ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗОЛЯТОРОВ ЛИНИЙ СВЯЗИ в 19 веке

Часть 1

Е.Сухов, мл. науч. сотр. НИУ Московский авиационный институт / Sukhov.george@gmail.com

УДК 621.315.622, DOI: 10.22184/2070-8963.2020.89.4.70.78

С развитием электросвязи в 19 веке значительное распространение получили воздушные линии (ВЛС), предназначенные для передачи электрических сигналов по проводам, подвешенным на специальных опорах. Для укрепления проводов на опорах применялись различные виды изоляторов и арматуры, от надежности которых в значительной мере зависела надежность функционирования линии связи в целом. В первой части статьи приведены краткие сведения об условиях проектирования изоляторов ВЛС и о материалах, применявшихся для их производства, представлен обзор ранних конструкций телеграфных изоляторов и арматуры 19 века.

ВВЕДЕНИЕ

Век "пара и электричества" отмечен многими важными изобретениями и открытиями, повлиявшими на развитие цивилизации. Одним из них без сомнения стал электромагнитный телеграф. В исторической литературе подробно описаны различные системы телеграфных аппаратов, а также изложены важнейшие открытия в области электромагнетизма, заложившие основы электросвязи. Однако практическое использование телеграфа было бы весьма ограничено или вовсе невозможно без создания протяженных и надежных линий связи. С развитием телеграфного дела в конце первой половины 19 века широкое распространение получили так называемые воздушные телеграфные линии. Они, подобно железным дорогам, не только объединили города и страны, но и изменили внешний облик планеты.

В статье идет речь о развитии конструкций одного из наиболее ответственных элементов ВЛС – линейного изолятора. Краткая историческая справка по конструкциям линейных изоляторов ранее приводилась в технической литературе, например в [1], а также в работах по истории электросвязи [2].

В настоящей же работе дан более подробный иллюстрированный обзор ранних конструкций изоляторов и линейной арматуры.

С технической точки зрения воздушная телеграфная линия – это открытая электроустановка, состоящая из железных (в современном понимании – изготовленных из низкоуглеродистой стали), медных или биметаллических проводов, подвешенных на опорах или столбах, и предназначенная для передачи электрических сигналов между телеграфными станциями. В 19 веке провода телеграфных линий наиболее часто изготавливали из неизолированной железной проволоки, а опоры – из дерева [3, 4, 5]. Значительно реже опоры делали из трубчатого железа или сортового проката. Чтобы электрически изолировать провод от опоры применялись линейные изоляторы различных конструкций.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЛИНЕЙНЫМ ИЗОЛЯТОРАМ

Качество телеграфной связи в значительной мере определяется электрическим сопротивлением линейной изоляции. При недостаточном уровне изоляции,

Рис.1. Изоляторы из коллекции Е.А.Сухова. Слева направо: фирмы "Сименс и Гальске" (1864–65 гг.), российский образца 1858–64 годов, российский образца 1864–70 годов

который может возникнуть из-за наличия на линии дефектных изоляторов или неудачного выбора их конструкции, токи утечки между проводами и землей становятся настолько значительными, что передаваемый сигнал может ослабевать вплоть до полной неразличимости, а на многопроводных линиях может также возникать перекрестное сообщение между соседними цепями.

Так как телеграфные изоляторы работают при низком напряжении и в то же время эксплуатируются на открытом воздухе, их основным электрическим параметром является поверхностное сопротивление. Данная характеристика определяется формой и материалом изолятора, загрязненностью его поверхности, а также состоянием окружающей среды. На практике для оценки поверхностного сопротивления применяется величина, называемая длиной пути утечки (рис.2) – наименьшее расстояние по поверхности изолятора b , разделяющее детали с разным электрическим потенциалом (провод a и опорную конструкцию $в$). Исходя из этого, форму изолятора выбирают так, чтобы максимизировать путь утечки, в том числе при неблагоприятных погодных условиях. Подобные условия возникают в туман, дождь или при выпадении росы, так как в этих случаях поверхность изолятора может покрываться сплошной проводящей пленкой. Загрязнения или шероховатость также способствуют увлажнению поверхности изолятора.

В процессе эксплуатации на изоляторы действуют значительные механические нагрузки: вес и статическая сила натяжения проводов, а также динамические нагрузки при порывах ветра и падении гололеда. Механическая надежность изолятора

Рис.2. Путь утечки в сухую погоду (I_I) и в дождь (I_{II})

в значительной мере зависит от способа его крепления к опоре, а также от способа прикрепления провода.

В связи с тем, что наличие на линии даже одного дефектного изолятора может привести к перерыву в сообщении, а его обнаружение может представлять существенную трудность, уже в 1860–70-х годах в телеграфных ведомствах различных стран существовали технические требования к форме, материалу и методике испытания изоляторов. К примеру, в [5] приводятся такие требования для российских казенных линий, а в [4] – для германских линий.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕЛЕГРАФНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

В 19 веке при производстве изоляторов наиболее часто применялись различные виды керамики и стекло [4]. Данные материалы наиболее полно удовлетворяли сформулированным выше требованиям.

Из керамики наиболее предпочтительным для производства изоляторов является "твердый" фарфор, производимый из каолина, полевого шпата, кварца и различных добавок [6, 7]. Из данных компонентов приготавливается однородная тестообразная масса, которая затем формируется прессованием в формы и точением, сушится и подвергается предварительному обжигу. Перед повторным обжигом для защиты фарфора и создания гладкой поверхности изоляторы покрываются глазурью, приготовляемой из тех же компонентов, что и фарфоровая масса.

Недостатки фарфора связаны с различными дефектами его производства – образованием трещин при

Рис.3. Американские стеклянные изоляторы с выемкой 1846 года (а), 1847 года (б) и метод их крепления

неравномерной усадке материала, облупливанием глазури или наличием каверн. При эксплуатации данные дефекты приводят к постепенному разрушению фарфора, падению сопротивления изолятора и иногда к его пробое. При этом внешне дефектный изолятор может не отличаться от исправного, особенно в том случае, если фарфоровая изолирующая деталь защищена снаружи металлической оболочкой.

Стеклянные изоляторы изготавливаются из незакаленного стекла, отливаемого в многоразовые формы. К недостаткам такого стекла относится высокая хрупкость. При этом стеклянные изоляторы значительно проще в производстве по сравнению с фарфоровыми.

В российской [5] и европейской практике предпочтение отдавалось фарфору или керамике, в то время как в США телеграфные изоляторы изготавливались преимущественно из стекла [3, 4, 8]. В некоторых случаях для изготовления изоляторов также применялись различные полимерные материалы, такие как эбонит и гуттаперча. Будучи простыми в производстве, эти изоляторы были весьма недолговечными из-за разрушения материала под воздействием ультрафиолета.

Конструкции изоляторов 1840-х – начала 50-х годов

Наиболее ранние способы изоляции проводов воздушных телеграфных линий были основаны на использовании подкладок или трубок из стекла или керамики, а также пропитанных изолирующими веществами тканей. Подобный метод описан в патенте В.Кука от 8 сентября 1842 года [9, 10]. Согласно данному методу, провод обматывался в месте крепления

шелковой или хлопковой нитью, покрывался каучуком или смолой и вкладывался в трубку из железа, дерева или фарфора, которая крепилась к деревянному столбу. Для защиты от дождя место крепления провода закрывалось козырьком. В качестве дополнительной защиты применялось обжигание поверхности столба, что позволяло создать вокруг места крепления провода гидрофобную область (bakedwood zone).

На опытной телеграфной линии Вашингтон – Балтимор (США), построенной по проекту Сэмюэля Морзе в 1843–44 годах, медные провода обматывались в месте крепления хлопковой нитью и покрывались шеллаком, смесью асфальта, пчелиного воска, смолы и льняного масла [11, 3]. Затем они вкладывались в пропилены в деревянной траверсе столба и закрывались сверху козырьками. Схожий метод крепления проводов был применен в 1846 году Генри О'Райли на линии между Филадельфией и Балтимором [12], где в качестве изолятора использовались стеклянные блоки с выемкой (рис.3а). На рис.3б показано дальнейшее развитие конструкции О'Райли с креплением стеклянного изолятора к столбу при помощи деревянного кронштейна [12].

Из предложенных Куком в 1842–45 годах систем подвески проводов наиболее удачной оказалась так называемая Cooke's Pole System, применявшаяся на линиях Electric Telegraph Co. [10]. Для изоляции проводов в данной системе использовались керамические изоляторы, выполненные в форме втулки-«бочонка», в центральной части которой имелась канавка для U-образной крепежной скобы (рис.4).

Рис.4. Изоляторы Кука (1845 г.)

Изоляторы крепились к вертикальным деревянным консолям, которые монтировались в верхней части столба. Для того чтобы провода не провисали и не соприкасались друг с другом, через каждые несколько пролетов устанавливались так называемые натяжные (анкерные) столбы, на которых провода крепились с помощью изолированных карабинов с храповым механизмом. Данная система эксплуатировалась

приблизительно до начала 1850-х годов, пока ей на смену не пришли изоляторы Э.Кларка [4].

Все вышеперечисленные конструкции и их аналоги обладали рядом существенных недостатков, главным из которых был крайне низкий уровень изоляции во влажную погоду, а также невысокая надежность, из-за чего уже в 1850-х годах такие изоляторы начали выходить из употребления.

Альтернативный подход был предложен в конце 1840-х годов и состоял в том, чтобы выполнять изолятор в виде перевернутого "стаканчика" или втулки, внутри которой фиксировался якорь для подвески провода. Для крепления изолятора к столбу часто применялась железная арматура различных конструкций. Одна из наиболее ранних конструкций такого типа была предложена в 1847 году Г.Физиком [3], запатентована 4 сентября 1848 года Дж.Рикардо [13] и в экспериментальном порядке применялась в Великобритании на линиях Electric Telegraph Co. Изолятор Физика и Рикардо (рис.5а) состоит из керамической изолирующей детали 2, металлической крепежной скобы 1, якоря для подвески провода 4 и цементной связки 3. Слабым местом данной конструкции была цементная связка. При колебаниях температуры окружающей среды в ней и фарфоровой изолирующей детали развивались трещины, приводившие к разрушению изолятора.

Изоляторы подобной конструкции были также распространены в 1840–50-х годах в США. Впервые

Рис.5. Изоляторы с якорем: а – Рикардо и Физика (1847 г.); б – Бэтчельдера и Фармера (1858 г.); в – Лефферта (примерно 1849 г.); г – французского образца (примерно 1849 г.)

Рис.6. Изолятор Сименса (1852 г.)

стеклянный изолятор с якорем был применен в 1849 году Дж.Сидом на телеграфной линии Детройт – Дирборн [3]. В качестве более поздних примеров можно привести изолятор по патенту Бэтчелдера и Фармера 1858 года с эбонитовой втулкой (рис.5б) [14, 1] и стеклянный изолятор М.Лефферта (рис.5в). В изоляторах Сиды и Лефферта стеклянная изолирующая деталь отливалась непосредственно поверх железной арматуры, что нередко приводило к образованию трещин.

На французских телеграфных линиях 1850-х годов применялись изоляторы с якорем, показанные на рис.5г, 5д [4, 15]. В данной конструкции изолирующая деталь имела приливы с отверстиями для крепления к столбу с помощью шурупов, а также полость, в которую посредством гипса вклеивался железный якорь. Так как прочность этих изоляторов была сравнительно невысокой, на угловых и концевых столбах применялись изоляторы, показанные на рис.5е и 5ж соответственно. Последний представлял собой фарфоровую катушку, прикрепленную к столбу шурупом. На натяжных столбах применялся усиленный изолятор, показанный на рис.5д. К якорю этого изолятора были шарнирно прикреплены храповые механизмы для регулирования натяжения провода.

Уже с начала 1850-х годов предпринимались различные попытки увеличить прочность изоляторов с якорем. В Бельгии и Дании с 1850–60-х годов использовались изоляторы, схожие по конструкции с французскими, однако, имевшие большие

габариты и металлическую арматуру для крепления к столбу. Поддерживающий и натяжной изоляторы датской системы показаны на рис.7в и 7г. В США большое распространение получили изоляторы с якорем по патенту Д.Брукса 1864 и 1867 годов [17, 18], показанные на рис.7д и широко применяемые на Центрально-Тихоокеанской железной дороге. В конструкции по патенту 1867 года изолирующая деталь изготавливалась из стекла и вклеивалась в железную оправу с помощью парафина, что позволяло увеличить сопротивление во влажную погоду.

В 1852 году В.Сименсом был предложен изолятор [2, 16], состоящий из железной оправы в виде колпака с приливом для крепления к столбу (рис.6). Внутренняя поверхность оправы была покрыта изолирующей эмалью, а в цилиндрическую полость в ее верхней части был вклеен якорь для подвески провода. Впервые эти изоляторы были применены на линиях Королевства Ганновер, и в ходе их эксплуатации сразу же обнаружились проблемы с отслоением и растрескиванием эмали. Поэтому в 1853 году был предложен модифицированный вариант данного изолятора, показанный на рис.7а. Вместо изолирующей эмали в колпак 1 с помощью смеси серы и охры 3 вклеивалась фарфоровая втулка 4, внутрь которой укреплялся якорь для подвески провода. На натяжных столбах использовалась усиленная версия изолятора, показанная на рис.7б и имевшая якорь с двумя гнездами для клинового крепления провода. Вышеописанные изоляторы Сименса использовались при прокладке первых российских воздушных телеграфных линий в 1850-х годах [19], различные их варианты применялись в Австралии, Аргентине, Индии, Чили и других странах мира, а также на Индо-Европейской телеграфной линии [4, 8]. В каталогах фирмы Siemens Bros. данные изоляторы также позиционировались как "антивандалные" [20].

Изоляторы с якорем имели ряд значительных недостатков, свойственных также другим ранним изделиям составной конструкции. Различие коэффициентов теплового расширения используемых материалов приводило к образованию трещин и зазоров между деталями и связкой, в которые затем проникала влага. Изоляторы этого типа были также сравнительно дороги. С появлением и распространением достаточно надежных и простых в производстве изоляторов штыревого типа с конца 1860-х – начала 1870-х годов изоляторы с якорем начали постепенно выходить из употребления.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:

В.С. Верба, К.Ю. Гаврилов,
А.Р. Ильчук, Б.Г. Татарский,
А.А. Филатов

Радиолокация для всех

Под ред. В.С. Вербы

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 504 с.
ISBN 978-5-94836-555-8

Цена 975 руб.

Настоящая книга одобрена научным советом Российской академии наук «Научные основы построения вычислительных, телекоммуникационных и локационных систем» отделения нанотехнологий и информационных технологий, возглавляемого академиком РАН Ю.В. Гуляевым, как научно-популярное издание.

Представленный в научно-популярной книге материал можно назвать начальным курсом по радиолокации. В издании рассмотрены основные физические и теоретические вопросы радиолокации, принципы построения радиолокационных систем и основные области их практического использования. Рассмотренные в книге примеры типовых радиолокаторов и области их применений не исчерпывают весь возможный диапазон использования радиолокационной техники и принципов получения информации радиолокационными методами в повседневной жизни человека.

Изложение материала ведется в форме беседы специалиста в области радиолокации – профессора кафедры радиолокации и студента, мало знакомого с радиотехникой и ее областью радиолокации.

Книга ориентирована в первую очередь на выпускников школ и студентов младших курсов технических вузов, может быть интересна и для студентов более старших курсов радиотехнических факультетов, а также для всех интересующихся радиолокацией.

Как заказать наши книги?

По почте: 125319, Москва, а/я 91
По факсу: (495) 956-33-46
E-mail: knigi@technosphere.ru
sales@technosphere.ru

ИНФОРМАЦИЯ О НОВИНКАХ
www.technosphere.ru

Рис.7. Изоляторы с якорем 1850-70-х годов: а и б – промежуточный и натяжной конструкции Сименса (1853 г.); в, г – промежуточный и натяжной датского образца (1860-70-е гг.); е – конструкции Брукса (1867 г.)

ШТЫРЕВЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Наибольшее распространение на телеграфных линиях получили штыревые изоляторы. Такой изолятор представляет собой перевернутый "стаканчик", укрепляемый на штыре или крюке, при этом провод крепится к верхней части изолятора. На рис.8а показан штыревой изолятор конструкции Э.Корнелла, впервые примененный в 1845 году на линии компании

Magnetic Telegraph между городами Филадельфия и Норристаун [12]. Данный изолятор изготавливался из стекла и имел "шейку", вокруг которой обматывался медный линейный провод.

В 1848 году В.Сименс предложил штыревой изолятор, отличавшийся удлиненной нижней частью – "юбкой" (рис.8б) и получивший благодаря своему внешнему виду название Glocke-isolator (от нем. Glocke – колокол;

Рис.8. Штыревые изоляторы Корнелла (а), В.Сименса (б, в), Бенедикта (г), Бэтчельдера (д), прусской телеграфной сети (е, ж)

в российской практике такие изоляторы иногда назывались "колокольчатыми"). Такое решение было призвано предотвратить увлажнение внутренней части изолятора в сырую погоду. Как и в конструкции Корнелла, в верхней части изолятора Сименса была сформирована шейка *a-a*, вокруг которой обматывался линейный провод. Данный изолятор впервые использован в 1848 году при сооружении телеграфной линии между Айзенахом и Франкфуртом-на-Майне [8].

Стоит также отметить штыревой изолятор, использовавшийся А.Бейном при прокладке телеграфных линий в Великобритании в 1845 году. На рис.9 представлен вид данного изолятора согласно заметке Т.Чеснелла о способах изоляции линейных проводов в выпуске британского журнала *Mechanic's Magazine* [22]. Отверстие А служило для насаживания изолятора на штырь, а линейный провод обматывался вокруг выступа В.

Важный шаг в совершенствовании штыревых изоляторов произошел в 1852 году. В связи с переходом прусской телеграфной сети с медных проводов на железные, конструкция изолятора Сименса была изменена и приобрела вид, показанный на рис.8в. Вместо обматывания провод привязывался к шейке мягкой перевязочной проволокой. На прямом участке провод вкладывался в верхний желоб *b*, а на угловых столбах прикладывался к шейке *a-a*. Такая конструкция верхней части изолятора продолжает повсеместно использоваться и в наши дни, отличаясь от изначальной лишь размерами и пропорциями. В качестве примера можно привести отечественные изоляторы серии "ТФ".

Несмотря на несомненное преимущество штыревых изоляторов в виде их простоты и дешевизны, первые их конструкции не отличались высокой надежностью. Так на прусских телеграфных линиях ежегодно приходилось заменять до 25% изоляторов Сименса [3]. Большинство повреждений было связано с раскалыванием изолятора в месте крепления провода. В связи с этим в 1853 году была предпринята попытка повысить прочность изолятора Сименса, усилив его верхнюю часть чугуновой головкой с желобами для проводов (рис.8ж). Однако такое решение не дало значительных результатов из-за низкой надежности соединения между головкой и изолирующей деталью. Ранние штыревые изоляторы были также в значительной мере подвержены увлажнению в сырую погоду, что особенно негативно сказывалось на работе линий большой протяженности. Первые попытки исправить ситуацию состояли в добавлении капельников, которые должны были препятствовать образованию

Рис.9. Штыревой изолятор Бейна

на внутренней поверхности изолятора сплошной водяной пленки. Как правило, такой капельник имел форму ребра, располагаемого около нижнего края изолятора (рис.9в, ж) или вокруг штыря.

Другой вариант штыревого изолятора был предложен в США Бенедиктом около 1848 года (рис.8г). Данный изолятор состоял из железной оправы, внутри которой с помощью расплавленного стекла фиксировался стержень с резьбой, предназначенный для укрепления на опоре. Провод вкладывался в желоб в верхней части изолятора и фиксировался шпилькой. Схожая конструкция была запатентована в 1851 году Бэтчелдером [21]: внутрь железной оправы заливалось расплавленное стекло, фиксирующее штырь и полностью покрывающее внутреннюю поверхность оправы (рис.8д). На штыре был также закреплен круглый щиток, который должен был ограничить занос влажного воздуха внутри оправы. Изоляторы этого типа были очень чувствительны к перепадам температуры и быстро приходили в негодность из-за растрескивания стекла.

Изолятор аналогичной конструкции также применялся в 1854–1862 годах на телеграфной сети Пруссии [4]. В прусском варианте изолирующая деталь изготавливалась из фарфора и клеивалась внутрь железной оправы с помощью серы.

Несмотря на недостатки, имевшиеся в ранних конструкциях, к концу 1850-х годов штыревые изоляторы получили широкое распространение в различных странах мира. Некоторые их варианты показаны на рис.10.

Рис.10. Штыревые изоляторы 1850-х: а, б – Пруссии, в – России, г – Франции, д – Швейцарии и Австрии, е – Великобритании, ж–к – США и Канады

На рис.10а и 10б представлены две конструкции, применявшиеся на прусских телеграфных линиях с 1857-го по 1862 год. Первая из них была сконструирована технической комиссией при Министерстве торговли Пруссии. Его отличительной чертой была узкая удлиненная "юбка". Такая форма должна была минимизировать занос влажного воздуха внутрь изолятора. Второй изолятор (показанный на рис.10б) был предложен механиком прусских телеграфов Борггревом и изготавливался из фарфора или стекла [4]. Одной из особенностей данной конструкции было то, что посадочное отверстие под штырь в плане имело квадратное сечение. Причины данного технического решения не ясны, однако результат оказался таков, что в процессе эксплуатации изоляторы Борггрева часто трескались и разрушались.

На основе конструкции Борггрева в конце 1850-х годов были созданы первые штыревые изоляторы для российской телеграфной сети [4, 19], один из вариантов которых показан на рис.10в. По сравнению с изолятором Борггрева он имел большие размеры и круглое посадочное отверстие для штыря. Изоляторы этого типа изготавливались из стекла или фарфора и крепились к крючьям с помощью серы или пакли.

На французских линиях штыревые изоляторы применялись с середины 1850-х годов и выполнялись без верхнего желоба [4] (рис.10г). Данные изоляторы изготавливались из фарфора, имели широкую "юбку" и боковые выступы, предназначенные

для удержания провода при монтаже или обрыве перевязочной проволоки. Для их укрепления на штырях использовался гипс. Во французской практике 50–60-х годов изоляторы этой модели были известны как *Cloched'Arret* ("натяжной" или "концевой колокол"), так как с момента своего появления они зачастую устанавливались на натяжных опорах линий, оборудованных изоляторами с якорем (рис.5г). Изолятор схожей формы, но без боковых выступов использовался на телеграфных линиях Баварии [4].

Изолятор английского образца конструкции Брайта показан на рис.10е [8]. Изоляторы этого образца применялись с 1852 до конца 1860-х годов. В данной конструкции штырь фиксировался при помощи цемента.

Американские и канадские изоляторы (рис.10ж–к), как правило, производились из стекла и не имели верхнего желоба: на прямых участках линии провод вкладывался в шейку. Из большого набора ранних конструкций заслуживают внимания решения Э.Эллиотта [3], изготовленные из керамической массы с преобладанием кремня (рис.10з). На поверхности этих изоляторов имелись вертикальные желоба, которые должны были улучшать стекание воды. Другая оригинальная конструкция, показанная на рис.10и, принадлежит Дж.Уейду [3]. Данный изолятор изготовлен из стекла и заключен в деревянную оправу с шейкой для крепления провода.

POWER ELECTRONICS

17-я Международная выставка
компонентов и модулей
силовой электроники

27-29 октября 2020

Москва, Крокус Экспо

Силовая Электроника

Единственная в России
специализированная
выставка компонентов
и модулей силовой электроники
для различных отраслей
промышленности

Организатор — компания MVK
Офис в Санкт-Петербурге

MVK Международная
Выставочная
Компания

+7 (812) 380 6000
power@mvk.ru

Запросите
условия участия:

powerelectronics.ru

12+

ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ

Стоимость 2200 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru

Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru

Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru

Стоимость 1056 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru

Стоимость 1287 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru

Стоимость 1716 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru