

В. А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, С. В. ПЛАКСИН, Л. М. ПОГОРЕЛАЯ, И. И. СОКОЛОВСКИЙ  
(Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», Днепропетровск)

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩЕГО ЭКИПАЖА

Запропонована концепція побудови автоматизованої інформаційно-управляючої системи (ІУС) магнітолевітуючого екіпажа, що базується на використуванні магістральної маркерно-зв'язної хвилеводної лінії з групами входних отворів зв'язку, що розташовується упродовж активної шляхової структури. Збудження хвилеводної лінії здійснюється модульованими НВЧ сигналами, несучими інформацію про просторове положення магнітолевітуючого екіпажа, його швидкість і параметри тягової системи.

Предложена концепция построения автоматизированной информационно-управляющей системы (ИУС) магнитолевитирующего экипажа, базирующаяся на использовании магистральной маркерно-связной волноводной линии с группами входных отверстий связи, располагаемой вдоль активной путевой структуры. Возбуждение волноводной линии осуществляется модулированными СВЧ сигналами, несущими информацию о пространственном положении магнитолевитирующего экипажа, его скорости и параметрах тяговой системы.

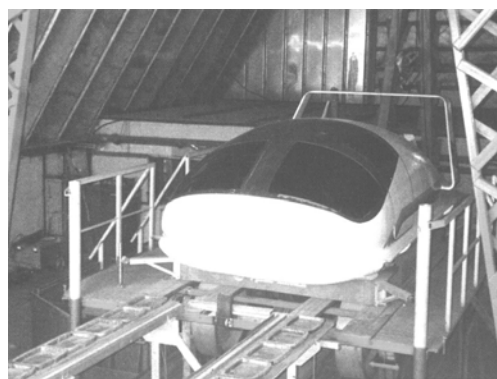
It is suggested the concept of construction of automated information-control system (ICS) for Maglev on the basis of usage of highway mark-connecting communication wave guide line with groups of input connecting holes placed along active way structure. The excitation of wave guide line is carried out by the modulated microwave signals with the information about spatial position of Maglev, its speed, and also about parameters of propulsion system.

Необходимость в развитии систем высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) обусловлена потребностями экономического роста, ведь скорость – это доступ к ресурсам. Развитие транспортных систем на основе ВСНТ признано одним из приоритетных направлений интеграционных научно-технических разработок в соответствии с 6 Рамочной Программой (6 РР) Евросоюза [1]. Основные перспективы в развитии ВСНТ связаны с магнитолевитирующими (МАГЛЕВ) транспортными системами. Понимание этих закономерностей вызвало к жизни разработку в странах Евросоюза проектов строительства радиальных трансъевропейских линий МАГЛЕВ-транспорта [2]. В Украине также ведутся разработки MagLev-систем учеными из Харькова [3, 4], Днепропетровска [5] и других регионов. В Институте транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг» (Днепропетровск) построены экспериментальные полигон и экипаж, фотографии которых приведены на рис. 1.

Высокая скорость и экологическая привлекательность этого вида транспорта обусловлены тем, что он основан не на традиционном принципе взаимодействия колеса и рельса, а на принципиально новом способе подвеса – магнитном.



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальный экипаж (а) и полигон (б) ИТСТ НАНУ «Трансмаг»

## Принцип работы МАГЛЕВ-транспорта

На сегодняшний день наиболее отлаженными являются две системы – JR-MagLev [6] и Transrapid [7]. Обе они являются весьма сложными и громоздкими комплексами, что во многом определяется многообразием их функций и сложностью задач, которые они призваны решать.

JR-MagLev разработан в качестве инновационной транспортной системы следующего поколения, в которой применяется электродинамическая система подвеса и синхронные линейные двигатели с сверхпроводящими магнитами. Принцип действия электродинамического подвеса, который также применяется и в экспериментах на испытательном полигоне института «Трансмаг» НАН Украины, иллюстрируется на рис. 2.

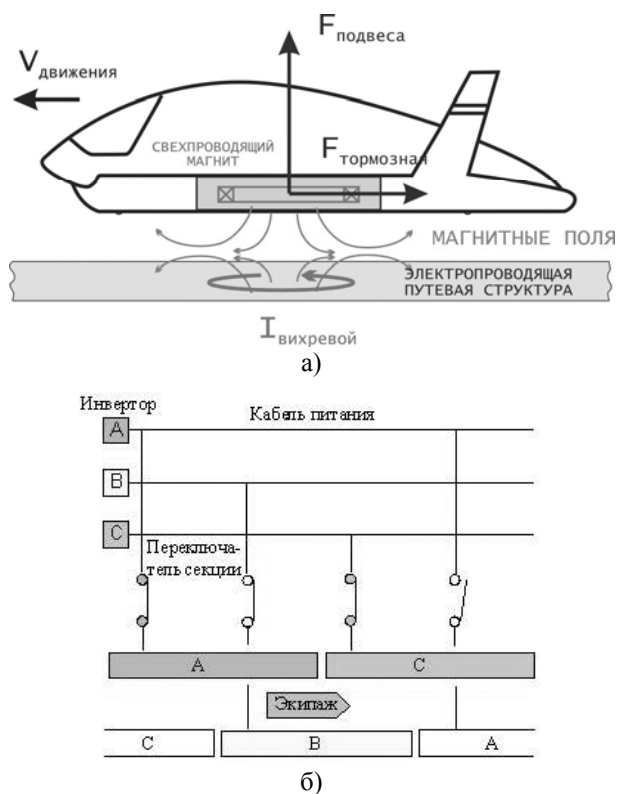


Рис. 2. Электродинамический подвес системы JR-MagLev :

- а) принцип электродинамического подвеса;
- б) трехфазная система продвижения экипажа

Эта система предназначена для обслуживания транспортной артерии между Токио и Осакой, крупнейшими городами Японии. Поскольку расстояние велико, то и скорость движения экипажа проектируется высокой (порядка 500 км/ч).

Немецкая же система Transrapid основана на электромагнитном способе подвешивания и рассчитана на более короткие дистанции (на-

пример, из центра города до аэропорта, как в мюнхенском проекте или в Шанхае) и, следовательно, рассчитана на более низкие скорости движения. Бесконтактная система подвеса и направления использует силы притяжения между отдельными электронно-управляемыми электромагнитами на экипаже и взаимодействующим с ними ферромагнитным (отражающим) рельсом, который установлен на обратной стороне (на изнанке) путевой структуры. Магниты подвеса притягивают экипаж вверх к путевой структуре снизу (см. рис. 3), а направляющие магниты удерживают его с боков трассы. Магниты подвешивания и направления установлены по обеим сторонам вдоль всей длины экипажа.

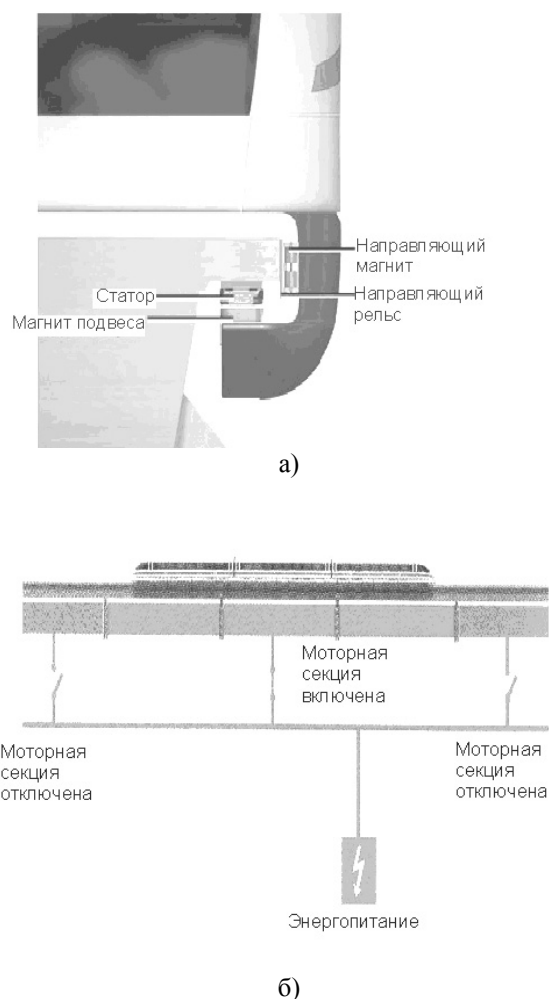


Рис. 3. Электромагнитный подвес системы Transrapid (а); поочередное включение тяговых секций (б)

Синхронный линейный двигатель трансрапидовской МАГЛЕВ-системы используется как для продвижения, так и для торможения. Действие этой бесконтактной системы продвижения и торможения может быть выведено из принципа функционирования вращающегося электромотора, статор которого рассечен и рас-

тянут вдоль обеих сторон путевой структуры. Вместо вращающегося магнитного поля мотор генерирует электромагнитное бегущее поле. Магниты подвеса на экипаже функционируют как ротор (возбудитель) электромотора.

В отличие от обычной железной дороги первичный двигательный компонент транспапидовской МАГЛЕВ-системы – статорные пакеты с трехфазными моторными обмотками – установлен не на экипаже, а на путевой структуре.

За счет подачи переменного тока на трехфазную моторную обмотку генерируется электромагнитное бегущее поле, которое движет экипажем, увлекая за собой магниты подвеса. Скорость может непрерывно (плавно) регулироваться от стояночного состояния до полной рабочей скорости изменением частоты переменного тока. Если направление бегущего поля меняется на противоположное, то мотор становится генератором, который бесконтактно тормозит экипаж. Энергия торможения может быть возвращена в сеть общего пользования. Система подвеса и направления запитывается энергией бесконтактно через линейные генераторы, интегрированные в магниты подвешивания. Для поездов обеих систем не требуется воздушной контактной сети. В случае аварийного прекращения подачи электроэнергии энергия подается из бортовых батарей, которые заряжаются линейными генераторами во время движения.

В японской системе JR-MagLev для движения экипажа также используется линейный синхронный двигатель. В обеих этих системах статор линейного двигателя, вмонтированный в путевую структуру, состоит из отдельных тяговых секций, которые запитываются электроэнергией только в момент прохождения над ними экипажа. Для обеспечения сил магнитного отталкивания, достаточных для компенсации гравитационных сил, необходимы такие токи, которые могут быть обеспечены только сверхпроводящими магнитами. Поэтому на борту экипажа должна функционировать еще и криогенная подсистема.

Несмотря на физическую ясность способов организации МАГЛЕВ-движения, практическая реализация таких систем представляет собой сложную научно-техническую задачу. Определенная сложность состоит в обеспечении слаженности работы всех подсистем. И эта задача – координация работы отдельных подсистем, вместе с осуществлением функций мониторин-

га параметров движения и управления линейным тяговым двигателем, возложена на сложный комплекс аппаратно-программных средств под общим названием

### **Автоматизированная информационно-управляющая система (ИУС) магнитоплана**

Разработки таких ИУС осуществляются в целом ряде ведущих научно-технических центров технологически развитых стран мира. По мнению разработчиков, как зарубежных [8], так и отечественных [9], к числу основных функций, которые должна осуществлять автоматизированная ИУС, следует относить следующие:

1) мониторинг параметров движения (скорость, ускорение, текущая координата);

2) на основании данных мониторинга и заданного графика движения управление катушками линейного двигателя активной путевой структуры путем синхронизированной с моментом прохождения над ними экипажа подачи электроэнергии;

3) оперативный контроль состояния путевой структуры (механические колебания, прогибы);

4) контроль параметров тягово-левитационной системы (величина магнитного поля в зазоре между экипажем и путевой структурой, состояние переключателей катушек);

5) контроль параметров левитирующего экипажа (величина зазора между днищем экипажа и поверхностью активной путевой структуры, зазор между экипажем и боковыми направляющими, функционирование бортовой аппаратуры);

6) бесконтактное измерение указанных параметров и передача этой информации по радиоканалу на центральный (стационарный) пункт управления;

7) включение аварийного торможения в случае превышения заданного лимита скорости;

8) обновление информации для персонала и пассажиров;

9) контроль параметров и управление режимами работы путевых и бортовых накопителей электроэнергии.

До настоящего времени такие ИУС разрабатывались на разнородной элементной базе и на основе разных физических явлений. Теперь же, при современном развитии измерительной техники, средств связи (в особенности в миллиметровом диапазоне), появилась возможность построения всей автоматизированной ИУС на основе однородной элементной базы и на однотипных физических явлениях. Пред-

лагаемая в данной работе концепция построения автоматизированной ИУС базируется на маркерно-связной волноводной линии передачи с использованием датчиков и преобразователей на основе нелинейных эффектов горячих электронов в полупроводниковой плазме.

### Концепция автоматизированной информационно-управляющей системы

Суть концепции состоит в следующем. Комплексная задача мониторинга параметров магнитоплана и управления его движением может быть решена за счет использования электромагнитных волн сверхвысоких частот (СВЧ) и в качестве средства канализации электромагнитных волн – закрытого полого волновода. Автоматизированная информационно-управляющая система, блок-схема которой приведена на рис. 4, включает маркерно-связной волновод 1, расположенный между направляющими рельсами путевой структуры по всей ее длине.

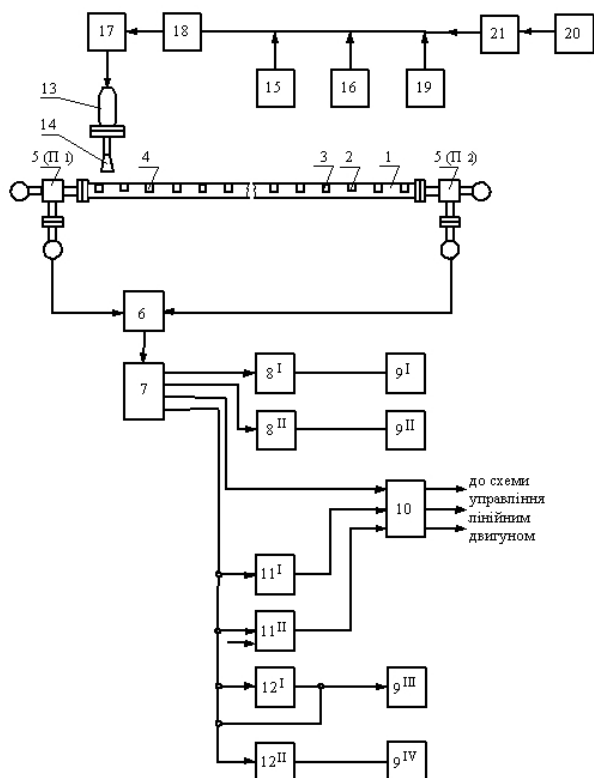


Рис. 4. Функциональная схема ИУС

Как показано на рис. 5, вдоль верхней линии образующей волновода размещены группы герметизированных диэлектриком отверстий 2, 3, 4 с шагом  $2\tau/6$ , где  $2\tau$  – характерный размер путевых катушек.

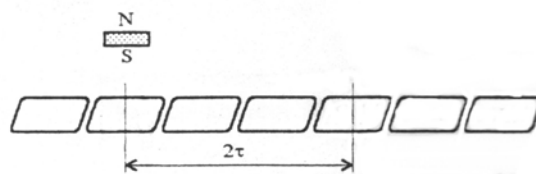


Рис. 5. Характерный размер путевых катушек

На концах волновода устанавливаются приемники 5 электромагнитных сигналов. Выходы приемников соединены с входами сумматора 6, а выход последнего соединен с входом декодера 7. С выходов декодера сигналы по своим каналам информации поступают на цифро-аналоговые преобразователи 8, с выходами которых соединены входы преобразующих, измерительных и регистрирующих приборов ( $9^I$  – регистрация вертикального зазора,  $9^{II}$  – поперечного смещения,  $9^{III}$  – скорости и  $9^{IV}$  – ускорения), устройства управления питанием катушек путевой структуры 10, реверсивных счетчиков 11 (кольцевого и программируемого) и устройств дифференцирования ( $12^I$  – вычислитель 1-ой производной (скорости),  $12^{II}$  – вычислитель 2-ой производной (ускорения)). На платформе МТС устанавливается генератор электромагнитных волн 13 с излучателем 14, излучение которого модулируется информативными сигналами о работе датчиков вертикального зазора 15, поперечного смещения 16, датчиков направления движения 19 с помощью модулятора 17 и кодирующего устройства 18.

В первоначальный момент движения МТС любой точки маршрута, управление частотой переключения катушек электромагнитов путевой структуры осуществляется с наземного пункта управления «вручную» либо по команде специального датчика, запрограммированного на определенный режим разгона. При пересечении излучателем 14 первого в направлении движения отверстия связи с волноводом, сигнал генератора, поступая через это отверстие в полость волновода, распространяется по волноводу по двум противоположным направлениям к его концам, где регистрируется приемниками 5. На выходе приемников, снабженных видеодетекторами, возникают сигналы, уровни которых пропорциональны расстоянию от точки ввода сигнала в полость волновода до приемников. В сумматоре 6 эти сигналы складываются таким образом, что на выходе сумматора уровни сигнала остаются постоянными на всем пути следования МТС. Декодер 7 производит декодирование и распределение по каналам имеющейся в сигнале информации, после чего информация от каждого из датчиков поступает

по своим каналам в преобразующее устройство 8, измерительно-регистрирующее устройство 9, счетчик 11 или дифференцирующее устройство 12. Измерительно-регистрирующие приборы 9 измеряют и регистрируют на технический носитель информации параметры движения и пространственного положения МТС, указанные выше. При этом устройство управления током путевой структуры 10, получая сигналы в момент прохождения платформой МТС маркерных отверстий в маркерно-связном волноводе, формирует сигнал управления линейным трехфазным электродвигателем на каждом из трех выходов устройства управления 10, чередуя сигналы включения фаз А, В, С питания катушек путевой структуры. Эта очередность задается реверсивным счетчиком 11 маркерных сигналов. Устройства дифференцирования 12 обеспечивают вычисление первой и второй производной по времени маркерных сигналов с целью получения мгновенных значений скорости и ускорения движения платформы МТС.

Счетчик маркерных сигналов 11 имеет несколько каналов счета:

1 – кольцевой реверсивный счетчик на 2 и на 6 с трехфазным выходом;

2 – программируемый реверсивный счетчик емкостью 144 импульса.

Назначение первого счетчика описано выше. Программируемый реверсивный счетчик задает отрезки пути, на которых будут реализовываться определенные режимы разгона, движения, торможения, изменения направления движения платформы МТС. Кроме того, на измерительно-регистрирующие приборы наземного пункта управления подается информация о режиме работы системы питания путевой структуры: напряжение питания катушек путевой структуры (мгновенное значение порядка 500 В), ток питания (мгновенное значение порядка 100 А), форма тока.

Особенностью линейного синхронного двигателя является необходимость регулирования напряжения питания обмоток путевой структуры в строгом соответствии с местом нахождения экипажа на линии и скоростью его движения. Так как на борту размещены лишь неуправляемые магниты возбуждения, регулирование скорости возможно лишь через систему энергоснабжения, которая, таким образом, становится элементом системы управления движением, при которой подключение и отключение секций должно производиться автоматически по мере продвижения МТС по линии.

Для однородной передающей линии связь между критической длиной волны  $\lambda_{кр}$ , длиной волны в свободном пространстве  $\lambda_0$  и длиной волны в линии  $\lambda_в$  определяется соотношением

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_в}\right)^2.$$

При длине линии  $L$  количество полуволн будет равным  $\frac{2L}{\lambda_в}$ . Тогда данное уравнение

может быть записано в виде

$$(fD)^2 = \left(\frac{ck}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{cN}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^2,$$

где  $D$  – диаметр волновода,  $k$  – корни функции Бесселя (табл. 7.1 [10]),  $N$  – число полуволн, заключающееся в отрезке  $L$ ,  $c$  – скорость света. Это уравнение в графическом виде и является диаграммой видов колебаний. Построив данную диаграмму (она здесь не приводится из-за громоздкости), удастся выбрать области, где наложение нежелательных видов исключено или сведено к минимуму. Для «длинного» волновода, когда отношение диаметра волновода  $D$  к его длине мало, значение ординаты на диаграмме  $\left(\frac{fD}{100}\right)^2 = 14$ . При диаметре волновода  $D = 3.2$  см (существует такой сортамент трубы), значение рабочей частоты электромагнитного поля равно 12.21 ГГц. Сопутствующий виду  $H_{01}$  вид колебаний  $E_{11}$  не может возбудиться из-за неблагоприятной для этого типа ориентации щели связи [11].

Эти численные данные были использованы при конструировании модели маркерно-связного волновода, использованного при проведении экспериментальных исследований. В качестве волноводной линии была использована алюминиевая труба диаметром  $D = 3.2$  см, длиной  $L = 400$  см, в которой вдоль образующей были прорезаны прямоугольные щели, размер которых был определен, исходя из электродинамических соображений [11]. Расстояние между щелями  $l = 2\tau/3 = 416.6$  мм, где  $2\tau = 1250$  мм (рис. 5). В качестве источника электромагнитных колебаний был использован генератор 3-см диапазона с опорным цилиндрическим резонатором, включенным по схеме полосно-заграждающего фильтра [12]. На частоте 12.2 ГГц уровень излучающей мощности был порядка 80 мВт.

С помощью измерительной установки, позволяющей поочередное возбуждение щелей

связи и измерение мощности, переизлученной из соседних щелей связи, были определены потери СВЧ-мощности на переизлучение из пассивных (то есть, находящихся вне зоны облучения) отверстий связи, перераспределение СВЧ-мощности по приемникам П1 и П2 (см. рис. 4) при перемещении излучателя вдоль волновода.

Результаты этих экспериментов показали, что предложенная концепция маркерно-связного волновода для построения информационно-управляющей системы управления магнитолевитирующих транспортных средств продуктивна, с ее помощью можно решать задачи по меньшей мере исследовательского характера. Решив некоторые технологические задачи (обеспечив гальваническую развязку между волноводом и приемником, используя высокочувствительные и энергопрочные приемники), протяженность волноводной линии можно сделать довольно значительной. Оценки показывают, что при использовании источников СВЧ-излучения с выходной мощностью 80 мВт на частотах в диапазоне 10-12 ГГц и приемников с чувствительностью  $10^{-11}$  Вт допустимая длина волноводной линии составляет 1 км. Использование же трактовых усилительных или приемоизлучающих устройств, устанавливаемых вдоль трассы (результаты исследований которых будут представлены в последующих сообщениях) решает реальную задачу построения информационно-управляющей системы, базирующейся на радиоволновых методах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 6 FP Instruments, Implementing the Priority Thematic Areas of the Sixth Frame Programme // European Commission. Community Research. – 2002. – No 2. – P.4.
2. Schöbl D. Energy and Environmental Assessment of a Eurometro. DEMAND and NETWORK – Influential Factors / Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on MAGnetically LEVitated Systems and Linear Drives “MAGLEV’2002”, September 3-5, 2002. – Lausanne, Switzerland (CD-ROM).
3. Zub S. S. Spatial Magnetic Potential Well and MagLev in the System of Magnetic Dipole and Su-

- perconductive Sphere // Visnyk of Kharkiv University, 1999. – N 453. – P. 48-53.
4. Kozoriz V. V. Novel Magnetic Levitation and Propulsion Phenomena. – Zaporizhzhya: Motor-Sich Press, 2001.
5. Дзензерский В. А. Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией / В. А. Дзензерский, В. И. Омеляненко, С. В. Васильев, В. И. Матин, С. А. Сергеев – К.: Наук. думка, 2001. – 479 с.
6. Seki A. The status of the development and the running tests of the JR-Maglev / A. Seki, H. Tsuruga, A. Inoue // Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on MAGnetically LEVitated Systems and Linear Drives “MAGLEV’2002”, September 3-5, 2002. – Lausanne, Switzerland (CD-ROM).
7. Transrapid MagLev System. Ed. by Heinrich K., Kretzschmar R. – Darmstadt: HESTRA-Verlag, 1989. – 114 p.
8. Henning U. Advanced Converter and Control Components of the TRANSPERAPID Propulsion System // Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems (STECH’03), August 19 to 22, 2003, Tokyo, Japan. – Department of Mechanical Systems Engineering of Tokyo Univ. of Agriculture & Technology.
9. Дзензерский В. А. Радиоволновые методы контроля и управления движением магнитолевитирующих транспортных средств / В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, И. И. Соколовский // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2002, № 1. – С. 108-114.
10. Гинзтон Э. Л. Измерения на сантиметровых волнах. – М.: Изд-во иностр. литературы, 1960. – 616 с.
11. Будурис Ж. Цепи сверхвысоких частот / Ж. Будурис, П. Шеневье – М: Сов. радио, 1979. – 288 с.
12. Кравченко А. В. Сравнительный анализ методов стабилизации полупроводниковых СВЧ-генераторов миллиметрового диапазона / А. В. Кравченко, В. Я. Крысь, И. И. Соколовский // Тезисы докладов I Украинского симпозиума «Физика и техника мм и субмм радиоволн». – Харьков: ИПЭ АН УССР, 1991. – Ч.1. – С.185.

Поступила в редакцию 03.01.2008.