

УДК 51-7: 656.2

Т. А. ВЛАСЮК

Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ)
vlasiuk.ta@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ БИФУРКАЦИОННОГО АНАЛИЗА ПАССАЖИРОПОТОКОВ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТРАНСПОРТА В АГЛОМЕРАЦИИ

Рассматриваются особенности использования бифуркационного анализа применительно к анализу пассажиропотоков в узлах взаимодействия крупных городов. Учитываются возможные влияния целого ряда факторов различной природы. С возникновением бифуркации обращается внимание на непредсказуемость транспортных процессов.

Основы теории бифуркации заложены А. Пуанкаре и А. Ляпуновым и в середине XX в. развиты А. Андроновым [13]. Анализ результатов исследований различных ученых показывает, что бифуркация может быть рассмотрена как процесс, при котором устойчивое состояние объекта в какой-то момент времени становится неустойчивым, вследствие чего развитие процессов может продолжаться не по данной расчетной траектории, а по некоторым новым, которые определяются ветвлением решений нелинейных дифференциальных уравнений [1–3].

Механизм трансформации данного процесса применительно к анализу пассажиропотока основан на миграции населения и связан с разветвлением транспортных процессов обслуживания различными видами транспорта, определяемым наличием конкуренции аттракторов, включающих различную стоимость поездки пассажира, ее продолжительности и др. (рисунок 1).

Функция выбора пассажиром вида транспорта от указанных параметров может быть представлена как $f(C, T)$, где C – стоимость, T – продолжительность поездки. Введем эмпирические коэффициенты α и β , при этом $f(\alpha)$ и $f(\beta)$ – соответственно количество пассажиров, выбирающих проезд на железнодорожном и автомобильном видах транспорта.

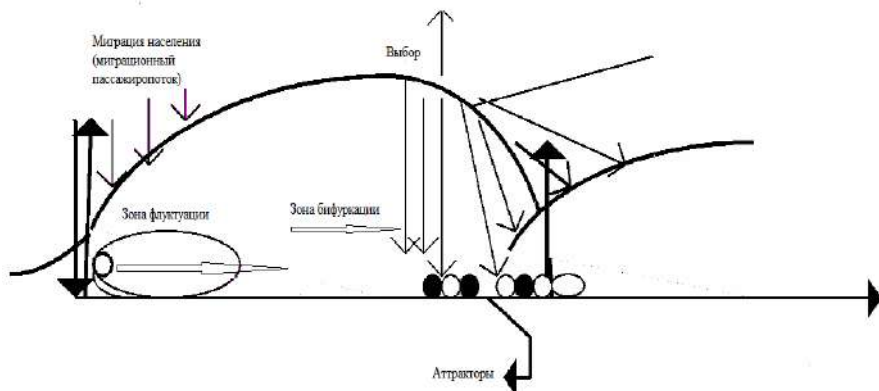


Рисунок 1 – Механизм бифуркации с учетом миграции населения

Исходя из предлагаемых эмпирических коэффициентов могут быть рассмотрены различные виды зависимости параметров выбора (таблица 1).

Т а б л и ц а 1 – Краткая характеристика видов зависимости

Вид зависимости	Параметрическая модель
Линейная	$F(C, t) = \alpha C + \beta T$
Логарифмическая	$F(C, t) = \alpha \ln C + \beta \ln T$
Тригонометрическая	$F(C, t) = \alpha \sin C + \beta \cos T$
	$F(C, t) = \alpha \cos C + \beta \sin T$
	$F(C, t) = \alpha \sin C + \beta \cos T$
	$F(C, t) = \alpha \sin C + \beta \sin T$

Рассмотрим важные для бифуркации предпочтения пассажира относительно выбора автомобильного или железнодорожного транспорта в зависимости от различной стоимости поездки и ее продолжительности (таблица 2).

При выборе вида транспорта возможны различные варианты в интервале времени от данной бифуркации до следующей, когда пассажиропоток возвращается в исходное или близкое к нему состояние. Только на этом этапе возможно достаточно точное прогнозирование направления дальнейшего выбора вида транспорта. Особо следует выделить путь развития, при котором бифуркация под действием какого-либо даже незначительного события «скачком» переводит пассажиропоток в совершенно новое, заранее непредсказуемое, качественное состояние, часто характеризующееся как катастрофическое (например, использование пассажирами новых видов транспорта). В точке бифуркации, в качестве которой может выступать центр зарождения или погашения пассажиропотока, например, вокзал (железнодорожный, речной, пункт пересадки и т. п.), появляется новый путь развития, именуемый как «аттрактор», отличающийся от других относительной устойчивостью.

Т а б л и ц а 2 – Краткая характеристика бифуркационного процесса с учетом выбора пассажиром вида транспорта

Форма представления бифуркационного пассажиропотока		Вариант предпочтений пассажира
формализованная	параметрическая	
$\Pi \rightarrow \begin{cases} A(C, T) \\ Ж(C, T) \end{cases}$ <p>где Π – пассажиропоток</p>	<p>Автомобильный транспорт</p> $A(C, T) \rightarrow \begin{cases} T > T_d \\ C > C_d \\ T < T_d \\ C > C_d \end{cases}$ <p>где C_d, T_d – приемлемые для пассажира стоимость и продолжительность поездки ($T_d = 1$)</p>	<p>Значительная продолжительность поездки и ее высокая стоимость или высокая стоимость при непродолжительной поездке</p>
	<p>Железнодорожный транспорт</p> $Ж(C, T) \rightarrow \begin{cases} T > T_d \\ C > C_d \\ T < T_d \\ C > C_d \end{cases}$ <p>где $C_d = (0, C), T_d = (0, T)$</p>	<p>Продолжительная поездка и ее высокая стоимость или недорогая стоимость при непродолжительной поездке</p>
	<p>Автомобильный транспорт</p> $A(C, T) \rightarrow \begin{cases} T > T_d \\ C > C_d \\ T < T_d \\ C < C_d \end{cases}$	<p>Непродолжительная поездка при низкой стоимости</p>
	<p>Железнодорожный транспорт</p> $Ж(C, T) \rightarrow \begin{cases} T > T_d \\ C > C_d \\ T < T_d \\ C > C_d \end{cases}$	<p>Высокая стоимость скоростной поездки и значительная продолжительность при высокой ее стоимости</p>

Если рассматривать пример, приведенный в таблице 2 с учетом скорости доставки пассажиров, то возможны другие варианты, представленные в таблице 3.

Например, если выбор пассажира приходится на вид транспорта, соответствующий его требованиям относительно скорости и продолжительности поездки, то можно сказать, что он находится в области аттрактора и далее будет наблюдаться эффект притяжения к нему.

Таким образом, в данном случае аттрактор – это относительно устойчивое состояние пассажиропотока, являющееся основой для развития множества направлений, возможных после точки бифуркации [1–3, 9, 12].

Т а б л и ц а 3 – Краткая характеристика бифуркационного процесса выбора пассажира в зависимости от скорости передвижения транспорта

Формализованный бифуркационный пассажиропоток	Условия	Краткая характеристика
$\Pi \rightarrow \begin{cases} \text{А} \rightarrow \begin{cases} v > v_d \\ v < v_d \\ s > s_d \end{cases} \\ \text{Ж} \rightarrow \begin{cases} v > v_d \\ v < v_d \\ s < s_d \end{cases} \end{cases}$	$0 < v < v_d$, где v_d – предельно допустимая скорость поездки; s_d – предельно допустимая стоимость поездки	Скорость и стоимость поездки высокие
		Скорость поездки выше при низкой стоимости

Возвращение пассажиропотока в область устойчивого состояния происходит в результате сочетания управляющих параметров (преднамеренных и необходимых, например, достаточного количества свободных мест в региональных поездах) и случайных событий, таких как рост миграции населения, что приводит к усложнению структуры пассажиропотока, увеличению его объема (появлению новых свойств). Поэтому для ситуации, при которой требуется повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта, аттракторами могут выступать различные типы структур, имеющих симметричную, правильную форму (расписание движения поездов, тип подвижного состава и др.). При этом необходимо учитывать, что аттракторы в традиционном понимании обладают способностью возвращаться в первоначальное состояние через некоторое время, что определяется как их асимптотическая устойчивость (рисунок 2) [5, 6].

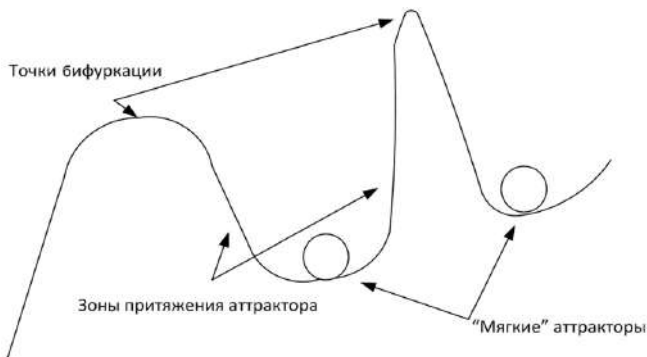


Рисунок 2 – Траектории развития аттракторов

Определим стационарные точки (аттракторы) через систему уравнений, которые являются алгебраическими решениями:

$$\begin{cases} r_1, \mathcal{J} \left(1 - \frac{\mathcal{J}}{n_1} \right) = 0 \\ r_2, A \left(1 - \frac{A}{n_2 + a_{21}\mathcal{J}} \right), \end{cases} \quad (1)$$

Аттракторы в данном примере являются стационарными точками равновесия и могут быть определены из условия

$$\frac{d\mathcal{J}}{dt} = \frac{dA}{dt} = 0. \quad (2)$$

Тогда система уравнений (1) имеет четыре пары корней:

$$\begin{aligned} \mathcal{J}^{(1)} = 0, \quad A^{(1)} = 0, \quad \mathcal{J}^{(2)} = 0, \quad A^{(2)} = n_2, \quad \mathcal{J}^{(3)} = n_1, \quad A^{(3)} = 0, \\ \mathcal{J}^{(4)} = n_1, \quad A^{(4)} = n_2 + a_{21}n_1. \end{aligned} \quad (3)$$

Если аттракторы устойчивы, то характеристики \mathcal{J} и A будут стремиться к ним, и наоборот, если не устойчивы – удаляться от них.

Таким образом, изучение бифуркационных нелинейных явлений имеет большое прикладное значение, так как позволяет изучать кризисные события в моделируемых системах. Важным свойством нелинейных систем является то, что в простых и в сложных системах возникают бифуркации одного и того же типа. Это дает возможность свести задачи исследования бифуркаций исходной системы к изучению более простой (модельной) системы. Из сказанного следует, что выбор конкретного пути развития в точке бифуркации может осуществиться под влиянием малого управляющего воздействия либо может быть вообще случайным. Следовательно, чтобы начался процесс формирования новой сложной структуры, отдача энтропии (внутренней энергии) должна превысить некоторое критическое значение, что приведет систему в неравновесное состояние, содержащее в себе неопределенность, вероятность и случайность (рисунок 3) [3].

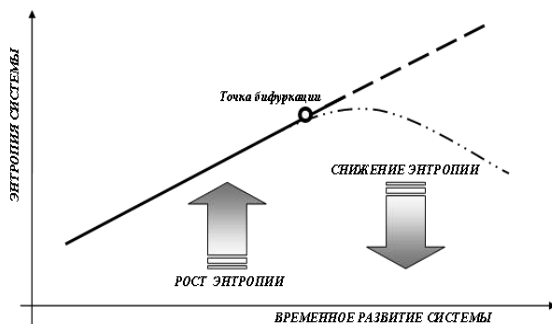


Рисунок 3 – Схема бифуркации с учетом энтропии

Энтропия системы определена В. И. Швецовым как состояние с наибольшим статистическим весом, доставляющее максимум некоторой функции в пространстве состояний. Тогда применительно к бифуркации пассажиропотока его энтропия может быть определена как

$$\Pi^B(f) = \sum_{ij} f_{ij} \ln \left(\frac{f_{ij}}{v_{ij}} \right), \quad f = \{f_{ij} | i, j \in R\}, \quad (4)$$

где f_{ij} – количество аттракторов, находящихся в состояниях (i, j) ; v_{ij} – приоритетные, наиболее вероятные значения f_{ij} .

Случайное событие вызывает неустойчивость, которая служит толчком для возникновения новых конфигураций. Так, при изменении управляющих параметров в пассажиропотоке могут наблюдаться разнообразные переходные явления. Вблизи точки равновесия стационарное состояние асимптотически устойчиво, поэтому в силу непрерывности эта динамика простирается до критической области. При достижении критического значения процесс может стать неустойчивым, так что любое, даже небольшое изменение переводит систему в новое устойчивое состояние, которое может быть упорядоченным.

Можно выделить следующие свойства точки бифуркации:

- 1) наличие нескольких аттракторов, определяемых как устойчивые режимы работы транспорта, один из которых будет выбран пассажирами;
- 2) кратковременное существование с разделением различных зон эволюционного или революционного развития.

Зоны развития флуктуации и бифуркации приводят к значительным изменениям значений параметров в различные периоды времени. При этом, например, остановочный пункт или вокзал может быть представлен в виде специальной точки, являющейся полюсом – центром тяготения пассажиропотока. Тогда входные полюса для рассматриваемого примера пассажиропотока $\Pi_{\text{пр}}^v$ с железнодорожного транспорта, следующего до вокзала или остановочного пункта, можно представить в виде

$$\Pi_{\text{ж}}^v = \left\{ \Pi_{\text{ж}_1}^v, \dots, \Pi_{\text{ж}_j}^v, \dots, \Pi_{\text{ж}_n}^v \right\} \quad (5)$$

Для выхода имеем множество выходных полюсов (пассажиропоток городского общественного транспорта ($\Pi_{\text{гор}}^v$)):

$$\Pi_{\text{гор}}^v = \left\{ \Pi_{\text{гор}_1}^v, \dots, \Pi_{\text{гор}_j}^v, \dots, \Pi_{\text{гор}_r}^v \right\} \quad (6)$$

Пересечение множества полюсов элементов рассматривается как связь

$$C_v^B = \left[\bigcup_{i=1}^{m_v} \Pi_{\text{ж}_i}^v \right] \cap \left[\bigcup_{j=1}^{n_v} \Pi_{\text{гор}_j}^v \right] \quad (7)$$

При установлении зависимости одних параметров, например, входов (в рассматриваемом примере пассажиропоток железнодорожного транспорта) от других выходов (пассажиропоток городского общественного транспорта) можно получить модель с обратной связью (рисунок 4).

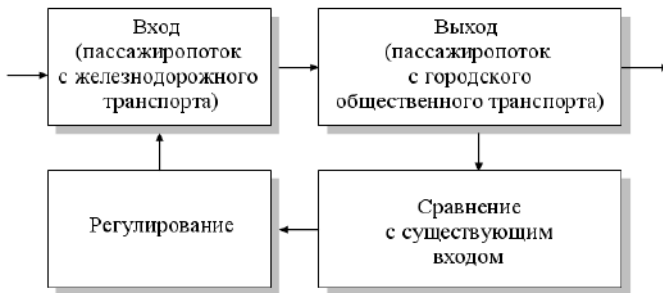


Рисунок 4 – Модель обратной связи

Если оценка результата меньше оценки входа, то за счет регулирования можно увеличить его интенсивность, и наоборот, в случае если больше оценка входа, то проводится его снижение. Следовательно, обратная связь положительна, если возрастающие результаты увеличивают интенсивность входа, и отрицательна, если возрастающие результаты уменьшают его интенсивность [7].

Проведенное исследование показало, что наличие точки разделения, которой является вокзал или остановочный пункт, позволяет рассмотреть ее как бифуркацию, вызывающую изменения в транспортной системе. Это приводит к значительным корректировкам значений характеристических параметров в течение коротких отрезков времени и невозможность их прогнозирования в силу почти стохастического характера направления этих изменений (так называемый эффект выбора пути).

Следует отметить, что стохастические системы относятся к классу нелинейных динамических систем и могут быть представлены уравнением

$$S^T(t) = G[\lambda, \Pi_{\text{пр}}^v(t), \Pi_{\text{гор}}^v(t)] | t_0 \leq \tau \leq t, \quad (7)$$

где $\Pi_{\text{пр}}^v(t)$ – входной случайный процесс (пригородный или региональный пассажиропоток, следующий до вокзала или остановочного пункта); $\Pi_{\text{гор}}^v(t)$ – выходной случайный процесс (пассажиропоток с городского общественного транспорта); λ – случайность нелинейного преобразования, представляемого функционалом G .

Следовательно, в сложных системах, к которым относится пассажирская транспортная система, можно выделить несколько последовательно и

параллельно связанных между собой контуров обратной связи, что подтверждается исследованиями [4, 8]. Например, в середине XX века железнодорожный транспорт занимал доминирующее положение при перевозке пригородных пассажиров. Однако в результате интенсивного роста уровня автомобилизации в начале XXI века значение параметра входа применительно к железнодорожному транспорту изменилось, и новые его значения служат индикатором возрастающей диспропорции в транспортной системе. При этом необходимо учесть, что факторы, влияющие на данные параметры системы, начинают действовать задолго до того, как эволюционная стадия сменится революционной. Какое-то время транспортная система сохраняет устойчивость, несмотря на то, что ряд характеризующих её параметров претерпевает необратимые изменения и сохраняется за счёт других значений, которые продолжают задавать ее прежние базовые свойства. Но в определённый момент времени данных параметров, сохраняющих прежние значения, оказывается недостаточно, и транспортная система изменяет свое состояние, оказываясь в точке бифуркации. Но вследствие изменений не успевает сформироваться совокупность новых значений параметров, задающих комплект её базовых свойств, которые могли бы обеспечить стабильное функционирование системы. Поэтому характеристические параметры получают набор некоторых временных значений, обеспечивающих кратковременную псевдоустойчивость системы, которая переводится в новое состояние.

Таким образом, предложенный анализ позволит осуществить научно обоснованный выбор того или иного вида транспорта для качественного формирования или развития конкретной пассажирской транспортной системы и эффективно реализовать научно-технические решения по ее дальнейшему развитию.

Следует отметить, что приведенный анализ особенно важен для железнодорожного пригородно-городского сообщения, где учет потребностей основных сегментов пассажиропотока в удобное время отправления и прибытия региональных (пригородных) поездов по начальным и конечным станциям, в рабочие, выходные и праздничные дни должен производиться при прокладке ниток графика движения поездов. Это обеспечивает адресность назначаемых поездов и их заполняемость при прочих равных условиях эксплуатации. Неучет целей поездки, режима работы и других побудительных факторов в значимых сегментах ведет к невостребованности проложенных ниток графика движения поездов, неоправданному ожиданию отправления поездов переходу части пассажиров на автомобильный транспорт. Однако эти факторы могут быть антагонистически связаны, например, для пассажиров более комфортной является поездка при минимальном населенности вагона, а для железной дороги – наоборот [5–7].

Таким образом, после коротких периодов псевдоустойчивости пассажиропоток под воздействием указанных факторов может возвращаться в бифуркационные отрезки повышенной неустойчивости с эффектом выбора пути и повышенной чувствительностью к малым, точечным воздействиям, значения параметров которых могут несколько раз меняться. Тогда периоды псевдоустойчивости связаны как

$$B_M^X \Rightarrow B_M^Y \Rightarrow B_M^Z. \quad (8)$$

При этом наиболее эффективными оказываются те воздействия, которые приближают пассажиропоток к его будущему устойчивому состоянию, т. е. меняют значения характеристических параметров $B_M^{X(Y,Z)}$ на такие, которые обеспечат новый комплект базовых свойств устойчивого пассажиропотока в будущем B_M^N .

$$B_M \Rightarrow B_M^X \Rightarrow B_M^Y \Rightarrow B_M^Z \Rightarrow B_M^N. \quad (9)$$

Этот процесс происходит до тех пор, пока необходимый набор значений не будет присвоен некоему критическому набору параметров $B_1^N, B_2^N, \dots, B_N^N$, который зафиксировывает возможность стабилизации пассажиропотока вокруг заданных им свойств. Бифуркационный процесс заканчивается, когда заканчиваются попытки ввода пассажиропотока в неустойчивое состояние [5–7].

Таким образом, на краткосрочном выборе каждого пассажира основывается равновесие транспортных предпочтений, недостаточно изученных в современных условиях и в которых приоритет отдается автомобильному транспорту, что приводит к возникновению множества социальных и экологических издержек, не компенсируемых автомобилистами (например, к росту числа автостоянок и, как следствие, отчуждению земель с территориальным «расползанием» городов при снижении численности в них). Следовательно, развитие представленного направления закладывает единые методологические основы организации транспортного обслуживания на различных видах транспорта, обеспечивая при этом приемлемую конкуренцию между ними, создает стимулы для поиска новых технологий, повышения качества обслуживания пассажиров, использования принципов синергетики в организации пассажирских перевозок.

Таким образом, пассажиропотоки на различных видах транспорта как сложные системы, отличающиеся разнообразием состояний, требуют нового подхода к их анализу и управлению. Следует подчеркнуть, что высокая степень потенциальных возможностей транспорта и низкая степень их

реализации в случае неэффективной организации транспортной схемы обслуживания будет формировать опасные тенденции его развития с приоритетом одного вида по отношению к другому.

Подводя итог, можно отметить следующие ключевые положения эффективного взаимодействия видов транспорта:

1) источником неустойчивости пассажиропотока является имманентно воспроизводящееся противоречие между возможностями транспортных средств, имеющих различные ограничения, например, по скорости передвижения, комфорту поездки и т. п., что не всегда соответствует потребностям пассажиров;

2) содержание и направленность диссипативных процессов, происходящих в пассажиропотоках, сводится к прогрессирующему процессу творчества социума, выражающегося как в познании естественных законов природы, так и в создании всё более совершенных искусственных систем, эволюция развития которых направляется специфическим аттрактором, представляющим собой набор определенных целей, к которым они тяготеют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Теория бифуркаций / В. И. Арнольд [и др.]. – М. : Наука, 1990. – 128 с.
- 2 Теория бифуркаций динамических систем на плоскости / А. А. Андронов [и др.]. – М. : Наука, 1967. – 485 с.
- 3 *Афраймович, В. С.* Размерность и энтропия в многомерных системах. Нелинейные волны. Динамика и эволюция / В. С. Афраймович, А. М. Рейман; под ред. А. В. Гапонова-Грехова, М. И. Рабиновича. – М., 1989. – 400 с.
- 4 *Ваксман, С. А.* Транспортные системы городов: наука и практика первого десятилетия XXI века / С. А. Ваксман // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния : материалы X Международной НПК. – Екатеринбург, 2004. – С. 12–18.
- 5 *Власюк, Т. А.* Особенности моделирования транспортных систем // Проблемы безопасности на транспорте : тезисы докладов Междунар. науч.-практ. конф. / Т. А. Власюк; под общ. ред. проф. В. И. Сенько. – Гомель : БелГУТ, 2012. – С. 67–68.
- 6 *Власюк, Т. А.* Особенности маркетинга пассажирских перевозок с учетом бифуркационных процессов в транспортных системах крупных городов, Т. А. Власюк // Маркетинг и логистика в системе менеджмента пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте : тезисы докладов III Международной науч.-практ. конференции. – Киев, 2012. – С. 22–25.
- 7 *Власюк, Т. А.* Моделирование взаимодействия железнодорожного и автомобильного транспорта по обслуживанию пассажиропотоков в крупных городах / Т. А. Власюк // Железнодорожный транспорт. – М : ВИНТИ. – 2013. – № 7. – С. 54–60.
- 8 Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / А. В. Гасников [и др.]; под ред. А. В. Гасникова – М. : МФТИ, 2010. – 362 с.
- 9 *Ильяшенко, Ю. С.* Аттракторы и их фрактальная размерность / Ю. С. Ильяшенко. – М. : МЦНМО, 2005. – 16 с.

10 Йосс, Ж. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Ж. Йосс, Д. Джозеф. – М. : Мир, 1983. – 301 с.

11 Кузнецов, А. П. Динамические системы и бифуркации / А. П. Кузнецов. – Саратов : Наука, 2015. – 168 с.

12 Kuznetsov, Yu. A. Elements of applied bifurcation theory / Yu. A. Kuznetsov. –New York : Springer-Verlag, 1998. – 591 p.

13 Ляпунов, А. М. Общая задача об устойчивости движения / А. М. Ляпунов. – М.–Л. : Гостехиздат, 1950. – 471 с.

14 Паташинский, А. З. Флуктуационная теория фазовых переходов / А. З. Паташинский, В. Л. Покровский. – М. : Наука. 1982. – 381 с.

15 Постнов, Д. Э. Бифуркации регулярных аттракторов : учеб. пособие / Д. Э. Постнов. – Саратов : Колледж, 1996. – 102 с.

17 Марсден, Д. Бифуркация рождения цикла и ее приложения : пер. с англ. / Д. Марсден, М. Мак-Кракен. – М., 1980. – 180 с.

T. A. VLASIUK

APPLICATION OF BIFURCATION ANALYSIS OF PASSENGER FLOWS IN THE ASSESSMENT OF THE INTERACTION OF DIFFERENT TRANSPORT MODES IN AN AGGLOMERATION

Characteristics of the bifurcation analysis application in relation to the analysis of passenger flows in the interaction junctions of large cities are considered. Possible effects of a variety of factors of different nature are taken into account. With the onset of The author draws attention to the unpredictability of the transport processes when bifurcation takes place.

Получено 16.10.2018.

**ISSN 2664-5025. Проблемы перспективного развития
железнодорожных станций и узлов. Гомель, 2019**

УДК 656.21:004.414.23

А. К. ГОЛОВНИЧ

*Белорусский государственный университет транспорта (БелГУТ)
golovnich_alex@mail.ru*

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ПРОТОТИПИРУЮЩАЯ 3D-МОДЕЛЬ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ФИЗИКИ ПРОЦЕССОВ

Исследуется возможность воспроизведения технологических процессов железнодорожной станции в динамической трехмерной модели в соответствии с физическими законами движения, соударения и трения объектов пути, подвижного состава и груза. Определяются критерии качества модельной реконструкции про-