influence of the cross-sectional forms of a power bus bar (PB) on its electrical and mass-dimensional parameters to determine the optimal geometry for minimizing electromagnetic interference. Asymmetric and symmetric cross-sectional configurations of PBs, as well as shielded transmission lines (TL), are analyzed. The effects of conductor dimensions and the relative permittivity of the insulator on the per-unit length inductance (L), capacitance (C), and characteristic impedance (Z_0) of the PB were modeled. The reduction in L and increase in C were evaluated as functions of higher conductor width-to-thickness ratios, as well as the use of insulators with elevated permittivity and reduced thickness. The study demonstrates the superiority of a shielded transmission line configuration with a rectangular central conductor for power PB applications.

Keywords: power bus bar, numerical modeling, per-unit length parameters.

DOI: 10.21293/1818-0442-2025-28-1-20-26

References

- Lu W., Wang B., Zhao C., Chen H., Wang K., Zhang T. Simulation and Experimental Study of High-Power Power Conditioning Unit. *2019 European Space Power Conference (ESPC)*, 2019, pp. 1–4.
- 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 Engineering Conference on Electrical, Energy, and Artificial Intelligence (EICEEAI)*, 2023, pp. 1–8.
- Kang Z., Tang Y., Zhan C., Wang W., Zhu L., Sun H., Ji S. Busbars Stray Parameters Optimization for Double Pulse Test Platform of High Voltage IGCT. *2024 CPSS & IEEE International Symposium on Energy Storage and Conversion (ISESC)*, IEEE, 2024, pp. 190–195.
- Dorneles A.C., Guo J. Bus bar design for high-power inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 235–2367.
- Wang D., Zhou L., Hemming S., An J., Wang Y., Pietrini G. Wang D. 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.
- Venugopal A., Robert F. Laminated busbar optimization concerning physical aspects, materials, and structural modifications. *2022 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, 2022, pp. 1–5.
- Hammerstad E., Jensen O. Accurate models for microstrip computer-aided design. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. 1980, pp. 407–40.
- Gupta K.C., Garg R., Chadha R. *Computer Aided Design of Microwave Circuits*. Research sponsored by the Department of Electronics of India, 1981, 426 p.
- Fusco F. *Microwave Circuits: Analysis and Computer-Aided Design*. Prentice Hall, 1987.
- Chen T.S. Determination of the capacitance, inductance, and characteristic impedance of rectangular lines. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1960, vol. 8, iss. 5, pp. 510–519.
- Frankel S. Characteristic impedance of parallel wires in rectangular troughs. *Proceedings of the IRE*, 1942, vol. 30, iss. 4, pp. 182–190.
- Wang J., Chen M., Yu S., Zhang X. Review of Modeling and Analysis of Parasitics in Power Electronic Converters. *Chinese Journal of Electrical Engineering. Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 151–173.
- Chen Z., Huang A. Q. Busbar Design for High-Power SiC Converters. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 23, pp. 4758.
- Mitsui K., Wada K. Design of a laminated bus bar optimizing the surge voltage, damped oscillation, and switching loss. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, vol. 57, no. 3, pp. 2737–2745.
- George N., Ripka P. Rectangular busbar with circular sensing part for wideband current measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, vol. 72, pp. 1–8.
- Varzaneh M. G., Iranshahi M., Emar W., Kamali-Omidi N., Panah A. S. Busbars Structural Requirements for DC Link in High Power Inverters: A Systematic Review. *2023 2nd International Engineering Conference on Electrical, IEEE*, 2023, pp. 1–6.
- Belousov A.O. [Approaches to ensuring electromagnetic compatibility of radio-electronic means as part of a complex for functional damage to unmanned aerial vehicles by powerful electromagnetic radiation]. *Sistemy Upravleniya, Svyazi i Bezopasnosti [Systems of Control, Communication, and Security]*, 2023, pp. 134–196 (in Russ.).
- 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)*. M., March 14–16, 2018, pp. 1–4.
- 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.
- Ehrich M., Fichte L.O., Luer M. Electrical properties and magnetic fields of a coaxial bus bar. *Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics*, Shanghai, China, May 07, 2000, pp. 11–16.
- Shang X. Yu, 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 International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, 2024, pp. 277–282.
- Gavryushov M.V., Efremov S.V. [Application of power aluminum bus bar technology at JSC «ISS»]. *Reshetnevskie Chteniya [Reshetnev Readings]*, 2013, vol. 1, no. 17, pp. 213–216 (in Russ.).
- Sampaio R.F.V., Zwicker M.F.R., Pragma J.P.M., Braganca I.M.F. 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.
- 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.

25. Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Kvasnikov A.A., Demakov A.V., Ivanov A.A., Klyukin D.V., Alhadj Hasan A., Maksimov A.E., Osincev A.V. [Development of software for modeling of radio-electronic means taking into account electromagnetic compatibility in TUSUR]. *Nanoindustry*, 2023, pp. 170–178 (in Russ.).

26. GOST V 23584–79. [Electrical installation of radio-electronic equipment and devices. General technical requirements]. M.: Standartinform, 1981, 15 p. (in Russ.).

27. ECSS-Q-ST-30-11C. Rev 1. *Space Product Assurance. Derating – EEE Components*. ECSS Secretariat, Noordwijk, The Netherlands, 2001, 71 p.

28. Zhuravlev S.A., Gusev A.L., Kurbatskii A.S., Terekhin O.V. [Power dividing systems based on a rectangular coaxial line]. *Achievements of modern radioelectronics*, 2021, vol. 75, no. 9, pp. 69–80.

Илья И. Nikolayev

Junior Researcher, Research Laboratory of Fundamental Research on Electromagnetic Compatibility (FR EMC) Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-5710-8528
Phone: +7-999-619-01-12
Email: Nikolaev.727@yandex.ru

Maxim E. Komnatov

Candidate of Sciences in Engineering, Senior Researcher, Research Laboratory of FR EMC TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-6463-2889
Phone: +7-952-888-38-96
Email: maxmek@mail.ru

Received: 31.01.2025.

Accepted: 14.04.2025.