

УДК 621.313:537.312.62

## Топологический генератор с фазовым коммутатором из 2G ВТСП

Ю. Ф. Антонов

### Аннотация

На основе новых представлений о структуре и динамике промежуточного и смешанного состояния сверхпроводников излагаются физические основы и принцип действия сверхпроводникового топологического генератора. Описывается конструкция опытного образца топологического генератора с резистивно-сверхпроводящим коммутатором, выполненным из ленточного 2G ВТСП. Приводятся данные экспериментального исследования.

### Ключевые слова

высокотемпературный сверхпроводник; промежуточное и смешанное состояния; топологический генератор; конструкция; экспериментальные данные.

### Постановка задачи

Сверхпроводниковый топологический генератор (ТПГ) – это электрическая машина постоянного тока с фазовым резистивно-сверхпроводящим коммутатором (РСК). Основное его назначение - питание сверхпроводниковых магнитных систем (СПМС) в короткозамкнутом режиме, т.е. в режиме, при котором СПМС в период возбуждения и последующей работы остается замкнутой накоротко сверхпроводником [1]. Применительно к описанию принципа действия ТПГ термин «топология» используется для указания изменений «связности» контуров РСК в результате циклических фазовых переходов участков РСК под влиянием внешнего воздействия.

Математическое обоснование «топологического» эффекта, системный анализ структуры и динамики промежуточного и смешанного состояния сверхпроводников 1-го и 2-го рода с параметром Гинзбурга-Ландау  $\chi \sim 2^{-1/2}$ ) [2-4], дополненный собственными

результатами экспериментального исследования проникновения магнитного поля в тонколистовые образцы сверхпроводниковых материалов с высоким значением  $\chi > 2^{-1/2}$  и близким к единице магнитометрическим коэффициентом размагничивания, стали научной базой разработки РСК из серийно выпускаемых промышленностью фольг и лент низкотемпературных сверхпроводниковых (НТСП) сплавов, интерметаллических соединений, а также высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) первого поколения [5].

Получившая научное доказательство принципиальная возможность создания ТПГ с использованием любых сверхпроводников имеет важное практическое значение. Так, применение в ТПГ технических жестких НТСП 2-го рода, обладающих высокими критическими параметрами по току, магнитному полю и температуре, открыло путь значительного повышения номинальных параметров рассматриваемых электрических машин. На основе технических жестких НТСП 2-го рода изготовлены ТПГ многофункционального использования с номинальным током до 10 кА и удельной токовой нагрузкой более 1 кА/кг.

Во время строительства в Протвино Ускорительно-накопительного комплекса УНК-5ТэВ успешно решена задача создания ТПГ на токи до 8 кА для автономного питания 200 сверхпроводниковых отклоняющих магнитов каналов частиц. Запасенная энергия каждого магнита 1 МДж [6]. Сегодня ТПГ на токи 13 кА и 75 кА, соответственно, могут найти применение в системах питания, защиты и диагностики Сверхпроводникового ускорителя со встречными пучками (LHD) и Международного термоядерного реактора (ITER). Существует потребность в миниатюрных ТПГ для СПМС при проведении длительных физических экспериментов.

Технологический прорыв в промышленном производстве обмоточных материалов из ВТСП на базе купратов 2-го поколения (the second generation - 2G), создал необходимые условия разработки ТПГ для питания различного рода нагрузок из 2G ВТСП.

Задача статьи - показать техническую возможность создания ТПГ из 2G ВТСП и представить данные исследования опытного образца.

## 1. Принцип действия

Рассмотрим работу ТПГ на простейшей схеме (рис. 1). Для наглядности она дана в проволочном (а) и пластинчатом (б) вариантах. На рис. 1а все провода выполнены из сверхпроводника. Вектор магнитной индукции поля, создаваемого магнитом  $B$ , направлен от наблюдателя перпендикулярно плоскости рисунка.

Для того чтобы завести ток в сверхпроводниковую нагрузку индуктивностью  $L_H$ , необходимо магнит  $B$  перемещать по контуру, показанному штриховой линией. Перед тем, как пересечь наружную ветвь, ее надо разомкнуть, например, с помощью резистивно-сверхпроводящего коммутатора РСК-1. Работа РСК основана на управляемых фазовых переходах. В сверхпроводящем состоянии РСК «замкнут», в нормальном – «разомкнут». Когда магнит займет положение  $a$ , наружная ветвь «замыкается» коммутатором РСК-1. Затем с помощью РСК-2 «размыкается» внутренняя ветвь. Магнит занимает положение  $b$ . РСК-2 переводится в «замкнутое» состояние. В результате с контуром нагрузки оказывается сцепленным магнитный поток, создаваемый магнитом  $B$ . При выводе магнита за пределы контура нагрузки в точке  $c$  в нагрузочной цепи наводится ток  $\Delta I_H$ , чтобы обеспечить неизменным потокосцепление в цепи нагрузки.

Тот же эффект мы получим, если заменим прямоугольную проволочную петлю тонкой сверхпроводниковой пластиной, фольгой или лентой (рис. 1б). Предположим, магнит способен создать в пластине нормальную зону. Нормальная зона названа так потому, что под воздействием магнитного поля в этой зоне подавлена сверхпроводимость. Через нормальную зону проходит магнитный поток от магнита  $B$ . В тех частях пластины, где нет нормальной зоны, поле магнита экранируется токами Мейсснера.

Траектория движения магнита прежняя. При перемещении магнита вместе с ним движется нормальная зона с потоком. Так магнитный поток попадает в контур, образованный пластиной и нагрузкой. При выводе магнита за пределы контура сверхпроводимость контура нигде не нарушается и в замкнутой цепи наводится ток, который обеспечивает неизменность потокосцепления.

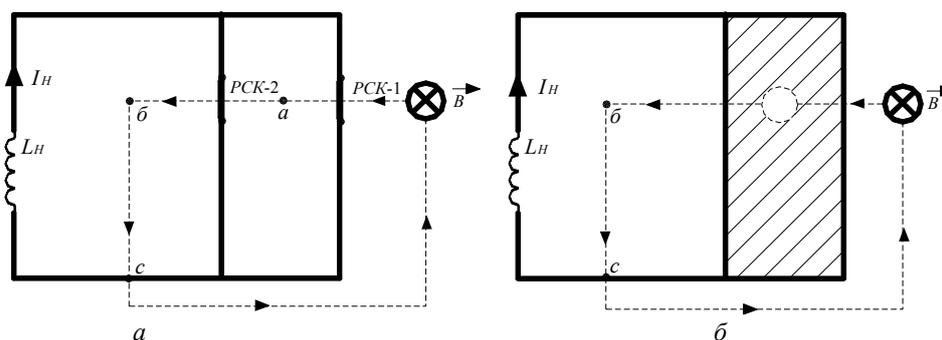


Рис. 1. Иллюстрация принципа действия сверхпроводникового топологического генератора

Многokrатно повторяя эту операцию, мы каждый раз порциями увеличиваем ток в цепи нагрузки. При этом ранее заведенный в нагрузку ток не затухает, потому что всегда имеется сверхпроводящий путь, по которому ток может течь без сопротивления. В

проволочной схеме (рис. 1а) - это внешняя или внутренняя ветви. В случае пластины (рис. 1б) - ее сверхпроводящие участки перед нормальной зоной и позади нее.

Если остановить этот циклический процесс, то заведенный в сверхпроводящий контур ток будет циркулировать в нем без затухания.

Вывод тока из замкнутой сверхпроводящей цепи осуществляется таким же способом. Для этого достаточно изменить направление движения магнита или его полярность.

## 2. Конструкция

Опытный образец ТПГ-2G ВТСП (рис. 2) выполнен по классической схеме [1]. Однослойная сверхпроводниковая якорная обмотка и резистивно-сверхпроводящий коммутатор РСК 4 изготовлены из ленточного 2G ВТСП (AMSC) и составляют единое целое. Установлены они на изоляционном цилиндре 6. Изоляцию от корпуса 7 обеспечивает бандаж 5. Разъемный корпус служит в качестве ферромагнитного сердечника якоря. Индуктор состоит из обмотки возбуждения 3 и зубчатого ферромагнитного сердечника 1. Обмотка возбуждения 3 состоит из двух идентично намотанных катушек с прямоугольным поперечным сечением. Катушки 3 установлены зеркально друг к другу и крепятся к ферромагнитным подшипниковым щитам 8. Они создают вдоль оси встречно направленное магнитное поле, которое концентрируется в полюсах-зубцах 1. Полюса-зубцы имеют однополярную намагниченность. Зубчатый ферромагнитный сердечник 1 жестко посажен на вал 2. Вал вращается в подшипниках 9.

## 3. 2G ВТСП токонесущий элемент

Для изготовления РСК и якорной обмотки использован полуфабрикат композитного ленточного проводника производства компании AMSC. Ширина исходного материала  $d = 100$  мм, толщина  $\delta = 50$  мкм. Осажденный слой сверхпроводника из купрата  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  имеет толщину  $\delta_{СП} \sim 1$  мкм. Двустороннее стабилизирующее медное покрытие  $\delta_{Cu} = 25$  мкм на сторону.

Согласно принципиальным положениям [5] и данным экспериментального исследования промежуточно-смешанного состояния 1G ВТСП - высокотемпературных сверхпроводников первого поколения (рис. 3а), даже слабовыраженные экранирующие свойства и наличие фазового магниторезистивного эффекта достаточны для создания резистивно-сверхпроводящих коммутаторов из ВТСП.

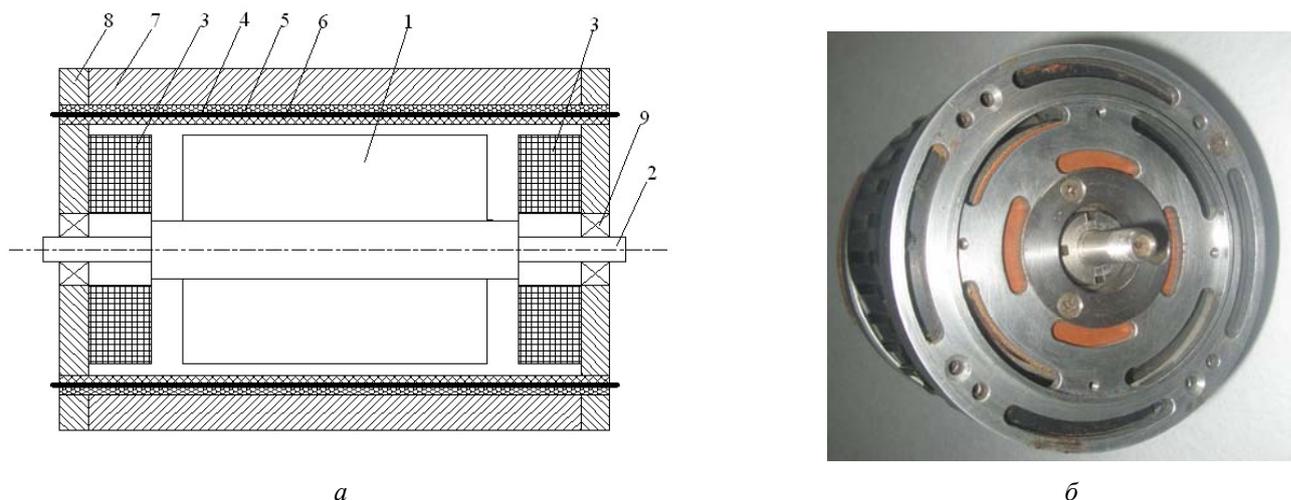


Рис. 2. Опытный образец сверхпроводникового топологического генератора с резистивно-сверхпроводящим коммутатором из 2G ВТСП. Номинальный ток нагрузки  $I_H = 55\text{A}$  ( $T = 77\text{K}$ ).

*a* - продольный разрез опытного образца (схематическое изображение); *б* – фото опытного образца.

В соответствии с этим экспериментальные исследования исходной 2G ВТСП ленты состояли в изучении ее экранирующих свойств, характера проникновения магнитного поля и получении картины промежуточно-смешанного состояния. Установлено, что наиболее заметные экранирующие свойства лента проявляет в магнитных полях до 10 мТл. В полях выше 10 мТл эффект экранирования существенно ослабляется, несмотря на то что лента остается сверхпроводящей. Магнитный поток пронизывает ленту и образует нерегулярную картину промежуточно-смешанного состояния (рис. 3). Макроскопические по размерам области проникновения поля состоят из пучков квантованных нитей магнитного потока. Главной причиной образования представленной на рис. 3 картины проникновения магнитного поля могут быть центры пиннинга и гранульное строение исследуемого высокотемпературного сверхпроводника. Отсутствие регулярной треугольной решетки из отдельных квантованных нитей магнитного потока и наличие преимущественно кластеров связано с намагничиванием и взаимным притяжением ферромагнитных частиц. Об этом косвенно свидетельствует их ориентация вдоль силовых линий магнитного поля, создаваемого вместо пары расположенных на одной оси катушек одной катушкой с прямоугольным поперечным сечением. С целью обеспечения строго поперечной ориентации поля надлежит снятие картины проникновения магнитного поля в 2G ВТСП ленточный образец с использованием двух катушек намагничивания. В таких экспериментах вместо ферромагнитного порошка нередко используется порошок из сверхпроводника. Однако, в отличие от НТСП, на базе ВТСП материалов трудно получить порошок из частиц с требуемыми диамагнитными свойствами.

Экспериментально определена максимальная токонесящая способность короткого

образца исходного материала в полную ширину  $d = 100$  мм. В жидком азоте (77К) транспортный (нагрузочный) ток  $I_H = 188$  А. Относительно малое значение объясняется неравномерным распределением тока по ширине ленты. Такой эффект наблюдается во всех без исключения HTСП материалах, выполненных в виде лент или фольг [1].

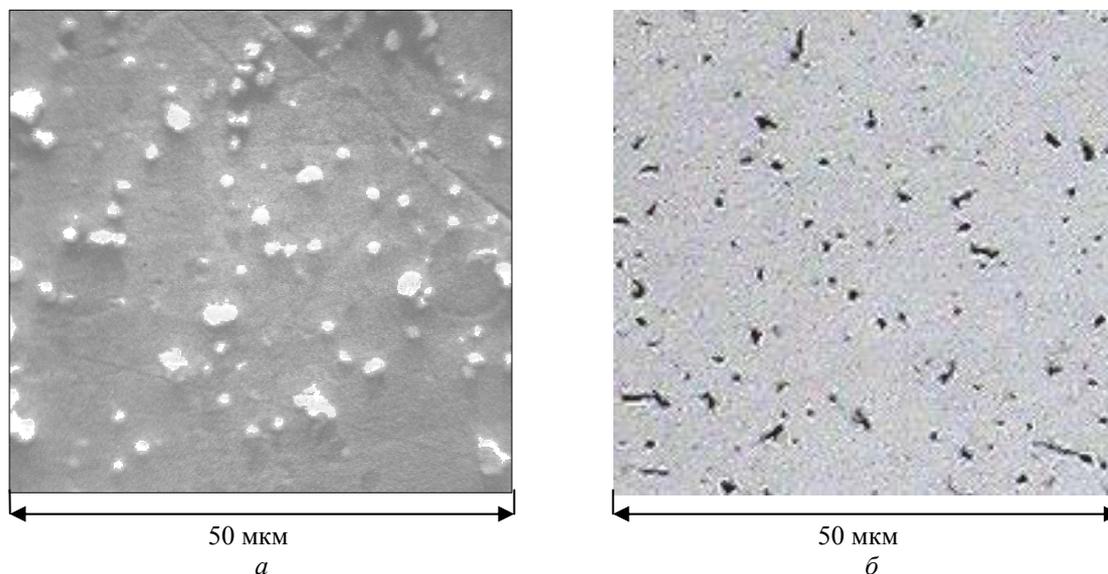


Рис. 3. Промежуточно-смешанные состояния высокотемпературных сверхпроводников. Фотографии сделаны на электронном микроскопе с использованием ферромагнитного порошка  $< 0,1$  мкм.

*а* - образец получен методом высокочастотного магнетронного напыления  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на подложку из  $SrTiO_3$ , рабочая зона  $15 \times 40$  мм<sup>2</sup>, толщина сверхпроводящего слоя  $\sim 3000$  Å, общая толщина пластины с подложкой  $0,5 \div 1,0$  мм;  $T_K = 84 \div 87$  К; светлые образования соответствуют участкам проникновения магнитного поля;  $B = 0,2 \times 10^{-3}$  Тл;

*б* - композитный ленточный 2G ВТСП токонесящий элемент на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  производства компании AMSC; темные образования соответствуют участкам проникновения магнитного поля;  $B = 0,6 \times 10^{-3}$  Тл.

Выводные концы в количестве 10 штук составляют одно целое с РСК и сверхпроводниковой якорной обмоткой. Они являются их продолжением и получены разрезанием в продольном (аксиальном) направлении концевых частей исходной ленты на отдельные полоски шириной 10 мм.

#### 4. Холостой ход

Испытания ТПГ-2G ВТСП проводились в жидком азоте. Для этих целей использовался миникриостат (рис. 4). Миникриостат по уровню заливки жидкого азота позволяет работать в течение 5-8 мин. Он имеет выполненный из алюминиевого сплава внутренний азотный сосуд, теплоизоляционные пенопластовые кольца, наружный металлический немагнитный кожух. К фланцу азотного сосуда крепится текстолитовое кольцо. Кожух криостата верхней частью винтами соединяется с текстолитовым кольцом, а нижней частью – с массивным основанием, дном криостата. В днище криостата имеется внутренний

кольцевой канал, заполненный пенопластом. Между дном азотного сосуда и днищем криостата установлен пенопластовый диск. Заполняемый объем азотного сосуда 2 литра. Наличие теплоизоляции, текстолитового переходного кольца и кожуха обеспечивает проведение эксперимента без наружного обмерзания установки.

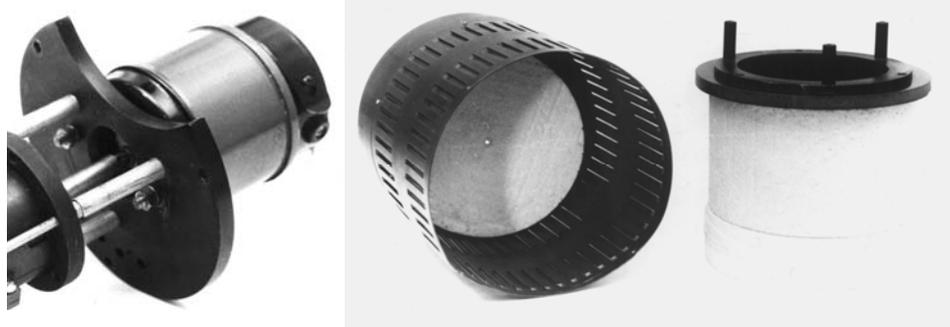


Рис. 4. Экспериментальная установка на базе азотного миникриостата

Привод ТПГ состоит из низковольтного электродвигателя постоянного тока типа СЛ-329, 24 В. Электродвигатель имеет широкую шкалу регулирования частоты вращения. Низкое номинальное напряжение – необходимое условие демонстрационных экспериментов. Подшипниковый щит электродвигателя крепится к промежуточному фланцу, который, в свою очередь, тремя шпильками крепится к фланцу азотного сосуда. Промежуточный фланец служит также в качестве узла подвески ТПГ и соединяется с ним тремя шпильками. Валы электродвигателя и ТПГ соединены между собой жестко посредством короткого отрезка нержавеющей трубки. Регулирование частоты вращения электродвигателя осуществляется за счет изменения подводимого к его обмоткам напряжения.

Характеристика напряжения холостого хода (рис. 5) позволяет определить один из главных параметров ТПГ – индуктивность РСК и обмотки якоря. Вследствие ее малого значения, сложной структуры и динамики промежуточного и смешанного состояния сверхпроводника, наличия ферромагнитных масс расчет указанной индуктивности весьма сложен и преимущественно определяется из эксперимента. Воспользуемся экспериментальными зависимостями напряжения холостого хода  $U_{X.X}$  (рис. 5) и расчетной формулой из [1]:

$$L_2 = \frac{R_{II} \Delta U}{2f^2 \Phi_M},$$

где  $\Delta U = f\Phi_M - U_{X.X}$ ;  $R_{II}$  – активное сопротивление РСК и якорной обмотки в нормальном состоянии при 77 К;  $f$  – частота вращения ТПГ;  $L_2$  – индуктивность сверхпроводящих участков РСК.

Так как удельное электрическое сопротивление материала РСК  $\rho(77K) = 4 \times 10^{-4}$  Ом·м, то активное сопротивление РСК и якорной обмотки в нормальном состоянии при температуре жидкого азота  $R_{II} = 4,3 \cdot 10^{-4}$  Ом. По основному магнитному потоку намагничивания, например,  $\Phi_M = 0,2 \times 10^{-3}$  Вб ( $i_B = 4,7$  А) и определенному из графика (рис. 5)  $\Delta U = 0,25 \times 10^{-3}$  В ( $f = 10$  Гц) получаем  $L_2 = 2,7 \times 10^{-6}$  Гн.

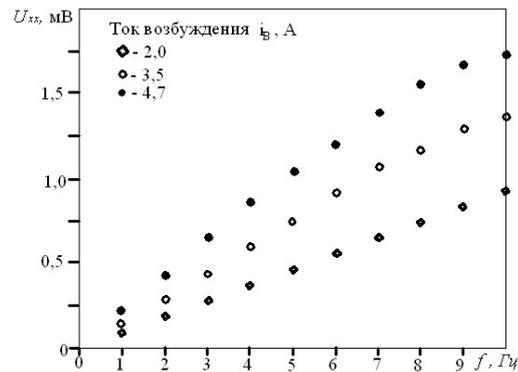


Рис. 5. Характеристика напряжения холостого хода  $U_{х,х}$

## 5. Режимы работы ТПГ

Основным режимом работы ТПГ является ввод тока в сверхпроводниковую нагрузку и его вывод (рис. 6). Данный режим практически мало отличается от соответствующего режима, обеспечиваемого традиционными («теплыми») источниками питания. Действительно, в общем случае ток  $I_H$  в нагрузке ( $R_H, L_H$ ) изменяется согласно

$$U = I_H R_H + L_H \frac{dI_H}{dt}.$$

Откуда находим

$$I_H = \frac{U}{R_H} (1 - e^{-\frac{L_H}{R_H} t}). \quad (1)$$

В сверхпроводниковой нагрузке  $R_H = 0$  и, следовательно, в (1) имеет место неопределенность  $0/0$ , которая раскрывается по правилу Лиувилля:

$$\lim_{R_H \rightarrow 0} \frac{f(R_H)}{g(R_H)} = \lim_{R_H \rightarrow 0} \frac{f'(R_H)}{g'(R_H)},$$

где  $f(R_H) = U(1 - e^{-\frac{L_H}{R_H} t})$ ;  $g(R_H) = R_H$ .

Сделав преобразования, получим

$$I_H = \frac{U}{L_H} t. \quad (2)$$

Согласно (2), ток в сверхпроводниковой нагрузке, независимо от типа источника

питания, изменяется прямо пропорционально напряжению  $U$  на его зажимах и обратно пропорционально индуктивности  $L_H$  нагрузки. Формула (2) пригодна для оценочных расчетов. Для более точных расчетов необходимо учитывать реальные характеристики источников питания. В случае традиционного источника питания, из-за наличия в нем внутреннего активного сопротивления  $R_B$ , изменение тока происходит по экспоненциальному закону согласно (1) с заменой  $R_H$  на  $R_B$ . В свою очередь, в ТПГ линейную связь параметров (2) нарушают коммутационные потери. Работа ТПГ на сверхпроводниковую нагрузку осуществляется при наличии замкнутой сверхпроводящей цепи, которая по отношению к внешним электромагнитным возмущениям сохраняет неизменным потокосцепление (рис. 1). Для регулирования тока в нагрузке, в том числе прецизионного, обеспечения режима незатухающего «замороженного» тока требуется точная диагностика состояния нагрузочной цепи и надежное устройство гашения поля.

Нагрузкой ТПГ (рис. 6) служила тест-катушка, намотанная из десяти соединенных параллельно лент шириной 10 мм. Индуктивность  $L_H = 0,117 \times 10^{-3}$  Гн. Для определения тока в тест-катушке использовался преобразователь Холла (Cryotronics, Inc.), закрепленный в оправке измерительного зонда и установленный в геометрическом центре тест-катушки (рис. 7). Питание преобразователя Холла током 100 мА осуществлялось от стабилизированного источника отечественного производства (НПФ «Сенсор»).



Рис. 6. Сверхпроводниковая нагрузка  $L_H = 0,117$  мГн

Рис. 7. Преобразователь Холла (слева),  
оправка измерительного зонда (справа) и  
стабилизированный источник питания (внизу)



Предельный ток  $I_{ПР}$  в нагрузке, достижимый с помощью ТПГ, не зависит от частоты вращения  $f$ . Он определяется током возбуждения  $i_B$  и индуктивностью РСК и якорной обмотки [1]:

$$I_{ПР} \approx \Phi_M / L_2. \quad (3)$$

Так, току возбуждения  $i_B = 4,7$  А ( $\Phi_M = 0,2 \times 10^{-3}$  Вб) соответствует  $I_{ПР} \approx 54$  А, что согласуется со значением, полученным опытным путем (рис. 8, 9). С помощью ТПГ в сверхпроводниковую нагрузку (рис. 6) заведен ток  $I_H = 55$  А. Однако для этого понадобилось повысить ток возбуждения до  $i_B = 6,5$  А (см. вертикальную стрелку на рис. 9), чтобы при

неизменной частоте вращения  $f = 6$  Гц поднять напряжение на зажимах ТПГ. Согласно (3) предельный нагрузочный ток  $I_{ПР}$  находится в прямой пропорциональной зависимости от основного магнитного потока намагничивания  $\Phi_M$  и может быть поднят за счет тока возбуждения  $i_B$ . Тем не менее, в данном эксперименте не удалось достичь более высокого тока нагрузки  $I_H$ . Он оказался в 3 раза ниже расчетного значения, определенного по критическому току исходного сверхпроводникового материала. Одной из причин, помешавших достижению более высокого нагрузочного тока, являются неудовлетворительные по качеству контактные соединения. Электрическое сопротивление 10 контактов, определенное опытным путем по затуханию тока в цепи нагрузки, составляет  $10^{-14}$  Ом.

В диапазоне токов возбуждения  $i_B = (0 \div 5)$  А и частот вращения  $f = (0 \div 10)$  Гц внешняя характеристика является линейной, но не жесткой (рис. 9).

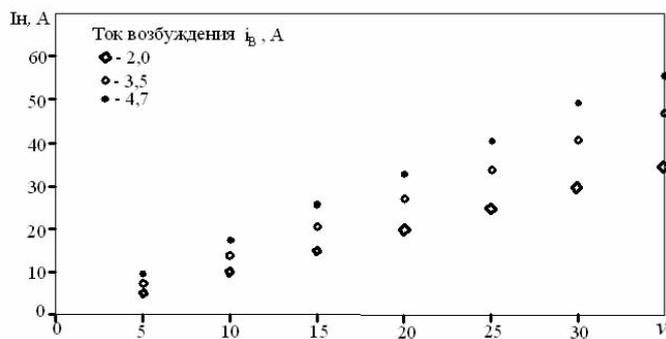


Рис. 8. Циклическая  $i_B$  зависимость тока нагрузки  $I_H$

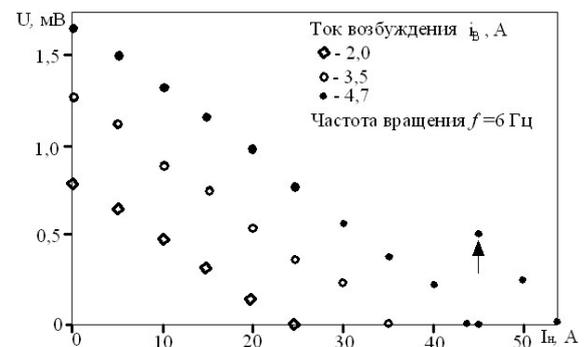


Рис. 9. Внешняя характеристика ТПГ

## Заключение

После снятия практически всех ограничений на использование в ТПГ любых сверхпроводников встал вопрос, связанный с переосмыслением классического определения его принципа действия. Для того чтобы ТПГ создавал постоянный ток необходимым и достаточным условием является наличие фазового резистивно-сверхпроводящего коммутатора (РСК). Коммутация тока происходит в результате фазовых переходов отдельных участков РСК в нормальное, промежуточное или смешанное состояния. Для этого магнитная индукция в рабочем зазоре ТПГ должна превышать магнитную индукцию поля проникновения в сверхпроводник. Она весьма мала для всех тонколистовых сверхпроводниковых материалов независимо от их принадлежности к сверхпроводникам 1-го или 2-го рода. Низкое значение магнитной индукции поля проникновения обусловлено близким к единице магнитометрическим коэффициентом размагничивания тонколистовых материалов, находящихся в поперечном магнитном поле.

В жесткий сверхпроводник 2-го рода магнитное поле проникает в виде квантованных нитей магнитного потока, образующих зоны смешанного или промежуточно-смешанного состояния. Поэтому в ТПП, где используются жесткие сверхпроводники 2-го рода, «топологическая» ЭДС является результатом взаимодействия квантованных нитей, как «магнитных структур», с изменяющимся однополярным магнитным полем индуктора.

Этот экспериментально подтвержденный факт послужил основанием, непосредственно после открытия в 1986 году высокотемпературной сверхпроводимости, предсказать и в данной статье показать возможность получения «топологической» ЭДС при использовании высокотемпературных сверхпроводников (которые как поликристаллические вещества относятся к сверхпроводникам 2-го рода), несмотря на существенное различие механизмов сверхпроводимости в металлических и металлооксидных сверхпроводниках.

### **Библиографический список**

1. Глебов И.А., Шахтарин В.Н., Антонов Ю.Ф. Проблема ввода тока в сверхпроводниковые устройства. - Л.: Наука, 1985. — 208 с.
2. Träuble H., Essmann U. Die Beobachtung magnetischer Strukturen von Supraleitern zweiter Art// Physica Status Solidi. — 1967.V. 20. — P. 95—111.
3. Sarma N.V. Direct evidence for the laminar and flux line models of mixed state in type II superconductors// Physics Letters. — 1967.V.25A.N 4. — P. 315—316.
4. Жарков Г.Ф. О зарождении сверхпроводимости и гистерезисе в цилиндрическом сверхпроводнике I рода// Письма в ЖЭТФ. — 2002. Т.122. Вып.3(9). — С. 600—609.
5. Данилевич Я.Б., Антонов Ю.Ф. Топологический генератор на высокотемпературных сверхпроводниках// Известия РАН. Энергетика. — 1995.N 12. — С. 26—29.

### **Сведения об авторе**

Антонов Юрий Федорович, Учреждение Российской академии наук Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И. И. Гребенщикова РАН, старший научный сотрудник, кандидат технических наук.

195298, Санкт-Петербург, ул. Осипенко, д. 4, корп. 1, кв. 154;

+7 812 291-61-82, +7 812 328-16-91, +7 911 992-97-97; [yuri-anto@yandex.ru](mailto:yuri-anto@yandex.ru).