

ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОДВИЖНОЙ ЕДИНИЦЫ

С.Г. Чув,

канд. техн. наук, заслуженный конструктор РФ,
генеральный конструктор АО МТЗ ТРАНСМАШ

Созданием принципиально новых тормозных систем для железнодорожного транспорта в мире и в нашей стране занимались многие фирмы, компании и отраслевые институты. Практически все данные исследования были направлены на разработку пневматических фрикционных тормозов, управление которыми осуществляется с помощью тормозной пневматической магистрали или электрическим сигналом. В последние 15 — 20 лет для управления тормозами стали активно использоваться микропроцессорные системы, которые значительно облегчают работу машиниста и повышают безопасность движения на железнодорожном транспорте. На локомотивах также нашло применение электродинамическое (реостатное и рекуперативное) торможение.

Однако для торможения состава исполнительным механизмом торможения является фрикционная пара трения «колесо-тормозная колодка» или тормозной диск, расположенный на оси, и тормозная накладка, расположенная на клещевом механизме. Для выполнения функции торможения к фрикционной паре должно быть подведено довольно большое количество энергии (например, от компрессора или другого источника энергии). При этом вся затраченная энергия в конце всех ее преобразований превращается в тепловую.

Многие годы различными фирмами и институтами велись работы по отказу от фрикционной пары трения при торможении. К ним можно отнести вращающийся вихретоковый тормоз (ВВТ) для железнодорожного транспорта (1), впервые разработанный отделением автотормозного хозяйства ВНИИЖТа совместно с кафедрой электрических машин МЭИ в 1980 г. Позднее в 1986 г. подобной разработкой занялось проектное бюро высокоскоростного движения DB (Германия).

Принцип работы ВВТ тот же, что и в линейном исполнении. При вращении колесной пары с высокой частотой ротор вращается параллельно магнитам, которые расположены в корпусе с чередованием северного и южного полюсов. Между магнитами и ротором возникают вихревые токи, которые создают силы, направленные против вращения ротора. За счет этого колесная пара начинает тормозить. Вихретоковый тормоз может быть выполнен также в линейном исполнении — линейный вихретоковый тормоз (ЛВТ).

Стоит отметить, что в ЛВТ роль элемента, выделяющего тепло, играет рельс. В ВВТ таким элементом является ротор. Корпус может крепиться к раме тележки или размещаться на колесной паре. В последнем случае необходимо исключить возможность его проворачивания путем установки подшипников.

Проведенные во ВНИИЖТе испытания показали, что максимальный тормозной момент возникает при частотах вращения в диапазоне 200 — 400 об/мин. При длительном торможении диск нагревается до 600 °С, что приводит к снижению тормозного момента примерно на 30 %, однако тормозное усилие при этом все равно остается достаточно высоким и составляет 1000 — 1100 кгс (2). Мощность питания тормоза составляет 3 — 4 кВт. Поскольку внешняя тормозная сила у ВВТ реализуется в точках контакта колес с рельсами, то ему (в отличие от ЛВТ) присуще ограничение по сцеплению. Также вихретоковые тормоза более экономичны и экологичны, чем фрикционные.

Многие годы различными учеными и практиками обсуждается вопрос использования огромной кинетической энергии, которой обладает движущаяся единица (вагон, локомотив, поезд и т.п.) рельсового транспорта. Однако практическая реализация использования кинетической энергии подвижной единицы в

железнодорожном транспорте в настоящее время отсутствует.

Развитие технологий в области создания постоянных магнитов открывает новые пути развития железнодорожного транспорта. Далее приводятся теоретические исследования применения генераторов на постоянных магнитах без магнитопровода. В настоящее время такие генераторы нашли широкое применение в ветроэнергетике. Они обладают рядом параметров, которые позволяют применить их для торможения подвижного состава железнодорожного транспорта.

Важнейшими достоинствами генераторов на постоянных магнитах без магнитопровода являются:

- практически полное отсутствие тормозящего момента на валу генератора во всем диапазоне скоростей вращения при нулевой нагрузке, достигаемое благодаря отсутствию у генератора замкнутого магнитопровода; скорость вращения вала генератора (оси колесной пары) в диапазоне скорости движения поезда от 0 до 300 км/ч составляет, соответственно, от 0 до 1676 об/мин при диаметре колеса 950 мм;

- генератор выходит на полную мощность при очень малых оборотах (от 100 об/мин), что соответствует скорости движения поезда 18 км/ч (при проектировании генератора под конкретную задачу минимальные обороты могут быть снижены);

- при коротком замыкании обмоток генератора на валу создается момент, который может быть использован для удержания вагона (поезда) на стоянке, причем этом момент не требует затрат энергии.

Таблица 1

Исходные обозначения математической модели торможения

Наименование параметра	Обозначение	Размерность
Осевая нагрузка	$Q_{ось}$	кг
Количество осей	$K_{ось}$	шт.
Начальная скорость вагона	V_H	м/с
Текущая скорость	V	м/с
Масса вагона	m_B	кг
Кинетическая энергия вагона в начале торможения	$E_{вн}$	Дж
Кинетическая энергия на ось в начале торможения	$E_{ось,н}$	Дж
Ускорение	a	м/с ²
Тормозной путь	L_T	м
Время торможения	t_T	с
Разность энергии между двумя скоростями при торможении	ΔE	Дж
Время между двумя скоростями при торможении	Δt	с
Мощность на оси	$P_{ось}$	Вт

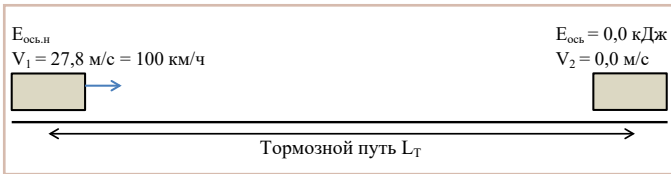


Рис. 1. Схема торможения идеального вагона

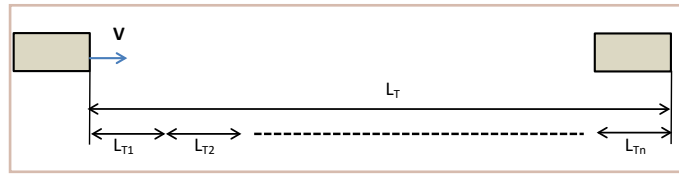


Рис. 2. Схема торможения вагона на участке

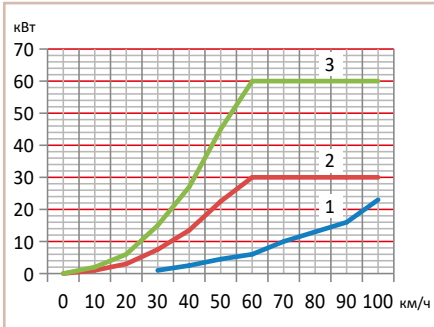


Рис. 3. Характеристики ветрогенераторов: 1 — 40 кВт, 700 об/мин (TGET770-I-H-40KW-700R); 2 — 30 кВт, 300 об/мин (TGET770-I-30KW-300R); 3 — 60 кВт, 300 об/мин (TGET900-I-60KW-300R)



Рис. 4. Общий вид ветрогенератора

идеального вагона. Результаты данных расчетов здесь не приводятся, так как они являются промежуточными. В дальнейшем при вычислении реального тормозного пути описанный процесс торможения с постоянным замедлением идеального вагона будет использован при вычислении тормозного пути на элементарном участке, на которые будет разбит реальный тормозной путь.

На рис. 2 представлена схема торможения вагона на участке L_t , который разбивается на элементарные участки L_{tn} , на каждом из которых принимаются допущения и процесс торможения, описанный выше.

Основные формулы, которые описывают процесс торможения с переменным замедлением идеального вагона:

тормозной путь, м:
 $L_t = L_{t1} + L_{t2} + \dots + L_{tn} = \Delta L$;
 тормозной путь на n-ом (элементарном) участке тормозного пути, м:
 $L_{tn} = (V_n - V_{n-1}) / (2 \cdot a_n)$;
 разность энергии между двумя скоростями при торможении, Дж:
 $\Delta E_{ось\ от\ v} = E_n - E_{n-1}$;
 мощность тормозного генератора на n-ом участке, Вт:

$P_{ГГn} = E_{ГГn} / t_{ГГn}$;
 время торможения на n-ом участке, с:
 $t_{ГГn} = \Delta E_{ось\ от\ v} / P_{ГГn}$;
 ускорение на n-ом участке, м/с²:

$a_{tn} = (V_n - V_{n-1}) / t_{ГГn}$;
 средняя мощность тормозного генератора на участке при торможении, Вт:
 $P_{ГГn} = P_{n-1} + (P_n - P_{n-1}) / 2$;
 время торможения на n-ом участке торможения, с:

$t_{tn} = \Delta E_{ось\ от\ v} / P_{ГГn}$;
 тормозной путь на n-ом участке торможения, м:
 $L_{tn} = (V_n - V_{n-1}) / (2 \cdot a_{tn})$.

На основании приведенных математических выражений были проведены расчеты тормозных путей для тормозных генераторов, расположенных на оси колесной пары, имеющих различную мощность и внешние характеристики.

Для расчета использовались реальные характеристики ветрогенераторов на постоянных магнитах (рис. 3, 4) производства КНР. Рабочие параметры генератора на постоянных магнитах модели TGET900-I-60KW-300R представлены в табл. 2. Необходимо обратить внимание на то, что отбор мощности от генератора производился в соответствии его мощно-

Таблица 2

Рабочие параметры генератора на постоянных магнитах модели TGET900-I-60KW-300R

Параметры	Значение
Номинальная мощность, кВт	60
Номинальная скорость вращения, об/мин	300
Величина тока, А	69
Тип намотки	звезда Y
Сопротивление изоляции, МОм	100
Уровень утечки	< 5 мА
Пусковой момент, Н/м	< 0,5
Фаза	трехфазный
Структура	внутренний ротор
Статор	полюс
Ротор	внутренний ротор
Диаметр, мм	895
Общая длина, мм	460
Общий вес, кг	300
Диаметр вала, мм	100
Материал корпуса	алюминиевый сплав
Материал вала	сталь

сти от скорости движения вагона, пересчитанной на число оборотов оси колесной пары, но не более номинальной мощности генератора, что и обуславливает линейную часть характеристик при скорости более 60 км/ч.

Расчеты проводились в программе Excel, результаты, которых представлены в табл. 3 — 6.

В табл. 7 представлены результаты расчета тормозных путей L_t в зависимости от начальной скорости торможения и мощности тормозного генератора. Полученные тормозные пути полностью укладываются в требования нормативных значений (табл. 8). При этом следует отметить, что тормозной путь обеспечивался только тормозным генератором и при этом не учитывались другие факторы, влияющие на сопротивление движению вагона.

На рис. 5 представлена функциональная схема тормозной системы вагона на основе тормозного генератора на постоянных магнитах.

Рассмотрим математическую модель торможения идеального вагона (поезда). Исходные обозначения приведены в табл. 1.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения:

- ✓ ускорение вагона является постоянным от начала торможения до полной остановки;
- ✓ сопротивление движению при торможении создается только тормозным генератором.

На рис. 1 представлена схема движения вагона при равномерном торможении с постоянным ускорением от начальной скорости 100 км/ч до нулевой скорости на участке L_t .

Процесс торможения с постоянным замедлением идеального вагона описывается следующими формулами:

текущая скорость вагона: $V = L/t$;
 масса вагона: $m_B = Q_{ось} \cdot K_{ось}$;
 кинетическая энергия вагона в начале торможения:

$E_{вн} = m_B \cdot V_n^2 / 2$;
 кинетическая энергия на ось в начале торможения:

$E_{ось,н} = E_{вн} / K_{ось}$;
 кинетическая энергия от скорости вагона на ось:

$E_{ось\ от\ v} = m_B \cdot V^2 / 2 / K_{ось}$;
 ускорение: $a = V_n^2 / (2 \cdot L_t)$ — при $a = const$; в диапазоне скоростей от V_n до $V = 0$;

время торможения от начальной скорости до нуля при постоянном ускорении: $t_t = V_n / a$;

разность энергии между двумя скоростями при торможении:

$\Delta E = E_n - E_{n-1}$;
 время между двумя скоростями при торможении:

$\Delta t = t_n - t_{n-1} = V_n / a - V_{n-1} / a$;
 мощность на оси между двумя скоростями:

$\Delta P_{ось} = \Delta E / \Delta t$.

На основании приведенных формул были выполнены расчеты торможения

Таблица 3

Торможение при мощности генератора 30 кВт (начальная скорость 100 км/ч)

V, км/ч	V, м/с	E _{осб} , кДЖ	P _{ген} , кВт	ΔE _{осб} , кДЖ	P _{гтп} , кВт	t _{тп} , с	a _{тп} , м/с ²	L _{тп} , м
100	27,77778	7908,950617	30					
90	25	6406,25	30	1502,700617	30	50,0900206	0,0554557	69,56947
80	22,22222	5061,728395	30	1344,521605	30	44,8173868	0,0619799	62,24637
70	19,44444	3875,385802	30	1186,342593	30	39,5447531	0,0702439	54,92327
60	16,66667	2847,222222	30	1028,16358	30	34,2721193	0,0810507	47,60017
50	13,88889	1977,237654	22,5	869,9845679	26,25	33,1422693	0,0838137	46,03093
40	11,11111	1265,432099	13,5	711,8055556	18	39,5447531	0,0702439	54,92327
30	8,333333	711,8055556	7,5	553,6265432	10,5	52,7263374	0,0526829	73,23102
20	5,555556	316,3580247	3	395,4475309	5,25	75,3233392	0,036878	104,6157
10	2,777778	79,08950617	1	237,2685185	2	118,634259	0,0234146	164,7698
0	0	0	0	79,08950617	0,5	158,179012	0,017561	219,6931

Таблица 4

Торможение при мощности генератора 40 кВт (начальная скорость 100 км/ч)

V, км/ч	V, м/с	E _{осб} , кДЖ	P _{ген} , кВт	ΔE _{осб} , кДЖ	P _{гтп} , кВт	t _{тп} , с	a _{тп} , м/с ²	L _{тп} , м
100	27,77778	7908,950617	40					
90	25	6406,25	40	1502,700617	40	37,5675154	0,0739409	52,1771
80	22,22222	5061,728395	40	1344,521605	40	33,6130401	0,0826399	46,68478
70	19,44444	3875,385802	40	1186,342593	40	29,6585648	0,0936585	41,19245
60	16,66667	2847,222222	40	1028,16358	40	25,7040895	0,1080675	35,70012
50	13,88889	1977,237654	28	869,9845679	34	25,5877814	0,1085588	35,53859
40	11,11111	1265,432099	13,5	711,8055556	20,75	34,3038822	0,0809756	47,64428
30	8,333333	711,8055556	17	553,6265432	15,25	36,3033799	0,0765157	50,42136
20	5,555556	316,3580247	4	395,4475309	10,5	37,6616696	0,0737561	52,30787
10	2,777778	79,08950617	1,5	237,2685185	2,75	86,2794613	0,0321951	119,8326
0	0	0	0	79,08950617	0,75	105,452675	0,0263415	146,462

Таблица 5

Торможение при мощности генератора 60 кВт (начальная скорость 100 км/ч)

V, км/ч	V, м/с	E _{осб} , кДЖ	P _{ген} , кВт	ΔE _{осб} , кДЖ	P _{гтп} , кВт	t _{тп} , с	a _{тп} , м/с ²	L _{тп} , м
100	27,77778	7908,350617	60					
90	25	6406,25	60	1502,700617	60	25,0450103	0,1109114	34,78474
SO	22,22222	5061,728395	60	1344,521605	60	22,4086934	0,1239598	31,12319
70	19,44444	3875,385802	60	1186,342593	60	19,7723765	0,1404878	27,46163
60	16,66667	2847,222222	60	1028,16358	60	17,1360597	0,621013	23,80008
50	13,88889	1977,237654	45	869,9845679	52,5	16,5711346	0,1676275	23,01546
40	11,11111	1265,432099	27	711,8055556	36	19,7723765	0,1404878	27,46163
30	8,333333	711,8055556	15	553,6265432	21	26,3631687	0,1053659	36,61551
20	5,555556	316,3580247	6	395,4475309	10,5	37,6616696	0,0737561	52,30787
10	2,777778	79,08950617	2	237,2685185	4	59,3171296	0,0468293	82,3849
0	0	0	0	79,08950617	1	79,0895062	0,035122	109,8465

Таблица 6

Торможение при мощности генератора 60 кВт (начальная скорость 300 км/ч)

V, км/ч	V, м/с	E _{осб} , кДЖ	P _{ген} , кВт	ΔE _{осб} , кДЖ	P _{гтп} , кВт	t _{тп} , с	a _{тп} , м/с ²	L _{тп} , м
300	83,33333	607,6388889	60					
280	77,77778	529,3209877	60	78,31790123	60	130,5298	0,0425616	362,5829
260	72,22222	456,404321	60	72,91666667	60	121,5278	0,0457143	337,5772
240	66,66667	388,8888889	60	67,5154321	60	112,5257	0,0493714	312,5714
220	61,11111	326,7746914	60	62,11419753	60	103,5237	0,0536646	287,5657
200	55,55556	270,0617284	60	56,71296296	60	94,5216	0,0587755	262,56
180	50	218,75	60	51,3117284	60	85,51955	0,0649624	237,5543
160	44,44444	172,8395062	60	45,91049383	60	76,51749	0,072605	212,5486
140	38,88889	132,3302469	60	40,50925926	60	67,51543	0,0822857	187,5429
120	33,33333	97,22222222	60	35,10802469	60	58,51337	0,0949451	162,5372
100	27,77778	67,5154321	60	29,70679012	60	49,51132	0,1122078	137,5314
90	25	54,6875	60	12,8279321	60	21,37989	0,1299248	29,69429
80	22,22222	43,20987654	60	11,47762346	60	19,12937	0,1452101	26,56857
70	19,44444	33,08256173	60	10,12731481	60	16,87886	0,1645714	23,44286
60	16,66667	24,30555556	60	8,777006173	60	14,62834	0,1898901	20,31714
50	13,88889	16,87885802	45	7,426697531	52,5	14,14609	0,1963636	19,64735
40	11,11111	10,80246914	27	6,076388889	36	16,87886	0,1645714	23,44286
30	8,333333	6,076388889	15	4,726080247	21	22,50514	0,1234286	31,25714
20	5,555556	2,700617284	6	3,375771605	10,5	32,15021	0,0864	44,65306
10	2,777778	0,675154321	2	2,025462963	4	50,63657	0,0548571	70,32858
0	0	0	0	0,675154321	1	67,51543	0,0411429	93,77143

В данной схеме применены следующие устройства.

Тормозной генератор на постоянных магнитах. Он может состоять из двух или трех генераторов общей мощностью до 60 кВт, расположенных на одной колесной паре.

Стабилизатор с выходным напряжением (например, 24 или 48 В). Величина напряжения выбирается при проектировании.

Блок управления нагрузкой, выдающий сигнал управления коммутацией нагрузки генератора. В зависимости от давления в тормозной магистрали (ТМ) или электрического сигнала в цепи электропневматического тормоза (ЭПТ) это может быть традиционная система управления ЭПТ или система ИСКРА.200 (3).

Блок коммутации нагрузки. В зависимости от сигнала, поступающего от блока управления нагрузкой, подключается к генератору (стабилизатору) различная нагрузка (R_{нагр}) с величиной от бесконечности (отсутствие нагрузки) до 0 Ом (короткое замыкание, используется для удержания состава на стоянке и подключается только во время останова). Величина R_{нагр} выбирается из условия не превышения номинальной мощности генератора.

Нагрузка (нагрузочные сопротивления) общей мощностью до 60 кВт (конкретные значения сопротивлений и количество ступеней определяются при проектировании).

Блок дотормаживания и удержания. Этот блок используется при недостаточной эффективности тормозного генератора при малых скоростях (менее 10 км/ч, уточняется при проектировании) или на стоянке. От блока подается постоянное напряжение на обмотки генератора от небольшого источника постоянного тока. Необходимость этого блока определяется характеристиками тормозного генератора.

Рассмотрим алгоритмы управления тормозной системой вагона на основе тормозного генератора на постоянных магнитах.

При управлении по каналу электропневматического тормоза:

❖ сигналы штатного ЭПТ преобразуются блоком управления нагрузкой в управляющие сигналы блоком коммутации нагрузки;

❖ при управлении тормозами с использованием системы ИСКРА.200 управление происходит аналогично ЭПТ.

При управлении по каналу тормозной магистрали:

❖ при зарядном давлении в ТМ нагрузка полностью отключена от тормозного генератора;

❖ при снижении давления в ТМ (при регулировочном или полном служебном торможении) начинает подключаться нагрузка (причем, чем ниже давление в тормозной магистрали, тем большая нагрузка подключается к тормозному генератору);

❖ при полной остановке поезда сопротивление нагрузки на генераторе

Сравнительная таблица расчетных тормозных путей L_t

Таблица 7

Начальная скорость торможения, км/ч	Мощность тормозного генератора на ось, кВт	Масса вагона, кг	Нагрузка на ось, кгс	Тормозной путь, м
100	30	82000	20500	897,6
100	40	82000	20500	627,9
100	60	82000	20500	448,8
300	60	70000	17500	2883,4

Нормированный тормозной путь электропоезда в зависимости от скорости

Таблица 8

Скорость начала торможения, км/ч	Тормозной путь на чистых и сухих рельсах, м, не более
140	930
160	1150
200	1670
260	2600
300	3900
360	6140

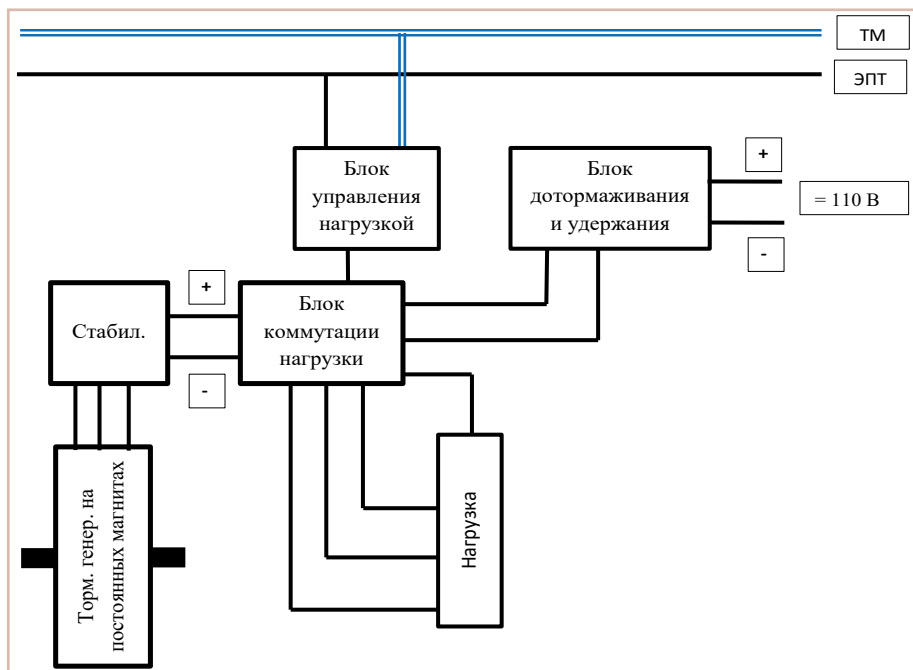


Рис. 5. Функциональная схема тормозной системы вагона на основе тормозного генератора на постоянных магнитах

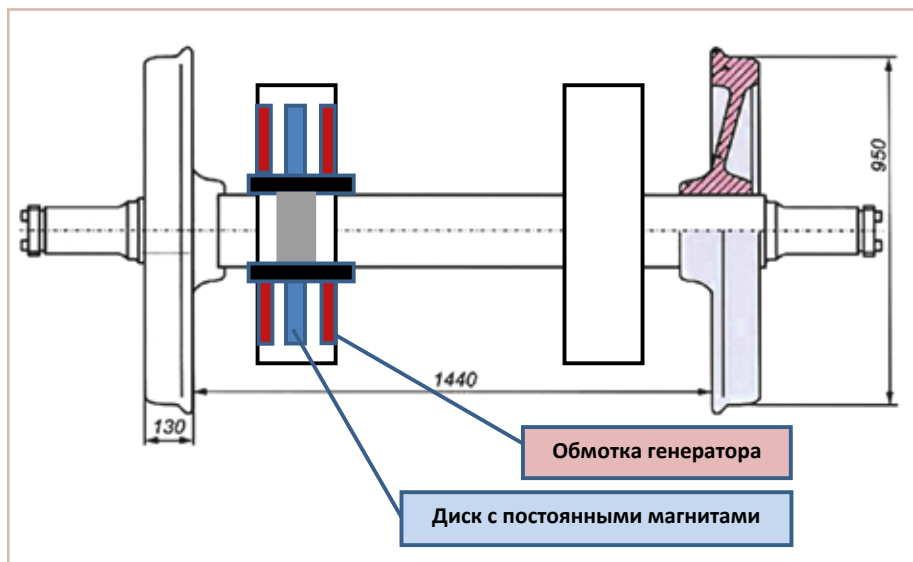


Рис. 6. Схема установки тормозного генератора на колесную пару

должно быть равно нулю (режим удержания);

- ❖ режим удержания поезда на стоянке ($R_{\text{н}} = 0$);
- ❖ при экстренном торможении к тормозному генератору подключается полная нагрузка, равная полной мощности тормозного генератора или большей мощности, если генератор рассчитан на такое подключение;

❖ при начале движения поезда для «отпуска» тормозов необходимо отключить нагрузку от генератора ($R_{\text{нагр}} = \infty$, отсутствие нагрузки).

На рис. 6 показан пример установки элементов тормозного генератора на колесную пару. Расположение обмотки и постоянных магнитов может быть иным, но при этом должно обязательно выполняться условие: обмотка должна быть не-

подвижной, а постоянные магниты жестко крепиться на диск, который сидит на оси колесной пары и вращается при движении подвижного состава.

На основе вышеперечисленных проведенных теоретических расчетов математической модели новой тормозной системы можно сделать следующие выводы:

- ❖ рассматриваемая тормозная система с тормозным генератором на постоянных магнитах не требует внешних источников энергии для осуществления торможения подвижной единицы железнодорожного транспорта;
- ❖ тормозная система на основе тормозного генератора на постоянных магнитах сама может являться источником энергии;
- ❖ тормозная система может эффективно работать при скоростях движения вагона (поезда): верхний предел не ограничен (например, 500 км/ч); минимальная скорость составляет 5 — 10 км/ч (в зависимости от конструкции генератора эта скорость может быть снижена и составлять около нуля км/ч);
- ❖ тормозная система не имеет frictionных частей и не требует периодического обслуживания;
- ❖ кинетическая энергия преобразовывается в тепловую на нагрузочных резисторах, которые располагаются в хорошо обдуваемых местах и не влияют на параметры торможения;
- ❖ тормозной системе не требуется время на подготовку к торможению;
- ❖ тормозной генератор мощностью 30 — 40 кВт на ось обеспечивает тормозные пути при начальной скорости торможения 100 км/ч, а при мощности 60 кВт — 300 км/ч;
- ❖ тормозная система может устанавливаться как на серийном подвижном составе, так и на вновь разрабатываемом.

Библиография

1. Бабаев А.М., Смирнов А.С. Вихретоковые тормоза рельсового транспорта // Вестник института проблем естественных монополий : Техника железных дорог. 2015. № 4 (32). С. 50 — 53.
2. Grundlagen der Bremstechnik : Basics of brake technology. Mödling; München : Knorr-Bremse, 2003. 236 p.
3. Чуев С.Г., Пополовский С.А., Тагиев П.М. Тормозные системы для грузового скоростного движения с цифровым управлением // Вагоны и вагонное хозяйство. 2018. № 4 (56). С. 35 — 37.