

## СНИЖЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ТРАНСМИССИИ ТРОЛЛЕЙБУСА МАЗ 103Т ПУТЁМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТИРИСТОРНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

Галямов П.М.

Белорусский национальный технический университет

Ударная повторяющаяся нагрузка для прочности деталей является особенно опасной, и конструктор должен принимать все меры к ослаблению ее воздействия на механизм [1].

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь эксплуатируется около двух тысяч троллейбусов, от чёткой и надёжной своевременной работы которых зависит своевременная доставка рабочих и служащих на городские предприятия. Кроме того, в нашей республике имеются два собственных производителя троллейбусов – ОАО «МАЗ» и ОАО «Белкоммунмаш», которые не только полностью покрывают потребности внутреннего рынка, но и экспортируют часть троллейбусов в Россию, Украину, Молдову, Румынию и Сербию, что является важным источником валютных средств для нашей республики.

Известно, что при эксплуатации троллейбусов пробег до выхода из строя из-за поломки основных деталей ведущего моста, прочность которых определяется максимальными нагрузками в трансмиссии (полуоси, сателлиты дифференциала, зубчатые колеса) почти в два раза ниже, чем у автобусов той же полной массы. Основная причина указанного явления заключается в том, что из-за наличия на всех современных троллейбусах системы электродинамического торможения тяговым электродвигателем путем перевода его в генераторный режим зубчатые колеса и шлицевые соединения в агрегатах трансмиссии троллейбусов изнашиваются не с одной, как в автобусах и грузовых автомобилях, а с двух сторон, вследствие чего при эксплуатации троллейбусов интенсивно растет окружной люфт в трансмиссии, значение которого по данным [2] может достигать 62 градусов в приведении к валу тягового электродвигателя. Наличие окружного люфта трансмиссиях мобильных машин существенно увеличивает их динамическую нагруженность в переходных процессах. В качестве иллюстрации к сказанному в таблице 1 представлены результаты экспериментальных данных по величине максимальных динамических нагрузок в трансмиссиях троллейбусов и автомобилей при наличии в них окружного люфта, заимствованные из литературных источников.

Таблица 1. Экспериментальные данные о динамических нагрузках трансмиссий троллейбусов и автомобилей в переходных процессах при наличии окружного люфта

Модель машины	Окружной люфт, градусы	Максимальный динамический момент, Н·м	Источник информации	Дополнительные сведения
т р о л л е й б у с ы				
МТБ–82Д	10	750	[3]	Включение первой ходовой позиции с заторможенными колёсами
МТБ–82Д	50	1550	[3]	
МТБ–82Д	75	1200–1600	[4]	
8ТР–8	0	800	[5]	Пуск с заторможенными колёсами
8ТР–8	20	1060	[5]	
а в т о м о б и л и				
ГАЗ–51	0	650–720	[6]	«Бросок» сцепления на IV передаче
ГАЗ–51	6,5–7,5	до 820	[6]	
ГАЗ–51	0	600–800	[6]	То же, но при выключенном заднем мосте
ГАЗ–51	6,5–7,5	1100–1200	[6]	
ЗИЛ–585	371	4600	[7]	Переключение со II на I передачу на подъеме 13°

Таким образом, экспериментально установлено, что окружной люфт в трансмиссиях мобильных машин является существенным фактором, увеличивающим их динамическую нагруженность. Пренебрежение им при моделировании переходных процессов может привести к значительной недооценке уровня максимальных динамических моментов в трансмиссиях троллейбусов при их разгоне.

**Моделирование динамической нагруженности трансмиссии троллейбуса МАЗ 103Т с учетом окружного люфта.** Трансмиссия троллейбуса по сравнению с автомобильной имеет ряд особенностей, наиболее существенными из которых являются меньшая крутильная податливость за счет отсутствия коробки передач, отсутствие демпфирующих элементов (демпфер сцепления или гидротрансформатор), а также элементов, способных своей пробуксовкой ограничить пиковый динамический момент (сцепление для механической или фрикционы для гидромеханической трансмиссии). Поэтому для исследования динамики троллейбуса предлагается использовать динамическую схему с сосредоточенными параметрами, построенную из типовых инерционных, упругих и диссипативных звеньев [8], и отличающуюся от известных наличием звена, представляющего окружной люфт. Указанная динамическая схема приведена на рис. 1.

На данной схеме представлены инерционные массы тягового электродвигателя, редуктора ведущего моста и маховика, эквивалентного поступательно движущейся массе троллейбуса. К первой массе приложен кру-

тящий момент тягового электродвигателя, а к последней момент сопротивления качению колес троллейбуса. Типовые упругое и диссипативное звенья имитируют соответственно крутильную податливость полуосей и демпфирование в трансмиссии. Данная схема является регулярной, но она отличается от известных наличием звена, имитирующего окружной люфт в трансмиссии (установлено между первой и второй массами). Алгоритм работы данного звена сводится к тому, что первая из соединяемых им масс имеет возможность вращаться независимо от второй до тех пор, пока первая масса не повернется относительно второй на заранее заданную угловую величину – величину окружного люфта. После этого обе массы начинают двигаться как единое целое с одинаковой угловой скоростью. Такой подход к схематизации окружного люфта позволяет получать регулярные динамические схемы и избегать структурных вырождений, приводящих к некорректным схемам и результатам.

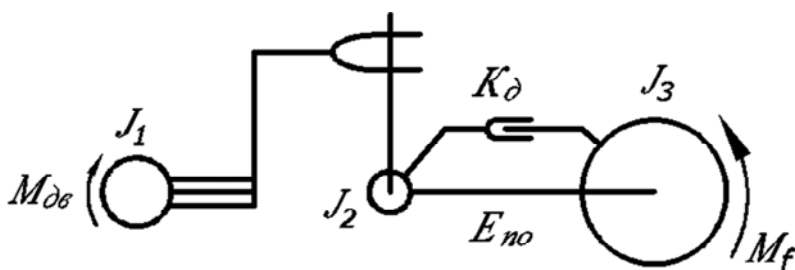


Рис. 1. Динамическая расчетная схема трансмиссии троллейбуса

Результаты исследования на описанной выше модели показали, что в существующих серийно выпускаемых троллейбусах модели МАЗ 103Т переходный процесс трогания протекает неудовлетворительно: при наличии окружного люфта в трансмиссии величиной 45 градусов (в приведении к валу тягового электродвигателя) в начальной стадии разгона в трансмиссии троллейбуса возникают интенсивные крутильные колебания, с амплитудой первого максимума крутящего момента 1380 Н·м, которые не только создают дополнительные циклические нагрузки, но и значительно ухудшают плавность разгона. Это видно из рис. 2, на котором представлены кривые изменения задаваемого (1) и действительного (2) тока якоря тягового электродвигателя, а также крутящего момента (3) на полуоси ведущего моста троллейбуса модели МАЗ-103Т, имеющего окружной люфт в трансмиссии величиной 45 градусов при его разгоне с полным нажатием на ходовую педаль. Причина указанных негативных явлений состоит в том, что в составе серийной системы управления тяговым электродвигателем указанного троллейбуса применен задатчик интенсивности нарастания тока якоря тягового электродвигателя с линейной переходной

характеристикой, приводящей к тому, что чем больше окружной люфт в трансмиссии, тем при большем крутящем моменте тягового электродвигателя он будет выбираться, что увеличивает динамическую нагруженность по мере эксплуатационного износа.

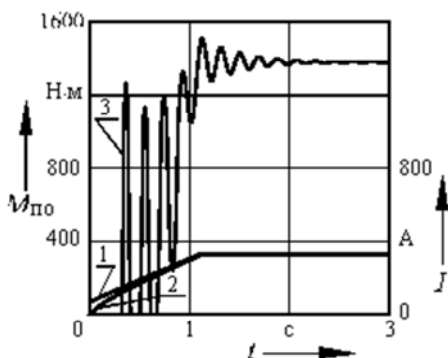


Рис. 2. Результаты моделирования процесса разгона троллейбуса МА3-103Т с окружным люфтом в трансмиссии величиной  $45^\circ$

Для **устранения** указанного недостатка предложена и разработана адаптивная система управления процессом нарастания задаваемого тока якоря тягового электродвигателя троллейбуса при разгоне троллейбуса [9]. Указанная система определяет окружной люфт трансмиссии по величине максимального джерка в переходном процессе трогания, и в зависимости от его величины так подбирает параметры нелинейного оптимизированного закона нарастания тока якоря тягового электродвигателя до задаваемого водителем значения. При этом оптимизация параметров указанного закона была выполнена исходя из того, чтобы время разгона троллейбуса было минимальным, но при этом максимальные динамические нагрузки в трансмиссии превышали квазистатические не более чем на 5%, а балл плавности разгона троллейбуса по джерку был не ниже 4, что соответствует субъективной оценке «переходный процесс чувствуется, но не доставляет неприятных ощущений» [10]. При этом предлагаемая адаптивная система управления тяговым электродвигателем обеспечивает приемлемые значения оценочных показателей динамики разгона троллейбуса при росте окружного люфта трансмиссии вплоть до  $75$  градусов, что невозможно при использовании серийной системы управления. Это видно из данных таблицы 2, в которой представлены оценочные показатели процесса разгона троллейбуса МА3 103Т с различными вариантами системы управления тяговым электродвигателем.

Таблица 2 – Оценочные показатели процесса разгона троллейбуса МАЗ 103Т с различными вариантами системы управления тяговым электродвигателем

Система управления (окружной люфт трансмиссии)	Оценочный показатель			
	$t_E$ , с	$K_D$	джерк, $m/c^3$	$b_j$
Штатная(50°/75°)	4,55/	1,10/	92,2/	-8,74/
	4,52	1,23	157	-23,3
Предлагаемая адаптивная (50°/75°)	4,86/	1,049/	35,8/	4,01/
	5,00	1,049	35,7	4,01

Из данных таблицы 2 следует, что предлагаемая адаптивная система управления тяговым электродвигателем троллейбуса МАЗ 103Т благодаря оптимизации параметров закона нарастания задаваемого тока якоря тягового электродвигателя обеспечивает по сравнению со штатной системой снижение коэффициента динамичности  $K_D$  на 5,4–15 %, а максимального джерка – в 2,6–4,4 раза при увеличении длительности начальной стадии разгона троллейбуса на 4,7–10,6 % в зависимости от величины окружного люфта трансмиссии. Меньшие значения соответствуют окружному люфту 50°, большие – 75° соответственно. Таким образом, использование на троллейбусах МАЗ 103Т предлагаемой адаптивной системы управления тяговым электродвигателем позволяет повысить пробег основных деталей ведущего моста троллейбуса модели МАЗ–103Т в эксплуатации на 58 % до наступления предельного состояния по износу, а также исключить замену полуосей в эксплуатации, расчетный ресурс которых до усталостной поломки будет выше нормативного пробега троллейбуса до списания.

#### **Выводы:**

- в трансмиссиях троллейбусов, находящихся в эксплуатации, присутствуют значительные окружные люфты (десятки градусов в приведении к валу тягового электродвигателя), обусловленные двухсторонним характером износа зубчатых колес и шлицевых соединений из-за электродинамического торможения тяговым электродвигателем;

- наличие указанных окружных люфтов существенно увеличивает динамическую нагруженность трансмиссий и ухудшает плавность разгона мобильных машин. Наиболее актуальна эта проблема именно для троллейбусов, поскольку процесс их разгона всегда начинается при окружном люфте трансмиссии, полностью раскрытом в сторону разгона из-за предшествовавшего ему электродинамического торможения;

- динамические схемы и математические модели, служащие для теоретического исследования динамической нагруженности трансмиссии троллейбусов в переходном процессе трогания должны учитывать их окружной люфт;

– системы управления тяговым электродвигателем троллейбусов должны содержать задатчики интенсивности нарастания задаваемого тока якоря тягового электродвигателя с нелинейной переходной характеристикой, обеспечивающей плавный выбор окружного люфта трансмиссии на начальном этапе разгона троллейбуса.

#### Литература

1 Чудаков, Е.А. Расчет автомобиля / Е.А. Чудаков. – М.: Машгиз, 1947. – С. 31.

2 Карманов, К. Н. Диагностирование ведущих мостов троллейбусов / К.Н. Карманов // Автомобильная пром-сть. – 1999. – №2. – С. 19–21.

3 Механические нагрузки в тяговой передаче и раме троллейбуса МТБ–82Д / В.Л. Марковников, Н.М. Куликовская, А.И. Яковлев, К.В. Ивин. – М.: Изд-во М-ва коммунального х-ва РСФСР, 1957. – 43 с.

4 Ефремов, И.С. Троллейбусы (конструкция и расчёт) / И.С. Ефремов, В.Л. Марковников. – М.: Машгиз, 1954. – 312 с.

5 Аксенов, М.И. Исследование троллейбусов 8ТР–8 и ЗИУ–5 в условиях движения на горной линии / М.И. Аксенов // Городской транспорт – сборник научных работ Академии коммунального х-ва имени К.Д. Памфилова. – Выпуск XIII. – М. – Л.: Издательство М-ва коммунального х-ва РСФСР, 1962. – С. 147–154.

6 Цитович, И.С. Динамические нагрузки трансмиссии автомобиля / И.С. Цитович // Машиностроитель Белоруссии (сб. науч.-техн. информации). – Выпуск 2(3). – Минск: Госиздат БССР, 1957. – С. 34–44.

7 Армадеров, Р.Г. Характерные режимы нагружения трансмиссии автомобиля в условиях бездорожья / Р.Г. Армадеров, В.М. Семенов // Некоторые особенности работы грузового автомобиля в условиях бездорожья (сборник статей). – Труды НАМИ. – Выпуск 46. – М.: НАМИ, 1962. – С. 33–56.

8 Альгин, В.Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин – Минск.: Навука і тэхніка, 1995. – 256 с.

9 Галямов П. М. Динамика трогания троллейбуса с адаптивной системой управления тяговым электродвигателем / П.М. Галямов, В.Б. Альгин, С. И. Заиченко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2009. – №1. – С. 34–40.

10 Надь, А.А. Методика измерений и оценки плавности переключений в гидромеханических передачах легковых автомобилей / А.А. Надь, Ю.И. Чередниченко // Автомобильная пром-сть. – 1976. – №1. – С. 8–11.