

УДК 629.113

Д.П. Барышов

канд. техн. наук, доц., МАДИ,

тел.: 8(499)155-01-45

e-mail: akademy@mail.ru

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ
ПО СЦЕПЛЕНИЮ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ НА ВЕДУЩИХ КОЛЕСАХ
ПОЛУПРИЦЕПА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АВТОПОЕЗДА И
ОГРАНИЧЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНОГО ПО СЦЕПЛЕНИЮ МОМЕНТА
НА ВАЛУ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Аннотация. В статье рассматриваются результаты определения предельных по сцеплению тяговых усилий на ведущих колесах полуприцепа автопоезда и соответствующих ограничений предельного по сцеплению момента на валу вентильно-индукторного двигателя, рассчитаны зависимости частоты вращения вентильно-индукторного двигателя от скорости движения автопоезда, параметры работы вентильно-индукторного двигателя в режиме подката автопоезда и определен порог автоматического ограничения скорости.

Ключевые слова: вал, модель, эксперимент, оценка, результат, тяговое усилие, ведущие колёса, сцепление, ВИД, вентильно-индукторный двигатель, момент, предельный момент, автопоезд, большегрузное транспортное средство, БТС, модульность, модуль, экспериментальная модель, двигатель, полуприцеп, колесо, дорога, мотор-колесо.

Введение

Результаты эксплуатации, полученные в ходе эксплуатации аналогов и прототипов экспериментального автопоезда, показывают, что наиболее

неблагоприятный вариант распределения веса порожнего автопоезда по осям и электромотор-колесам автопоезда состоит в том, что минимальная вертикальная нагрузка 3154 кг приходится на правое (по ходу автопоезда) колесо второй (считая сзади) оси полуприцепа, а максимальная вертикальная нагрузка 5690 кг приходится на левое мотор-колесо четвертой (считая сзади) оси полуприцепа при общей массе автопоезда без груза около 82 т. Основываясь на этих данных, были выполнены теоретические и экспериментальные исследования и оценки.

Определение предельных по сцеплению тяговых усилий на ведущих колесах полуприцепа автопоезда и соответствующих ограничений предельного по сцеплению момента на валу ВИД

Определяем массу перевозимого автопоездом груза [1–2]:

$$G_{гр} = G_a - G_{п} = 120 - 82 = 38 \text{ т}, \quad (1)$$

где $G_{гр}$ – масса груза, перевозимого автопоездом, т; G_a – полная масса автопоезда с грузом, т; $G_{п}$ – масса автопоезда без груза, т.

Принимаем, что вес груза равномерно распределяется между всеми 10 колесами полуприцепа. Тогда дополнительная вертикальная нагрузка на мотор-колесо полуприцепа равна

$$G_{мкдоп} = G_{гр}/10 = 38/10 = 3,8 \text{ т}. \quad (2)$$

Суммарная вертикальная нагрузка на наименее нагруженное мотор-колесо равна:

$$G_{мкгp} = G_{мк \text{ пор}} + G_{мкдоп} = 3,154 \text{ т} + 3,8 \text{ т} = 6,954 \text{ т} \approx 7 \text{ т}. \quad (3)$$

Аналогично, суммарная вертикальная нагрузка на наиболее нагруженное мотор-колесо равна:

$$G_{мкгp} = 5,69 + 3,8 = 9,49 \approx 9,5 \text{ т}. \quad (4)$$

Предельное по сцеплению тяговое усилие на мотор-колесе определяем по следующей формуле [3–4]:

$$F_{мксц} = \varphi \cdot G_{мкгp} \cdot 9,8, \quad (5)$$

где $F_{\text{мксц}}$ – предельное по сцеплению тяговое усилие на колесе, кН;
 φ – коэффициент сцепления мотор-колес с дорогой; $G_{\text{мкгп}}$ – суммарная вертикальная нагрузка на мотор-колесо, т.

Подставляя в (5) значения $G_{\text{мкгп}}$ из (3) и (4), а также значения коэффициентов сцепления, определяем значения предельных по сцеплению тяговых усилий на мотор-колесах.

Для наименее нагруженного мотор-колеса на дороге с асфальто-бетонным покрытием:

$$F_{\text{мксц}} = 0,6 \cdot 7 \cdot 9,8 = 41,16 \text{ кН.} \quad (6)$$

Для наиболее нагруженного мотор-колеса на дороге с асфальто-бетонным покрытием:

$$F_{\text{мксц}} = 0,6 \cdot 9,5 \cdot 9,8 = 55,86 \text{ кН.} \quad (7)$$

Для наименее нагруженного мотор-колеса на дороге с грунтово-щебеночным покрытием:

$$F_{\text{мксц}} = 0,4 \cdot 7 \cdot 9,8 = 27,44 \text{ кН.} \quad (8)$$

Для наиболее нагруженного мотор-колеса на дороге с грунтово-щебеночным покрытием:

$$F_{\text{мксц}} = 0,4 \cdot 9,5 \cdot 9,8 = 37,24 \text{ кН.} \quad (9)$$

Предельный по сцеплению момент на валу ВИД мотор-колеса определяем из (10) следующим образом:

$$F_{\text{хпп}} = 8 \cdot 34,85 \cdot 0,944 \cdot \frac{M_{\text{д}}}{(0,8 \cdot 10^3)} = 0,33 M_{\text{д}}, \quad (10)$$

где $F_{\text{хпп}}$ – суммарное тяговое усилие, кН; $M_{\text{д}}$ – момент на валу ВИД, Нм;

$$M_{\text{дсц}} = 8 \cdot F_{\text{мксц}} / 0,33, \quad (11)$$

где $M_{\text{дсц}}$ – предельный по сцеплению момент на валу ВИД, Нм;

$F_{\text{мксц}}$ – предельное по сцеплению тяговое усилие на колесе, кН.

Подставляя в (11) значения $F_{\text{мксц}}$ из (6) и (9), находим значения предельных по сцеплению моментов на валу ВИД для четырех рассмотренных выше случаев.

Для наименее нагруженного мотор-колеса на дороге с асфальто-бетонным покрытием:

$$M_{\text{дсц}} = 8 \cdot 41,16 / 0,33 = 998 \text{ Нм.} \quad (12)$$

Для наиболее нагруженного мотор-колеса на дороге с асфальто-бетонным покрытием:

$$M_{\text{дсц}} = 8 \cdot 55,86 / 0,33 = 1354 \text{ Нм.} \quad (13)$$

Для наименее нагруженного мотор-колеса на дороге с грунтово-щебеночным покрытием:

$$M_{\text{дсц}} = 8 \cdot 27,44 / 0,33 = 665 \text{ Нм.} \quad (14)$$

Для наиболее нагруженного мотор-колеса на дороге с грунтово-щебеночным покрытием:

$$M_{\text{дсц}} = 8 \cdot 37,24 / 0,33 = 903 \text{ Нм.} \quad (15)$$

Как следует из приведенных выше расчетов, значения предельных по сцеплению моментов на валу ВИД существенно различаются для отдельных мотор-колес полуприцепа, как вследствие различия приходящихся на них вертикальных нагрузок, так и вследствие различия условий сцепления колес для дорог с различным покрытием. Поэтому для максимального использования сцепного веса автопоезда аппаратура управления ВИП должна обеспечивать возможность индивидуального регулирования уровня ограничения предельного по сцеплению момента на валу ВИД в пределах значений, рассчитанных в (12)–(15).

Следует отметить, что найденные в (12)–(15) значения предельных по сцеплению моментов на валу ВИД в тяговом режиме в равной степени относятся и к режиму электрического торможения.

Расчет зависимости частоты вращения ВИД от скорости движения автопоезда и определение порога автоматического ограничения скорости

Произведем расчёт зависимости частоты вращения ВИД от скорости движения автопоезда и определение порога автоматического ограничения скорости.

Связь между частотой вращения ВИД и скоростью движения автопоезда находим из (16):

$$V = 3,6 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot \frac{n_d}{(30 \cdot 34,85)} = 0,00865 \cdot n_d, \quad (16)$$

$$n_d = V / 0,00865 = 115,6 \cdot V, \quad (17)$$

где n_d – частота вращения вала ВИД, об/мин; V – скорость автопоезда, км/ч.

Результаты расчета по (17) сведены в табл. 1.

Таблица 1

V , км/ч	2	4	6	8	10	12	15
n_d , об/мин	231	462	694	925	1156	1387	1734
V , км/ч	20	25	30	35	40	45	50
n_d , об/мин	2312	2890	3468	4046	4624	5202	5780

ВИП должен обеспечивать автоматический переход из режимов тяги и выбега в режим электрического торможения с предельной установкой при превышении максимальной скорости автопоезда $(40 + 2)$ км/ч.

По (17) определяем, что указанному значению максимальной скорости соответствует частота вращения ВИД:

$$n_{d \text{ макс}} = 115,6 \cdot (40 + 2) = (4624 + 231) \text{ об/мин}. \quad (18)$$

Определяемый (18) диапазон частоты вращения вентильно-индукторного двигателя ВИД от 4624 до 4855 об/мин принимаем в качестве порога автоматического ограничения скорости автопоезда, при котором аппаратура управления вентильно-индукторного электропривода (ВИП) должна обеспечивать автоматическое включение режима электрического торможения с предельной установкой.

Расчет параметров ВИД в режиме подката автопоезда

Произведём расчёт параметров вентильно-индукторного двигателя ВИД в режиме подката автопоезда.

Вентильно-индукторный электропривод (ВИП) должен обеспечивать работу автопоезда в режиме подката при выключенной гидромеханической трансмиссии (ГМТ) тягача со следующими фиксированными скоростями:

- первая скорость – до 1 км/ч;
- вторая скорость – до 2 км/ч;
- третья скорость – до (3–4) км/ч;
- четвертая скорость – до (5–6) км/ч.

Расчет производим для горизонтальных участков дороги ($i = 0$) с асфальтово-бетонным и грунтово-щебеночным покрытием при работе только ВИП (ГМТ тягача не работает).

Из (19) при $i = 0$ определяем тяговое усилие, реализуемое ВИП полуприцепа, при движении автопоезда с фиксированной скоростью [3–4]:

$$i = F_x / (9,8 - G_a) - f, \quad (19)$$

где F_x – суммарное тяговое усилие автопоезда, кН; G_a – полная масса автопоезда, т; i – продольный уклон дороги; f – коэффициент сопротивления качению.

$$F_{хпп} = 9,8 \cdot G_a \cdot f. \quad (20)$$

Подставляя в (20) значения G_a и f , находим:

для дороги с асфальтово-бетонным покрытием ($f = 0,02$)

$$F_{хппаб} = 9,8 \cdot 120 \cdot 0,02 = 23,5 \text{ кН}; \quad (21)$$

для дороги с грунтово-щебеночным покрытием ($f = 0,04$)

$$F_{хппгщ} = 9,8 \cdot 120 \cdot 0,04 = 47 \text{ кН}. \quad (22)$$

Момент на валу ВИД в режиме подката определяем по (10).

Для дороги с асфальтово-бетонным покрытием:

$$M_{даб} = F_{хппаб} / 0,33 = 23,5 / 0,33 = 71,2 \text{ Нм}. \quad (23)$$

Для дороги с грунтово-щебеночным покрытием:

$$M_{дгщ} = F_{хппгщ} / 0,33 = 47 / 0,33 = 142,4 \text{ Нм}. \quad (24)$$

Мощность на валу ВИД в режиме подката определяем из (25):

$$M_d = 9,55 \cdot 10^3 \cdot P_{2\text{вид}} / n_d, \quad (25)$$

где M_d – момент на валу ВИД, Нм; n_d – частота вращения вала ВИД, об/мин; $P_{2\text{вид}}$ – мощность на валу ВИД, кВт.

$$P_{2\text{вид}} = M_d \cdot n_d / (9,55 \cdot 10^3). \quad (26)$$

Частоту вращения ВИД в режиме подката определяем по (17):

$$n_d = 115,6 \cdot V. \quad (27)$$

Результаты расчета по (23)–(27) для 4 заданных диапазонов скоростей подката сведены в табл. 2.

Таблица 2

$V_{\text{подката}}$, км/ч	1	2	3–4	5–6
$M_{\text{даб}}$, Нм	71,2	71,2	71,2	71,2
$M_{\text{дгц}}$, Нм	142,4	142,4	142,4	142,4
n_d , об/мин	115	231	347–462	578–694
$P_{2\text{вид аб}}$, кВт	0,86	1,72	2,59–3,44	4,31–5,17
$P_{2\text{вид гц}}$, кВт	1,72	3,44	5,18–6,88	8,62–10,34

Заключение

В статье приведено определение предельных по сцеплению тяговых усилий на ведущих колесах полуприцепа автопоезда и соответствующих ограничений предельного по сцеплению момента на валу вентильно-индукторного двигателя (ВИД). В ходе исследований было выявлено, что значения предельных по сцеплению моментов на валу ВИД существенно различаются для отдельных мотор-колес полуприцепа. Для максимального использования сцепного веса автопоезда аппаратура управления ВИП должна обеспечивать возможность индивидуального регулирования уровня ограничения предельного по сцеплению момента на валу ВИД в пределах значений, приведённых в работе. Приведены расчеты зависимости частоты вращения ВИД от скорости движения автопоезда и определение порога автоматического ограничения скорости, а также расчет параметров ВИД в режиме подката автопоезда.

Литература

1. Павлов В.А., Муханов С.А. Транспортные прицепы и полуприцепы. М.: Воениздат, 1981. 192 с.
2. Закин Я.Х. Маневренность автомобиля и автопоезда. М.: Транспорт, 1986. 136 с.
3. Закин Я.Х., Щукин М.М., Марголис С.Я., Ширяев П.П., Андреев А.С. Конструкции и расчёт автомобильных поездов. Л: Машиностроение, 1968.
4. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 727 с.

References

1. Pavlov V.A., Muhanov S.A. *Transportnye pricepy i polupricepy* (Transport trailers and semi-trailers), Moscow, Voenizdat, 198, 192 p.
2. Zakin Ja.H. *Manevrennost' avtomobilja i avtopoezda* (The maneuverability of the vehicle and trailer), Moscow, Transport, 1986, 136 p.
3. Zakin Ja.X., Shhukin M.M., Margolis S.Ja., Shirjaev P.P., Andreev A.S. *Konstrukcii i raschjot avtomobil'nyh poezdov* (The design and calculation of road trains), Leningrad, Mashinostroenie, 1968.
4. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoj gruzopodemnosti* (Wheeled vehicles especially heavy-duty), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman, 2006, 727 p.

D. Baryshov

The simulation results and evaluation of the limits of adhesion traction on the drive wheels of the semitrailer experimental trains and limitations the limits of adhesion torque on the shaft of the switched-reluctance motor

Abstract. In article results of definition of limit traction efforts on coupling on driving wheels of the semi-trailer of the road train and the corresponding restrictions of the moment, limit on coupling, on a shaft of the valve-inductor engine are considered, dependences of frequency of rotation of the valve-inductor engine on the speed of the movement of the road train, parameters of operation of the valve-inductor engine in the mode of a tackle of the road train are calculated and the threshold of automatic restriction of speed is defined.

Key words: shaft, model, experiment, evaluation, result, traction, wheels, clutch, switched - reluctance motor, torque limiting torque, heavy vehicle, modularity, module, experimental model, engine, trailer, wheel, road, motorized wheel.