

УДК 621.313.8

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-82-90

### Уменьшение магнитных потоков рассеяния в линейных генераторах Вернье с помощью высокотемпературных сверхпроводящих элементов

А.А. Дроздов, П.А. Курбатов, Е.П. Курбатова

Приведены результаты исследований, направленных на улучшение энергетических показателей линейных электрических генераторов для волновых электростанций путем уменьшения магнитных потоков рассеяния межзубцовыми вставками из высокотемпературного сверхпроводящего материала (ВТСП). Рассмотрена конструкция генератора, использующая принцип Вернье для модуляции магнитного потока, с транслятором в виде полого цилиндра. Данный тип генератора используют в поплавковых электростанциях с прямым приводом от совершающего возвратно-поступательное движения поплавок, передающего большие усилия при малой скорости перемещения. Для расчетов использована методика моделирования свойств ВТСП, базирующаяся на представлении индуцированных токов в сверхпроводнике в виде магнитных моментов этих токов, что позволило упростить анализ электромагнитного поля в генераторе без существенных дополнительных погрешностей. В результате получены характеристики продольных составляющих электромагнитных сил и потокосцеплений фазных обмоток в зависимости от перемещения транслятора. Применение вставок из ВТСП-материала и распределённой обмотки в статоре позволило снизить электромагнитные потери рассеяния и увеличить силу взаимодействия статора и транслятора. Однако поскольку дополнительные затраты на систему охлаждения и теплоизоляцию ВТСП-элементов сопоставимы со стоимостью генератора, то полученные результаты по улучшению энергетических параметров не позволяют сделать однозначный вывод об эффективности рассмотренных технических решений.

*Ключевые слова:* линейный электрический генератор, высокотемпературный сверхпроводящий материал (ВТСП), принцип Вернье, моделирование свойств ВТСП, расчет электромагнитного поля, поплавковые электростанции.

*Для цитирования:* Дроздов А.А., Курбатов П.А., Курбатова Е.П. Уменьшение магнитных потоков рассеяния в линейных генераторах Вернье с помощью высокотемпературных сверхпроводящих элементов // Вестник МЭИ. 2021. № 6. С. 82—90. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-82-90.

### Flux Leakage Reduction in Linear Vernier Generators Using High-Temperature Superconducting Elements

A.A. Drozdov, P.A. Kurbatov, E.P. Kurbatova

The article presents the results of studies aimed at improving the power performance indicators of linear electric generators for wave power plants by reducing the flux leakages using high-temperature superconducting (HTS) inserts placed in between the teeth. The generator design involving application of the Vernier principle for magnetic flux modulation with a translator in the form of a hollow cylinder is considered. Generators of this type are used in float wave power plants driven directly by a reciprocating float, which transmits large forces at a low motion speed. The calculations were carried out using the HTS properties modeling procedure based on representing the currents induced in a superconductor in the form of magnetic moments of these currents, which made it possible to simplify the analysis of the electromagnetic field in the generator without significant additional errors. As a result, the characteristics of the electromagnetic force longitudinal components and phase winding flux linkages versus the translator displacement have been obtained. The use of HTS inserts and a distributed winding in the stator made it possible to reduce the electromagnetic leakage losses and increase the interaction force between the stator and translator. However, since the additional outlays for the cooling system and thermal insulation of the HTS

elements are commensurable with the generator cost, the obtained results on improving the power performance parameters do not allow an unambiguous statement to be made about the effectiveness of the considered technical solutions.

*Key words:* linear electric generator, high-temperature superconducting material, Vernier principle, modeling of HTS properties, electromagnetic field calculation, float wave power plants.

*For citation:* Drozdov A.A., Kurbatov P.A., Kurbatova E.P. Flux Leakage Reduction in Linear Vernier Generators Using High-Temperature Superconducting Elements. Bulletin of MPEI. 2021;6:82—90. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-82-90.

**Введение**

Морские волны обладают большой плотностью энергии, значительно превосходящей плотность энергии ветра и солнца [1]. Известны несколько типов волновых электростанций: поплавковые, гидравлические и пневматические.

Рассмотрены конструкции электрических генераторов для поплавковых волновых электростанций с прямым приводом. К их преимуществам относят:

- простоту конструкции и низкую стоимость;
- сравнительно высокий (около 80%) КПД;
- возможность установки как на опорах защитных прибрежных конструкций, так и на удалении от берега.

Основной недостаток и трудности практической реализации подобных волновых генераторов связаны с малой скоростью колебания поплавка, что требует использования индуктора большого размера для обеспечения требуемых энергетических показателей [2].

В настоящий момент существует несколько успешных реализаций волновых электростанций, например, проекты, проводимые фирмой Ocean Power Technologies [3]. Линейные системы с прямым приводом привлекают внимание исследователей из-за отсутствия сложной трансмиссии, низкого акустического шума и повышенной надежности по сравнению с поворотным приводом. Повышение эффективности линейных генераторов достигается применением конструкций Вернье для модуляции магнитного потока в машине, позволяющих преобразовывать малую скорость движения индуктора в быстро изменяющийся магнитный поток.

Одно из направлений дальнейшего совершенствования конструкций электрических генераторов для поплавковых волновых электростанций — применение высокотемпературных сверхпроводящих материалов для уменьшения магнитных потоков рассеяния. Предметом исследований были выбраны две конструкции цилиндрических линейных генераторов. Первая конструкция ЛГ1 показана на рис. 1, а. Ранее она рассматривалась в [4]. Вторая конструкция — ЛГ2 продемонстрирована на рис. 1 и предложена авторами настоящей работы в качестве развития конструкции ЛГ1. Внешний вид обоих генераторов одинаков (рис. 1, в).

Обе конструкции состоят из верхнего и нижнего стальных магнитопроводов 1 и 7, трехфазной обмотки статора 3, расположенной в пазах между стальными зубьями 2, транслятора для возбуждения магнитного поля, составленного из стальных вставок 5, и постоянных магнитов 6 из сплава NdFeB с чередующейся

полярностью намагниченности в направлении движения (горизонтально на рис. 1) и ВТСП-вставок 6, размещенных в пазах нижнего магнитопровода. Трансляторы и воздушные зазоры в обеих конструкциях одинаковы. Вторая конструкция отличается от первой только распределенной статорной обмоткой на три паза и формой зубцов. Обе конструкции имеют статорные обмотки только в верхней части. В нижней части они отсутствуют.

**Параметры генераторов**

Тип линейного генератора.....	ЛГ1/ЛГ2
Внешний диаметр статора, мм.....	198,0/163,0
Внутренний диаметр магнитопровода статора, мм.....	167,0/132,0
Внутренний диаметр статора, мм.....	108,0
Длина статора, мм.....	360,0/362,0
Диаметр внутреннего магнитопровода, мм.....	90,0
Длина внутреннего магнитопровода, мм.....	360,0
Высота малых зубцов на статоре (для ЛГ1) и внутреннем магнитопроводе, мм.....	5,5
Ширина зубцов статора у зазора, мм.....	2,5
Внешний диаметр транслятора, мм.....	106,0
Внутренний диаметр транслятора, мм.....	92,0
Полюсное деление статора, мм.....	180,0
Полюсное деление транслятора, мм.....	10,6
Воздушный зазор, мм.....	1,0
Размеры постоянных магнитов (поперечное сечение), мм.....	3,2×7,0
Размеры ферромагнитных элементов транслятора (поперечное сечение), мм.....	7,4×7,0
Намагниченность постоянных магнитов, кА/м.....	1000,0
Высота ВТСП-элементов, мм.....	5,5
Длина зубцов у воздушного зазора, мм.....	5,0/6,0
Плотность критического тока $J_{C,max}$ ВТСП, А/мм <sup>2</sup> .....	184,0
Критическая напряженность магнитного поля $H_{C,max}$ , кА/м.....	2300,0
МДС фазы (максимум), А.....	806/1008
Число витков в фазе.....	131
Материал ферромагнитных элементов.....	Сталь 10

Объемные ВТСП-элементы из YBaCuO керамики в генераторах размещены между стальными зубцами нижнего магнитопровода. Ось анизотропии ВТСП-элементов в обоих случаях ориентирована радиально. Применение ВТСП обосновано их способностью вытеснять магнитный поток из объема, где они расположены (эффект Мейснера). Это должно позволить формировать топографию магнитного поля в генераторах с меньшими магнитными потоками рассеяния. Положение ВТСП-элементов на нижнем магнитопроводе позволяет упростить систему охлаждения жидким азотом и их теплоизоляцию. Охлаждение ВТСП протекает в

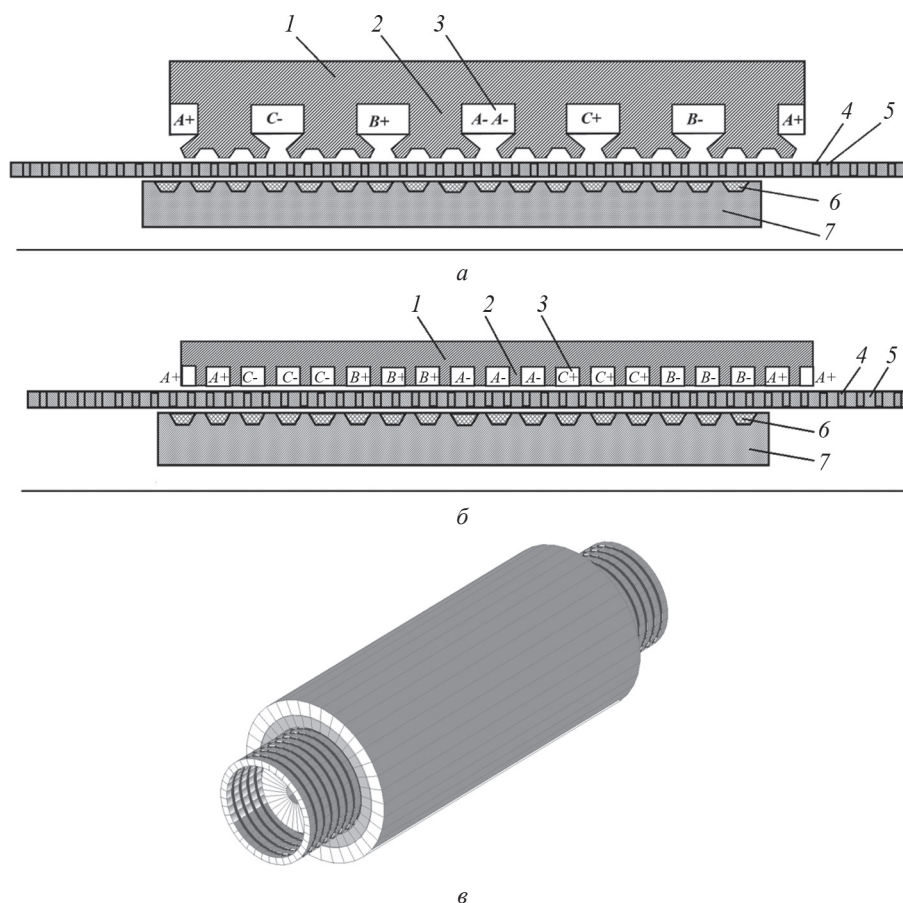


Рис. 1. Конструкции генераторов:  
 а — ЛГ1; б — ЛГ2; в — внешний вид ЛГ1 и ЛГ2

отсутствии магнитного поля, когда транслятор убран и ток статора выключен. Предполагается, что движение трансляторов осуществляется соединением их с поплавком, совершающим колебательные движения на морских волнах. Линейная скорость движения поплавка расположена в пределах 0,5...1,0 м/с.

#### Метод расчета электромагнитного поля

Численный расчет электромагнитного поля в присутствии ВТСП-элементов выполнен с использованием программного обеспечения, основанного на методе пространственных интегральных уравнений для распределений векторов плотности тока и намагниченности  $J, M$  [5 — 9].

В квазистационарном приближении, когда можно пренебречь токами электрического смещения в вакууме, справедлива система уравнений Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}; \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt, \quad (2)$$

где  $\mathbf{H}$  — напряженность магнитного поля;  $\mathbf{J} = \mathbf{J}^n + \mathbf{J}^{ct}$  — сумма плотностей вихревого и стороннего токов;  $\mathbf{E}$  — вектор напряженности электрического поля;  $\mathbf{B}$  — магнитная индукция.

Кроме (1), (2) в систему уравнений переменного электромагнитного поля входят уравнения непрерывности линий магнитной индукции и полного тока в электропроводящей среде:

$$\nabla \mathbf{B} = 0; \nabla \mathbf{J} = 0.$$

Интегральные уравнения для источников квазистационарного поля базируются на выражении для векторного магнитного потенциала:

$$\mathbf{A}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \int_V \frac{\mathbf{J}(t) + \nabla \times \mathbf{M}(t)}{r} dV - \oint_S \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{M}(t)}{r} dS \right] + \mathbf{A}^{ct}(t), \quad (3)$$

где  $\mathbf{A}^{ct}$  — векторный потенциал, созданный сторонним током.

Закон электромагнитной индукции при использовании векторного магнитного потенциала представим в виде:

$$\mathbf{E} = -\partial \mathbf{A} / \partial t - \nabla \varphi_e. \quad (4)$$

Истоком потенциальной составляющей  $\mathbf{E}^n = -\nabla \varphi_e$  в кусочно-однородной среде служит простой слой электрических зарядов с плотностью  $\xi$ , наведенных на граничных поверхностях электропроводящих деталей с различными свойствами:

$$\mathbf{E}^n = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \frac{\xi \mathbf{r}}{r^3} dS. \quad (5)$$

Уравнения для расчетов источников переменного электромагнитного поля получим подстановкой (5) — (7) в выражения:

- плотности тока  $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$ , где  $\gamma$  — удельная электрическая проводимость материала;
- условия непрерывности нормальной компоненты плотности тока на границе раздела разнородных сред  $\gamma_1(\mathbf{nE}_1) = \gamma_2(\mathbf{nE}_2)$  при вычислении плотности зарядов;
- магнитной индукции  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}(t)$ .

Для получения замкнутой системы уравнений дополнительно запишем материальные уравнения — электрические и магнитные свойства используемых материалов.

При моделировании электромагнитного поля электрических генераторов плотность тока в статорных обмотках известна и заранее задана. Магнитопроводы и остальные ферромагнитные элементы в выполненных расчетных исследованиях приняты неэлектропроводящими, т. к. изготовлены шихтованными из листовых стали или из композитных материалов. Магнитные свойства ферромагнитных материалов заданы кривой начального намагничивания  $M = f(H)$ , анизотропия и магнитный гистерезис не учитывались.

Наибольшую сложность представляет расчет индуцированных токов с нелинейными и анизотропными свойствами в сверхпроводящих элементах конструкции. Обычно в полевых расчетах для описания свойств ВТСП применяют степенную функцию, называемую power law [10]:

$$E = E_C \left( \frac{|J|}{J_C(H)} \right)^{n-1} \frac{J}{J_C(H)}. \quad (6)$$

Индексом «C» отмечены критические параметры: максимальная плотность тока  $J_C(H)$  и напряженность электрического поля  $E_C$ , при которой теряется сверхпроводимость.

Соотношение (6) представляет собой запись закона Ома с нелинейной зависимостью удельного электрического сопротивления от плотности тока, магнитной индукции и температуры:

$$J_C(T, H) = J_{C,\max}(T) \times \left( 1 - |H/H_C(T)|^\alpha \right)^\beta, \text{ если } |H| \leq H_C;$$

$$J_C(T, H) = 0, \text{ если } |H| > H_C,$$

где  $T$  — температура;  $J_{C,\max}(T)$  — максимальное значение критической плотности тока при данной температуре;  $\alpha, \beta$  — постоянные коэффициенты, определяемые по экспериментальным данным.

Существующие трудности в практической реализации данной модели связаны с резким поверхностным

эффектом из-за больших значений удельной электрической проводимости у ВТСП, что требует построения мелкой сетки в зоне протекания токов и увеличивает время расчетов.

С целью упрощения расчетов применено приближенное представление квазистационарного электромагнитного поля стационарным. Для этого индуцированные токи в сверхпроводнике представлены эквивалентным распределением их магнитных моментов — намагниченностью  $M$ . Это стало возможным при следующих допущениях.

При возмущениях электромагнитного поля изменение индуцированных токов в сверхпроводнике происходит мгновенно и далее, при отсутствии возмущений, картина токов остается неизменной, т. е. затухание отсутствует.

Элементы из ВТСП-материала представляют собой односвязные области. Так, кольца собраны из отдельных сегментов.

Кроме того принято, что ВТСП-элементы в генераторах имеют идеальную анизотропию свойств в радиальном направлении. У индуцированных токов в кольцевых ВТСП-элементах — только угловая и осевая составляющие в цилиндрической системе координат.

Намагниченность связана с плотностью тока соотношением

$$\mathbf{J} = \nabla \times \mathbf{M}, \quad (7)$$

поэтому  $\mathbf{M}$  будет иметь одну радиальную составляющую, и соотношение (7) для составляющих векторов в цилиндрической системе координат  $(\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\phi, \mathbf{e}_z)$  запишем в виде:

$$J_\phi \mathbf{e}_\phi + J_z \mathbf{e}_z = \frac{\partial M_\rho}{\partial z} \mathbf{e}_\phi - \frac{\partial M_\rho}{\rho \partial \phi} \mathbf{e}_z. \quad (8)$$

В односвязных изолированных областях результирующий индуцированный ток в любом сечении равен нулю. Для кольца из ВТСП условие односвязности выполняется из-за того, что оно изготовлено из отдельных изолированных друг от друга сегментов. Это условие вместе с (8) позволяет связать критическую плотность тока и намагниченность. В сечении кольца  $S$  ток имеет угловую компоненту и

$$\int_S J_{C,\phi} dS = \int_S \frac{\partial M_{C,\rho}}{\partial z} dS = 0. \quad (9)$$

Если критическая плотность тока постоянна, то критическая намагниченность линейно возрастает к средней линии сечения и должна удовлетворять аналогичным соотношениям для критической плотности тока:

$$M_C(T, H) = M_{C,\max}(T) \times \left( 1 - |H/H_C(T)|^\alpha \right)^\beta, \text{ если } |H| \leq H_C,$$

$$M_C(T, H) = 0, \text{ если } |H| > H_C,$$

Показатели степеней  $\alpha$ ,  $\beta$  для намагниченности могут отличаться от их значений в формулах для плотности тока. Пока значение намагниченности меньше, чем критическое значение  $M_c$ , магнитная индукция в ВТСП-элементе остается постоянной и равна ранее приобретенной, т. е. выполняется равенство  $dM/dH = -1$ .

На рисунке 2 показана принятая зависимость  $M(H)$  для ВТСП при постоянной температуре для однородной области в циклически изменяющемся и линейно нарастающем магнитном поле. Она представляет собой семейство прямых линий, расположенных под углом  $-45^\circ$  и ограниченных кривой  $M_c(T, H)$ .

Допустимость замены свойств ВТСП для плотности тока моделью для намагниченности иллюстрирует следующий пример. Диск из ВТСП-материала  $YBaCuO$  диаметром 30 мм и толщиной 10 мм помещают в однородное внешнее магнитное поле, охлаждают (переводят в сверхпроводящее состояние) и фиксируют распределение напряженности магнитного поля на расстоянии 1 мм от поверхности по диаметральному сечению после снятия внешнего поля, т. е. захваченное магнитное поле. Вектор намагниченности имеет одну составляющую по оси диска. Параметры моделей для  $J$ , на основе которых определены параметры модели для  $M$ , следующие:  $J_{C,max} = 230,0 \text{ А/мм}^2$ ;  $M_{C,max} = 230,0(R - r) \text{ кА/м}$ ;  $\alpha = 2$ ;  $\beta = 1$ ;  $n = 31$ ;  $H_c = 2300,0 \text{ кА/м}$ ;  $T = 77 \text{ К}$ .

Максимальное значение критической намагниченности линейно возрастает к центру диска в соответствии с (9).

В расчетах использована кусочно-постоянная аппроксимация плотности тока и намагниченности по объему диска. Для этого диск разбит на 15 кольцевых полос по радиусу и 20 полос по высоте.

На рисунке 3 продемонстрировано распределение захваченного магнитного поля после помещения диска в однородное магнитное поле напряженностью 2000 кА/м, направленное вдоль оси диска.

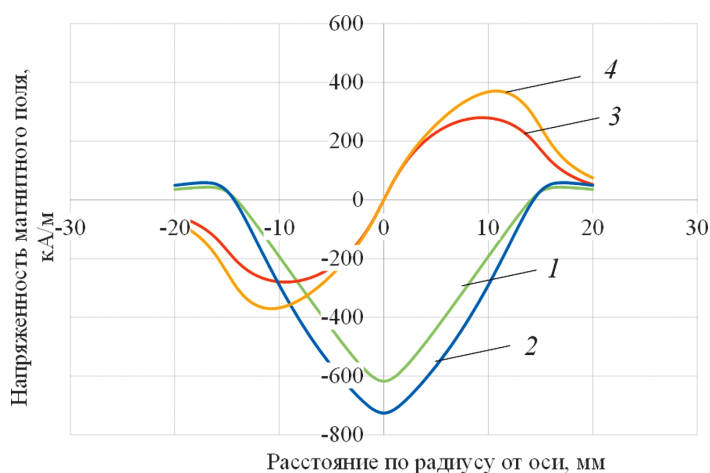


Рис. 3. Распределение напряженности магнитного поля по диаметру диска на высоте 1 мм после наложения внешнего поля с напряженностью 2000 кА/м:

1, 3 — осевые и радиальные составляющие  $H$  для модели с  $J$ ; 2, 4 — осевые и радиальные составляющие  $H$  для модели с  $M$

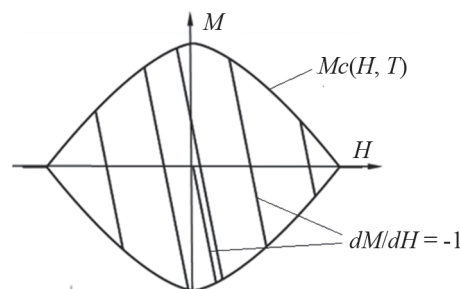


Рис. 2. Модель свойств ВТСП в виде зависимости  $M(H)$  в циклически изменяющемся и линейно нарастающем магнитном поле

У двух моделей идентичный характер распределения магнитного поля. Расхождение данных в основном вызвано грубой сеткой разбиения диска на элементарные объемы при кусочно-постоянной аппроксимации источников. Применение более мелкой схемы дискретизации приближает результаты расчетов по моделям до их совпадения.

Настройка модели для расчетов магнитного поля в системе с межзубцовыми вставками из ВТСП-материала выполнена на основе данных экспериментальных исследований гребенчатого элемента (рис. 4), приведенных в [9]. Элемент состоит из стальной пластины 1 с пазами, в которых размещены прямоугольные стержни из ВТСП-керамики 2. Над поверхностью зубцов с зазором 2 мм передвигается система с постоянными магнитами 3. Все ферромагнитные детали изготовлены из стали 10, а постоянные магниты — из сплава NdFeB с постоянной намагниченностью 1000 кА/м.

ВТСП-стержень в тестовой задаче составлен из элементов с различной критической намагниченностью, увеличивающейся от боковых поверхностей к центру. Принято, что ВТСП имеет резко выраженную анизо-

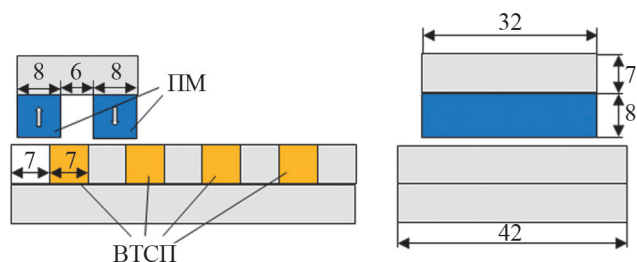


Рис. 4. Тестовая задача для настройки модели

тропию свойств, и возникающая намагниченность обладает только одной координатной составляющей, направленной вертикально.

На рисунке 5 даны результаты расчета касательных к поверхности зубцов сил, возникающих при перемещении системы с постоянными магнитами, с использованием модели свойств ВТСП для намагниченности. Рассмотрены два случая: без ВТСП-стержней и с

ними. Также на рис. 5 представлено сопоставление касательных сил с экспериментальными данными из [9]. Свойства ВТСП-материала заданы аналогично примеру с диском.

**Результаты анализа конструкций линейных генераторов с цилиндрическим транслятором с ВТСП и без ВТСП-элементов**

С целью сопоставления параметров магнитных систем анализируемых конструкций выполнены расчеты магнитного поля генераторов LG1 и LG2 как с ВТСП-элементами, так и без них. Определены реактивные силы, действующие на транслятор при отсутствии тока в статоре, и потокосцепления с фазными обмотками на холостом ходу. Вычислены электромагнитные силы, возникающие при номинальном токе в статорных обмотках.

На рисунке 6 изображены рассчитанные зависимости возникающих реактивных продольных сил двух

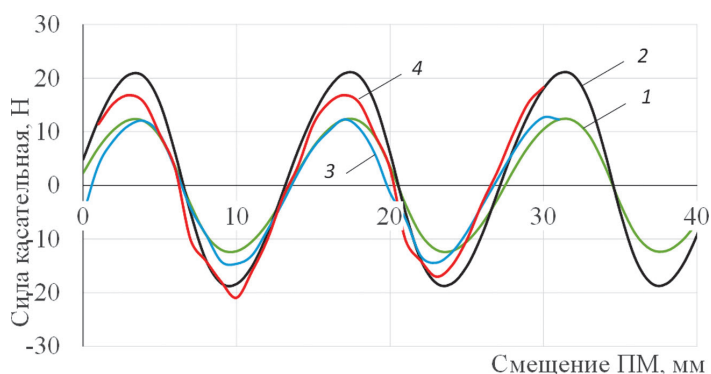


Рис. 5. Зависимости касательных сил от положения системы с постоянными магнитами: 1, 3 — без ВТСП; 2, 4 — с ВТСП; 3, 4 — экспериментальные данные

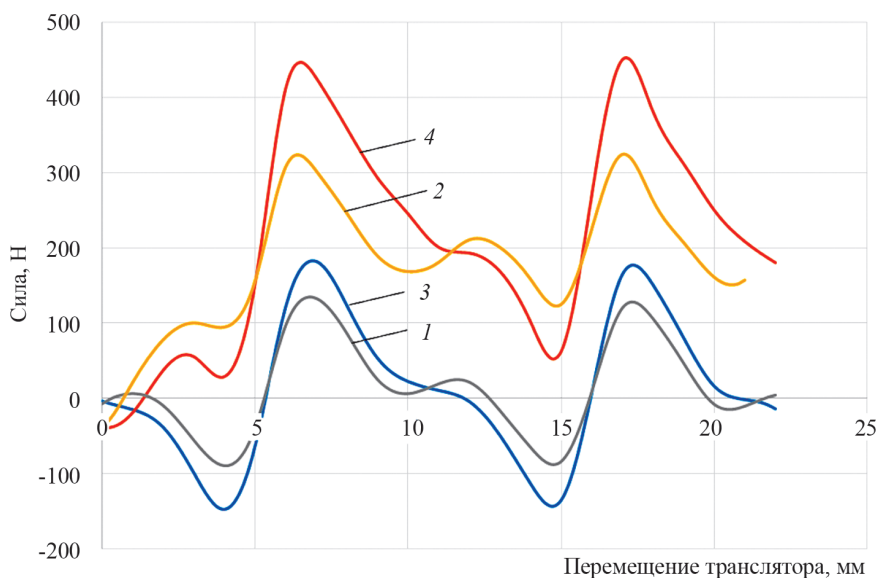


Рис. 6. Сопоставление продольных сил генераторов на холостом ходу: 1 — LG1 без ВТСП; 2 — LG1 с ВТСП; 3 — LG2 без ВТСП; 4 — LG2 с ВТСП

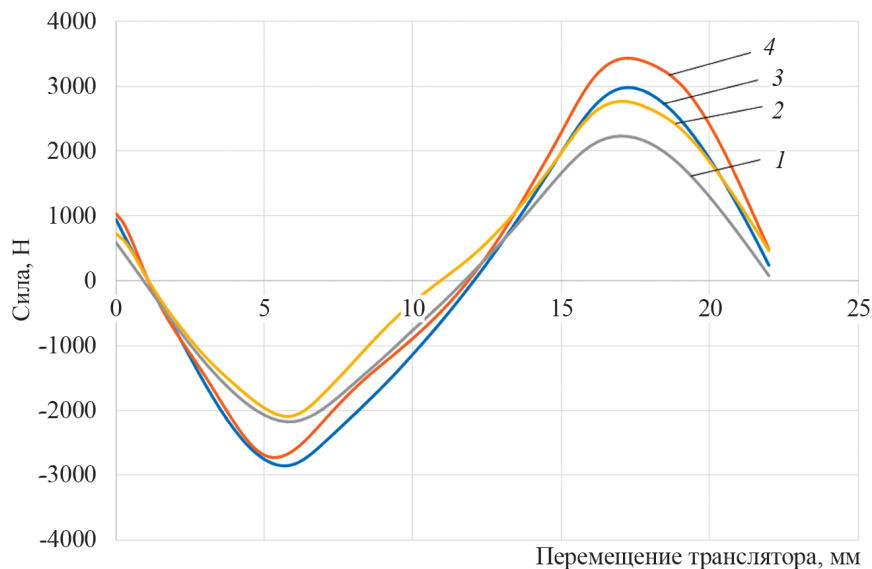


Рис. 7. Сопоставление продольных сил генераторов с номинальным током статора:  
 1 — LG1 без ВТСП; 2 — LG1 с ВТСП; 3 — LG2 без ВТСП; 4 — LG2 с ВТСП

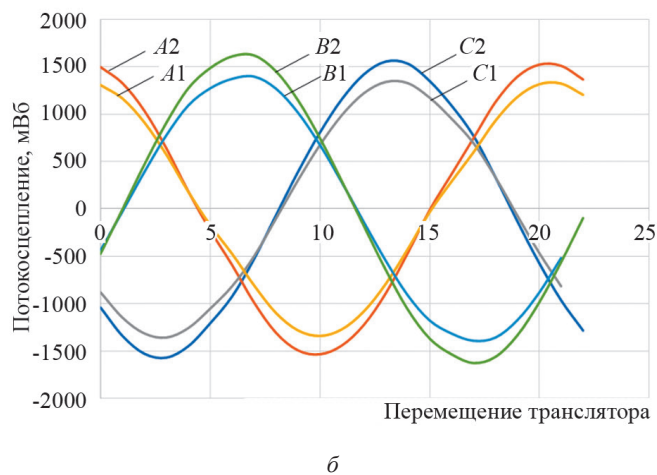
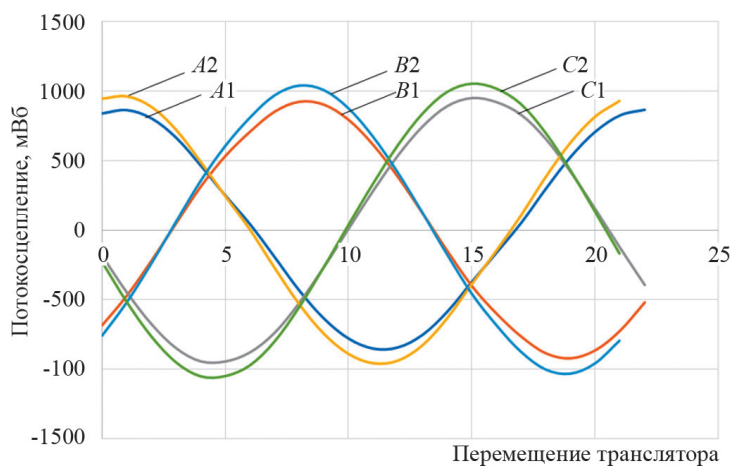


Рис. 8. Сопоставление потокоцеплений холостого хода фазных обмоток генераторов:  
 а — для LG1; б — для LG2; A1, B1, C1 — без ВТСП; A2, B2, C2 — с ВТСП

генераторов при перемещении транслятора в пределах двух полюсных делений без тока в статоре без ВТСП-элементов и с ними. Смещение кривых относительно оси абсцисс связано с начальным асимметричным расположением транслятора относительно статора. Наличие ВТСП-элементов увеличивает амплитуды реактивных сил. Результаты расчетов сил при номинальном токе в статоре в момент максимума тока в фазе показаны на рис. 7. При применении ВТСП-элементов растут электромагнитные силы в обеих конструкциях генераторов.

На рис. 8 приведены рассчитанные потокоцепления фазных обмоток на холостом ходу для изучаемых конструкций генераторов с ВТСП-элементами и без них. Полученные зависимости отражают изменения потокоцеплений при перемещении транслятора. Применение ВТСП-элементов позволило увеличить потокоцепление и, соответственно, ЭДС холостого хода фазных обмоток, создаваемых магнитным полем постоянных магнитов транслятора.

### Литература

1. Гринкруг М.С., Новгородов Н.А., Ткачёва Н.А. Основные проблемы, возникающие при проектировании волновых электростанций и пути их преодоления // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 4(37). С. 67—70.
2. Энергетика и промышленность России [Электрон. ресурс] [www.eprussia.ru/epr/341/6353102.htm](http://www.eprussia.ru/epr/341/6353102.htm) (дата обращения 16.07.2021).
3. Ocean Power Technologies [Офис. сайт] [www.oceanpowertechnologies.com](http://www.oceanpowertechnologies.com) (дата обращения 16.07.2021).
4. Baloch N., Khaliq S., Kwon B. A High Force Density HTS Tubular Vernier Machine // IEEE Trans. Magnetics. 2017. V. 53. No. 11. Pp. 1—5.
5. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчёт электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Kurbatova E.P., Kurbatov P.A., Kuschenko E., Sysoev M., Kulaev Y.V. Comparison of Properties of a Bulk HTS and a Stack of HTS Tapes after FC and ZFC // J. Physics: Conf. Series. 2020. V. 1559(1). P. 012049.
7. Dergachev, P.A., Kurbatova, E.P., Kurbatov, P.A., Kulaev Y.V. Force Interaction in Magnetic Systems with a Volumetric High-Temperature Superconductor // Russian Electrical Eng. 2018. V. 89(8). Pp. 496—500.
8. Kurbatova E.P., Kurbatov P.A., Dergachev P.A., Molokanov O. Electromagnetic Analysis of HTS Generator with Bulk Superconductor // Proc. 20<sup>th</sup> Intern. Symp. Electrical Apparatus and Technolog. 2018. P. 8447118.
9. Kurbatova E.P., Kuschenko, E., Sysoev M., Drodov A., Dergachev P.A., Kurbatov P.A. Using of the Diamagnetic Properties of HTS for Magnetic Systems of Linear Electric Machines // Proc. 16<sup>th</sup> Conf. Electrical Machines, Drives and Power Systems. 2019. P. 8771667.

### Заключение

Показано, что применение распределенной обмотки и ВТСП-элементов между зубцами нижней части статора позволяет снизить магнитные потоки рассеяния, увеличить ЭДС холостого хода и электромагнитную силу и, соответственно, улучшить удельные энергетические показатели линейного электрического генератора. Однако выводы [8] о высокой эффективности метода снижения потоков рассеяния с помощью ВТСП-элементов в зубчатой структуре статора для представленных конструкций делать преждевременно из-за значительных дополнительных затрат на систему охлаждения и теплоизоляции.

Дальнейшие исследования следует направить на поиск конструктивных решений линейных генераторов для волновых электростанций, которые наилучшим образом используют свойства объемных ВТСП-материалов и позволяют существенно повысить получаемый технико-экономический эффект.

### References

1. Grinkrug M.S., Novgorodov N.A., Tkacheva N.A. Osnovnye Problemy, Voznikayushchie pri Proektirovanii Volnovykh Elektrostantsiy i Puti Ikh Preodoleniya. Elektrotekhnicheskie Sistemy i Kompleksy. 2017;4(37): 67—70. (in Russian).
2. Energetika i Promyshlennost' Rossii [Elektron. Resurs] [www.eprussia.ru/epr/341/6353102.htm](http://www.eprussia.ru/epr/341/6353102.htm) (Data Obrashcheniya 16.07.2021). (in Russian).
3. Ocean Power Technologies [Ofits. Sayt] [www.oceanpowertechnologies.com](http://www.oceanpowertechnologies.com) (Data Obrashcheniya 16.07.2021).
4. Baloch N., Khaliq S., Kwon B. A High Force Density HTS Tubular Vernier Machine. IEEE Trans. Magnetics. 2017;53;11:1—5.
5. Kurbatov P.A., Arinchin S.A. Chislenny Raschet Elektromagnitnykh Poley. M.: Energoatomizdat, 1984. (in Russian).
6. Kurbatova E.P., Kurbatov P.A., Kuschenko E., Sysoev M., Kulaev Y.V. Comparison of Properties of a Bulk HTS and a Stack of HTS Tapes after FC and ZFC. J. Physics: Conf. Series. 2020;1559(1):012049.
7. Dergachev, P.A., Kurbatova, E.P., Kurbatov, P.A., Kulaev Y.V. Force Interaction in Magnetic Systems with a Volumetric High-Temperature Superconductor. Russian Electrical Eng. 2018;89(8):496—500.
8. Kurbatova E.P., Kurbatov P.A., Dergachev P.A., Molokanov O. Electromagnetic Analysis of HTS Generator with Bulk Superconductor. Proc. 20<sup>th</sup> Intern. Symp. Electrical Apparatus and Technolog. 2018:8447118.
9. Kurbatova E.P., Kuschenko, E., Sysoev M., Drodov A., Dergachev P.A., Kurbatov P.A. Using of the Diamagnetic Properties of HTS for Magnetic Systems of Linear Electric Machines. Proc. 16<sup>th</sup> Conf. Electrical Machines, Drives and Power Systems. 2019:8771667.



10. Yokono T., Hasegawa K., Kamitani A. Magnetic Shielding Analysis of High-Tc Superconducting Plates by Power Law, Flux-Flow, and Flux-Creep Models // IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2003. V. 13. No 2. Pp. 1672—1675.

10. Yokono T., Hasegawa K., Kamitani A. Magnetic Shielding Analysis of High-Tc Superconducting Plates by Power Law, Flux-Flow, and Flux-Creep Models. IEEE Trans. Appl. Superconductivity. 2003;13;2:1672—1675.

**Сведения об авторах:**

**Дроздов Андрей Андреевич** — аспирант кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: DrozdovAAn@mpei.ru

**Курбатов Павел Александрович** — доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: kurbatovpa@gmail.com

**Курбатова Екатерина Павловна** — кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, электрических и электронных аппаратов НИУ «МЭИ», e-mail: kurbatovaep@mail.ru

**Information about authors:**

**Drozdov Andrey A.** — Ph.D.-student of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: DrozdovAAn@mpei.ru

**Kurbatov Pavel A.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: kurbatovpa@gmail.com

**Kurbatova Ekaterina P.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Electromechanics, Electrical and Electronic Apparatuses Dept., NRU MPEI, e-mail: kurbatovaep@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 20.07.2021

**The article received to the editor:** 20.07.2021