УДК 538.945

Обзор

Акустические методы детектирования перехода в нормальное состояние в ВТСП проводниках

Д. А. Александров[1,*], И. В. Мартиросян[1], С. В. Покровский[1]

1 НИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, 115409, Москва, Россия
* e-mail: dimax.2001@mail.ru

Поступила в редакцию 28.11.25, после переработки 03.12.25., принята к публикации 15.12.25.

В настоящей обзорной статье рассмотрены современные методы детектирования перехода в нормальное состояние (далее переход) в высокотемпературных сверхпроводниках (ВТСП) и магнитных системах на их основе. Обсуждаются особенности развития перехода в ВТСП, связанные с низкой скоростью распространения нормальной зоны, сложной многослойной архитектурой проводников и возможностью перераспределения тока между отдельными лентами. Эти особенности существенно затрудняют раннее обнаружение перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние традиционными методами, основанными на измерении напряжения и температуры. Кратко упомянуты альтернативные подходы к детектированию перехода, включая оптоволоконные, магнитные и ёмкостные методы. Основной акцент обзора сделан на акустических методах детектирования перехода, которые в последние годы демонстрируют высокий потенциал благодаря неинвазивности, устойчивости к электромагнитным помехам и способности регистрировать ранние стадии локального нагрева, связанные с термомеханическими процессами в проводнике. Подробно анализируются принципы пассивной акустической эмиссии и активной акустической термометрии, включая методы на основе многократно рассеянных упругих волн (coda waves), а также результаты экспериментальных исследований на отдельных ВТСП лентах и кабелях. Обсуждаются достигнутые значения температурной чувствительности и пространственного разрешения, а также перспективы внедрения акустических методов в эксплуатационные ВТСП магнитные системы.

Ключевые слова: ВТСП; переход в нормальное состояние; CORC®; ROEBEL; PH3; VIPER.

DOI: 10.62539/2949-5644-2025-9-4-39-47

1. Введение

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП, англ. High-Temperature Superconductors, HTS) представляют собой класс материалов, радикально расширивший возможности сверхпроводниковых технологий. В отличие от традиционных низкотемпературных сверхпроводников (НТСП, LTS), таких как NbTi и Nb_3Sn, высокотемпературные сверхпроводники характеризуются существенно более высокими критическими параметрами — критической температурой, критическим магнитным полем и критической плотностью тока. Эти свойства делают проводники из ВТСП кабелей основой для создания высокополевых магнитов нового поколения, которые применяются в установках управляемого термоядерного синтеза (токамаках и стелларарорах) [1, 2], ускорителях заряженных частиц [3, 4], магнитах для ядерной магнитно-резонансной спектроскопии [5, 6] и магнитно-резонансной томографии [7, 8], а также в индуктивных накопителях энергии (СПИН, англ. Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) и других сильноточных и высокополевых системах [9–11].

Одним из ключевых факторов, определяющих надёжность и долговечность сверхпроводящих систем, является их электротермическая стабильность. Внезапный переход сверхпроводящего материала из сверхпроводящего состояния в нормальное приводит к формированию локальной нормальной зоны, сопровождающейся интенсивным тепловыделением. Если переход не будет своевременно обнаружен, температура в зоне перехода может быстро превысить допустимый уровень и вызвать деградацию или разрушение сверхпроводника, и выход из строя всей установки. Для НТСП магнитов широко используются отработанные схемы защиты

от перехода, включающие детектирование напряжения и последующее целенаправленное инициирование перехода во всей обмотке с помощью нагревателей (quench heaters). Такой подход позволяет ускорить распространение нормальной зоны, перераспределить тепловыделение по объёму магнита и обеспечить безопасную разрядку накопленной энергии [12, 13]. Однако перенос этих методов на ВТСП проводники оказывается нетривиальным из-за существенно более медленного распространения нормальной зоны и отличий в тепловых и электрических свойствах высокотемпературных сверхпроводников.

Скорость распространения нормальной зоны (РНЗ, Normal Zone Propagation Velocity, NZPV) существенно различается для различных классов сверхпроводников [14, 15]. Низкотемпературные материалы (NbTi, Nb_3Sn, V_3Ga, Nb_3Al) демонстрируют сравнительно высокие скорости РНЗ [16], магний-бориды (MgB_2) занимают промежуточное положение, тогда как композитные ВТСП материалы отличаются чрезвычайно низкими скоростями РНЗ. Так, получаемые скорости распространения нормальной зоны в ВТСП на основе соединения $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (где RE-редкоземельный элемент, далее REBCO), как правило, составляют несколько сантиметров в секунду [17], что на порядок или несколько порядков ниже, чем для низкотемпературных сверхпроводников. В результате локальный нагрев в ВТСП материалах распространяется медленно и сопровождается слабыми электрическими сигналами, что затрудняет раннее обнаружение перехода традиционными методами. Кроме того, ВТСП ленты обладают выраженной анизотропией теплопроводности и сложной слоистой структурой. В многоленточных конструкциях кабелей типа CORC и Roebel возможно перераспределение тока между летами, которое частично компенсирует локальные тепловые возмущения и «маскирует» начальную стадию перехода [18–20]. Всё это делает задачу раннего детектирования перехода из сверхпроводящего в нормальное состояние (S-N переход) существенно более сложной задачей, чем в классических НТСП системах.

Для решения этой проблемы в последние годы активно развиваются различные подходы к детектированию перехода в ВТСП проводниках и кабелях. Наиболее распространёнными остаются методы, основанные на измерении распределения напряжения и температуры вдоль проводника, однако их эффективность в ВТСП ограничена из-за малой скорости РНЗ [13]. В качестве альтернативы рассматриваются оптоволоконные методы, основанные на распределенных решетках Брэгга [21], рамановском [22], рэлеевском [23] и бриллюэновском рассеянии [15]. Перспективными также считаются магнитные методы, основанные на анализе изменения распределения магнитного поля при перераспределении токов между элементами проводника [24]. Значительное внимание привлекают акустические методы, использующие температурную зависимость скорости звука [25], а также ёмкостные [26] подходы.

В сравнении с перечисленными методами акустические подходы выделяются сочетанием высокой пространственно-временной чувствительности, минимального вмешательства в конструкцию проводника и потенциальной применимости в условиях сильных магнитных полей и криогенных температур. Однако, несмотря на заметный интерес к акустическим методам детектирования перехода, количество систематизированных данных и обобщающих работ в этой области остаётся ограниченным. В связи с этим в настоящем обзоре сознательно сделан акцент на особенностях возникновения перехода в ВТСП и акустических методах их детектирования, как одном из перспективных, но пока недостаточно освещённых направлений.

2. Особенности перехода в НТСП и ВТСП проводниках

В настоящем разделе рассматриваются особенности поведения высокотемпературных сверхпроводников на основе оксидов меди редкоземельных элементов (ReBCO) при переходе с акцентом на их принципиальные отличия от низкотемпературных сверхпроводников, прежде всего в части временных масштабов развития перехода, критически важных для применения акустических методов детектирования.

Одной из ключевых практических характеристик резистивного S-N перехода при кри-

тической плотности тока J_c является так называемое параметра n (n-value), определяемое как показатель степени в уравнении:

$$E = E_0 \left(\frac{J}{J_c(T,B)} \right)^n, \tag{1}$$

где E_0 — условный критерий, вводимый для практического определения начала перехода в нормальное состояние. Обычно для практических целей он принимается равным 10^{-4} В/м. Следует отметить, что «истинное» значение n связано с экспонентой термически активированного крипа потока [21] $n = U_0/T$, где U_0 — энергия активации крипа.

Кроме того, поскольку механизмы пиннинга магнитного потока варьируются в зависимости от напряженности магнитного поля B, угла относительно оси с ленты θ и температуры T, фактическое значение n не является постоянной величиной, а зависит от всех этих параметров $n = n(B, \theta, T)$. В НТСП n обычно находится в диапазоне 50–80, что представляет собой резкий резистивный переход при температуре перераспределения тока (current sharing) T_{cs}: при $J < J_c(B, T)$ весь ток протекает в сверхпроводнике, а при $J > J_c(B, T)$ полностью переключается в нормальный металлический стабилизатор, где E и J связаны по омическому закону. В этом случае в НТСП потенциально может существовать режим течения магнитного потока, хотя и только в узком интервале токов $J \sim J_c$. В то же время критическая плотность тока J_c пространственно модулируется распределением магнитного поля [21]. Эта модуляция в сочетании со спонтанной локальной энергией, выделяемой в обмотке катушки в результате различных механических явлений (движение проводника при механических нагрузках, растрескивание эпоксидной смолы, деламинация и т. д.), обычно определяет места возникновения перехода в НТСП магнитах. Напротив, в высокотемпературных сверхпроводниках типа REBCO при температуре жидкого гелия характерны значения $n \approx 40$–50. При температуре кипения жидкого азота n составляет ~ 20−30 и еще больше снижается при приближении к температуре сверхпроводящего перехода (92 К). Более низкое значение n означает, что S-N переход при I_c становится более плавным, и транспортный ток может распределяться между отдельными лентами и металлическими стабилизирующими слоями в резистивном режиме в расширенном интервале магнитных полей и температур для $T_{cs}(B) < T < T_c$. Поскольку на практике, как правило, обычно наблюдаются реальный разброс в распределении критической плотности тока J_c вдоль ленты на уровне ~ 10–15 процентов по длине ВТСП ленты, может возникнуть предопределенная картина слабых точек, где будет происходить перераспределение тока, локальное выделение и рассеивание тепла.

3. Акустические методы детектирования перехода

Всякий раз, когда в сверхпроводящем магните возникает механическое возмущение, это приводит к всплеску акустической эмиссии (АЭ). Источники акустической эмиссии в сверхпроводящих магнитах хорошо обобщены в [28, 29]. Пассивное прослушивание АЭ магнита и анализ акустических данных с точки зрения задержек прихода и амплитуды сигнала, а также частотного спектра успешно использовались для диагностики низкотемпературных сверхпроводящих магнитов в прошлом [30, 31], и эта область продолжает активно развиваться по сей день. Однако идея использования пассивной акустической диагностики применительно к ВТСП магнитам до настоящего времени не получила широкого распространения. В то же время методы, связанные с активной акустической термометрией постепенно становятся все более распространенными [25, 27, 32, 33].

Несмотря на широкое и успешное применение акустической термометрии в жидкостях и газах, реализация аналогичных подходов для твёрдых тел долгое время оставалась серьёзной экспериментальной проблемой. Дело в том, что в жидкостях и газах термически индуцирован-

ные изменения скорости звука $c(T)$ могут быть легко измерены, что достигается путем генерации акустического импульса и измерения времени его прохождения через среду. Для передачи и приема таких импульсов могут использоваться пьезоэлектрические преобразователи, имеющие либо два преобразователя — передатчик и приемник, расположенные на противоположных сторонах объема жидкости или газа, — либо один преобразователь, работающий в режиме импульсного эха [34]. Однако этот простой подход трудно реализовать для твердого объекта произвольной формы из-за гораздо меньшей величины изменения $c(T)$, а также из-за множественных отражений и преобразований мод, происходящих внутри объекта; например, в квазиодномерном твердом стержне, где поперечная скорость звука задается формулой $v = p{\cdot}E/\rho$, а ее температурная зависимость определяется в основном модулем упругости $E(T)$, а не гораздо меньшим изменением плотности $\rho(T)$ [35].

Одной из первых работ, показавших практическую применимость акустических методов для диагностики перехода в ВТСП, является исследование Марчевского и соавторов [27, 36]. Авторы предложили метод акустической термометрии (Eigen Frequency Thermometry, EFT), в основе которого лежит активное зондирование проводника акустическими импульсами и анализ временных сдвигов многократно рассеянных упругих волн. Изменение скорости звука в материале при локальном нагреве приводит к изменению времени прихода акустического сигнала, что позволяет регистрировать и локализовать «горячие зоны» без прямого контакта с электрической цепью.

Принцип действия этого метода показан на рис. 1. Когда короткий (~ 1 мкс) акустический импульс излучается в испытуемую катушку с помощью пьезоэлектрического преобразователя, сигнал, принимаемый другим преобразователем на противоположном конце катушки, будет демонстрировать множественные колебания и, как правило, продлеваться по оси времени в течение нескольких миллисекунд. Такой удлиненный пакет волн называется «кода» и является результатом многократного рассеяния, преобразования мод и интерференции вторичных волн на их пути к приемнику. Таким образом, кода представляют собой протяжённый во времени диффузный акустический сигнал, возникающий в результате многократного рассеяния и преобразования волновых мод в твёрдом теле; их высокая чувствительность к малым изменениям скорости звука позволяет использовать фазовый сдвиг кода-волны для обнаружения локального нагрева и ранних стадий перехода. Преимущество coda-волны заключается в том, что она многократно «зондирует» обмотку катушки прежде, чем достигнуть приёмника. Таким образом, каждый раз, когда волна проходит через область с тепловыми возмущениями, она приобретает небольшую дополнительную задержку, что приводит к накоплению фазового сдвига принятого сигнала по отношению к эталонной коде, полученной до возникновения тепловых возмущений.

В эксперименте Марчевского использовалась лента REBCO длиной 1.2 м, погружённая в жидкий азот, с прикреплёнными пьезоэлектрическими преобразователями-излучателями и приёмниками. Метод продемонстрировал тепловую чувствительность лучше 1 К и способность фиксировать диссипацию мощности порядка 0.1–0.5 Вт при переходе проводника в нормальное состояние. Применение дифференциальной обработки сигналов позволило повысить точность и устойчивость к фоновым температурным колебаниям. Таким образом, EFT подтвердила эффективность акустического подхода для отдельных ВТСП лент и реальных магнитных систем на их основе, демонстрируя неинвазивность, быстродействие и устойчивость к электромагнитным шумам.

В более поздней работе Ли [37] представлена методика акустической рефлектометрии, направленная на точное определение положения зоны нагрева в ВТСП лентах второго поколения. В отличие от пассивных систем, регистрирующих акустические импульсы от перехода, данный подход основан на активном возбуждении сдвиговых волн (shear-horizontal, SH0) в ленте, рассматриваемой как волновод.

В ходе эксперимента на ВТСП ленту длиной 0.5 м устанавливались пьезоэлектриче-

ские преобразователи, возбуждающие и принимающие SH0-волну, а локальный нагрев имитировался миниатюрными резистивными нагревателями. Для анализа отражённых сигналов использовалось чирплет-преобразование, обеспечивающее высокое временно-частотное разрешение и устранение перекрёстных помех, характерных для классического распределения Вигнера–Вилла. Результаты показали, что предложенный метод позволяет различать два нагревателя, расположенные на расстоянии всего 0.5 см, что соответствует пространственному разрешению лучше 1 % длины образца. Таким образом, акустическая рефлектометрия доказала свою эффективность как инструмент точной локализации перехода, пригодный для диагностики длинных ВТСП проводников и магнитов с высоким пространственным разрешением.

В дальнейшем технология была адаптирована для катушек, намотанных из ВТСП CORC-кабеля, где акустическая термометрия позволила выявить начало S-N перехода при токе около 537 А, задолго до регистрации напряжения на катушке [25].

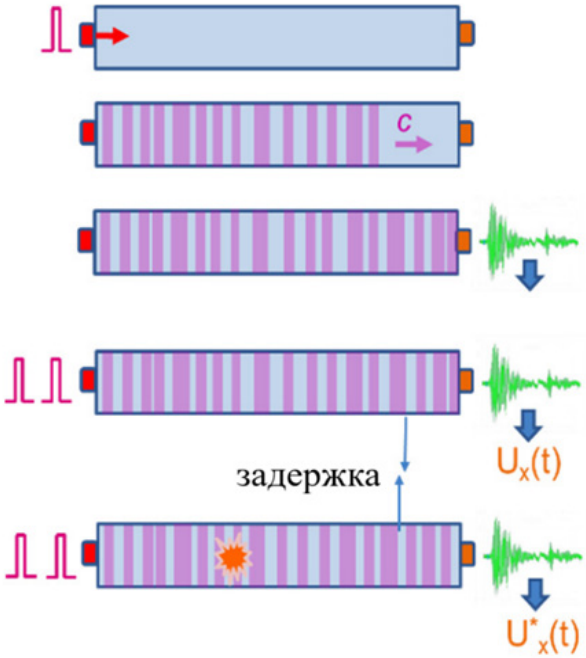


Рис. 1. — Принципиальная схема акустического зондирования в твердых телах [36].

Переход от лабораторных исследований к инженерной реализации систем акустического мониторинга перехода был предложен в работе Мура и соавторов [38]. В ней разработаны и протестированы миниатюрные MEMS-пьезоэлектрические датчики, способные функционировать при температурах вплоть до 10 K. Авторы использовали коммерческие микрофоны Vesper VM1000, из которых был удалён интегрированный усилитель ASIC, неработоспособный при температурах ниже 110 K. Вместо него применён специально разработанный криогенный предусилитель на базе операционного усилителя AD8591. Сенсоры были установлены вдоль трубки, содержащей образец ленты REBCO, охлаждённой в гелии до 20–60 K.

Экспериментальные данные подтвердили способность MEMS-сенсоров фиксировать акустические импульсы, возникающие в момент перехода. Зарегистрированные сигналы имели амплитуду от долей паскаля до 200 Па при разрушении образца, что соответствует высоким уровням акустической энергии. Система показала стабильную работу при криогенных температурах и возможность интеграции массива сенсоров без существенного усложнения конструкции сверхпроводящего магнита. Преимуществами предложенного решения являются низкая стоимость, простота масштабирования и потенциальная возможность формирования распределённой сети датчиков для раннего обнаружения перехода в крупных магнитных системах.

Представленная совокупность работ в области акустического детектирования перехода в ВТСП системах представляет собой значительный прогресс в решении критически важной задачи обнаружения затухания для высокотемпературных сверхпроводниковых магнитов, используемых в термоядерных реакторах и ускорителях. Акустический подход имеет ряд неоспоримых преимуществ: неинвазивность, высокая помехоустойчивость, возможность распределенного зондирования и экономическая эффективность по сравнению с оптическими альтернативами. Ключевой результат представленных исследований заключается в демонстрации того, что температурно-зависимые изменения модулей упругости в многокомпонентных высокотемпературных сверхпроводниках производят измеримые акустические сигнатуры с достаточной чувствительностью (< 1 K) и пространственным разрешением (< 1%) для практического обнаружения перехода. Разработка технологий (криогенные предусилители, алгоритмы временного-частотного анализа) наряду с экспериментальной валидацией создает основу для передачи технологий в эксплуатационные системы.

4. Заключение

В настоящем обзоре рассмотрены современные акустические подходы к детектированию перехода в высокотемпературных сверхпроводящих кабелях и магнитных системах на их основе. Показано, что особенности ВТСП кабелей, включая низкую скорость распространения нормальной зоны, сложную многослойную архитектуру лент и возможность перераспределения тока между отдельными лентами, существенно осложняют раннее обнаружение перехода традиционными методами, основанными на измерении напряжения и температуры. Это обстоятельство обусловливает необходимость развития альтернативных подходов к детектированию перехода.

В обзоре упомянуты оптоволоконные, магнитные и ёмкостные методы детектирования, а основной акцент сделан на акустических подходах как одном из наиболее перспективных и в то же время сравнительно мало систематизированных направлений. Показано, что акустические методы, включающие пассивную акустическую эмиссию и активную акустическую термометрию, позволяют регистрировать ранние стадии локального нагрева, связанные с термомеханическими процессами в проводнике, и обладают рядом существенных преимуществ, таких как неинвазивность, устойчивость к электромагнитным помехам и возможность распределённого зондирования.

На основе анализа опубликованных экспериментальных и методических работ продемонстрировано, что температурно-зависимые изменения модулей упругости в многокомпонентных ВТСП проводниках формируют измеримые акустические сигналы с температурной чувствительностью порядка единиц кельвина и пространственным разрешением на уровне процентов от длины образца, что является достаточным для практического детектирования перехода.

В целом акустические методы детектирования перехода представляют собой перспективное дополнение к существующим системам защиты ВТСП магнитов и могут рассматриваться как важный элемент комплексного мониторинга их состояния. Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию распределённых сетей акустических датчиков, повышение устойчивости к эксплуатационным шумам и валидацию методов на полноразмерных магнитных установках. Совокупность представленных в обзоре результатов указывает на высокий потенциал акустических подходов для практического применения в будущих высокополевых ВТСП системах.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2025-0008) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

[1] Z.Y. Li, Z.C. Pan, Q.J. Zhang, K.P. Zhu, C. Zhang, Z.W. Zhang, G. Dong, Y.M. Ye, Z. Yang, Superconductivity **12**, 100137 (2024). DOI: 10.1016/j.supcon.2024.100137
[2] M. Windridge, Philosophical Transactions of the Royal Society A **377**, 20170438 (2019). DOI: 10.1098/rsta.2017.0438
[3] L. Rossi, C. Senatore, Instruments **5**, 8 (2021). DOI: 10.3390/instruments5010008
[4] H. Piekarz, S. Hays, J. Blowers, B. Claypool, V. Shiltsev, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment **943**, 162490 (2019). DOI: 10.1016/j.nima.2019.162490
[5] D. Park, J. Bascuñán , Y. Li , W. Lee , Y. Choi, Y. Iwasa, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **31**, 4300206 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3064006
[6] Y. Yanagisawa, M. Hamada, K. Hashi, H. Maeda, Superconductor Science and Technology **35**, 044006 (2022). DOI: 10.1088/1361-6668/ac5644
[7] Y. Öztürk, B. Shen, R. Williams, J. Gawith, J. Yang, J. Ma, A. Carpenter, T. Coombs, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **31**, 4400405 (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3068305
[8] H. Park, G. Kim, K. Choi, J. Park, J. Kim, S. Choi, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **34**, 4402705 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3365084
[9] J. Zheng, J. Zheng, Y. Cheng, M. Li, H. Khodzhibagiyan, Sh. Dai, M. Novikov, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **34**, 4606405 (2024). DOI: 10.1109/TASC.2024.3446286
[10] A.H.K. Asadi, et al. Optimal Design of High Density HTS-SMES Step-Shaped Cross- Sectional Solenoid to mechanical stress reduction // International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS), vol. 16, pp. 1-6, 2022.
[11] T. Mato and S. Noguchi, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **32**, 3700105 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2021.3135796
[12] J.v. Nugteren, J. Murtomäki, J. Ruuskanen, G. Kirby, P. Hagen, G.d. Rijk, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **29**, 4700108 (2019). DOI: 10.1109/TASC.2018.2848229
[13] M. Marchevsky, Instruments **5**, 27 (2021). DOI: 10.3390/instruments5030027
[14] H. Maeda, Y. Yanagisawa, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **24**, 4602412 (2014). DOI: 10.1109/TASC.2013.2287707
[15] H. Lu , Y. Hu, Y. Xiao, X. Li, L. Zheng, Q. Yan, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **33**, 9000907 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3317182
[16] J.R. Hull, M. Wilson, L. Bottura, L. Rossi, Applied Superconductivity : Handbook on Devices and Applications // Superconducting Magnets, 2015.
[17] H. Song, M.W. Davidson, J. Schwartz, Superconductor Science and Technology **22**, 062001 (2009). DOI: 10.1088/0953-2048/22/6/062001
[18] F. Trillaud, G. dos Santos, G. Gonçalves Sotelo, Materials **14**, 1892 (2021). DOI: 10.3390/ma14081892
[19] T. Lécrevisse, X. Chaud, P. Fazilleau, C. Genot, J.-B. Song, Superconductor Science and Technology **35**, 074004 (2022). DOI: 10.1088/1361-6668/ac49a5
[20] B. Caiffi, L. Alfonso, A. Bersani, L. Bottura, S. Farinon, A. Gagno, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **35**, 4002007 (2025). DOI: 10.1109/TASC.2025.3529424
[21] E.E. Salazar, R. A. Badcock, M. Bajko, B. Castaldo, M. Davies, J. Estrada, V. Fry, J.T. Gonzales, Ph.C Michael, M. Segal, Superconductor Science and Technology **34**, 035027 (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/abdba8
[22] J. Jiang, J. Jiang, Y. Zhao, Z. Hong, J. Zhang, Z. Li, D. Hu, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 4702105 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2802487
[23] F. Scurti, S. Ishmael, G. Flanagan, J. Schwartz, Superconductor Science and Technology **29**, 03LT01 (2016). DOI: 10.1088/0953-2048/29/3/03LT01
[24] R. Teyber, M. Marchevsky, S. Prestemon, J. Weiss, D. van der Laan, Superconductor Science and Technology **33**, 095009 (2020). DOI: 10.1088/1361-6668/ab9ef3

[25] M. Marchevsky, E. Hershkovitz, X. Wang, S.A. Gourlay, S. Prestemon, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **28**, 4703105 (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2817218
[26] E. Ravaioli, D. Davis, M. Marchevsky, G.L. Sabbi, T. Shen, A. Verweij, K. Zhang, Physica Scripta **95**, 015002 (2020). DOI: 10.1088/1402-4896/ab4570
[27] M. Marchevsky, S.A. Gourlay, Applied Physics Letters **110**, 012601 (2017). DOI: 10.1063/1.4973466
[28] O.O. Ige, A.D. McInturff, Y. Iwasa, Cryogenics **26**, 131 (1986). DOI: 10.1016/0011-2275(86)90212-2
[29] O. Tsukamoto, M.W. Sinclair, M.F. Steinhoff, Y. Iwasa, Applied Physics Letters **38**, 718 (1981). DOI: 10.1063/1.92491
[30] M. Marchevsky, G. Sabbi, H. Bajas, S. Gourlay, Cryogenics **69**, 50 (2015). DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.03.005
[31] O. Tsukamoto, J.F. Maguire, E.S. Bobrov, Y. Iwasa, Applied Physics Letters **39**, 172 (1981). DOI: 10.1063/1.92652
[32] M. Marchevsky, S. Prestemon, O. Lobkis, R. Roth, D.C. van der Laan, J.D. Weiss, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **32**, 4701705 (2022). DOI: 10.1109/TASC.2022.3164035
[33] G.S. Lee, M. Marchevsky, S. Prestemon, IEEE Transactions on Applied Superconductivity **33**, 9000505 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3245560
[34] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Ultrasonic testing of materials. Springer Science & Business Media, 2013. DOI: 10.1007/978-3-662-02296-2
[35] H.M. Ledbetter, Cryogenics **22**, 653 (1982). DOI: 10.1016/0011-2275(82)90072-8
[36] M. Marchevsky, Y.Y. Xie, V. Selvamanickam, Superconductor Science and Technology **23**, 034016 (2010). DOI: 10.1088/0953-2048/23/3/034016
[37] G.S. Lee, M. Marchevsky, C. Sanabria, S. Prestemon, IEEE Sensors Journal **22**, 21846 (2022). DOI: 10.1109/JSEN.2022.3209143
[38] P. Moore, B. Isaacson, J. D'Alessandro, F. Alquaddoomi, Z. Zhao, O. Doolittle, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **33**, 4702206 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3251941

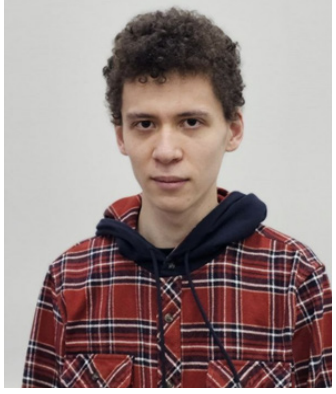
Acoustic methods for quench detection in HTS cables

D. A. Aleksandrov[1,*], I.V. Martirosian[1], S. V. Pokrovskii[1]

1 NRNU MEPhI, Kashirskoye Highway, 31, 115409, Moscow, Russia
* e-mail: dimax.2001@mail.ru

This review summarizes modern approaches to quench detection in high-temperature superconducting (HTS) cables and magnets. The peculiarities of quench development in HTS conductors are discussed, including the low normal zone propagation velocity, the complex multilayer cable architecture, and current redistribution among individual tapes. These factors significantly complicate early detection of the transition from the superconducting to the normal state using conventional voltage- and temperature-based methods. Alternative quench detection approaches, including fiber-optic, magnetic, and capacitive techniques, are listed. The main focus is placed on acoustic quench detection methods, which have recently demonstrated significant potential due to their non-invasive nature, immunity to electromagnetic interference, and ability to detect early stages of localized heating associated with thermomechanical processes in the conductor. The principles of passive acoustic emission and active acoustic thermometry, including techniques based on multiply scattered elastic waves (coda waves), are analyzed in detail, along with experimental results obtained on individual HTS tapes and cables. Achieved temperature sensitivity and spatial resolution are discussed, as well as the prospects for implementing acoustic methods in operational HTS magnet systems.

Keywords: HTS; quench; CORC®; ROEBEL; NZP; VIPER.



Дмитрий Александрович Александров — инженер-исследователь лаборатории НИЛ СЭС, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Dmitrii Aleksandrov — research engineer at Superconducting Energy Systems laboratory, National research nuclear university «MEPHI».

Ирина Валерьевна Мартиросян — доцент, к. ф.-м. н., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Dr. Irina Martirosian — National research nuclear university «MEPHI».

Сергей Владимирович Покровский — доцент, к. ф.-м. н., зав. лабораторией НИЛ СЭС Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Sergey Pokrovskii — Ph. D; Assoc. Prof.; head of Superconducting Energy Systems laboratory National research nuclear university «MEPHI».