



УДК 538.945

Обзор

## Неизолированные сверхпроводящие обмотки: анализ методов описания электромагнитных процессов

Д. С. Яшкин<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», пл. акад. Курчатова, д.1, 123098 Москва, Россия

\* e-mail: yashkin\_ds@nrcki.ru

Магнитные системы, сконструированные на основе неизолированной сверхпроводящей обмотки (НИСО), находят всё больше практических применений и представляют собой научный и промышленный инструмент с колоссальными перспективами. Основное их достоинство — устойчивость к перегоранию вследствие наличия защиты в виде «встроенного» шунтирующего сопротивления. Однако серьёзным недостатком НИСО является неопределённость пути протекания тока, что затрудняет как описание характеристик таких катушек, так и предсказание их поведения в заданных условиях. В данном обзоре показаны основные известные в литературе методы для описания протекающих в НИСО электромагнитных процессов и проанализированы границы применимости этих методов.

Ключевые слова: неизолированные магниты; НИСО; резистивно связанные витки; PCB; эквивалентная схема; моделирование.

DOI: 10.62539/2949-5644-2024-0-1-41-52

### 1. Введение

Сама концепция сверхпроводящего соленоида с резистивной связью между витками вообще-то не нова. Уже в 1913 году Камерлинг-Оннес описывал эксперимент со стальной трубкой, заполненной ртутью, которая, будучи скручена в катушку, даже с прижатыми друг к другу витками всё равно должна являться электромагнитом при температуре ниже 4.19 К [1]. Позже на различных этапах развития технологии эти идеи всплывали (например, в [2] представлен подробный анализ электродинамики сверхпроводникового магнита при появлении в нём короткозамкнутых витков), однако широкого распространения не получали.

В 2010 году в Массачусетском технологическом институте велась разработка сверхпроводникового магнита для ядерных магнито-резонансных исследований (ЯМР). Seungyong Hahn с соавторами опубликовал статью [3], в которой предложил отказаться от использования межвитковой изоляции в разрабатываемом соленоиде галетного типа (одиночная галета — pancake или двойная галета — double-pancake (DP)). Авторы привели базовую эквивалентную схему (рис. 1a), ввели понятия радиального и азимутального сопротивления и сопроводили статью расчётом их величин исходя из экспериментально определяемых параметров экспоненциальных процессов. Там же авторы привели результаты испытаний по вводу/выводу тока (рис. 1b), резкому обрыву питания, а также результаты эксперимента по вводу тока, существенно превышающего критическое значение. Эти три эксперимента до сих пор являются «золотым стандартом» характеристики НИСО. Следует отметить, что уже в этой статье авторы обратили внимание на то, что переходный процесс являлся экспоненциальным лишь приблизительно.

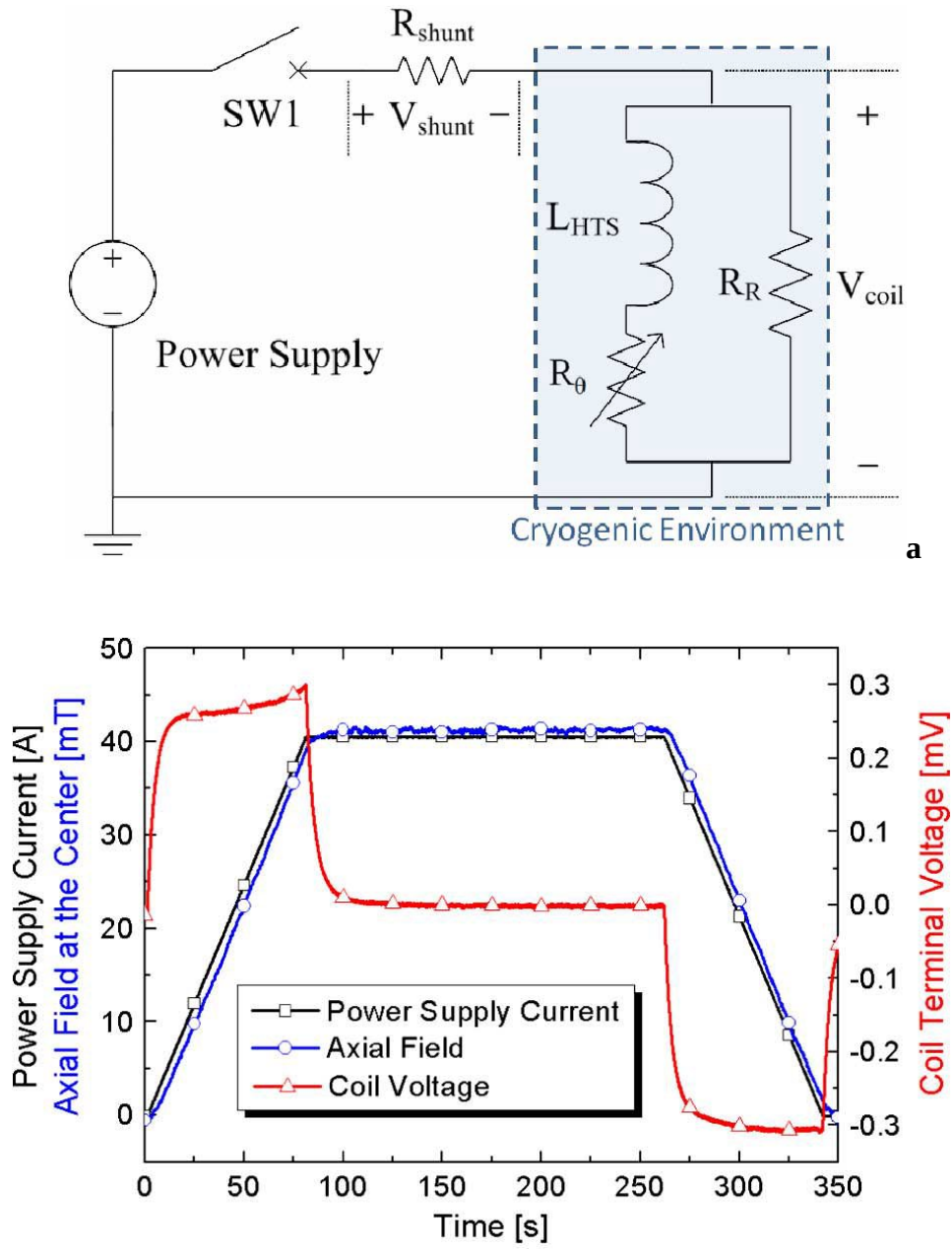


Рис. 1. (а) Базовая эквивалентная схема НИСО [3]. (б) Зависимость тока, магнитного поля и напряжения от времени в НИСО [2].

В той же статье авторы описали вариант конструкции, при котором параллельно со сверхпроводящей лентой наматывалась лента хастеллоя, что всё ещё обеспечивало шунтирование галеты, но значительно увеличивало радиальное сопротивление. Такая конструкция позже получила название MI HTS (metal-insulated) — обмотка с металлической изоляцией. Вскоре в работе [4] было экспериментально показано, что НИСО действительно являются более устойчивыми к перегоранию, чем катушки с изоляцией. Позже в работе [5] авторы показали (также экспериментально), что НИСО имеют ещё одно важное преимущество: неизолированные обмотки менее чувствительны к дефектам в однородности критического тока по длине ленты и оказываются работоспособными при достаточно существенных локальных провалах.

## 2. Описание с использованием эквивалентных схем

Начиная с первой же работы, эквивалентные схемы стали основным методом описания свойств НИСО, поскольку они требуют весьма ограниченных вычислительных мощностей для численного моделирования, а также позволяют проводить и аналитические изыскания.

### 2.1. Схемы с сосредоточенными параметрами

Базовая схема на рис. 1а, схема с сосредоточенными параметрами, позволяла качественно описать такие наблюдаемые характерные явления как плавное изменение напряжения и отставание магнитного поля в процессе ввода/вывода тока, экспоненциальное затухание поля и напряжения при обрыве тока, возможность безаварийного функционирования при токах, превышающих критическое значение. Пользуясь этой схемой, можно экспериментально определить индуктивность обмотки, радиальное сопротивление, время релаксации [6]. В работе [7] авторы варьировали натяжение ленты при намотке и получили при большем натяжении меньшее сопротивление и, следовательно, большее характерное время релаксации. В работе [8] для анализа радиального сопротивления используется задача Герца. Также базовая схема позволяет рассчитывать взаимодействие с внешними магнитными системами, как это сделано в [9] (рис.2)

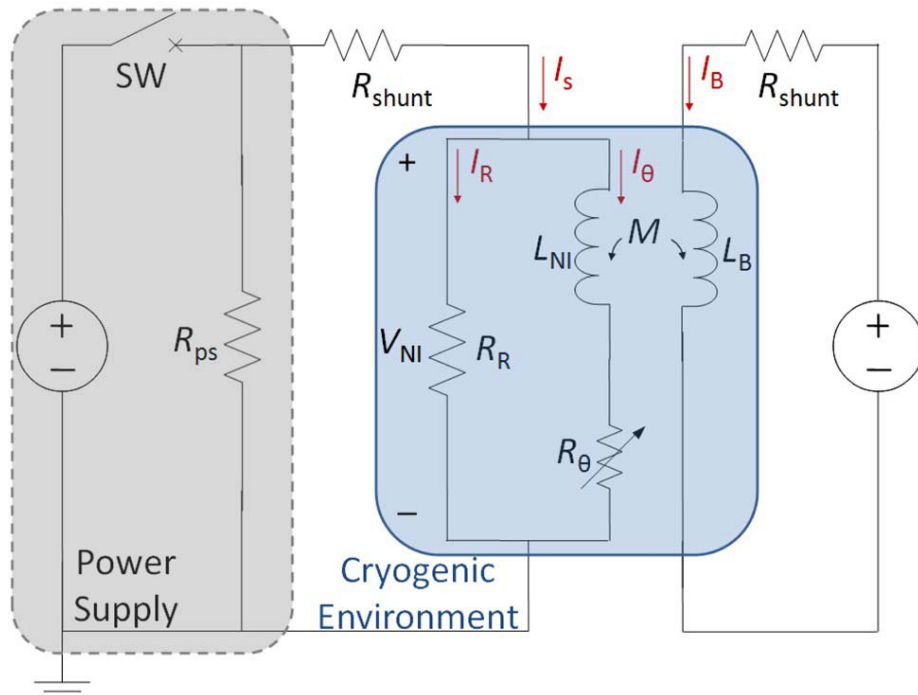
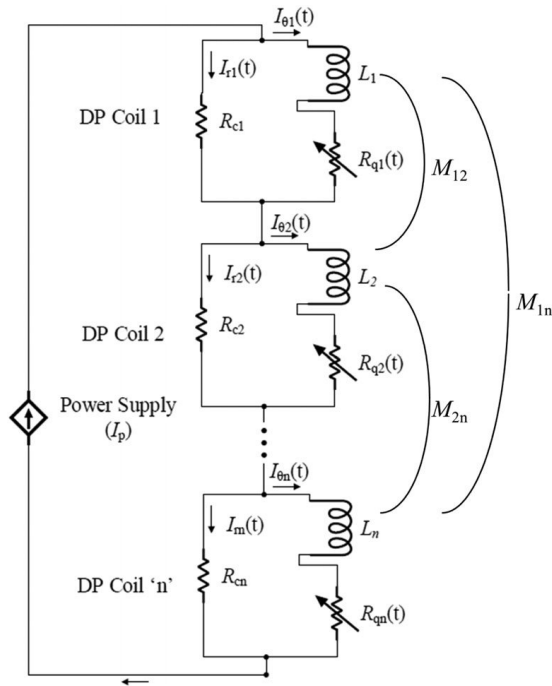
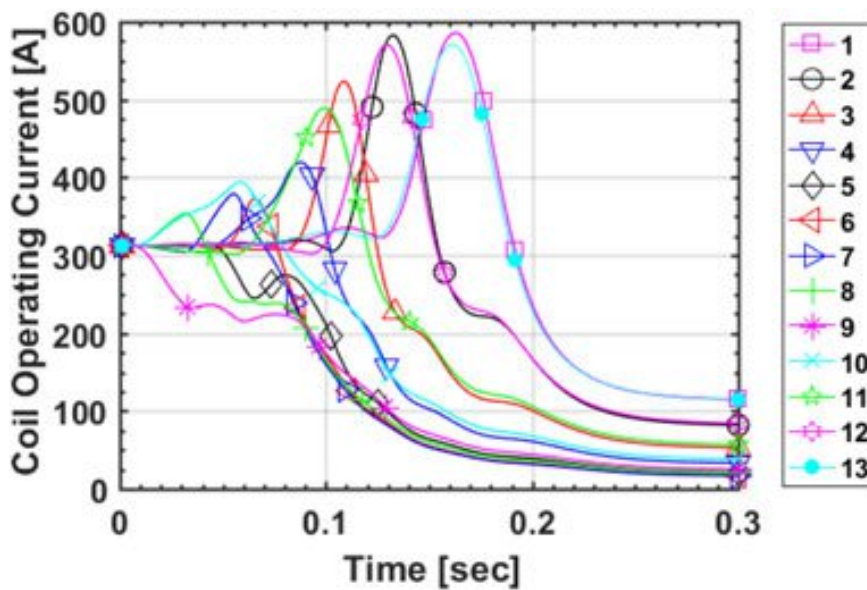


Рис. 2. Базовая эквивалентная схема НИСО, адаптированная для моделирования взаимодействия с внешним полем [9].

Из введения взаимодействия с внешними магнитными системами естественным образом вытекает возможность расширить модель на несколько последовательно соединённых двойных галет, что сделано в [10] (рис. 3а). В расчёте, моделирующем систему из тринадцати двойных галет, авторы работы получили резкий рост азимутального тока в отдельных галетах вследствие перераспределения магнитного потока между секциями после выключения источника. Двукратный рост был, по сути, ограничен фактически запасом по критическому току. Результаты эксперимента качественно соответствовали результатам моделирования.



a



b

**Рис. 3.** (а) Последовательная эквивалентная схема НИСО. (б) Зависимость тока в различных двойных галетах НИСО от времени при переходном процессе (модель) [10].

Схема с делением на последовательные участки применима и к отдельным катушкам. В работе [11] такая схема предложена для катушки с частичной изоляцией (partial-insulated, PI HTS), в которой изоляция прокладывалась через каждые пять витков. В работе [12] авторы, рассматривая влияние дефекта, делят катушку на пять участков: участок с дефектом, два участка, примыкающие к дефекту, на которые он оказывает непосредственное влияние, два участка далеко от дефекта (рис. 4). В работе [13] также использовано деление катушки с дефектом на пять последовательных частей. Сравнение результатов моделирования с экспериментом показало хорошее соответствие.

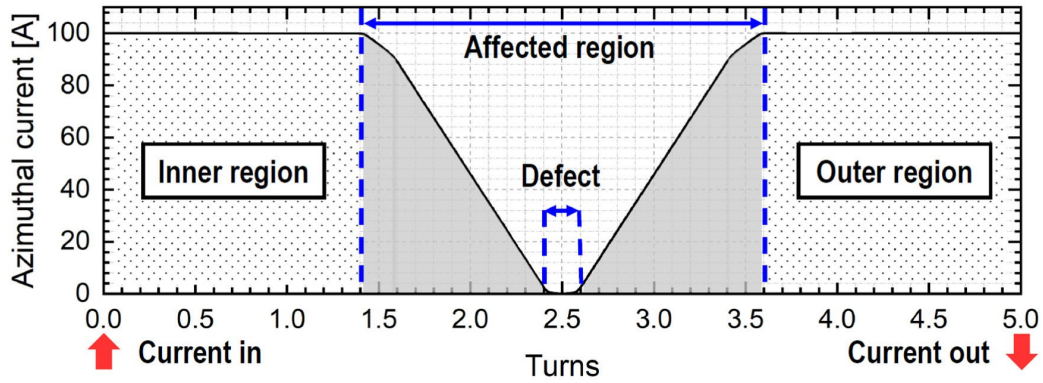
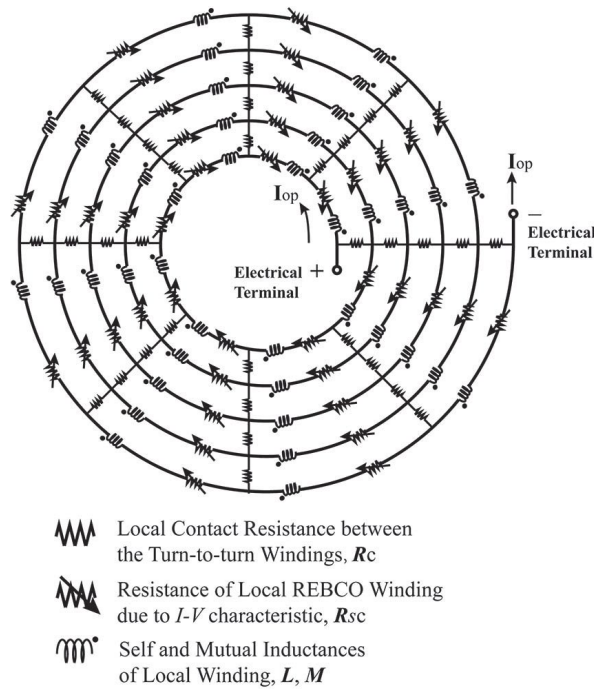


Рис. 4. Схема деления НИСО с дефектом на пять частей [12].

### 2.2. Распределённые схемы

В работе [14] авторы предложили использовать эквивалентную схему, в которой катушка разделена на звенья, соединённые в цепь в виде спирали с соответствующими резистивными и индуктивными связями (рис. 5а). Эта модель унаследовала название своего прототипа, использовавшегося в радиотехнике partial element equivalent circuit (ПЕЕС) [15]. Такая схема содержит связанные друг с другом индуктивные элементы, резисторы, представляющие собой радиальное сопротивление и нелинейные диссипативные элементы, отвечающие за характерную для сверхпроводника нелинейную вольт-амперную характеристику. Количество элементов на оборот спирали можно варьировать, при уменьшении их до одного элемента на виток произойдёт предельный переход к схеме рис. 3а. Таким образом, спиральная схема расширяет возможности последовательной схемы, добавляя, в частности, возможность моделировать явления, неоднородные по углу намотки, например, нагрев и распространение тепла от токовых вводов (рис. 5b).

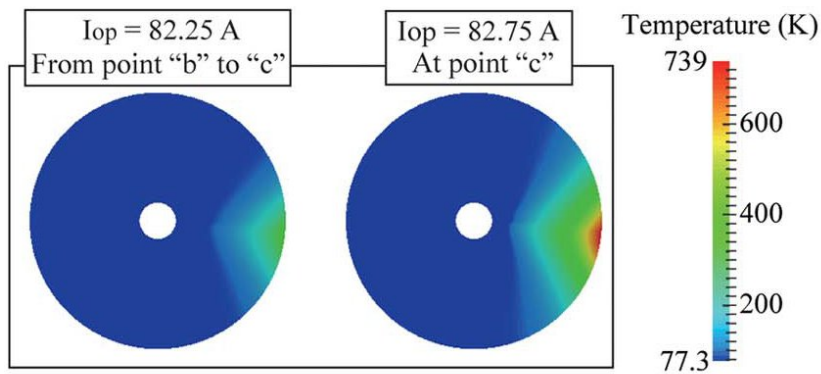
а



а



b

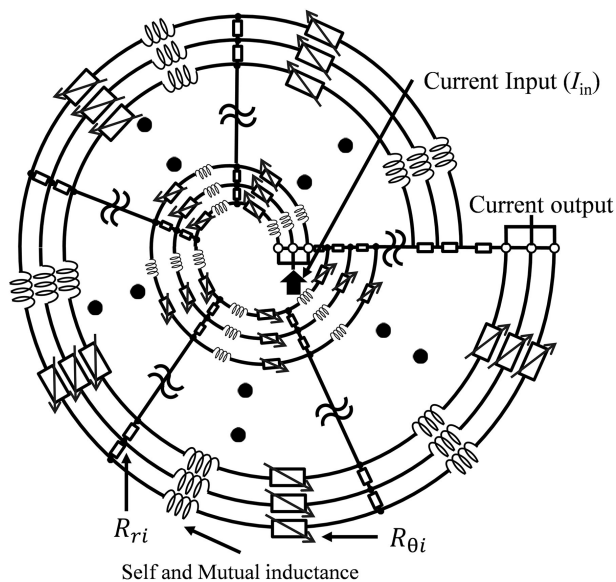


b

**Рис. 5.** (а) Эквивалентная схема НИСО типа спирали [14]. (б) Пример моделирования локального разогрева НИСО вблизи токового ввода [14].

Современные тенденции к использованию НИСО в крупных системах, таких, например, как токамак, требуют обратить пристальное внимание на проблему длительности процессов введения и вывода поля из них. Одним из способов снижения характерного времени переходных процессов является формирование НИСО не из одиночных лент, а сразу из ленточных пакетов (parallel-wound no-insulation, PWNI HTS), поскольку такой подход, очевидно, снижает индуктивность магнитной системы.

В работе [16] авторы рассматривают спиральную эквивалентную схему, модифицированную для случая параллельной намотки (рис. 6а).



**Рис. 6.** Эквивалентная схема НИСО с параллельной намоткой [15].

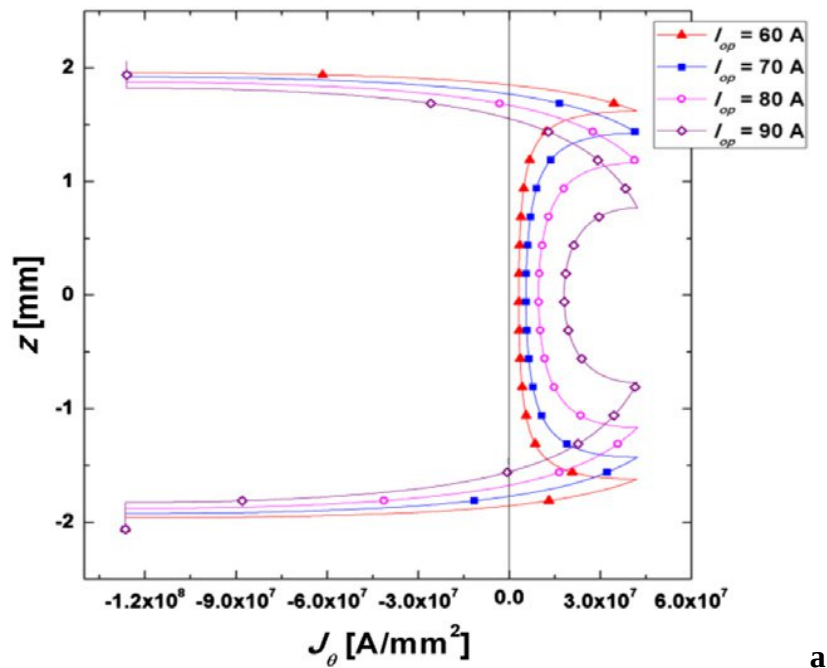
В такой схеме становится возможным моделирование проблемы, знакомой по разработке сверхпроводящих кабелей, — проблемы несбалансированности индуктивностей отдельных лент. В статье утверждается, что моделирование успешно проявляет эту проблему. Увеличение количества лент в пакете усугубляет её. Спиральная схема наряду с достоинствами обладает и существенным недостатком: её расчет занимает существенно больше машинного времени и ресурсов, поскольку в ней кратно больше связанных друг с другом элементов, чем в последовательной схеме. В работе [17] авторы утверждают, что спиральную схему имеет смысл

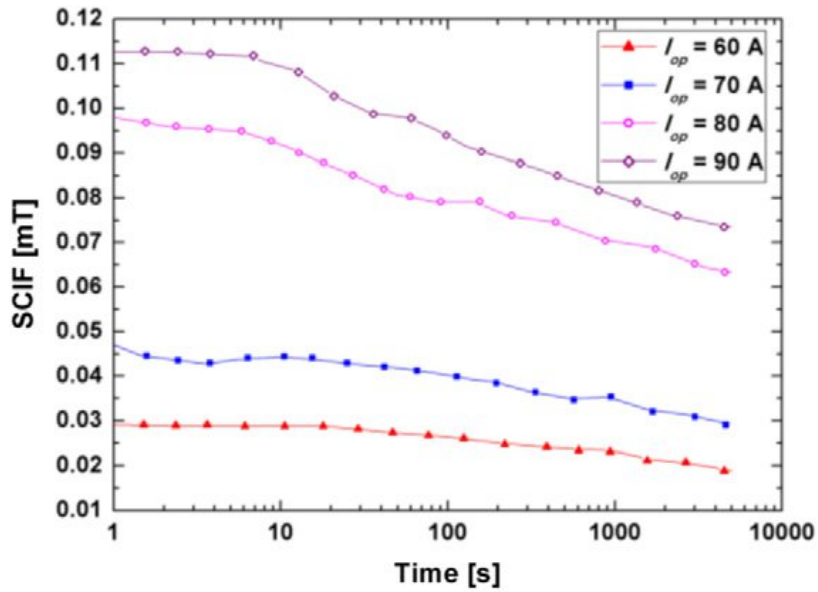
применять тогда, когда азимутальный ток превышает критическое значение. В остальное время для симуляции можно использовать базовую модель с сосредоточенными параметрами. Сравнение результатов моделирования разных моделей между собой, а также с экспериментом подтвердило правомерность такого гибридного подхода. Дополнительно полезные ссылки можно найти в обзоре, которым Seungyong Hahn с коллегами в 2018 году подводил промежуточный итог семилетнего развития НИСО [18].

### 3. Учет экранирующих токов

Описанные выше схемы хорошо моделируют базовые экспоненциальные процессы, позволяют проследить за перераспределением магнитного потока между обмотками магнитной системы или между частями одной обмотки, а также даже увидеть несбалансированность ленточного пакета. Однако есть целый класс явлений, к описанию которых эти схемы даже не подступились. Эти явления касаются электродинамики экранирующих токов (screening current), возникающих из-за того, что по сверхпроводящей ленте транспортный ток не обязан растекаться равномерно и его распределение зависит, в том числе, от предыстории обмотки. В англоязычной литературе часто используется аббревиатура SCIF — screening current-induced field, обозначающая магнитное поле (либо добавку к полю), возникающее вследствие наличия этих токов. Строго говоря, поле экранирующих токов не является эффектом, специфичным для НИСО, однако НИСО являются тем «предметным стеклом», на котором этот эффект можно детально, удобно и безопасно исследовать.

В работе [19] авторы на основе аналитических расчетов из классических работ Бина, Брандта, Зельдова постулируют наличие экранирующих токов, рассчитывают их конфигурации (рис. 7а) и демонстрируют экспериментально наличие поправки к полю, рассчитанному по базовой модели. Также в работе экспериментально показано, что поле экранирующих токов затухает логарифмически медленно, как и положено полю замкнутого сверхпроводящего контура (рис. 7b).



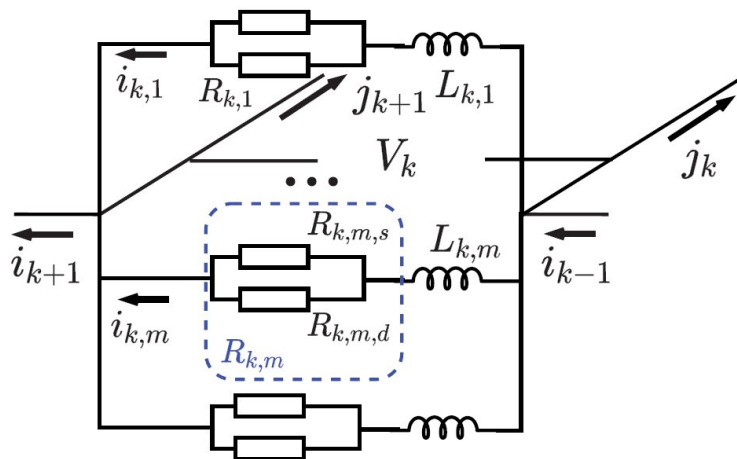


**b**

**Рис. 7.** (а) Примеры распределения тока по ширине ленты в НИСО. (б) Логарифмическая релаксация поля экранирующих токов [19].

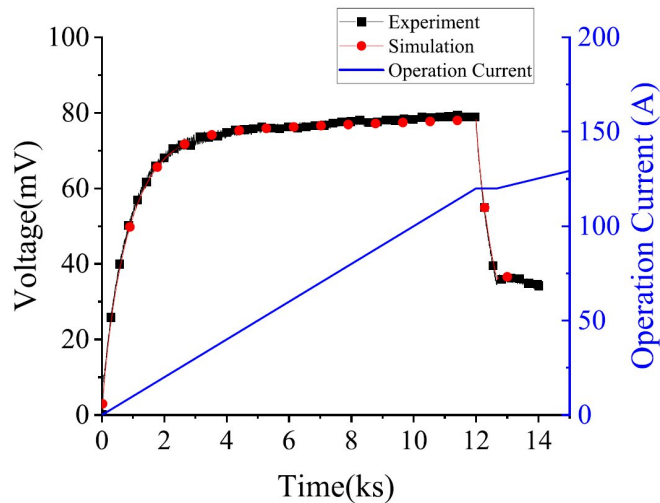
Однако роль экранирующих токов не ограничивается генерацией остаточного слабозатухающего поля. Еще на графике рис. 1b можно заметить прибавку к напряжению при процессах ввода-вывода тока из НИСО. Эта прибавка не объясняется описанными выше эквивалентными схемами, поскольку в них напряжение через продолжительное время должно так или иначе экспоненциально выходить на константу. В статье [20] авторы предположили, что это может быть вызвано эффектом Холла в достаточно сильном магнитном поле. Была скорректирована эквивалентная схема, проведены оценки, моделирование, и в итоге авторы пришли к выводу, что эффект Холла скорее всего не при чем. В работе [21] авторы подавали на НИСО переменный ток низкой частоты, наблюдали на ней нелинейный рост напряжения при увеличении амплитуды силы тока и интерпретировали результат как возрастающую с величиной переменного тока эффективную индуктивность.

Причина возникновения дополнительного напряжения при равномерном вводе тока в НИСО показана в статьях [22, 23]. Авторы обеих работ разделили ленту на элементы вдоль её ширины, таким образом, в модели появилась возможность протекания замкнутых сверхтоков (рис. 8а, 9а).



**a**

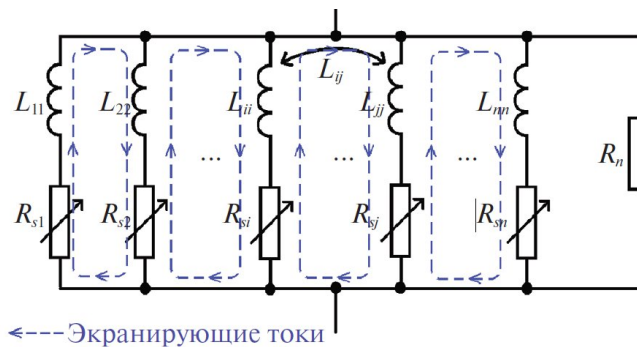




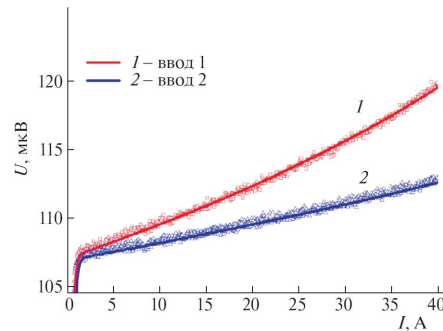
**б**

**Рис. 8.** (а) Эквивалентная схема НИСО, адаптированная к расчету экранирующих токов. (б) Зависимость тока и напряжения в модели и эксперименте от времени в НИСО [22].

Такая модель описывает возникновение и релаксацию экранирующих токов, и результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными результатами в соответствующих работах (рис. 8b, 9b).



**а**



**б**

**Рис. 9.** (а) Эквивалентная схема НИСО, адаптированная к расчету экранирующих токов. (б) Модельная и экспериментальная зависимость напряжения в НИСО от времени при вводе тока с постоянной скоростью первый раз (ввод 1) и последующие разы без отогрева (ввод 2); по оси абсцисс указан ток через выводы НИСО в соответствующие моменты времени [23].

Отдельно следует отметить работу [24], в которой предложен изящный метод учета экранирующих токов. Авторы взяли за основу последовательную схему и с каждым индуктивным элементом связали, опять же индуктивно, замкнутый сверхпроводящий контур (рис. 10). При этом объём требующихся вычислительных ресурсов увеличивается незначительно по сравнению со схемой рис. 8а или, тем более, методом конечных элементов (МКЭ). Авторы утверждают, что точность модели оказывается вполне удовлетворительная. Однако также следует заметить, что в статье описан только однонаправленный процесс — ввод тока в катушку.

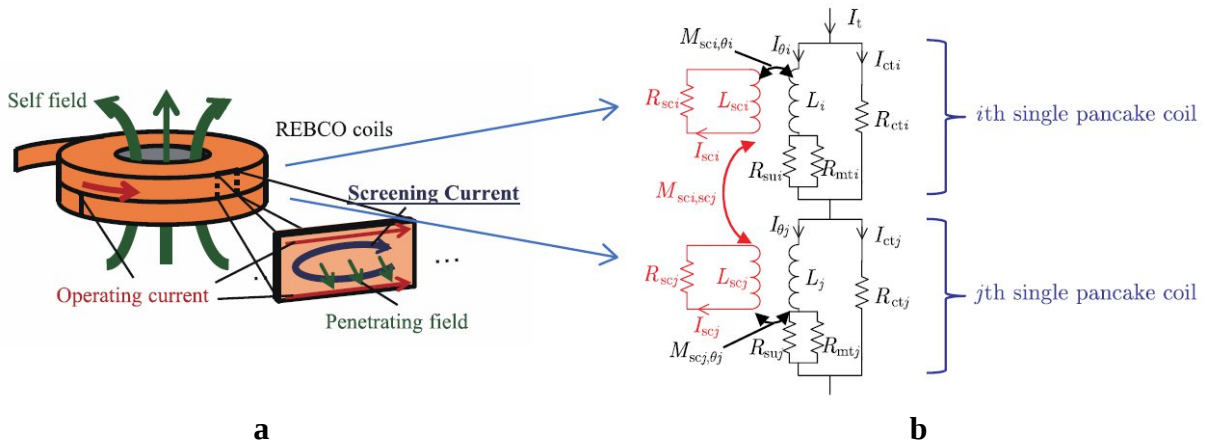


Рис. 10. Последовательная эквивалентная схема НИСО, адаптированная для учета экранирующих токов [24].

Разумеется, перечисляя способы моделирования НИСО, нельзя пройти мимо метода конечных элементов, интегрированного в специализированный программный комплекс. В работе [25] авторы сравнили результаты, полученные МКЭ и расчетом спиральной схемы. Результаты МКЭ отличались лучшим совпадением с экспериментом, но авторы также отметили то, что расчет эквивалентных схем требует меньше времени и ресурсов. Из множества работ, использующих МКЭ, стоит выделить работу [26]. Авторы тоже моделируют систему с помощью МКЭ и спиральной схемы, закономерно получают соответствие там, где процессы касаются межвитковой неоднородности и несоответствие там, где необходимо учесть экранирующие токи. Авторы приходят к выводу, что эквивалентными схемами следует пользоваться с осторожностью. Также в этой работе можно найти много полезных ссылок. В целом, работы с использованием МКЭ методически похожи друг на друга, а перечисление конкретных решенных прикладных задач не является целью данного обзора.

#### 4. Заключение

Использование неизолированных сверхпроводящих обмоток постепенно становится всё более массовым, а моделирование поведения НИСО — всё более рутинной процедурой. И, разумеется, метод конечных элементов в этой области лидирует, поскольку он универсален, хоть и ресурсоёмок. Тем не менее, у МКЭ есть ещё одна отличительная черта: он хорошо рассчитывает, что будет с конкретной системой, позволяет постфактум понять, что пошло не так, если что-то пошло не так [27], но с его помощью сложно выявлять общие закономерности систем. Поэтому, возможно, не стоит совсем отказываться от использования эквивалентных схем. Необходимо как раз эффективно искать эти общие закономерности. В литературе можно найти много конкретных расчетов, но мало конкретных рекомендаций. Накоплено большое количество экспериментальных данных. В нашей коллекции достаточно марок — пришло время заняться физикой.

#### Благодарности

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

#### Литература

- [1] H. K. Onnes, KNAW Proceedings, **15**, 1406, (1913).
- [2] V. E. Keilin and L. B. Lugansky, IEEE Trans. Appl. Supercond., **11**, 1454, (2001). DOI: 10.1109/77.920046.

- [3] S. Hahn, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **21**, 1592, (2010). DOI: 10.1109/TASC.2010.2093492
- [4] S. Choi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **22**, 4904004, (2011). DOI: 10.1109/TASC.2011.2175892
- [5] S. Hahn, et al., Supercond. Sci. Technol., **29**, 105017, (2016). DOI 10.1088/0953-2048/29/10/105017
- [6] Е. П. Красноперов и др., Измерительная техника **9**, 41, (2021). DOI: 10.32446/0368-1025it.2021-9-41-46
- [7] K. L. Kim, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **24**, 1, (2013). DOI: 10.1109/TASC.2013.2283855
- [8] D. G. Yang, et al. IEEE Trans. Appl. Supercond., **25**, 1, (2014).
- [9] S. Hahn, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **23**, 4601705, (2013). DOI: 10.1109/TASC.2013.2240756
- [10] K. R. Bhattarai, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **27**, 1 (2017). DOI: 10.1109/TASC.2017.2669962
- [11] Y. H. Choi, et al., Supercond. Sci. Technol., **24**, 125013, (2011). DOI 10.1088/0953-2048/24/12/125013
- [12] S. An, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **31**, 1, (2021). DOI: 10.1109/TASC.2021.3066197
- [13] U. Bong, et al., Supercond. Sci. Technol., **34**, 085003, (2021). DOI 10.1088/1361-6668/ac0759
- [14] T. Wang, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **25**, 1, (2015). DOI: 10.1109/TASC.2010.2089595
- [15] N. Gvozdenovic, et al., European Microwave Conference, IEEE, 1103, (2013). DOI: 10.23919/EuMC.2013.6686854
- [16] H. Kobayashi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **33**, 1, (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3251301
- [17] M. Cho, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **29**, 1 (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2899501
- [18] S. Hahn, et al., J Cryog. Supercond. Soc. Japan, **53**, 2, (2018). DOI: 10.2221/JCSJ.53.2
- [19] D. G. Yang, et al., Supercond. Sci. Technol., **26**, 105025, (2013). DOI: 10.1088/0953-2048/26/10/105025
- [20] S. Noguchi, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **28**, 1, (2018). DOI: 10.1109/TASC.2018.2799573
- [21] S. Chen, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **29**, 1, (2019). DOI: 10.1109/TASC.2019.2897868
- [22] L. Qin, et al., Supercond. Sci. Technol., **34**, 075002, (2021). DOI: 10.1088/1361-6668/abfc28
- [23] Д.С. Яшкин и др., Вестник ВИТ «ЭРА», **3**, 54 (2022). DOI: 10.56304/S2782375X22020188
- [24] S. Noguchi, et al., Supercond. Sci. Technol., **33**, 11500,5 (2020). DOI 10.1088/1361-6668/abb35b
- [25] Y. Wang, et al., Supercond. Sci. Technol., **28**, 045017, (2015). DOI: 10.1088/0953-2048/28/4/045017
- [26] S. Venuturumilli, et al., AIP Advances, **13**, 3 (2023). DOI: 10.1063/5.0135291
- [27] D. G. Whyte, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., **34**, 1 (2023). DOI: 10.1109/TASC.2023.3332613

## No-insulation HTS coils: methods for describing electromagnetic processes

**D. S. Yashkin<sup>1\*</sup>**

1 NRC “Kurchatov Institute”, 123182, 1, Akademika Kurchatova sq., Moscow, Russia

\* e-mail: yashkin\_ds@nrcki.ru

Magnetic systems based on no-insulated high temperature superconductor coils (NI HTS) are finding increasingly practical applications. They became a scientific and industrial tool with enormous prospects. Their main advantage is that they are resistant to burnout due to protection in the form of a “built-in” shunt resistance. However, a serious disadvantage of NISO is the lack of a clearly defined current flow path, which makes it difficult to both describe the characteristics of such coils and predict their behavior under given conditions. This review shows the main methods for describing electromagnetic processes occurring in NI HTS and analyzes the limits of applicability of these methods.

Keywords: NI HTS, superconducting magnet, equivalent circuit.



Яшкин Дмитрий Сергеевич — младший научный сотрудник отдела сверхпроводниковых, криогенных и магнитных технологий НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Dmitrii S. Yashkin — Researcher, Department of superconducting, cryogenic and magnetic technology NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia