



Особенности нормирования маневровой работы в имитационной модели станции



Михаил ШМУЛЕВИЧ
Mikhail I. SHMULEVICH

Алексей СТАРИКОВ
Aleksey E. STARIKOV



Шмелевич Михаил Израилевич — доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), заместитель директора ЗАО «ПромтрансНИИпроект», Москва, Россия.
Стариков Алексей Евгеньевич — инженер ЗАО «ПромтрансНИИпроект», Москва, Россия.

Features of Regulation of Shunting Operations in the Station Simulation Model (текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 206)

При построении имитационной модели железнодорожной станции или узла одним из ее обязательных элементов является продолжительность выполнения маневровой работы. С помощью системы моделирования AnyLogic для оценки этой позиции необходимо рассмотреть метод учета разгона и замедления маневрового состава при выполнении полурейса. Причем используемый метод должен соответствовать и правилам расчета, принятым в системе AnyLogic, и требованиям действующих инструкций по нормированию маневровой работы (с учетом возникающих ограничений). В статье изложен способ решения такой задачи, удовлетворяющий этим требованиям. Одновременно предлагается корректировка некоторых неточностей, содержащихся в действующей методике.

Ключевые слова: железная дорога, станция, маневровая работа, нормирование, продолжительность полурейса, моделирование, система AnyLogic.

Одним из методов оптимизации проектных и управленческих решений при анализе инфраструктуры и технологии работы сложных транспортно-логистических систем, к которым относятся железнодорожные станции и узлы, является имитационное моделирование [1–3]. Оно имеет свою специфику.

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ ANYLOGIC

Отличительной чертой моделирования в среде AnyLogic [4–7], о чем пойдет речь далее, считается то, что применительно к железнодорожным системам продолжительность движения транспортных средств не задается в явном виде, а вычисляется, исходя из расстояния передвижения (длины перегона, станционного пути, маршрута следования по станции) и скорости перемещения [6].

С этой целью в модель вносится масштабная схема объекта. В профессиональной версии AnyLogic 7.2 реализована возможность экспорта чертежа станции, построенного в формате .shp, в модель. В версии AnyLogic 7.3 предполагается реализовать вариант непосредственного экс-

порта чертежей, построенных в AutoCAD (формата .dxf). В упрощенном варианте план станции строится по выбранным характерным точкам.

Однако моделирование в AnyLogic маневровой работы, выполняемой на вытяжном пути, требует учета не только продолжительности движения с установленной скоростью, но и продолжительности разгона и замедления (ускорения и торможения маневрового состава) [8], то есть ко времени, полученному в результате деления расстояния на скорость, следует добавить продолжительность разгона и замедления при выполнении каждого полурейса.

При этом полученная таким путем (в процессе моделирования) продолжительность полурейса ($t_{n/p}^M$) должна совпадать с продолжительностью полурейса $t_{n/p}$, рассчитываемой в соответствии с официально принятыми нормативными документами (например, с инструкцией по нормированию маневровой работы и выпущенных на ее основе норм [9,10]), без чего результаты моделирования не могут считаться легитимными.

Для выполнения этого условия требуется найти такой метод расчета ускорения и торможения в модели, при котором $t_{n/p}^M = t_{n/p}$.

В соответствии с [1] продолжительность полурейса равна:

$$t_{n/p} = (\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m) \cdot \frac{V_M}{2} + \frac{3,6 \cdot l_{np}}{V_M}, \text{ с}, \quad (1)$$

где α_{pm} — коэффициент, учитывающий время, необходимое для изменения скорости движения локомотива на 1 км/ч при разгоне и торможении, $\alpha_{pm} = 0,76 \frac{\text{с}}{\text{км/ч}}$;

β_{pm} — коэффициент, учитывающий дополнительное время на изменение скорости движения каждого вагона в маневровом составе на 1 км/ч при разгоне и торможении, $\beta_{pm} = 0,13 \frac{\text{с}}{\text{км/ч}}$;

m — количество вагонов в маневровом составе;

V_M — допустимая скорость движения при маневрах, км/ч;

l_{np} — длина полурейса, м.

Определим продолжительность полурейса при моделировании.

Длину полурейса можно найти по формуле:

$$l_{np} = l_1 + 2 \cdot l_2, \text{ м}, \quad (2)$$

где l_1 — расстояние, пройденное маневровым составом с постоянной скоростью V_M , м;

l_2 — расстояние, пройденное маневровым составом с ускорением или торможением, м;

$$l_1 = V_M \cdot t_1, \text{ м}, \quad (3)$$

где V_M — допустимая скорость движения при маневрах, м/с;

t_1 — продолжительность следования с постоянной скоростью V_M , с;

$$l_2 = a \cdot \frac{t_2^2}{2}, \text{ м}, \quad (4)$$

где a — ускорение или торможение маневрового состава (при расчетах и дальнейшем моделировании целесообразно задавать ускорение и торможение равными, то есть $a_p = a_m = a$), м/с²;

t_2 — продолжительность следования с ускорением или торможением, с;

$$t_2 = \frac{V_M}{a}, \text{ с}, \quad (5)$$

$$l_2 = a \cdot \frac{\left(\frac{V_M}{a}\right)^2}{2} = \frac{V_M^2}{2a}, \text{ м}. \quad (6)$$

Продолжительность полурейса при моделировании определяется по формулам:

$$t_{n/p}^M = t_1 + 2 \cdot t_2, \text{ с}, \quad (7)$$

$$t_1 = t_{n/p}^M - 2 \cdot t_2 = t_{n/p}^M - 2 \cdot \frac{V_M}{a}, \text{ с}, \quad (8)$$

$$l_1 = V_M \cdot \left(t_{n/p}^M - 2 \cdot \frac{V_M}{a}\right) = V_M \cdot t_{n/p}^M - 2 \cdot \frac{V_M^2}{a}, \text{ м}, \quad (9)$$

$$l_{np} = l_1 + 2 \cdot l_2 = V_M \cdot t_{n/p}^M - 2 \cdot \frac{V_M^2}{a} + 2 \cdot \frac{V_M^2}{2a} = V_M \cdot t_{n/p}^M - \frac{V_M^2}{a}, \text{ м}. \quad (10)$$

Отсюда

$$t_{n/p}^M = \frac{l_{np}}{V_M} + \frac{V_M}{a}, \text{ с}. \quad (11)$$

При задании скорости маневровых передвижений в км/ч формула примет вид:

$$t_{n/p}^M = \frac{3,6 \cdot l_{np}}{V_M} + \frac{V_M}{3,6 \cdot a}, \text{ с}. \quad (12)$$



Из требования совпадения расчетной продолжительности полурейса и продолжительности в модели ($t_{п/р} = t_{п/р}^м$) получаем:

$$(\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m) \cdot \frac{V_m}{2} + \frac{3,6 \cdot l_{np}}{V_m} = \frac{3,6 \cdot l_{np}}{V_m} + \frac{V_m}{3,6a}, \quad (13)$$

откуда

$$a = \frac{2}{3,6 \cdot (\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m)}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что ускорение и торможение при маневрах не зависят от допустимой скорости движения (V_m), но зависят от количества вагонов в маневровом составе (m).

Таким образом, при моделировании маневровой работы на вытяжном пути в среде AnyLogic ускорение и торможение состава следует задавать в соответствии с формулой (14) с помощью выражения: $a = 2 / (3,6 \cdot (0,76 + 0,13 \cdot (\text{trainSizeWithLoco} - 1)))$, где *trainSizeWithLoco* — параметр модели, отражающий количество вагонов в составе с учетом локомотива.

В среде моделирования AnyLogic возможен и другой подход к решению данной задачи: не учитывать ускорение и торможение состава, а моделировать движение с постоянной скоростью маневрового состава V_m . При этом для соблюдения требования о совпадении модельного времени с расчетным после каждого блока, соответствующего очередному полурейсу, необходимо ставить блок «delay», определяющий продолжительность задержки t_z для учета разгона и замедления в модели. Продолжительность задержки в блоке «delay» фиксируется с учетом скорости движения при маневрах и количества вагонов в составе по формуле:

$$t_z = (\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m) \cdot \frac{V_m}{2}, \text{ с.} \quad (15)$$

Применение способа с включением в модель блока «delay» демонстрирует абсолютно точное совпадение результатов с расчетной формулой, а способ с расчетом ускорения состава по формуле (14) дает результаты, приближенные к расчетным.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ФОРМУЛ

Исследование описанного подхода на модели показало, что оба способа учета ускорения (с использованием блока «delay»

и расчетом задержки по формуле (15), либо с расчетом ускорения по формуле (14)), основанные на действующей методике [10], дают неверные результаты расчета продолжительности маневров при значениях расчетной скорости, превышающих определенную величину.

Рассмотрим графики изменения продолжительности маневровой работы, рассчитанной по инструкции [10] и предлагаемому для моделирования методу с использованием расчетного ускорения и замедления.

Рис. 1 и 2 отражают зависимость продолжительности маневровой работы от скорости движения при различных длинах полурейсов (соответственно 250 и 500 м) и одинаковой длине маневрового состава (20 вагонов).

На рис. 3 продолжительность полурейса, рассчитанная по действующим методическим указаниям (МУ) для условий, приведенных на рис. 1, и обозначенная $t(V, a)$, разложена на две составляющие: продолжительность движения при установившейся скорости $t(V)$ и продолжительность движения с ускорением $t(V(a))$.

Как показывают полученные результаты, оба метода, в том числе и действующий в соответствии с инструкцией ОАО «РЖД», дают неверные результаты при скоростях движения, превышающих скорость в точке перегиба кривой на рис. 1 и 2. По расчету продолжительность маневров увеличивается, но в действительности должна оставаться одинаковой. В варианте расчета с ускорением продолжительность уменьшается, что также искажает результаты.

Из графиков следует, что при расчете по действующей методике нормирования маневровой работы с увеличением скорости при постоянном расстоянии и количестве вагонов продолжительность полурейса вначале уменьшается до определенного значения, а затем возрастает.

Участок графика после перегиба не имеет смысла — такой скорости маневровый состав при заданной длине пути достичь не сможет. То же можно сказать и про участок графика при определении продолжительности полурейса с применением в модели расчетного ускорения.

Таким образом, при расчетах необходимо накладывать ограничение на расчетную

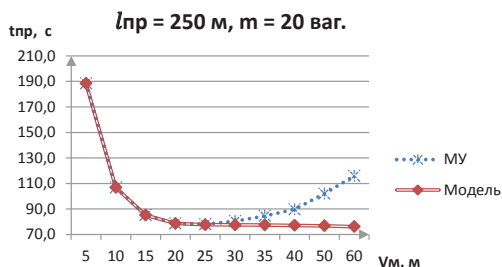


Рис. 1. Зависимость продолжительности полурея от допустимой скорости движения маневрового состава при $l_{пр} = 250$ м.

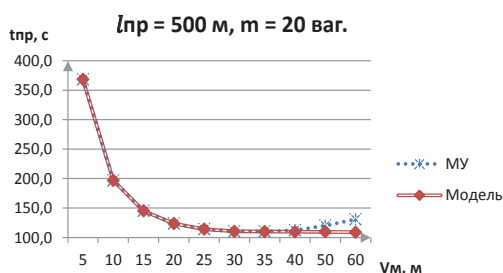


Рис. 2. Зависимость продолжительности полурея от допустимой скорости движения маневрового состава при $l_{пр} = 500$ м.

скорость, в противном случае мы получаем неверную продолжительность полурея — большую при расчете с использованием задержки (t_3) или меньшую при использовании расчетного ускорения.

ОГРАНИЧЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СКОРОСТИ

В соответствии с «классическим» подходом продолжительность полурея составляет:

$$t_{n/p} = t_p + t_{уст} + t_{зам}, \quad (16)$$

где t_p — время разгона;

$t_{уст}$ — время движения с установившейся скоростью, в наших обозначениях t_1 ;

$t_{зам}$ — время замедления.

При ограниченных длинах маневрового полурея $l_{пр}$ и допустимой скорости движения V_m маневровый состав не успевает достичь скорости V_m и средний член из формулы (16) выпадает. После разгона и достижения некоторой скорости V_{max} начинается замедление, что гарантирует остановку на расстоянии $l_{пр}$.

Определим предельную скорость V_{max} , которую может развить маневровый состав на ограниченном расстоянии с постоянным ускорением ($a=const$, $l=const$). Это значение соответствует значениям графика функции в точке перегиба на рис. 1–3.

В приведенных условных обозначениях $l_{пр} = 2 \cdot l_2$; ($l_1 = 0$),

$$t_{min} = 2 \cdot t_2; (t_1 = 0),$$

$$t_2 = \frac{V_{max}}{a},$$

$$l_{пр} = 2 \cdot l_2 = 2 \cdot a \cdot \frac{t_2^2}{2} = a \cdot \left(\frac{V_{max}}{a} \right)^2 = \frac{V_{max}^2}{a}, \quad (17)$$

$$V_{max} = \sqrt{a l_{пр}}, \text{ м/с}, \quad (18)$$

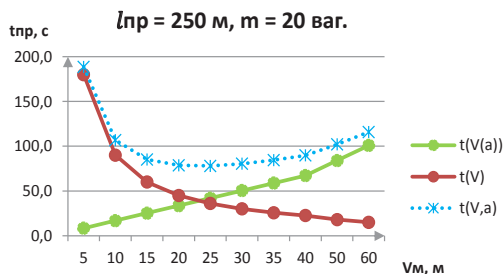


Рис. 3. Зависимость составляющих продолжительности полурея от допустимой скорости движения маневрового состава.

$$V_{max} = 3,6 \cdot \sqrt{a l_{пр}} =$$

$$\sqrt{\frac{2 \cdot 3,6 \cdot l_{пр}}{(\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m)}} = \sqrt{\frac{7,2 \cdot l_{пр}}{(\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m)}}, \text{ км/ч.} \quad (19)$$

Итак, ограничение, накладываемое на расчетную скорость при выполнении маневрового полурея, имеет вид:

$$V_{расч} \leq V_{max} = \sqrt{\frac{7,2 \cdot l}{(\alpha_{pm} + \beta_{pm} \cdot m)}}, \text{ км/ч.} \quad (20)$$

С учетом допустимой по ПТЭ скорости маневровых передвижений на конкретной станции $V_{ман}$ расчетная скорость составляет:

$$V_{расч} = \min\{V_{max}; V_{ман}\}. \quad (21)$$

О КОРРЕКТИРОВКЕ МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ

В качестве иллюстрации к результату, возможному при отсутствии ограничений (19–21), рассмотрим примеры использования методических указаний, с помощью которых определяется продолжительность выполнения маневровых операций на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта.



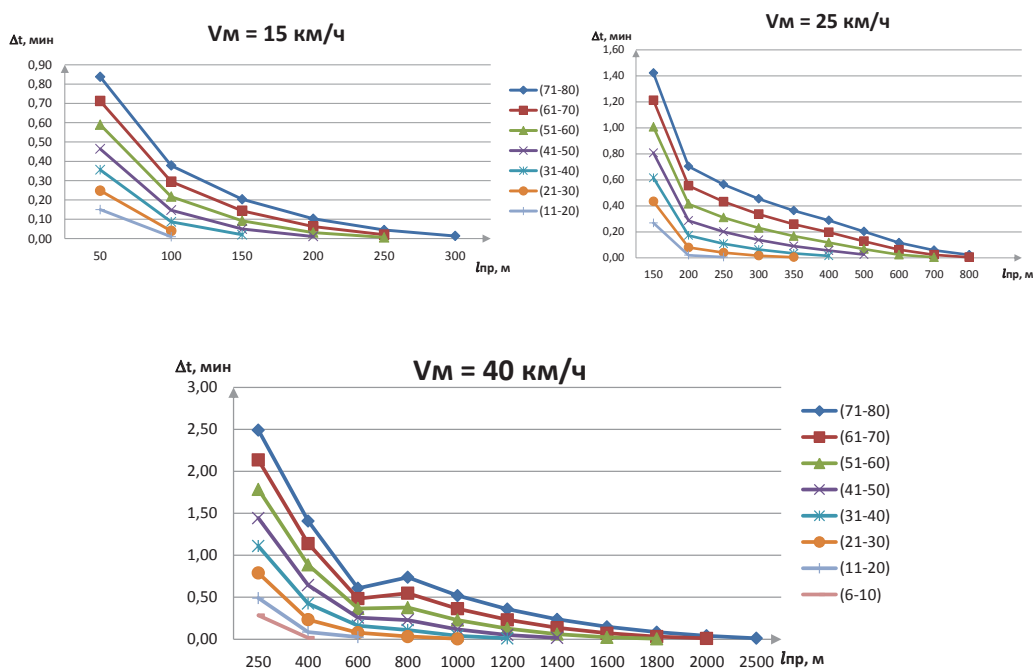


Рис. 4. Отличие откорректированной продолжительности полурейса от полученной по действующей инструкции.

В методических указаниях для расчета норм времени на маневровые работы приведены таблицы значений продолжительности полурейсов при различных скоростях движения маневрового состава, количестве вагонов и длине полурейса. Поскольку в этих таблицах необходимо ограничение на максимально допустимую скорость не учитывалось, некоторые из названных в них значений не верны.

В таблицах [1–3] утвержденных норм времени из методических указаний [10] в правой верхней части отмечены поля, в которых выделены неверные результаты.

Таблицы (4–6) пересчитаны для тех же условий с учетом ограничения скорости. В них выделены поля, содержащие откорректированные значения продолжительности маневрового полурейса.

Отклонение реальных (откорректированных) результатов от приведенных в действующей инструкции [10] при сопоставлении таблиц приведены на рис. 4. Отклонение тем значительнее, чем меньше длина полурейса и больше количество вагонов в составе. Отсутствие отличий отвечает тем сочетаниям величин V_m , $l_{пр}$ и n , при которых маневровый состав может достичь скорости V_m .

ЛИТЕРАТУРА

1. Lin, E. and C. Cheng. YardSim: A Rail Yard Simulation Framework and its Implementation in a Major Railroad in the U.S. In: Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Edited by M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin and R. G. Ingalls. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009, pp. 2532–2541.
2. Козлов П. А. О методических расчетах систем железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 12. – С. 28–32.
3. Clausen, U., Goedicke, I. 2012. Simulation of Yard Operations and Management in Transshipment Terminals. In: Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference.
4. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: Учебно-метод. пособие. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – 88 с.
5. The AnyLogic Company. 2015. AnyLogic – Multimethod Simulation Software. <http://www.anylogic.com>. Last accessed 29.10.2015.
6. Petersen, E. R. 1977. Railyard Modeling: Part I. Prediction of Put-Through Time. Transportation Science, Vol. 11, No. 1, February.
7. Baugher Roger. Application of AnyLogic to Railroad Operation Analysis. AnyLogic Conference, December, 2013.
8. Шмудевич М. И., Стариков А. Е. Структура имитационной модели промышленных железнодорожных станций и ее реализация в системе AnyLogic // Промышленный транспорт XXI век. – 2015. – № 1.
9. Нормы времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожных станциях ОАО «РЖД», нормативы численности бригад маневровых локомотивов. Утверждено ОАО «РЖД» 08.02.2007 г.
10. Методические указания по расчету норм времени на маневровые работы, выполняемые на железнодорожном транспорте. Утверждено МПС РФ 19.03.1998 г.

Таблица 1

Нормы времени на полурейсы заездов маневровых локомотивов и перестановок вагонов и составов со скоростью 15 км/ч (в минутах) по действующей инструкции											
Длина полурейса, м		Заезд маневрового локомотива	Перестановка вагонов и составов при количестве вагонов в составе								
от	до		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	50	0,20	0,24	0,33	0,45	0,61	0,77	0,93	1,10	1,26	1,42
51	100	0,40	0,45	0,53	0,65	0,81	0,97	1,14	1,30	1,46	1,62
101	150	0,60	0,65	0,73	0,85	1,01	1,17	1,34	1,50	1,66	1,82
151	200	0,80	0,85	0,93	1,05	1,21	1,37	1,54	1,70	1,86	2,02
201	250	1,00	1,05	1,13	1,25	1,41	1,57	1,74	1,90	2,06	2,22
251	300	1,20	1,25	1,33	1,45	1,61	1,77	1,94	2,10	2,26	2,42
301	350	1,40	1,45	1,53	1,65	1,81	1,97	2,14	2,30	2,46	2,62
351	400	1,60	1,65	1,73	1,85	2,01	2,17	2,34	2,50	2,66	2,82
401	500	1,90	1,95	2,03	2,15	2,31	2,47	2,64	2,80	2,96	3,12
501	600	2,30	2,35	2,43	2,55	2,71	2,87	3,04	3,20	3,36	3,52
601	700	2,70	2,75	2,83	2,95	3,11	3,27	3,44	3,60	3,76	3,92
701	800	3,10	3,15	3,23	3,35	3,51	3,67	3,84	4,00	4,16	4,32
801	900	3,50	3,55	3,63	3,75	3,91	4,07	4,24	4,40	4,56	4,72
901	1000	3,90	3,95	4,03	4,15	4,31	4,47	4,64	4,80	4,96	5,12
1001	1200	4,50	4,55	4,63	4,75	4,91	5,07	5,24	5,40	5,56	5,72
1201	1400	5,30	5,35	5,43	5,55	5,71	5,87	6,04	6,20	6,36	6,52
1401	1600	6,10	6,15	6,23	6,35	6,51	6,67	6,84	7,00	7,16	7,32
1601	1800	6,90	6,95	7,03	7,15	7,31	7,47	7,64	7,80	7,96	8,12
1801	2000	7,70	7,75	7,83	7,95	8,11	8,27	8,44	8,60	8,76	8,92
2001	2200	8,50	8,55	8,63	8,75	8,91	9,07	9,24	9,40	9,56	9,72
2201	2400	9,30	9,35	9,43	9,55	9,71	9,87	10,04	10,20	10,36	10,52
2401	2600	10,10	10,15	10,23	10,35	10,51	10,67	10,84	11,00	11,16	11,32
2601	2800	10,90	10,95	11,03	11,15	11,31	11,47	11,64	11,80	11,96	12,12
2801	3000	11,70	11,75	11,83	11,95	12,11	12,27	12,44	12,60	12,76	12,92

Таблица 2

Нормы времени на полурейсы заездов маневровых локомотивов и перестановок вагонов и составов со скоростью 25 км/ч (в минутах) по действующей инструкции											
Длина полурейса, м		Заезд маневрового локомотива	Перестановка вагонов и составов при количестве вагонов в составе								
от	до		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	150	0,34	0,42	0,56	0,76	1,03	1,30	1,57	1,84	2,11	2,38
151	200	0,58	0,66	0,80	1,00	1,27	1,54	1,81	2,08	2,35	2,62
201	250	0,70	0,78	0,92	1,12	1,39	1,66	1,93	2,20	2,47	2,74
251	300	0,82	0,90	1,04	1,24	1,51	1,78	2,05	2,32	2,59	2,86
301	350	0,94	1,02	1,16	1,36	1,63	1,90	2,17	2,44	2,71	2,98
351	400	1,06	1,14	1,28	1,48	1,75	2,02	2,29	2,56	2,83	3,10
401	500	1,24	1,32	1,46	1,66	1,93	2,20	2,47	2,74	3,01	3,28
501	600	1,48	1,56	1,70	1,90	2,17	2,44	2,71	2,98	3,25	3,52
601	700	1,72	1,80	1,94	2,14	2,41	2,68	2,95	3,22	3,49	3,76
701	800	1,96	2,04	2,18	2,38	2,65	2,92	3,19	3,46	3,73	4,00
801	900	2,20	2,28	2,42	2,62	2,89	3,16	3,43	3,70	3,97	4,24
901	1000	2,44	2,52	2,66	2,86	3,13	3,40	3,67	3,94	4,21	4,48
1001	1200	2,80	2,88	3,02	3,22	3,49	3,76	4,03	4,30	4,57	4,84
1201	1400	3,28	3,36	3,50	3,70	3,97	4,24	4,51	4,78	5,05	5,32
1401	1600	3,76	3,84	3,98	4,18	4,45	4,72	4,99	5,26	5,53	5,80
1601	1800	4,24	4,32	4,46	4,66	4,93	5,20	5,47	5,74	6,01	6,28
1801	2000	4,72	4,80	4,94	5,14	5,41	5,68	5,95	6,22	6,49	6,76
2001	2200	5,20	5,28	5,42	5,62	5,89	6,16	6,43	6,70	6,97	7,24
2201	2400	5,68	5,76	5,90	6,10	6,37	6,64	6,91	7,18	7,45	7,72
2401	2600	6,16	6,24	6,38	6,58	6,85	7,12	7,39	7,66	7,93	8,20
2601	2800	6,64	6,72	6,86	7,06	7,33	7,60	7,87	8,14	8,41	8,68
2801	3000	7,12	7,20	7,34	7,54	7,81	8,08	8,35	8,62	8,89	9,16



Таблица 3

Нормы времени на полурейсы заездов маневровых локомотивов и перестановок вагонов и составов со скоростью 40 км/ч (в минутах) по действующей инструкции											
Длина полурейса, м		Заезд маневрового локомотива	Перестановка вагонов и составов при количестве вагонов в составе								
от	до		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	250	0,44	0,57	0,79	1,11	1,55	1,98	2,41	2,85	3,28	3,71
251	400	0,74	0,87	1,09	1,41	1,85	2,28	2,71	3,15	3,58	4,01
401	600	1,00	1,13	1,35	1,68	2,11	2,54	2,98	3,41	3,84	4,28
601	800	1,30	1,43	1,65	1,98	2,41	2,84	3,28	3,71	4,14	4,58
801	1000	1,60	1,73	1,95	2,28	2,71	3,14	3,58	4,01	4,44	4,88
1001	1200	1,90	2,03	2,25	2,58	3,01	3,44	3,88	4,31	4,74	5,18
1201	1400	2,20	2,33	2,55	2,88	3,31	3,74	4,18	4,61	5,04	5,48
1401	1600	2,50	2,63	2,85	3,18	3,61	4,04	4,48	4,91	5,34	5,78
1601	1800	2,80	2,93	3,15	3,48	3,91	4,34	4,78	5,21	5,64	6,08
1801	2000	3,10	3,23	3,45	3,78	4,21	4,64	5,08	5,51	5,94	6,38
2001	2500	3,63	3,76	3,98	4,30	4,73	5,17	5,60	6,03	6,47	6,90
2501	3000	4,38	4,51	4,73	5,05	5,48	5,92	6,35	6,78	7,22	7,65
3001	3500	5,13	5,26	5,48	5,80	6,23	6,67	7,10	7,53	7,97	8,40
3501	4000	5,88	6,01	6,23	6,55	6,98	7,42	7,85	8,28	8,72	9,15
4001	4500	6,63	6,76	6,98	7,30	7,73	8,17	8,60	9,03	9,47	9,90
4501	5000	7,38	7,51	7,73	8,05	8,48	8,92	9,35	9,78	10,22	10,65
5001	5500	8,13	8,26	8,48	8,80	9,23	9,67	10,10	10,53	10,97	11,40
5501	6000	8,88	9,01	9,23	9,55	9,98	10,42	10,85	11,28	11,72	12,15
6001	6500	9,63	9,76	9,98	10,30	10,73	11,17	11,60	12,03	12,47	12,90
6501	7000	10,38	10,51	10,73	11,05	11,48	11,92	12,35	12,78	13,22	13,65
7001	7500	11,13	11,26	11,48	11,80	12,23	12,67	13,10	13,53	13,97	14,40
7501	8000	11,88	12,01	12,23	12,55	12,98	13,42	13,85	14,28	14,72	15,15
8001	8500	12,63	12,76	12,98	13,30	13,73	14,17	14,60	15,03	15,47	15,90
8501	9000	13,38	13,51	13,73	14,05	14,48	14,92	15,35	15,78	16,22	16,65
9001	9500	14,13	14,26	14,48	14,80	15,23	15,67	16,10	16,53	16,97	17,40
9501	10000	14,88	15,01	15,23	15,55	15,98	16,42	16,85	17,28	17,72	18,15

Таблица 4

Откорректированные нормы времени на полурейсы заездов маневровых локомотивов и перестановок вагонов и составов со скоростью 15 км/ч (в минутах)											
Длина полурейса, м		Заезд маневрового локомотива	Перестановка вагонов и составов при количестве вагонов в составе								
от	до		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	50	0,17	0,20	0,24	0,30	0,36	0,42	0,47	0,51	0,55	0,59
51	100	0,40	0,45	0,53	0,64	0,77	0,89	0,99	1,08	1,17	1,25
101	150	0,60	0,65	0,73	0,85	1,01	1,15	1,29	1,41	1,52	1,62
151	200	0,80	0,85	0,93	1,05	1,21	1,37	1,53	1,67	1,80	1,92
201	250	1,00	1,05	1,13	1,25	1,41	1,57	1,74	1,89	2,04	2,18
251	300	1,20	1,25	1,33	1,45	1,61	1,77	1,94	2,10	2,26	2,41
301	350	1,40	1,45	1,53	1,65	1,81	1,97	2,14	2,30	2,46	2,62
351	400	1,60	1,65	1,73	1,85	2,01	2,17	2,34	2,50	2,66	2,82
401	500	1,90	1,95	2,03	2,15	2,31	2,47	2,64	2,80	2,96	3,12
501	600	2,30	2,35	2,43	2,55	2,71	2,87	3,04	3,20	3,36	3,52
601	700	2,70	2,75	2,83	2,95	3,11	3,27	3,44	3,60	3,76	3,92
701	800	3,10	3,15	3,23	3,35	3,51	3,67	3,84	4,00	4,16	4,32
801	900	3,50	3,55	3,63	3,75	3,91	4,07	4,24	4,40	4,56	4,72
901	1000	3,90	3,95	4,03	4,15	4,31	4,47	4,64	4,80	4,96	5,12
1001	1200	4,50	4,55	4,63	4,75	4,91	5,07	5,24	5,40	5,56	5,72
1201	1400	5,30	5,35	5,43	5,55	5,71	5,87	6,04	6,20	6,36	6,52
1401	1600	6,10	6,15	6,23	6,35	6,51	6,67	6,84	7,00	7,16	7,32
1601	1800	6,90	6,95	7,03	7,15	7,31	7,47	7,64	7,80	7,96	8,12
1801	2000	7,70	7,75	7,83	7,95	8,11	8,27	8,44	8,60	8,76	8,92
2001	2200	8,50	8,55	8,63	8,75	8,91	9,07	9,24	9,40	9,56	9,72
2201	2400	9,30	9,35	9,43	9,55	9,71	9,87	10,04	10,20	10,36	10,52
2401	2600	10,10	10,15	10,23	10,35	10,51	10,67	10,84	11,00	11,16	11,32
2601	2800	10,90	10,95	11,03	11,15	11,31	11,47	11,64	11,80	11,96	12,12
2801	3000	11,70	11,75	11,83	11,95	12,11	12,27	12,44	12,60	12,76	12,92

Таблица 5

Откорректированные нормы времени на полурейсы заездов маневровых локомотивов и перестановок вагонов и составов со скоростью 25 км/ч (в минутах)											
Длина полурейса, м		Заезд маневрового локомотива	Перестановка вагонов и составов при количестве вагонов в составе								
от	до		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	150	0,28	0,32	0,40	0,49	0,60	0,69	0,76	0,84	0,90	0,96
151	200	0,58	0,66	0,80	0,98	1,19	1,37	1,53	1,67	1,80	1,92
201	250	0,70	0,78	0,92	1,11	1,35	1,55	1,73	1,89	2,04	2,18
251	300	0,82	0,90	1,04	1,24	1,49	1,72	1,91	2,09	2,26	2,41
301	350	0,94	1,02	1,16	1,36	1,62	1,87	2,08	2,28	2,45	2,62
351	400	1,06	1,14	1,28	1,48	1,75	2,01	2,24	2,44	2,64	2,82
401	500	1,24	1,32	1,46	1,66	1,93	2,20	2,45	2,67	2,88	3,08
501	600	1,48	1,56	1,70	1,90	2,17	2,44	2,71	2,96	3,19	3,41
601	700	1,72	1,80	1,94	2,14	2,41	2,68	2,95	3,22	3,47	3,71
701	800	1,96	2,04	2,18	2,38	2,65	2,92	3,19	3,46	3,73	3,98
801	900	2,20	2,28	2,42	2,62	2,89	3,16	3,43	3,70	3,97	4,24
901	1000	2,44	2,52	2,66	2,86	3,13	3,40	3,67	3,94	4,21	4,48
1001	1200	2,80	2,88	3,02	3,22	3,49	3,76	4,03	4,30	4,57	4,84
1201	1400	3,28	3,36	3,50	3,70	3,97	4,24	4,51	4,78	5,05	5,32
1401	1600	3,76	3,84	3,98	4,18	4,45	4,72	4,99	5,26	5,53	5,80
1601	1800	4,24	4,32	4,46	4,66	4,93	5,20	5,47	5,74	6,01	6,28
1801	2000	4,72	4,80	4,94	5,14	5,41	5,68	5,95	6,22	6,49	6,76
2001	2200	5,20	5,28	5,42	5,62	5,89	6,16	6,43	6,70	6,97	7,24
2201	2400	5,68	5,76	5,90	6,10	6,37	6,64	6,91	7,18	7,45	7,72
2401	2600	6,16	6,24	6,38	6,58	6,85	7,12	7,39	7,66	7,93	8,20
2601	2800	6,64	6,72	6,86	7,06	7,33	7,60	7,87	8,14	8,41	8,68
2801	3000	7,12	7,20	7,34	7,54	7,81	8,08	8,35	8,62	8,89	9,16

Таблица 6

Откорректированные нормы времени на полурейсы заездов маневровых локомотивов и перестановок вагонов и составов со скоростью 40 км/ч (в минутах)											
Длина полурейса, м		Заезд маневрового локомотива	Перестановка вагонов и составов при количестве вагонов в составе								
от	до		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	250	0,33	0,40	0,50	0,62	0,76	0,87	0,97	1,06	1,14	1,22
251	400	0,74	0,87	1,07	1,33	1,61	1,86	2,07	2,26	2,44	2,61
401	600	1,00	1,13	1,35	1,65	2,03	2,38	2,72	3,04	3,36	3,67
601	800	1,30	1,43	1,65	1,97	2,38	2,73	3,05	3,33	3,59	3,84
801	1000	1,60	1,73	1,95	2,28	2,70	3,10	3,46	3,78	4,08	4,36
1001	1200	1,90	2,03	2,25	2,58	3,01	3,43	3,83	4,18	4,51	4,82
1201	1400	2,20	2,33	2,55	2,88	3,31	3,74	4,16	4,55	4,91	5,24
1401	1600	2,50	2,63	2,85	3,18	3,61	4,04	4,47	4,89	5,27	5,63
1601	1800	2,80	2,93	3,15	3,48	3,91	4,34	4,78	5,20	5,61	5,99
1801	2000	3,10	3,23	3,45	3,78	4,21	4,64	5,08	5,51	5,93	6,34
2001	2500	3,63	3,76	3,98	4,30	4,73	5,17	5,60	6,03	6,47	6,89
2501	3000	4,38	4,51	4,73	5,05	5,48	5,92	6,35	6,78	7,22	7,65
3001	3500	5,13	5,26	5,48	5,80	6,23	6,67	7,10	7,53	7,97	8,40
3501	4000	5,88	6,01	6,23	6,55	6,98	7,42	7,85	8,28	8,72	9,15
4001	4500	6,63	6,76	6,98	7,30	7,73	8,17	8,60	9,03	9,47	9,90
4501	5000	7,38	7,51	7,73	8,05	8,48	8,92	9,35	9,78	10,22	10,65
5001	5500	8,13	8,26	8,48	8,80	9,23	9,67	10,10	10,53	10,97	11,40
5501	6000	8,88	9,01	9,23	9,55	9,98	10,42	10,85	11,28	11,72	12,15
6001	6500	9,63	9,76	9,98	10,30	10,73	11,17	11,60	12,03	12,47	12,90
6501	7000	10,38	10,51	10,73	11,05	11,48	11,92	12,35	12,78	13,22	13,65
7001	7500	11,13	11,26	11,48	11,80	12,23	12,67	13,10	13,53	13,97	14,40
7501	8000	11,88	12,01	12,23	12,55	12,98	13,42	13,85	14,28	14,72	15,15
8001	8500	12,63	12,76	12,98	13,30	13,73	14,17	14,60	15,03	15,47	15,90
8501	9000	13,38	13,51	13,73	14,05	14,48	14,92	15,35	15,78	16,22	16,65
9001	9500	14,13	14,26	14,48	14,80	15,23	15,67	16,10	16,53	16,97	17,40
9501	10000	14,88	15,01	15,23	15,55	15,98	16,42	16,85	17,28	17,72	18,15

Координаты авторов: **Шмулевич М. И.** – mikhail.shmulevich@gmail.com,
Стариков А. Е. – starikovaleksei1992@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 25.09.2015, принята к публикации 27.10.2015.



FEATURES OF REGULATION OF SHUNTING OPERATIONS IN THE STATION SIMULATION MODEL

Shmulevich, Mikhail I., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), CJSC «PromtransNIIproekt», Moscow, Russia.

Starikov, Aleksey E., CJSC «PromtransNIIproekt», Moscow, Russia.

ABSTRACT

When building a simulation model of the railway station or the junction one of its mandatory elements is duration of shunting operations. With the help of AnyLogic modeling system to assess this position it is necessary to consider the accounting method for acceleration and deceleration of shunting train in half-run. Moreover, the method used

must comply with the rules of calculation adopted in the AnyLogic, requirements of existing procedures for regulation of shunting operations (taking into account emerging constraints). The article describes a way to solve this problem, satisfying these requirements. At the same time adjustment of some of the inaccuracies contained in the current method is proposed.

Keywords: railway, station, shunting operations, regulation, duration of half-run, modeling, system AnyLogic.

Background. Simulation is among the leading methods of optimization of design and management decisions and of the analysis of the infrastructure and operation technology of complex transport and logistics systems, which include railway stations and junctions [1–3]. It has its own specifics.

Objective. The authors suggest new approach to building of a simulation model of a railway station, taking into account duration of shunting operations, acceleration and deceleration of shunting train in half-run, existing guidelines for those operations, and using AnyLogic modeling system.

Methods. Mathematical and simulation methods are used, as well as specific methods of control of station operations.

Results.

Simulation in AnyLogic

A distinctive feature of the simulation in the environment AnyLogic [4–7], which will be discussed below, is that in relation to railway systems the duration of movement of vehicles is not specified explicitly, but is calculated from the distance of movement (length of haul, station track, route for the station) and the speed of movement of [6].

To this end, a large-scale object scheme is introduced into the model. The professional version of AnyLogic 7.2 implements the ability to export station drawing, built in the format.shp, into the model. In the version of AnyLogic 7.3 it is supposed to realize an option of direct export of drawings, built in AutoCAD (format.dxf). In a simplified version

the station plan is based on the selected characteristic points.

However, modeling in AnyLogic of shunting operations performed on turnout track, requires taking into account not only the duration of the motion at a specified speed, but also duration of acceleration and deceleration (acceleration and braking of shunting train) [8], that is, to the time obtained by dividing the distance by the speed should be added the duration of acceleration and deceleration in the performance of each half-run.

At the same time the duration of half-run ($t_{h/r}^m$) obtained through simulation coincides with the duration of half-run $t_{h/r}$, calculated in accordance with the adopted normative documents (for example, instructions on rationing of shunting operations and rules issued on its basis [9, 10]), without which the simulation results cannot be considered legitimate.

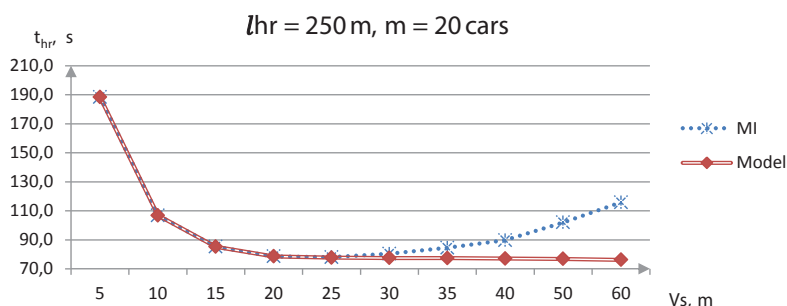
To fulfill this condition it is necessary to find a method for calculating the acceleration and deceleration in the model, in which $t_{h/r}^m = t_{h/r}$.

According to [1] duration of half-run is equal to:

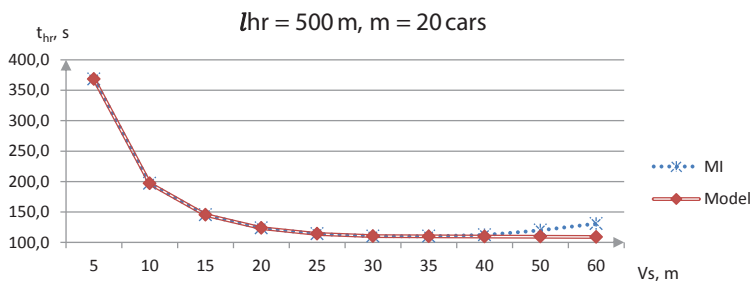
$$t_{h/r} = (\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m) \frac{V_s}{2} + \frac{3,6 \cdot l_{hr}}{V_s} c, \quad (1)$$

where α_{ab} is coefficient, taking into account time, required to change speed of locomotive by 1 km/h during acceleration and braking,

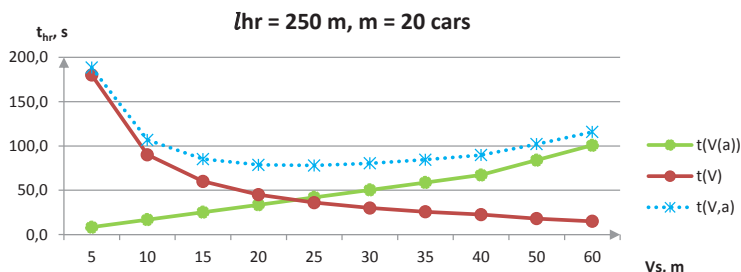
$$\alpha_{ab} = 0,76 \frac{s}{km/h};$$



Pic. 1. Dependence of half-run duration on permissible speed of the shunting train at $l_{hr} = 250$ m.



Pic. 2. Dependence of half-run duration on permissible speed of the shunted train at $l_{hr} = 500$ m.



Pic. 3. Dependence of components of half-run duration on permissible speed of the shunted train.

β_{ab} is coefficient, taking into account additional time to change speed of each car in the shunted train by 1 km/h during acceleration and braking,

$\beta_{ab} = 0,13 \frac{s}{km/h}$; m is a number of cars in the shunting

train;

V_s is permissible speed during shunting operations, km/h;

l_{hr} is length of half-run, m.

Let's define duration of half-run while modeling.

Length of half-run can be determined using the formula:

$$l_{hr} = l_1 + 2 \cdot l_2, m, \quad (2)$$

where l_1 is distance covered by the shunted train at a constant speed V_s , m;

l_2 is distance covered by the shunted train with acceleration or braking, m;

$$l_1 = V_s \cdot t_1, m, \quad (3)$$

where V_s is permissible speed during shunted operations, m/s;

t_1 is duration of movement at constant speed V_s , s;

$$l_2 = a \cdot \frac{t_2^2}{2}, m, \quad (4)$$

where a is acceleration or braking of the shunted train (in calculations and in further simulation it is advisable to set acceleration and braking equal, i.e. $a_a = a_b = a$), m/s²;

t_2 is duration of movement with acceleration or braking, s;

$$t_2 = \frac{V_s}{a}, s, \quad (5)$$

$$l_2 = a \cdot \frac{(\frac{V_s}{a})^2}{2} = \frac{V_s^2}{2a}, m. \quad (6)$$

Duration of half-run in simulation is determined by the formula:

$$t_{h/r}^m = t_1 + 2 \cdot t_2, s, \quad (7)$$

$$t_1 = t_{h/r}^m - 2 \cdot t_2 = t_{h/r}^m - 2 \cdot \frac{V_s}{a}, s, \quad (8)$$

$$l_1 = V_s \cdot (t_{h/r}^m - 2 \cdot \frac{V_s}{a}) = V_s \cdot t_{h/r}^m - 2 \cdot \frac{V_s^2}{a}, m, \quad (9)$$

$$l_{hr} = l_1 + 2 \cdot l_2 = V_s \cdot t_{h/r}^m - 2 \cdot \frac{V_s^2}{a} + 2 \cdot \frac{V_s^2}{2a} = V_s \cdot t_{h/r}^m - \frac{V_s^2}{a}, m. \quad (10)$$

Hence,

$$t_{h/r}^m = \frac{l_{hr}}{V_s} + \frac{V_s}{a}, s. \quad (11)$$

When speed of shunting movements is set in km/h, the formula takes a form:

$$t_{h/r}^m = \frac{3,6 \cdot l_{hr}}{V_s} + \frac{V_s}{3,6a}, s. \quad (12)$$

From the requirement of coincidence of design duration of half-run and duration in the model ($t_{h/r} = t_{h/r}^m$) we get:

$$(\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m) \cdot \frac{V_s}{2} + \frac{3,6 \cdot l_{hr}}{V_s} = \frac{3,6 \cdot l_{hr}}{V_s} + \frac{V_s}{3,6a}, \quad (13)$$

hence,

$$a = \frac{2}{3,6 \cdot (\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m)}. \quad (14)$$

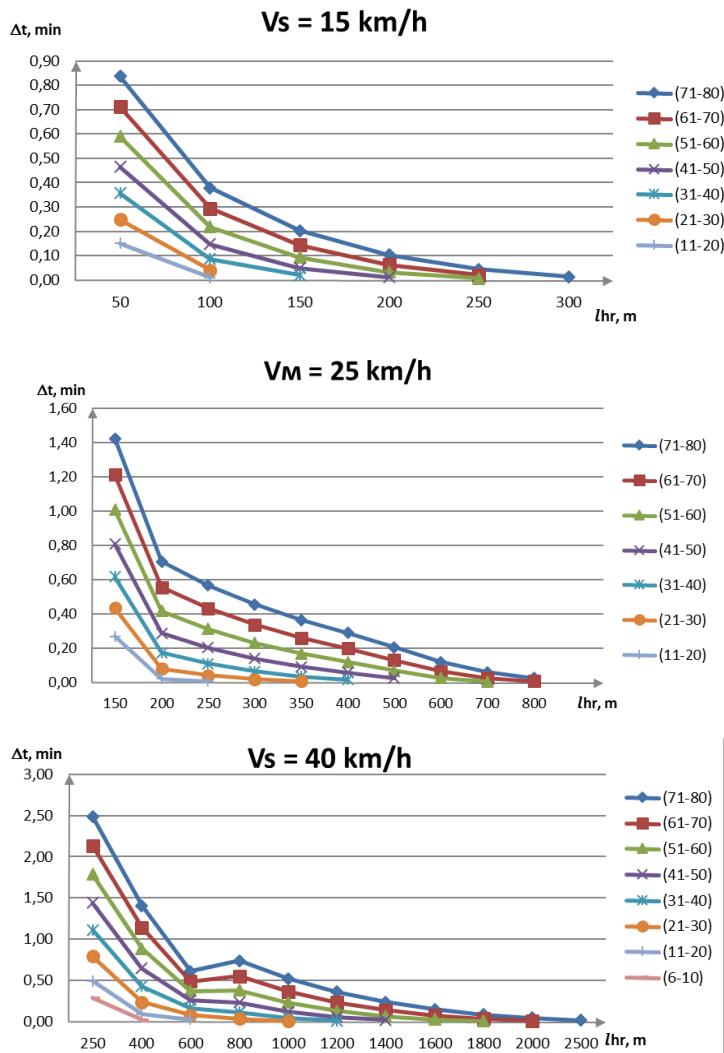
From the formula (14) it follows that acceleration and braking during shunting operations do not depend on permissible speed (V_s), but depend on the number of cars in the shunted train (m).

Thus, simulating shunting operations on turnout track in the environment AnyLogic, acceleration and braking should be set according to the formula (14) using the expression:

$a = 2 / (3,6 \cdot (0,76 + 0,13 \cdot (\text{trainSizeWithLoco} - 1)))$, where trainSizeWithLoco is model parameter, reflecting the number of cars in the train with account of locomotive.

In the simulation environment AnyLogic another approach to solution of the task is possible: not to take into account acceleration and braking of the train, but





Pic. 4. Difference of adjusted half-run duration from obtained according to the existing instruction.

to simulate movement at constant speed of the shunting train V_s . At the same time to comply with the requirements of the coincidence of the model time with the calculated time after each block corresponding to the next half-run, it is necessary to put the unit «delay», which determines the length of the delay t_{del} to account for acceleration and deceleration patterns. The delay duration in the block «delay» is fixed taking into account the speed during shunting operations and the number of cars in the train by the formula:

$$t_{del} = (\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m) \cdot \frac{V_s}{2} \cdot s. \quad (15)$$

Application of the method that includes in the model the block «delay» shows absolutely exact matching of results to the calculation formula and the method with calculation of acceleration of the train by the formula (14) gives the results close to estimated.

The results of application of obtained formulas

Research on this approach using the model showed that both acceleration accounting methods (using block «delay» and calculation of delays by the

formula (15) or the calculation of acceleration by the formula (14)) based on the current method [10] give incorrect results of the calculation of the duration of shunting operations with the values of calculated speed exceeding a certain value.

Let's consider the graphs of change in duration of shunting operations calculated under the instruction [10] and proposed for the simulation method using the calculated acceleration and deceleration.

Pic. 1 and 2 represent the dependence of the duration of shunting operations on the speed of movement at different lengths of half-run (respectively 250 and 500 m) and with the same length of the shunting train (20 cars).

In Pic. 3 duration of half-run, calculated from current methodical instructions (MI) for the conditions shown in Pic. 1 and designated as $t(V, a)$, has been broken down into two components: the duration of the movement at a steady rate $t(V)$ and the duration of the motion with acceleration $t(V(a))$.

As the results show, both methods, including acting in accordance with the MI give incorrect results at speeds exceeding the speed at the inflection point of

the curve in Pic. 1 and 2. In the calculation the duration of shunting operations increases, but in reality it should remain the same. In the option with calculation with acceleration the duration reduces, which distorts the results.

The graphs show that in the calculation using current method of rationing shunting operations with speed increase at a constant distance and with the same number of cars half-run duration first decreases to a certain value, and then increases.

The section of the graph after the inflection point does not make sense – the shunted train will not be able to achieve this speed at a given length of the track. The same can be said about the section of the graph while determining half-run duration using calculated acceleration in a model.

Thus, in the calculations it is necessary to impose a limit on the design speed, otherwise we get the wrong half-run duration – higher in the calculation using a delay (t_{del}) or smaller by using the calculated acceleration.

Limiting design speed

In accordance with «classical» approach, half-run duration is:

$$t_{h/r} = t_a + t_{st} + t_{dec}, \quad (16)$$

where t_a is time of acceleration;

t_{st} is time of movement at steady speed, in our designations t_p ;

t_{dec} is time of deceleration.

In case of limited lengths of shunting half-run l_{hr} and permissible speed V_s the shunting train does not manage to reach speeds V_s and middle term of formula (16) drops. After acceleration and achieving a certain speed V_{max} deceleration starts which guarantees the stop at the distance l_{hr} .

Let's define the maximum speed V_{max} , which may be developed by a shunted train within a limited distance with constant acceleration ($a=const$, $l=const$). This value corresponds to the values in the graph of the function at the inflection point in Pic. 1–3.

In the above legend

$$l_{hr} = 2l_2; (l_1 = 0), \quad t_{min} = 2t_2; (t_1 = 0), \quad \frac{max}{a};$$

$$l_{hr} = 2l_2 = 2a \cdot \frac{t_2^2}{2} = a \left(\frac{V_{max}}{a} \right)^2 = \frac{V_{max}^2}{a}; \quad (17)$$

$$V_{max} = \sqrt{al_{hr}}, \text{ m/s}; \quad (18)$$

$$V_{max} = 3,6 \sqrt{al_{hr}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 3,6 l_{hr}}{(\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m)}} = \sqrt{\frac{7,2 l_{hr}}{(\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m)}}, \text{ km/h}. \quad (19)$$

Thus, the restriction imposed on the calculated speed when performing shunting half-run has a form:

$$V_{cal} \leq V_{max} = \sqrt{\frac{7,2 \cdot l}{(\alpha_{ab} + \beta_{ab} \cdot m)}}, \text{ km/h}. \quad (20)$$

Taking into account Railway Operation Rules, stipulating the speed of shunting movements at a particular station as V_s , calculated speed is:

$$V_{cal} = \min \{V_{max}; V_s\}. \quad (21)$$

On adjustment of methodological instructions

As an illustration of the results, possible in the absence of restrictions (19–21), let's consider the examples of the use of guidelines, with the aid of which the duration of shunting operations at stations of main and industrial railway transport is determined.

In the MI for the calculation of the norms of time for shunting operations one can find values of half-run duration at different speeds of the shunting train, the number of cars and the length of half-run. Since in these tables necessary limit to the maximum permissible speed was not taken into account, some of these values in them are not true.

In some top right fields of tables [1-3] those norms of time, calculated according to MI, are highlighted, that contain incorrect results.

Tables (4–6) are recalculated for the same conditions, taking into account the speed limit. In them fields are highlighted containing adjusted values of shunting half-run duration.

Deviation of real (adjusted) results from given in the existing instruction [10] when comparing the tables are shown in Pic. 4.

Conclusion. The greater is the deviation, the shorter is the length of half-run and the more is the number of cars in the train. The lack of difference meets the combinations of values of V_s , l_{hr} and m , where the shunting train can reach speeds V_s .

REFERENCES

1. Lin, E. and C. Cheng. YardSim: A Rail Yard Simulation Framework and its Implementation in a Major Railroad in the U.S. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*. Ed. by M. D. Rossetti, R. R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin and R. G. Ingalls. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2009, pp. 2532–2541.
2. Kozlov, P.A. On methodological calculations of railway transport systems [*O metodicheskikh raschetah sistem zheleznodorozhnogo transporta*]. *Zheleznodorozhnyy transport*, 2014, Iss. 12, pp. 28–32.
3. Clausen, U., Goedicke, I. (2012). Simulation of Yard Operations and Management in Transshipment Terminals. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*.
4. Kiseleva, M. V. Simulation of systems in the environment AnyLogic: educational guide [*Imitacionnoe modelirovanie sistem v srede AnyLogic: Uchebno-metod. posobie*]. Yekaterinburg, UGTU-UPI publ., 2009, 88 p.
5. The AnyLogic Company. 2015. AnyLogic – Multimethod Simulation Software. <http://www.anylogic.com>. Last accessed 29.10.2015.
6. Petersen, E. R. Railway Modeling: Part I. Prediction of Put-Through Time. *Transportation Science*, Vol. 11, 1977, Iss. 1.
7. Baugher Roger. Application of AnyLogic to Railroad Operation Analysis. *Anylogic Conference*, December, 2013.
8. Shmulevich, M. I., Starikov, A. E. Structure of simulation model of industrial railway stations and its implementation in AnyLogic [*Struktura imitacionnoj modeli promyshlennyykh zheleznodorozhnykh stancij i ee realizacija v sisteme AnyLogic*]. *Promyshlennyy transport XXI vek*, 2015, Iss. 1.
9. The norms of time for shunting operations carried out at railway stations of JSC «Russian Railways», regulations of the number of crews of shunting locomotives. Approved by JSC «Russian Railways» of 08.02.2007 [*Normy vremeni na manevrovye raboty, vypolnjaemye na zheleznodorozhnykh stancijah OAO «RZhD», normativy chislennosti brigad manevrovyyh lokomotivov. Uverzhdeno OAO «RZhD» 08.02.2007*].
10. Guidelines for the calculation of standards of time for shunting operations, carried out on railways. Approved by the Ministry of Railways of the Russian Federation of 03.19.1998 [*Metodicheskie ukazaniya po raschetu norm vremeni na manevrovye raboty, vypolnjaemye na zheleznodorozhnom transporte. Uverzhdeno MPS RF 19.03.1998*].



Table 1

Norms of time for half-run of turning of shunting locomotives and displacement of cars and trains at speed of 15 km/h (in minutes) according to existing instructions											
Half-run length, m		Turning of a shunting locomotive	Displacement of cars and trains with the indicated number of cars in the train								
from	to		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	50	0,20	0,24	0,33	0,45	0,61	0,77	0,93	1,10	1,26	1,42
51	100	0,40	0,45	0,53	0,65	0,81	0,97	1,14	1,30	1,46	1,62
101	150	0,60	0,65	0,73	0,85	1,01	1,17	1,34	1,50	1,66	1,82
151	200	0,80	0,85	0,93	1,05	1,21	1,37	1,54	1,70	1,86	2,02
201	250	1,00	1,05	1,13	1,25	1,41	1,57	1,74	1,90	2,06	2,22
251	300	1,20	1,25	1,33	1,45	1,61	1,77	1,94	2,10	2,26	2,42
301	350	1,40	1,45	1,53	1,65	1,81	1,97	2,14	2,30	2,46	2,62
351	400	1,60	1,65	1,73	1,85	2,01	2,17	2,34	2,50	2,66	2,82
401	500	1,90	1,95	2,03	2,15	2,31	2,47	2,64	2,80	2,96	3,12
501	600	2,30	2,35	2,43	2,55	2,71	2,87	3,04	3,20	3,36	3,52
601	700	2,70	2,75	2,83	2,95	3,11	3,27	3,44	3,60	3,76	3,92
701	800	3,10	3,15	3,23	3,35	3,51	3,67	3,84	4,00	4,16	4,32
801	900	3,50	3,55	3,63	3,75	3,91	4,07	4,24	4,40	4,56	4,72
901	1000	3,90	3,95	4,03	4,15	4,31	4,47	4,64	4,80	4,96	5,12
1001	1200	4,50	4,55	4,63	4,75	4,91	5,07	5,24	5,40	5,56	5,72
1201	1400	5,30	5,35	5,43	5,55	5,71	5,87	6,04	6,20	6,36	6,52
1401	1600	6,10	6,15	6,23	6,35	6,51	6,67	6,84	7,00	7,16	7,32
1601	1800	6,90	6,95	7,03	7,15	7,31	7,47	7,64	7,80	7,96	8,12
1801	2000	7,70	7,75	7,83	7,95	8,11	8,27	8,44	8,60	8,76	8,92
2001	2200	8,50	8,55	8,63	8,75	8,91	9,07	9,24	9,40	9,56	9,72
2201	2400	9,30	9,35	9,43	9,55	9,71	9,87	10,04	10,20	10,36	10,52
2401	2600	10,10	10,15	10,23	10,35	10,51	10,67	10,84	11,00	11,16	11,32
2601	2800	10,90	10,95	11,03	11,15	11,31	11,47	11,64	11,80	11,96	12,12
2801	3000	11,70	11,75	11,83	11,95	12,11	12,27	12,44	12,60	12,76	12,92

Table 2

Norms of time for half-run of turning of shunting locomotives and displacement of cars and trains at speed of 25 km/h (in minutes) according to existing instructions											
Half-run length, m		Turning of a shunting locomotive	Displacement of cars and trains with the indicated number of cars in the train								
from	to		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	150	0,34	0,42	0,56	0,76	1,03	1,30	1,57	1,84	2,11	2,38
151	200	0,58	0,66	0,80	1,00	1,27	1,54	1,81	2,08	2,35	2,62
201	250	0,70	0,78	0,92	1,12	1,39	1,66	1,93	2,20	2,47	2,74
251	300	0,82	0,90	1,04	1,24	1,51	1,78	2,05	2,32	2,59	2,86
301	350	0,94	1,02	1,16	1,36	1,63	1,90	2,17	2,44	2,71	2,98
351	400	1,06	1,14	1,28	1,48	1,75	2,02	2,29	2,56	2,83	3,10
401	500	1,24	1,32	1,46	1,66	1,93	2,20	2,47	2,74	3,01	3,28
501	600	1,48	1,56	1,70	1,90	2,17	2,44	2,71	2,98	3,25	3,52
601	700	1,72	1,80	1,94	2,14	2,41	2,68	2,95	3,22	3,49	3,76
701	800	1,96	2,04	2,18	2,38	2,65	2,92	3,19	3,46	3,73	4,00
801	900	2,20	2,28	2,42	2,62	2,89	3,16	3,43	3,70	3,97	4,24
901	1000	2,44	2,52	2,66	2,86	3,13	3,40	3,67	3,94	4,21	4,48
1001	1200	2,80	2,88	3,02	3,22	3,49	3,76	4,03	4,30	4,57	4,84
1201	1400	3,28	3,36	3,50	3,70	3,97	4,24	4,51	4,78	5,05	5,32
1401	1600	3,76	3,84	3,98	4,18	4,45	4,72	4,99	5,26	5,53	5,80
1601	1800	4,24	4,32	4,46	4,66	4,93	5,20	5,47	5,74	6,01	6,28
1801	2000	4,72	4,80	4,94	5,14	5,41	5,68	5,95	6,22	6,49	6,76
2001	2200	5,20	5,28	5,42	5,62	5,89	6,16	6,43	6,70	6,97	7,24
2201	2400	5,68	5,76	5,90	6,10	6,37	6,64	6,91	7,18	7,45	7,72
2401	2600	6,16	6,24	6,38	6,58	6,85	7,12	7,39	7,66	7,93	8,20
2601	2800	6,64	6,72	6,86	7,06	7,33	7,60	7,87	8,14	8,41	8,68
2801	3000	7,12	7,20	7,34	7,54	7,81	8,08	8,35	8,62	8,89	9,16

Table 3

Norms of time for half-run of turning of shunting locomotives and displacement of cars and trains at speed of 40 km/h (in minutes) according to existing instructions											
Half-run length, m		Turning of a shunting locomotive	Displacement of cars and trains with the indicated number of cars in the train								
from	to		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	250	0,44	0,57	0,79	1,11	1,55	1,98	2,41	2,85	3,28	3,71
251	400	0,74	0,87	1,09	1,41	1,85	2,28	2,71	3,15	3,58	4,01
401	600	1,00	1,13	1,35	1,68	2,11	2,54	2,98	3,41	3,84	4,28
601	800	1,30	1,43	1,65	1,98	2,41	2,84	3,28	3,71	4,14	4,58
801	1000	1,60	1,73	1,95	2,28	2,71	3,14	3,58	4,01	4,44	4,88
1001	1200	1,90	2,03	2,25	2,58	3,01	3,44	3,88	4,31	4,74	5,18
1201	1400	2,20	2,33	2,55	2,88	3,31	3,74	4,18	4,61	5,04	5,48
1401	1600	2,50	2,63	2,85	3,18	3,61	4,04	4,48	4,91	5,34	5,78
1601	1800	2,80	2,93	3,15	3,48	3,91	4,34	4,78	5,21	5,64	6,08
1801	2000	3,10	3,23	3,45	3,78	4,21	4,64	5,08	5,51	5,94	6,38
2001	2500	3,63	3,76	3,98	4,30	4,73	5,17	5,60	6,03	6,47	6,90
2501	3000	4,38	4,51	4,73	5,05	5,48	5,92	6,35	6,78	7,22	7,65
3001	3500	5,13	5,26	5,48	5,80	6,23	6,67	7,10	7,53	7,97	8,40
3501	4000	5,88	6,01	6,23	6,55	6,98	7,42	7,85	8,28	8,72	9,15
4001	4500	6,63	6,76	6,98	7,30	7,73	8,17	8,60	9,03	9,47	9,90
4501	5000	7,38	7,51	7,73	8,05	8,48	8,92	9,35	9,78	10,22	10,65
5001	5500	8,13	8,26	8,48	8,80	9,23	9,67	10,10	10,53	10,97	11,40
5501	6000	8,88	9,01	9,23	9,55	9,98	10,42	10,85	11,28	11,72	12,15
6001	6500	9,63	9,76	9,98	10,30	10,73	11,17	11,60	12,03	12,47	12,90
6501	7000	10,38	10,51	10,73	11,05	11,48	11,92	12,35	12,78	13,22	13,65
7001	7500	11,13	11,26	11,48	11,80	12,23	12,67	13,10	13,53	13,97	14,40
7501	8000	11,88	12,01	12,23	12,55	12,98	13,42	13,85	14,28	14,72	15,15
8001	8500	12,63	12,76	12,98	13,30	13,73	14,17	14,60	15,03	15,47	15,90
8501	9000	13,38	13,51	13,73	14,05	14,48	14,92	15,35	15,78	16,22	16,65
9001	9500	14,13	14,26	14,48	14,80	15,23	15,67	16,10	16,53	16,97	17,40
9501	10000	14,88	15,01	15,23	15,55	15,98	16,42	16,85	17,28	17,72	18,15

Table 4

Adjusted norms of time for half-run of turning of shunting locomotives and displacement of cars and trains at speed of 15 km/h (in minutes) according to existing instructions											
Half-run length, m		Turning of a shunting locomotive	Displacement of cars and trains with the indicated number of cars in the train								
from	to		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	50	0,17	0,20	0,24	0,30	0,36	0,42	0,47	0,51	0,55	0,59
51	100	0,40	0,45	0,53	0,64	0,77	0,89	0,99	1,08	1,17	1,25
101	150	0,60	0,65	0,73	0,85	1,01	1,15	1,29	1,41	1,52	1,62
151	200	0,80	0,85	0,93	1,05	1,21	1,37	1,53	1,67	1,80	1,92
201	250	1,00	1,05	1,13	1,25	1,41	1,57	1,74	1,89	2,04	2,18
251	300	1,20	1,25	1,33	1,45	1,61	1,77	1,94	2,10	2,26	2,41
301	350	1,40	1,45	1,53	1,65	1,81	1,97	2,14	2,30	2,46	2,62
351	400	1,60	1,65	1,73	1,85	2,01	2,17	2,34	2,50	2,66	2,82
401	500	1,90	1,95	2,03	2,15	2,31	2,47	2,64	2,80	2,96	3,12
501	600	2,30	2,35	2,43	2,55	2,71	2,87	3,04	3,20	3,36	3,52
601	700	2,70	2,75	2,83	2,95	3,11	3,27	3,44	3,60	3,76	3,92
701	800	3,10	3,15	3,23	3,35	3,51	3,67	3,84	4,00	4,16	4,32
801	900	3,50	3,55	3,63	3,75	3,91	4,07	4,24	4,40	4,56	4,72
901	1000	3,90	3,95	4,03	4,15	4,31	4,47	4,64	4,80	4,96	5,12
1001	1200	4,50	4,55	4,63	4,75	4,91	5,07	5,24	5,40	5,56	5,72
1201	1400	5,30	5,35	5,43	5,55	5,71	5,87	6,04	6,20	6,36	6,52
1401	1600	6,10	6,15	6,23	6,35	6,51	6,67	6,84	7,00	7,16	7,32
1601	1800	6,90	6,95	7,03	7,15	7,31	7,47	7,64	7,80	7,96	8,12
1801	2000	7,70	7,75	7,83	7,95	8,11	8,27	8,44	8,60	8,76	8,92
2001	2200	8,50	8,55	8,63	8,75	8,91	9,07	9,24	9,40	9,56	9,72
2201	2400	9,30	9,35	9,43	9,55	9,71	9,87	10,04	10,20	10,36	10,52
2401	2600	10,10	10,15	10,23	10,35	10,51	10,67	10,84	11,00	11,16	11,32
2601	2800	10,90	10,95	11,03	11,15	11,31	11,47	11,64	11,80	11,96	12,12
2801	3000	11,70	11,75	11,83	11,95	12,11	12,27	12,44	12,60	12,76	12,92



Table 5

Adjusted norms of time for half-run of turning of shunting locomotives and displacement of cars and trains at speed of 25 km/h (in minutes) according to existing instructions											
Half-run length, m		Turning of a shunting locomotive	Displacement of cars and trains with the indicated number of cars in the train								
from	to		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	150	0,28	0,32	0,40	0,49	0,60	0,69	0,76	0,84	0,90	0,96
151	200	0,58	0,66	0,80	0,98	1,19	1,37	1,53	1,67	1,80	1,92
201	250	0,70	0,78	0,92	1,11	1,35	1,55	1,73	1,89	2,04	2,18
251	300	0,82	0,90	1,04	1,24	1,49	1,72	1,91	2,09	2,26	2,41
301	350	0,94	1,02	1,16	1,36	1,62	1,87	2,08	2,28	2,45	2,62
351	400	1,06	1,14	1,28	1,48	1,75	2,01	2,24	2,44	2,64	2,82
401	500	1,24	1,32	1,46	1,66	1,93	2,20	2,45	2,67	2,88	3,08
501	600	1,48	1,56	1,70	1,90	2,17	2,44	2,71	2,96	3,19	3,41
601	700	1,72	1,80	1,94	2,14	2,41	2,68	2,95	3,22	3,47	3,71
701	800	1,96	2,04	2,18	2,38	2,65	2,92	3,19	3,46	3,73	3,98
801	900	2,20	2,28	2,42	2,62	2,89	3,16	3,43	3,70	3,97	4,24
901	1000	2,44	2,52	2,66	2,86	3,13	3,40	3,67	3,94	4,21	4,48
1001	1200	2,80	2,88	3,02	3,22	3,49	3,76	4,03	4,30	4,57	4,84
1201	1400	3,28	3,36	3,50	3,70	3,97	4,24	4,51	4,78	5,05	5,32
1401	1600	3,76	3,84	3,98	4,18	4,45	4,72	4,99	5,26	5,53	5,80
1601	1800	4,24	4,32	4,46	4,66	4,93	5,20	5,47	5,74	6,01	6,28
1801	2000	4,72	4,80	4,94	5,14	5,41	5,68	5,95	6,22	6,49	6,76
2001	2200	5,20	5,28	5,42	5,62	5,89	6,16	6,43	6,70	6,97	7,24
2201	2400	5,68	5,76	5,90	6,10	6,37	6,64	6,91	7,18	7,45	7,72
2401	2600	6,16	6,24	6,38	6,58	6,85	7,12	7,39	7,66	7,93	8,20
2601	2800	6,64	6,72	6,86	7,06	7,33	7,60	7,87	8,14	8,41	8,68
2801	3000	7,12	7,20	7,34	7,54	7,81	8,08	8,35	8,62	8,89	9,16

Table 6

Adjusted norms of time for half-run of turning of shunting locomotives and displacement of cars and trains at speed of 40 km/h (in minutes) according to existing instructions											
Half-run length, m		Turning of a shunting locomotive	Displacement of cars and trains with the indicated number of cars in the train								
from	to		(1–5)	(6–10)	(11–20)	(21–30)	(31–40)	(41–50)	(51–60)	(61–70)	(71–80)
1	250	0,33	0,40	0,50	0,62	0,76	0,87	0,97	1,06	1,14	1,22
251	400	0,74	0,87	1,07	1,33	1,61	1,86	2,07	2,26	2,44	2,61
401	600	1,00	1,13	1,35	1,65	2,03	2,38	2,72	3,04	3,36	3,67
601	800	1,30	1,43	1,65	1,97	2,38	2,73	3,05	3,33	3,59	3,84
801	1000	1,60	1,73	1,95	2,28	2,70	3,10	3,46	3,78	4,08	4,36
1001	1200	1,90	2,03	2,25	2,58	3,01	3,43	3,83	4,18	4,51	4,82
1201	1400	2,20	2,33	2,55	2,88	3,31	3,74	4,16	4,55	4,91	5,24
1401	1600	2,50	2,63	2,85	3,18	3,61	4,04	4,47	4,89	5,27	5,63
1601	1800	2,80	2,93	3,15	3,48	3,91	4,34	4,78	5,20	5,61	5,99
1801	2000	3,10	3,23	3,45	3,78	4,21	4,64	5,08	5,51	5,93	6,34
2001	2500	3,63	3,76	3,98	4,30	4,73	5,17	5,60	6,03	6,47	6,89
2501	3000	4,38	4,51	4,73	5,05	5,48	5,92	6,35	6,78	7,22	7,65
3001	3500	5,13	5,26	5,48	5,80	6,23	6,67	7,10	7,53	7,97	8,40
3501	4000	5,88	6,01	6,23	6,55	6,98	7,42	7,85	8,28	8,72	9,15
4001	4500	6,63	6,76	6,98	7,30	7,73	8,17	8,60	9,03	9,47	9,90
4501	5000	7,38	7,51	7,73	8,05	8,48	8,92	9,35	9,78	10,22	10,65
5001	5500	8,13	8,26	8,48	8,80	9,23	9,67	10,10	10,53	10,97	11,40
5501	6000	8,88	9,01	9,23	9,55	9,98	10,42	10,85	11,28	11,72	12,15
6001	6500	9,63	9,76	9,98	10,30	10,73	11,17	11,60	12,03	12,47	12,90
6501	7000	10,38	10,51	10,73	11,05	11,48	11,92	12,35	12,78	13,22	13,65
7001	7500	11,13	11,26	11,48	11,80	12,23	12,67	13,10	13,53	13,97	14,40
7501	8000	11,88	12,01	12,23	12,55	12,98	13,42	13,85	14,28	14,72	15,15
8001	8500	12,63	12,76	12,98	13,30	13,73	14,17	14,60	15,03	15,47	15,90
8501	9000	13,38	13,51	13,73	14,05	14,48	14,92	15,35	15,78	16,22	16,65
9001	9500	14,13	14,26	14,48	14,80	15,23	15,67	16,10	16,53	16,97	17,40
9501	10000	14,88	15,01	15,23	15,55	15,98	16,42	16,85	17,28	17,72	18,15

Information about the authors:

Shmulevich, Mikhail I. – D.Sc. (Eng.), professor of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), deputy director of CJSC «PromNIIproekt», Moscow, Russia, mikhail.shmulevich@gmail.com.

Starikov, Aleksey E. – engineer of CJSC «PromNIIproekt», Moscow, Russia, starikovaleksei1992@mail.ru.

Article received 25.09.2015, accepted 27.10.2015.



ОХЛАЖДЕНИЕ ДИЗЕЛЕЙ 214

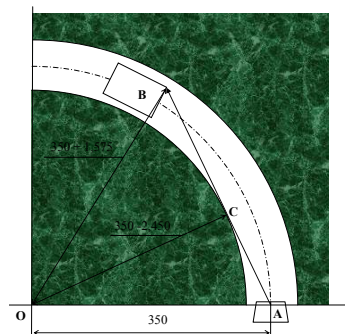
*Демпфирующее устройство
против разрушения
трубопроводов.*

ЗВУКОИЗОЛЯЦИЯ 222

*Кабина локомотива: расчеты
шума.*

ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА 230

*Растущие скорости требуют
иных сценариев.*



НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ 238

*Скрытые дефекты – явные
риски.*

АНТИРЕЗОНАНС 250

*«Силовой» вариант крепления
тягового двигателя.*

БЕЗОПАСНОСТЬ • SAFETY AND SECURITY



DIESEL ENGINE COOLING 214

*Damping device against
destruction of conduits.*

NOISE REDUCTION 222

*Locomotive cabin: calculation
of noise effects.*

PASSIVE PROTECTION 230

*Growing speeds require new
scenarios.*

UNDESTRUCTIVE CONTROL 238

*Hidden failures cause evident
risks.*

ANTI-RESONANCE 250

*«Forced» variant of mounting of
traction engine.*

