

Сергей Яковлевич Соколов и его наследие в электронной дефектоскопии, гидролокации и акустике

Андрей Кашкаров

Среди учёных, внёсших значительный вклад в прикладную науку и развитие отечественной электроники, особое место занимает Сергей Яковлевич Соколов. Его по праву называют «отцом» электронного метода неразрушающего контроля и создателем устройств для обнаружения объектов на основе отражённой акустической волны. Оба направления, заложенные Соколовым, получили дальнейшее развитие и сегодня применяются в различных областях – как в гражданской, так и в военной сферах. Разработанные им идеи сохраняют актуальность и находят применение в современных технологиях.

Вехи биографии

Сергей Яковлевич Соколов родился 26 сентября 1897 года в селе Кряжим Саратовской губернии в крестьянской многодетной семье. Сначала будущий учёный поступил в церковноприходскую школу, а затем в двухклассное сельское училище в селе Вязовка и в 1914 году – в среднетехническое училище в Саратове. По окончании среднетехнического училища (сегодня СКРП – Саратовский колледж радиоэлектроники приборов имени П.Н. Яблочкова) в 1919 году Сергей Соколов был призван в армию и служил техническим специалистом связи. После демобилизации поступил в Ленинградский электротехнический институт имени В.И. Ульянова (Ленина) – сегодня ЛЭТИ – и закончил его в 1925 году (рис. 1).

Первые три курса Соколов учился на электротехническом факультете, а затем, увлёкшись лекциями своего наставника И.Г. Фреймана по радиотехнике, перешёл на электрофизический факультет.

Именно Фрейман оказал значительное влияние на научное становление Соколова, привлекая его к исследованиям и разработке электронного устройства на основе «сверхтональной акустической волны». После этого С.Я. Соколов продолжил работу в ЛЭТИ в качестве ассистента кафедры специальной радиотехники.

В 1927 году появились первые значимые результаты самостоятельных исследований Соколова, выполненных с использованием кварцевых вибраторов. В этом направлении Соколов



Рис. 1. Сергей Яковлевич Соколов, фотопортрет

развивал идеи французского физика Поля Ланжевена, связанные с преобразованием электрической энергии в ультразвуковые колебания [3]. Исследования показали способность ультразвука проходить через металлы без заметного поглощения. Эти результаты создали предпосылки для разработки электронных дефектоскопов, позволяющих осуществлять неразрушающий контроль материалов и конструкций, которые широко применяются и сегодня.

Успехи в развитии электронной дефектоскопии

С.Я. Соколов исследовал зависимость поглощения ультразвука от структуры металла, а также особенности распространения ультразвуковых сигналов по проводам. Он установил, что ультразвуковые волны отражаются от неоднородностей внутри изделий. Учёный разработал электронное устройство для исследования металлов с помощью ультразвука, что положило начало новому методу неразрушающего контроля качества изделий – ультразвуковой дефектоскопии (ультразвукоскопии).

Первый промышленный образец ультразвукового дефектоскопа для



Рис. 2. С.Я. Соколов с учениками на занятиях в лаборатории акустики ЛЭТИ, 1936 год

обнаружения дефектов в изделиях и заготовках также был создан и запатентован Соколовым [4, 5].

В 1931 году в ЛЭТИ была создана кафедра технической акустики, которую возглавил С.Я. Соколов. В 1932 году с авторством учёного вышел учебник «Основы электроакустики», основные положения которого актуальны и сегодня. Это первая книга по электроакустике в нашей стране (рис. 2). К этому же времени относят зарождение советской научно-инженерной школы неразрушающего контроля и смежных направлений, связанных с акустическими методами контроля.

В 1929–1930 годах С.Я. Соколов стал консультантом Научно-испытательного полигона связи Военно-морских сил, где проводил испытания кварцевых вибраторов на подводных лодках. Это направление деятельности учёного сегодня мало известно. Тем не менее удалось обнаружить сведения о его исследованиях в области гидроакустики (рис. 3).

Вода – одно из наиболее распространённых на Земле химических соединений. Гидроакустика – быстро развивающаяся область физики, охватывающая широкий спектр прикладных и научных исследований. Она изучает излучение, приём и распространение звуковых волн в водной среде, а также взаимодействие механических волн, составляющих звуковое поле, с водой, содержащимися в ней объектами и границами раздела неоднородных сред. На рис. 4 показан принцип определения направления на источник звука.

На рис. 5 показана зависимость скорости распространения акустической волны в водной среде. Звук связан с механическими колебаниями, создаваемыми физическим объектом или электронным устройством, и распространяется в окружающей среде на определённое расстояние. Вода, в отличие от воздуха, обладает способностью проводить звуковые колебания на большие расстояния, что обуславливает перспективность использования акустических сигналов под водой.

На распространение звуков влияет множество факторов: частота и амплитуда звуковой волны, температура, солёность и глубина воды, расстояние распространения звука и связанная с этим постепенная трансформация звука в тепло – абсорбция, а также другие местные особенности: неоднородности в воде, участки с турбулент-



Рис. 3. Способ акустического обнаружения подводных препятствий, предложенный С.Я. Соколовым

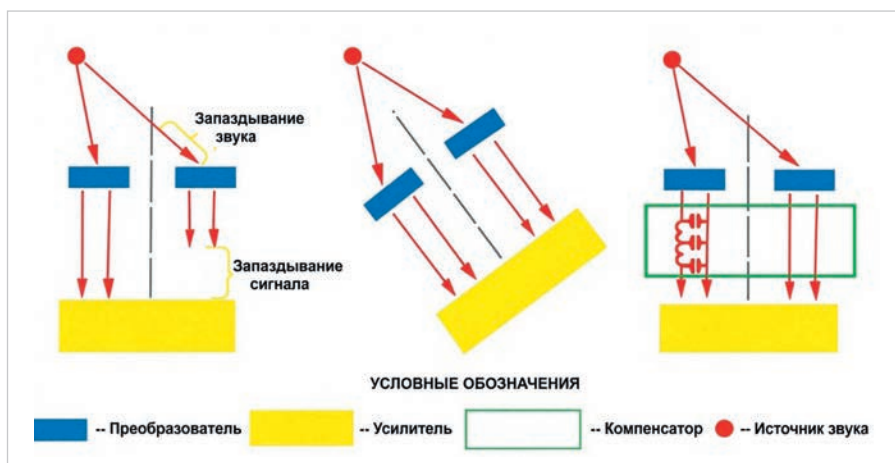


Рис. 4. Принцип определения направления на источник звука

ностью, состояние поверхности воды – пузырьки воздуха, дождь и ветер; тип дна – ил, песок, гравий или скала.

Звуковая волна, распространяющаяся под водой, состоит из чередующихся сжатий и разрежений среды. Сжатия и разрежения воспринимаются приёмником, человеческим ухом или гидрофоном, как изменение давления.

Чем выше упругость среды, тем с большей скоростью расходитесь в ней звук. К примеру, скорость в каучуке составляет примерно 50 метров в секунду, в воздухе – 330, в воде – 1450, а в стали – 5000 метров в секунду. Приблизительные значения скорости распространения звука для пресной и морской воды при нормальном атмосферном давлении составляют 1450 м/с и 1500 м/с соответственно.

Из всех известных видов излучения звук расходитесь в море с наименьшими потерями. Радиоволны и свет зату-

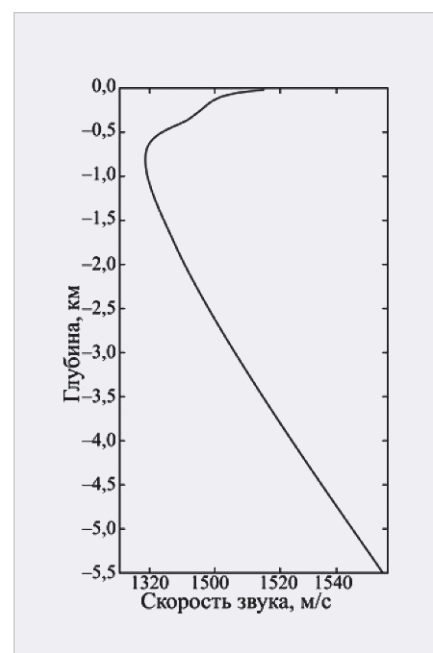


Рис. 5. Зависимость скорости отклика акустической волны в водной среде

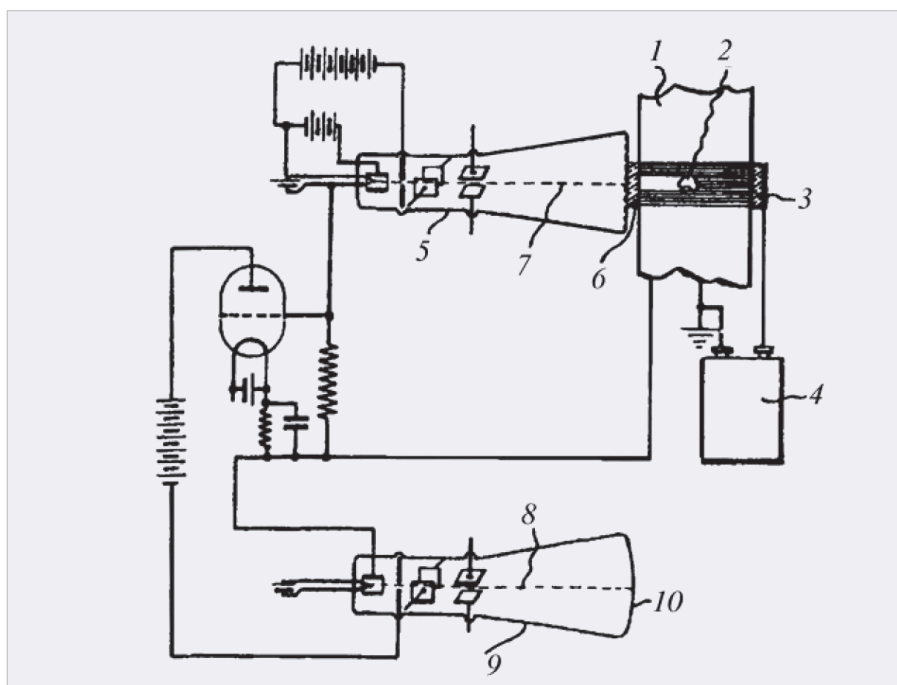


Рис. 6. Структурная схема установки на основе трубки Соколова

хают в мутной и солёной морской воде значительно быстрее. Относительно свободное продвижение звука в водной среде позволило найти гидроакустике разнообразное применение.

Скорость продвижения звуковых волн меняется с глубиной, причём изменения зависят от времени года, профиля и состава дна, глубины водоёма и ряда других причин. Вода неоднородна, поэтому скорость звука в ней увеличивается с повышением давления, температуры и солёности.

Изменение этих трёх параметров влияет на направление движения звукового луча. Рефракция, или искривление траектории распространения звуковой волны, вызывается неоднородностью свойств воды, главным образом по вертикали, вследствие трёх основных причин: изменения гидростатического давления с глубиной, изменения солёности и изменения температуры, обусловленного неодинаковым прогревом водной массы солнечным излучением. Звуковые волны могут отражаться от различных объектов на дне, а также от косяков рыб.

Звуковые волны, выходящие из источника под некоторым углом к горизонту, изгибаются, причём направление изгиба зависит от распределения скоростей звука в среде:

- летом, когда верхние слои теплее нижних, лучи изгибаются книзу и в большинстве отражаются от дна, теряя при этом значительную долю своей энергии;

- зимой, когда нижние слои воды сохраняют свою температуру, между тем как верхние охлаждаются, лучи изгибаются вверх и многократно отражаются от поверхности воды, при этом теряется значительно меньше энергии. Поэтому зимой дальность распространения звука больше, чем летом.

Создание «звуковидения» и ультразвукового микроскопа

Разработка С.Я. Соколова, известная как метод сканирования поверхностного рельефа и контроля параметров с помощью электронно-акустической трубки-преобразователя, основана на преобразовании звуковых сигналов в видимые. Так, с помощью отражённой акустической волны стало возможно создавать визуализацию изображений на расстоянии. В копилке знаний отечественной науки этот способ известен с 1935 года, когда Соколов был признан доктором технических наук. Диссертационное исследование называлось «Ультраакустические колебания и их применение». Структурная схема установки на основе трубки Соколова приведена на рис. 6, где 1 – контролируемое изделие с внутренним дефектом; 2, 3 – излучающий преобразователь, возбуждаемый генератором; 4, 5 – электронно-лучевая трубка, в которой светочувствительный экран заменён на звуочувствительный преобразователь (6),

имеющий сеть точечных электродов, изолированных один от другого.

Принцип действия устройства таков. При прозвучивании изделия на приёмной пьезопластине создаётся рельеф электрических зарядов, которые считываются электронным лучом (7), усиливаются и управляют яркостью луча (8) второй электронно-лучевой трубки (9), на светочувствительном экране (10) которой создаётся видимое изображение дефекта в изделии. Этот метод интроскопии показал пороговую чувствительность 10^{-9} Вт/см² и высокую разрешающую способность.

Дальнейшее совершенствование этого метода привело к созданию ультразвукового микроскопа. Первым устройством звуковидения, предложенным С.Я. Соколовым ещё в 1928 году, стала система, основанная на формировании и регистрации распределения акустического поля на свободной поверхности жидкости – метод поверхностного рельефа. В дальнейшем система была усовершенствована по аналогии с оптическими системами (рис. 7). На рис. 7: 1 – излучатель ультразвука; 2 – объект; 3 – акустическая линза; 4 – поверхность жидкости; 5 – источник света; 6 – конденсорная линза; 7 – объектив; 8 – диафрагма; 9 – экран.

Сергей Яковлевич также занимался проблемой передачи информации, записанной азбукой Морзе, по металлическим проводникам при помощи ультразвука. В результате было установлено, что сигнал затухает при расстояниях в несколько десятков метров, а при наличии дефекта затухание происходит значительно быстрее. Основы ультразвуковой диагностики впоследствии были использованы при создании медицинских аппаратов УЗД–УЗИ.

Награды и признание заслуг

Сергей Яковлевич Соколов дважды удостоен Государственной премии СССР («сталинской»): в 1942 году за изобретение метода ультразвуковой дефектоскопии и в 1951 году за изобретение ультразвукового микроскопа, усовершенствование и промышленное освоение методов ультразвуковой дефектоскопии. Награждён также Орденами Ленина, Трудового Красного знамени и медалями.

В 1953 году учёный избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. А осенью 1955 года С.Я. Соколов

представил страну на Первой Международной конференции ICNDT в Бельгии и вскоре был назначен постоянным представителем СССР во «Всемирной ассоциации испытания материалов без разрушения» (ICNDT – The International Committee for Non-Destructive Testing). Первый патент № 11371 на способ и устройство ультразвуковой дефектоскопии с приоритетом от 2 февраля 1928 года.

С авторством С.Я. Соколова опубликованы 32 научные работы и известно 23 патента и авторских свидетельства в области ультразвуковой техники обнаружения дефектов и исследования твёрдых тел. За 75 лет со дня открытия С.Я. Соколовым способ ультразвуковой дефектоскопии стал основным широко применяемым во всех отраслях промышленности, строительства и транспорта методом выявления внутренних потенциально опасных дефектов. Только на железнодорожном транспорте России ежегодно методом ультразвуковой дефектоскопии проверяется более 4 млн км рельсов, 2,5 млн сварных стыков рельсов, 12 млн стрелочных переводов, а также 40 млн осей, колёс и других деталей подвижного состава [14].

В заключительный период жизни и работы Соколов разработал модификацию ультразвуковой дефектоскопии, основанную на импульсной локации неоднородностей в образце с использованием высоких частот в диапазоне 0,5–15 МГц, а в качестве индикатора использовался электронный осциллограф.

Сергей Яковлевич Соколов скончался в возрасте 59 лет 20 мая 1957 года и был похоронен на Шуваловском кладбище в Санкт-Петербурге.

В 1997 году решением Международного кураториума специалистов из Германии и СССР была учреждена международная премия «В.К. Рентген – С.Я. Соколов» за выдающиеся достижения в разработке передовых средств неразрушающего контроля и подготовке высококвалифицированных специалистов [9].

В ЛЭТИ кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, на которой С.Я. Соколов проработал всю жизнь, носит имя учёного.

Соколов при жизни заложил основы акустической голографии, разработал первый кварцевый анализатор звука и исследовал дифракцию света на ультразвуке. Выдвинул идею использования дифракции света в ультразвуко-

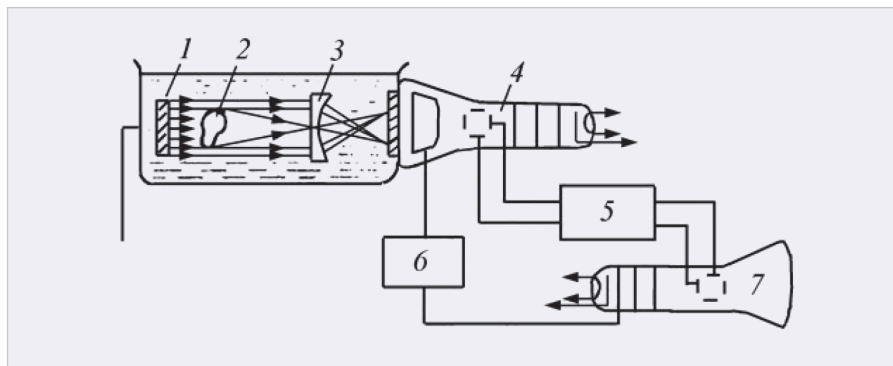


Рис. 7. Схема устройства звуковидения С.Я. Соколова

вом поле в твёрдых и жидких средах для модуляции светового пучка. Сегодня идеи учёного трансформировались в новые направления научных исследований.

Значимые для наших современников изобретения Сергея Яковлевича Соколова:

- метод ультразвуковой дефектоскопии. Учёный первым в мире предложил новый способ контроля качества изделий без их разрушения;
- ультразвуковой микроскоп разработки 1935 года;
- электромагнитно-акустический метод возбуждения колебаний в изделии, основанный на взаимодействии вихревых токов с полем постоянного магнита;
- низкочастотный акустический метод измерения частот собственных колебаний турбинных лопаток, предназначенный для обнаружения внутренних дефектов (трещин);
- прибор для контроля за содержанием примесей в высокочистых металлах;
- теоретические основы ультразвуковых слоистых преобразователей с активным слоем, используемых в гидроакустике и дефектоскопии.

Идеи, послужившие Соколову и науке

С.Я. Соколова считают самобытным исследователем, поскольку в новой для того времени области знаний у него не было непосредственных предшественников и учителей. Вместе с тем на формирование его научных взглядов оказали влияние работы радиофизиков П. Ланжевена, М. фон Лауэ, И.Г. Фреймана, Л.И. Мандельштама и других учёных. Заслуга Соколова заключается также в последовательном сочетании изобретательской деятельности с физическими экспериментами – подходе, близком к

научным приёмам А.С. Попова. Такое сочетание теоретических исследований, экспериментов и практической разработки позволяет рассматривать С.Я. Соколова одновременно как физика-электронщика и инженера-изобретателя.

История гидроакустики насчитывает более двух тысячелетий. Древнегреческий философ Аристотель (384–322 гг. до н. э.) одним из первых отметил, что звук можно слышать в воде. Считается, что подводная акустика как научное направление зародилась в 1490 году, когда Леонардо да Винчи описал возможность обнаружения звуков под водой с помощью длинной трубки: если остановить корабль, опустить трубку в воду и приложить её другой конец к уху, можно услышать шум кораблей, находящихся на значительном расстоянии. При этом речь шла о парусных, а не моторных судах.

Идея известного итальянца нашла практическое применение лишь в конце XIX века. Для безопасности кораблевождения в туманную погоду начали применять подводную звуковую сигнализацию. Плавающие маяки стали оборудовать подводными колоколами, а на морских судах устанавливать простейшие гидроакустические приёмники на оба борта, чтобы слышать и определять направление на навигационную опасность. Звук подводного колокола был слышен на значительно большем расстоянии, чем звук колокола, установленного на берегу.

Начало развитию гидроакустических средств обнаружения положено на рубеже XIX–XX веков. В России в 1891 году адмирал С.О. Макаров предложил гидроакустическую телеметрическую систему для океанографических исследований. В 1905 году в Санкт-Петербурге Роберт Ниренберг начал проводить исследования



Рис. 8. Пример дефектного изделия, выявленного электронным способом, основанным на идеях Соколова



Рис. 9. Один из первых портативных дефектоскопов отечественного производства УЗД-20

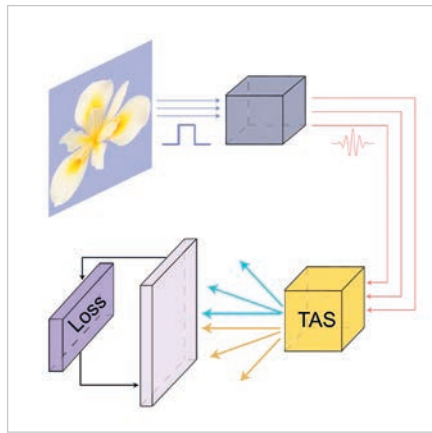


Рис. 10. Структурная схема усовершенствованного способа видеоконтроля объектов будущего с помощью звуковидения, у истоков которого стоял изобретатель С.Я. Соколов

по звукоподводной телеграфии, а в 1907 году был получен патент «Передающая станция для беспроводного (гидрофонического) телеграфирования через воду». Затем первые серийные станции звукоподводной связи конструкции Балтийского завода в 1909–1910 годах установили на подводных лодках «Карп», «Пескарь», «Стерлядь», «Макрель» и «Окунь».

Интерес к разработке систем эхолокации усилился после того, как в 1912 году в результате столкновения с айсбергом затонул океанский лайнер «Титаник». В том же году Томас Грин Фессенден разработал электромагнитный источник звука, который позволил осуществить связь между судами путём подводной сигнализации с помощью азбуки Морзе.

Французский физик Поль Ланжевен в 1915 году предложил использовать чувствительный приёмник из сегнетовой соли для первой шумопеленгаторной станции. В том же году канадцем Фессенденом был запатентован первый прототип гидролокатора. Во Франции русский инженер-электротехник Константин Шиловский совместно с Ланжевеном работал над прибором, включавшим в себя конденсаторный (электростатический) прожектор и угольный микрофон, размещённый в фокусе вогнутого акустического зеркала. В 1916 году эти учёные подали заявку на патент «Описание аппаратов и способов их применения для локализации подводных препятствий».

Первые гидрофоны применяли в борьбе именно с кайзеровскими подводниками. Название «АСДИК» (ASDIC – AntiSubmarine Detection Investigation Committee – Комитет по

исследованиям для обнаружения подводных лодок) для системы подводного обнаружения придумали в Британии в 1916 году.

Первый действующий глубоководный эхолот изобрёл именно Хейес. Благодаря этому появилась возможность составить квазинепрерывный профиль дна океана вдоль курса движения корабля. Первый такой профиль был составлен американцем на борту эсминца ВМС США «Стюарт» с 22 по 29 июня 1922 года. Хейес и его группа разработали буксируемую антенну из гидрофонов под названием «Угорь». Однако прибор мог указать лишь на присутствие лодки и примерное направление на неё, но не дистанцию. Тем не менее несколько пеленгов, пересекаясь, давали и примерное местоположение.

Интересно, что ещё в 1822 году швейцарский физик и инженер Жан-Даниэль Колладон и математик Шарль-Франсуа Штурм использовали «подводный звонок» для измерения скорости звука в водах Женевского озера в Швейцарии. Одновременно с подрывом порохового заряда под водой приводился в действие колокол.

Световая вспышка от воспламенения наблюдалась в 10 милях и сравнивалась на том же расстоянии с восприятием звука от колокола под водой. Звук воспринимался через специальное устройство, состоящее из трубки, опущенной в воду. В этом эксперименте много лет назад даже с помощью простейшего инструментария удалось определить, что скорость распространения звука под водой составляет 1435 м/с, что кардинально не отличается от того, что доказа-

но в наше время более современными инструментами.

Примерно через 80 лет в 1906 году физик Московского университета П.Н. Лебедев зафиксировал при помощи искрового разряда в воздухе ультразвуковые колебания, а в 1911 году Н.П. Неклепаев в лаборатории Лебедева впервые произвёл измерения поглощения ультразвука в воздухе. Этими экспериментами было доказано, что сильное затухание ультразвука препятствует его распространению в воздухе.

На принципе свистка Гальтона исследователь Эйдельман разработал метод, обеспечивающий значительно большую мощность ультразвука. В первых экспериментах получили частоту колебаний порядка 30 кГц. В дальнейшем конструкция свистка Гальтона изменялась, и в настоящее время он с успехом применяется в лабораториях, обеспечивая значительную мощность. При частоте колебаний порядка 100 кГц излучаемая мощность ультразвука достигает 50 Вт. А позже Соколов доказал, что ультразвук может проникать сквозь металлы практически без потерь.

Принципы современной дефектоскопии электронными методами

Рассмотрим практический пример дефектоскопии в цехе сталелитейного производства. Металлический пруток перемещается по рольгангу и поступает к электронному сканирующему модулю, где три равноудалённых друг от друга ультразвуковых преобразователя

вращаются вокруг изделия. Пруток перемещается поступательно, поэтому каждый преобразователь формирует спиральную траекторию сканирования по его поверхности, выявляя дефекты как в центральной, так и в периферийной части сечения.

Ультразвуковой преобразователь возбуждает акустическую волну, которая распространяется вглубь прутка. При наличии дефекта – трещины, поры или неметаллического включения – ультразвуковая волна отражается от него, а отражённый сигнал принимается и регистрируется радиоэлектронной аппаратурой (РЭА). Пример дефектного изделия, выявленного электронным методом, основанным на идеях Соколова, представлен на рис. 8.

На рис. 9 показан один из первых портативных дефектоскопов отечественного производства УЗД20.

Звуковые волны будущего и эффект топологического акустического синапса

Это апробированный научный подход, основанный на изучении и попытках имитации нейроморфных принципов работы головного мозга человека. Известно, что мозг способен с высокой скоростью обрабатывать огромные объёмы информации при относительно низком энергопотреблении. В обозримом будущем системы обучения ИИ могут потребовать значительных энергетических ресурсов, что ставит перед современными разработчиками радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) задачу поиска энергоэффективных решений.

Одно из преимуществ новых технологий в сравнении с традиционными способами передачи данных в чипах с ИИ в том, что память и модуль обработки данных размещены в одном чипе. Этим достигается экономия энергии, затрачиваемой на его работу.

На рис. 10 показана схема усовершенствованного способа видеоконтроля объектов с помощью «звуковидения», у истоков которого стоял изобретатель С.Я. Соколов. Звуковые волны вместо контактного электрического способа передачи данных позволяют электронным устройствам будущего взаимодействовать с большим аппаратным ускорением и эффективностью.

В отличие от традиционной проводной передачи электронов в кремни-

евых чипах, новая технология предусматривает генерацию и беспроводную передачу акустических волн по миниатюрным соединённым между собой каналам. Передача и приём кодированной информации осуществляются за счёт изменения интенсивности маломощной управляемой звуковой волны посредством её усиления или ослабления.

Итоги и перспективы

Ультразвуковые чипы рассматриваются как одно из перспективных направлений развития электроники. Современные исследования показывают, что акустический синапс способен одновременно обрабатывать несколько потоков данных [1]. В основе этого подхода лежит эффект топологического акустического синапса (ТАС). Такие устройства способны передавать энергию и оцифрованные пакетные данные с использованием прямых и отражённых акустических волн в многомерных пространствах и состояниях.

Разрабатываются электронные устройства со сверхнизким энергопотреблением на основе двух основных типов компонентов: полевых транзисторов (FET) и мемристоров. Современные разработчики радиоэлектронной аппаратуры, опираясь на идеи С.Я. Соколова, а также используя новые материалы и технологии, стремятся увеличить скорость передачи и масштабировать потоки данных за счёт одновременной работы нескольких синапсов. Для реализации и усиления эффекта ТАС используется нелинейная динамика акустических волн в связанных волноводах. Одним из направлений развития этой технологии является интеграция множества компонентов в миниатюрные чиповые структуры.

Литература

1. Арнольд П. Звуковые волны могут стать источником питания для нового типа чипов, созданных по образцу человеческого мозга. URL: <https://techxplare.com/news/2026-06-power-kind-chip-human-brain.html>.
2. Иофе В.К., Мясникова Е.Н., Соколова Е.С. Сергей Яковлевич Соколов // СПбГЭТУ. СПб., 1997. 176 с.
3. Паврос С.К. Сергей Яковлевич Соколов – основоположник ультразвуковой дефектоскопии и звуковидения // Известия ГЭТУ. 1997. Вып. 505. С. 5–11.

4. Патент № 11371 СССР. Способ и устройства для испытания металлов / С.Я. Соколов; опубл. 30.09.1929 // Вестник Комитета по делам изобретений. 1929. № 6.
5. Патент № 2164125 США. Средства для обнаружения дефектов в материале / С.Я. Соколов. Опубл. 08.06.1937.
6. Лигулевский Е.Д. О чувствительности и разрешающей способности акустооптического преобразователя на поверхности жидкости // Акустический журнал, 1958. Т. 4. № 4. С. 348–354.
7. Пономарев П.В. Опытная установка для видения ультразвукового поля // Известия ЛЭТИ. 1958. Вып. 34. С. 224–228.
8. Прохоров В.Г. Электронно-акустический преобразователь // Акустический журнал. 1957. Т. 3. № 3. С. 248–254.
9. Сергей Яковлевич Соколов. URL: https://www.prlib.ru/Great_Russia/outstanding_scientists_XX/Sokolov.
10. Соколов С.Я. Избранные труды. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1997. 263 с.
11. Соколов Сергей Яковлевич в 1928 году запатентовал и создал в 1935 году ультразвуковой дефектоскоп. URL: <https://retrabbit.ru/publ/26-1-0-227>.
12. Соколов С.Я. Ультразвуковые колебания и их применение // Заводская лаборатория. 1935. № 5. С. 527–538.
13. Соколов С.Я. Ультразвуковые методы изучения свойств закалённой стали и определения внутренних пороков металлических изделий // ЖТФ. 1941. Т. XI. Вып. 1. С. 160–169.
14. Соколов С.Я. Ультразвуковой микроскоп // ДАН СССР. 1949. Т. LXIV. № 3. С. 333–335.
15. Храмов Ю.А. Соколов Сергей Яковлевич // Физики: Биографический справочник / под ред. А.И. Ахиезера. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Наука, 1983.
16. Уэйд Г. Системы акустического изображения. Л.: Судостроение, 1981.
17. Sokoloff S. Zur Frage der Fortpflanzung ultra-acustischer Schwingungen in verschieden Rorpern // Eleck. Nachr. Techn. 1929. Bd. 6. H. 11. S. 450–460 (к вопросу ультразвуковых колебаний в различных телах).

