

7. Wang Y. et al. Localization of fiber cable with distributed acoustic sensing. *10th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN): IEEE Proceedings*, 2022, pp. 473–478. DOI: 10.1109/ICICN56848.2022.10006527
8. Gubareva O.Yu. et al. Localization method for all-dielectric fiber-optic cable. *Optical Technologies for Telecommunications 2021: Proceedings SPIE*, 2022, vol. 12295, pp. 1229510-1–1229510-8. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2631780>
9. Gureev V.O., Dashkov M.V., Shaban O.V. All-dielectric fiber-optic cable route search method. *Optical Technologies for Telecommunications 2022: Proceedings SPIE*, 2023, vol. 12743, pp. 1274313-1–1274313-7. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2680877>
10. Dashkov M.V., Gureev V.O. Method for searching the route of a dielectric optical cable using a phase-sensitive reflectometer. *Foton-ekspress*, 2023, no 6 (190), pp. 477–478. DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6-477-478 (In Russ.)

Received 26.07.2024

УДК 621.315.2

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛЬНО-БЛОКИРОВОЧНЫХ КАБЕЛЕЙ

Попов Б.В., Попов В.Б.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: inkat@inbox.ru

С ростом объемов перевозок на железных дорогах страны возрастают требования к обеспечению их безопасности и надежности. Одной из технических составляющих обеспечения безопасности и надежности железнодорожного транспорта является кабельная инфраструктура железных дорог, в которой особая роль отводится сигнально-блокировочным кабелям. Качественные сигнально-блокировочные кабели должны иметь характеристики, строго соответствующие требованиям ГОСТ. В статье проводятся результаты экспериментальных исследований и анализ электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей с однопроволочными и многопроволочными токопроводящими жилами. Показано, что производство изолированных проводников сигнально-блокировочных кабелей, так же, как и любых других симметричных кабелей связи, осуществляется на технологических автоматических линиях, оборудованных системами автоматического регулирования, что обеспечивает высокую стабильность их электрических характеристик. Даны практические рекомендации по применению сигнально-блокировочных кабелей не только на железнодорожном транспорте, но и в других ведомствах, где используются симметричные кабели связи.

Ключевые слова: *сигнально-блокировочные кабели, технология производства, нормативные документы, низкочастотные характеристики, высокочастотные характеристики*

Общие положения

Совершенствование кабельной инфраструктуры железных дорог является неотъемлемой частью развития технологических сетей сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) железных дорог.

Сигнально-блокировочные кабели обеспечивают функционирование железнодорожной автоматики и телемеханики. По их цепям передаются сигналы управления и электрическое питание систем сигнализации, централизации и блокировки [1].

В настоящее время сигнально-блокировочные кабели изготавливаются в соответствии с техническими условиями (ТУ). Например, по ТУ 16.К71-297-2000, разработанным Всероссийским научно-исследовательским институтом кабельной промышленности (ВНИИКП) [2]. Сравнительно недавно был выпущен новый стандарт

ГОСТ 34679-2020, в котором стали нормироваться важные для практического использования кабелей высокочастотные характеристики [3].

На технологических сетях СЦБ находят применение сигнально-блокировочные кабели с однопроволочными и многопроволочными токопроводящими жилами. Сейчас в научно-технических источниках информации отсутствуют систематизированные данные результатов исследований электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей. В этой связи исследование электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей становится достаточно актуальным. В статье исследуются электрические характеристики сигнально-блокировочных кабелей производства АО «Самарская кабельная компания».

Технологические особенности изготовления сигнально-блокировочных кабелей

Технологический процесс серийного выпуска сигнально-блокировочных кабелей имеет ряд особенностей. Первым этапом производства является изготовление изолированной токопроводящей жилы, которое осуществляется на экструзионной линии. Экструзионная линия имеет в своем составе измерительные системы, контролирующие такие параметры изолированной жилы, как:

- погонная емкость;
- диаметр;
- эксцентриситет;
- электрическая прочность изоляции.

Автоматическая система регулирования экструзионной линии поддерживает нормативные значения указанных параметров [4–6]. Нормы отклонения составляют:

- для толщины изоляции – $\pm 1\%$ (0,003 мм);
- для емкости – не больше 2 пФ;
- для концентричности – не меньше 0,95.

Пары изолированных токопроводящих жил кабеля скручиваются с разными шагами. Это необходимо для уменьшения взаимных электромагнитных влияний между цепями. Для скрутки подбираются шаги скрутки, не превышающие 100 мм. Таким образом, обеспечиваются стабильно высокое качество кабельно-проводниковой продукции.

Результаты измерения электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей с однопроволочными жилами

Измерения электрических характеристик сигнально-блокировочного кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9 проводились на кабельном заводе на строительных длинах 170, 200 и 240 м.

Подключение жил исследуемого кабеля к измерительной системе выполнялось при помощи специального подключающего устройства, изготовленного с применением отрезка LAN-кабеля емкостью 4х2х0,52.

Низкочастотные характеристики.

Контролируемыми низкочастотными характеристиками передачи сигнально-блокировочных кабелей являются:

Таблица 1. Низкочастотные характеристики кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9

R , Ом/км		ΔR , Ом		C , нФ/км	
R_{cp}	σ	ΔR_{cp}	σ	C_{cp}	σ
27,94	0,29	0,15	0,23	48,06	0,82

- электрическое сопротивление жил при постоянном токе R , Ом/км;
- омическая асимметрия жил ΔR , Ом;
- рабочая емкость C , нФ/км.

Низкочастотные характеристики данного кабеля должны соответствовать нормируемым величинам:

- величина R не более 28,8 Ом/км;
- величина ΔR не более 0,8 Ом;
- величина C не более 100 нФ/км.

Полученные результаты измерений низкочастотных характеристик кабеля были обработаны с помощью методов статистики. При нормальном законе распределения они характеризуются среднестатистическим значением и среднеквадратическим отклонением [7]. Низкочастотные характеристики кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9 приведены в таблице 1.

Анализ результатов измерения низкочастотных характеристик кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9 (таблица 1) показывает, что:

- электрическое сопротивление жил близко к норме и стабильно;
- омическая асимметрия жил меньше нормы 0,8 Ом;
- рабочая емкость меньше максимума 100 нФ/км.

Нормируемое значение омической асимметрии жил для сигнально-блокировочных кабелей оказывается даже жестче, чем для симметричных кабелей связи. Низкая величина ΔR достигается посредством использования для производства кабелей токопроводящих жил повышенной однородности.

Высокочастотные характеристики.

К высокочастотным характеристикам кабелей относятся:

- коэффициент затухания, α , дБ/км;
- переходное затухание на ближнем конце (БК), A_o , дБ;
- защищенность на дальнем конце (ДК), A_z , дБ.

Высокочастотные характеристики кабелей характеризуют потребительские свойства кабелей. Их нужно знать при строительстве и эксплуатации кабельных линий.

Стандарт ГОСТ 34679-2020 регламентирует:

- коэффициент затухания на частотах до 39 кГц;

– переходное затухание на БК на частотах до 160 кГц.

Указанные характеристики исследуются на частотах до 16 МГц. Также исследуется защищенность на ДК.

Ниже приводится исследование высоко-частотных характеристик кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9. Исследование проведено для строительной длины 170 м. Характеристики пересчитаны к длине 100 м. Пересчет сделан для удобства сравнения с характеристиками кабеля широкополосного доступа (ШПД) похожей конструкции (ГОСТ Р 70042-2022) [6].

В таблице 2 приведены результаты измерения коэффициента затухания кабеля СБВБэпПу 4х2х0.

Анализ результатов измерения коэффициента затухания, приведенных в таблице 2 и на рисунке 1, а также сравнение с нормами этого параметра кабеля ШПД [8] показывают, что затухание в сравниваемых кабелях с диаметром медных жил 0,9 мм с повышением частоты возрастает пропорционально квадратному корню из частоты. Следовательно, можно сделать вывод о преобладании в цепях кабеля потерь в металле.

При этом частотные характеристики коэффициента затухания сигнально-блокировочного кабеля и кабеля ШПД совпадают оптимальным образом.

В таблицах 3 и 4 приведены результаты измерения суммарной мощности степеней взаимного

влияния на БК (PS NEXT) и ДК (PS ELFEXT) кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9.

Анализируя данные, приведенные в таблицах 3 и 4, а также частотные характеристики, приведенные на рисунках 2 и 3, и сравнения их с нормами кабелей ШПД в соответствии с ГОСТ Р 70042-2022 [8], следует отметить следующее:

– ГОСТ Р 70042-2022 разделяет кабели ШПД согласно диапазону частот: до 30 МГц; до 60 МГц; до 100 МГц;

– на частотах до 16 МГц кабель СБВБэпПу 4х2х0,9 имеет PS NEXT на 6-8 дБ, а PS ELFEXT на 14-18 дБ выше норм для кабеля ШПД на частотах до 30 МГц. Все это свидетельствует о высокой однородности сигнально-блокировочного кабеля марки СБВБэпПу 4х2х0,9.

Результаты измерения электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей с многопроволочными жилами

Рассмотрим электрические характеристики кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0 повышенной гибкости с многопроволочными жилами. Токопроводящая жила представляет собой стренгу, скрученную из 7 проволок по 0,427 мм. Измерялись строительные длины 0,112 км и 0,3 км. Для проведения измерений использовался измерительный комплекс «ПИКА ИКС».

Таблица 2. Коэффициент затухания кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9, дБ/100м

Пара	1,0 МГц	2,0 МГц	4,0 МГц	6,0 МГц	8,0 МГц	10,0 МГц	12,0 МГц	14,0 МГц	16,0 МГц
1	1,04	1,48	2,08	2,59	3,01	3,28	3,80	4,00	4,31
2	1,01	1,46	2,03	2,52	3,05	3,38	3,73	4,06	4,31
3	1,06	1,52	2,13	2,58	3,02	3,36	3,76	4,08	4,49
4	1,04	1,49	2,14	2,55	3,00	3,40	3,75	4,07	4,35

Таблица 3. Результаты измерения характеристики PS NEXT кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9, дБ/100м

Пара	1,0 МГц	2,0 МГц	4,0 МГц	6,0 МГц	8,0 МГц	10,0 МГц	12,0 МГц	14,0 МГц	16,0 МГц
1	55,45	48,84	45,76	41,89	38,26	36,26	39,06	34,79	37,22
2	55,90	47,89	43,53	40,63	36,67	37,48	30,58	32,09	29,25
3	52,17	45,13	42,88	46,16	37,95	39,21	35,90	32,08	31,91
4	50,52	45,58	46,53	45,58	36,93	35,19	30,67	33,87	30,29

Таблица 4. Результаты измерения характеристики PS ELFEXT кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9, дБ/100м

Пара	1,0 МГц	2,0 МГц	4,0 МГц	6,0 МГц	8,0 МГц	10,0 МГц	12,0 МГц	14,0 МГц	16,0 МГц
1	69,93	60,70	53,35	55,63	47,14	41,46	43,67	42,60	37,62
2	65,02	58,32	53,74	49,04	43,82	43,07	38,53	40,83	40,53
3	68,83	45,13	59,48	50,03	43,95	41,49	43,49	40,14	34,89
4	63,90	56,03	49,51	46,79	44,03	39,06	38,62	40,58	35,85

Низкочастотные характеристики. Низкочастотные характеристики кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0 должны соответствовать нормируемым величинам:

- величина R не более 17,8-19,9 Ом/км;
- величина ΔR не более 0,8 Ом;
- величина C не более 70 нФ/км.

Полученные результаты измерений низкочастотных характеристик кабеля были обработаны с помощью методов статистики. При нормальном законе распределения они характеризуются среднестатистическим значением и среднеквадратическим отклонением от него [7]. Низкочастотные характеристики кабеля СБВБэпПу 4х2х0,9 приведены в таблице 5.

Анализируя результаты измерения низкочастотных характеристик кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0 (таблица 5) можно заключить, что этот кабель также является достаточно однородным:

- электрическое сопротивление жил близко к норме и стабильно;
- омическая асимметрия жил меньше нормы 0,8 Ом;
- рабочая емкость меньше максимума 70 нФ/км.

Нормируемое значение омической асимметрии

жил для сигнально-блокировочных кабелей оказывается даже жестче, чем для симметричных кабелей связи. Низкая величина ΔR достигается посредством использования для производства кабелей токопроводящих жил повышенной однородности.

Высокочастотные характеристики. Высокочастотные характеристики сигнально-блокировочного кабеля с многопроволочными проводниками марки СБМВБАБпШп 19х2х1,0 на частотах до 250 кГц измерялись с помощью прибора PSM-39. В таблице 6 приведены усредненные значения коэффициента затухания, на рисунке 1 приведена частотная характеристика.

Коэффициент затухания увеличивается пропорционально квадратному корню из частоты, что характерно для преобладания потерь в металле. Коэффициент затухания соответствует требованиям ГОСТ 34679-2020.

В таблице 7 приведены усредненные значения переходного затухания на БК и защищенности на ДК, а на рисунке 2 – частотные характеристики этих параметров.

Анализ результатов исследования показывает, что нормы переходных затуханий по ГОСТ 34679-2020 выполняются. Частотные характеристики с повышением частоты уменьшаются не более, чем

Таблица 5. Низкочастотные характеристики кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

R , Ом/км		ΔR , %		C , нФ/км	
$R_{\text{ср}}$	σ	$\Delta R_{\text{ср}}$	σ	$C_{\text{ср}}$	σ
17,75	0,34	0,03	0,23	48,56	0,92

Таблица 6. Коэффициент затухания кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

Частота, кГц	0,8	10	15	20	40	60	100	160	250
α , дБ/км	0,72	1,13	1,23	1,37	1,94	2,55	3,23	3,74	4,98

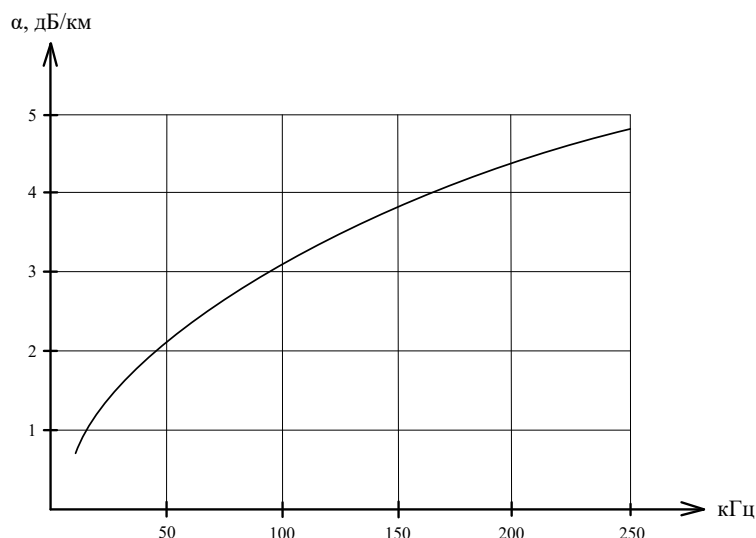
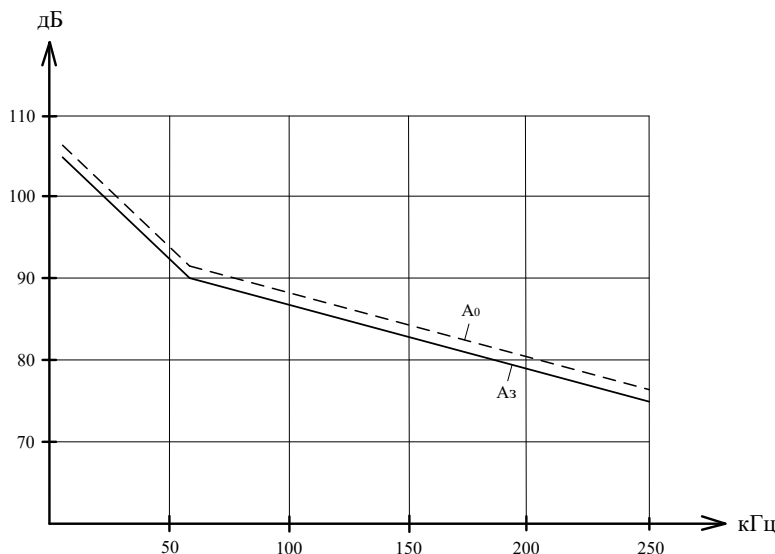


Рисунок 1. Частотная характеристика коэффициента затухания кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

Таблица 7. Характеристики взаимного влияния кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

Частота, кГц	0,8	10	15	20	40	60	100	160	250
A_0 , дБ	106	104	101	99	94	90	86	82	76
A_3 , дБ	105	103	100	98	93	91	84	80	75

Рисунок 2. Частотные характеристики переходного затухания на БК (A_0) и защищенности на ДК (A_3) кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0

до 6 дБ/окт, что характерно для преобладания непосредственного влияния за счет нерегулярной составляющей. Теоретические и экспериментальные результаты хорошо согласуются [9; 10]. Результаты исследования свидетельствуют о высокой однородности кабеля СБМВБАБпШп 19х2х1,0.

Заключение

Выполненное исследование электрических характеристик сигнально-блокировочных кабелей позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Показано, что низкочастотные характеристики кабелей соответствуют нормам ГОСТ 34679-2020.

2. Показано, что производство изолированных проводников сигнально-блокировочных кабелей, так же, как и любых других симметричных кабелей связи, осуществляется на технологических автоматических линиях, оборудованных системами автоматического регулирования, что обеспечивает высокую стабильность их электрических характеристик.

Высокая однородность изолированной токопроводящей жилы во многом обеспечивает стабильность электрических характеристик кабеля.

3. Установлено, что высокочастотные характеристики сигнально-блокировочных кабелей удовлетворяют нормам кабелей ШПД (ГОСТ Р 70042-2022).

4. Высокие электрические характеристики

сигнально-блокировочных кабелей АО «Самарская Кабельная Компания» показывают целесообразность их использования не только на технологических сетях СЦБ железнодорожного транспорта, но и в других ведомствах, где используются симметричные кабели связи.

Литература

1. Кабели и провода. Основы кабельной техники / А.И. Балашов [и др.]; под ред. И.Б. Пешкова. М.: Энергоатомиздат, 2009. 467 с.
2. ТУ 16.К71-297-2000. Кабели для сигнализации и блокировки с полиэтиленовой изоляцией в металлической оболочке с гидрофобным заполнением. М.: ВНИИКП, 2015. 58 с.
3. ГОСТ 34679-2020. Кабели для сигнализации и блокировки. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 32 с.
4. Качество LAN-кабелей – основа надежной работы СКС и сетей ШПД / Андреев В. [и др.] // Первая миля. 2020. № 1 (86). С. 34–37.
5. Гроднев И.И., Сергейчук К.Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. М.: Связьиздат, 1960. 316 с.
6. Гроднев И.И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. М.: Связь, 1972. 111 с.
7. Шварцман В.О. Взаимные влияния в кабелях связи. М.: Связь, 1996. 416 с.
8. ГОСТ Р 70042-2022. Кабели связи симметричные.

- ные для сетей широкополосного доступа. Общие технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 42 с.
9. Направляющие системы электросвязи: учебник для вузов / В.А. Андреев [и др.]; под редакцией В.А. Андреева; 8-е изд. М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 396 с.

10. Попов Б.В., Попов В.Б., Сабиров Р.Н. Электрические характеристики кабеля с многопроволочными проводниками // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 10. С. 27–29.

Получено 03.07.2024

Попов Борис Владимирович, к.т.н., профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443090, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 228-00-66. E-mail: inkat@inbox.ru

Попов Виктор Борисович, к.т.н., профессор кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. 443090, Российская Федерация, г. Самара, ул. Московское шоссе, 77. Тел. +7 846 228-00-66. E-mail: inkat@inbox.ru

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF SIGNAL-LOCKING CABLES

Popov B.V., Popov V.B.

Povolzhskiy State University of telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation

E-mail:inkat@inbox.ru

With the increase of transportation volumes on the country's railways, the requirements for ensuring their safety and reliability are also increasing. One of the technical components of ensuring the safety and reliability of railway transport is the cable infrastructure of railways, in which a special role is given to signaling and interlocking cables. High-quality signal-locking cables must have characteristics that strictly comply with GOST requirements. The article presents the results of experimental studies and analysis of the electrical characteristics of transmission and mutual influences of signal-locking cables with single-wire and multi-wire conductors. It was proved that the production of insulated conductors of signal-locking cables, as well as of any other symmetrical communication cables, is realized on an extrusion line equipped with automatic control systems, which ensures high stability of their electrical characteristics. Practical recommendations for the use of signal-blocking cables not only in railway transport, but also in other departments that use symmetrical communication cables are also provided in this study.

Keywords: *signal-locking cables, production technology, regulatory documents, low-frequency characteristics, high-frequency characteristics*

DOI: 10.18469/ikt.2024.22.1.06

Popov Boris Vladimirovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Professor of Communication and Measurement in Communications Technology Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 846 228-00-66. E-mail: inkat@inbox.ru

Popov Victor Borisovich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 77, Moskovskoe shosse, Samara, 443090, Russian Federation; Professor of Communication and Measurement in Communications Technology Department, PhD in Technical Science. Tel. +7 846 228-00-66. E-mail: inkat@inbox.ru

References

1. Balashov A.I. et al. *Cables and Wires. Fundamentals of Cable Technology*. Ed. by I.B. Peshkova. Moscow: Energoatomizdat, 2009. 467 p. (In Russ.)
2. U 16.K71-297-2000. Cables for Signaling and Interlocking with Polyethylene Insulation in a Metal Shell with Hydrophobic Filling. Moscow: VNIIPK, 2015, 58 p. (In Russ.)
3. GOST 34679-2020. Cables for signaling and interlocking. General technical conditions. Moscow: Standartinform, 2020, 32 p. (In Russ.)

4. Andreev V. et al. Quality of LAN cables – the basis for reliable work of SCS and broadband networks. *Pervaya milya*, 2020, no. 1 (86), pp. 34–37. (In Russ.)
5. Grodnev I.I., Sergeychuk K.Ya. *Shielding of Equipment and Communication Cables*. Moscow: Svyaz'izdat, 1960, 316 p. (In Russ.)
6. Grodnev I.I. *Electromagnetic Shielding in a Wide Frequency Range*. Moscow: Svyaz', 1972, 111 p. (In Russ.)
7. Shvartsman V.O. *Mutual Influences in Communication Cables*. Moscow: Svyaz', 1996, 416 p. (In Russ.)
8. GOST R 70042-2022. Symmetrical communication cables for broadband access networks. General technical conditions. Moscow: Rossijskij institut standartizacii, 2022, 42 p. (In Russ.)
9. Andreev V.A. et al. *Guiding Telecommunication Systems: Textbook for Universities*. Ed. by V.A. Andreeva. 8th ed. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2018, 396 p. (In Russ.)
10. Popov B.V., Popov V.B., Sabirov R.N. Electrical characteristics of transmission cables with multi-wire conductors. *Avtomatika, svyaz', informatika*, 2023, no. 10, pp. 27–29. (In Russ.)

Received 03.07.2024

АНТЕННЫ, АФУ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 681.586

ПРЕДКОРРЕКЦИЯ ФАЗОЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Шакурский М.В.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: m.shakurskiy@psuti.ru

Статья посвящена синтезу компьютерной модели цифрового фильтра с нулевой фазочастотной характеристикой. Известна структурная реализация цифрового фильтра с нулевой фазочастотной характеристикой на основе двойной фильтрации сигнала в прямом и обратном направлениях, а также на основе фильтров с конечной импульсной характеристикой. В данной статье рассматривается реализация фильтра с нулевой фазочастотной характеристикой на основе фильтров с бесконечной импульсной характеристикой. Реализация предкоррекции фазочастотной характеристики фильтра достигается путем использования двухканальной структурной схемы с переносом спектра входного сигнала. Сложность использования фильтров с бесконечной импульсной характеристикой обусловлена ее нелинейностью, что требует предварительной коррекции с целью линеаризации фазочастотной характеристики. В статье рассматривается как математическая модель прохождения сигнала через структурную схему, так и компьютерную модель в среде Matlab-Simulink в статическом и динамическом режимах.

Ключевые слова: цифровой фильтр, нулевая фазочастотная характеристика, моделирование, система реального времени, структурная реализация фильтра

Введение

В задачах цифровой обработки сигналов [1; 2] реализация фильтра с нулевой фазочастотной характеристикой (ФЧХ) относится к нереализуемым задачам, так как она подразумевает нулевую задержку сигнала. Однако ее реализация невозможна только в реальном времени. Вне реального времени существуют решения для цифровой фильтрации с нулевой ФЧХ. Для фильтров с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) существует оригинальное решение относительно реализации цифрового фильтра за счет двукратной фильтрации сигнала в прямом и обратном направлениях последовательности отсчетов с

помощью стандартного алгоритма фильтрации, что позволяет получить фильтр с нулевой фазочастотной характеристикой. Один из наиболее известных примеров – функция `filtfilt` [3] в среде MATLAB. Для фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) существуют решения на основе задержки сигнала [4–6].

Однако также известна реализация цифрового фильтра с нулевой ФЧХ в реальном времени, в которой сохраняется фундаментальный принцип задержки. В качестве примера такой реализации рассмотрим гармонический сигнал. Если допустить, что выходной сигнал отстает на один или несколько периодов, то фактически фазовый сдвиг будет равен нулю. Распространяя на полосу