

УДК 656.222.6

Н. И. ОСИПОВ

*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
N-I-Osipov@yandex.ru*

**ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ КОМПЛЕКСА
ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СИСТЕМ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ**

Для оценки эффективности интервального регулирования движения поездов использовано многоподходное имитационное моделирование в среде AnyLogic. В разработанном комплексе имитационных моделей процессный метод определяет логику действий дежурного персонала во время движения поездов, агентный метод имитирует работу локомотивного хозяйства на участковой станции и выбор машинистом режима движения поезда. Системная динамика используется для тяговых расчетов. С целью определения возможности задействования авторского комплекса для принятия управленческих решений по развитию интервального регулирования проведена трехуровневая верификация и валидация на одном из железнодорожных направлений. В ходе тестирования были сопоставлены фактические и моделируемые величины ходовых, технических, участковых и маршрутных скоростей, а также нормативный и построенный по результатам моделирования графики работы участковой станции. Гипотеза о совпадении фактических и моделируемых значений по критериям Колмогорова – Смирнова и Манна – Уитни для части выборок принята только на уровне значимости 0,01. Для повышения точности комплекса требуется алгоритм динамического регулирования доли используемой силы тяги.

На современном этапе развития технологий имеет место наличие на рынке достаточного количества развитых сред и систем имитационного моделирования для воспроизведения процессов на железнодорожном транспорте [1]. Наиболее известными инструментами для поиска и ликвидации узких мест работы железнодорожных станций и линий являются комплексы ИСТРА, ИМЕТРА (обе разработки – ООО «Транспортный алгоритм»), МСУ (разработка НИИАС). Однако доступность данных комплексов ограничена вследствие их проприетарности. При этом имеет место возможность дополнения данных комплексов, которые реализуют дискретно-событийный подход, являющийся самым распространенным [2] на основе модулей, основанных на агентном моделировании и системной динамике для оптимизации архитектуры моделей [3] и получения результатов принципиально нового качества.

На современном этапе при принятии управленческих решений по развитию железнодорожных полигонов обязательным становится учет разгонов и замедлений поездов [4]. Одним из наиболее универсальных способов интеграции тяговых расчетов в оценку пропускной способности является аналитический [5]. Достоинством данного подхода является простота применения в сочетании с относительно высокой точностью, достаточной для ускоренного принятия решений высокого уровня абстракции. В то же время аналитические модели делают возможным анализ незначительного количества факторов.

Следующим уровнем детализации анализа тяговых расчетов является статистический метод, заключающийся в многократном воспроизведении функционирования реального объекта за определенный период с последующей обработкой полученных данных. В работе [6] на основании статистических данных о движении 105 поездов различной массы и длины по одному из существующих участков для прогнозирования ускорения поезда построена модель линейной регрессии, применение которой позволяет строить кривые скорости поезда.

Значительное развитие в последние годы получает метод нейросетевого моделирования тяговых расчетов. В работе [7] представлен метод построения регулятора движения поезда на основе искусственных нейронных сетей. Его достоинствами является непрерывная адаптация нейронной сети и возможность параллельного применения тысяч нейросетей для подбора наиболее подходящей для конкретного поезда. В то же время применение данного метода требует детального исследования основ нейросетевого моделирования для настройки модели.

В исследовании [8] для моделирования движения поезда на основе машинного обучения задействован относительно простой в понимании и интерпретации алгоритм случайного леса (Random Forest), при котором разрабатывается множество решающих деревьев с признаками «рёбер», определяющими значения целевой функции.

В рамках данного исследования предлагается альтернативный метод моделирования тяговых расчетов, основанный на концепции многоподходного моделирования. Наиболее сложной частью комплекса имитационных моделей является симуляция тяговых расчетов с задействованием элементов системной динамики. С помощью представленных на рисунке 1 взаимосвязей между накопителем, параметрами, табличными функциями, простыми и динамическими переменными методом Эйлера решается основное уравнение движения поезда и выполняется расчет тормозного пути методом интервалов скорости в соответствии Правилами [9].

Агентный подход моделирования применяется для выбора режимов движения поезда (тяга, холостой ход или торможение). Данная имитация в авторской модели осуществляется с помощью приведенной на рисунке 2 диаграммы состояний агента-поезда.

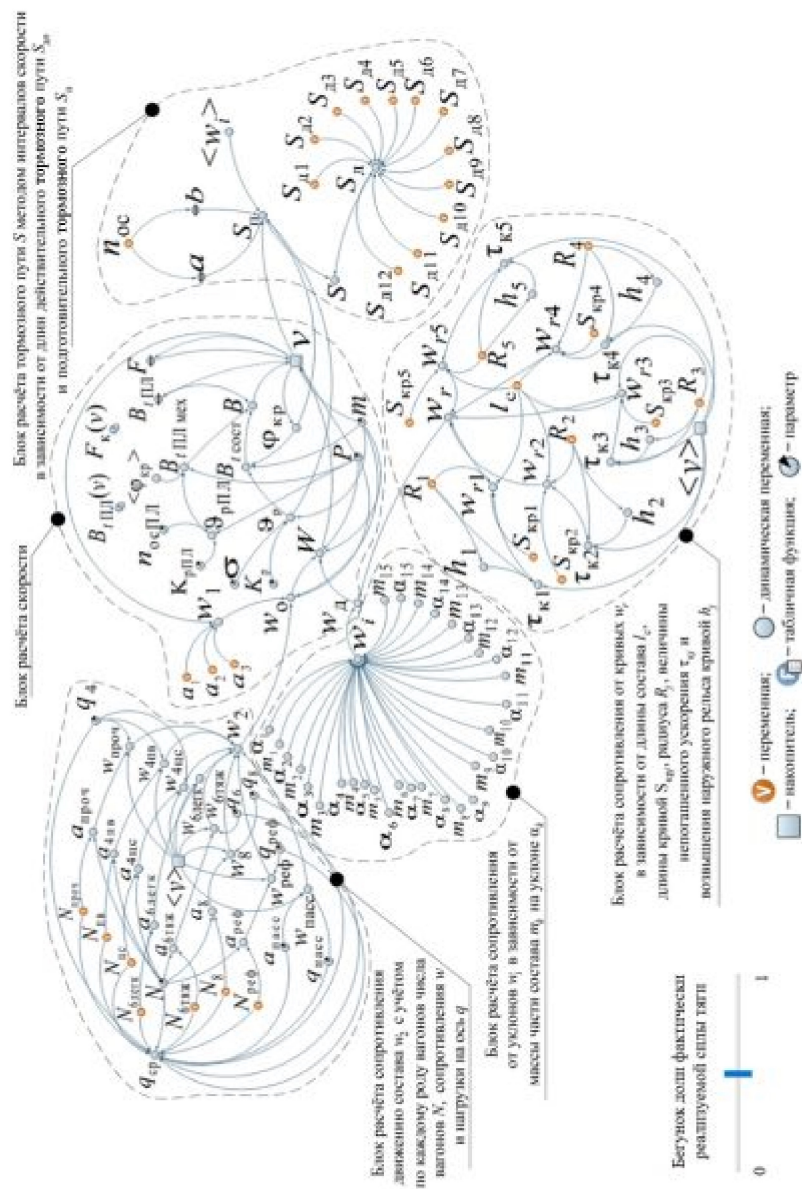


Рисунок 1 – Графическая интерпретация основного уравнения движения поезда в форме взаимосвязи элементов системной динамики

На основе функционирования перехода, имитирующего работу непрерывной локомотивной сигнализации (АЛСН) или многозначной локомотивной сигнализации (АЛСЕН) каждым поездом осуществляется доступ к коллекции «Блок-участки». В зависимости от состояния впередилежащих блок-участков (занят/свободен) для поезда устанавливается максимальная скорость движения.

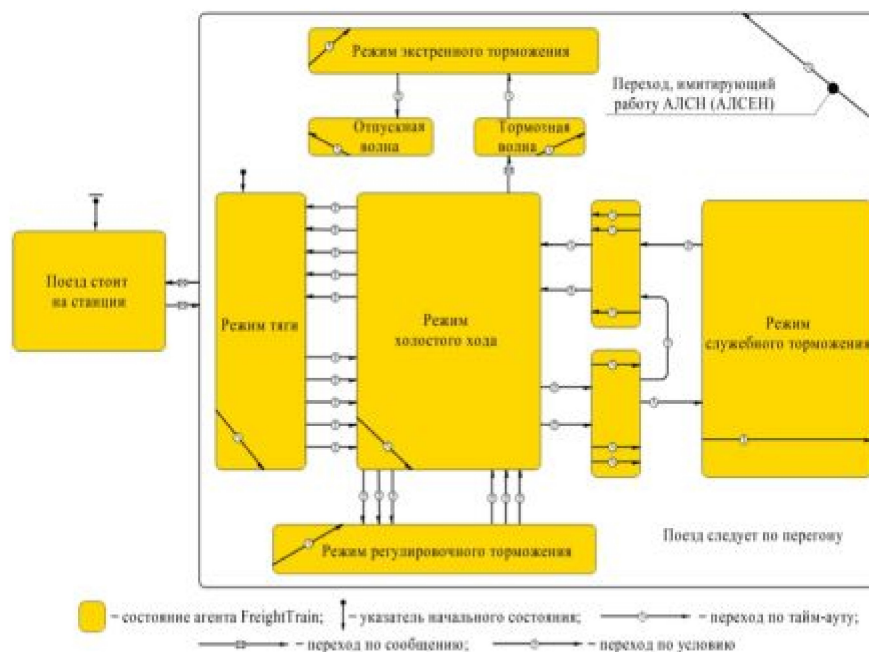


Рисунок 2 – Выбор режима движения поезда (агентное моделирование)

В рамках процессного подхода, потоковые диаграммы которого представлены на рисунке 3, пользователь разработанной модели принимает на себя роль поездного диспетчера и осуществляет принятие управленческих решений о продвижении поездопотока по направлению.

Для подтверждения возможности применения разработанного комплекса имитационных моделей для оценки эффективности интервального регулирования на однопутном направлении требуется проведение трехуровневых верификации и валидации, структура которых представлена на рисунке 4.

Для повышения степени доверия к результатам работы авторского комплекса имитационных моделей валидация ходовой скорости движения проведена для четырех различных сценариев, представленных в таблице 1.

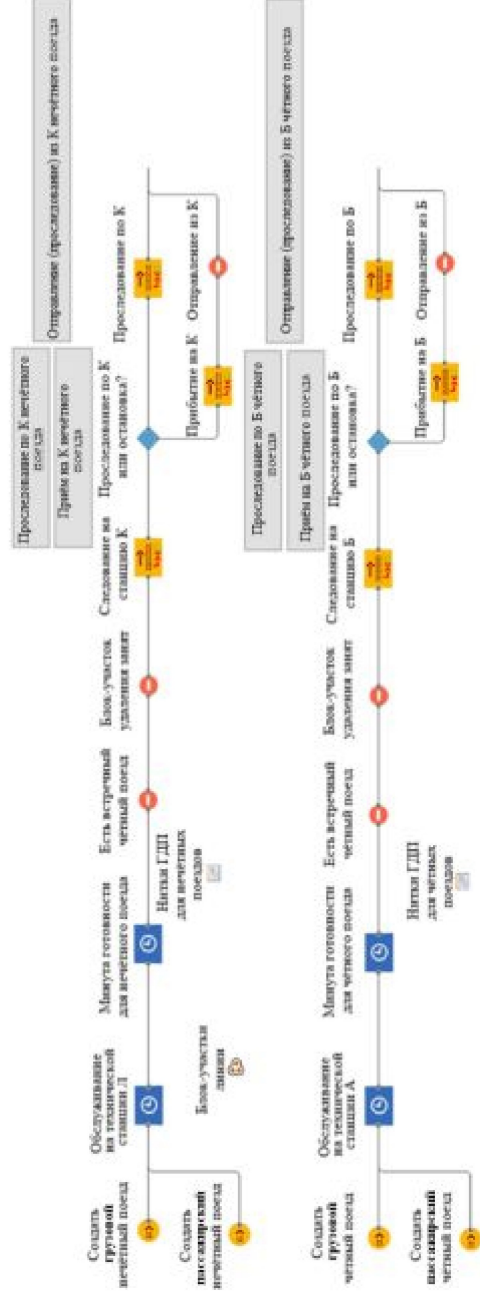


Рисунок 3 – Логика модели по пропуску поездов (процесный подход)



Рисунок 4 – Структура трехуровневой верификации и валидации

Таблица 1 – Сценарии для валидации при движении поезда по перегону

Номер сценария	Масса поезда, т	Количество осей, шт.	Наличие разгона	Наличие замедления
1	2927	236	Нет	Нет
2	3573	236	Да	Да
3	4437	220	Нет	Нет
4	2635	248	Да	Да

На рисунках 5–8 представлено сравнение ходовых, технических, участковых, маршрутных скоростей движения поездов фактических и полученных по результатам моделирования. Результаты трехуровневой валидации авторского комплекса моделей сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты трехуровневой валидации комплекса имитационных моделей

Перевозочный процесс	Сравниваемые параметры	Размер каждой выборки, ед.	Статистический критерий	Принятие при уровне значимости	
				0,01	0,05
На перегоне	Ходовая скорость (сценарий № 1)	136	Колмогорова – Смирнова	Да	Да
	Ходовая скорость (сценарий № 2)	209		Да	Нет
	Ходовая скорость (сценарий № 3)	174		Да	Нет
	Ходовая скорость (сценарий № 4)	192		Да	Да
На участке	Техническая скорость	60	Манна – Уитни	Да	Нет
	Участковая скорость	60	Манна – Уитни	Да	Да
На направлении	Маршрутная скорость	37	Манна – Уитни	Да	Да

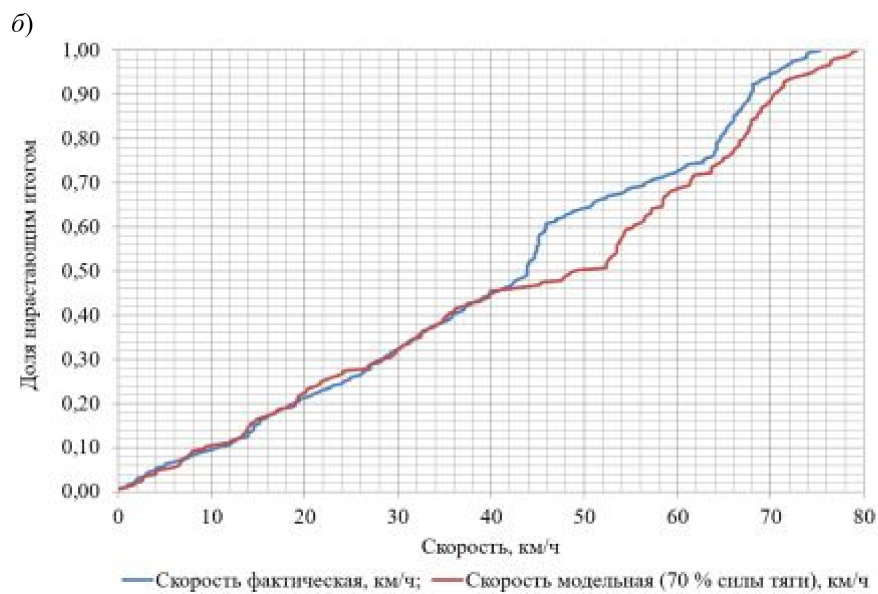
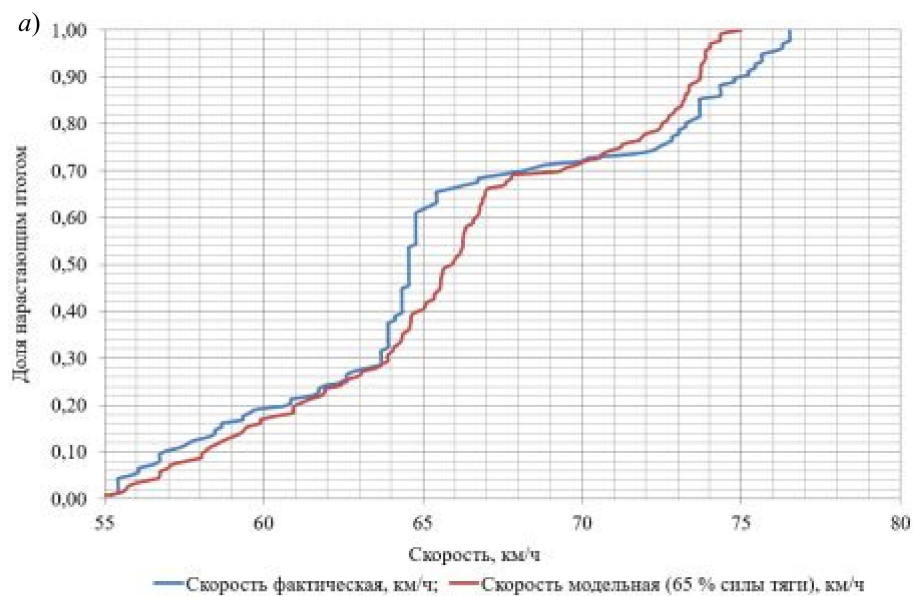


Рисунок 5 (начало) – Результаты фактического и моделируемого движения поезда по перегону: а – сценарий № 1, 65 % реализации силы тяги; б – сценарий № 2, 70 % реализации силы тяги

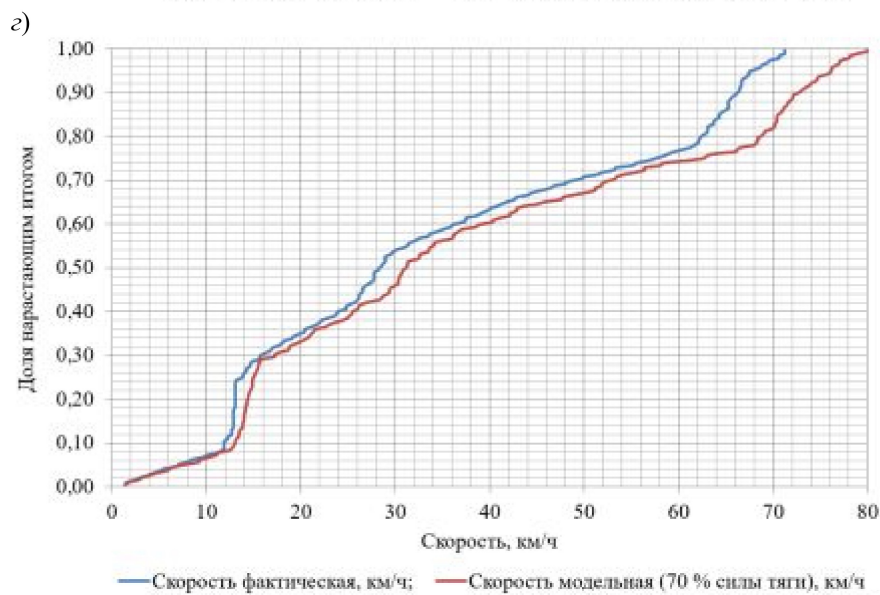
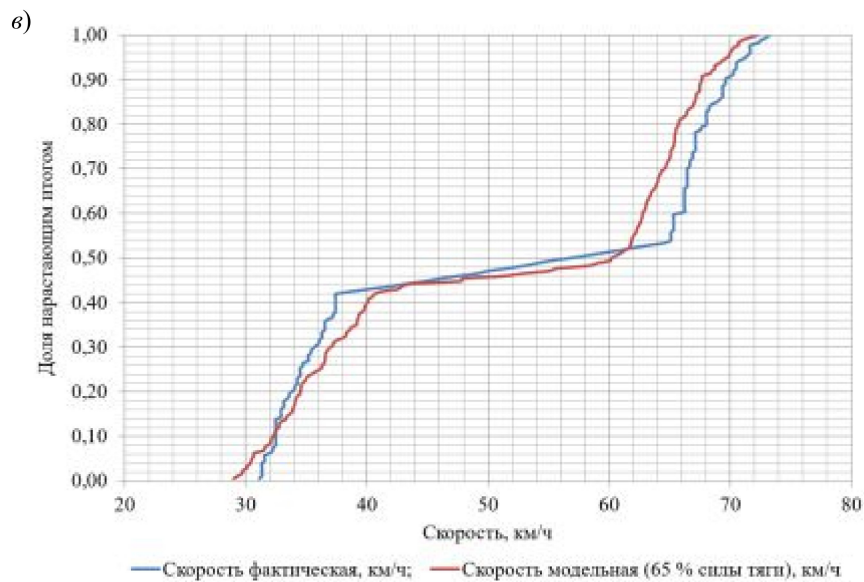


Рисунок 5 (окончание) – Результаты фактического и моделируемого движения поезда по перегону: а – сценарий № 3, 65 % реализации силы тяги; в – сценарий № 4, 70 % реализации силы тяги

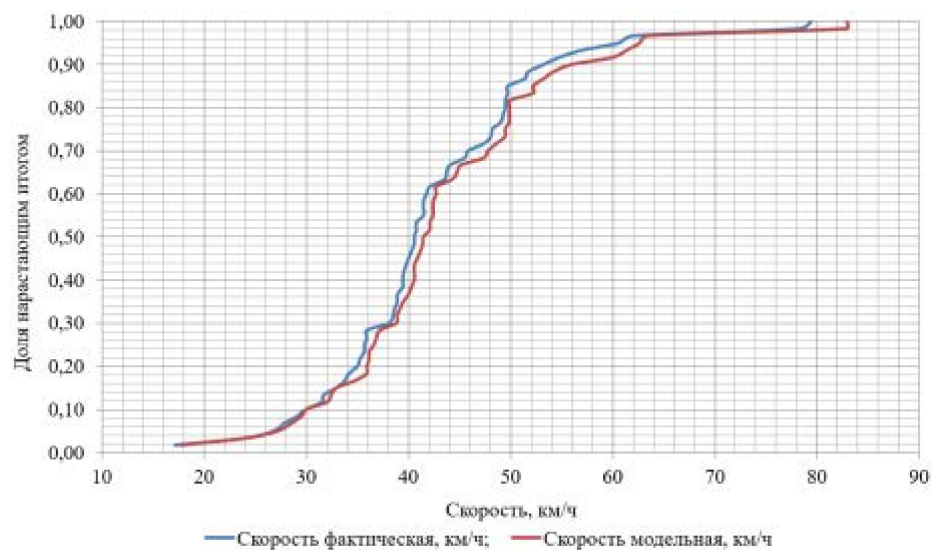


Рисунок 6 – Сравнение фактической и моделируемой участковых скоростей движения поездов по однопутному участку

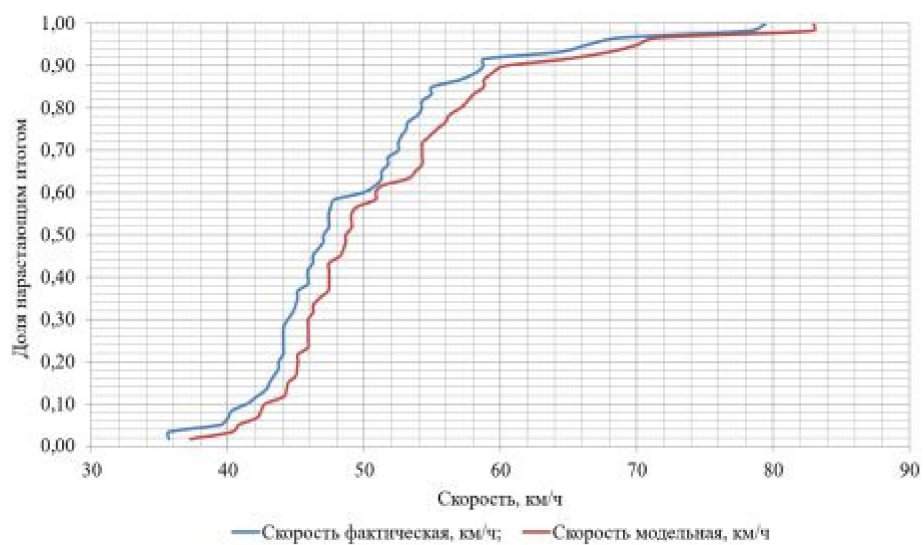


Рисунок 7 – Сравнение фактической и моделируемой технических скоростей движения поездов по однопутному участку

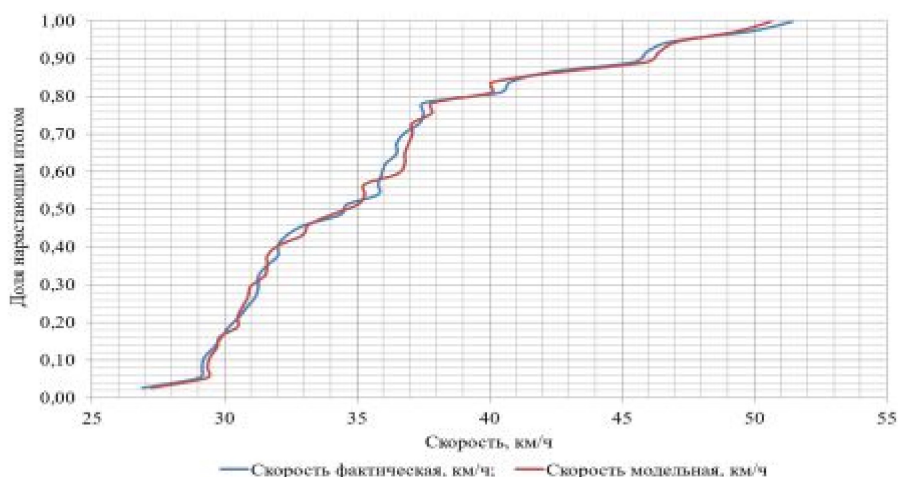


Рисунок 8 – Сравнение фактической и моделируемой маршрутной скоростей движения поездов по однопутному направлению

Разработанный комплекс имитационных моделей способен воспроизводить перевозочный процесс на участке с достаточной степенью точности. При этом необходимо отметить, что вследствие сложности детальной имитации процесса следования поездов по перегонам эмпирическое значение критерия Манна – Уитни для выборок с технической скоростью существенно более близко к критическому его значению на уровне значимости 0,01 в сравнении с выборками с участковой скоростью. Данное обстоятельство объясняется возможностью введения поездов в график за счет изменения продолжительности стоянок на промежуточных станциях.

С целью проверки возможности имитации работы участковой станции с помощью авторского комплекса моделей воспроизведен нормативный суточный план-график ее работы. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о возможности задействования данного комплекса для имитации работы участковой станции. При этом следует отметить, что при моделировании прямо-отправочный путь выбирается из путей на основе соответствия полезной длины пути длине поезда, а не задается вручную, что является причиной расхождения моделируемого плана-графика и нормативного в части порядка задействования прямо-отправочных путей станции.

Таким образом, главный результат исследования – возможность использования разработанного комплекса имитационных моделей, основой которого является многоподходное моделирование, для принятия управленческих решений по развитию интервального регулирования движения поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Осипов, Н. И. Применение имитационного моделирования для оценки влияния величины интервала прибытия поездов на работу станций стыкования родов тягово-