

ТЕОРИЯ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В МОДЕЛИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

д.ф.-м.н. профессор РАН А.Л. Казаков

к.ф.-м.н. А.А. Лемперт, к.т.н. М.Л. Жарков

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН

XXIV Международная конференция имени А. Ф. Терпугова

«Информационные технологии и математическое моделирование»

(ИТММ – 2025)

Свойства транспортных систем

- Многократное выполнение однотипных технических операций (прибытие транспорта, погрузка / разгрузка, отправление);
- Время их выполнения подвержено влиянию множества случайных факторов;
- Ограниченная вместимость системы;
- Сложная структура, в которой можно выделить несколько подсистем.



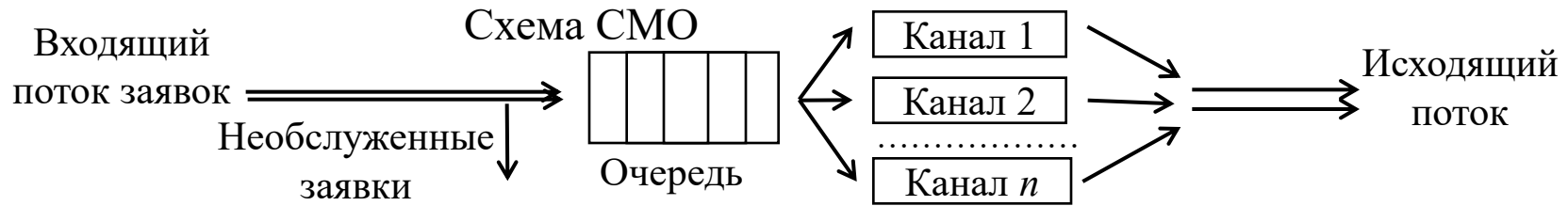
Сортировочная станция



3D-модель транспортно-пересадочного узла

Для построения моделей **применяется аппарат теории массового обслуживания**. В ней изучаются объекты, в которых регулярно выполняются однотипные операции, а их продолжительность не детерминирована. К таким объектам и относятся транспортные системы, в частности, железнодорожные станции и транспортно-пересадочные узлы.

Система массового обслуживания (СМО)



Формальное описание СМО, код Кендалла: $A / B / m / n$.

A — входящий поток заявок, B — закон распределения времени обслуживания, m — число каналов (обслуживающих устройств), n — максимальная длина очереди.

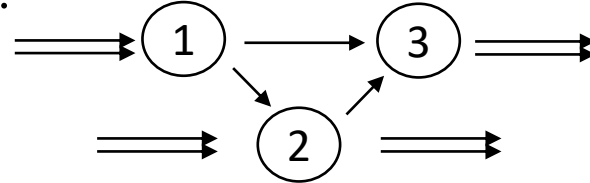
Марковские СМО (M/M/m/n): входящий поток обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последействия, время обслуживания распределено экспоненциально. Если СМО не отвечает этим свойствам, то она считается *немарковской*.

Системы массового обслуживания

Многофазные СМО - комплекс последовательно расположенных и взаимосвязанных между собой СМО (фаз обслуживания).



Сеть массового обслуживания (СеМО) - совокупность конечного числа СМО (узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой, в соответствии с маршрутной матрицей P .



Такие СМО являются эффективным инструментом для описания различных технических систем, в том числе и в области железнодорожного транспорта^{1,2}.

¹ Wilson N., Fourie C.J., Delmistro R. *Mathematical and simulation techniques for modelling urban train networks* // South Afr. J. Ind. Eng. 2016. V. 27.

² Weik N., Nießen N. *Quantifying the effects of running time variability on the capacity of rail corridors* // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2019. V. 15.

Методика моделирования микрологистических систем

При моделировании выбранного объекта выделяются: **входящий материальный поток** и **процесс его обработки в системе** с учетом ее структуры, которые описываются различными моделями.

Материальный поток характеризуется:

- интенсивностью поступления транспорта (λ),
- распределением числа грузов/вагонов/пассажиров ($f(x)$),
- направлением следования.

Грузы и пассажиры обслуживаются независимо друг от друга и занимают определенное место в системе, поэтому они считаются **отдельными заявками**.

Для описания **входящих материальных потоков** применяется **ВМАР-поток** – обобщение неординарного Пуассоновского потока, в котором допускается изменение интенсивности поступления групп заявок, а также закона распределения их размеров. ВМАР-поток **позволяет описать** в одной модели **несколько независимых подпотоков** с различными характеристиками, при этом каждый из них может быть групповым.

Batch Markovian Arrival Process

ВМАР-поток³ задается управляющим процессом (цепью Маркова) v_t с непрерывным временем и пространством состояний $\{0, 1, \dots, W\}$;

Время пребывания в каждом состоянии распределено экспоненциально с параметром λ_v , $v = 0, W$.

С вероятностью $p_k(v, v')$, $0 \leq k \leq m$ процесс перейдет из состояния v в v' и сгенерируется **группа заявок размера k** . При этом

$$\sum_{\substack{v'=1 \\ v' \neq v}}^m p_0(v, v') + \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{r=1}^m p_k(v, v') = 1$$

Интенсивности переходов целесообразно хранить в матрицах D_k , $k \geq 0$, которые задаются следующим образом:

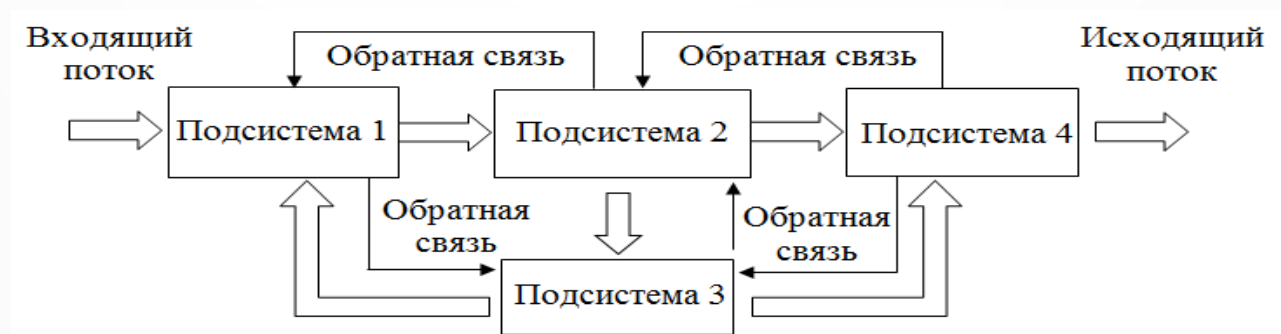
$$(D_0)_{vv} = -\lambda_v, \quad 0 \leq v \leq W; \quad \begin{aligned} (D_0)_{vv'} &= \lambda_v p_k(v, v'), & v, v' = \overline{0, W} \\ (D_k)_{vv'} &= \lambda_v p_k(v, v'), & v, v' = \overline{0, W}; \quad k \geq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

³ Lucantoni D.M. New results on single server queue with a Batch Markovian Arrival Process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. V. 7.

Методика моделирования микрологистических систем

Для **описания процесса обслуживания** применяются **СеМО**. С помощью этого математического аппарата возможно **отобразить нелинейную структуру** транспортных объектов, **учесть различные технические характеристики** каждой из **подсистем**, а также влияние случайных факторов на их работу.

Каждая СМО (узел) описывает подсистему (парк станции, сортировочную горку, остановочный пункт). Длина очереди (n_k) определяется максимальной вместимостью соответствующего элемента. Число каналов (m_k) задается количеством обслуживающих приборов (маневровых локомотивов, бригад осмотра, турникетов).



Методика моделирования микрологистических систем

Применяемые типы СМО при описании частей транспортных объектов:

1. $BMAP / G^X / 1 / 0$ – моделирование транспортных путей (лестницы, эскалаторы, железнодорожные пути) между подсистемами;
2. $* / M^X / 1 / m$ – описание работы сортировочных устройств (сортировочная горка) и станций различного транспорта (автобусная остановка, станция метро), где канал – устройство или транспортная единица, а очередь – доступное место перед ним;
3. $* / G^X / n / m$ – работа подсистем выбранного объекта, каналы – бригады осмотра, кассы, турникеты, а очередь – суммарная вместимость подсистемы.

Здесь: $*$ – параметры входящего потока неизвестны; G – произвольное распределение времени обслуживания; X – групповое обслуживание заявок.

Методика моделирования микрологистических систем

Для описания работы транспортного объекта применяются открытые СеМО, поэтому внешний источник считается **дополнительным (фиктивным) узлом**. Тогда маршрут движения заявок между узлами хранят в матрице вероятностей переходов (маршрутной матрице) P размера $(S+1) \times (S+1)$,

$$P = \begin{pmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \dots & P_{0,S} \\ P_{1,0} & P_{1,2} & \dots & P_{1,S} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{S,0} & P_{S,1} & \dots & P_{S,S} \end{pmatrix}, \quad \sum_{u=0}^s P_{y;u} = 1, \quad \forall y \in S.$$

Ее элементы: P_{ij} – вероятности перехода заявки из узла i в узел j , $i, j = 1, 2, 3, \dots, S$; P_{0j} и P_{j0} – соответственно, вероятность поступления в j -й узел заявки из источника и вероятность покидания заявкой сети после обслуживания в j -м узле.

Данные вероятности определяются, как относительные частоты: отношение числа вагонов/грузов/пассажиров, поступающих в конкретный элемент, к общему объему материального потока для одного направления.

Исследование CeMO

Анализ CeMO проводится численно с использованием методов Монте-Карло. Для этого применяется имитационная модель, блок-схема алгоритма которой представлена на рисунке.

Наибольший интерес представляют предельные средние характеристики системы или **показатели эффективности CeMO**:

P_{loss} – вероятность отказа;

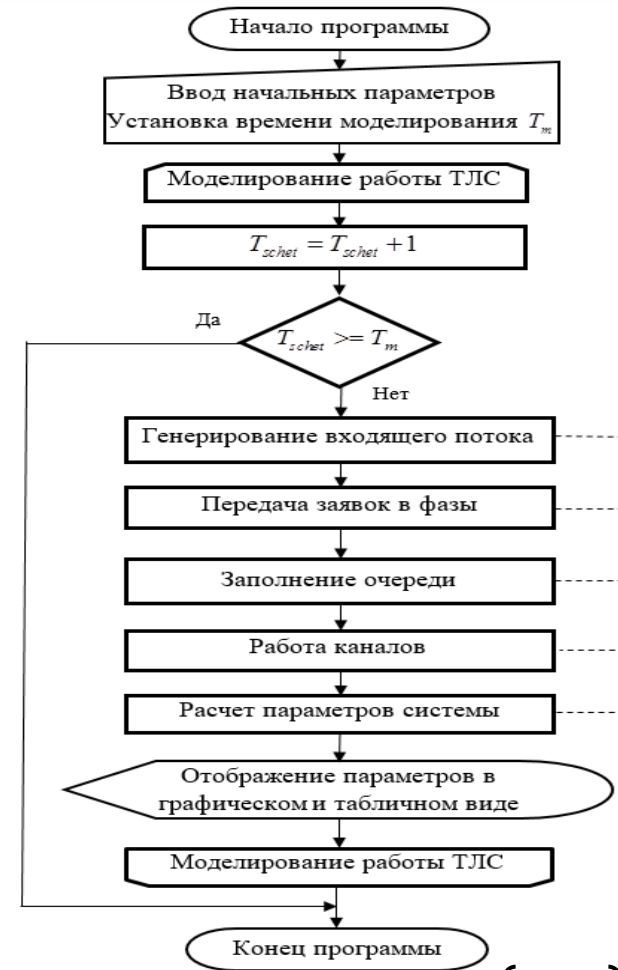
K – коэффициент занятости каналов;

T_{sist} – среднее время пребывания заявки в системе;

T_{node} – среднее время в узле;

P_{lock} – вероятность блокировки каналов;

T_{lock} – среднее время блокировки работы канала; и т.д.



Область применения методики

- 1. Пассажирские городские системы:** железнодорожные вокзалы и транспортно-пересадочные узлы^{4,5};
- 2. Морские грузовые системы:** угольные и контейнерные морские терминалы, универсальные морские порты^{6,7}.
- 3. Железнодорожные системы:** сортировочные и грузовые станции.

Далее будет представлено применение методики на примере железнодорожного транспорта.

⁴ Жарков М.Л., Супруновский А.В. Моделирование работы вокзального комплекса Иркутск-Пассажирский на основе сетей массового обслуживания // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21).

⁵ Kazakov A., Vu G., Zharkov M. A Stochastic Model of a Passenger Transport Hub Operation Based on Queueing Networks // In: Dudin, A., Nazarov, A., Moiseev, A. (eds) ITMM. Queueing Theory and Applications. CCIS. 2024. Vol. 2163. Springer, Cham.

⁶ Лемперт А.А., Жарков М.Л., Казаков А.Л., Ву Х.З. Моделирование морского контейнерного терминала с использованием сети массового обслуживания // Управление большими системами. 2024. Вып. 112.

⁷ Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of a Coal Transshipment Complex Based on a Queueing Network // Appl. Sci. 2024, Vol. 14.

Моделирование железнодорожных станций

В схеме типовой сортировочной станции, как правило, имеются:

Парк прибытия (ПП) - принятие поезда, отцепка от него тягача;

Сортировочная горка (СГ) – расформирование поезда на группы вагонов по направлениям;

Сортировочный парк (СП) - накопление вагонов до полносоставного поезда, их сортировка по направлениям и передача в парк отправления;

Парк отправления (ПО) - окончательное формирование поезда и отправка его из системы.

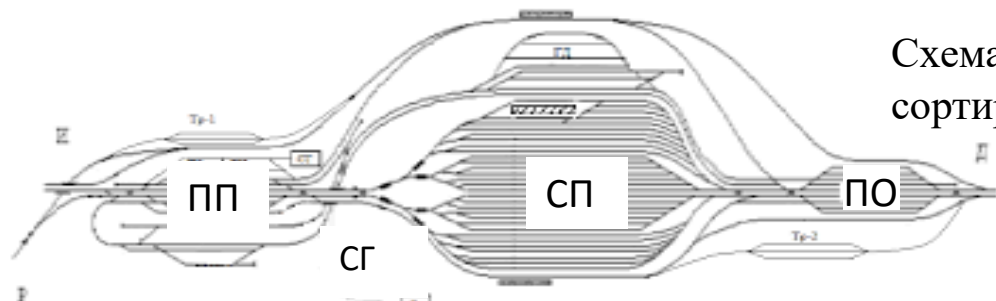


Схема типовой
сортировочной станции

Составы следуют через них последовательно. Парки имеют различные вместимость, время выполнения технических операций и число обслуживающих устройств (устройств роспуска, маневровых локомотивов, бригад осмотра).

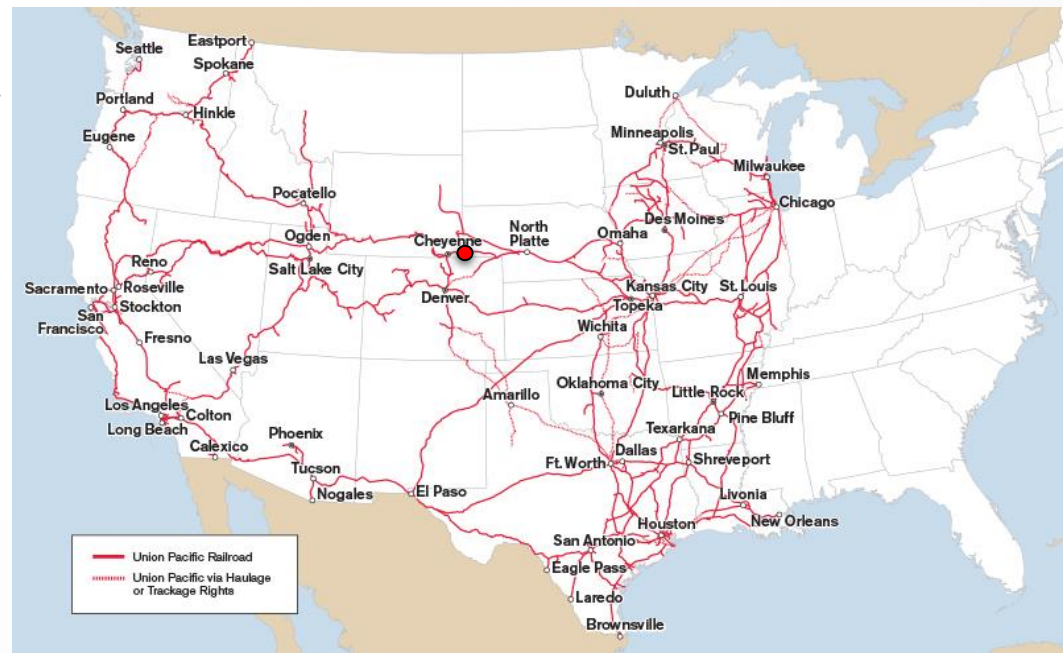
Исследование железнодорожных станций в стационарном режиме

1) Сортировочная станция Бэйли Ярд, США

Станция расположена на Union Pacific Railroad (Железная дорога Юнион Пасифик) и является крупнейшей в мире сортировочной станцией. Она расположена в центре США, штате Небраска. На ней формируются поезда, направляющиеся по всей Северной Америке, в том числе к границам Канады и Мексики.

Локомотивные центры ремонтируют 750 локомотивов в месяц и обслуживают более 8500 единиц, т.е. весь парк локомотивов.

Через станцию проходит огромного количества товаров, из-за чего Union Pacific Railroad описывает Бэйли Ярд как «экономичный барометр Америки».



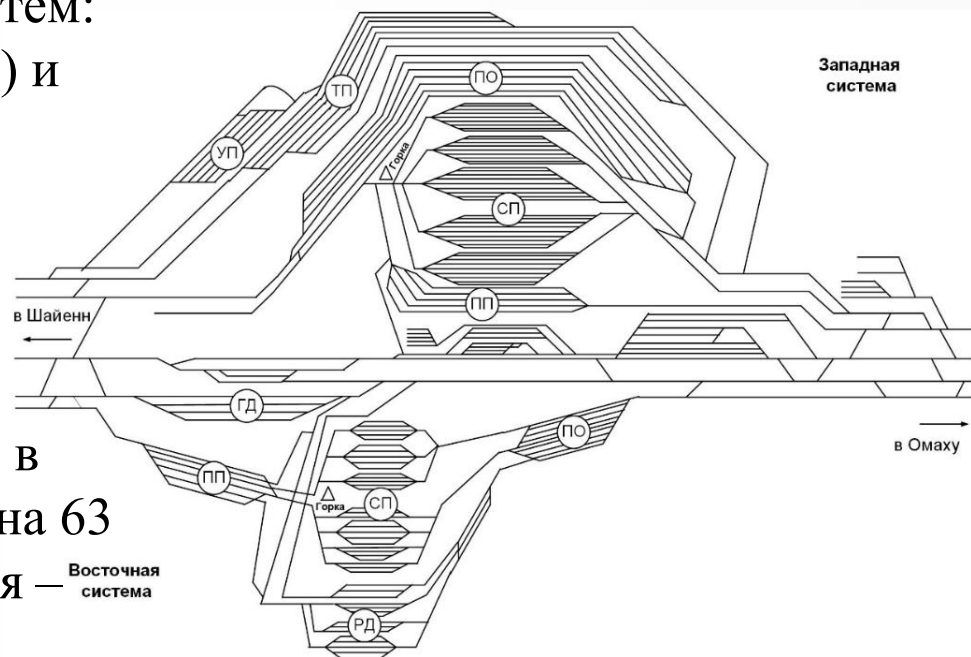
Сортировочная станция Бэйли Ярд имеет 114 путей, занимает площадь 11,5 км² и обрабатывает в сутки 12-13 тыс. вагонов. Наличие грузового двора делает структуру станции нелинейной и позволяет ей производить массовую разгрузку угля.⁸

В структуре станции имеется 11 подсистем:

- 8 парков, включая Угольный парк (УП) и Транзитный парк (ТП),
- две сортировочные горки,
- грузовой двор (ГД).

На станции функционирует ремонтное депо (РД).

Поезда прибывают с двух направлений, в среднем 54 поезда в сутки, средняя длина 63 вагонов, максимальная зафиксированная — 130 вагонов.



⁸ Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. Modeling of Railway Stations Based on Queuing Networks // Applied Sciences. 2021. V. 11(5). [14]

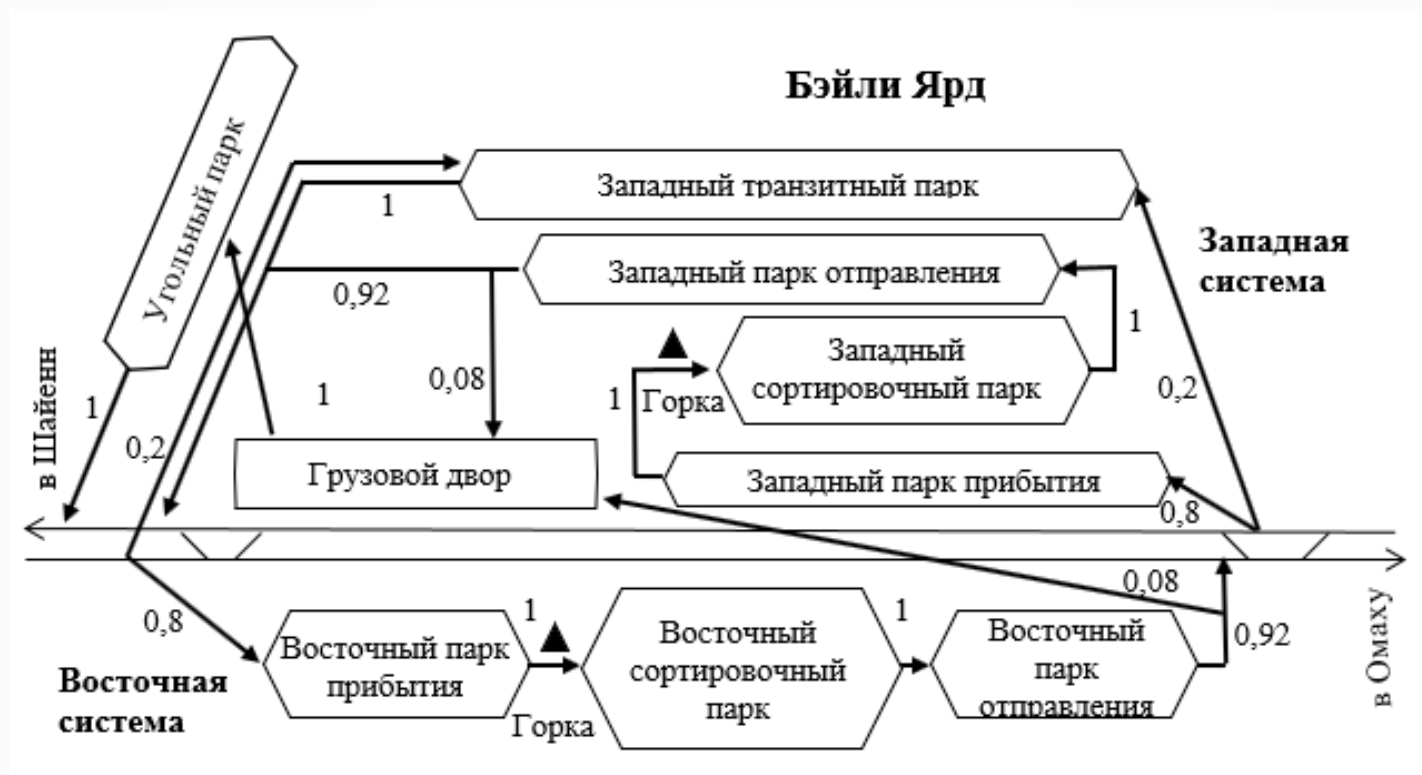
CeMO. Максимальное число вагонов в составе равно **130**, поэтому *ВМАР*-поток будет включать 131 матрицу $D_k, k = 0, 1, \dots, 130$, размера 2×2 – два входящих потока. Их элементы вычисляются по формулам **(1)**, где $\lambda_0 = \lambda_1 = 103 / 24 = 4,3$ интенсивность поступления групп заявок в час, $f(k)$ - биномиальное распределение **$B(130, 0,95)$** вероятности переходов

$$p_k(v, v') = pf(k), \quad v, v' = \overline{0, 1}, \quad k = \overline{0, 130}. \quad (2)$$

Узел 1 (Восточный парк прибытия) – $ВМАР / G^X / 2 / 1170$;
 Узел 2 (Восточная сортировочная горка) – $*/ G^X / 1 / 130$;
 Узел 3 (Восточный сортировочный парк) – $*/ G^X / 3 / 3840$;
 Узел 4 (Восточный парк отправления) – $*/ G^X / 2 / 780$;
 Узел 5 (Грузовой двор) – $*/ G^X / 8 / 130$;
 Узел 6 (Западный парк прибытия) – $ВМАР / G^X / 2 / 837$;
 Узел 7 (Западная сортировочная горка) – $*/ G^X / 1 / 0$;
 Узел 8 (Западный сортировочный парк) – $*/ G^X / 3 / 3000$;
 Узел 9 (Западный парк отправления) – $*/ G^X / 2 / 736$;
 Узел 10 (Западный транзитный парк) – $*/ G^X / 2 / 920$;
 Узел 11 (Угольный парк) – $*/ G^X / 2 / 736$,

Здесь G – произвольный закон распределения времени обслуживания заявок, X – групповое обслуживание в канале.

Схема модели



Вычислительный эксперимент 1

В таблице представлены результаты моделирования при интенсивности поступления $\lambda = 4,3$ групп заявок в час, что соответствует 13 тыс. вагонов в сутки в среднем. Виртуальное время моделирования 35 суток.

Поступило групп	3571,7	Отклонено групп					0
Поступило заявок	417807,3	Отклонено заявок					0
Вероятность отказа	0	Ср. вр. нахождения заявки в системе (ч.)					88,53
Параметры узла	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	
Ср. ч. занятых каналов	1,03	0,45	2,67	0,95	6,88	1,07	
Ср. длина очереди	69,53	6,32	408,54	44,63	49,61	70,78	
Сумм вр. блокировки (мин)	3,89	-	-	70,67	-	1969,11	
Параметры узла	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10	Узел 11		
Ср. ч. занятых каналов	0,45	2,66	0,95	0,46	0,12		
Ср. длина очереди	-	438,48	43,87	49,03	19,03		
Сумм вр. блокировки (мин)	111,00	-	71,33	-	-	17 [17	

Вычислительный эксперимент 2

В таблице представлены результаты при $\lambda = 5,5$ групп заявок в час (в среднем 15,4 тыс. вагонов в сутки) и уменьшении среднего времени обслуживания в сортировочных парках на 20%.

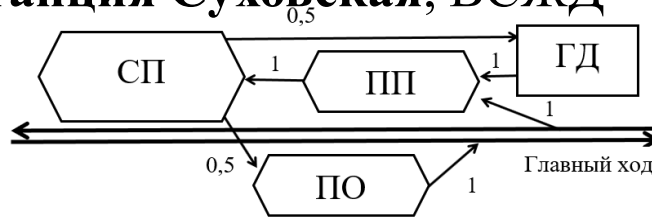
Поступило групп	4592,5	Отклонено групп					5,5
Поступило заявок	537544,3	Отклонено заявок					639,75
Вероятность отказа	0,001	Ср. вр. нахождения заявки в системе (ч.)					53,19
Параметры узла	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	
Ср. ч. занятых каналов	1,31	0,57	2,84	1,20	7,56	1,37	
Ср. длина очереди	97,44	8,78	870,96	44,58	68,07	115,09	
Сумм вр. блокировки (мин)	3,75	0	0	95,25	0	2499,50	
Параметры узла	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10	Узел 11		
Ср. ч. занятых каналов	0,58	2,84	1,20	0,61	0,14		
Ср. длина очереди	-	818,24	44,55	52,86	30,96		
Сумм вр. блокировки (мин)	0	0	97,00	-	-	18 [18	

Результаты моделирования

- При поступлении **4,3 групп заявок в час** (13 тыс. вагонов в сутки) вероятность отказа равна нулю – т.е. станция успешно справляется с текущей нагрузкой.
- При прибытии **4,95** (14 тыс. вагонов в сутки) поездов в час **вероятность отказа** составила **0,002**. Узлы 3 и 8 оказались перегружены, из-за чего в предыдущих Узлах (1, 2, 6 и 7) значительно увеличилось время блокировки каналов. Следовательно система имеет максимальную загрузку.
- При уменьшении среднего времени обслуживания в обоих сортировочных парках (Узлы 3 и 8) на 20% станция сможет обработать в среднем 15,4 тыс. вагонов в сутки (**5,5 групп заявок в час**), т.е. на 28% больше.

Исследование переходного режима работы железнодорожных станций

2) Грузовая станция Суховская, ВСЖД⁹



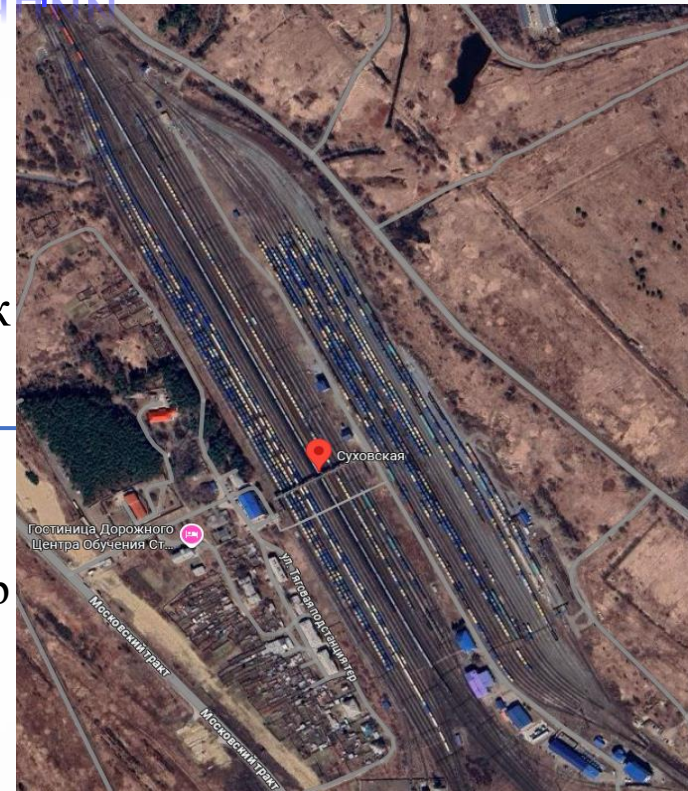
Здесь: Парк прибытия (ПП); Сортировочный парк (СП); Парк отправления (ПО); Грузовой двор (ГД)

Модель имеет вид многофазной СМО:

$$BMAP / M / 1 / 5 \rightarrow * / M / 2 / 8 \rightarrow * / M / 3 / 0$$

Парк прибытия Сортировочный парк Грузовой двор

$$D_0 = \begin{pmatrix} -0,202 & 0 \\ 0 & -0,218 \end{pmatrix}, \quad D_1 = \begin{pmatrix} 0,120 & 0,082 \\ 0,1298 & 0,0882 \end{pmatrix} \quad (3)$$



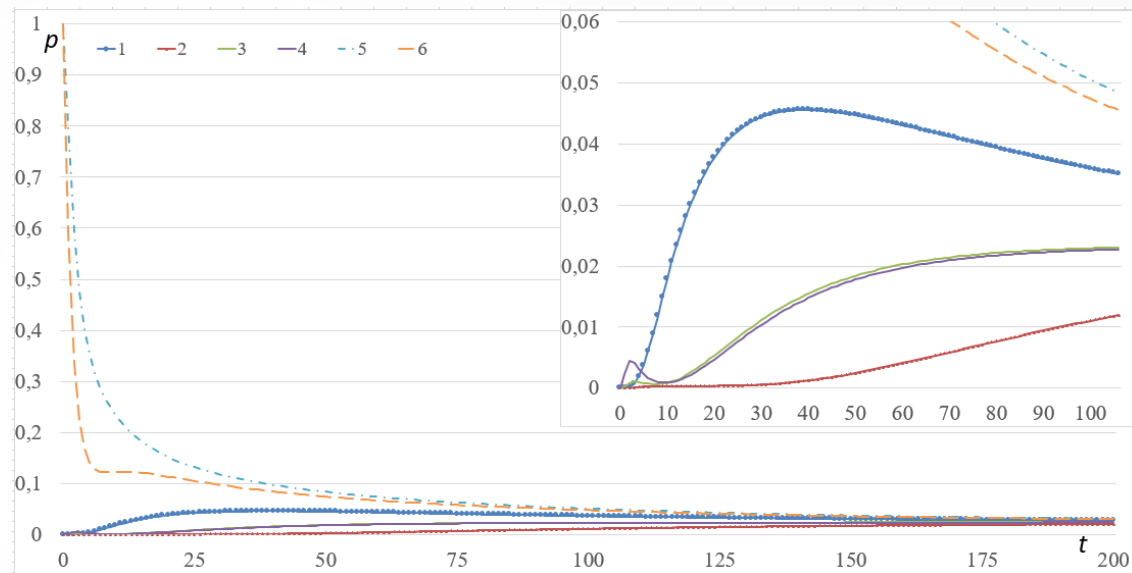
⁹ Zharkov M., Kazakov A., Lempert A. On the application of queuing theory in the analysis of transients in the operation of a freight railway station // In: Dudin, A., Nazarov, A., Moiseev, A. (eds) ITMM. Queueing Theory and Applications. ITMM 2021. CCIS. 2022. vol. 1605. Springer, Cham.

Вычислительный эксперимент 1. Входящий поток задается матрицами (3)

$$BMAP / M / 1 / 5 \rightarrow * / M / 2 / 8 \rightarrow * / M / 3 / 0$$

На рисунке представлено изменение P_{loss} при $t = [0; 200]$ в зависимости от начального состояния системы:

- 1) $P_{000}(0) = 1$,
- 2) $P_{2,5,2}(0) = 1$,
- 3) $P_{6,11,4}(0) = 1$,
- 4) $P_{3,5,0}(0) = 1$,
- 5) $P_{6,10,0}(0) = 1$.



P_{loss}		K	L	P_{lock}	P_{lock}
0.242	Фаза 1	0.878	2.355	0.243	0.393
	Фаза 2	1.986	7.093	0.109	
	Phase 3	2.848	0	-	

Стационарные
характеристики
системы при $t = 200$

P_{loss} – вероятность отказа, P_{lock} – вероятность блокировки каналов,
 K – среднее число работающих каналов, L – средняя длина очереди.

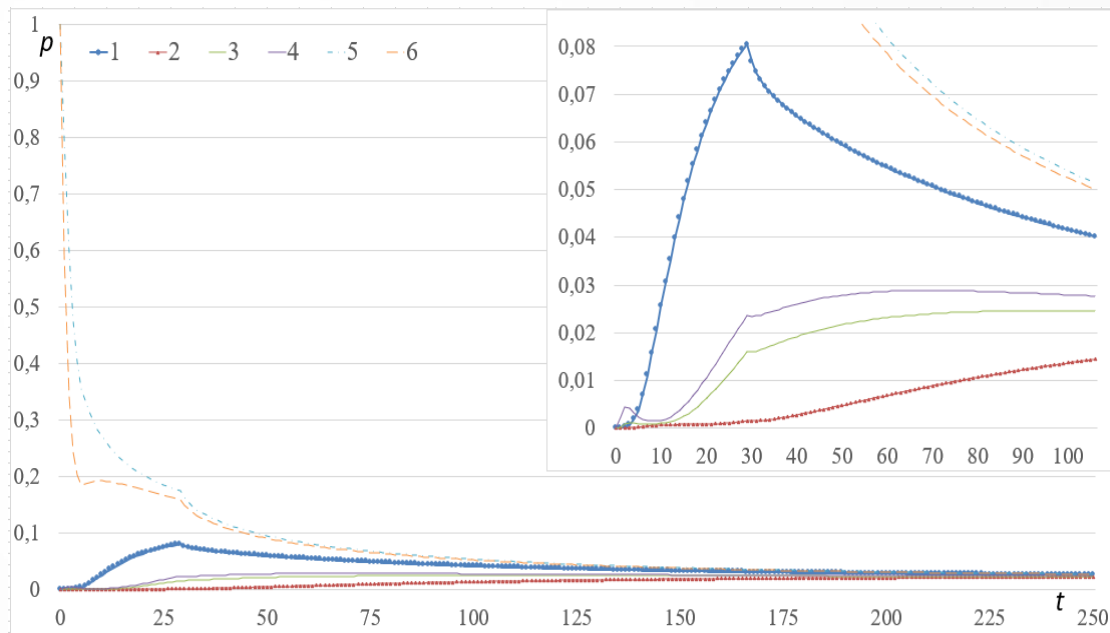
Вычислительный эксперимент 2

Изучим работу многофазной СМО при повышении интенсивности поступления заявок на 15% в течении 24 виртуальных часов.

$$D_0 = \begin{pmatrix} -0,2323 & 0 \\ 0 & -0,2507 \end{pmatrix}, \quad D_1 = \begin{pmatrix} 0,1442 & 0,0881 \\ 0,1445 & 0,1062 \end{pmatrix} \quad (4)$$

На промежутке $t = [5; 29]$ входящий поток задается матрицами (4), в остальное время – матрицами (3). На рисунке представлены графики P_{loss} в зависимости от начального состояния системы:

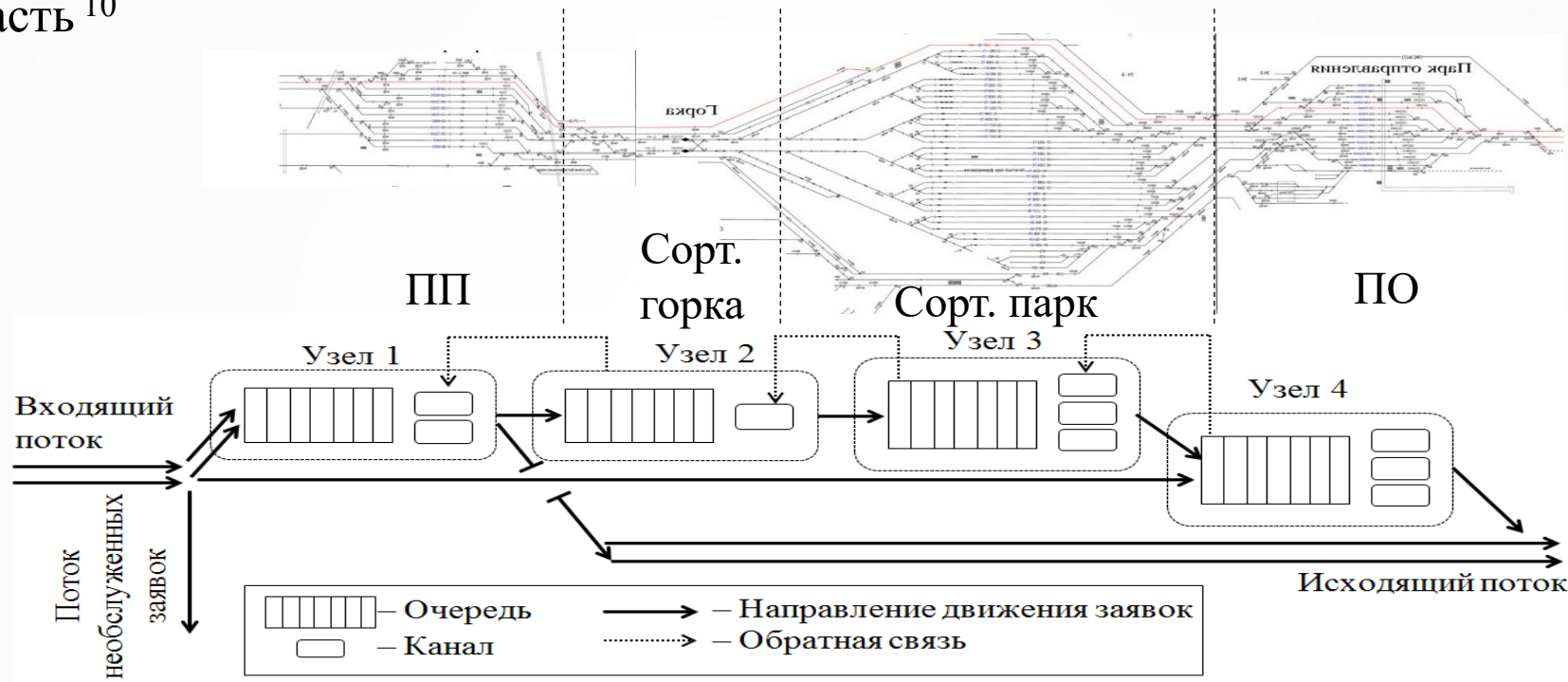
- 1) $P_{000}(0) = 1,$
- 2) $P_{2,5,2}(0) = 1,$
- 3) $P_{6,11,4}(0) = 1,$
- 4) $P_{3,5,0}(0) = 1,$
- 5) $P_{6,10,0}(0) = 1.$



Результаты моделирования

- Продолжительность переходных процессов является значимым фактором для железнодорожных станций. Минимальное время входа в стационарный режим составляет более четырех суток.
- Необходимо учитывать загрузку системы в начальный момент времени для оценки ее пропускной способности. В частности, после устранения аварии на грузовом дворе, что соответствует случаю полной загрузки фаз 2 и 3, период восстановления работы станции составляет более пяти суток, а вероятность отказа увеличивается в два раза по сравнению с предельными значениями.
- Если повышение объемов поездопотоков незначительно и имеет относительно малую длительность, то в большинстве случаев оно компенсируется вместимостью системы. Однако при высокой ее загрузке, в частности, после аварий, такое повышение приведет к быстрому переполнению парка прибытия и перегрузке в целом.

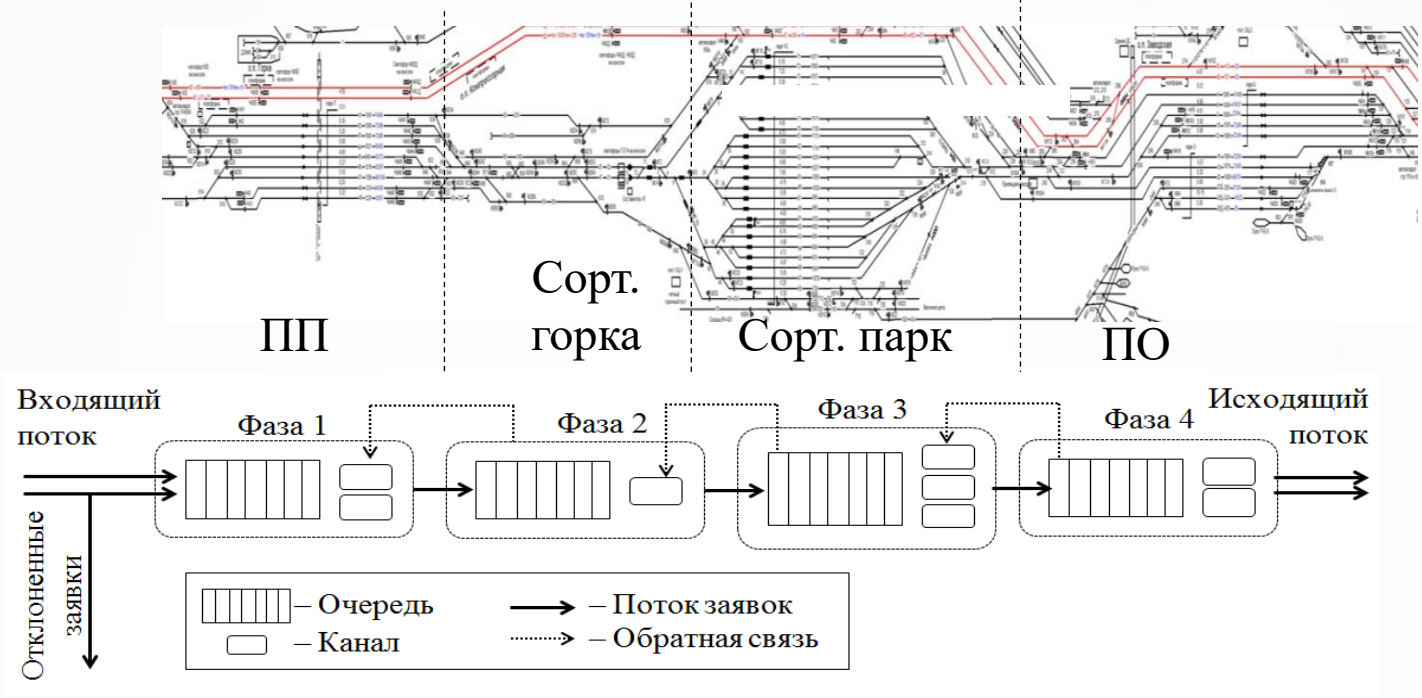
3) Сортировочная станция Екатеринбург-Сортировочный, Свердловская область¹⁰



Модель: Узел 1 - $BMAP / G^{X_1} / 2 / 716$; Узел 2 - $*/ G^{X_2} / 1 / 100$;
 Узел 3 - $*/ G^{X_3} / 3 / 2535$; Узел 4 - $*/ G^{X_4} / 3 / 980$

¹⁰ Жарков М.Л., Павидис М.М. Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания // Надежность. 2021. Т. 21. № 3. [25]

4) Сортировочная станция Иркутск-Сортировочный, Иркутская область ¹¹

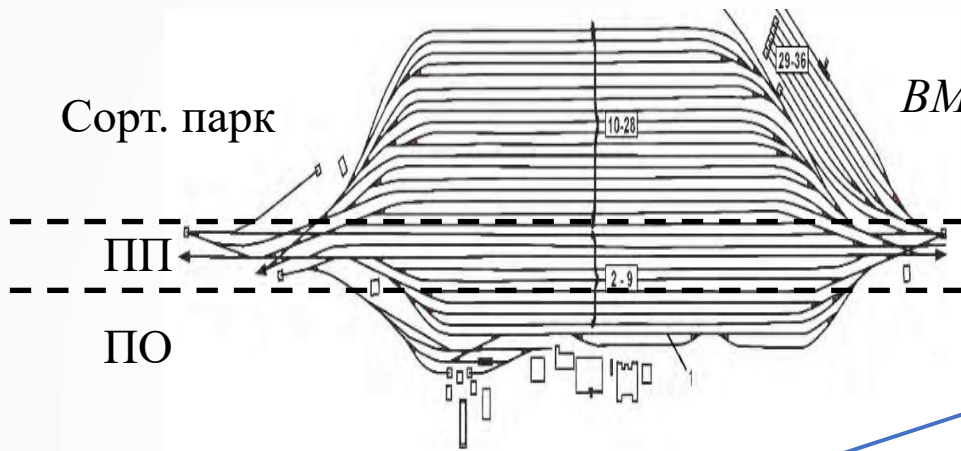


Модель работы в виде СеМО

$$BMAP / G^{X_1} / 2 / 720 \rightarrow * / G^{X_2} / 1 / 90 \rightarrow * / G^{X_3} / 3 / 3500 \rightarrow * / G^{X_4} / 2 / 750$$

¹¹ Zharkov M., Lempert A., Pavidis M. Simulation of Railway Marshalling Yards Based on Four-Phase Queuing Systems // In: Dudin A., Nazarov A., Moiseev A. (eds) ITMM. Queueing Theory and Applications. CCIS. 2020. Vol. 1391. Springer, Cham.

5) Сортировочная станция Ниш, Сербия¹²



Модель в виде СеМО:

$$BMAP / G^{X_1} / 1 / 219 \rightarrow * / G^{X_2} / 2 / 822 \rightarrow * / G^{X_3} / 2 / 159$$

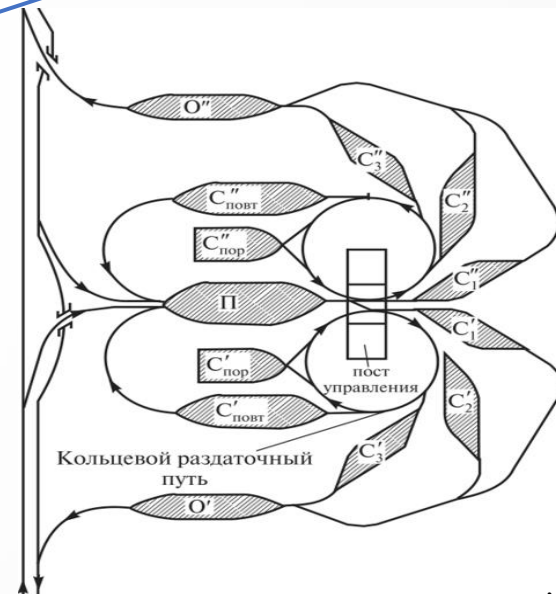
6) Сортировочная станция Кумагая, Япония¹²

Модель станции

$$BMAP / G^{X_1} / n_1 / m_1 \rightarrow * / G^{X_2} / n_2 / m_2 \rightarrow * / G^{X_3} / n_3 / m_3$$

Модель парков повторного обслуживания

$$BMAP / G^{X_1} / n_1 / m_2 \rightarrow * / G^{X_2} / n_2 / m_2$$

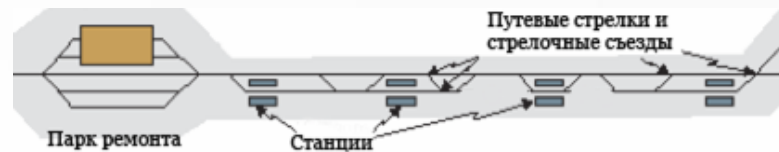


¹² Жарков М.Л., Лемперт А.А., Павидис М.М. Моделирование зарубежных сортировочных станций на основе теории массового обслуживания // Вестник УрГУПС. 2019. №3 (43).

Моделирование двухпутных железнодорожных участков

Свойства железнодорожного участка:

- Имеется несколько станций разных типов;
- Поезда между соседними станциями следуют по одному и более пути;
- От типа станции зависит число подсистем (парков), которые обладают различной пропускной способностью и вместимостью.



Модель движения поездов по участку железнодорожной сети строится в виде **СеМО** с несколькими независимыми входящими потоками заявок, в том числе и с ВМАР-потоками. Под **заявкой** понимается **поезд целиком**.

Работа станций в зависимости от типа моделируются **одной и более многоканальными СМО без очереди (узлами СеМО)**, где каналом обслуживания считается отдельный путь. Каналы обслуживают заявки по одной.

Путь между станциями (перегон) моделируется **двумя одноканальными СМО без очереди**. Время обслуживания в этих СМО – время движения поездов по данному пути.

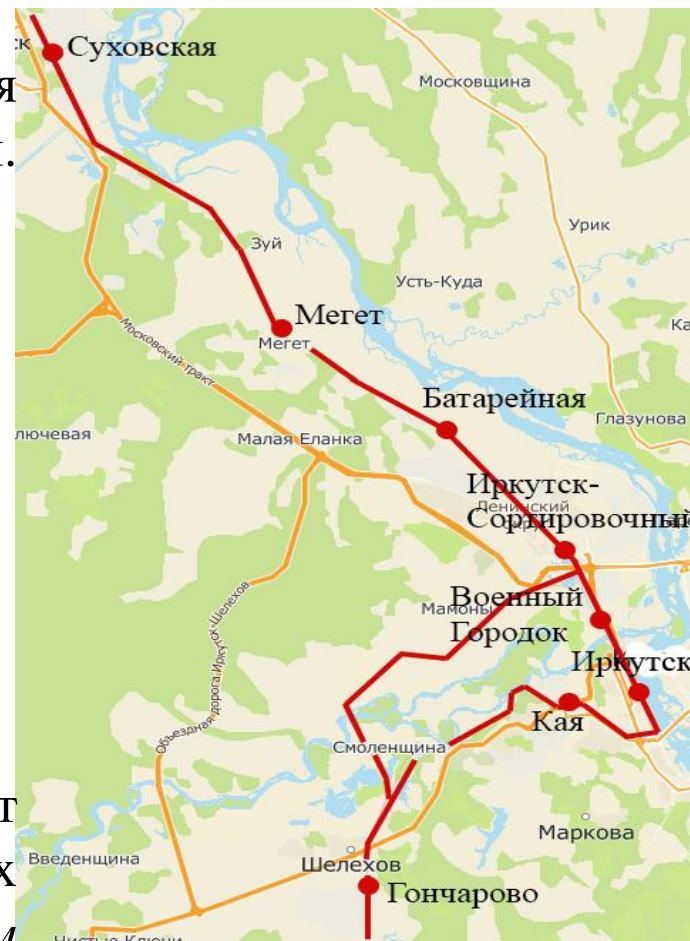
7) Иркутский железнодорожный узел

Применим предложенный подход для моделирования участка железнодорожной сети в Иркутской области.

Он включает следующие станции:

1. *Суховская* (большая грузовая)
2. *Меget* (промежуточная)
3. *Батарейная* (грузовая)
4. *Иркутск-Сортировочный* (сортировочная)
5. *Военный городок* (грузовая)
6. *Иркутск-Пассажирский* (пассажирская и грузовая)
7. *Кая* (грузовая)
8. *Гончарово* (грузовая)

По плану в среднем в сутки через участок проходит **85** транзитных, **16** местных и **18** пассажирских поездов в *восточном* и столько же в *западном* направлениях.



Модель включает **31** узел¹³:

Узлы 1, 3-20 и 22 (круги) – участки магистрали;

Узел 23 – Суховская (большая грузовая);

Узлы 2 и 21 – Мегет (промежуточная);

Узел 24 – Батарейная (грузовая);

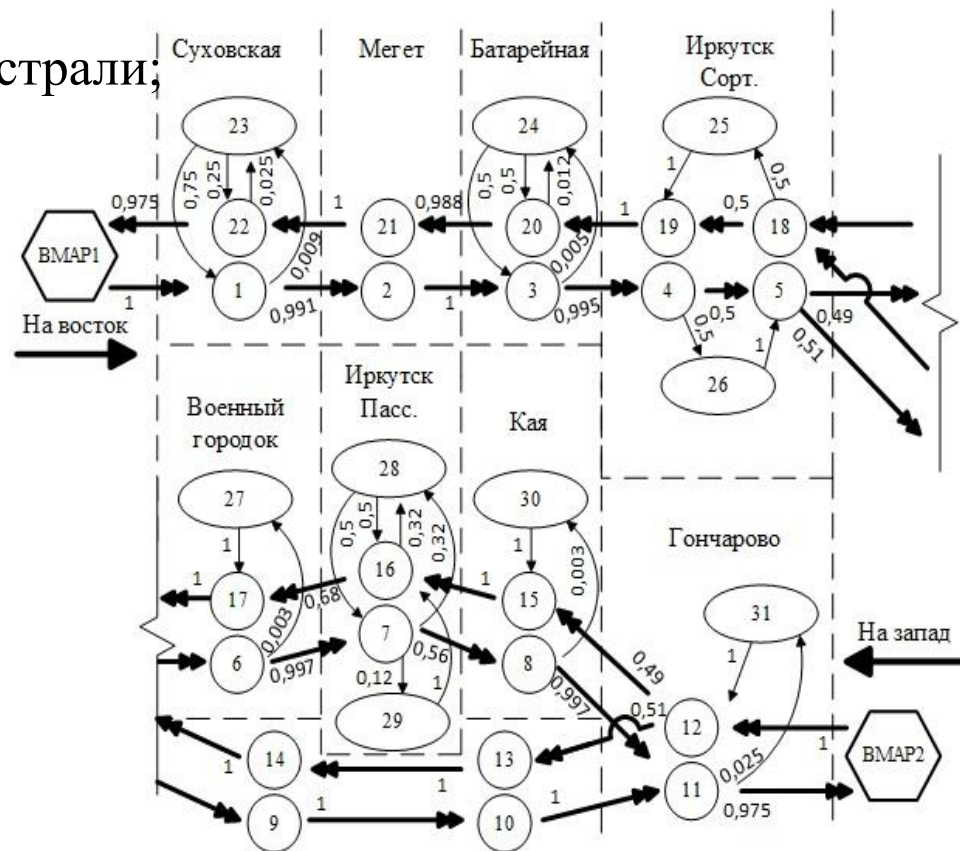
Узлы 25 и 26 – Иркутск-Сортировочный
(западная и восточная системы);

Узел 27 – Военный городок (грузовая);

Узел 28 и 29 – Иркутск-Пассажирский
(пассажирская и грузовая части);

Узел 30 – Кая (грузовая);

Узел 31 – Гончарово (грузовая).



¹³ Kazakov A., Lempert A., Zharkov M. *An approach to railway network sections modeling based on queuing networks* // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2023. Vol. 27. [30

Вычислительный эксперимент 1

В таблице представлены результаты моделирования при текущем поездопотоке, т.е. 119 поездов в сутки или 4,96 поезда в час для каждого направления.

Виртуальное время моделирования составило 30 дней.

	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 12	Node 15	Поступило заявок	
K	0,68	0,55	0,65	0,39	0,75	0,40	7101,0	
T_{node} (мин.)	21,28	40,86	23,66	9,47	9,98	9,85	Отклонено заявок	
T_l	84,8	941,4	2746,4	1669,6	3539,8	2360,8	5,3	
	Node 19	Node 21	Node 25	Node 26	Node 28	Node 29	P_{loss}	0,0008
K	0,61	0,49	3,99	3,99	1,16	0,97		
T_{node} (мин.)	21,83	6,02	920,28	961,76	3270,82	664,82	T_w (ч.)	2,21
T_l	234,2	1817,5	450,0	495,2	1768,8	497,8	T_E (ч.)	1,66

Здесь: T_w – среднее время прохождения поезда по главному ходу; T_E – среднее время прохождения поезда по участку через обходной путь; K – среднее число работающих каналов в узле; T_{node} – среднее время пребывания заявки в узле; T_l – продолжительность блокировки каналов узла за все время моделирования. (31)

Вычислительный эксперимент 2

В таблице представлены результаты моделирования при увеличении объемов транзитных поездопотоков на 15%, т.е. 87 и 82 грузовых поездов в сутки для восточного и западного направлений соответственно. Также увеличим поездопоток, который проходит через обходной путь на 20%.

	Node 3	Node 4	Node 5	Node 6	Node 12	Node 15	Поступило заявок	
K	0,73	0,76	0,78	0,39	0,84	0,41	7758,5	
$T_{node} (мин.)$	20,88	21,63	23,89	9,54	10,37	9,88	Отклонено заявок	
T_l	258,8	1738,4	2881,8	1840,2	4301,0	2442,4	2,3	
	Node 19	Node 21	Node 25	Node 26	Node 28	Node 29	P_{loss}	0,0003
K	0,75	0,52	3,98	3,98	1,19	0,98		
$T_{node} (мин.)$	22,11	5,70	976,13	1000,48	3397,68	677,15	$T_W (ч.)$	1,89
T_l	143,0	0	724,4	768,4	1858,6	529,2	$T_E (ч.)$	1,69

Время движения поезда по главному ходу на 17.5% в среднем (T_W , T_E), при этом загрузка обходного пути увеличилась незначительно, на 2%. Появились и негативные эффекты: загрузка станции Иркутск-Сортировочный приблизилась к максимальной; общее время «простоя» в сутки увеличилось на 7.8% в целом. { 32 }

Результаты моделирования

При текущем плановом поездопотоке (119 пар п./сут.) Иркутский железнодорожный узел имеет достаточную пропускную способность. Среднее число работающих каналов (K) в Узлах 25 и 26 приближается к максимальному их числу (4 шт.), следовательно загрузка станции Иркутск-Сортировочный близка к максимальной.

При **увеличении** объемов транзитных поездопотоков **на 15% (131 пар п./сут.)** среднее время «простоя» в сутки составляет $\sum_{k=0}^{11} T_l / 30 / 131 = 2$ мин. на поезд. Этот «простой» образуется из-за загрузки станции Иркутск-Сортировочный, а также из-за значительного местного поездопотока на главном ходу.

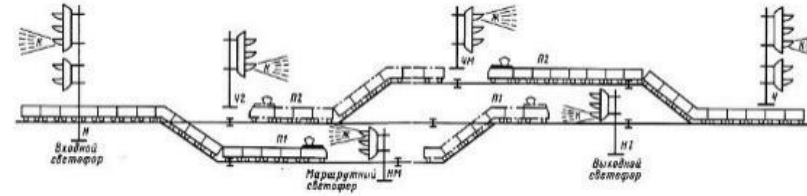
При увеличении объемов транзитных поездопотоков на 15% и росте доли поездов, следующих по обходному пути на 20%, среднее время «простоя» составляет 1,66 мин. на поезд. При этом загрузка обходного пути увеличилась незначительно, на 2%.

Таким образом, Иркутский железнодорожный узел имеет запас пропускной способности, благодаря которому возможно увеличить объем потока транзитных поездов на 15%. Однако для этого потребуются перенаправить большую часть грузовых поездов по обходному пути и оптимизировать технологические процессы на станции Иркутск-Сортировочный.

Моделирование однопутных железнодорожных участков

Поезда следуют между станциями по одному пути в двух направлениях. Поэтому для увеличения пропускной способности линий применяются:

1. «Разъезды» - небольшие станции с 2 или 3 путями, предназначенные для пропуска встречных поездов на перегоне располагаются.

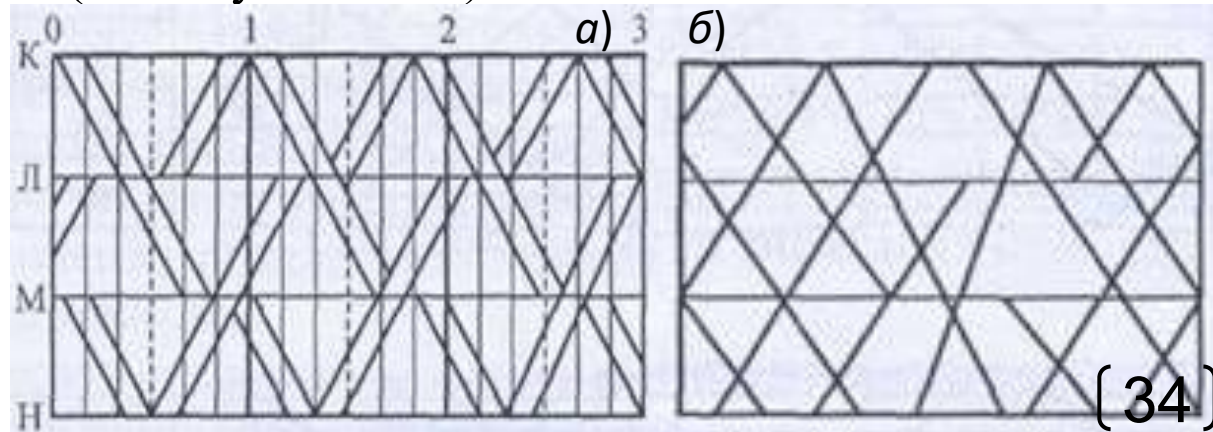


2. Частично-пакетный график. В этом случае поезда поступают (отправляются) на станцию группами от 1 до 3 поездов, следующих друг за другом с относительно небольшим интервалом времени (минимум 10 мин.).

На рис. представлены графики движения поездов:

а) для однопутного участка (пакет включает 2 поезда), *линии не могут пересекаться вне станций;*

б) для двухпутного участка;



Для моделирования движения поездов по однопутному железнодорожному участку применяется **полуоткрытая сеть массового обслуживания (ПСеМО)**.

В ней часть заявок поступают из внешнего источника (**внешние**) и покидают систему после обслуживания, другая часть циркулирует внутри системы и не может ее покинуть (**внутренние**). За счет такого подхода **учитываются движение транзитных поездов** через участок и местных поездов, число которых фиксировано, а маршрут является кольцевым.

Каждый узел ПСеМО описывает структурный элемент участка.

Различные маршруты движения поездов по участку учитываются с помощью нескольких типов заявок.



Для описания входящих материальных потоков применяется **ВММАР-поток** – модификация ВМАР-потока, допускающая поступление групп заявок с заданным типом.

Моделирование однопутных железнодорожных участков

8) Железнодорожный участок Киренга – Северобайкальск – Новый Уоян, далее - Северобайкальский участок ¹⁴.

Характеристики:

- Протяженность 351 км, из которых **231 км однопутные**,
- На нем расположено **8 станций** (белые круги), **15 разъездов** (черные круги) и 4 тоннеля,
- Участок проходит по Байкальской природной территории, **36 км вдоль берега Байкала**.



¹⁴ Bychkov I., Kazakov A., Lempert A., Zharkov M., *Modeling and Numerical Analysis of the Severobaikalsk Section of the Baikal–Amur Mainline Considering Environmental Points // Sustainability*. 2025. Vol. 17(2).

Структура Северобайкальского участка

Участок включает:
8 станций (белые круги);
15 разъездов (черные круги) – станций, имеющих до трех путей и предназначенных для пропуска встречных поездов при однопутном движении.

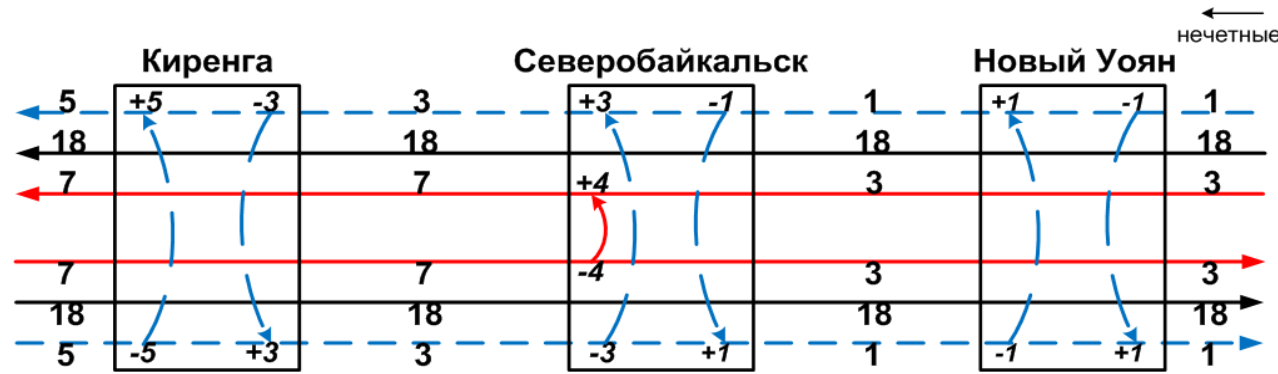
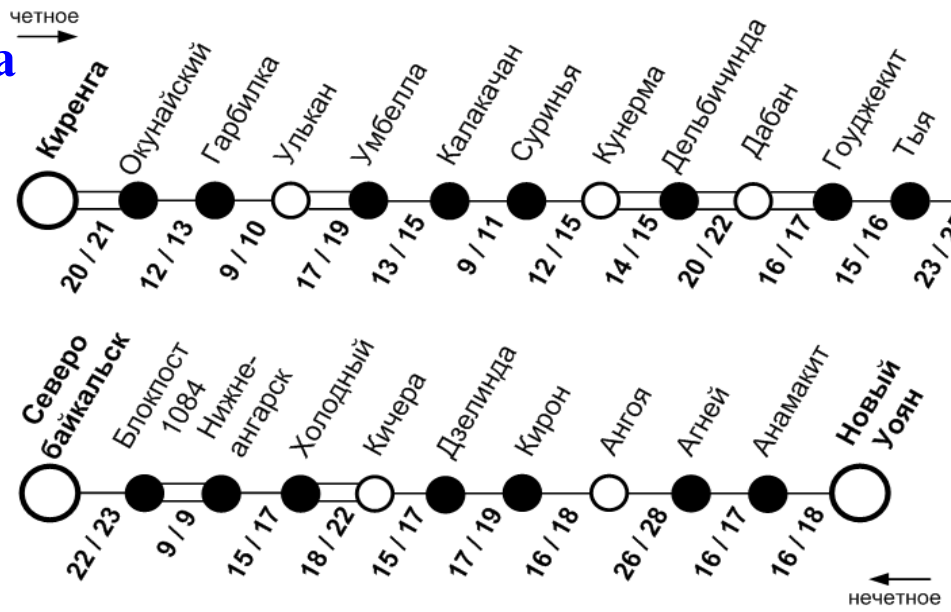


График движения поездов в 2023 году.

Математическое описание входящих поездопотоков

Поезда на рассматриваемый участок поступают с двух направлений, каждое из которых описывается отдельным ВММАР-потокком:

ВММАР-1 – нечетные направление, 30 поездов/сут. (п./сут.)

$$D_0 = \begin{pmatrix} -1,209 & 0 \\ 0 & -1,384 \end{pmatrix}, D_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 0,7724 & 0,2347 \\ 1,0615 & 0,3225 \end{pmatrix}, D_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$
$$D_1^{(3)} = \begin{pmatrix} 0,1549 & 0,0470 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, D_1^{(4)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

ВММАР-2 – четное направление, 22 п./сут.

$$D_0 = \begin{pmatrix} -0,899 & 0 \\ 0 & -1,028 \end{pmatrix}, D_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, D_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 0,7410 & 0,1166 \\ 0,8882 & 0,1398 \end{pmatrix}, \quad (6)$$
$$D_1^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, D_1^{(4)} = \begin{pmatrix} 0,0357 & 0,0056 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Верхние строки в матрицах описывают поступление грузовых поездов, а нижние – пассажирских.

Математическое описание движения поездов

Работа крупных станций моделируются несколькими узлами СеМО:

Киренга – 3 узла: Узел 1 (пасс.) – ВММАР-1/G/1/2; Узел 2 (транзит) – ВММАР-1/G/5/2; Узел 3 (грузовой двор) – ВММАР-1/G/5/3.

Северобайкальск – 4 узла: Узел 27 (пасс.) – */G/4/0; Узел 28 (транзит) – */G/9/0; Узел 29 (местн.) – */G/1/0; Узел 30 (грузовой двор) – */G/1/0.

Новый Уоян – 3 узла: Узел 49 (пасс.) – ВММАР-2/G/3/0; Узел 50 (транзит) – ВММАР-2/G/6/0; Узел 51 (грузовой двор) – ВММАР-2/G/1/1.

Небольшие станции (до 5 путей) описываются одним узлом:

Улькан и Кичера (Узлы 8 и 39) – */M/5/0; **Кунерма** (Узел 15) – */M/3/0;

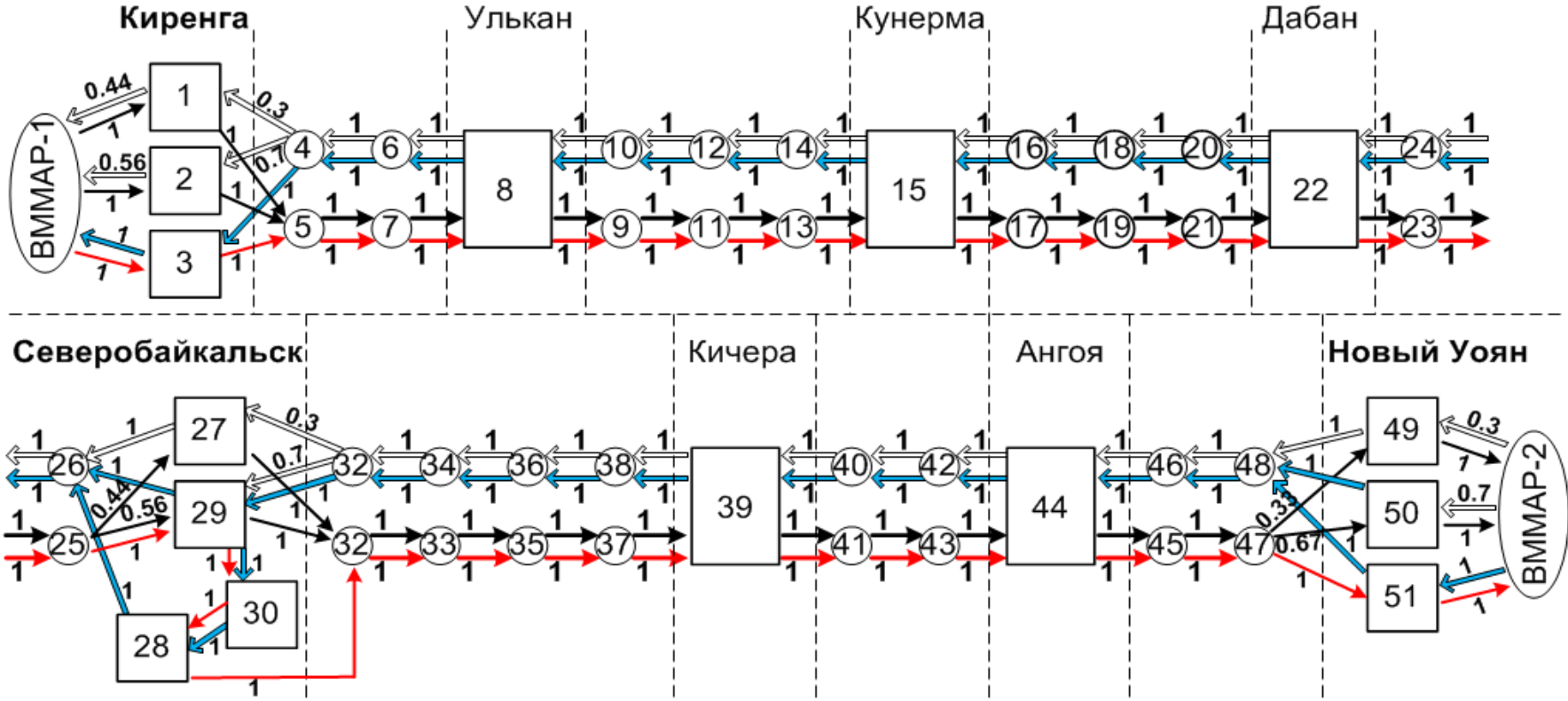
Дабан и Ангоя (Узлы 22 и 44) – */M/4/0.

Число каналов в СМО равно **количеству путей** в соответствующем парке или станции.

Перегоны описываются **парами узлов** – **одноканальными СМО**.

Использование двух узлов позволяет отобразить в модели ситуацию, когда поезд останавливается на разъезде и пропускает встречный поезд.

Математическое описание маршрутов поездов



На рис. квадраты соответствуют станциям и их частям, круги – перегонам; веса белых стрелок задают ненулевые элементы маршрутной матрицы P_1 , веса черных стрелок – P_2 , веса синих стрелок – P_3 , веса красных стрелок – P_4 .

Вычислительный эксперимент 1

Оценка загрузки объекта при целевых параметрах в 2023 году (**52 п./сут.**), нахождение максимальной пропускной способности участка и узких мест в его структуре. Виртуальное время моделирования 60 дней.

	D	V	P_{loss}	T_1 (ч.)	T_2 (ч.)	T_b (мин.)	$max b_y$ (мин.)
1	51.6	3095.7	0.0077	8.66	8.97	72.38	38.88 (Узел 29)
2	54.7	3281.0	0.0085	8.66	9.02	77.87	44.05 (Узел 29)

Здесь и далее: D – среднее число поступивших заявок в сутки; V – сумма заявок, поступивших в систему; T_1 и T_2 – среднее время пребывания заявок в СеМО, которые описывают движение пассажирских и транзитных грузовых поездов в нечетном и четном направлениях; T_b – среднее суммарное время (в мин) блокировки одной заявки при прохождении всех узлов в одном направлении; $max b_y$ – максимальное среднее значение времени блокировки среди всех узлов.

Северобайкальский участок имеет запас пропускной способности на 6,5% больше расчетной, что позволяет пропустить по нему до 27 пар п./сут. в штатном режиме. На участке имеются три узких места: перегоны Гоуджекит – Северобайкальск; Северобайкальск – Блокпост и Ангоя – Агней.

Вычислительный эксперимент 2

Оценка эффективности применения частично пакетного графика движения поездов. Четверть транзитных грузовых поездов прибывают в составе пакета, включающий 2 поезда. Пассажирские и местные грузовые поезда в пакеты не включаются.

	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>V</i>	<i>P_{loss}</i>	<i>T₁</i> (ч.)	<i>T₂</i> (ч.)	<i>T_b</i> (мин.)	<i>max b_y</i> (мин.)
1	43,3	50,0	2596,5	0,0074	9,15	8,98	47,28	14,93 (Узел 27)
2	44,6	51,8	2678,3	0,0105	9,29	9,12	50,79	15,74 (Узел 27)

Здесь: *C* – среднее число поступивших групп заявок в сутки.

Введение частично пакетного графика движения позволяет уменьшить время блокировки работы каналов на 29.8% в среднем для каждого узла по сравнению с экспериментом 1.

Тем не менее, вероятность отказа, наоборот, значительно выше, из-за недостаточной вместимостью узлов 1, 2, 49 и 50, т.е. недостаточным количеством путей на станциях Киренга и Новый Уоян.

Результаты исследования Северобайкальского участка

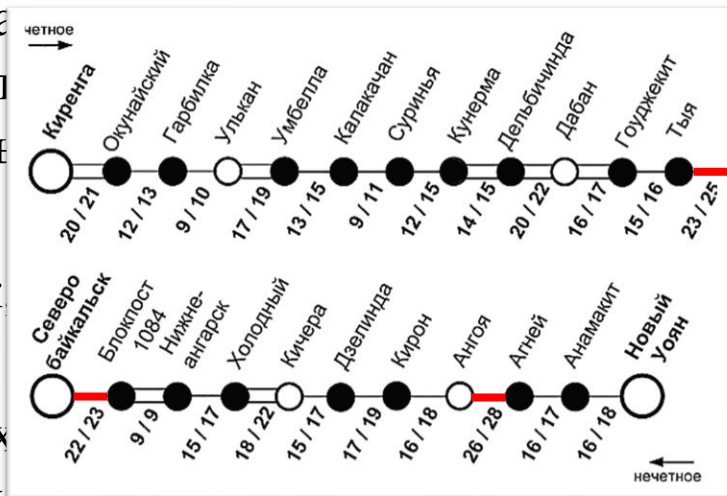
Введение частично пакетного графика нецелесообразно, поскольку не позволяет увеличить пропускную способность сколь-нибудь существенно.

Проблемные перегоны: Тыя – Северобайкальск
Северобайкальск – Блокпост и Ангоя – Агней.

Наиболее логичным видится **создание на трех проблемных перегонах двухпутного сообщения**, что в результате позволит увеличить пропускную способность участка с 26 до **32 пар п./сут.**

В этом случае потребуется проложить 65 км путей и расширить четыре туннеля, которые проходят вдоль берега Байкала.

Единственным эффективным способом существенно увеличить пропускную способность остается создание двухпутного сообщения на всем участке. [43]



**Структурная схема участка с
изображением найденных
узких мест**

Заключение

В докладе представлена методика моделирования работы транспортных систем, которая основана на теории массового обслуживания. Отличительная особенность методики заключается в следующем.

- Для описания поступающих материальных потоков применяются сложные потоки заявок, в частности, модель ВМАР-поток.
- Для отображения процесса движения материальных потоков по системе используются сети массового обслуживания с разными типами узлов.
- Анализ получаемых моделей выполняется с помощью имитационного моделирования.

Разработанный программно-алгоритмический инструмент был использован для исследования различных по структуре и назначению транспортных объектов. На основе полученных результатов показано, что методы теории массового обслуживания в настоящее время актуальны и являются эффективным инструментом анализа и прогнозирования широкого спектра транспортных систем.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!