



УДК 537

**Ю. Ф. Антонов, А. А. Зайцев, Е. И. Морозова**

Петербургский государственный университет путей сообщения

**Ю. Ф. Хозиков**

Институт химии силикатов Российской академии наук

**ТЕХНОЛОГИЯ «МАГТРАНСИТИ» В ПРОЕКТЕ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ МАГЛЕВ»**

Целью проекта «Санкт-Петербургский Маглев» является строительство эстакадной магнитолевитационной скоростной пассажирской магистрали для диаметрально-дуговой связи исторической части города Санкт-Петербурга и новых микрорайонов с крупными транспортными узлами. В основе проекта лежит магнитолевитационная транспортная технология «МагТранСити». Ее отличительным свойством является обеспечение левитации и боковой стабилизации транспортного средства на стоянках, участках разгона, торможения и в пути. Технология «МагТранСити» предполагает использование композитных низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников второго поколения. Для активации высокотемпературных сверхпроводников по месту их штатного расположения разработаны теория и метод топологического намагничивания. Для обеспечения режима «незатухающего тока» трековых катушек из композитных низкотемпературных сверхпроводников созданы индивидуальные сверхпроводниковые источники питания – топологические генераторы.

общественный транспорт, левитация, сверхпроводники низкотемпературные и высокотемпературные второго поколения, топология, намагничивание.

**Введение**

В соответствии с назначением, ходовыми характеристиками и техническими показателями магнитолевитационный транспорт делится на две категории. К 1-й категории относится городской общественный наземный и подземный транспорт. Он характеризуется умеренными скоростями движения – до 150 км/ч. Во 2-ю категорию входит междугородный транспорт с высокими (до 400 км/ч) и сверхвысокими (до 1000 км/ч) скоростями движения.

Транспорт 1-й категории предназначен для связи центра города (мегаполиса) с ми-

крорайонами, городами-спутниками, крупными транспортными узлами (хабами) – железнодорожными и автобусными вокзалами, станциями метрополитена, воздушными, морскими и речными портами. Транспорт 2-й категории предназначен для скоростного и сверхвысокоскоростного междугороднего сообщения.

Целью проекта «Санкт-Петербургский Маглев» является создание наиболее востребованного в настоящее время магнитолевитационного транспорта, предназначенного, в первую очередь, для решения транспортных проблем мегаполисов (1-я категория)

с последующим внедрением апробированной на относительно коротких линиях новой транспортной технологии на сверхскоростных трассах, связывающих крупные города и пользующиеся массовым спросом рекреационные зоны (2-я категория).

## 1 Анализ проекта

Проект «Санкт-Петербургский Маглев» предусматривает строительство диаметрально-дуговой трассы, проходящей через дамбу (рис. 1). Первая очередь этого строительства – диаметрально-дуговая дорога длиной 43 км через Крестовский и Васильевский острова.

Анализ динамических характеристик магнитолевитационного общественного транспорта (табл. 1) показывает, что затраты времени на разгон и торможение транспортного средства незначительно влияют на общее количество времени, требуемого для покрытия расстояния между конечными пунктами. При наличии 11 остановочных промежуточ-

ных пунктов время в пути увеличивается на 7 минут. Но даже в этом случае средняя скорость транспортного средства  $V_{cp} > 100$  км/ч. Такой результат есть следствие двух факторов: 1) высокой максимальной скорости  $V_{max}$  магнитолевитационного транспорта и 2) его динамики. С учетом посадки-высадки пассажиров в течение 30 секунд средняя скорость  $V_{cp} \sim 60$  км/ч.

Проект «Санкт-Петербургский Маглев» основан на технологии «МагТранСити». Бортовые магнитные полюса системы левитации и боковой стабилизации изготавливаются из высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (2G ВТСП), в то время как обмотка возбуждения тягового линейного синхронного двигателя выполняется из композитного низкотемпературного сверхпроводника (НТСП). Такое техническое решение способно значительно снизить массу и габариты транспортного средства, упростить монтаж, повысить надежность и эффективность бортового электроэнергетического оборудования.



Рис. 1. Проект «Санкт-Петербургский Маглев». Диаметрально-дуговая трасса

ТАБЛИЦА 1. Динамика магнитолевитационного транспорта по технологии «МагТранСити»

Длина трассы $\Sigma L = 43$ км						
Количество станций	0	1	3	7	9	11
Расстояние между станциями $L$ , км	43	21,5	14,3	6,14	4,8	3,9
Время разгона и торможения $t_{p-r}$ , с	$2 \cdot 42 =$ $= 84$	$4 \cdot 42 =$ $= 168$	$6 \cdot 42 =$ $= 252$	$14 \cdot 42 =$ $= 588$	$18 \cdot 42 =$ $= 756$	$22 \cdot 42 =$ $= 924$
Длина участков пути разгона и торможения $L_{p-r}$ , км	$2 \cdot 0,875 =$ $= 1,750$	$4 \cdot 0,875 =$ $= 3,5$	$6 \cdot 0,875 =$ $= 5,25$	$14 \cdot 0,875 =$ $= 12,25$	$18 \cdot 0,875 =$ $= 15,75$	$22 \cdot 0,875 =$ $= 19,25$
Время движения с максимальной скоростью $t_{max}$ , с	990	948	906	738	654	570
Длина участка пути движения с максимальной скоростью $L_{max}$ , км	41,25	39,5	37,75	30,75	27,25	23,75
Общее время в пути $\Sigma t$ , с	1074 (~17,9 мин)	1116 (~18,6 мин)	1158 (~19,3 мин)	1326 (~22,1 мин)	1410 (~23,5 мин)	1494 (~24,9 мин)
Средняя скорость $V_{cp}$ , км/ч	144,1	138,7	133,7	116,7	109,8	103,6
Максимальная скорость транспортного средства $v_{max} = 150$ км/ч Ускорение $a = 1$ м/с <sup>2</sup>						

## 2 Бортовое электроэнергетическое оборудование

Основные технические данные магнитолевитационного транспортного средства приведены в табл. 2.

На рис. 2 показана компоновка элементов левитации, боковой стабилизации и тяги. Тяговый линейный синхронный двигатель (ЛСД) 4, 5, 7 располагается вдоль оси транспортного средства и активной путевой структуры. Устройства левитации и боковой стабилизации 1, 2, 3 устанавливаются по бортам транспортного средства и по краям виадука.

Левитационный зазор в несколько раз меньше, чем рабочий зазор ЛСД. Учитывая региональные климатические и погодные условия эксплуатации, для надежного функционирования системы левитации и боковой стабилизации ее узлы необходимо располагать в «климат-кожухе».

ВТСП-магнитный полюс левитации и боковой стабилизации  $l$  размещается в азотном криостате, а НТСП-обмотка возбуждения ЛСД 4 – в гелиевом криостате.

По технологии «МагТранСити» применяется магнитодинамическая левитация и боковая стабилизация. При движении транспортного средства магнитное поле, создаваемое полюсом  $l$ , взаимодействует с наведенными токами в горизонтальной беличьей клетке 2, вследствие чего возникает подъемная сила. При смещении горизонтальной оси симметрии полюса  $l$  в любую сторону от плоскости, в которой расположена вертикальная беличья клетка 3, в последней наводятся токи, препятствующие этому смещению. Многоконтурная конструкция горизонтальной и вертикальной беличьих клеток обеспечивает эффективную левитацию и боковую стабилизацию. Так, при магнитной индукции полюса  $l$   $B_p = 0,5$  Тл и площади  $s_p = 1$  м<sup>2</sup> начальная

ТАБЛИЦА 2. Параметры транспортного средства

Параметр	Значение
Род тока	трехфазный
Напряжение $U$ , кВ	10
Максимальная скорость $V_{\max}$ , км/ч	150
Средняя скорость $V_{\text{ср}}$ , км/ч	60
Число транспортных средств в поезде	8
Число сидячих мест в транспортном средстве	44
Длина транспортного средства $l$ , мм	19 206
Ширина транспортного средства $w$ , мм	2670
Высота транспортного средства $h$ , мм	3650
Масса транспортного средства без пассажиров $M_0$ , т	15
Масса транспортного средства с пассажирами $M_p$ , т	30
Материал кузова транспортного средства	дюраль
Тяговая мощность в расчете на одно транспортное средство $P$ , МВт	1,2
Тип тягового электродвигателя	ЛСД
Ускорение при разгоне $a_a$ , м/с <sup>2</sup>	1,0
Ускорение при торможении $a_d$ , м/с <sup>2</sup>	1,6
Коэффициент рекуперации	0,85

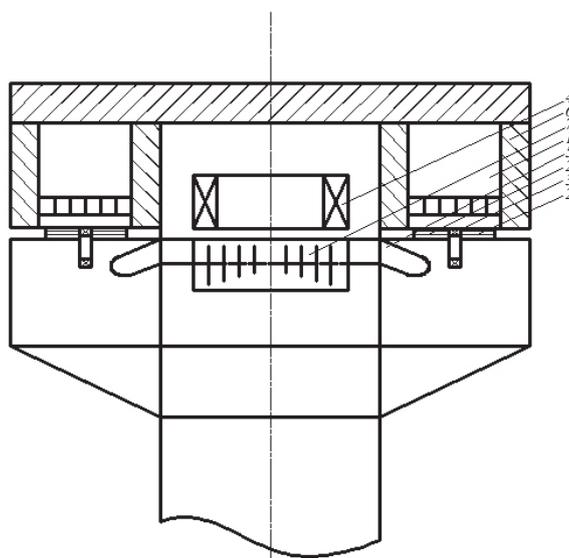


Рис. 2. Схематическое изображение транспортного средства и активной путевой структуры: 1 – ВТСП-магнитный полюс левитации и боковой стабилизации; 2 – горизонтальная развернутая беличья клетка; 3 – вертикальная развернутая беличья клетка; 4 – НТСП-обмотка возбуждения ЛСД; 5 – путевая трехфазная обмотка ЛСД; 6 – несущая тележка; 7 – шихтованный сердечник ЛСД

скорость возникновения левитации составляет  $V_{st} = 10$  м/с (шаг витков беличьей клетки  $w = 40$  мм) и может быть снижена до  $V_{st} = 3$  м/с при  $B_p = 1$  Тл,  $w = 15$  мм. Транспортное средство массой  $M = 30$  т на скорости  $v_{100} = 100$  км/ч (27,8 м/с) имеет подъемную силу  $F_L \sim 50$  кН. Его боковые смещения компенсируются за счет силы боковой стабилизации  $F_{sw} \sim 50$  кН.

### 3 Магнитные полюса системы левитации и боковой стабилизации. Топологический метод активации ВТСП

По технологии «МагТранСити», в отличие от *Inductrack* [1], постоянные магниты *NdFeB* в «массиве Хальбаха» заменены объемными ВТСП, которые могут в несколько раз увеличить магнитную индукцию поля в рабочем зазоре. В данном контексте к «объемным»

ВТСП относятся как керамические образцы, так и многослойные упаковки из 2G ВТСП. Как и постоянные магниты, ВТСП-магниты в процессе эксплуатации требуют периодического намагничивания. Во время эксплуатации они подвергаются воздействию переменных магнитных полей различной природы и интенсивности. В результате происходит их частичное размагничивание. При потере криоагента ВТСП магниты полностью утрачивают магнитные свойства. Их активация (намагничивание) по месту штатного расположения связана с большими технологическими трудностями. Она осложняется тем, что намагниченность отмечена только у криостатированных ВТСП, находящихся в сверхпроводящем состоянии. Таким образом, технология активации объемных ВТСП должна быть приспособлена к конкретным условиям монтажа и эксплуатации ВТСП узлов. Для решения этой задачи разработан метод «топологической» активации (рис. 3),

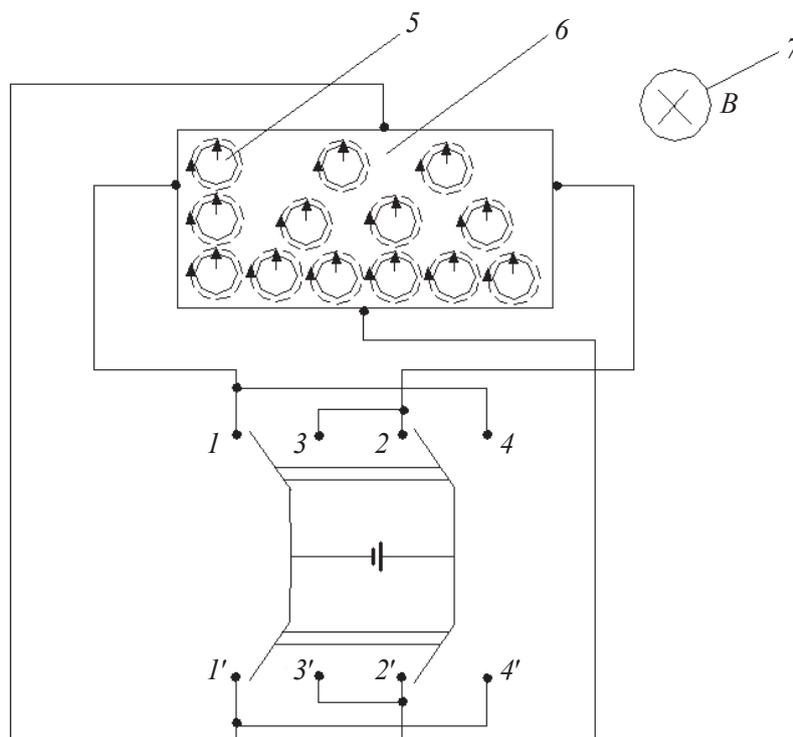


Рис. 3. Схема топологического намагничивания (активации) 2G ВТСП: 1, 1', 2, 2', 3, 3', 4, 4' – клеммы переключателя; 5 – квантованные нити магнитного потока; 6 – высокотемпературный сверхпроводник; 7 – источник магнитного поля  $B$  (все элементы схемы, кроме 6 (и, как вариант, 7), располагаются вне криогенной зоны)

который является особой разновидностью *field cooling process* [2].

ВТСП относятся к сверхпроводникам второго рода. Поэтому характерным их признаком является малое значение первого (нижнего) критического магнитного поля и пиннинг магнитного потока в глубине образца (рис. 4). Объемные ВТСП имеют близкий к единице коэффициент размагничивания. Поэтому весьма слабое ( $\sim 0,01$ – $0,001$  Тл) магнитное поле начинает проникать в глубь образца, что приводит к промежуточно-смешанному состоянию (рис. 4). Плотность квантованных нитей магнитного потока и их пучков зависит

от величины приложенного магнитного поля и эффективности центров пиннинга. Поэтому для интенсивного намагничивания к объемным ВТСП прикладывается магнитное поле с высокой индукцией, которая, как правило, вдвое превышает магнитную индукцию остаточного поля намагничивания.

При использовании метода топологического намагничивания процесс проникновения магнитного поля в объемный ВТСП усиливается за счет транспортного тока  $I$ , который подводится от внешнего источника питания. Данный процесс может быть улучшен путем периодического изменения

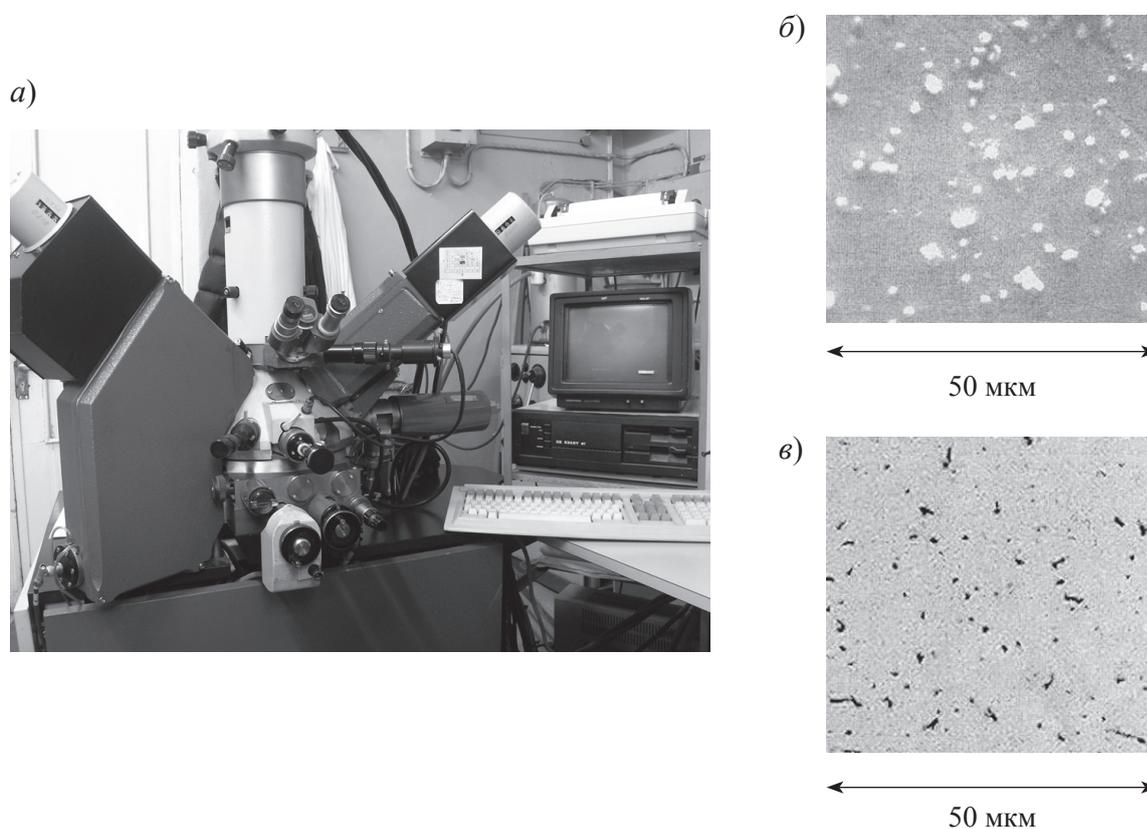


Рис. 4. Промежуточно-смешанное состояние ВТСП (фотографии сделаны с использованием ферромагнитного порошка  $\sim 0,1$  мкм):

*a* – анализатор рентгеновский микронзондовый *Camebax*; *б* – образец, полученный 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; *в* – композитный ленточный 2G ВТСП-токонесущий элемент на основе *Y-123* производства компании *AMSC*; темные образования соответствуют участкам проникновения магнитного поля;  $B = 0,6 \times 10^{-3}$  Тл

направления транспортного тока  $I$  посредством переключателя.

Для подведения транспортного тока необходимо иметь низкоомное контактное соединение между ВТСП и проводами от источника питания. В качестве опытных образцов объемных ВТСП использовались иттриевые керамики Y-123.

Для получения контактных соединений разработаны и экспериментально исследованы две технологии: пайка подводящих проводов, установленных в пазах, и пайка к контактному слою, нанесенному «вжиганием» металлической пасты на основе золота Au, серебра Ag или палладия Pd. Процесс «вжигания» выполнялся по следующей технологии. На поверхность ВТСП наносилась паста из металлического порошка, затем осуществлялось ее «вжигание» в печи с температурным режимом согласно графику, представленному на рис. 5.

При том и другом способах контактные соединения проводов с объемным ВТСП (рис. 6)

выполнялись пайкой ультразвуковым паяльником с использованием легкоплавкого припоя – индия In, температура плавления которого  $T = 429,32 \text{ K}$  ( $156 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Изготовление контактных соединений способом *a* просто, однако они имеют повышенное сопротивление  $(3\div 5) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  ( $T = 4,2; 78 \text{ K}$ ). И наоборот, изготовление контактных соединений способами *b, в* сложно, однако они имеют малое сопротивление  $(1\div 3) \cdot 10^{-8} \text{ Ом}$  ( $T = 4,2; 78 \text{ K}$ ). Контактные соединения первого типа рекомендуется использовать при измерении критической температуры образца ВТСП четырехконтактным способом; второго типа – при реализации технологии «топологического» намагничивания объемных ВТСП и иных случаях, когда требуется подведение к объемному ВТСП сравнительно большого тока.

На рис. 7 показана динамика процесса топологического намагничивания объемного ВТСП. Начала графиков совпадают и соответствуют магнитной индукции  $\sim 0,1 \text{ Тл}$ .

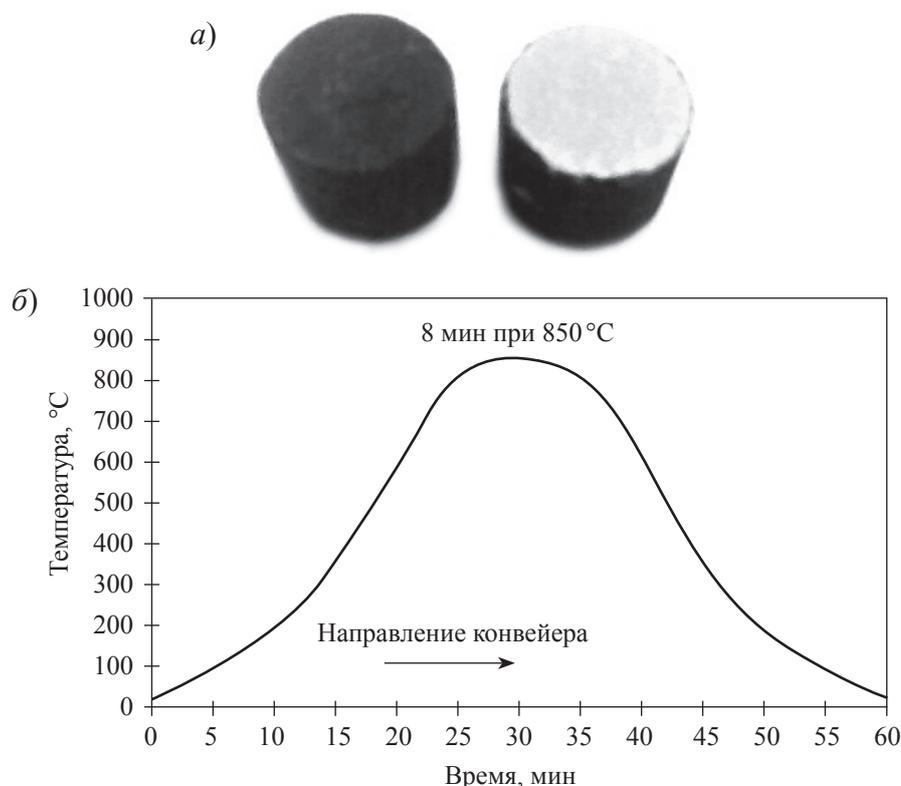


Рис. 5. Получение контакта на поверхности объемного Y-123 методом «вжигания» золотой пасты: *a* – Y-123: *слева* – до металлизации, *справа* – после металлизации; *б* – график температурного режима «вжигания»

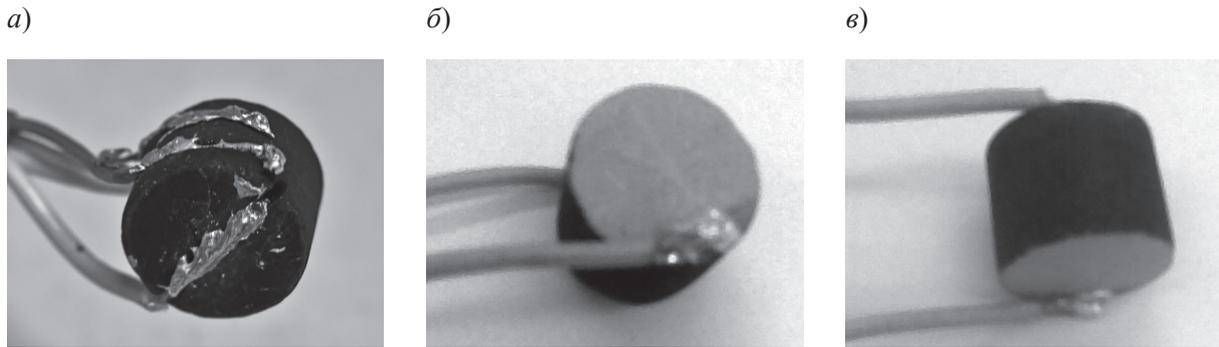


Рис. 6. Контактные соединения с керамикой Y-123: а – пайка индием In в пазах; б, в – «вжигание» золотой пасты и пайка индием In

Графики показывают линейную зависимость намагниченности  $B$  от времени  $t$  протекания процесса. Они также находятся в прямопропорциональной зависимости от значения транспортного тока  $I$ . При токе  $I = 0,25$  А и ниже эта зависимость нарушается.

Объемный образец представляет собой плотно упакованные отрезки ленты толщи-

ной 0,1 мм из 2G ВТСП. Размеры образца  $30 \times 30 \times 2$  мм<sup>3</sup>. Внешним источником магнитного поля  $B$  (см. рис. 3) служит постоянный магнит NdFeB,  $20 \times 20 \times 3$  мм<sup>3</sup>. Магнит создает на поверхности объемного образца 2G ВТСП поле с индукцией  $B = 0,3$  Тл. Насыщение в графике намагничивания обусловлено пиннингом квантованных нитей магнитного

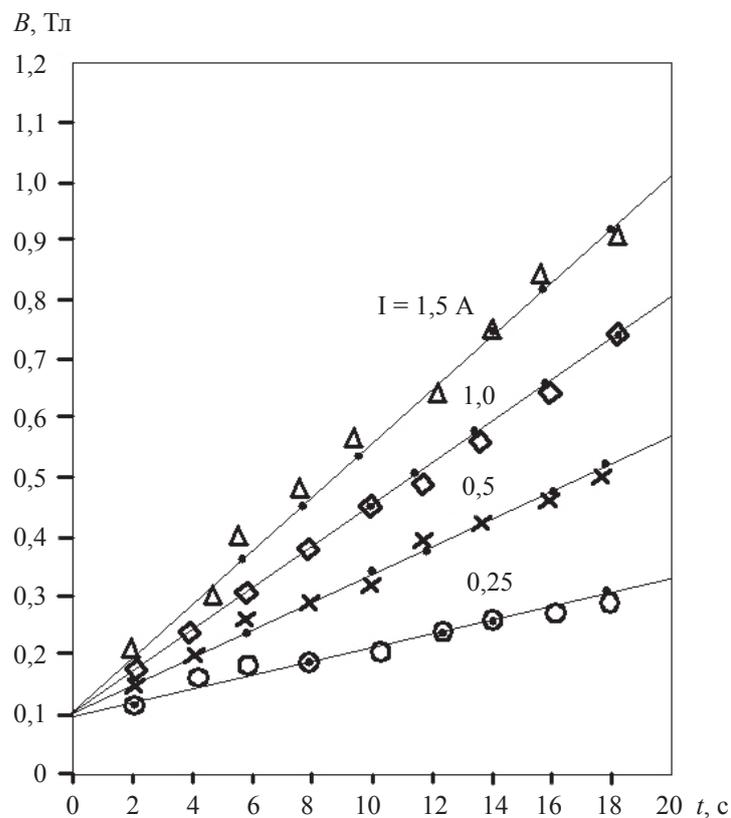


Рис. 7. Изменение во времени  $t$  магнитной индукции  $B$  остаточного магнитного поля в объемном 2G ВТСП в зависимости от транспортного тока  $I$

потока и снижением градиента магнитного поля.

Метод топологического намагничивания позволяет при сравнительно малой магнитной индукции внешнего источника поля получать в объемном ВТСП остаточное магнитное поле с магнитной индукцией, в несколько раз превышающей магнитную индукцию поля намагничивания.

#### 4 Магнитные полюса левитации и боковой стабилизации

Установка объемных ВТСП по схеме «массива Хальбаха» имеет особенности (рис. 8). Каждый элементарный объемный ВТСП снабжен небольшим по размерам персональным постоянным магнитом и двумя проводниками для подведения транспортного тока  $I$ . Часть элементарных объемных ВТСП имеет форму призм. Проволоки образуют последовательную электрическую цепь и подсоединяются к внешнему источнику питания (см. рис. 3).

На рис. 9 представлены графики распределения магнитной индукции поля, создаваемого различными магнитными полюсами в соответствии со схемой установки элементарных объемных ВТСП.

#### 5 Сверхпроводниковый трековый модуль линейного синхронного двигателя. Топологический генератор

Бортовая обмотка возбуждения ЛСД состоит из сверхпроводниковых трековых модулей, пропитанных эпоксидным компаундом (рис. 10). Материал обмотки – композитный низкотемпературный сверхпроводник NbTi. Размеры: длина  $\times$  ширина  $\times$  поперечное сечение:  $1700 \times 500 \times (56 \times 94)$  мм. МДС = 1 МА; номинальный ток  $I_N = 1,2$  кА; индуктивность  $L_N = 0,83$  Гн; запасенная электромагнитная энергия  $W_N = 0,6$  МДж; средний по сечению коэффициент заполнения по катушке  $k_w = 0,85$ ; оптимальное напряжение постоянного натяга  $\sigma_{opt} = 3,5 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>; магнитная индукция в геометрическом центре модуля  $B_0 = 3,5$  Тл; максимальная магнитная индукция (в лобовых частях)  $B_{max} = 4,5$  Тл.

По технологии «МагТранСити» предусмотрено автономное питание сверхпроводниковых трековых модулей. Источником питания трекового модуля ЛСД является топологический генератор с номинальным током  $I_G = 2$ , который в 1,7 раза превышает  $I_N$  (рис. 9, а). Генератор располагается в криостате рядом с трековым модулем и обеспечивает все

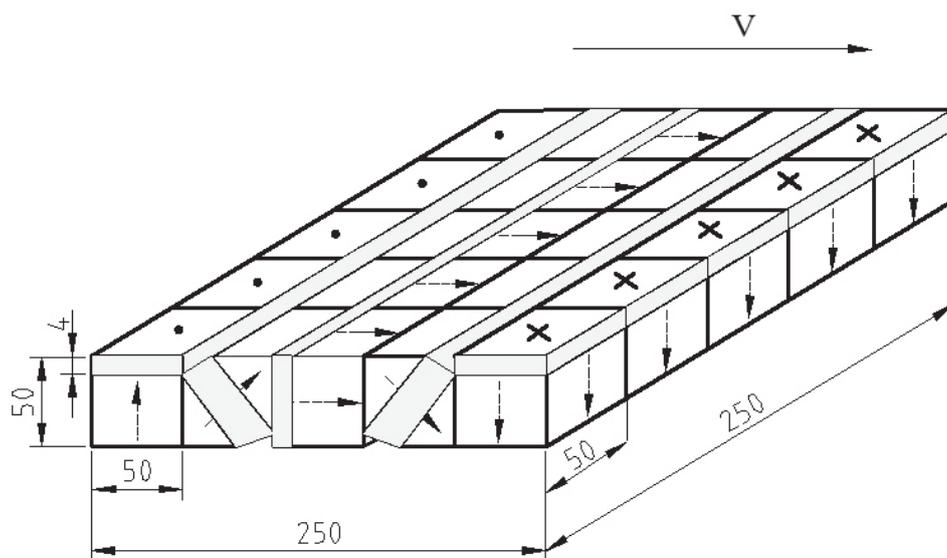


Рис. 8. Магнитный полюс из элементарных объемных ВТСП

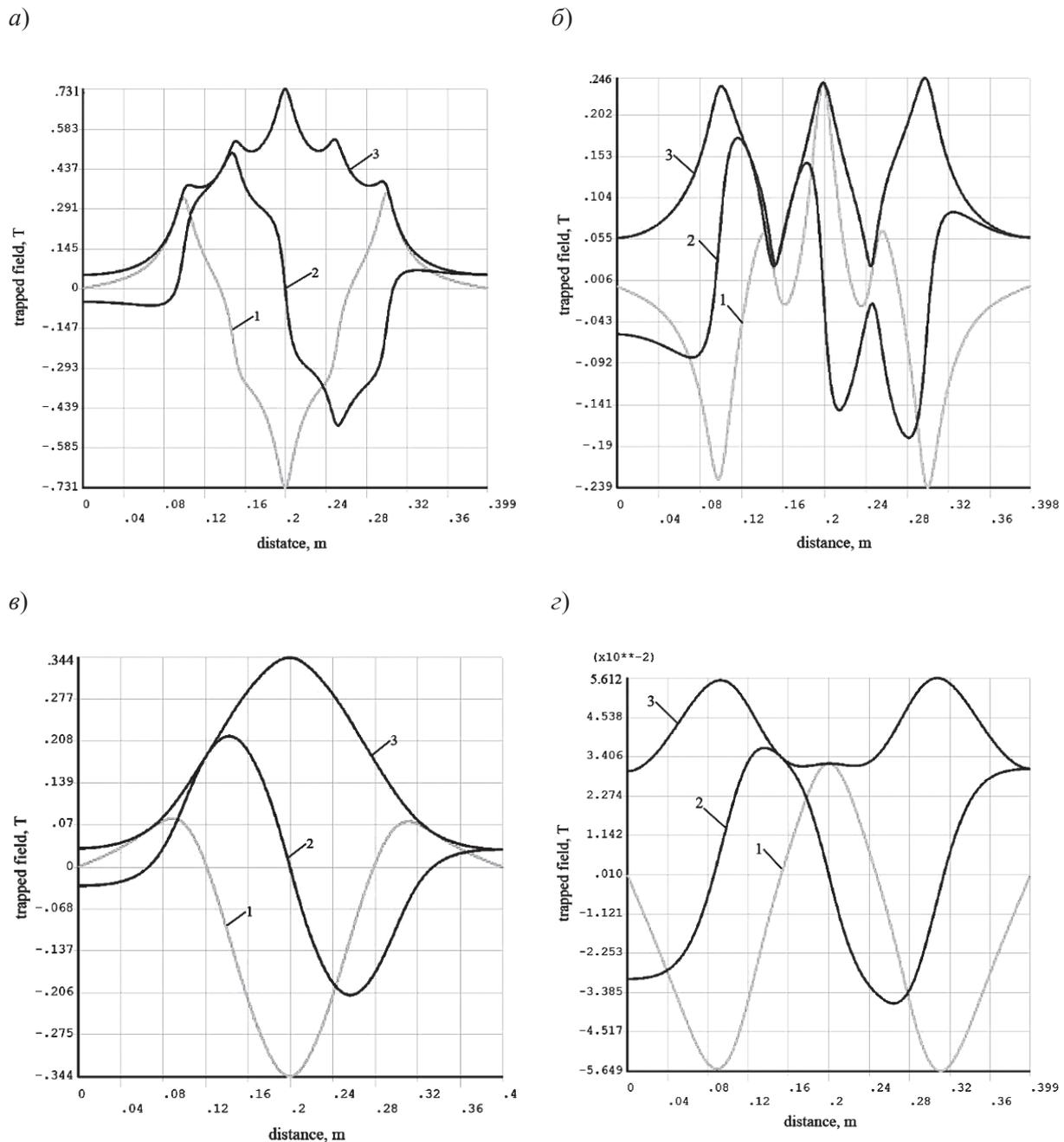


Рис. 9. Распределение магнитного поля различных полюсов:

1 – горизонтальная составляющая магнитной индукции  $B_x$ ; 2 – вертикальная составляющая  $B_y$ ; 3 – суммарная магнитная индукция  $B$  (схемы полюсов:  $\uparrow \nearrow \rightarrow \searrow \downarrow$  (а, б);  $\uparrow \nearrow \searrow \downarrow$  (в);  $\uparrow \rightarrow \downarrow$  (г); высота полюса 25 мм (б))

режимы питания: начальное заведение, регулирование и вывод тока, а также «незатухающий ток» [3]. При аварийном переходе

сверхпроводникового трекового модуля в нормальное состояние в его обмотке выделяется запасенная электромагнитная энергия.

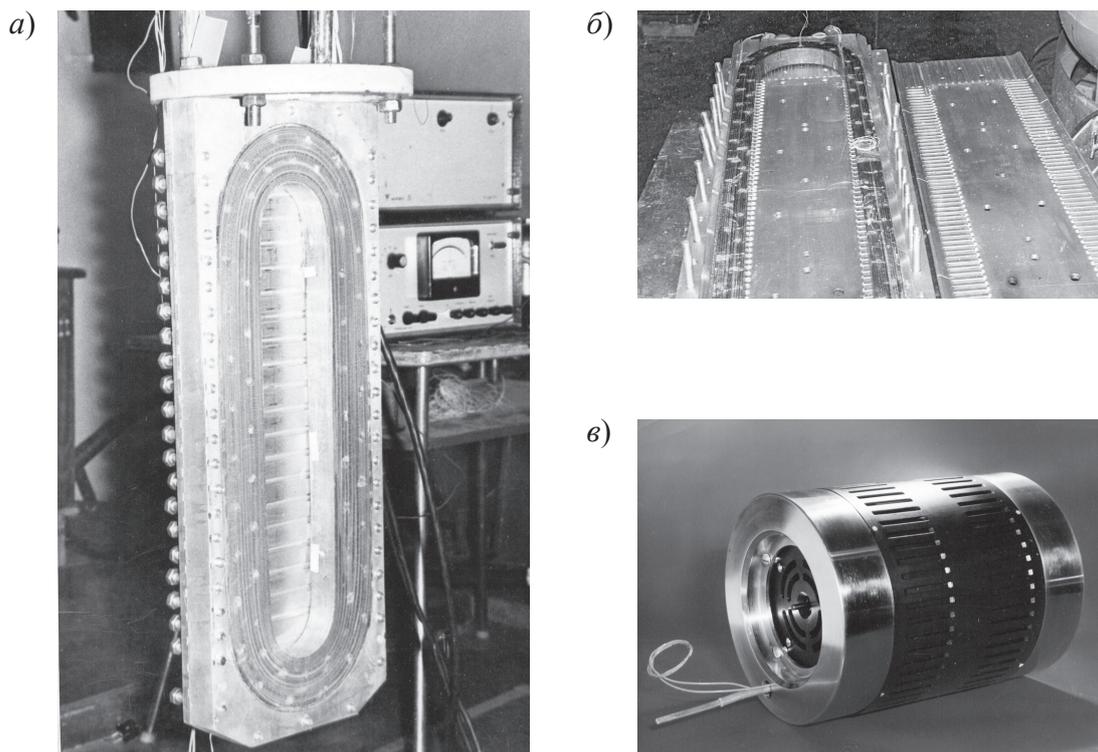


Рис. 10. Сверхпроводниковый трековый модуль:  
*a* – перед испытанием в технологическом криостате; *b* – после компаундирования;  
*в* – сверхпроводниковый топологический генератор

## 6 Путевая трехфазная обмотка статора линейного синхронного двигателя

На рис. 11 приведена схема взаимного расположения бортовых и путевой обмоток систем левитации, боковой стабилизации и линейной тяги.

Магнитная индукция в зоне расположения путевой трехфазной обмотки статора  $B_1$  в 5–6 раз меньше, чем в геометрическом центре трекового модуля  $B_0$ , и может находиться, в зависимости от величины воздушного зазора, в пределах  $0,6 \div 0,8$  Тл. Сравнительно высокие значения магнитной индукции поля возбуждения позволяют отказаться от использования в статоре шихтованного сердечника. В результате возникает возможность увеличения количества активного проводникового материала и, как следствие, повышения линейной нагрузки статора и удельной мощности тягового двигателя. Из-за отсутствия в конструкции линейного синхронного двигателя ферромагнитных материалов ис-

ключаются потери на гистерезис. В такого рода «беспазовом» линейном синхронном двигателе нет «тяжения силовых линий» магнитного поля, и такой двигатель, по сравнению с традиционным, не снижает эффективности системы левитации.

По технологии «МагТранСити» для ЛСД применяется кабельная трехфазная однослойная волновая обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу (рис. 12). Волновая обмотка, по сравнению с петлевой или лягушачьей, позволяет обеспечить питание от силовой сети длинных участков, достигающих нескольких километров. Данное преимущество имеет важное значение для городского транспорта.

Путевая трехфазная обмотка тягового двигателя в «беспазовом» исполнении выполняется с диаметральной шагом при том, что рядом расположены стержни одной фазы. Это упрощает конструкцию обмотки, крепление ее стержней и снижает требования к межвитковой изоляции. Обмотка с диаметральной

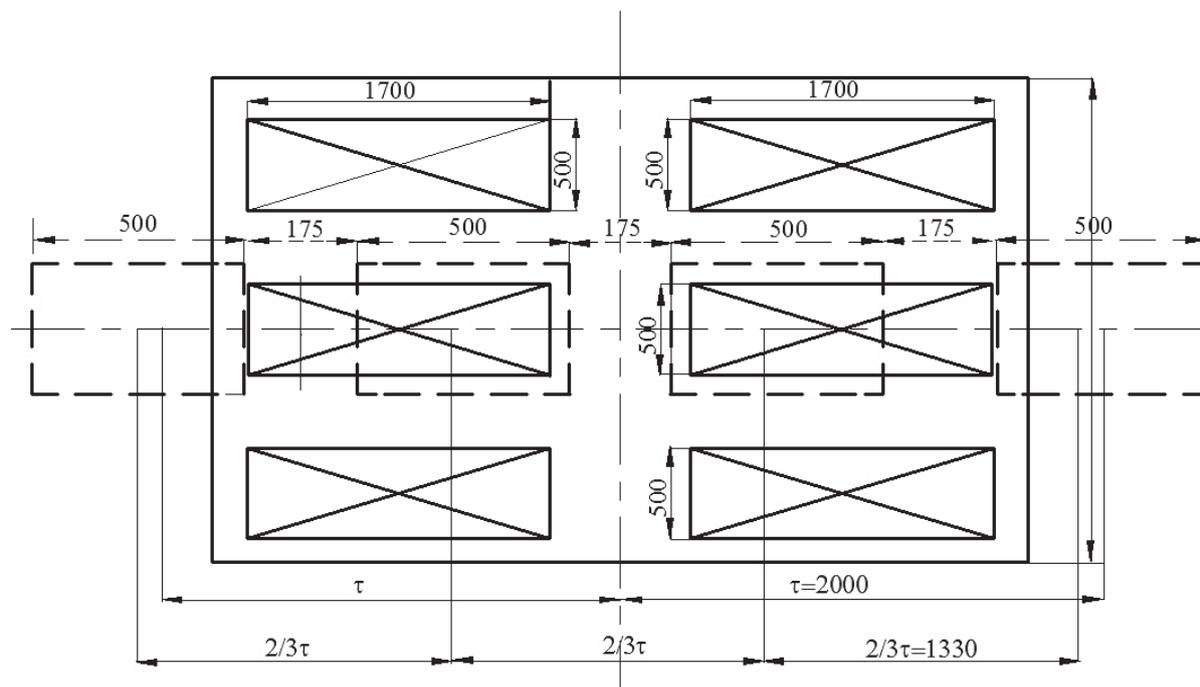


Рис. 11. Схема расположения магнитных полюсов системы левитации и боковой стабилизации, бортовых трековых модулей и путевого трехфазной обмотки статора ЛСД

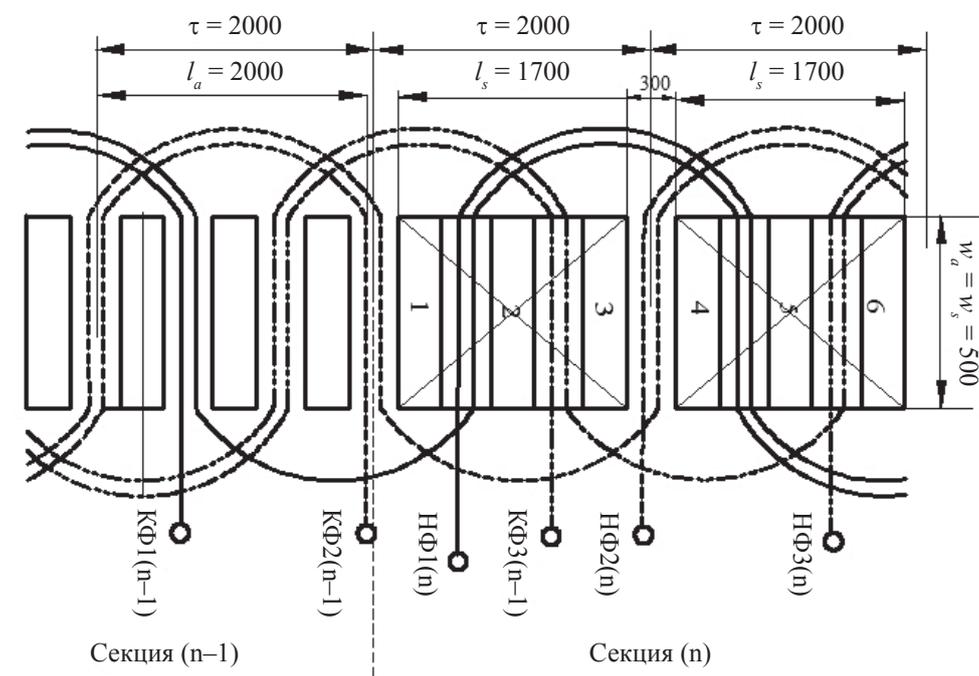


Рис. 12. Схема трехфазной однослойной волновой обмотки статора ЛСД

шагом позволяет увеличить коэффициент заполнения по намотке и увеличить единичную мощность линейного синхронного двигателя.

Однослойное исполнение обмотки исключает вертикальные усилия, действующие на витки, в любых режимах работы ЛСД. Однако

с увеличением коэффициента заполнения по намотке уменьшаются расстояния между стержнями однослойной обмотки, вследствие чего увеличиваются размеры вылетов лобовых частей. Их длина достигает более 50% длины стержня, что ведет к увеличению расхода активных материалов.

## Заключение

Новая технология «МагТранСити» позволяет достичь скорости городского общественного транспорта, в 2,5–4 раза превышающей скорость трамвая и троллейбуса и в 2–2,5 раза скорость поезда метро. Удельная мощность

составляет 230–270 (В·А)/Н. По сравнению с наземным электрическим транспортом потребляемая энергия на 1 км пути на 20–25% ниже, а для метро – в 3 раза.

## Библиографический список

1. **FTA-CA-26-7025.2005.** *General Atomics Low Speed Maglev Technology Development Program* (Supplemental #3). Final Report.
2. **Campbell, M.,** Cardwell, D.A. (1995). *Cryogenics*, 37, 567–575.
3. **Glebov, I.A.,** Shakhtarin, V.N., Antonov, Yu. F. (1978). *Proceedings of the 6th international conference on magnet technology*, Bratislava, 276–286.

УДК 656.25

**П. Е. Булавский, Д. С. Марков**

Петербургский государственный университет путей сообщения

## АВТОМАТИЗАЦИЯ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ

Предложена формализация электронного документооборота технической документации (ЭДТД) на устройства железнодорожной автоматики. Описано применение международных стандартов для представления моделей обследования технологических процессов ЭДТД систем железнодорожной автоматики и телемеханики.

электронный документооборот технической документации, технический документ, отраслевой формат, обобщенная формализованная схема, параллельные логические схемы алгоритмов.

## Введение

Повышение эффективности проектирования, строительства и эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) требует комплексного внедрения электронного документооборота технической документации (ЭДТД), обеспе-

чивающего применение новых принципов стандартизации технической документации и организации взаимодействия проектных, строительных, эксплуатационных и ремонтных организаций.

Синтез систем ЭДТД СЖАТ весьма сложен ввиду его существенных особенностей: