

УДК 629.4.016.1

## О возможности применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» при разработке энергооптимальных режимов ведения поездов

С. Н. Журавлев<sup>1</sup>, Т. С. Авсиевич<sup>1</sup>, В. П. Гриневич<sup>1</sup>, Д. Н. Курилкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Российской Федерации, 140402, Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Журавлев С. Н., Авсиевич Т. С., Гриневич В. П., Курилкин Д. Н. О возможности применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» при разработке энергооптимальных режимов ведения поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 148–159. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-148-159

### Аннотация

**Цель:** Экономия топлива является одной из ключевых задач, стоящих перед железнодорожным транспортом. Решению задачи поиска энергооптимальных режимов ведения поезда в различных эксплуатационных условиях служит программный комплекс «Тяга — Прогноз», использование алгоритмов которого в программах автоведения поезда затруднено из-за необходимости выполнения большого объема вычислений в реальном режиме времени. Актуальность применения энергосберегающих режимов ведения поездов, определенных по алгоритмам программного комплекса «Тяга — Прогноз», обусловлена необходимостью совершенствования методов управления локомотивами. Подтверждением аддитивности определяемых режимов практически устанавливается возможность реализации алгоритма «киевский веник» при решении тягово-энергетических задач программным комплексом «Тяга — Прогноз», резко уменьшающего количество выполняемых шагов при определении энергооптимального режима. Предложены решения по сокращению вычислительного объема режима ведения поезда без заметных потерь в топливе. **Методы:** Методом исследований является сравнение значений расхода топлива для поездов, определенных при расчете энергооптимального режима для всей железнодорожной линии с суммой затрат топлива, определенных по тем же правилам, но по отдельным перегонам железнодорожной линии. **Результаты:** Сформулирован вывод о подтверждении аддитивности энергосберегающих режимов ведения поездов, определенных по алгоритмам программного комплекса «Тяга — Прогноз» для единой железнодорожной линии и отдельных ее перегонов с погрешностью менее 2 %. **Практическое применение:** Алгоритмы программного комплекса «Тяга — Прогноз» могут быть применены в программах автоведения поездов.

**Ключевые слова:** Программный комплекс, тяговые расчеты, оптимальное управление, энергооптимальный режим, аддитивность, терминология.

Экономическая целесообразность любого производственного процесса может быть охарактеризована поддержанием экстремального значения некоторого определяющего технико-экономического показателя.

Перевозочный процесс относится к процессам, обладающим большой инерционностью и управляющимся входными координатами объекта через дискретные промежутки времени. Входные координаты перевозочного процесса —

это параметры, определяющие изменение режимов ведения поезда, которые включают набор позиций контроллера машиниста, режим холостого хода, позиции электрического реостатного тормоза и регулируемую величину тормозной силы пневматического тормоза одиночного локомотива и всего поезда.

Изменение режимов ведения поезда дает возможность реализации большого диапазона управления перевозочным процессом, в том числе обеспечивая возможность формирования режимов, формирующих оптимальные технико-экономические показатели.

Между тем основная задача автономных систем автоведения поездов сводится не к экономической эффективности, а к выполнению заданного графика движения.

В настоящее время управление движением поездами связывают с реализацией энергооптимальных режимов ведения. В этом случае при соблюдении графика движения выходной координатой становится расход энергоресурсов. В настоящее время распространено применение термина «энергооптимальный режим», характеризующий эффективность любых режимов.

Фактическими **энергооптимальными** режимами следует считать такие управляющие воздействия, которые обеспечивают минимальный расход топлива при заданной массе поезда и маршруте следования без жесткой связи со временем хода по железнодорожному участку. Многовариантность формирования режимов управления тяговым подвижным составом может привести к тому, что близкое к минимальному значению расхода энергоресурсов за поездку может быть получено при нескольких комбинациях режимов управления. Комбинацию режимов управления, обеспечивающих минимальный расход топлива при заданном графике движения, корректно называть **энергосберегающими**. При данной комбинации режимов управления рас-

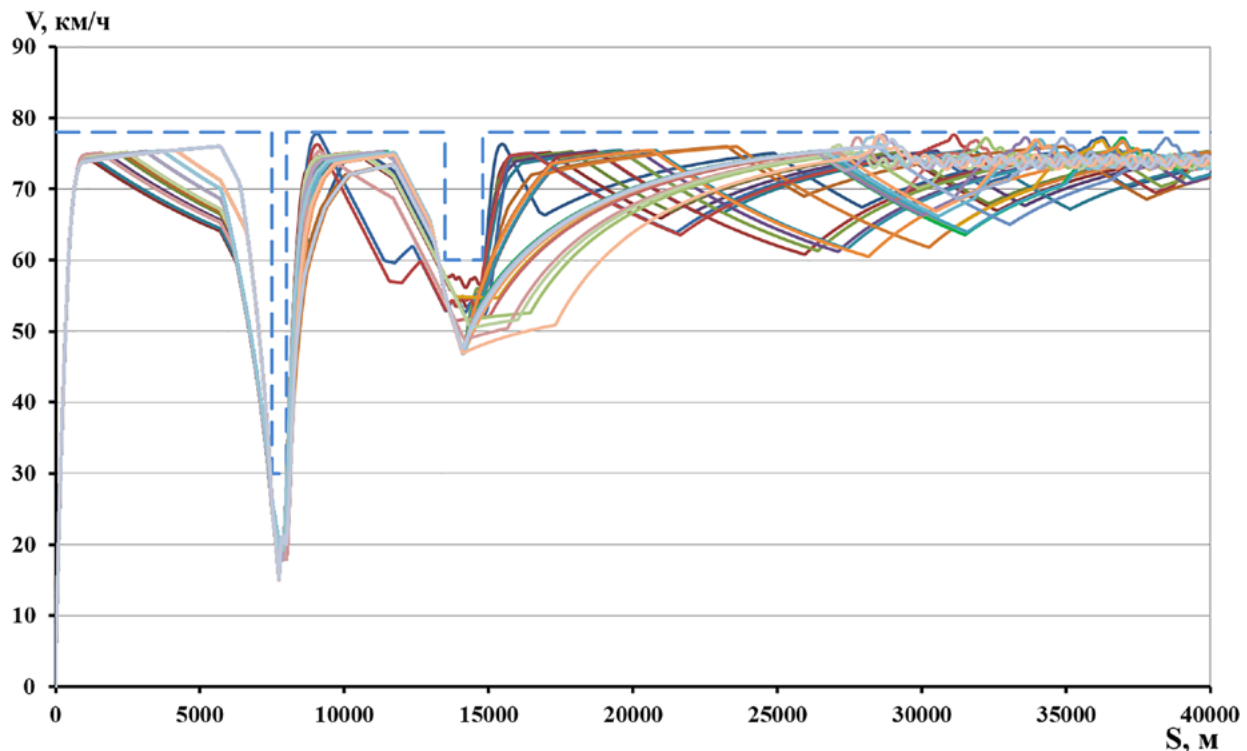
ход топлива, скорее всего, окажется несколько больше, чем при энергооптимальной комбинации режимов управления. Режимы ведения поезда, в которые не заложены непосредственно вычисление расхода топлива, а назначенные с целью соблюдения времени хода или с другой технико-экономической целью, предлагаем считать **ресурсосберегающими**.

Автономные системы автоведения поездов в зависимости от того, где выполняется расчет необходимых комбинаций управляющих воздействий, принято разделять на системы с предварительно рассчитанными траекториями и системы, определяющие управляющие воздействия непосредственно в процессе движения [1]. К последним системам следует отнести системы беспилотного управления поездом [2].

К системам с предварительно рассчитанной комбинацией режимов управления следует отнести методы оперативных тяговых расчетов, обеспечивающие повышение энергоэффективности автономных локомотивов.

График движения конкретного поезда задается в виде режимной карты для каждого локомотива с учетом сопротивления движению определенного состава на заданном маршруте. Недостатком таких режимных карт является «необходимость изготовления таких программ в большом количестве по числу поездов, а также создание большого и довольно сложного хозяйства по расчету и изготовлению таких программ, их правильной раздачи на локомотивы и своевременной замены другими, в случае изменения условия движения или износа и повреждения программносителя» [1].

К программам, которые ведут расчет непосредственно в процессе движения, следует отнести унифицированные системы автоведения поезда УСАВП и УСАВП-Л, применяемые на электропоездах. Кроме регулирования режима тяги, система обеспечивает прицельное торможение при приближении к светофорам или к местам,



Фрагмент расчетов по ПК «Тяга — Прогноз» начала движения поезда с возможными траекториями режимов движения поезда с учетом ограничения по допустимой скорости движения (пунктирная линия)

требующим ограничения скорости движения. Системами автоматического ведения поезда оборудовано некоторое количество электровозов различных серий.

Программный комплекс «Тяга — Прогноз» определяет энергооптимальный режим движения локомотива с составом заданной массы на основе анализа различных режимов ведения поезда, охватывающих все поле с координатами «скорость — путь» [3–5].

Каждый из рассматриваемых программой наборов режимов управления обеспечивает выполнение всех временных и постоянных ограничений по скорости движения. Комбинации режимов управления отличаются различным сочетанием использования позиций контроллера машиниста, режимов выбега и регулировочных торможений. На рисунке показан фрагмент выполненного расчета, на котором при помощи

различных режимов, получаемых в результате вариативного управления позициями контроллера машиниста и регулировочным торможением, поезд проследует участок, имеющий локальное ограничение допустимой скорости движения. Особенностью реализации режимов, представленных на рисунке по различным траекториям управления, является выдержка одинакового времени хода поезда по участку для всех вариантов. При этом расход топлива за поездку имеет существенное отличие для рассматриваемых комбинаций режимов управления.

Выбор одного из режимов, имеющих наименьший расход топлива, можно считать однозначным нахождением энергооптимальной комбинации режимов ведения поезда.

В качестве примера выбора энергооптимального режима из 30 комбинаций режимов ведения поезда в табл. 1 и 2 приведено распределе-

ние режимов ведения поезда по позициям, время хода по участку, число смен позиции контроллера и расход топлива за поездку. В качестве объекта расчета использован поезд, включающий в себя тепловоз 2ТЭ25К<sup>М</sup> и 60 порожних полувагонов. Было принято условие движения без промежуточных остановок по реальному железнодорожному участку 1-й категории сложности с действующими постоянными ограничениями.

Общее заданное время хода для всех вариантов, приведенных в табл. 1, принималось равным 225 мин. Отклонение времени хода среди рассмотренных 30 вариантов различных режимов движения от среднего значения составило  $\pm 0,4$  %, за исключением двух выбросов величиной в 1,7 %. Характерно, что при одном из этих выбросов получен минимальный расход топлива. Результаты расчета показали, что при максимально полученном отклонении времени хода в 1,7 % возможен разброс значений расхода топлива в 4,6 %.

Анализируя результаты, приведенные в табл. 1, можно отметить, что расход топлива несколько меньше при большем времени хода и существует нечетко выраженная тенденция уменьшения числа переключений позиций контроллера машиниста при меньшем времени хода поезда по участку. Следует отметить, что влияние переходных процессов на величину силы тяги и расхода топлива в расчетах не учитывалось [5, 6].

Различия в получаемых результатах становятся значительнее при реализации режимов ведения поезда за минимально возможное время хода (табл. 2). Получаемое при этом разное значение времени хода в рассматриваемых вариантах расчета обусловлено требованиями, накладываемыми программой на законы формирования режимов управления поездом.

В результате расчетов получено, что при 30 различных комбинациях режимов ведения поезда время хода составило от 192,2 до 245,86 минуты. Расход топлива при этом изменяется в преде-

лах от 1386,4 до 1104,9 кг. Результаты расчета подтвердили достаточно очевидный факт, что с увеличением перегонного времени хода расход топлива на перемещение поезда уменьшается. Например, в вариантах 25 и 27, приведенных в табл. 2, при близких значениях времени хода 245,79 и 245,8 минут расход топлива составил 1083,3 и 1104,9 кг соответственно.

В то же время при минимальных значениях времени хода в диапазоне от 192,2 до 193,4 минуты, полученных в вариантах 1–6, минимальный расход топлива за поездку оказался максимальным и составил от 1349 до 1386,4 кг.

Разброс значений расхода топлива составил 286 кг, что составляет  $\pm 23$  % от среднего значения расхода топлива (1231 кг) для всех рассмотренных вариантов комбинаций режимов ведения поезда.

При этом расход топлива и время движения коррелируются с числом прямых переключений позиций контроллера машиниста, необходимых для обеспечения заданного варианта движения. В целом большее число прямых переключений и больший расход топлива имеют место при уменьшении времени хода поезда по участку.

В табл. 1 и 2 номера вариантов режимов ведения поезда идентичны и характеризуются величиной заданного диапазона изменения скорости движения от управляющего воздействия и расстояния прогнозирования траектории движения поезда [3, 4].

С учетом выполнения требований к соблюдению графика движения: по заданному времени хода или соблюдении минимально возможного времени хода должна проводиться отбраковка неэффективных вариантов.

Очевидно, что строгое соблюдение графика движения поезда на всем участке практически невозможно. График движения может быть нарушен при наличии временных ограничений скорости движения, задержки с отправлением на

Таблица 1. Расчетные режимы работы тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> с составом из порожних вагонов массой 1500 т по участку 1-й категории сложности с соблюдением общего для всех режимов времени хода

№ варианта режима ведения поезда	Время работы на позициях контроллера машиниста, мин															Число прямых переключений	Расход топлива, кг		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15	
	1	19,00	1,60	6,93	11,53	89,01	77,81	3,25	1,37	5,37	1,14	3,21	2,26	0,36	0,25			0,24	1,99
2	18,1	3,81	2,2	7,23	106,14	69,97	1,89	5,87	0,78	0,87	5,07	0,48	0,44	0,38	0,3	1,87	225,4	193	1149,8
3	15,42	4,36	4,07	10,55	90,12	82,39	1,47	5,39	0,68	6,19	0,65	0,94	0,52	0,18	0,16	1,69	224,78	152	1162
4	18,14	1,35	1,54	12,74	87,68	84,11	7,11	4,02	3,49	0,47	0,82	0,93	0,46	0,25	0,2	1,53	224,84	152	1164,5
5	15,46	3,82	2,07	11,95	93,54	78,45	7,44	7,48	0,47	0,48	0,47	0,63	0,82	0,45	0,13	1,53	225,19	184	1160,4
6	12,28	3,93	2,31	12,3	90,28	93,32	2	3,96	0,33	0,93	0,96	0,51	0,15	0,14	0,13	1,53	225,06	146	1164,9
7	20,48	1,18	14,22	12,47	54,89	90,71	8,35	0,86	13,81	0,63	3,71	0,6	0,48	0,3	0,18	2,3	225,17	101	1189,5
8	23,5	0,9	1,48	15,89	60,49	97,29	6,8	13,35	0,29	0,33	0,74	1,23	0,15	0,13	0,12	2,22	224,91	59	1188,5
9	17,01	0,89	6,27	14,16	63,58	101,67	6,92	8,73	0,29	0,4	1,06	0,76	0,14	0,14	0,12	2,17	224,31	54	1192,3
10	15,93	0,9	6,71	14,28	64,13	101,48	15,59	0,45	0,37	0,5	1,53	0,13	0,14	0,15	0,14	2,09	224,52	49	1188,1
11	11,59	1,16	8,91	4,48	155	11,21	13,55	12,68	1,11	1,43	4,03	0,43	0,39	0,3	0,28	2,07	228,62	138	1140,2
12	13,86	1,87	6,53	6,2	139,61	4,07	34,56	15,46	0,68	0,77	0,6	0,5	0,47	0,49	0,38	1,61	227,66	139	1159,1
13	18,19	1,27	9,39	3,72	123,24	29,24	6,87	7,99	6,84	4,73	3,76	2,78	3,28	0,63	0,4	2,61	224,94	378	1173,5
14	19,83	1,3	1,66	3,93	133,59	15,84	14,81	6,91	9,95	4,12	4,5	4,33	0,71	0,41	0,31	2,41	224,61	308	1177,8
15	11,92	1,49	9,29	13,28	126,63	15,24	16,28	4,9	6,3	6,41	4,09	4,88	1,5	0,5	0,71	2,35	225,77	371	1181,5
16	11,09	1,12	11,15	4,32	139,53	12,43	16,56	4,12	5,79	5,01	7,42	3,19	0,67	0,47	0,24	2,25	225,36	277	1173,6
17	17,94	1,32	1,64	3,44	138,6	15,99	18,2	5,68	3,41	3,97	10,03	1,47	0,62	0,49	0,26	2,19	225,25	257	1175,8
18	17,38	1,69	2,08	8,92	129,19	13,32	11,48	13,86	5,36	11,24	5,08	1,43	0,89	0,68	0,35	1,82	224,77	317	1183,2
19	14,04	2,01	6,67	26,64	113	5,8	18,24	9,99	6,53	8,43	5,02	2,54	1,41	0,85	1,95	2,52	225,64	463	1178,6
20	14,74	1,29	12,82	6,65	130,61	11,12	13,98	6,04	6,74	6,86	4,95	2,68	3,57	0,85	0,44	2,43	225,77	432	1174
21	11,45	1,16	1,4	29,54	122,3	11,21	13,61	6,63	6,48	7,01	5,11	2,82	3,32	0,72	0,35	2,42	225,53	427	1177,5
22	10,86	1,26	13,63	6,04	138,45	7,81	13,76	7,17	6,05	6,17	4,72	4,59	1,45	0,85	0,46	2,3	225,57	357	1173,9
23	18,7	1,46	1,89	13,09	124,42	18,36	12,37	7,15	6,48	6,85	5,21	4,78	1,23	0,76	0,43	2,32	225,5	419	1180,2
24	17,83	1,66	4,97	9,35	128,72	10,09	16,63	8,36	6,3	7,53	7,58	2,04	1,09	1,05	0,53	1,96	225,69	386	1178,8
25	14,2	1,88	13,07	27,96	97,56	15,63	7,11	8,31	12,52	9,53	7,16	4,68	1,63	0,89	0,81	3,24	226,18	595	1192,9
26	16,99	1,66	16,56	4,77	121,7	6,27	8,93	15,94	8,26	8,95	5,49	2,86	1,45	1,23	0,93	2,97	224,96	530	1183,5
27	13,13	1,92	2,43	45,23	92,96	14,01	7,54	10,71	10,34	9,87	8,02	3,46	1,65	1,07	0,61	3,17	226,12	588	1192,1
28	10,98	3,43	17,46	13,92	116,32	6,84	8,24	15,4	8,37	8,47	6,45	3,15	1,42	1,1	1,04	2,71	225,3	544	1184,7
29	21,14	2,24	8,2	17,31	100,03	20,48	8,41	8,78	10,13	9,94	8,43	3,76	1,61	1,22	0,69	2,97	225,34	589	1195,6
30	20,66	2,64	8,24	17,12	104,24	11,07	13,96	7,98	13	9,99	6,4	3,48	2,07	1,17	0,76	2,74	225,52	567	1193

Таблица 2. Расчетные режимы работы тепловоза 2ТЭ25К<sup>М</sup> с составом из порожних вагонов массой 1500 т по участку 1-й категории сложности при соблюдении минимально возможного времени хода

№ варианта режима ведения поезда	Время работы на позициях контроллера машиниста, мин															Число прямых переключений	Расход топлива, кг		
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			15	
1	18,1	2,06	4,64	7,06	16,64	16,75	29,7	49,87	11,47	8,78	15,06	4,66	1,8	2,73	0,56	3,53	193,41	315	1349
2	16,6	2,63	2,76	3,5	18,6	14,21	36,38	42,77	14,18	15,62	15,2	2,38	2,38	1,06	1,91	2,64	192,37	289	1363,1
3	15,47	1,98	2,6	5,2	14,34	16,13	40,37	56,32	6,63	7,98	16,52	1,21	3,33	1,79	0,55	2,35	192,77	273	1370,7
4	15,34	1,86	2,68	3,37	7,72	23,98	49,7	48,93	8,15	8,55	13,14	2,07	3,77	0,54	0,6	2,3	192,2	261	1375,5
5	15,61	1,99	2,69	3,08	5,89	22,82	48,75	50,23	15,28	10,34	8,42	1,59	3,23	0,82	0,25	2,25	193,24	248	1378,8
6	14,61	1,84	2,87	3,61	4,2	6,35	67,43	59,74	6,93	13,48	5,64	2,58	0,68	0,3	0,25	2,25	192,76	226	1386,4
7	17,8	2,21	4,73	7,89	17,71	26,9	95,56	7,85	1,48	5,58	5,53	0,78	1,9	2,17	1,75	2,29	202,13	234	1303,0
8	17,98	1,93	2,59	3,35	9,71	35,74	105,06	2,17	2,27	5,08	6,64	5,78	0,37	0,25	0,24	2,41	198,3	217	1331,1
9	15,85	2,08	2,62	5,32	9,69	44,46	73	23,7	4,25	10,31	1,24	5,11	0,38	0,3	0,26	2,35	200,92	209	1336,3
10	14,79	3,9	2,6	3,28	8,97	52,77	92,92	3,39	2,6	3,21	8,33	2,82	0,4	0,48	0,29	2,25	203	207	1329,2
11	14,13	1,79	2,64	6,24	10,5	52,22	87,07	6,41	5,78	6,97	2,56	2,84	0,79	0,48	0,13	2,2	202,75	199	1326,5
12	14,84	2,2	2,74	2,82	7,52	30,57	115,08	13,79	1,35	2,36	4,74	0,53	0,14	0,13	0,12	2,2	201,13	189	1338,4
13	15,5	1,11	8,68	3,94	30,47	119,1	11,58	11,1	0,73	0,7	4,59	3,67	0,1	0,13	0,12	2,24	213,81	95	1251,7
14	17,68	1,16	1,32	9,93	51,86	98,19	12	11,09	0,69	0,94	5,53	3,4	0,14	0,14	0,13	2,36	216,56	113	1234,9
15	12,04	4,09	1,38	7,36	56,75	97,99	15,53	10,74	0,56	1,06	5,14	0,36	0,14	0,14	0,13	2,3	215,71	106	1234,2
16	13,89	1,24	2,82	5,39	44,51	97,99	27,82	8,34	0,82	7,02	1,12	1,3	0,15	0,14	0,13	2,25	214,93	110	1255,6
17	13,86	3,18	1,82	5,45	36,89	104,44	27,89	5,24	10,27	1,07	0,76	0,13	0,15	0,16	0,13	2,2	213,64	128	1259,9
18	12,13	1,32	1,46	9,14	37,02	126,64	8,09	15,35	0,83	0,3	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	2,2	215,13	146	1254,1
19	21,41	0,28	3,54	18,22	154,82	5,25	0,74	25,78	0,3	0,28	2,16	0,13	0,15	0,13	0,12	2,24	235,55	36	1106,2
20	24,55	0,8	0,86	14,98	138,43	35,33	0,78	14,82	0,35	0,72	1,35	0,13	0,14	0,13	0,13	2,36	235,86	39	1117,9
21	13,43	2,06	9,25	19,27	140,03	30,64	16,39	0,61	2,06	0,16	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	2,3	236,88	30	1114,5
22	13,41	1,8	10,12	15,21	142,99	31,01	16,25	2,35	0,18	0,16	0,14	0,13	0,15	0,14	0,13	2,25	236,42	28	1116,9
23	16,46	0,67	9,06	15,4	135,37	53,94	0,76	2,06	0,18	0,2	0,17	0,13	0,15	0,16	0,13	2,2	237,04	29	1110,3
24	13,38	4,28	0,88	21,61	168,65	19,15	8	0,21	0,21	0,3	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	2,2	239,53	24	1084,7
25	20,71	0,65	11,2	39,58	137,52	2,43	16,62	10,73	3,28	0,16	0,14	0,13	0,15	0,13	0,12	2,24	245,79	32	1083,3
26	29,29	0,91	5,41	32,86	117,87	6,98	44,15	0,3	0,3	0,29	2,03	0,13	0,14	0,13	0,13	2,36	243,28	39	1108,2
27	16,42	1,99	1,37	61,65	108,7	32,64	16,47	3,31	0,18	0,15	0,14	0,13	0,14	0,14	0,13	2,3	245,86	27	1100,4
28	15,62	0,6	15,48	32,41	122,78	32,78	16,51	3,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,15	0,14	0,13	2,25	242,67	28	1104,9
29	23,02	1,03	7,39	36,08	114,58	39,08	16,57	3,16	0,18	0,2	0,17	0,13	0,15	0,16	0,13	2,2	244,23	30	1106,4
30	21,55	1,46	6,39	37,1	114,41	33,23	22,72	2,76	0,21	0,3	0,14	0,13	0,14	0,13	0,12	2,2	242,99	30	1111,2

промежуточных станциях или при движении по желтому сигналу светофора. Небольшие отклонения от графика движения принято компенсировать наличием определенного допуска на время хода поезда по участку.

При серьезных нарушениях графика движения локомотивная бригада обязана осуществить введение поезда в график («нагон») для выдержки времени хода поезда без учета вопросов энергоэффективности.

Из-за необходимости наличия значительных вычислительных средств в микропроцессорной системе управления тепловозом невозможно после нарушения графика движения просчитать в реальном режиме времени новый график движения на весь оставшийся участок, но возможно рассчитать график движения на более коротких перегонах (субучастках), состоящих из нескольких блок-участков.

Согласно принципу оптимальности Р. Беллмана [7, 8], независимо от того, каким бы путем система ни пришла в данное состояние, дальнейшее ее движение должно быть оптимальным. При реализации этого принципа алгоритм управления должен после фиксации нарушения энергооптимального режима перейти на расчет нового энергооптимального режима на самостоятельно выбранном по длине субучастке с выдачей команд управления в режиме реального времени. Время прохождения таких субучастков будет значительно меньше, следовательно, и вероятность отклонения от заданного режима должна быть менее существенна.

Повторный расчет для оставшихся перегонов потребует меньших вычислений благодаря уменьшению оставшегося времени хода и расстояния, что позволяет выполнить его в масштабе реального времени и получить для каждого из субучастков режим, близкий к энергооптимальному.

Практически необходимо проверить возможность выполнения для данного случая хорошо

известного алгоритма оптимизации процесса — киевский веник [8–10], формулирующий правила последовательного усечения множества конкурентоспособных вариантов. Алгоритм выбора режимов ведения представляет собой многошаговый процесс, на каждом этапе которого выполняется отбрасывание некоторого множества вариантов, о которых становится известно, что они не являются оптимальными.

В данном случае на каждом субучастке может быть выбрана самая экономичная комбинация режимов из нескольких ранее рассчитанных. Показатели движения в конце субучастка становятся исходными для всех рассматриваемых вариантов движения следующему субучастку. Итогом проверки на аддитивность является сравнение расходов топлива, полученных в результате тягово-энергетического расчета по всему железнодорожному участку с суммой расходов топлива, определенной по энергооптимальным режимам по каждому субучастку.

По существующей классификации продольных профилей железнодорожной сети различают 4 типа профиля. При этом каждой группе профилей соответствует доля так называемых легких элементов профиля с уклонами от минус 3 ‰ до плюс 3 ‰ и значения расчетных подъемов [11].

В данной работе для примера выбраны 4 реальных железнодорожных участка разной категории сложности, разбитые на 5–8 субучастков. На каждом субучастке была определена комбинация режимов ведения с наименьшим расходом топлива, по тому же алгоритму, что и для всего участка. Исходными данными (скорость движения, позиция контроллера) для следующего субучастка являются результаты расчета в конце предыдущего субучастка.

Результаты вычислений приведены в табл. 3–6. Числитель в таблицах соответствует значениям,

Таблица 3. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 1-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения субучастков, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастках, МДж	Скорость движения в конце субучастков, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
0–66 900	59,6/59,6	5788,4/5788,4	893,0/893,0	34,6/34,6	464,5/464,5
66 900–95 900	25,9/26,2	2290,0/2351,2	593,3/636,0	34,6/34,6	185,3/189,6
95 900–129 900	30,8/30,4	2964,2/2966,8	549,6/513,3	34,8/34,9	241,0/246,3
129 900–178 000	42,1/42,2	3432,9/3449,3	1072,8/1119,2	34,9/34,9	282,9/283,8
178 000–220 800	43,6/43,2	3551,3/3383,1	1113,4/924,9	0/0	284,9/271,8
Итого	202/201,6	18026,8/17938,8	4222,1/4086,4		1458,6/1455,6
Процент расхождения, %	0,2	0,5	3,3		0,2

Таблица 4. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 2-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения субучастков, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастках, МДж	Скорость движения в конце субучастков, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
1 859 950–1 918 000	70,1/70,1	1113,6/1113,6	8304,2/8304,2	35,0/35,0	121/121
1 918 000–1 992 000	80,3/80,4	5359,0/5522,9	1641,1/1903,9	33,1/33,7	442,5/453,6
1 992 000–2 058 000	73,9/73,8	7059,2/6869,4	1758,3/1541,3	32,8/32,8	545,0/533,9
2 058 000–2 121 000	69,6/69,9	6647,1/6844,4	1184,9/1390,6	34,8/34,8	515,5/528,7
2 121 000–2 186 000	73,0/73,8	6691,4/6726,4	1440,3/1404,9	34,8/34,8	519,0/522,5
2 186 000–2 241 000	63,6/64,1	8904,9/8916,9	1178,5/1217,7	36,8/36,8	665,6/666,4
2 241 000–2 290 000	57,2/58,5	7592,4/7700,1	2257,7/2425,3	32,7/32,9	567,8/576,2
2 290 000–2 342 700	64,8/64,7	2201,9/2253,5	7584,6/7634,9	0/0	190,8/194,5
Итого	552,5/555,3	45569,5/45647,2	25349,6/25822,8		3567,2/3596,8
Процент расхождения, %	0,5	0,2	1,8		0,8

полученным при расчете энергооптимального режима по субучасткам, знаменатель — значениям, полученным при расчете по всему участку, без разбиения его на субучастки.

Из результатов вычисления следует, что погрешность в комбинации энергооптимальных режимов по расходу энергоресурсов составляет не более 2 %. На более легких участках профиля



Таблица 5. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 3-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения границы субучастка, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастке, МДж	Скорость движения в конце субучастка, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
0–262 290	39,62/41,22	5304,19/5242,18	2355,41/2375,15	35,16/33,17	399,95/394,98
262290–309 800	43,31/44,36	5986,31/5742,0	3394,93/3280,37	34,43/34,37	432,48/430,5
309 800–352 590	48,51/49,83	7500,30/7837,57	1677,76/2060,64	33,16/33,16	551,98/577,52
352 590–394 740	41,03/40,61	5628,99/5734,75	2315,07/2409,1	35,08/35,20	421,28/427,8
394 740–423 500	28,96/29,76	2502,91/2619,7	4083,97/4196,01	0/0	190,66/199,4
Итого	201,48/205,78	26922,7/27176,2	13827,14/14321,27		1996,35/2030,2
Процент расхождения, %	2,09	0,93	3,45		1,66

Таблица 6. Проверка на аддитивность применения алгоритмов программного комплекса «Тяга — Прогноз» в случае дробления на субучастки расчетного полигона 4-й категории сложности при массе поезда 4200 т

Отметки границ субучастков, м	Время прохождения границы субучастка, мин	Проделанная работа, МДж	Работа сил торможения на субучастке, МДж	Скорость движения в конце субучастка, км/ч	Расход топлива за время прохождения субучастка, кг
404 990–380 310	35,06/34,75	3553,96/3445,4	0/0	36,1/35,08	268,3/275,39
380 310–353 320	30,9/31,39	3600,9/3677,8	396,0/461,5	35,4/35,33	273,4/279,2
353 320–317 330	41,89/40,18	5843,02/5944,04	271,71/299,11	38,38/37,98	437,73/446,89
317 330–288 310	38,35/37,59	6689,56/6723,63	0/0	33,67/33,68	491,93/494,91
288 310–254 310	44,16/43,0	8949,82/8910,5	0 0	33,11/33,17	645,87/646,08
254 310–234 900	31,73/31,63	6767,7/6791,67	0/37,12	0/0	491,1/493,38
Итого	222,09/218,54	35404,9/35492,59	667,71/797,73		2334,93/2635,85
Процент расхождения, %	1,6	0,2	16,3		1,3

погрешность в определении комбинации энергооптимального режима меньше, чем на более тяжелых.

Подтвержденный таким образом аддитивный процесс для расчета энергооптимального режима

поезда с применением программы «Тяга — Прогноз» позволяет распространить алгоритмы поиска энергооптимальных режимов ведения поезда, реализованных в программе «Тяга — Прогноз» на системы автоведения.

Вместе с тем очевидно, для выполнения вычисления энергооптимального режима в реальном масштабе времени потребуются разбиение железнодорожного участка на большее число субучастков. Вопросы о том, насколько сохранится оптимальным процесс поиска при дроблении перегона на более мелкие субучастки, каков будет характер погрешности поиска энергооптимальных режимов ведения и каково влияние изменения разбиения на субучастки на энергооптимальность, требуют дальнейших исследований.

Одним из путей уменьшения объема вычислений является уменьшение числа комбинаций рассматриваемых режимов управления. Если из табл. 1 выбрать каждый третий режим, то результат при выборке из 10 режимов ухудшился на 1,7 %, а если каждый пятый, то результат при выборке из 6 режимов ухудшился на 1,8 %. Целесообразность такого подхода к сокращению объема вычислений может считаться достаточно перспективной.

В силу влияния на результат поиска большого числа факторов установить общие правила назначения количества вариантов поиска в выборке с целью получения наилучшего результата получения энергооптимального режима достаточно сложно. Данный вопрос должен решаться для каждого железнодорожного участка и массы поезда индивидуально.

## Выводы

Подтверждена аддитивность энергооптимального режима ведения поезда тепловозом, определенного с помощью алгоритмов, реализованных в программном комплексе «Тяга — Прогноз», что позволяет использовать данные алгоритмы в программах автоведения поезда тепловоза.

## Список источников

1. Фаминский Г. В. Автоматические устройства для вождения поездов / Г. В. Фаминский, Е. В. Ерофеев. — М.: Транспорт, 1978 — 108 с.

2. URL: <https://zdmira.com/news/v-kitae-uspeshno-ispytali-bespilotnyj-tyazhelovesnyj-poezd>.

3. Гриневич В. П. Использование программного комплекса «Тяга — Прогноз» для поиска энергооптимальных режимов ведения поезда / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 4. — С. 131–149. — DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149.

4. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022616927 Российская Федерация. Программа выполнения тягово-энергетических расчетов «Тяга — Прогноз» ведения локомотивами поездов различной составности по энергооптимальным режимам / В. П. Гриневич, Д. Н. Курилкин, Т. С. Авсиевич и др. — № 2022616055; заявл. 06.04.2022; опубл. 18.04.2022, Бюл. № 4.

5. Гриневич В. П. К вопросу оценки переходных процессов в тепловозном дизель-генераторе / В. П. Гриневич, Т. С. Авсиевич, П. С. Фролов // Вестник ВНИКТИ. — 2022. — Вып. 105. — С. 53–60.

6. Курилкин Д. Н. Учет переходных процессов в дизель-генераторной установке тепловоза при выполнении тяговых расчетов / Д. Н. Курилкин, В. В. Грачев, А. Г. Брагин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 1. — С. 22–34. — DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_22.

7. Беллман Р. Динамическое программирование / Беллман Р. Пер. с англ. И. М. Андреевой и др.; под общ. ред. Н. Н. Воробьева. — М.: Издательство иностранной литературы, 1960. — 400 с.

8. Моисеев Н. Н. Численные методы в теории оптимальных систем / Н. Н. Моисеев. — М.: Наука. 1971. — 424 с.

9. Костромин А. М. Оптимизация управления локомотивом / А. М. Костромин. — М.: Транспорт, 1979. — 119 с.

10. Мугинштейн Л. А. Энергооптимальные методы управления движением / Л. А. Мугинштейн, А. Е. Илютович, И. А. Ябко. — М.: Интекст, 2012. — 80 с.

11. Баранов А. М. Развитие пропускной и провозной способности однопутных линий / А. М. Баранов, В. Е. Козлов, Э. Д. Фельдман // Труды ВНИИЖТ. — М.: Транспорт, 1964. — Вып. 280. — 196 с.

Дата поступления: 20.12.2024

Решение о публикации: 02.02.2025

**Контактная информация:**

ЖУРАВЛЕВ Сергей Николаевич — заместитель главного инженера по перспективным проектам — заведующий НИ КБ ЭМСУ АО «ВНИКТИ»; info@vnikti.com

АВСИЕВИЧ Татьяна Сергеевна — инженер I категории АО «ВНИКТИ»; avsievich-ts@vnikti.com

ГРИНЕВИЧ Владимир Петрович — эксперт I категории АО «ВНИКТИ»; grinevich-vp@vnikti.com

КУРИЛКИН Дмитрий Николаевич — канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Локомотивы и локомотивное хозяйство»; kurilkin@pgups.ru

## Using Algorithms of the Traction–Forecast Software Package to Develop Energy–Efficient Train Driving Modes

S. N. Zhuravlev<sup>1</sup>, T. S. Avsievich<sup>1</sup>, V. P. Grinevich<sup>1</sup>, D. N. Kurilkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Research and Constructive-Technology Institute of Rolling Stock (JSC “VNIKTI”), 410, Oktyabrskoy Revolyutsii str., Kolomna, 140402, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Zhuravlev S. N., Avsievich T. S., Grinevich V. P., Kurilkin D. N. Using Algorithms of the Traction-Forecast Software Package to Develop Energy-Efficient Train Driving Modes // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 148–159. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-148-159

### Summary

**Purpose:** Fuel saving is one of the key challenges facing railway transport. The “Traction — Forecast” software is a solution in search for energy-efficient modes of train driving in various operating conditions. It is difficult to use the algorithms of the system in automatic train operation programmes because of the need to perform a large amount of calculations in real time. The application of energy-saving train driving methods that have been determined by the “Traction — Forecast” software algorithms has been increasingly important due to the necessity of improving locomotive operations. The additivity of the determined modes makes it possible to apply the “Kiev broom” algorithm for solving traction-energy problems using the “Traction — Forecast” software, which sharply reduces the number of steps performed when determining the energy-efficient mode. The solutions for reducing the computational volume of the train-driving mode without noticeable fuel losses have been proposed. **Methods:** The values of the train fuel consumption determined for the whole railway line energy-efficient mode have been compared with the fuel consumption for separate sections of the same railway line calculated according to the same guidelines. **Results:** The additivity of energy-optimal modes of train driving determined by the “Traction — Forecast” software algorithms for a single railway line and its separate sections with an error of less than 2% has been confirmed. **Application:** The algorithms of the “Traction — Forecast” software can be applied in the automatic train operation programmes.

**Keywords:** Software system, traction calculations, optimal control, energy-optimal mode, additivity, terminology.

## References

1. Faminskiy G. V., Erofeev E. V. *Avtomaticheskie ustroystva dlya vozhdeniya poezdov* [Automatic devices for driving trains]. Moscow: Transport Publ., 1978, 108 p. (In Russian)
2. Available at: <https://zdmira.com/news/v-kitae-uspeshno-ispytali-bespilotnyj-tyazhelovesnyj-poezd>. (In Russian)
3. Grinevich V. P., Kurilkin D. N., Avsievich T. S. Ispol'zovanie programmnoy kompleksa "Tyaga — Prognoz" dlya poiska energooptimal'nykh rezhimov vedeniya poezda [Using the Tyaga — Prognoz software package to search for energy-optimal train driving modes]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. 2022, Iss. 4, pp. 131–149. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-4-131-149. (In Russian)
4. Grinevich V. P., Kurilkin D. N., Avsievich T. S. et al. *Programma vypolneniya tyagovo-energeticheskikh raschetov "Tyaga — Prognoz" vedeniya lokomotivami poezdov razlichnoy sostavnosti po energooptimal'nykh rezhimam* [Program for performing traction and energy calculations "Tyaga — Prognoz" for locomotive operation of trains of various compositions in energy-optimal modes]. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RF, no. 2022616927, 2022. (In Russian)
5. Grinevich V. P., Avsievich T. S., Frolov P. S. K voprosu otsenki perekhodnykh protsessov v teplovoznom dizel'-generatore [On the issue of assessing transient processes in a locomotive diesel generator]. *Vestnik VNIKTI* [Bulletin of VNIKTI]. 2022, Iss. 105, pp. 53–60. (In Russian)
6. Kurilkin D. N., Grachev V. V., Bragin A. G. Uchet perekhodnykh protsessov v dizel'-generatornoy ustanovke teplovoza pri vypolnenii tyagovykh raschetov [Accounting for transient processes in a diesel generator set of a locomotive when performing traction calculations]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering]. 2024, Iss. 1, pp. 22–34. DOI: 10.46973/0201-727X\_2024\_1\_22. (In Russian)
7. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye. Per. s angl. I. M. Andreevoy i dr.; pod obshch. red. N. N. Vorob'eva* [Dynamic programming. Transl. from English by I. M. Andreeva et al.; under the general editorship of N. N. Vorobyov]. Moscow: Izdatel'stvo inostranoy literatury Publ., 1960, 400 p. (In Russian)
8. Moiseev N. N. *Chislennyye metody v teorii optimal'nykh sistem* [Numerical methods in the theory of optimal systems]. Moscow: Nauka Publ., 1971, 424 p. (In Russian)
9. Kostromin A. M. *Optimizatsiya upravleniya lokomotivom* [Optimization of locomotive control]. Moscow: Transport Publ., 1979, 119 p. (In Russian)
10. Muginshteyn L. A., Ilyutovich A. E., Yabko I. A. *Energooptimal'nye metody upravleniya dvizheniem* [Energy-optimal methods of traffic control]. Moscow: Intekst Publ., 2012, 80 p. (In Russian)
11. Baranov A. M., Kozlov V. E., Fel'dman E. D. Razvitie propusknoy i provoznoy sposobnosti odnopusnykh liniy [Development of throughput and carrying capacity of single-track lines]. *Trudy VNIIZhT* [Proceedings of VNIIZhT]. Moscow: Transport Publ., 1964, Iss. 280, 196 p. (In Russian)

Received: December 20, 2024

Accepted: February 02, 2025

### Author's information:

Sergey N. ZHURAVLEV — Deputy Chief Engineer for Advanced Projects — Head of the Research Institute of the EMSU Design Bureau of VNIKTI JSC; [info@vnikti.com](mailto:info@vnikti.com)  
Tatiana S. AVSIEVICH — Engineer of the First Category of JSC VNIKTI; [avsievich-ts@vnikti.com](mailto:avsievich-ts@vnikti.com)  
Vladimir P. GRINEVICH — Expert of the First Category of JSC VNIKTI; [grinevich-vp@vnikti.com](mailto:grinevich-vp@vnikti.com)  
Dmitry N. KURILKIN — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Locomotives and Locomotive Engineering; [kurilkin@pgups.ru](mailto:kurilkin@pgups.ru)