

УДК 621.315.216

И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов

## Анализ погонных параметров силовых шин электропитания с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями

Выполнено сравнение погонных параметров коаксиальной силовой шины электропитания со спиральной при проводниках бесконечно тонких и конечной толщины. Показано, как увеличение количества витков и толщины стенок пластин приводит к уменьшению погонной индуктивности и волнового сопротивления и увеличению погонной ёмкости. Сравнение погонных параметров спиральной с коаксиальной СШЭП показало, что значения погонных параметров коаксиальной и спиральной СШЭП довольно близки, и различие уменьшается при увеличении количества цилиндров для коаксиальной и витков для спиральной СШЭП. Между тем спиральная линия более предпочтительна, чем коаксиальная, особенно при уменьшении  $N$  и увеличении  $t$ .

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

Силовые шины электропитания (СШЭП) используются для передачи электроэнергии высокой мощности от источника к потребителю. Преимуществами их использования являются низкий импеданс за счёт сильно связанных проводящих плоскостей, упрощённая сборка и повышенная надёжность. В основном СШЭП изготавливают с прямоугольным поперечным сечением, поскольку это является наиболее простым и известным конструкторским решением. В работе [1] исследуются зависимости значений погонных параметров различных форм поперечного сечения СШЭП с сохранением площади  $50 \text{ мм}^2$ . Показано, что увеличение отношения ширины к толщине проводников приводит к уменьшению значений погонной индуктивности и волнового сопротивления, а также увеличению погонной ёмкости. При этом СШЭП с круглым (коаксиальным) поперечным сечением является более эффективной конструкцией за счёт компенсации вихревых магнитных полей в окружении СШЭП [2].

Конструкция коаксиальной СШЭП представляет собой систему, состоящую из коаксиальных трубок. Главными особенностями данной конструкции являются отсутствие результирующего магнитного поля в окружении СШЭП, а также низкое значение погонной индуктивности и низкие потери мощности. Увеличение количества цилиндров и толщины их стенок приводит к уменьшению погонной индуктивности и увеличению погонной ёмкости, что является положительным эффектом при проектировании СШЭП [3]. Спиральное поперечное сечение можно рассматривать как частный случай реализации коаксиального поперечного сечения.

В работе [4] предложена математическая модель распространения поперечной  $T$ -волны в линии передачи со спиральным поперечным сечением. В [5] представлена математическая модель для вычисления погонных параметров СШЭП со спиральным поперечным сечением для  $N$  витков. При этом в работах по спиральной линии отсутствует учёт толщины проводников, а также её сравнение с коаксиальной.

Таким образом, видится необходимым провести анализ, оценку и сравнение погонных параметров

коаксиального и спирального поперечных сечений СШЭП. Результаты учёта толщины проводников будут полезны при проектировании СШЭП с коаксиальным и спиральным поперечными сечениями.

Цель данной работы – выполнить анализ и сравнение погонных параметров СШЭП с коаксиальной и спиральной формами поперечного сечения.

### Спиральная СШЭП с проводниками бесконечно тонкими и конечной толщины

Созданы модели спирального поперечного сечения СШЭП с проводниками бесконечно тонкими (рис. 1, *а*) и конечной толщины (рис. 1, *б*) в программном обеспечении TALGAT [6].

Исходными данными при вычислении погонных параметров являлись: начальный радиус  $r = 1,2 \text{ мм}$ , расстояние между витками  $w = 0,1 \text{ мм}$ , толщина проводников  $t = 0,1; 0,5; 1 \text{ мм}$  и заданное количество витков  $N$ . Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались. Относительные магнитная ( $\mu_r$ ) и диэлектрическая ( $\epsilon_r$ ) проницаемости приняты равными 1.

Для спиральной СШЭП с проводниками бесконечно тонкими и конечной толщины (см. рис. 1) выполнено вычисление погонной индуктивности ( $L$ ) и ёмкости ( $C$ ) при увеличении  $N$  от 1 до 10 (рис. 2).

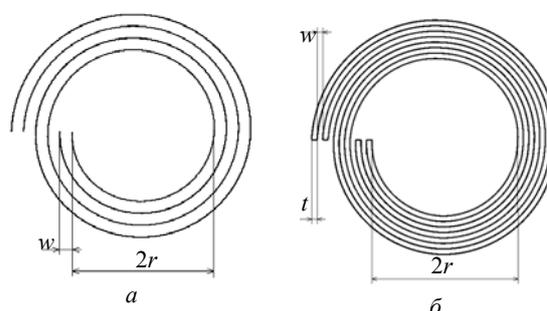


Рис. 1. Поперечные сечения спиральной СШЭП с проводниками бесконечно тонкими (*а*) и конечной толщины (*б*)

Из рис. 2 видно, что при увеличении  $t$  значения  $L$  уменьшаются, а  $C$  – увеличиваются, что является положительным эффектом при проектировании подобных СШЭП. Так, для СШЭП с бесконечно тонкими проводниками при увеличении  $N$  значения  $L$

уменьшились с 13,7 до 0,45 нГн/м (в 30 раз), а  $C$  – увеличились с 0,82 до 24,8 нФ/м (в 30 раз), что привело к уменьшению волнового сопротивления ( $Z$ ) с 4,1 до 0,13 Ом (в 30 раз) (рис. 3).

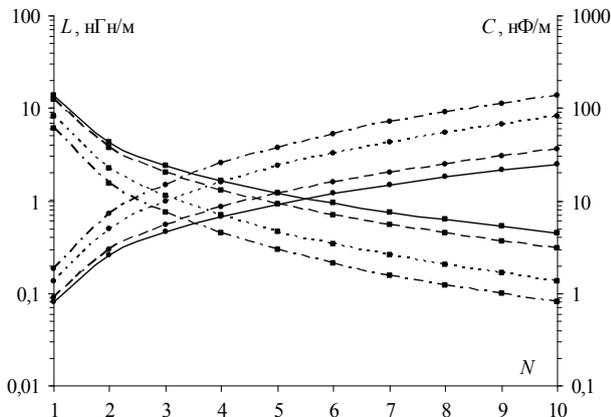


Рис. 2. Зависимости  $L$  (■) и  $C$  (●) от  $N$  для спиральной СШЭП с проводниками бесконечно тонкими (—) и толщиной  $t = 0,1$  (---);  $0,5$  (- -);  $1$  (- · -) мм

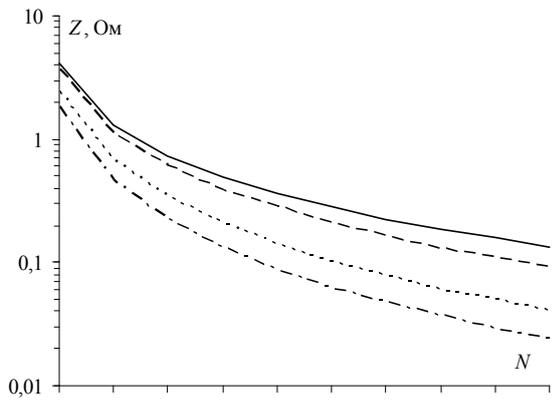


Рис. 3. Зависимости  $Z$  от  $N$  для спиральной СШЭП с проводниками бесконечно тонкими (—) и толщиной  $t = 0,1$  (---);  $0,5$  (- -);  $1$  (- · -) мм

При увеличении толщины проводников значения  $L$  уменьшаются, а  $C$  – увеличивается. Так, при  $t = 0,1$  мм, значения  $L$  уменьшились с 12,28 до 0,31 нФ/м (в 40 раз), а  $C$  – увеличились с 0,9 до 35,69 нФ/м (в 40 раз). При  $t = 0,5$  мм значения  $L$  уменьшились с 8,4 до 0,14 нФ/м (в 60 раз), а  $C$  – увеличились с 1,36 до 81,62 нФ/м (в 60 раз). При  $t = 1$  мм значения  $L$  уменьшились с 6,05 до 0,08 нФ/м (в 75 раз), а  $C$  – увеличились с 1,84 до 137,98 нФ/м (в 75 раз). Таким образом, увеличение  $t$  от 0,1 до 1 мм, привело к уменьшению  $Z$  в 1,875 раза (см. рис. 3). Значения  $L$  и  $Z$  спиральной СШЭП при  $t = 0,1; 0,5; 1$  мм, в сравнении с СШЭП при бесконечно тонких проводниках уменьшились, а  $C$  – увеличились в 1,33; 2 и 2,5 раза соответственно. Увеличение  $N$ , для бесконечно тонкой проводников, приводит к увеличению внешнего радиуса СШЭП от 1,5 мм до 3,3 мм (2,2 раза) и длины дуги спирали от 8,8 до 144,5 мм (в 16,4 раза). Увеличение толщины проводников приводит к увеличению внешнего радиуса в 2,89 (с 1,9 до 5,5 мм); 4 (с 3,5 до 14,3 мм); 4,6 (с 5,5 до

25,3 мм) раза и увеличению среднего значения длины дуги спирали в 21,7 (с 10 до 217 мм); 30 (с 17 до 506 мм); 35 (с 25 до 867 мм) раз соответственно.

#### Сравнение коаксиальной и спиральной СШЭП с бесконечно тонкими проводниками

Проведено сравнение значений  $L$  и  $C$  при увеличении количества ( $N$ ) витков для спиральной и цилиндров для коаксиальной СШЭП по результатам работы [3]. Разница значений погонных параметров коаксиальной СШЭП по отношению к спиральной ( $\delta$ ) уменьшается с ростом  $N$  (рис. 4). Так, при  $N = 1, 5, 10$  она составляет 10, 7 и 5% соответственно.

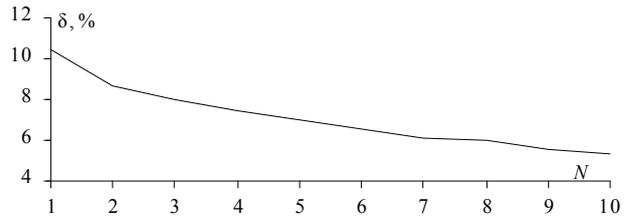


Рис. 4. Зависимость  $\delta$  спиральной СШЭП от коаксиальной при изменении  $N$

#### Сравнение коаксиальной и спиральной СШЭП с конечной толщиной проводников

В таблице представлены значения  $L$  и  $C$ , а также  $Z$  коаксиальной и спиральной СШЭП при  $t = 0,1; 0,5; 1$  мм для  $N = 1, 5, 10$ . Видно, что при увеличении  $t$  значения  $L$  и  $Z$  уменьшаются, а  $C$  – увеличиваются. При этом значения  $L$  и  $Z$  для спиральной СШЭП по отношению к коаксиальной меньше, а  $C$  – больше. Так, при  $t = 0,1$  мм и  $N = 1, 5, 10$ , разница значений погонных параметров составляет 13,97, 7 и 4,7%, при  $t = 0,5$  мм – 32,97; 12,3 и 7,1%, а при  $t = 1$  мм – 42,1; 12,8 и 6,95% соответственно.

#### Значения и отклонения параметров для спиральной и коаксиальной СШЭП при разной толщине проводников и разных $N$

$t, N$	СШЭП	$L$ , нГн/м	$\Delta L$ , %	$C$ , нФ/м	$\Delta C$ , %	$Z$ , Ом	$\Delta Z$ , %
$t = 0,1$ мм, $N = 1$	Коакс.	14,02	13,97	0,79	13,97	4,2	13,97
	Спир.	12,31		0,9		3,69	
$t = 0,1$ мм, $N = 5$	Коакс.	1	7	11,13	7	0,3	7
	Спир.	0,93		11,91		0,28	
$t = 0,1$ мм, $N = 10$	Коакс.	0,33	4,7	34,07	4,7	0,1	4,7
	Спир.	0,31		35,69		0,09	
$t = 0,5$ мм, $N = 1$	Коакс.	10,95	32,97	1,02	32,97	3,28	32,97
	Спир.	8,24		1,35		2,47	
$t = 0,5$ мм, $N = 5$	Коакс.	0,53	12,3	21,15	12,3	0,16	12,3
	Спир.	0,47		23,75		0,14	
$t = 0,5$ мм, $N = 10$	Коакс.	0,15	7,1	76,26	7,1	0,044	7,1
	Спир.	0,14		81,67		0,04	
$t = 1$ мм, $N = 1$	Коакс.	8,6	42,1	1,29	42,1	2,58	42,1
	Спир.	6,05		1,84		1,81	
$t = 1$ мм, $N = 5$	Коакс.	0,33	12,8	33,67	12,8	0,1	12,8
	Спир.	0,29		37,99		0,09	
$t = 1$ мм, $N = 10$	Коакс.	0,09	6,95	129,18	6,95	0,03	6,95
	Спир.	0,08		138,15		0,02	

При этом значение внешнего радиуса для коаксиальной СШЭП при  $t = 0,1; 0,5; 1$  мм и  $N = 10$  составляет 5,1; 13,1; 23,1 мм соответственно, а для спиральной СШЭП – 5,5; 14,3; 25,3 мм.

### Заключение

Выполнен анализ СШЭП со спиральным поперечным сечением с проводниками бесконечно тонкими и конечной толщины. Показано, что увеличение количества витков и толщины проводников приводит к уменьшению  $L$  и  $Z$  и увеличению  $C$ . При этом увеличиваются внешний радиус и средняя длина дуги конструкции СШЭП.

Сравнение погонных параметров спиральной с коаксиальной СШЭП показало, что значения погонных параметров коаксиальной и спиральной СШЭП довольно близки, и различие уменьшается при увеличении количества цилиндров для коаксиальной и витков для спиральной СШЭП. Между тем спиральная линия более предпочтительна, чем коаксиальная, особенно при уменьшении  $N$  и увеличении  $t$ . Однако для более корректного сравнения его целесообразно выполнить при равных поперечных сечениях линий. Это предполагается сделать в перспективе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-37-51017.

### Литература

1. Ternov S. Influence of the cross-section form of the power bus bar on its parameters / S. Ternov, A.V. Demakov, M.E. Komnatnov // Moskow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). – Moscow, 14–16 March 2018. – P. 1–4.
2. 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.

3. Николаев И.И. Силовая шина электропитания с коаксиальным поперечным сечением / И.И. Николаев, М.Е. Комнатнов / Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 257–260.

4. Fabbri I.M. The spiral coaxial cable // International Journal of Microwave Science and Technology. – 26 Feb. 2015. – Vol. 15, Iss. 2. – P. 1–18.

5. Komnatnov M.E. Electrical modeling of the spiral bus bar / M.E. Komnatnov, T.R. Gazizov // IEEE 21th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM. – 2020, Chermal, Russia, 29 June – 3 July 2020. – P. 1–5.

6. Куксенко С.П. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT / С.П. Куксенко, А.М. Заболоцкий, Т.Р. Газизов // Доклады ТУСУР. – 2015. – С. 45–50.

### Николаев Илья Игоревич

М.н.с. НИЛ «ФИЭМС» каф. телевидения и управления (ТУ) Томского гос. ун-та систем управления и радиотехники (ТУСУР)

Вершинина ул., 47, г. Томск, 634045

Тел.: +7-999-619-01-12

Эл. почта: nikolaev.727@yandex.ru

### Комнатнов Максим Евгеньевич

С.н.с. НИЛ «БЭМС РЭС» каф. ТУ ТУСУРа

Вершинина ул., 47, г. Томск, 634045

Тел.: +7-952-888-38-96

Эл. почта: maxmek@mail.ru