

УДК 621.371.32

Р.Р. Хажибеков, М.Е. Комнатнов

Моделирование спиральной в поперечном сечении силовой шины электропитания при двух положениях электропроводящих пластин

Представлены результаты моделирования силовых шин электропитания (СШЭП) со спиральным поперечным сечением без сдвига и со сдвигом их электропроводящих пластин, образующим в поперечном сечении поворот на 180° одной пластины относительно другой. Получены результаты квазистатического анализа, которые показали преимущества СШЭП, а именно малую погонную индуктивность и большую погонную емкость. Рассмотрено влияние количества витков, толщины и свойств изолятора, а также толщины электропроводящих пластин на характеристики СШЭП. Используя электродинамическое моделирование, представлены частотные зависимости модуля коэффициента передачи, которые показали преимущества использования спиральных СШЭП при сдвиге электропроводящих пластин и без него.

Ключевые слова: силовая шина электропитания, линия передачи, помехозащита.

Силовые шины электропитания (СШЭП) используются для передачи электроэнергии от источника к потребителю в различных типах электронного оборудования. В основном СШЭП устанавливают в местах протекания тока высоких амплитуд, для которого не подходят другие токопроводящие методы, как, например, использование печатных проводников или обычных проводов, которые во время эксплуатации могут нагреваться до высоких температур [1, 2]. Одним из основных преимуществ использования СШЭП является снижение значений паразитных параметров, которые оказывают непосредственное влияние на амплитуды синфазной и дифференциальной помех, неучёт которых может привести к нестабильной работе активных элементов из-за перенапряжения, падения напряжения, дисбаланса токов, резонанса в конденсаторах [3, 4].

В работе [5] предложена конструкция СШЭП, полученная в результате сворачивания двух электропроводящих пластин. Сворачивание пластин позволяет получить компактную конструкцию СШЭП с малой погонной индуктивностью и высокой погонной ёмкостью. Уменьшение индуктивности достигается за счет взаимных магнитных полей, создаваемых при протекании тока по двум свёрнутым электропроводящим пластинам. Также в [5] показано повышенное затухание в диапазонах высоких и сверхвысоких частот при начальном сдвиге одной пластины относительно другой таким образом, что в поперечном сечении поворот пластин равен 180° . Детальное исследование подобного эффекта в работе [5] не рассмотрено.

Целью данной работы является моделирование спиральной в поперечном сечении СШЭП без сдвига и со сдвигом электропроводящих пластин, образующим поворот одной пластины относительно другой на 180° .

Геометрическая модель

В работе исследуются конструкции с количеством витков N от 1 до 8. Рассматриваются поперечные сечения без сдвига (рис. 1, а, б) и со сдвигом (см. рис. 1, в, г) электропроводящих пластин. Для простоты моделирования и уменьшения вычисли-

тельных затрат, электропроводящие пластины полагаются бесконечно тонкими. Начальный радиус r равен 3 мм и не изменялся.

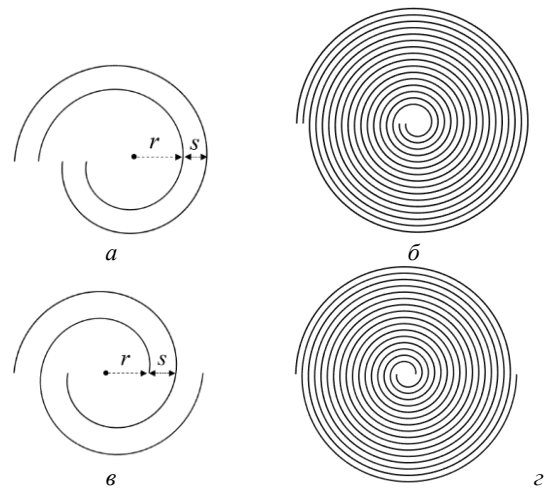


Рис. 1. Поперечные сечения спиральной СШЭП без сдвига (а, б) и со сдвигом (в, г) электропроводящих пластин при $N = 1$ (а, в) и $N = 8$ (б, г)

Учитывались внешняя изоляция и изоляция между пластинами. В качестве изоляции при моделировании использовались следующие диэлектрики: воздух ($\epsilon_r = 1$), полиамид ($\epsilon_r = 3$), жидкий теплопроводящий компаунд ($\epsilon_r = 6,5$) и титанат бария ($\epsilon_r = 1000$). Предполагается, что при высоком значении ϵ_r значение погонной электрической емкости будет достаточно высоким, что позволит получить низкую частоту среза и возможность подавления нежелательных помех в СШЭП без использования дополнительных помехозащитных устройств.

Вычисление погонных емкости и индуктивности при изменении количества витков

С помощью ПО TALGAT вычислены погонные емкости (C), индуктивности (L), а также волновые сопротивления (Z_0) при количестве витков $N = 1 \div 8$. Значения C для конструкции без сдвига и со сдвигом электропроводящих пластин приведены на рис. 2.

Из рис. 2, а следует, что C увеличивается прямо пропорционально увеличению ϵ_r , как и в случае с

плоским конденсатором. Например, при использовании титаната бария в качестве изолятора погонная C достигает 12,1 мкФ/м, тогда, как при воздушном заполнении максимальное значение C – 12,1 нФ/м. Также результаты вычислений показали, что при сдвиге электропроводящих пластин (см. рис. 2, б) значение C изменяется незначительно (различие не более 3,3%).

Вычислены значения L при увеличении N для электропроводящих пластин без и со сдвигом (рис. 3). Видно, что L уменьшается при увеличении N . Значения L для обоих сечений близки и отличаются не более чем на 2,7%.

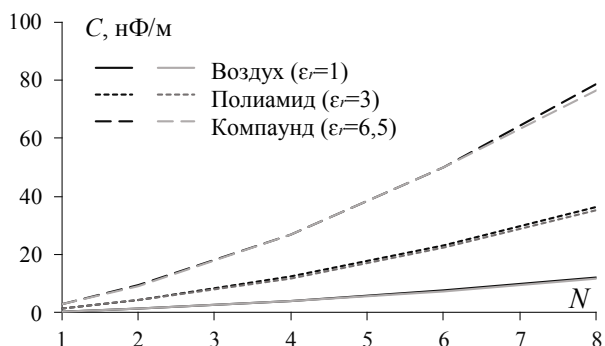


Рис. 2. Зависимости C от N для спиральной СШЭП без сдвига (черные линии) и со сдвигом (серые линии) электропроводящих пластин при разных материалах диэлектрика

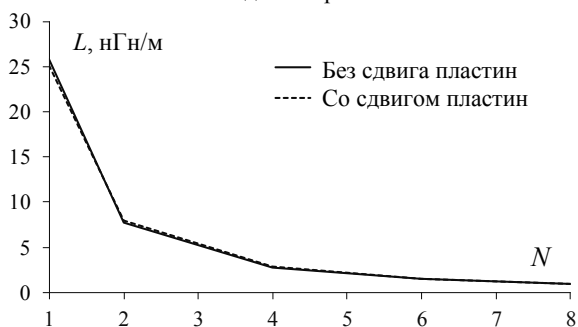


Рис. 3. Значения погонной L в зависимости от N спиральной СШЭП для электропроводящих пластин без и со сдвигом

Вычислены зависимости волнового сопротивления Z_v от количества витков N (рис. 4) из которых видно, что Z_v уменьшается при увеличении N .

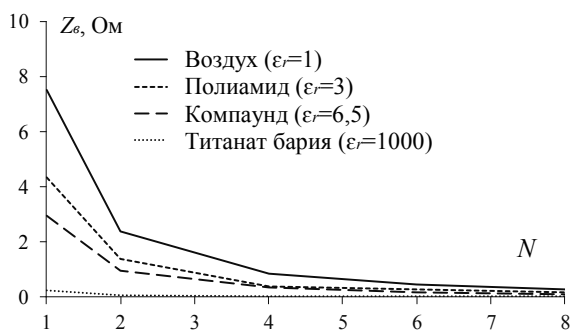


Рис. 4. Зависимости Z_v от количества витков N спиральной СШЭП со сдвигом электропроводящих пластин

В случае при $N = 8$ Z_v не превышает 280 мОм при обоих типах расположения электропроводящих пластин. При использовании изолятора с $\epsilon_r = 1000$ и количестве витков $N = 8$ величина Z_v составляет 9 мОм.

Влияние толщины изолятора на погонные параметры

Представленные выше исследования показали, что наибольшую погонную C и наименьшее Z_v обеспечивает использование в спиральных СШЭП титаната бария в качестве диэлектрика. Однако этот материал является дорогостоящим и имеет форму порошка, что может затруднить изготовление лабораторных макетов спиральных СШЭП. В связи с этим первые лабораторные макеты предполагается изготовить с использованием компаунда, который обеспечит простоту изготовления и высокую прочность конструкции. Таким образом, для дальнейших исследований выбран материал компаунд ($\epsilon_r = 6,5$).

Исследовано влияние толщины диэлектрика s на погонные параметры спиральных СШЭП. Результаты вычисления параметров для конструкции спиральной СШЭП с внешним диаметром D без сдвига и со сдвигом электропроводящих пластин представлены в табл. 1. При вычислении использовались следующие параметры: $r = 3$ мм, $N = 4$, $\epsilon_r = 6,5$.

Таблица 1
Вычисленные параметры спиральной СШЭП без сдвига (1) и со сдвигом (2) электропроводящих пластин с разной толщиной изолятора

s , мм	Вид	Параметр			
		C , нФ/м	L , нГн/м	Z_v , Ом	D , мм
0,1	1	87,38	0,83	0,09	1,6
	2	86,48	0,84	0,1	
0,5	1	26,67	2,71	0,32	8
	2	25,69	2,81	0,33	
1	1	19,08	3,79	0,45	16
	2	18,04	4,0	0,47	
2	1	15,29	4,73	0,56	32
	2	14,24	5,08	0,6	

Из табл. 1 видно, что с увеличением s все характеристики СШЭП ухудшаются, а именно: уменьшается C , увеличиваются L , Z_v и внешний диаметр D СШЭП. Поэтому целесообразно выбрать минимальное s , что обеспечит наилучшие характеристики СШЭП. При этом для компаунда толщиной 0,1 мм напряжение пробоя составляет несколько кВ [6]. Поэтому необходимо тщательно выбирать величину s , учитывая электрическую прочность материала при обеспечении наилучших значений L и C . Что касается сдвига, то он ухудшает характеристики, но незначительно.

Спиральные СШЭП с конечной толщиной электропроводящей пластины

Выполнено исследование влияния толщины (t) электропроводящей пластины на погонные параметры спиральных СШЭП. Поперечное сечение конструкций СШЭП с конечной толщиной пластин представлено на рис. 5.

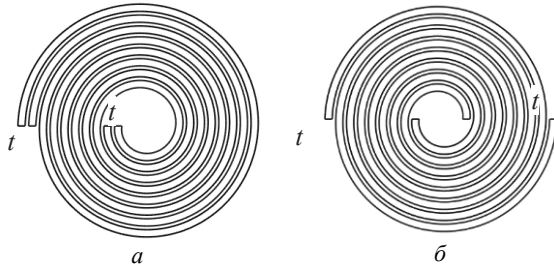


Рис. 5. Поперечные сечения спиральной СШЭП без сдвига (а) и со сдвигом (б) электропроводящих пластин конечной толщины

Результаты вычисления L и C спиральной СШЭП без сдвига и со сдвигом электропроводящих пластин при $t = 0,1, 1$ и 3 мм представлены в табл. 2. При вычислении использовались следующие параметры: $r = 3$ мм, $s = 0,5$ мм, $N = 4$, $\epsilon_r = 6,5$.

Таблица 2
Вычисленные параметры спиральной СШЭП без сдвига (1) и со сдвигом (2) электропроводящих пластин с толщиной t

t , мм	Вид	Параметр			
		C , нФ/м	L , нГн/м	Z_0 , Ом	D , мм
0,1	1	22,78	2,47	0,33	15,8
	2	16,78	2,58	0,4	
1	1	40,98	1,38	0,18	32
	2	28,12	1,48	0,23	
3	1	80,48	0,7	0,09	68
	2	54,73	0,76	0,12	

Из табл. 2 видно, что параметры значительно отличаются от исследуемых поперечных сечений. Так, значения C отличаются на 26,3% при $t = 0,1$ мм, на 31,4% при $t = 1$ мм и на 32% при $t = 3$ мм. Также результаты вычислений показали, что увеличение t позволяет увеличить C и уменьшить L . При этом видно, что увеличение N более эффективно увеличивает C и уменьшает L , чем увеличение t .

В то же время необходимо учитывать максимальную силу тока, протекающего в СШЭП, во избежание перегрева пластин. Приближённая оценка максимальной силы тока в СШЭП может быть вычислена в соответствии с ГОСТ В 23584-79 и ECSS-Q-ST-30-11С как

$$I_{\max} = 8,95 \cdot 2\pi t \sum_{i=1}^N r + (i+1)(s+t), \quad (1)$$

$$I_{\max} = 12,1 \cdot 2\pi t \sum_{i=1}^N r + (i+1)(s+t). \quad (2)$$

В представленных выше формулах первый множитель (8,95 или 12,1) определяет максимальный ток для проводника сечением 1 мм^2 в соответствии с указанными стандартами, а остальная часть выражения определяет площадь СШЭП в поперечном сечении.

Электродинамический анализ

Результаты квазистатического анализа показали, что сдвиг одной из пластин спиральной СШЭП незначительно влияет на их погонные параметры.

Однако целесообразно выполнить полноволновой анализ исследуемых поперечных сечений. Выполнено вычисление частотных зависимостей $|S_{21}|$ при: $r = 3$ мм, $t = 0,1$ мм, $s = 0,5$ мм, $N = 8$, $\epsilon_r = 6,5$, $l = 100$ мм (рис. 6). Из рис. 6, а видно, что первая частота среза для конструкции без сдвига и со сдвигом электропроводящих пластин равна 8,2 МГц. Из рис. 6, б следует, что на частотах резонанса $|S_{21}|$ выше у СШЭП без сдвига. Поэтому эта конструкция хуже подходит к помехозащитным устройствам и обеспечивает худший коэффициент затухания, чем СШЭП со сдвигом электропроводящих пластин. При этом резонансные частоты у СШЭП без сдвига электропроводящих пластин могут быть в дальнейшем исследованы для передачи сигнала, используя технологию «Power line communication (PLC)».

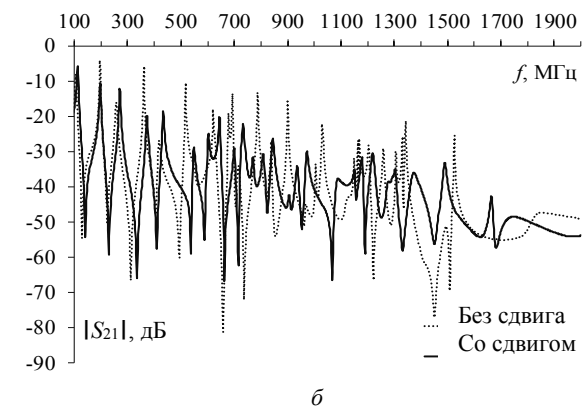
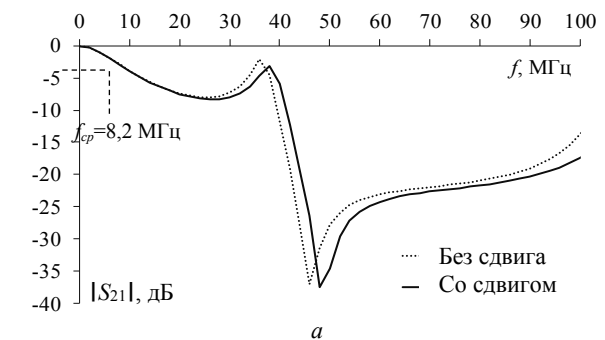


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{21}|$ спиральных СШЭП в диапазоне до 100 МГц (а) и от 100 МГц до 2 ГГц (б)

Заключение

Представлены преимущества СШЭП со спиральным поперечным сечением, которые обеспечивают малые погонную индуктивность и волновое сопротивление, а также большую погонную емкость. Данные преимущества могут позволить в дальнейшем проектировать системы электропитания без дополнительных помехозащитных устройств.

Представлены результаты квазистатического анализа для СШЭП без и со сдвигом электропроводящих пластин, образующих в поперечном сечении поворот на 180° . Из результатов вычислений выявлено, что большое влияние на характеристики спиральных СШЭП оказывают количество витков и зазор между пластинами. При этом количество витков нужно выбирать максимально возможным, а зазор –

минимальным с учётом электрической прочности изолятора.

Представлены результаты электродинамического моделирования конструкции СШЭП длиной 100 мм, из которых видно, что она обеспечивает частоту среза вблизи 8,2 МГц. Таким образом, возможно использовать спиральные СШЭП со сдвигом электропроводящих пластин для передачи постоянного тока и подавления высокочастотных помех в системах электропитания. Конструкцию без сдвига электропроводящих пластин можно использовать для передачи электроэнергии и данных.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ 19-37-51017 «Научное наставничество».

Литература

1. Jodoin R.C. Using busbars for efficient power distribution // Electron. Packaging Prod. – 1993. – No. 33 (2). – P. 46–47.
2. Jones F.D., Schubert P.B. (eds.) Engineering Encyclopedia. – 3rd ed. – New York, Industrial Press, 1963. – 1431 p.
3. Clavel E. Influence of the cabling geometry on paralleled diodes in a high power rectifier / E. Clavel, J. Roudet, J.-L. Schanen, A. Foutanet // IEEE Conf. Record of the Industry Applications Conference. – San Diego, CA, USA. – 6–10 Oct. 1996. – Vol. 2. – P. 993–998.
4. Huiqing W. Electric vehicle drive inverters simulation considering parasitic parameters / W. Huiqing, L. Jun, Z. Xuhui, W. Xuhui // 13th Power Electronics and Motion Control Conference. – 1–3 Sept. 2008. – Poznan, Poland. – P. 417–421.
5. Komnatnov M.E. Electrical modeling of the spiral bus bar / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – 29 June – 3 July 2020. – Chemal, Russia. – P. 395–399.
6. Изоляторы элегазовых КРУ. – URL: <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/izolyatory-elegazovyh-kru-21.html> (дата обращения: 01.09.2020).

Хажибеков Роман Русланович

Аспирант каф. ТУ ТУСУРа
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-01-45
Эл. почта: r300994@mail.ru

Комнатнов Максим Евгеньевич

Доцент каф. ТУ ТУСУРа, канд. техн. наук
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 90-01-45
Эл. почта: maxmek@mail.ru