

Повышение эффективности высокоскоростной контактной подвески на переменном токе

ШЕВЛЮГИН М.В., СЕМЕНОВА Д.В.

РУТ(МИИТ), Москва, Россия

При разработке высокоскоростной контактной подвески для железных дорог, электрифицированных на переменном токе, важно обеспечить проход электроподвижным составом нейтральной вставки без отключения тока и без снижения скорости движения. В статье дается анализ ранее разработанных устройств в области электроснабжения электрифицированных железных дорог однофазного переменного тока, в которых была сделана попытка прохода электроподвижным составом нейтральной вставки без отключения нагрузки. Описано устройство изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе. При этом проход нейтральной вставки осуществляется под током и торможение электроподвижного состава не произойдет. Среди прочего, для повышения эффективности высокоскоростной контактной подвески для железных дорог, электрифицированных на переменном токе, предложено использовать новые материалы и новые технологии, которые можно применять в устройстве изолирующего сопряжения контактной сети.

Ключевые слова: высокоскоростные железнодорожные магистрали, контактная сеть, контактная подвеска, электроподвижной состав, нейтральная вставка контактной сети, устройство изолирующего сопряжения контактной сети, наноккомпозит

Стратегия развития железнодорожного транспорта Российской Федерации до 2030 г. предусматривает строительство сети высокоскоростных магистралей (далее – ВСМ), где планируется организовать движение со скоростями более 300 км/ч. Создание высокоскоростных железных дорог позволит улучшить транспортное сообщение, повысить комфорт и безопасность пассажирских перевозок, сократить время в пути и увеличить пассажиропоток.

Повышение транспортной доступности вместе с ростом мобильности населения регионов станут мощным фактором экономического роста России, а реализация проектов высокоскоростной железной дороги будет стимулировать развитие высокотехнологичных производств [1].

Для повышения надежности и безопасности высокоскоростных перевозок реализовано множество передовых идей. Так, в [2] предложена замена двух пантографов одним для снижения шума, из-за уменьшения веса и лучшего натяжения это привело и к повышению качества. Была создана бортовая информационная сеть с контрольным блоком, работа которого направлена на повышение безопасности за счет управления скоростью и торможением в случае пробуксовки или скольжения колес. Также были внедрены системы мониторинга вибраций и новые вагонные тележки, которые не только снизили вибрации и повысили надежность, но и способны в автоматическом режиме осуществлять наклон подвижного состава.

Однако следует отметить, что на высоких скоростях условия динамического взаимодействия между токоприемником и подвесной цепью сильно ухудшаются.

В широком диапазоне условий эксплуатации должны быть обеспечены высокая надежность и безотказная работа [3]. Технические решения для ВСМ России не могут быть напрямую перенесены с зарубежных аналогов. Разрабатывая контактную сеть для высокоскоростных линий, необходимо учитывать все характеристики постоянного и переменного тока [4]. Разработка контактной сети высокоскоростной линии должна быть спланирована как комплексный проект, результатом которого станет не только техническое решение по узлам контактной сети, но и технология проектирования контактной сети, технология строительно-монтажных работ, а также правила эксплуатации и технического обслуживания [5]. Только такой комплексный подход может обеспечить необходимую конкурентоспособность.

Основной подсистемой контактной сети является контактная подвеска, которая является системой проводов, предназначенная для передачи электрической энергии от тяговой подстанции к электроподвижному составу (далее – ЭПС) через скользящий контакт с токоприемником [6]. При разработке высокоскоростной контактной сети для железных дорог переменного тока наиболее сложная задача – обеспечение контактной подвеской проход ЭПС нейтральной вставки под рабочим током [7].

Участки линии однофазной контактной сети переменного тока, чередуясь, питаются от разных фаз железной дороги. Контактная сеть слева и справа от подстанции запитана от разных фаз тягового трансформатора (фазы *АС* и *ВС*). Для того чтобы исключить короткое замыкание между фазами *A* и *B*, устанавливаются два изолирующих сопряжения, между которыми

включается участок контактной подвески, не присоединенный ни к одной из фаз трансформатора. Такое подключение называется «нейтральной вставкой контактной сети» [8]. По условиям эксплуатации железных дорог переменного тока не допускается прохождение нейтральных вставок и изолирующих сопряжений под действием тяговой нагрузки. Несоблюдение этого условия вызовет образование открытой электрической дуги на изолирующих сопряжениях, в результате возникнет короткое замыкание между фазами *A* и *B* тягового трансформатора и контактная сеть будет перегорать [8, 9]. Длину нейтральной вставки принимают больше, чем расстояние между крайними токоприемниками ЭПС при любом сочетании включенных токоприемников. Так, при эксплуатации ЭПС на 16 вагонов длина нейтральной вставки составляет 400–500 м.

Прохождение нейтральной вставки под нагрузкой и переключение токоприемником ЭПС последовательно обоих изолирующих сопряжений приводит к образованию двух электрических дуг, которые будут существовать и после проезда нейтральной вставки ЭПС. В этом случае между фазами *A* и *B* возникает устойчивое короткое замыкание, на которое релейная защита фидера смежных подстанций не настроена (отсутствует настройка защиты на угол между током и напряжением при замыкании "за спиной" питающих фидеров) [10, 12].

Время прохода фидерной зоны на скоростной магистрали, т. е. зоны между нейтральными вставками, сокращается до 12–15 мин, а при достижении необходимой скорости 400 км/ч время сокращается до 8 мин. Лобовое сопротивление поездов на скоростях 100–200 и 400 км/ч обычно составляет 20–25 кН, что приведет к резкому падению скорости поезда после выключения тягового двигателя. После прохождения через нейтральную вставку дополнительно возрастет потребление энергии, используемой для разгона поезда до скорости движения [11].

При таком режиме работы происходят постоянные смены режимов движения, торможения на выбеге и разгон ЭПС, что создает некомфортные условия для пассажиров. Средняя скорость на магистрали на сегодня составляет около 170 км/ч. Если рассматривать более высокие скорости движения, такие как 250 км/ч, а тем более 400 км/ч, то эти негативные последствия будут только усугубляться.

Анализ разработанной ранее технологии прохождения нейтральной вставки контактной сети на переменном токе показывает, что в настоящее время не существует приемлемого устройства для прохождения нейтральной вставки контактной сети под током.

Разработка «Контактная сеть переменного тока» [13] направлена на исключение человеческого фактора с исполнительным органом защиты от возникновения разрушительной дуги.

Оборудование электроснабжения, разработанное для контактной сети переменного тока [14] (далее – устройство электроснабжения), решало две проблемы: устранение человеческого фактора и обеспечение прохода нейтральной вставки без отключения тяговых нагрузок ЭПС.

В устройстве электроснабжения исполнительным органом защиты от возникновения разрушительной дуги является отдельно стоящий высоковольтный выключатель, принадлежащий нейтральной вставке.

Переключатель высокого напряжения используется в качестве компонента для отключения тягового тока при переходе на изолированное сопряжение, тем самым устраняя появление дуги в контактной сети и создавая условия для прохождения нейтральной вставки без отключения нагрузки ЭПС.

Однако использование высоковольтных выключателей имело множество недостатков:

1. Недостаточная эксплуатационная надежность: даже незначительные нарушения в многозвенной цепи управления выключателем могут стать причиной серьезных аварий;

2. Скорость проследования ограничена, т.е. чем выше скорость ЭПС, тем больше сближается механическое время срабатывания цепи управления с временем прохождения изолированного промежутка, и это может привести к межфазному перекрытию нейтральной вставки. Когда скорость прохода нейтральной вставки ЭПС составляет 200 км/ч, время срабатывания цепи управления становится критическим;

3. Моторесурс высоковольтного выключателя ограничен. Для определения времени выхода его из работы необходим непрерывный мониторинг за накоплением и передачей данных;

4. Регулярное плановое обслуживание, вызванное отказом выключателя, потребует дополнительных затрат на рабочую силу.

Необходимо разработать устройство, исключающее перечисленные недостатки, с сохранением функции проследования ЭПС через нейтральную вставку без отключения нагрузки.

Таким является устройство изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки высокоскоростной железной дороги переменного тока (далее – устройство изолирующего сопряжения контактной сети) [12]. В качестве исполнительного органа защиты от возникновения разрушительной дуги применяются ступенчатые переменные активные сопротивления, включенные в подходящую и отходящую части нейтральной вставки контактной сети, представленные на рис. 1 и 2. Эти ступенчатые сопротивления состоят из двух частей, а именно:

контактная часть – продолжение контактной линии и замена той части, которая подходит или отходит от изолированного промежутка, изображена на рис. 1;

вторая часть – набор гасящих сопротивлений, шлейфы которых подключены к контактной части. Эти сопротивления расположены на изолированном рессорном тросе, который поддерживает контактную часть подвески, и представлены на рис. 2.

Контактная часть – ряд набранных в последовательную цепь изолированных и токопроводящих частей, по форме напоминающих контактный провод. Длина изолирующей части не должна превышать ширину контактной части лыжи токоприемника. К токо-

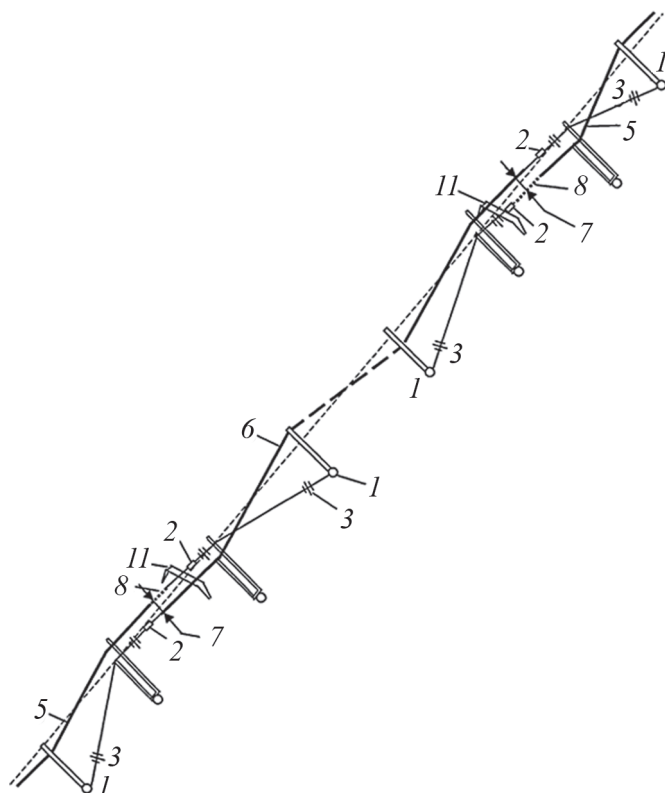


Рис. 1. Вид сверху на устройство изолирующего сопряжения контактной сети

Fig. 1. Top view of the contact network isolation interface device

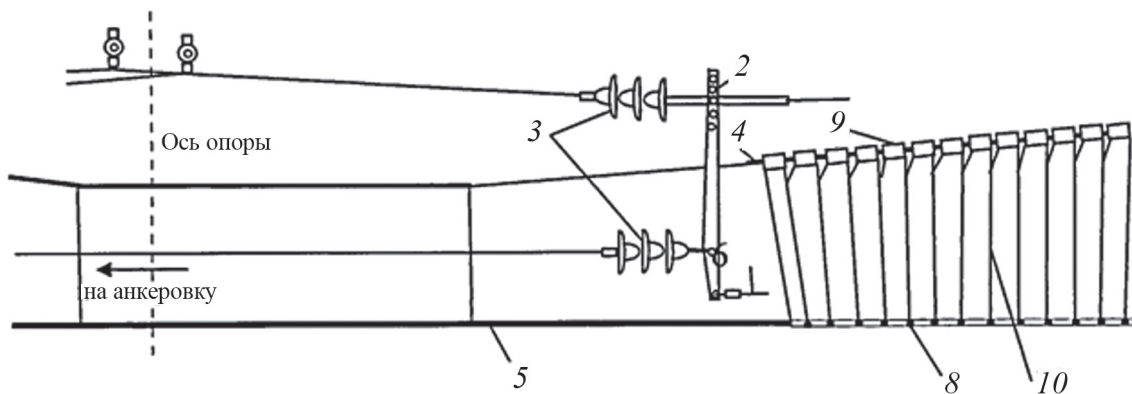


Рис. 2. Вид сбоку на устройство изолирующего сопряжения контактной сети

Fig. 2. Side view of the contact network isolation interface device

проводящим элементам контактной части подключены шлейфы сопротивлений, выполняющих функцию постепенного снижения или увеличения тока нагрузки ЭПС в зависимости от перемещения токоприемника. Ток нагрузки снижается до значения тока, не способного вызвать разрушения при отрыве лыжи токоприемника от последнего элемента сопротивления. Согласно уравнению теплового баланса мощность сопротивления рассчитывается в зависимости от времени, в течение которого сопротивление находится под напряжением.

На рис. 1 и 2 показаны: анкерные опоры контактной сети (1); коромысло (2); гирлянда изоляторов (3); изолированный рессорный трос (4); питающие контак-

ные провода (5); изолированный контактный провод нейтральной вставки (6); изолированные промежутки (7); контактная часть переменного сопротивления (8); гирлянда сопротивлений части переменного сопротивления (9); шлейфы переменного сопротивления (10); токоприемник (11).

Работа устройства изолирующего сопряжения контактной сети в момент прохождения ЭПС нейтральной вставки осуществляется следующим образом: токоприемник 11, снимая ток тяговой нагрузки при следовании по рабочему контактному проводу 5 и подходя к изолированному промежутку 7, начинает скользить по контактной части 8 переменного сопротивления

(8, 10, 9). Контактная часть 8 переменного сопротивления (8, 10, 9) представляет собой чередование изолированных и токоведущих частей. Токоведущие части соединены шлейфами 10 с гирляндой сопротивлений 9, расположенные на изолированном рессорном тросе 4. Элементы 8, 10, 9 выполняют функцию ступенчатого переменного сопротивления, которое при движении токоприемника 11 по контактной части 8 снижает ток потребления ЭПС до безопасного, не приносящего разрушения элементам контактной сети при отрыве от последнего контактного элемента 8 и перехода на изолированный нерабочий контактный провод нейтральной вставки 6, изолированный за счет изолированных промежутков 7. При дальнейшем движении токоприемника 11 к переходу с нейтральной вставки 6 через изолированный промежуток 7 на рабочий питающий контактный провод 5 также вставляется ступенчатое переменное сопротивление, состоящее из элементов 8, 10, 9. В этом месте применение переменного сопротивления также необходимо для снижения тока, так как при приближении токоприемника 11 к рабочему контактному проводу 5 (не касаясь его), у которого напряжение 27,5 кВ, произойдет пробой воздуха, и при большом токе неизбежно разрушение токоведущих частей.

Переменное сопротивление (8, 10, 9), по которому движется токоприемник 11, повысит ток до номинального значения, и тяга ЭПС будет восстановлена. Проход устройства изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе, будет практически мгновенным и на торможение ЭПС не повлияет. Движение ЭПС будет равномерным, и с увеличением скорости будет расти надежность устройства изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе.

Устройство изолирующего сопряжения – громоздкое, массивное устройство, использующее несущие тросы в качестве магазина сопротивлений. Технически сложным является и контактная часть переменного сопротивления линии вместе со шлейфами. При интенсивной эксплуатации устройство изолирующего сопряжения контактной сети будет иметь ограниченный срок службы.

Поэтому для повышения эффективности высокоскоростной контактной подвески для железных дорог, электрифицированных на переменном токе, предлагается использовать в качестве материала провода композит, попадающий в наноразмерный диапазон и обладающий при этом высокими параметрами износостойкости и электросопротивления. Важно отметить, что изделия из композитов более надежны и долговечны в работе, чем их аналоги из различных видов металлов, так как у деталей из композитных материалов отсутствуют сварные швы, концентраторы напряжений и зоны низкой химической стойкости.

Основные причины необходимости активно заменять традиционные материалы новыми, такими, например, как нанокompозиты, – это, в первую очередь, их впечатляющие физические и химические характеристики: высокая коррозионная стойкость, повышенная прочность и, соответственно, износостойкость, изолирующие свойства, высокое электросопротивление.

На фоне изложенных управляемых структурных изменений возможно получить такой материал провода, который будет устойчив к негативным атмосферным явлениям, долговечен, экологически безопасен и не потребует специального обслуживания. Эти факторы особенно важны с учетом огромной протяженности российских железных дорог, значительная часть которых проходит по районам с экстремальными климатическими условиями [15]. Применение таких новых материалов в устройстве изолирующего сопряжения контактной сети обеспечит полную надежность этого устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Распоряжение Правительства РФ** от 17.06.2008 N 877-р «О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г. (вместе с “Планом мероприятий по реализации в 2008 – 2015 гг. Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.”).
2. **Asano Koji.** JR East High-speed Rolling Stock Development. – JR East Technical Review, 2017, No.36, pp. 1–6.
3. **Glover J.D., Overbye T.J., Sarma M.S.** Power System Analysis and Design. 6th Ed. Boston, 2017, 962 p.
4. **Мамошин Р.Р., Зимакова А.Н.** Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1980, 296 с.
5. **Фрайфельд А.В., Брод Г.Н.** Проектирование контактной сети. М.: Транспорт, 1991, 335 с.
6. **Михеев В.П.** Контактные сети и линии электропередачи. М.: Маршрут, 2003, 416 с.
7. **Беляев И.А.** Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении. М.: Транспорт, 1989, 143с.
8. **Марквардт К.Г., Власов И.И.** Контактная сеть. 3-е изд. М.: Транспорт, 1977, 272 с.
9. **Правила** технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утв. Приказом Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286.
10. **Беляев И.А.** Машинисту о контактной сети и токосъеме. М.: Транспорт, 1986, 128 с.
11. **Зимакова А.Н., Гиенко В.М., Скворцов В.А.** Контактная сеть электрифицированных железных дорог. Расчеты, выбор конструкций и составление монтажных планов: Учебное пос., 2-е изд. М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011, 232 с.
12. **Пат. RU 2533768C1.** Устройство изолирующего сопряжения контактной сети и нейтральной вставки для высокоскоростных магистралей железных дорог, электрифицированных на переменном токе / Е.Ю. Семенова, В.И. Карпенко, Ю.В. Иодко, Д.В. Семенова. 2006.
13. **Пат. RU 2071426.** Контактная сеть переменного тока / А.В. Котельников, А.В. Кузнецов, Г.В. Кузнецов, В.В. Мунькин, О.В. Петропавлова, Г.Б. Якимов. 1997.
14. **Пат. RU 2404500C1.** Контактная сеть переменного тока / А.В. Кузнецов, В.И. Уманский, Г.В. Кузнецов, Д.Г. Кузнецов. 2010.
15. **Слепцов В.В., Диесперова И.И., Бизюков А.А., Дмитриев С.Н.** Физико-химические аспекты формирования нанокompозитных структур. – Нано- и микросистемная техника, 2020, №. 1, с. 16–27.



Авторы: **Шевлюгин Максим Валерьевич** – доктор техн. наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ).



Семенова Дарья Владимировна – ассистент кафедры «Электроэнергетика транспорта» Российского университета транспорта (МИИТ), аспирант.

Elektrichestvo, 2021, No. 5, pp. 39–43

DOI:10.24160/0013-5380-2021-5-39-43

Improving the Efficiency of High-Speed AC Contact Suspension

SHEVLYUGIN Maksim V. (Russian University of Transport – RUT MIIT, Moscow, Russia) – Head of the Electric Power Engineering of Transport Dept., Dr. Sci. (Eng.).

SEMENOVA Daria V. (Russian University of Transport – RUT MIIT, Moscow, Russia) – Assistant of the Electric Power Engineering of Transport Dept., Postgraduate student.

When developing a high-speed contact suspension for railways electrified with alternating current, it is important to ensure that the electric rolling stock passes the neutral insert without turning off the current and without reducing the speed of movement. The article provides an analysis of previously developed devices in the field of power supply of electrified railways of single-phase alternating current, in which an attempt was made to pass an electric rolling stock of a neutral insert without disconnecting the load. The device of isolating coupling of a catenary and a neutral insert for high-speed railway lines electrified on alternating current is described. In this case, the passage of the neutral insert is carried out under current and braking of the electric rolling stock will not occur. Among other things, to improve the efficiency of high-speed contact suspension for railways electrified with alternating current, it is proposed to use new materials and new technologies that can be used in the device of insulating coupling of the catenary.

К е y w o r d s: high-speed railway lines, catenary, contact suspension, electric rolling stock, neutral insert of catenary, catenary insulating device, nanocomposite

REFERENCES

1. *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 17.06.2008 N 877-p «O Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 g. (vmeste s "Planom meropriyatiy po realizatsii v 2008 – 2015 gg. Strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiyskoy Federatsii do 2030 g.")* (Order of the Government of the Russian Federation of 17.06.2008 N 877-r "On the Strategy for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030 (together with the" Action Plan for implementation in 2008-2015 Strategies for the development of railway transport in the Russian Federation until 2030")).
2. **Asano Koji.** JR East High-speed Rolling Stock Development. – JR East Technical Review, 2017, No.36, pp. 1–6.
3. **Glover J.D., Overbye T.J., Sarma M.S.** Power System Analysis and Design. 6th Ed. Boston, 2017, 962 p.
4. **Mamoshin R.R., Zimakova A.N.** *Elektrosnabzheniye elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog* (Electricity supply for electrified railways). M.: Transport, 1980, 296 p.
5. **Frayfel'd A.V., Brod G.N.** *Proyektirovaniye kontaktnoy seti* (Design of the contact network). M.: Transport, 1991, 335 p.
6. **Mikheyev V.P.** *Kontaktnyye seti i linii elektroperedachi* (Contact networks and power lines). M.: Marshrut, 2003, 416 p.
7. **Belyayev I.A.** *Ustroystvo i obsluzhivaniye kontaktnoy seti pri vysokoskorostnom dvizhenii* (Installation and maintenance of the contact network in high-speed traffic). M.: Transport, 1989, 143 p.
8. **Markvardt K.G., Vlasov I.I.** *Kontaktnaya set'*. 3-ye izd. (Contact network. The 3rd ed.). M.: Transport, 1977, 272 p.
9. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii zheleznnykh dorog Rossiyskoy Federatsii. Utv. Prikazom Mintransa Rossii ot 21.12.2010 g. No. 286* (Rules of railways technical operation of the Russian Federation. By the order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of 21.12.2010. No. 286).
10. **Belyayev I.A.** *Mashinistu o kontaktnoy seti i tokos"yeme* (To the driver about the contact network and current collection). M.: Transport, 1986, 128 p.
11. **Zimakova A.N., Giyenko V.M., Skvortsov V.A.** *Kontaktnaya set' elektrifitsirovannykh zheleznnykh dorog. Raschety, vybor konstruktivnykh i sostavleniye montazhnykh planov: Uchebnoye pos., 2-ye izd.* (Contact network of electrified railways. Calculations, selection of structures and preparation of installation plans: Tutorial, the 2nd ed.). M.: FGOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 2011, 232 p.
12. **Pat. RU 2533768C1.** *Ustroystvo izoliruyushchego sopryazheniya kontaktnoy seti i neytral'noy vstavki dlya vysokoskorostnykh magistralnykh zheleznnykh dorog, elektrifitsirovannykh na peremennom toke* (Device for isolating the interface of the contact network and the neutral insert for high-speed railway lines electrified with alternating current) / E.Yu. Semenova, V.I. Karpenko, Yu.V. Iodko, D.V. Semenova, 2006.
13. **Pat. RU 2071426.** *Kontaktnaya set' peremennogo toka* (AC contact network) / A.V. Kotelnikov, A.V. Kuznetsov, G.V. Kuznetsov, V.V. Mun'kin, O.V. Petropavlova, G.B. Yakimov. 1997.
14. **Pat. RU 2404500C1.** *Kontaktnaya set' peremennogo toka* (AC contact network) / A.V. Kuznetsov, V.I. Umanskiy, G.V. Kuznetsov, D.G. Kuznetsov. 2010.
15. **Sleptsov V.V., Diyesperova I.I., Bizyukov A.A., Dmitriyev S.N.** *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika – in Russ. (Nano- and Microsystems Technology)*, 2020, No. 1, pp.16–27.

[28.12.2020]