

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК [656.2 : 629.439]–047.58

А. ЛАШЕР¹, М. УМАНОВ^{2*}, Е. ФРИШМАН³, Е. ПРИШЕДЬКО⁴¹Дрезденский технический университет, ул. Момсен, 13, Дрезден, Германия, D-01062, эл. почта a.lasher@gmx.de^{2*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, эл. почта m.umantov@mail.ru³Каф. «Электроника», Иерусалимский технологический колледж, ул. Хаваад Халеуми, 21, Иерусалим, Израиль, 91160, эл. почта f688349@netvision.net.il⁴Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», ул. Писаржевского, 5, Днепропетровск, Украина, 49005, эл. почта kheltanya@gmail.com

МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МАГНИТОЛЕВИТИРУЮЩИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Цель. В настоящее время магнитолевитирующие транспортные системы (МТС) для высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) практически не применяются в связи с необходимостью больших капиталовложений и увеличением эксплуатационных расходов. Цель статьи – внедрение комплексной оптимизации параметров МТС для уменьшения капиталовложений и эксплуатационных расходов, что позволит начать практическое их применение. В данной работе обосновывается целесообразность использования теории комплексной оптимизации транспорта (ТКОТ), предложенной одним из авторов, для снижения расходов в МТС. **Методика.** Согласно ТКОТ была разработана абстрактная модель обобщенной транспортной системы (АМОТС), которая математически определяет максимальное равновесие между всеми компонентами системы и тем самым обеспечивает предельную адаптацию любой транспортной системы к условиям ее применения. Для определения сфер эффективного применения МТС в соответствии с ТКОТ была разработана динамическая модель распределения и развития сфер эффективного применения транспортных систем (ДМРПСЭПТС), где для каждой отдельно взятой трассы выбирается наиболее эффективная транспортная система. Основным оценочным критерием при определении эффективности применения МТС является величина удельного перевозочного тарифа, получаемая из расчета окупаемости суммарных приведенных затрат к нормативному сроку окупаемости или сроку предоставления кредита. **Результаты.** Выполненные многовариантные расчеты четырех типов МТС: TRANSRAPID, MLX01, ТРАНСМАГ и ТРАНСПРОГРЕСС показали эффективность комплексной оптимизации параметров таких систем. Это позволило расширить сферы эффективного применения МТС примерно в 2 раза. Результаты исследований докладывались на многих международных конференциях в Германии, Швейцарии, США, Китае, Украине и др. На примере МТС в данной работе была доказана состоятельность предлагаемой комплексной оптимизации параметров транспортных систем, которая может быть использована и для других транспортных систем. **Научная новизна.** Изложенные основы комплексной оптимизации транспорта являются новой системой универсальных научных методов и подходов, обеспечивающей высокую точность и достоверность расчетов при моделировании транспортных систем и транспортных сетей с учетом динамики их развития. **Практическая значимость.** Разработка теоретических и технологических основ проведения комплексной оптимизации транспорта позволяет создать научный инструмент, обеспечивающий выполнение автоматизированного моделирования и расчета технико-экономической структуры и технологии работы различных объектов транспорта, включая его инфраструктуру.

Ключевые слова: МТС; TRANSRAPID; MLX01; ТРАНСМАГ; ТРАНСПРОГРЕСС; ТКОТ; АМОТС; ДМРПСЭПТС; электромагнитный подвес; электродинамический подвес; подвес на постоянных магнитах

Введение

Высокая капиталоемкость МТС и низкая рентабельность инвестиций в их строительство при действующих пассажиропотоках существенно ограничивают возможности применения таких систем в существующей транспортной инфраструктуре. Поэтому в данной работе обосновывается целесообразность использова-

ния теории комплексной оптимизации транспорта, предложенной одним из авторов, для снижения расходов в МТС. Это позволит повысить их шансы в конкуренции с традиционными видами транспорта на действующем рынке перевозок.

Цель

Снижение расходов МТС путем повышения их эффективности с помощью применения комплексной оптимизации их параметров.

Методика

Согласно ТКОТ была разработана абстрактная модель обобщенной транспортной системы (АМОТС), которая математически определяет максимальное равновесие между всеми компонентами системы и тем самым обеспечивает предельную адаптацию любой транспортной системы к условиям ее применения. В результате этого отсекаются все излишние расходы и обеспечивается максимальная эффективность МТС.

Также для определения сфер эффективного применения МТС в соответствии с ТКОТ была разработана динамическая модель распределения и развития сфер эффективного применения транспортных систем (ДМРПСЭПТС), где для каждой отдельно взятой трассы выбирается наиболее эффективная транспортная система. В этом случае основным оценочным критерием при определении эффективности применения МТС в сравнении с традиционными видами транспорта является величина удельного перевозочного тарифа, получаемая из расчета окупаемости суммарных приведенных затрат к нормативному сроку окупаемости.

Расчеты выполнялись применительно к четырем МТС: TRANSRAPID, MLX01, ТРАНСМАГ и ТРАНСПРОГРЕСС. TRANSRAPID – это немецкая МТС на электромагнитном подвесе; MLX01 – японская МТС на электродинамическом подвесе; ТРАНСМАГ и ТРАНСПРОГРЕСС – это украинская и российская МТС. При этом первая – это МТС на электродинамическом подвесе со сверхпроводящими магнитами и линейным синхронным приводом, разработанная в Институте транспортных систем и технологий Национальной академии наук Украины [10], а вторая – это МТС на постоянном магнитном подвесе с линейным асинхронным короткостаторным приводом, предназначенная для перевозки сыпучих грузов на горно-обогачительных и металлургических предприятиях [11].

На основе АМОТС для каждой из указанных МТС был написан отдельный алгоритм.

Расчеты TRANSRAPID и MLX01 проводились для выбранных виртуальных трасс (табл. 1) и трасс, для которых имеются ранее выполненные проекты TRANSRAPID (табл. 2).

Для ТРАНСМАГ и ТРАНСПРОГРЕСС расчеты выполнялись по массиву исходных данных, характеризующих совокупность виртуальных трасс. Для ТРАНСМАГ длина трасс была взята в диапазоне от 250 до 4 500 км, а объемы перевозок – в диапазоне от 1 до 25 млн пас. в год.

Для ТРАНСПРОГРЕСС рассматривалась длина трасс от 0,3 до 15 км при руководящем уклоне от 0 до 40 % и грузопотоке от 0,1 до 0,9 млн т/год.

При пассажирских перевозках для сравнения МТС с традиционными видами транспорта были выбраны железнодорожные системы, действующие (планируемые) в направлениях, для которых выполнялись проекты трасс TRANSRAPID (табл. 3).

При грузовых перевозках МТС сравнивались с железнодорожными, автомобильными, конвейерными, канатно-подвесными и пневматическими трубопроводными транспортными системами.

Результаты

В целях выбора правильных подходов для проведения комплексной оптимизации МТС изначально была исследована зависимость их затрат от максимальной скорости поезда и конфигурации его состава.

По результатам проведения комплексной оптимизации МТС была дана их оценка по двум критериям: снижение расходов МТС и расширение сфер их применения в сравнении как с железнодорожным транспортом (для пассажирских перевозок), так и с другими видами традиционного транспорта (для грузовых промышленных перевозок). При этом была определена граница между сферами эффективного применения TRANSRAPID и MLX01.

Выбор оптимальной скорости поезда. Результаты моделирования виртуальных трасс MLX01 и TRANSRAPID показали, что при коротких расстояниях между остановками поезда не может достигнуть максимальной технической скорости (табл. 4). Поскольку, разогнав-

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

шись до возможной скорости, поезд сразу начинает тормозить, то повышения его скорости можно достичь только за счет увеличения ускорения разгона и торможения экипажей. Так как короткие расстояния между остановками свойственны трассам регионального и пригородного сообщения, в поездах которых имеются стоячие места, то увеличение ускорения и замедления экипажей свыше 1 м/с^2 в этом случае недопустимо.

Даже при допустимых значениях ускорения и замедления экипажей скорость поезда является далеко не оптимальной. Это обусловлено тем, что изначально для расчета конфигурации транспортной системы задается максимальная техническая скорость ее поездов, которой они не достигают.

Но неиспользованная разница в скоростях – это дополнительные: мощности линейного привода и подстанций, затраты на их обслуживание, потребляемая электроэнергия и так далее.

В этой связи наиболее целесообразно привести в соответствие задаваемую для расчетов максимальную проектную скорость поезда с его реальной скоростью разгона на участке между двумя остановками.

Как видно из табл. 4, при увеличении мощности линейного двигателя, позволяющего разгонять поезд с постоянным ускорением 1 м/с^2 , его максимальная скорость из-за короткого расстояния между остановками не превысит 412 км/ч . При этом начальная мощность двигателя увеличится в 2,7 раза, а удельная стоимость проезда возрастет до 6,68 цента евро/чел.-км из расчета увеличения суммарных приведенных затрат к сроку их окупаемости на 1,11 млрд евро (до 37,62 млрд евро). Само же время перевозок между конечными пунктами сократится лишь на 1 мин.

Это приводит к незначительному увеличению времени перевозок, но в сравнении с полученным экономическим эффектом такое решение является абсолютно оправданным (табл. 5).

Следовательно, оптимизация максимальной скорости разгона поезда является важным фактором повышения эффективности МТС для трасс регионального и пригородного сообщения.

Выбор оптимальной конфигурации состава поезда. В процессе расчета оптимального удельного проездного тарифа MLX01

и TRANSRAPID для трассы MÜNCHEN была выявлена его зависимость от увеличения состава поезда, выраженная скачкообразным понижением тарифа с увеличением амплитуды и длины каждого последующего скачка (рис. 1).

При этом увеличение количества секций в составе поезда имеет свое ограничение, после которого уже не обеспечивается заданный в проекте коэффициент заполнения вагонов.

Аналогичная тенденция была выявлена при исследованиях системы ТРАНСМАГ, но в рамках данной работы не исследовались причины возникновения вышеуказанной зависимости.

Исходя из этого следует, что выбор оптимальной конфигурации поезда существенно влияет на эффективность МТС.

Анализ комплексной оптимизации ТРАНСМАГ. После проведения комплексной оптимизации ТРАНСМАГ [5] были получены величины удельного тарифа на перевозку одного пассажира на 1 км в зависимости от объема перевозок и длины трассы (рис. 2).

В результате сравнения полученных тарифов с тарифами МТС ТРАНСМАГ до ее комплексной оптимизации (рис. 3) было выявлено более чем двукратное снижение необходимого объема перевозок при фиксированном значении удельного перевозочного тарифа 1,2 цента США/пас.-км (табл. 6).

Отсюда следует, что при фиксированном объеме годовых перевозок 16 млн пассажиров в год величина перевозочного тарифа после комплексной оптимизации ТРАНСМАГ примерно в 2,11 раза ниже тарифа, действовавшего до ее оптимизации (табл. 7).

Таким образом, было достигнуто 52,5 % уменьшения суммарных приведенных расходов к нормативному сроку их окупаемости. Снижение капитальных вложений и эксплуатационных затрат определяет экономическую эффективность комплексной оптимизации ТРАНСМАГ.

Более детальный структурный анализ снижения расходов в ТРАНСМАГ представлен в табл. 8. Из него видно, что наибольшая часть снижения расходов приходится на эксплуатационные затраты.

Таким образом, проведенный анализ показал существенное повышение эффективности МТС ТРАНСМАГ в результате осуществления ее комплексной оптимизации [12].

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Анализ комплексной оптимизации MLX01 и TRANSRAPID. Для проведения расчетов MLX01 и TRANSRAPID в их модели были введены исходные данные из наиболее известных проектов трасс TRANSRAPID. На рис. 4–11 для каждой из трасс по ее основным параметрам представлены результаты моделирования MLX01 и TRANSRAPID, а также ранее полученные результаты при выполнении технико-экономического обоснования вышеуказанных проектов.

Анализ данных, полученных в результате комплексной оптимизации TRANSRAPID, показал, что при одновременном улучшении скоростных показателей была повышена его экономическая эффективность в сравнении с проектными данными трасс (рис. 12–13).

Также было установлено, что увеличение максимального числа секций в составе поезда от его базовой конфигурации приводит к дополнительному снижению затрат исследуемых МТС в среднем на 3,2 процента.

Данные результаты вполне сопоставимы с величиной экономической эффективности, полученной при проведении комплексной оптимизации ТРАНСМАГ (52,5 %), что подтверждает достоверность полученных результатов.

Определение сфер эффективного применения исследуемых МТС. Сферы эффективного применения МТС определяются в данной работе по пяти направлениям.

1. Влияние среднего расстояния между остановками на приведенные затраты.

При осуществлении комплексной оптимизации MLX01 и TRANSRAPID была выявлена зависимость их затрат от среднего расстояния между остановками на трассе.

С увеличением этого расстояния тариф возрастает до тех пор, пока скорость разгона поезда не достигает его максимальной технической допустимой величины, а затем начинает медленно падать (рис. 16). При этом энергозатраты постоянно растут.

Исходя из этого можно сделать вывод, что наиболее эффективным будет применение MLX01 и TRANSRAPID на трассах со средним расстоянием между остановками от 10 до 15 км, что соответствует в основном региональному и пригородному сообщению.

Определение границы между сферами эф-

фективного применения MLX01 и TRANSRAPID. Результаты моделирования проектных трасс показали, что для всех случаев экономически целесообразным будет применение TRANSRAPID в сравнении с MLX01 (см. рис. 11). Но было выявлено, что при дальнейшем увеличении объемов годовых пассажиропотоков (от заданных в проектах) для трасс сообщения «город-аэропорт» (Мюнхен и Шанхай), наиболее эффективным становится применение MLX01 (табл. 9).

Также было установлено, что при последующем увеличении годовых пассажиропотоков существует предел их роста, когда предусмотренная в проекте конфигурация МТС технически уже не может удовлетворять действующим на трассе потребностям в перевозках. Расчеты показали, что для всех трасс (за исключением Шанхай-Ханчжоу) порог применения MLX01 по максимальному объему перевозок выше, чем у TRANSRAPID (рис. 14).

Для всех вариантов расчета были взяты постоянные величины максимальной конфигурации состава поезда MLX01 (6 секций) и TRANSRAPID (10 секций), рассчитанные на 50-й год эксплуатации трассы. Данные конфигурации состава поездов были оптимизированы только под виртуальные трассы длиной 456,5 км со средним расстоянием между остановками 13,4 км, и в дальнейшем, с изменением расстояния между остановками, заданные конфигурации не менялись.

Таким образом, можно сказать, что при малых пассажиропотоках TRANSRAPID является наиболее эффективным для всех проектных трасс.

При объемах перевозок от 8 млн пассажиров в год и выше наиболее эффективным для трасс сообщения «город-аэропорт» становится MLX01.

В зависимости от трассы, граница технического применения проектной конфигурации TRANSRAPID находится в диапазоне от 34,5 до 124,4 млн пассажиров в год, а MLX01 – в диапазоне от 35,5 до 127 млн пассажиров в год.

3. Определение границы между сферами эффективного применения TRANSRAPID и железнодорожного транспорта.

Так как при заданных объемах перевозок (см. табл. 2) TRANSRAPID оказался для всех проектных трасс эффективней MLX01, то в этой связи TRANSRAPID был выбран для сравнения с железнодорожным транспортом,

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

действующим на указанных направлениях (см. табл. 3).

Сначала было проведено сравнение удельных тарифов железнодорожного транспорта с проектными тарифами TRANSRAPID. Затем тарифы железнодорожного транспорта были сравнены с расчетными тарифами TRANSRAPID, полученными в результате его комплексной оптимизации путем моделирования.

В первом случае применение TRANSRAPID оказалось эффективным только на 2 из 6 трасс, а во втором случае – на 4 из 6 трасс (табл. 10).

Это значит, что в результате комплексной оптимизации TRANSRAPID сфера его эффективного применения расширилась за счет железнодорожного транспорта вдвое.

4. Определение границы между сферами эффективного применения ТРАНСМАГ и железнодорожного транспорта.

Как видно из рис. 2 и 3, плоскость, характеризующая удельный проездной тариф МТС ТРАНСМАГ (1,2 цента США/пас. км), ограничивает сферу ее эффективного применения по величине годовых пассажиропотоков. После комплексной оптимизации ТРАНСМАГ данная граница сместилась с 15–17 до 3–9,5 млн пассажиров в год (см. табл. 6) и тем самым в два с половиной раза расширилась сфера его эффективного применения.

5. Определение сферы эффективного применения ТРАНСПРОГРЕСС в сравнении с традиционными видами транспорта при перевозке сыпучих грузов в условиях промышленных предприятий.

Для определения сферы эффективного применения МТС по сравнению с традиционными транспортными системами при перевозке сыпучих грузов в условиях горно-обогатительных комбинатов и металлургических предприятий Украины был выбран ТРАНСПРОГРЕСС.

В этом случае основным оценочным критерием при определении эффективности применения maglev-систем в сравнении с традиционными видами транспорта является величина удельного перевозочного тарифа, получаемого из расчета окупаемости суммарных приведенных затрат к нормативному сроку окупаемости.

Для проведения комплексной оптимизации ТРАНСПРОГРЕСС под него была адаптирована абстрактная модель обобщенной транспортной системы с учетом методики расчета его технико-экономических показателей [4] и выполнением предварительной оптимизации [11]. Расчет технико-экономических параметров остальных сравниваемых традиционных промышленных транспортных систем выполнялся по методикам [1–2].

Результаты расчетов показали, что из сравниваемых систем сферы эффективного применения разделились между: ТРАНСПРОГРЕСС, канатно-подвесной и пневматической трубопроводной транспортными системами (рис. 15, а). Остальные транспортные системы оказались не конкурентоспособными.

Из дальнейших расчетов были последовательно отключены канатно-подвесная (рис. 15, б), пневматическая трубопроводная (рис. 15, в) и конвейерная транспортные системы. В результате оказалось, что при каждом очередном отключении сфера эффективного применения ТРАНСПРОГРЕСС расширяется, а после отключения конвейерной транспортной системы ТРАНСПРОГРЕСС остается единственным эффективным транспортным средством в сравнении с оставшимися автомобильной и железнодорожной транспортными системами.

При этом во всех случаях применения ТРАНСПРОГРЕСС наиболее оптимальной для состава поездов оказалась конфигурация непрерывного (замкнутого) типа, что технически вполне соответствует условиям перевозок на горно-обогатительных комбинатах и металлургических предприятиях.

Таким образом, на примере комплексной оптимизации ТРАНСПРОГРЕСС была обоснована конкурентоспособность применения МТС в горно-обогатительных комбинатах и металлургических предприятиях при перевозке сыпучих грузов. Также была наглядно представлена возможность определения сфер эффективного применения сравниваемых транспортных систем с учетом возможного их изменения.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования виртуальных трасс MLX01 и TRANSRAPID

Параметр	Единицы измерения	MLX01	TRANS-RAPID
Длина трассы	км	456,5	
Количество станций на трассе	шт.	34	
Среднее расстояние между остановками	км	13,04	
Вид трассы	–	Незамкнутая (линейная) трасса	Замкнутая (кольцевая) трасса ¹
Максимальный продольный уклон трассы	‰	5	
Руководящий уклон трассы	‰	2	
Доля протяженности мостов на трассе ²	%	11	8
Доля протяженности туннелей на трассе	%	5	
Доля протяженности на трассе путевой структуры в виде эстакады без опор, установленной на поверхности земли	%	20	25
Доля протяженности на трассе путевой структуры в виде эстакады на опорах	%	75	70
Годовой пассажиропоток по обоим направлениям	млн пас.	25	
Годовой рост пассажиропотока	%	2	
Годовой грузопоток по обоим направлениям	млн т	1,15	
Годовой рост грузопотока	%	3	
Годовые проценты под кредит на строительство трассы	%	3	
Нормативный срок окупаемости понесенных расходов (срок действия выданного кредита)	годы	30	
Допустимое значение ускорения поезда, min/max	м/с ²	0,2/1	
Нормативное значение равномерного ускорения и замедления поезда	м/с ²	1	

¹ Приблизительные данные.² На мостах путевая структура уложена прямо на пролётные строения.

Исходные проектные данные различных трасс TRANSRAPID

Параметр	Единица измерения	Проект					
		METRO-RAPID	MÜNCHEN	SHANGHAI	SHANGHAI-HANGZHOU Maglev Line	HAMBURG-BERLIN	SIC ¹
Трасса	Конечные остановки	Düsseldorf Hbf– Dortmund Hbf	München Hbf– München Flughafen	Longyang Road Station– Flughafen Pudong	Longyang Road Station – Hangzhou East Station	Hamburg Hbf – Berlin Lehrter Bf	Berlin Papestraße – Budapest
Длина трассы	км	78,9	36,8	30	163	292	884
Количество станций на трассе	шт.	7	2		6	5	10
Среднее расстояние между остановками	км	13,15	36,8	30	32,60	73	98,22
Максимальный продольный уклон трассы	‰	30	80	19	40	100	
Руководящий уклон трассы	‰	4 ¹	7 ¹	5	4 ¹	5 ¹	6
Доля протяженности мостов на трассе ²	%	3 ³	5,8 ⁴	1,24	3 ³	1,7 ⁵	1,2
Доля протяженности туннелей на трассе	%	5,06	20	0	14,72 ⁶	0,62	0,8 ⁷
Доля протяженности на трассе путевой структуры в виде эстакады без опор, установленной на поверхности земли	%	72,46	47	1,24	30 ³	32,77	65,2
Доля протяженности на трассе путевой структуры в виде эстакады на опорах	%	22,48	33	98,76	55,28 ³	66,61	34
Годовой пассажиропоток по обоим направлениям	млн пас.	34,37	7,86	10	33	10,5	6,1
Годовой рост пассажиропотока	%	4,5	3,5	4,3	6,2	3,2	1,6
Нормативный срок окупаемости понесенных расходов (срок действия выданного кредита) ⁸	годы	20		27	31	20	50 ⁹
Годовые проценты под кредит на строительство трассы	%	5 ¹⁰		2,81	5,34	5 ¹⁰	4,37 ¹¹

¹ Приблизительные данные.² На мостах путевая структура уложена прямо на пролетные строения.³ Данные, генерированные логико-аналитическим методом.⁴ Три моста.⁵ Общая длина 4,7 км [11].⁶ 24 км туннель на 32 км участке [7].⁷ Пять туннелей общей длиной 6,3 км [5].

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

⁸ С момента ввода трассы в эксплуатацию.

⁹ За общий расчетный срок в проекте 50 лет (из которых 10 лет приходятся на проектно-строительные работы и 40 лет на фазу эксплуатации) не была обеспечена окупаемость суммарных понесенных расходов, поэтому для достижения данной цели срок эксплуатации трассы был увеличен на 10 лет [5].

¹⁰ Приравнивается к усредненной дисконтной ставке ~ 5 % [10].

¹¹ 3 % – чистый дисконтированный доход + 1,37 % внутренняя прибыль [5].

Таблица 3

Параметры железнодорожных транспортных систем применительно к исследуемым трассам

Параметр	Единица измерения	Проект					
		METRO-RAPID	MÜNCHEN	SHANGHAI	SHANGHAI-HANGZHOU Maglev Line	HAMBURG-BERLIN	SIC
Название железнодорожной транспортной системы	–	ICE: InterCity-Express	S-Bahn: скоростная электричка	U-Bahn: метро	высокоскоростной поезд	ICE: InterCity-Express	ICE: InterCity-Express
Время поездки между конечными остановками	мин	59	40	39 ¹	45	126	316
Удельная величина тарифа перевозки 1 пассажира на 1 км пути (вагон 2-го класса)	цент евро/пас.-км	29	26	6	6	24	16

¹ Приблизительные данные.

Таблица 4

Расчетные параметры MLX01 и TRANSRAPID, полученные при моделировании их виртуальных трасс

Параметр	Единица измерения	MLX01		TRANSRAPID	
		без оптимизации скорости движения	с оптимизацией скорости движения	без оптимизации скорости движения	с оптимизацией скорости движения
Максимальная задаваемая (проектная) скорость поезда	км/ч	550	383	500	259
Максимальная скорость разгона поезда на трассе	км/ч	412		388 ²	259
Крейсерская скорость движения поезда на трассе	км/ч	162,8	161,6		134,6
Время поездки поезда между конечными остановками	мин	133,3	134,5		168,5
Количество вагонов в составе поезда (на 1-й/50-й год эксплуатации трассы)	секция	4/10		2/6	
Максимальная мощность линейного двигателя поезда	МВт	64,78	24,09	30,34	6,61

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Окончание табл. 4

Параметр	Единица измерения	MLX01		TRANRAPID	
		без оптимизации скорости движения	с оптимизацией скорости движения	без оптимизации скорости движения	с оптимизацией скорости движения
Удельные энергозатраты, приходящиеся на перевозку 1 пассажира на 1 км пути, с учетом рекуперации электроэнергии при торможении поезда	Вт·ч/чел.-км	72,5	70,3	53,5	36,2
Удельные общие капитальные вложения, приходящиеся на 1 км пути	млн евро/км	33,78	22,06	26,59	16,43
Суммарные приведенные расходы к моменту их окупаемости (выплаты полученного кредита)	млрд евро	51,27	41,67	36,51	28,32
Усредненные эксплуатационные затраты, приходящиеся на перевозку 1 пассажира на 1 км пути	центы евро/чел.-км	4,79	4,47	3,26	2,88
Удельный тариф на перевозку 1 тонны груза на 1 км пути	центы евро/т·км	81,47	66,21	54,78	42,49
Удельная величина тарифа перевозки 1 пассажира на 1 км пути	центы евро/чел.-км	6,68	5,43	4,93	3,83

Таблица 5

Результаты оптимизации скорости движения поездов на виртуальных трассах MLX01 и TRANRAPID с короткими расстояниями между остановками

Параметр	Единица измерения	MLX01	TRANRAPID
Увеличение времени поездки в один конец трассы после оптимизации скорости движения поезда	мин/%	1,2/0,9	34/25,28
Величина изменения удельных энергозатрат после оптимизации скорости движения поезда	%	– 3,03	– 32,34
Величина изменения общих капитальных вложений после оптимизации скорости движения поезда	%	– 34,7	– 38,21
Величина изменения удельных эксплуатационных затрат после оптимизации скорости движения поезда	%	– 6,68	– 11,66
Величина изменения удельного проездного тарифа после оптимизации скорости движения поезда	%	– 18,71	– 22,31
Экономический эффект после оптимизации скорости движения поезда к моменту самоокупаемости суммарных понесенных расходов (выплаты полученного кредита)	млрд евро	9,6	8,19

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таблица 6

Определение эффективности комплексной оптимизации ТРАНСМАГ по снижению объема перевозок при фиксированном значении проездного тарифа

Параметр	Единица измерения	До оптимизации	После оптимизации
Удельный проездной тариф	центы США/ пас.-км	1,2	
Нормативный срок окупаемости	годы	10	
Диапазон объема перевозок в оба конца в зависимости от длины трассы	млн пас./год	15...17	3...9,5
Среднеарифметическое значение объема перевозок в оба конца	млн пас./год	16	6,25
Коэффициент снижения минимального объема годовых перевозок, для обеспечения окупаемости понесенных расходов к нормативному сроку окупаемости	разы	0	2,56

Таблица 7

Определение эффективности комплексной оптимизации ТРАНСМАГ по снижению значения удельного проездного тарифа при фиксированном значении объема годовых перевозок в оба конца

Параметр	Единица измерения	До оптимизации	После оптимизации
Объем перевозок в оба конца	млн пас./год	16	
Диапазон тарифов при заданном объеме годовых перевозок в зависимости от длины трассы	центы США/ пас.-км	1,1...1,3	0,5...0,8
Среднеарифметическое значение тарифа	центы США/ пас.-км	1,2	0,57
Коэффициент снижения тарифа при заданном объеме годовых перевозок	разы	1	2,11
Доля снижения суммарных приведенных расходов к нормативному сроку окупаемости	%		52,5
Доля капитальных вложений от суммарных приведенных расходов к нормативному сроку окупаемости	%	27,48	47,39
Доля общих эксплуатационных затрат от суммарных приведенных расходов	%	72,52	52,61

Таблица 8

Структура снижения затрат к нормативному сроку в МТС ТРАНСМАГ после комплексной оптимизации

Параметр	Единица измерения	Капитальные вложения	Эксплуатационные затраты
Процент снижения затрат от начальных величин, полученных до оптимизации	%	18,07	65,53
Доля снижения затрат от величины суммарных приведенных расходов, полученной до оптимизации	%	4,96	47,54

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Окончание табл. 8

Параметр	Единица измерения	Капитальные вложения	Эксплуатационные затраты
Доля снижения затрат от общей суммы сэкономленных средств	%	9,5	90,5
Усредненная доля снижения годовых эксплуатационных затрат от величины суммарных приведенных расходов, полученных до оптимизации	%	Отсутствует	4,75
Усредненная доля снижения годовых эксплуатационных затрат от общей суммы сэкономленных средств	%	Отсутствует	9,06

Таблица 9

Граница между сферами эффективного применения TRANSRAPID и MLX01

Параметр	Единица измерения	Проект					
		METRO-RAPID	MÜNCHEN	SHANGHAI	SHANGHAI-HANGZHOU Maglev Line	HAMBURG-BERLIN	SIC ¹
Граничный годовой пассажиропоток в оба направления, при котором более эффективным становится MLX01	млн пас.	Нет	8	11	Нет	Нет	Нет
Удельная величина тарифа перевозки 1 пассажира на 1 км пути (вагон 2-го класса) ¹	TRANS-RAPID	Отсутствует	34,48	11,81	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
	MLX01		29,08	11,44			

¹ Проездные тарифы были рассчитаны с учетом коэффициентов: освоения опыта эксплуатации новой трассы, дисконтирования (приведения разновременных затрат) и получения дополнительной прибыли.

Таблица 10

Граница между сферами эффективного применения TRANSRAPID и железнодорожного транспорта по величине проездного тарифа

Параметр	Единица измерения	Проект					
		METRO-RAPID	MÜNCHEN	SHANGHAI	SHANGHAI-HANGZHOU Maglev Line	HAMBURG-BERLIN	SIC ¹
При сравнении с проектными данными	Транспортная система	TRANS-RAPID	S-Bahn (скоростная электричка)	U-Bahn (метро)	Высокоскоростной железнодорожный поезд	TRANS-RAPID	ICE (Inter-City-Express)
При сравнении с результатами моделирования					TRANS-RAPID		TRANS-RAPID

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

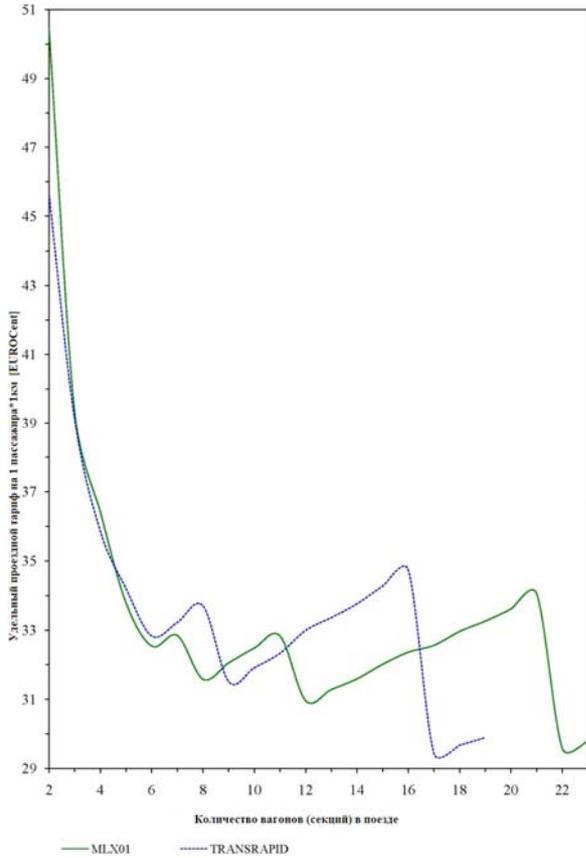


Рис. 1. Зависимость удельного проездного тарифа от конфигурации поезда

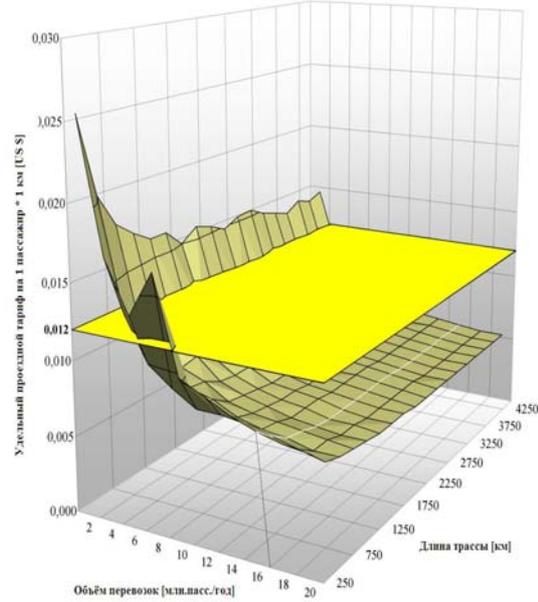


Рис. 2. Зависимость значения удельного проездного тарифа ТРАНСМАГ от объема перевозок и длины трассы после ее комплексной оптимизации [11]

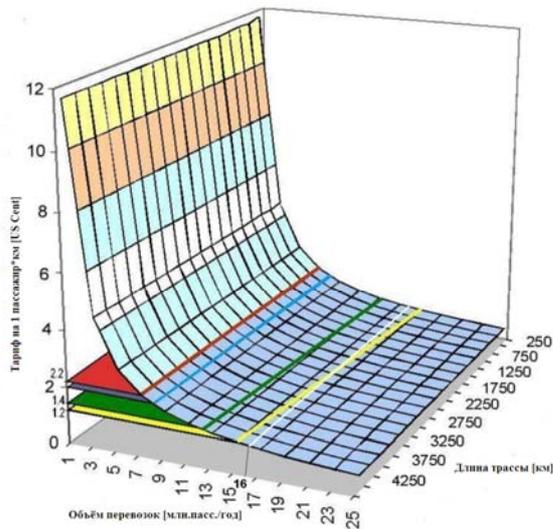


Рис. 3. Зависимость значения удельного проездного тарифа ТРАНСМАГ от объема перевозок и длины трассы до ее комплексной оптимизации [12]

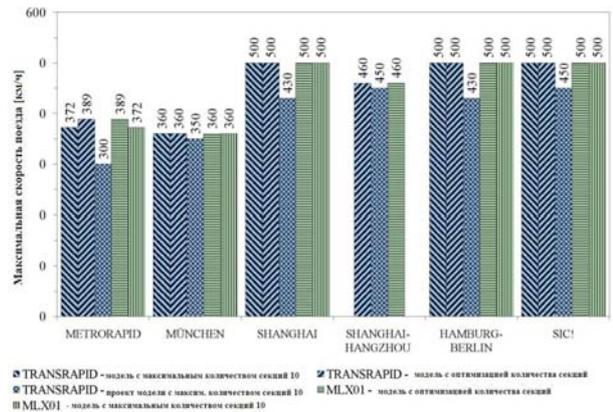


Рис. 4. Максимальная скорость разгона поезда на трассе

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

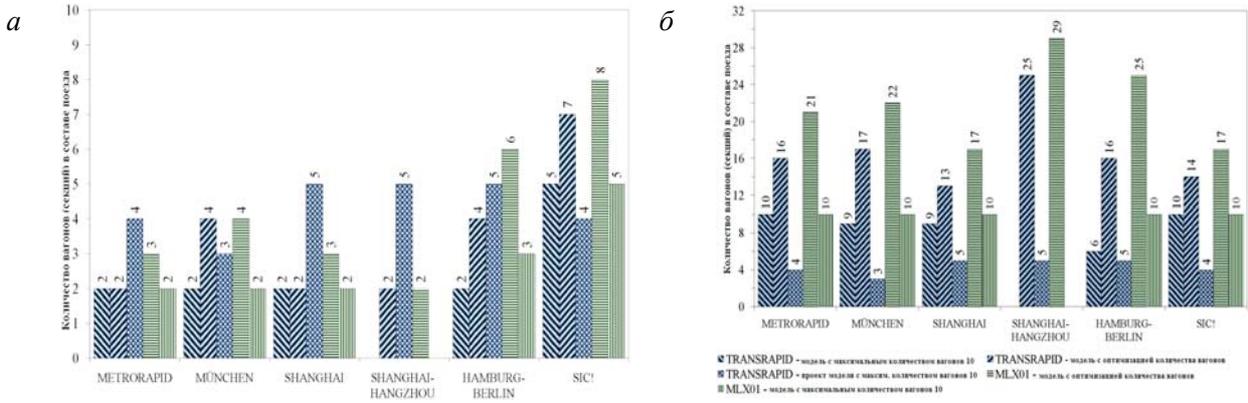


Рис. 5. Количество вагонов в составе поезда:
а – на первый год эксплуатации трассы; б – на 50-й год эксплуатации трассы

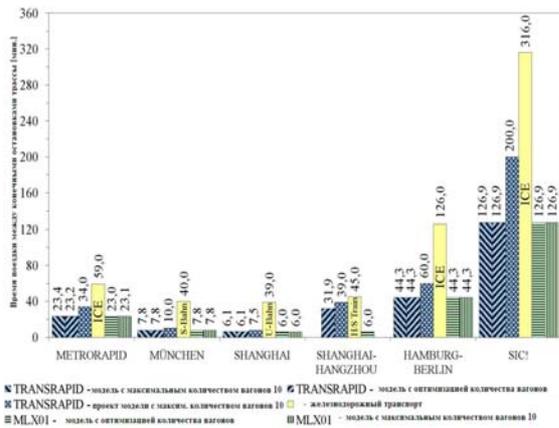


Рис. 6. Время поездки между конечными остановками трассы

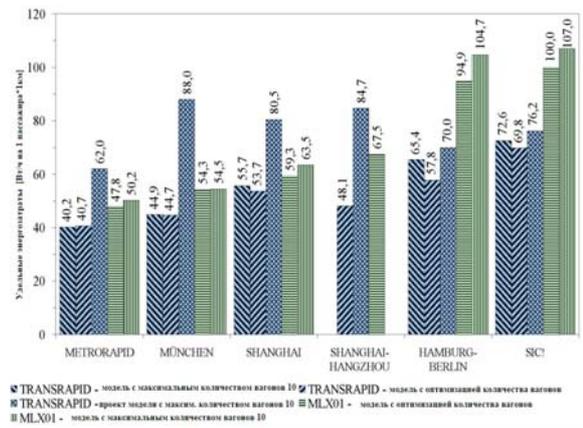


Рис. 7. Удельные энергозатраты на перевозку 1 пассажира на 1 км пути с учетом рекуперации электроэнергии при торможении поезда

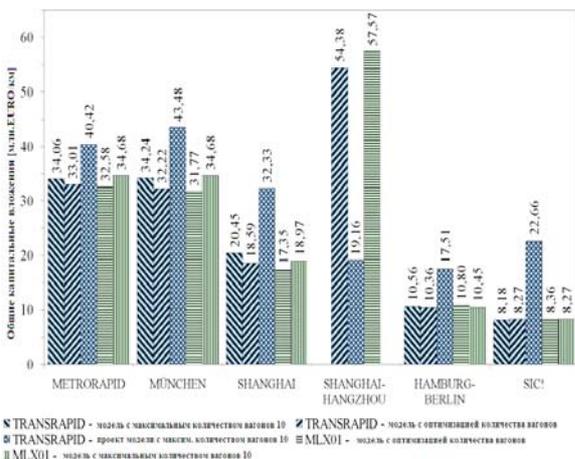


Рис. 8. Средние капитальные вложения, приходящиеся на 1 км пути

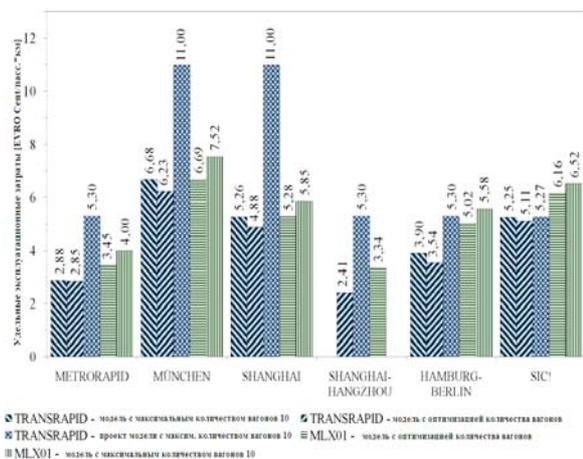


Рис. 9. Средние удельные эксплуатационные затраты, приходящиеся на перевозку 1 пассажира на 1 км пути

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

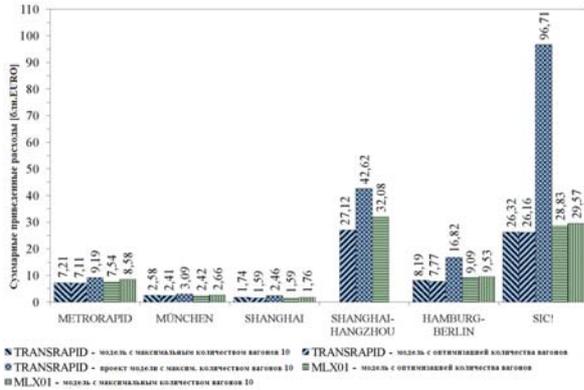


Рис. 10. Суммарные приведенные расходы трассы к моменту их окупаемости (выплаты полученного кредита)

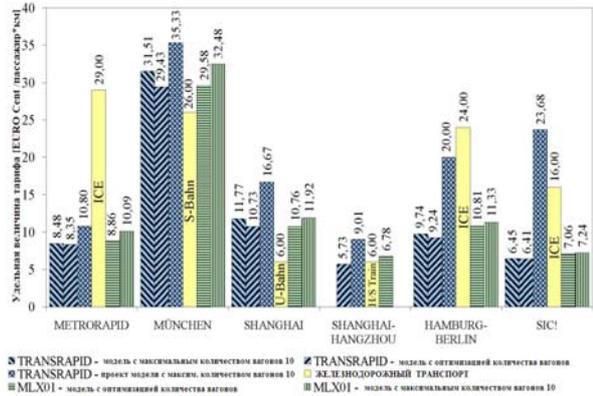


Рис. 11. Средняя удельная величина тарифа перевозки 1 пассажира на 1 км пути (вагон 2-го класса)

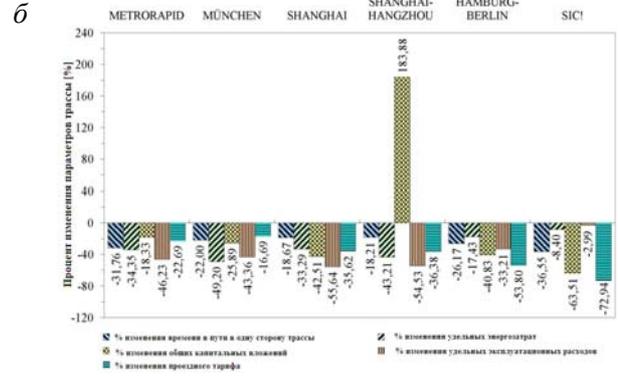
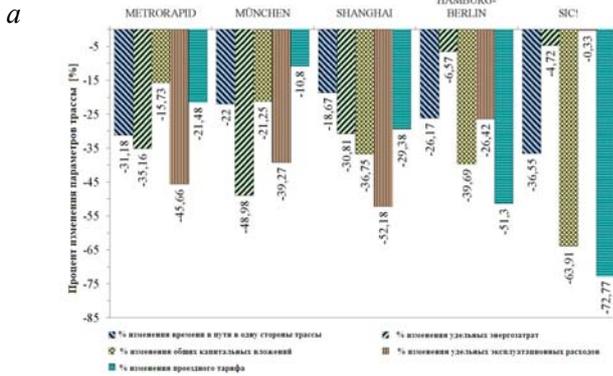


Рис. 12. Процент изменения параметров трасс вследствие комплексной оптимизации TRANSRAPID, полученный путем сравнения результатов моделирования с проектными данными: а – при базовой конфигурация поезда; б – при неограниченной конфигурации поезда

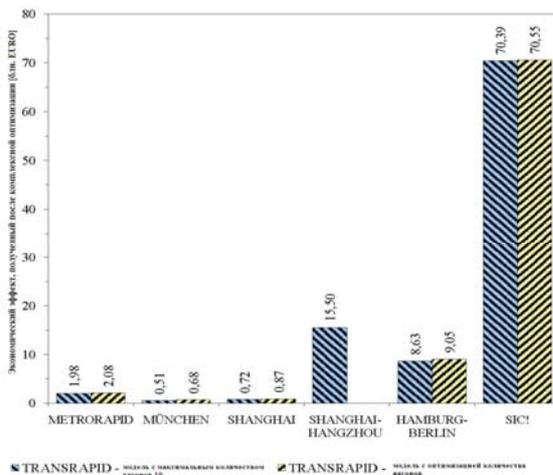


Рис. 13. Экономический эффект к моменту самоокупаемости суммарных понесенных расходов (выплаты полученного кредита), полученный при комплексной оптимизации TRANSRAPID

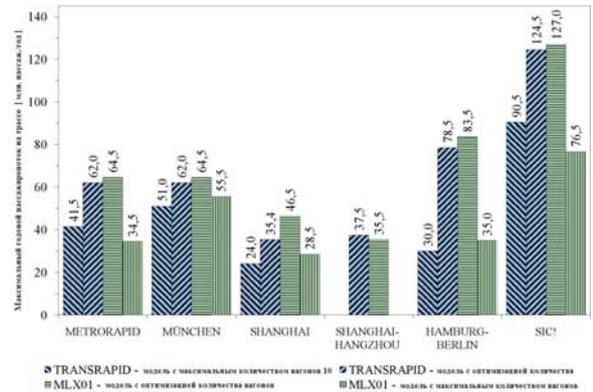


Рис. 14. Максимальный годовой пассажиропоток на трассе, предусмотренный проектной конфигурацией транспортной системы

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

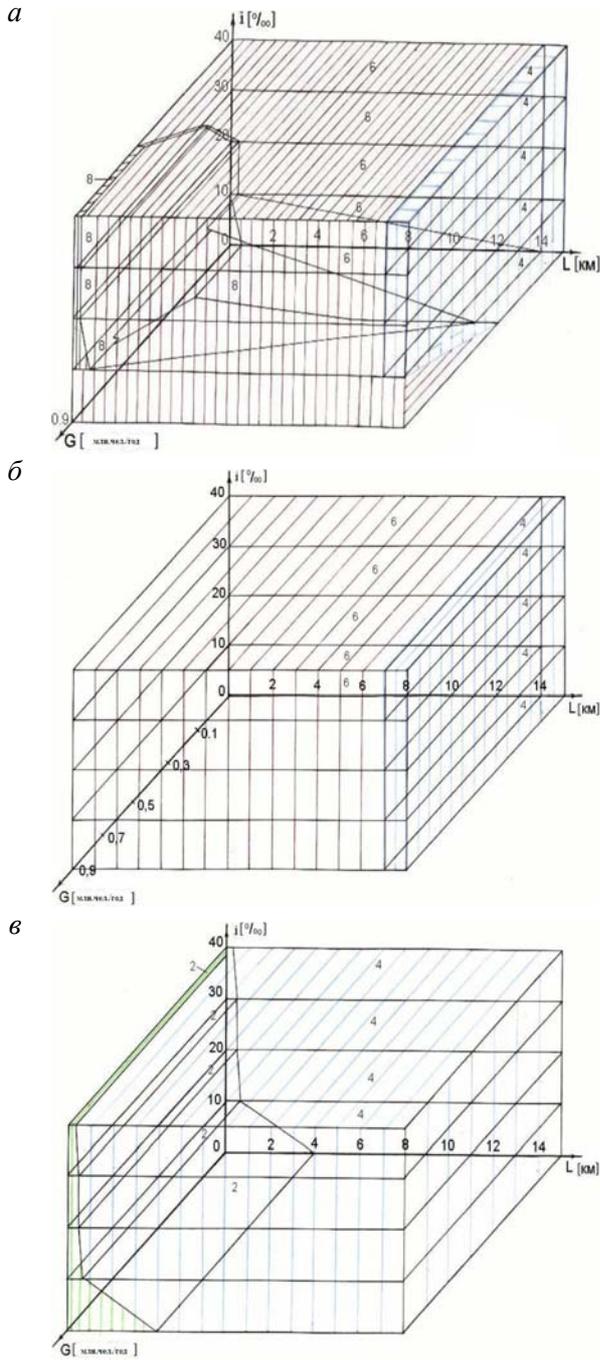


Рис. 15. Области эффективного применения TRANSPROGRESS в сравнении с канатно-подвесной и пневматической трубопроводной (а), пневматической трубопроводной (б) и конвейерной (в) транспортными системами: ▨ – конвейерная транспортная система (2); ▨ – TRANSPROGRESS (4); ▨ – пневматическая трубопроводная транспортная система (6); ▨ – канатно-подвесная транспортная система (8); G – годовой грузопоток на трассе; L – длина трассы; I – руководящий уклон трассы

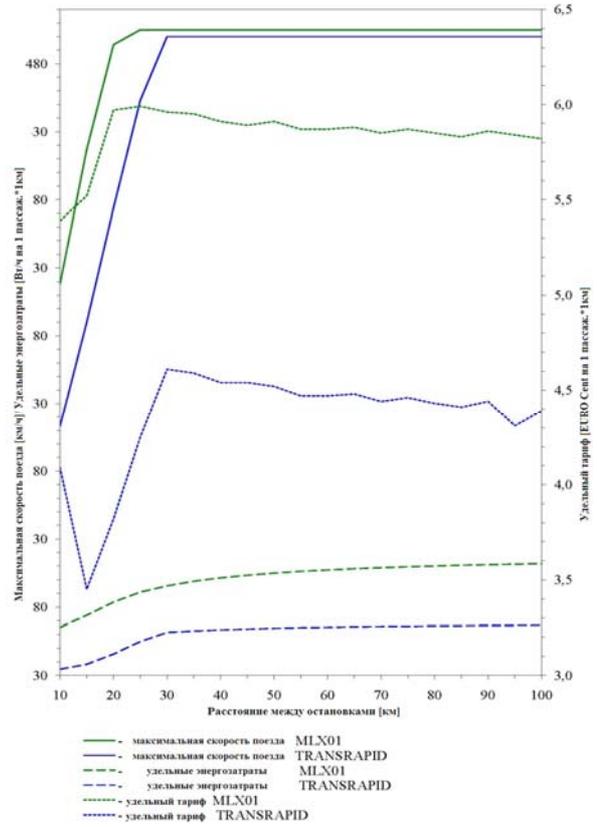


Рис. 16. Зависимость удельных энергозатрат и удельного проездного тарифа от расстояния между остановками

Научная новизна и практическая значимость

Изложенные основы комплексной оптимизации транспорта являются новой системой универсальных научных методов и подходов, обеспечивающей высокую точность и достоверность расчетов при моделировании транспортных систем и транспортных сетей с учетом динамики их развития. Сформулированные на основе системного анализа способы описания сложных транспортных систем и методы их структурированного моделирования позволяют существенно сократить время на выработку и повысить качество принимаемых в проблемных областях решений.

Представленные основы теории комплексной оптимизации транспорта формируют новый научный взгляд на проблему разработки, проектирования и развития транспортных систем и инфраструктур как в локальном, так и глобальном масштабе, что в свою очередь выведет указанные направления исследований на качественно новый уровень.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Разработка теоретических и технологических основ проведения комплексной оптимизации транспорта позволяет создать научный инструмент, обеспечивающий выполнение автоматизированного моделирования и расчета технико-экономической структуры и технологии работы различных объектов транспорта, включая его инфраструктуру. Предложенные методы и подходы могут быть использованы при решении многих практических и теоретических задач, связанных с транспортом, а также при проведении микро- и макроэкономических исследований. Использование всех перечисленных возможностей позволит создать наиболее благоприятную среду для эффективного применения и развития транспорта в целом, а следовательно всего народного хозяйства и общественных отношений.

Выводы

На примере МТС в данной работе была доказана состоятельность предлагаемой комплексной оптимизации транспортных систем, что позволит существенно повысить эффективность различных транспортных систем и тем самым расширить сферы их эффективного применения.

Она может быть использована не только для МТС, но и для других транспортных систем.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гельман, А. С. Справочник проектировщика промышленных дорог. Т. 1: Промышленный транспорт / А. С. Гельман. – М.: Стройиздат, 1972. – 232 с.
2. Размеры удельных капиталовложений, эксплуатационных затрат и металлоемкости по различным видам транспорта. Методические указания. – М.: Транспорт, 1984. – 206 с.
3. Уманов, М. И. Определение оптимальной грузоподъемности экипажа транспортной системы с использованием магнитной подвески на постоянных магнитах / М. И. Уманов, Е. М. Фришман, А. Н. Лашер // Трансп.: наука, техника, упр. – 1991. – № 8. – С. 18–21.
4. Фришман, Е. М. Экономичны ли транспортные системы с подвесом грузовых тележек на постоянных магнитах? / М. И. Уманов, Е. М. Фришман, А. Н. Лашер // Подъемно-транспортная техника и склады. – 1991. – № 1, Н. 217. – С. 41–42.
5. Complex optimization of parameters of Maglev systems is a basic condition of their implementation / A. Lascher, M. Umanov, E. Frishman, H. Prishedko // Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers : 19th Intern. Conf. (September 13–15, 2006). – Dresden, 2006. – P. 721–725.
6. Endbericht SIC! - Modul Vergleichende Untersuchung von Hochgeschwindigkeits-systemen im Verkehrskorridor Berlin - Sachsen - Praha - Wien - Bratislava – Budapest [Electronic resource]. – 2007. – 282 p. – Mode of access: http://www.landesentwicklung.sachsen.de/download/Landesentwicklung/Endbericht_SIC-Modul.pdf/. – Title from the screen.
7. Heckl, F. X. Infoblatt TRANSRAPID in Shanghai / F. X. Heckl. – Leipzig : Klett, 2010. – 193 p.
8. Heilmeyer, E. Magnetschwebbahnsysteme für hohe Geschwindigkeiten in Deutschland und Japan, Vergleich der Entwicklungsverläufe und der technischen und ökonomischen Merkmale / E. Heilmeyer, D. Rogg // Elektrische Bahnsysteme : 2th Intern. Conf. (March 23–24, 1999). – Berlin, 1999. – P. 331–339.
9. Obermeyer / Krebs and Kiefer & Spiekermann / Vössing. Machbarkeitsstudie für Magnetschnellbahnstrecken in Bayern und Nordrhein-Westfalen. Planungsgemeinschaft “Metrorapid-TRANSRAPID”. Teil II - Teilprojekt Bayern, Erläuterungsbericht und Teil III - Teilprojekt Nordrhein-Westfalen, Erläuterungsbericht. Berlin, 2002. – 480 p.
10. Prykhodko, O. A. On the calculation of aerodynamic characteristics of high-speed ground vehicles on the base of three-dimensional Navier-Stokes equations / O. A. Prykhodko, O. B. Polevoy, A. V. Menddriy // Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers : 18th Intern. Conf. (October 26–28, 2004). – Shanghai, 2004. – P. 575–583.
11. Stephan, A. Optimization of lengths of maglev trains / A. Stephan, A. Lascher, M. Umanov // Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers : 20th Intern. Conf. (15–18 December, 2008). – San Diego, 2008.
12. Umanov, M. Ways of increase of efficiency of Maglev-transport with the purpose of acceleration of its introduction / M. Umanov, A. Lascher, A. Taturjevich // Magnetically Levitated Systems and Linear Drives : 17th Intern. Conf. (September 3–5, 2002). – Lausanne, 2002.
13. Zu Ressourcenproduktivität von spurgeführten Hochgeschwindigkeitsverkehrssystemen: Ein Vergleich von ICE und TRANSRAPID / V. Gers, H. Hübner, P. Otto, H. Stiller. – Wuppertal : Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH, 1997. – 19 p.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

А. ЛАШЕР¹, М. УМАНОВ^{2*}, Є. ФРІШМАН³, Е. ПРИШЕДЬКО⁴¹Дрезденський технічний університет, вул. Момсен, 13, Дрезден, Німеччина, D-01062, ел. пошта a.lasher@gmx.de^{2*}Каф. «Колія і колійне господарство», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, ел. пошта m.umanov@mail.ru³Каф. «Електроніка», Єрусалимський технологічний коледж, вул. Хаваад Халеумі, 21, Єрусалим, Ізраїль, 91160, ел. пошта f688349@netvision.net.il⁴Інститут транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг», вул. Писаржевського, 5, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005, ел. пошта kheltanya@gmail.com

МЕТОДИ КОМПЛЕКСНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МАГНІТОЛЕВІТУЮЧИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Мета. Зараз магнітолевітуючі транспортні системи (МТС) для високошвидкісного наземного транспорту (ВСНТ) практично не застосовуються у зв'язку з необхідністю великих капіталовкладень і збільшення експлуатаційних витрат. Мета статті – впровадження комплексної оптимізації параметрів МТС для зменшення капіталовкладень і експлуатаційних витрат, що дозволить розпочати практичне їх застосування. У цій роботі обґрунтовується доцільність використання теорії комплексної оптимізації транспорту (ТКОТ), запропонованої одним з авторів, для зниження витрат у МТС. **Методика.** Згідно з ТКОТ була розроблена абстрактна модель узагальненої транспортної системи (АМОТС), яка математично визначає максимальну рівновагу між усіма компонентами системи й тим самим забезпечує граничну адаптацію будь-якої транспортної системи до умов її застосування. Для визначення сфер ефективного застосування МТС відповідно до ТКОТ була розроблена динамічна модель розподілу та розвитку сфер ефективного застосування транспортних систем (ДМРРСЕЗТС), де для кожної окремо взятої траси вибирається найбільш ефективна транспортна система. Основним оцінним критерієм під час визначення ефективності застосування МТС є величина питомого перевізного тарифу, отримана з розрахунку окупності сумарних приведених витрат до нормативного терміну окупності або терміну надання кредиту. **Результати.** Виконані багатоваріантні розрахунки чотирьох типів МТС: TRANSRAPID, MIX01, ТРАНСМАГ і ТРАНСПРОГРЕС показали ефективність комплексної оптимізації параметрів таких систем. Це дозволило розширити сфери ефективного застосування МТС приблизно у 2 рази. Результати досліджень доповідалися на багатьох міжнародних конференціях у Німеччині, Швейцарії, США, Китаї, Україні та ін. На прикладі МТС у цій роботі було доведено обґрунтованість запропонованої комплексної оптимізації параметрів транспортних систем, яка може бути використана й для інших транспортних систем. **Наукова новизна.** Викладені основи комплексної оптимізації транспорту є новою системою універсальних наукових методів і підходів, яка забезпечує високу точність і достовірність розрахунків під час моделювання транспортних систем і транспортних мереж з урахуванням динаміки їх розвитку. **Практична значимість.** Розробка теоретичних і технологічних засад виконання комплексної оптимізації транспорту дозволяє створити науковий інструмент, який забезпечує виконання автоматизованого моделювання та розрахунку техніко-економічної структури й технології роботи різних об'єктів транспорту, включаючи його інфраструктуру.

Ключові слова: МТС; TRANSRAPID; MIX01; ТРАНСМАГ; ТРАНСПРОГРЕС; ТКОТ; АМОТС; ДМРРСЕПТС; електромагнітний підвіс; електродинамічний підвіс; підвіс на постійних магнітах

A. LASHER¹, M. UMANOV^{2*}, Ye. FRISHMAN³, Ye. PRISHEDKO⁴¹Technical University of Dresden, Professorship Electric Railways Systems, Mommsen St., 13, Dresden, Germany, D-01062, e-mail a.lasher@gmx.de^{2*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipropetrovsk National University of Railways Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, e-mail m.umanov@mail.ru³Dep. «Electronics», The Jerusalem College of Technology, Havaad Haleumi St., 21, Jerusalem, Israel, 91160, e-mail f688349@netvision.net.il⁴«Transmag» Institute of Transport Systems and Technologies, Pisarzhevskiy St., 5, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49005, e-mail kheltanya@gmail.com

METHODS OF INTEGRATED OPTIMIZATION MAGLEV TRANSPORT SYSTEMS

Purpose. To demonstrate feasibility of the proposed integrated optimization of various MTS parameters to reduce capital investments as well as decrease any operational and maintenance expense. This will make use of MTS reasonable. At present, the Maglev Transport Systems (MTS) for High-Speed Ground Transportation (HSGT) almost do not apply. Significant capital investments, high operational and maintenance costs are the main reasons why Maglev Transport Systems (MTS) are hardly currently used for the High-Speed Ground Transportation (HSGT). Therefore, this article justifies use of Theory of Complex Optimization of Transport (TCOT), developed by one of the co-authors, to reduce MTS costs. **Methodology.** According to TCOT, authors developed an abstract model of the generalized transport system (AMSTG). This model mathematically determines the optimal balance between all components of the system and thus provides the ultimate adaptation of any transport systems to the conditions of its application. To identify areas for effective use of MTS, by TCOT, the authors developed a dynamic model of distribution and expansion of spheres of effective use of transport systems (DMRRSEPTS). Based on this model, the most efficient transport system was selected for each individual track. The main estimated criterion at determination of efficiency of application of MTS is the size of the specific transportation tariff received from calculation of payback of total given expenses to a standard payback period or term of granting the credit. **Findings.** The completed multiple calculations of four types of MTS: TRANSRAPID, MLX01, TRANSMAG and TRANSPROGRESS demonstrated efficiency of the integrated optimization of the parameters of such systems. This research made possible expanding the scope of effective usage of MTS in about 2 times. The achieved results were presented at many international conferences in Germany, Switzerland, United States, China, Ukraine, etc. Using MTS as an example, this research proved the sustainability of the proposed integrated optimization parameters of transport systems. This approach could be applied not only for MTS, but also for other transport systems. **Originality.** The bases of the complex optimization of transport presented are the new system of universal scientific methods and approaches that ensure high accuracy and authenticity of calculations with the simulation of transport systems and transport networks taking into account the dynamics of their development. **Practical value.** The development of the theoretical and technological bases of conducting the complex optimization of transport makes it possible to create the scientific tool, which ensures the fulfillment of the automated simulation and calculating of technical and economic structure and technology of the work of different objects of transport, including its infrastructure.

Keywords: MTS; TRANSRAPID; MLX01; TRANSMAG; TRANSPROGRESS; electromagnetic suspension; electrodynamic suspension; permanent magnet suspension

REFERENCES

1. Gelman A.S. *Spravochnik proyektirovshchika promyshlennykh dorog. T. I: Promyshlennyy transport* [Handbook of industrial roads designer. Volume I: Industrial Transport]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972. 232 p.
2. *Razmery udelnykh kapitalovlozheniy, ekspluatatsionnykh zatrat i metalloyemkosti po razlichnym vidam transporta. Metodicheskiye ukazaniya* [Dimensions of specific capital investments, operating costs and steel intensity for various types of transport. Methodical instructions]. Moscow, Transport Publ., 1984. 206 p.
3. Umanov M.I., Frishman Ye.M., Lasher A.N. *Opredeleniye optimalnoy gruzopodyemnosti ekipazha transportnoy sistemy s ispolzovaniyem magnitnoy podveski na postoyannykh magnitakh* [Determining the optimal load crew of transportation system using magnetic suspension permanent magnets]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transport: science, technology, management*, 1991, no. 8, pp.18-21.

РУХОМИЙ СКЛАД ЗАЛІЗНИЦЬ І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Frishman Ye.M., Umanov M.I., Lasher A.N. Ekonomichny li transportnyye sistemy s podvesom gruzovykh telezhek na postoyannykh magnitakh? [Whether transport systems with suspension of trolleys on permanent magnets are economical?]. *Podyemno-transportnaya tekhnika i sklady – Materials-handling equipment and storage structures*, 1991, no. 1, H. 217, pp. 41-42.
5. Lascher A., Umanov M., Frishman E., Prishedko H. Complex optimization of parameters of Maglev systems is a basic condition of their implementation. 19th Int. Conf. "Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers". Dresden, 2006, pp. 721-725.
6. Endbericht SIC! - Modul Vergleichende Untersuchung von Hochgeschwindigkeits-systemen im Verkehrskorridor Berlin - Sachsen - Praha - Wien - Bratislava – Budapest, 2007. 282 p. Available at: http://www.landesentwicklung.sachsen.de/download/Landesentwicklung/Endbericht_SIC-Modul.pdf/. (Accessed 01 September 2013).
7. Heckl F.X. Infoblatt TRANSRAPID in Shanghai. Leipzig, Klett Publ., 2010. 193 p.
8. Heilmeyer E., Rogg D. Magnetschwebbahnsysteme für hohe Geschwindigkeiten in Deutschland und Japan, Vergleich der Entwicklungsverläufe und der technischen und ökonomischen Merkmale. 2th Int. Conf. "Elektrische Bahnsysteme". Berlin, 1999, pp. 331-339.
9. Obermeyer / Krebs and Kiefer & Spiekermann / Vössing. Machbarkeitsstudie für Magnetschnellbahnstrecken in Bayern und Nordrhein-Westfalen. Planungsgemeinschaft "Metrorapid-TRANSRAPID". Teil II - Teilprojekt Bayern, Erläuterungsbericht und Teil III - Teilprojekt Nordrhein-Westfalen, Erläuterungsbericht. Berlin Publ., 2002. 480 p.
10. Prykhodko O.A., Polevoy O.B., Menddriy A.V. On the calculation of aerodynamic characteristics of high-speed ground vehicles on the base of three-dimensional navier-stokes equations. 18th Int. Conf. "Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers". Shanghai, 2004, pp. 575-583.
11. Stephan A., Lascher A., Umanov M. Optimization of lengths of maglev trains. 20th Int. Conf. "Magnetically Levitated Systems and Linear Drivers". San Diego, 2008.
12. Umanov M., Lascher A., Taturjevich A. Ways of increase of efficiency of Maglev-transport with the purpose of acceleration of its introduction. 17th Int. Conf. "Magnetically Levitated Systems und Linear Drives". Lausanne, 2002.
13. 13 Gers V., Hübner H., Otto P., Stiller H. Zu Ressourcenproduktivität von spurgeführten Hochgeschwindigkeitsverkehrssystemen: Ein Vergleich von ICE und TRANSRAPID. Wuppertal, Umwelt und Energie GmbH Publ., 1997. 19 p.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Мямлиным (Украина); д.т.н., проф. Л. А. Манашкиным (США)

Поступила в редколлегию 21.01.2013

Принята к печати 12.09.2013