

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСМИССИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Д.Т.Н. Худорожков С.И., К.Т.Н. Красильников А.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия
xscu-55@mail.ru, a_kr36@mail.ru

В данной статье рассмотрены вопросы цифрового моделирования физических динамических процессов в трансмиссиях транспортной техники. Целью данного исследования являлась отработка алгоритма численного математического моделирования динамических процессов в трансмиссиях транспортных машин с использованием современных цифровых пакетов программ. Методика включает системный подход к исследованию динамических процессов при переключении, основанный на моделировании работы КПП совместно с двигателем внутреннего сгорания (с учетом его динамических, скоростных и нагрузочных характеристик). Рассмотрен порядок применения пакета программ MATLAB–Simulink, Simscape для численного моделирования динамических процессов. При помощи фундаментальных блоков данных приложений созданы модели физических компонентов: двигателя внутреннего сгорания, фрикционных муфт сцепления, зубчатых редукторов, упругих валов, демпфирующих устройств, а также системы управления силовой передачей трактора. Создана цифровая модель трансмиссии трактора, приведена ее расчетная схема, заданы исходные характеристики. С ее помощью проведено моделирование динамических процессов в коробке перемены передач трактора. Основное внимание в данной работе уделено применению предлагаемой методики для расчета динамических процессов в КПП при переключениях передач под нагрузкой при прямом и реверсном включении, в том числе с одновременным использованием нескольких фрикционных муфт.

Ключевые слова: трансмиссия, численное моделирование, коробка перемены передач, трактор, динамические процессы.

Для цитирования: Худорожков С.И., Красильников А.А. Численное моделирование динамических процессов в трансмиссии транспортных средств // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 1 (47). С. 38–45. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-38-45.

Введение

Динамические процессы, происходящие в трансмиссиях транспортных машин, особенно при переключении передач в коробке перемены передач (КПП), носят сложный характер, что обусловлено наличием инерционно-упругих звеньев, включающих в себя податливые валы, шестерни, маховик двигателя и др. Особенно это характерно для трансмиссий тракторов, где процесс переключения передач происходит под нагрузкой, что связано с необходимостью обеспечения отсутствия разрыва потока мощности в трансмиссии машины при переключениях передач.

Анализ процесса переключения передач в данном случае является одним из самых сложных видов переходных процессов в трансмиссиях транспортных и тяговых машин [1, 2,

3, 4, 5]. В рассматриваемых КПП переключение передач производится при помощи фрикционных элементов управления (дисковых фрикционных муфт). В отдельных случаях при переключении передач могут одновременно работать несколько фрикционных муфт. Существующие в настоящее время методики расчетов не отражают в полной мере особенности динамических процессов в КПП при переключении ступеней под нагрузкой при одновременном использовании нескольких фрикционных муфт [6, 7, 8, 9].

Вопросы анализа рабочих процессов в трансмиссиях автотракторной техники, управления переключением передач рассматриваются в частности в [10, 11, 12, 13]. Применение современных программных средств для инженерных расчетов, в частности приложения

пакета MATLAB – Simulink и Simscape, может позволить существенно упростить выполнение динамических расчетов силовых передач.

Целью данного исследования являлась отработка алгоритма численного математического моделирования динамических процессов в трансмиссиях транспортных машин на основе системного подхода к исследованию динамических процессов при переключении передач в КПП.

Метод решения задачи

Для цифрового моделирования динамических процессов в трансмиссиях транспортных машин в данной работе предлагается использовать современные программные средства для инженерных расчетов, в частности приложения пакета MATLAB – Simulink и Simscape [14, 15]. Это позволяет существенно упростить выполнение динамических расчетов силовых передач. Пакеты MATLAB – Simulink и Simscape имеют фундаментальные блоки, при помощи которых можно создать модели физических компонентов таких, как двигатель внутреннего сгорания, фрикционная муфта управления, зубчатый редуктор, упругие валы, демпфирующие устройства и другие компоненты силовой передачи. Из модели, которая близка по виду к кинематической схеме, Simscape автоматически выводит дифференциальные уравнения, характеризующие поведение системы.

Методика и порядок применения пакета MATLAB для анализа динамических процессов в трансмиссии транспортных машин рассматривается на примере моделирования работы коробки перемены передач сельскохозяйственного трактора Кировец К-744.

На основе известных кинематических, инерционно-упругих и демпфирующих параметров коробки передач разработана Simscape-модель для симуляции динамических процессов. Модель КПП представлена на рис. 1.

На рисунке валы коробки передач представлены в виде типовых библиотечных блоков Flexible Shaft, описывающих упруго-демпфирующие и инерционные свойства по участкам, разбитым в точках подключения блоков Inertia, характеризующих инерционность ведущих и ведомых масс фрикционных муфт, а также зубчатых колес, закрепленных на валах.

Входной вал коробки передач представлен в виде участков, соединенных на входе с портом Engine, а на выходе с подсистемами F, представляющих собой фрикционные узлы.

Редукторные свойства описываются с помощью четырех блоков Gear и двух блоков M. Подшипниковые опоры вала представлены блоками с вращающимися опорами D.

Раздаточный вал Transfer Shift представлен участком, соединенным с выходным портом Load.

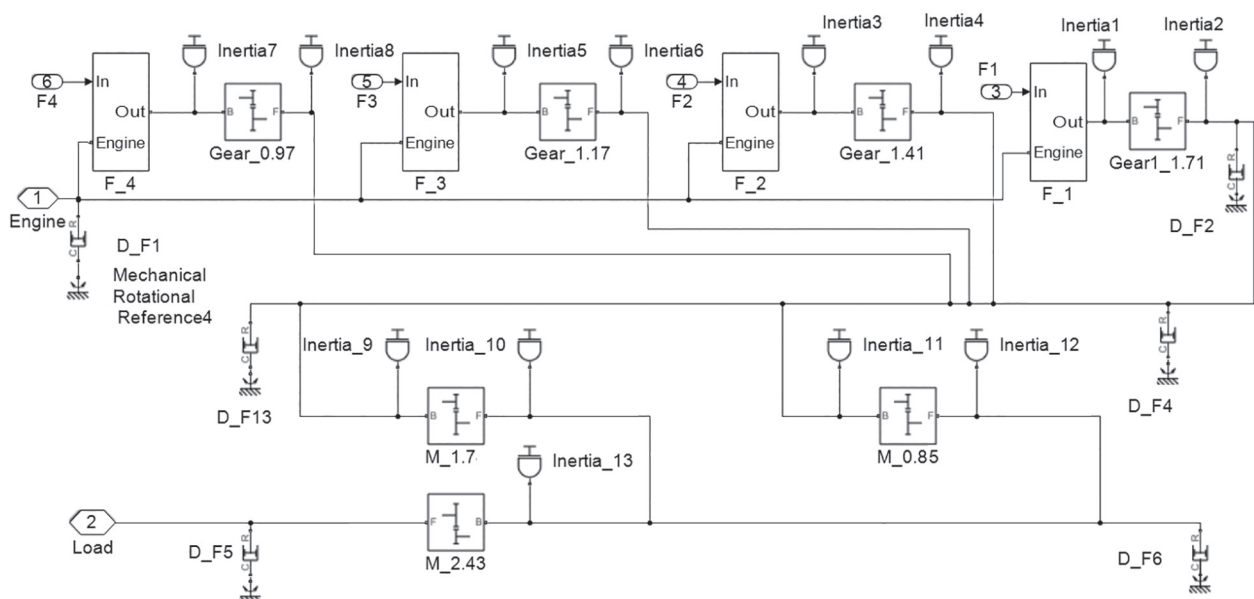


Рис. 1. Simscape-модель механической системы КПП

Fig. 1. Simscape model of the mechanical gearbox system

Подсистемы «Фрикционный узел» F представляют собой однотипные блок-схемы, соответствующие рис. 2.

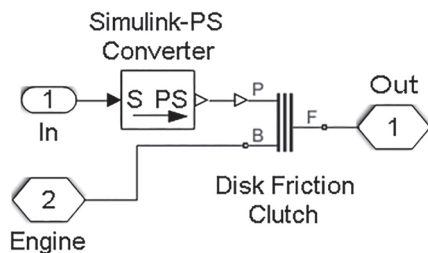


Рис. 2. Подсистема «Фрикционный узел»

Fig. 2. Friction unit subsystem

Simscape-модели КПП включают в себя следующие основные типовые блоки:

Типовой блок Disk Friction Clutch представляет собой фрикционную муфту с наборами фрикционных дисков. Муфта двунаправленная и может скользить в положительном и отрицательном направлениях. Блок обеспечивает входной порт физического сигнала для приложенного давления к дискам трения. Окно параметров блока представлено на рис. 3.

Типовой блок Inertia представляет собой идеальную механическую вращательную инерцию, в окне параметров которой внесены значения моментов инерции вращающихся масс коробки передач, принятых в модели на рис. 1 (см таблицу 1).

Таблица 1

Моменты инерции вращающихся масс КПП

Table 1. Moments of inertia
of the gearbox rotating masses

№ п/п	Обозначение массы	Момент инерции, кг·м ²
1	Inertia_1	0,25
2	Inertia_2	0,10
3	Inertia_3	0,25
4	Inertia_4	0,10
5	Inertia_5	0,25
6	Inertia_6	0,10
7	Inertia_7	0,25
8	Inertia_8	0,10
9	Inertia_9	0,15
10	Inertia_10	0,25
11	Inertia_11	0,15
12	Inertia_12	0,20
13	Inertia_13	0,15

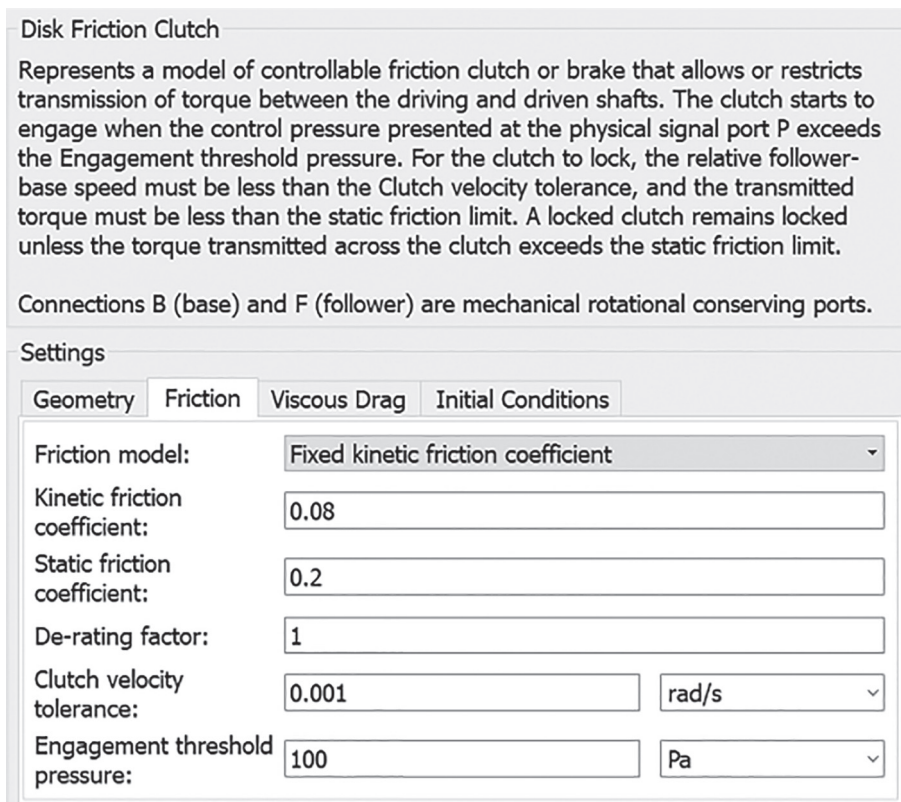


Рис. 3. Окно параметров блока Disk Friction Clutch

Fig. 3. Disk Friction Clutch block parameters window

Типовой блок Simple Gear представляет собой зубчатую пару с фиксированным передаточным числом. Передаточное число рассчитывается как отношение чисел зубьев ведомого колеса (порт F) к ведущему (порт B) – (NF/NB). В окно параметров блока введены передаточные числа зубчатых передач (см. таблицу 2).

Таблица 2

Передаточные числа зубчатых передач

Table 2. Gear ratios

№ п/п	Обозначение пары зубчатых колес	Передаточное число
1	Gear_1.71	1,71
2	Gear_1.41	1,41
3	Gear_1.17	1,17
4	Gear_0.97	0,97
5	M_0.83	0,85
6	M_1.74	1,70
7	M_2.43	2,43

Обобщенная модель трансмиссии трактора с двигателем представляет собой последовательно соединенные между собой следующие Simscape-блоки: блок управления Control, блок двигателя Engine, блок коробки передач Transmission, блок нагружающего устройства Load и блок визуализации результатов расчетов Monitor.

Подсистема управления Control представлена на рис. 4. В подсистему входит блок Signal Builder, формирующий управляющие воздействия на фрикционные узлы F_1, F_2, F_3, F_4 коробки передач и подачу топлива в цилиндры двигателя Throttle. Блоки Gain трансформируют управляющие воздействия на фрикционные муфты в давление с максимальным значением 0,9 МПа, а подачу топлива в процентах от максимального значения (100 %).

Подсистема Engine представлена на рис. 5 и включает в себя блок 2-D Lookup Table.

Блок 2-D Lookup Table сопоставляет входные данные с выходным значением путем поиска или интерполяции таблицы значений, определенных с параметрами блока. Содержание матрицы блока 2-D Lookup Table соответствует параметрам внешней и регуляторным характеристикам двигателя.

Подсистема Load формирует нагрузки на выходном валу коробки передач с помощью блока Signal Builder, соответствующие режиму постоянного момента сопротивления или постоянной мощности.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты применения данной модели для численного моделирования динамических процессов, происходящих в КПП при переключениях передач, приведены ниже. Здесь для расчета процесса переключения передач

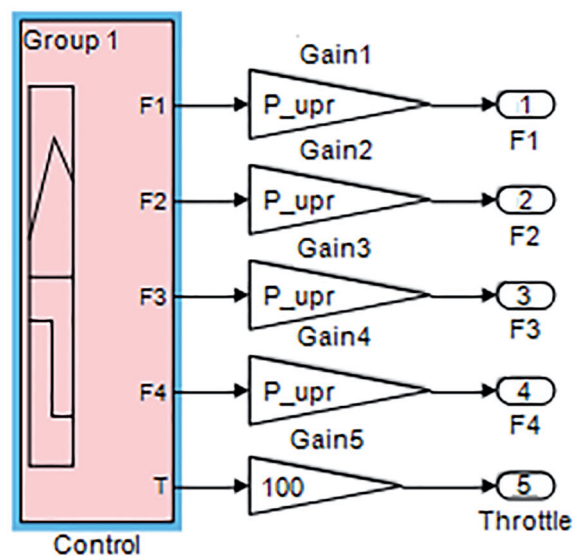


Рис. 4. Подсистема Control

Fig. 4. Control subsystem

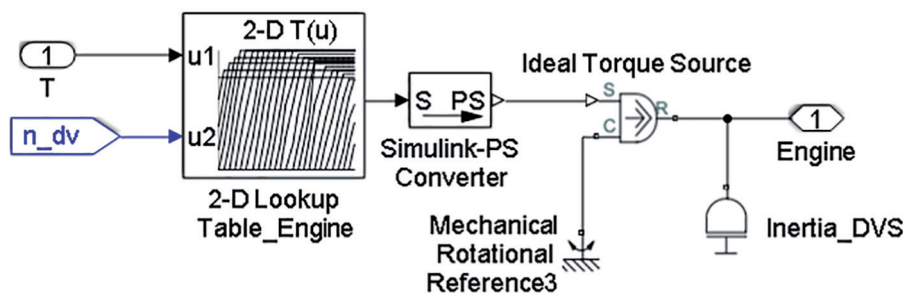


Рис. 5. Подсистема Engine

Fig. 5. Engine subsystem

на фрикционные элементы управления КПП в определенные моменты времени подаются управляющие команды на включение/выключение соответствующих фрикционных муфт.

В качестве примера на рис. 6 представлен вид управляющих воздействий при численном моделировании трогания трактора с места и разгона с переключением вверх с 1-й по 4-ю передачи.

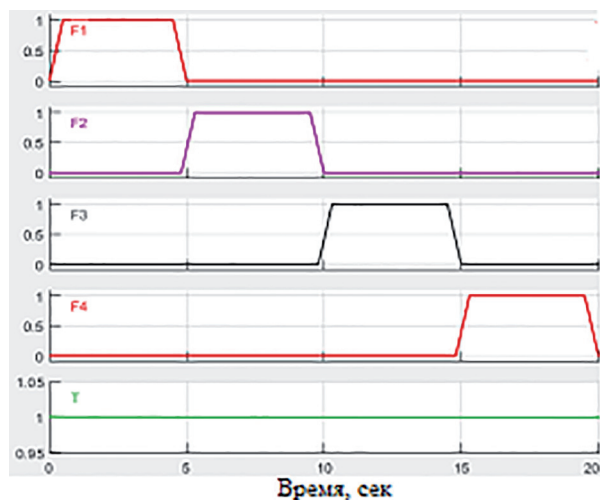


Рис. 6. Сигналы управляющих воздействий на фрикционы АКПП (F1, F2, F3, F4) и подачи топлива в двигатель (T) при моделировании процесса переключения с 1-й по 4-ю передачи

Fig. 6. Signals of control actions to automatic transmission clutches (F1, F2, F3, F4) and fuel supply to the engine (T) when simulating the shift process from 1st to 4th gear

На рис. 7 представлены полученные в результате проведенных расчетов кривые изменения оборотов двигателя $n_{дв}$ (верхняя кривая) и крутящего момента $M_{дв}$ (нижняя кривая) при последовательном переключении передач с 1-й по 4-ю при трогании трактора с места.

В начале процесса движения машины фрикционная муфта F1 включается по линейному закону нарастания от нуля до 0,9 МПа в течение 0,45 сек. При этом учитывается совместная работа двигателя и трансмиссии. В это время момент трения муфты F1 является для коленчатого вала моментом сопротивления, а для входного вала КПП – ведущим моментом. Обороты двигателя несколько снижаются (в связи с увеличением момента трения фрикционной муфты F1) и одновременно повышается крутящий момент двигателя.

Затем происходит переключение с первой на вторую передачи КПП с помощью двух

фрикционных муфт (муфта F1, реализующая режим первой передачи, выключается, муфта второй передачи F2 включается).

Существенным параметром, влияющим на динамику процесса переключения передач, является длительность перекрытия совместной работы двух фрикционных муфт.

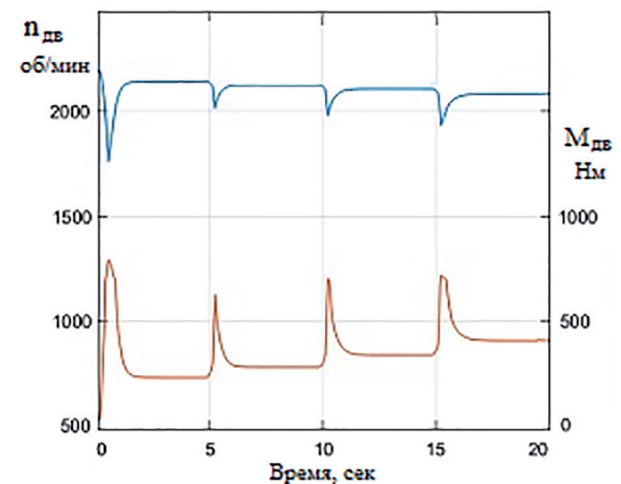


Рис. 7. Расчетные кривые изменения частоты вращения двигателя при последовательном переключении передач (с 1-й по 4-ю)

Fig. 7. Calculated curves of changes in engine speed with sequential gear shifting (from 1st to 4th)

Здесь под перекрытием в работе фрикционов понимается промежуток времени, где заканчивается процесс выключения одной муфты (F1) и одновременно начинаются включения другой фрикционной муфты (F2). Длительность перекрытия будет определяться алгоритмом подачи системой управления КПП команд, управляющих включением/выключением фрикционов (см. рис. 6).

Предложенная математическая Simscape-модель КПП позволяет производить расчетные исследования динамики трансмиссии при различных законах управления – изменяя моменты и временные интервалы включения фрикционных элементов управления, перекрытия и задержки при их совместной работе.

На рис. 8 в качестве иллюстрации приведены графики, показывающие динамические процессы в КПП при переключении данных передач.

Здесь представлены графики изменения оборотов и крутящих моментов основных звеньев КПП при включении второй передачи с перекрытием в работе первой и второй фрикционных муфт около 0,15 секунды. Как видно на графиках, в процессе переключения

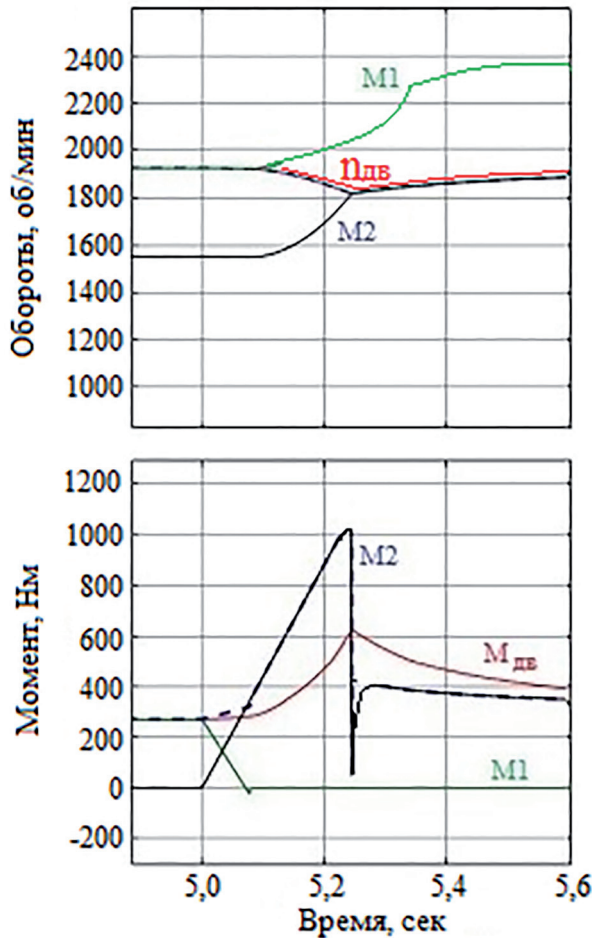


Рис. 8. Расчетные кривые на входном валу при переключении с 1-й на 2-ю передачу

Fig. 8. Calculated curves on the input shaft when shifting from 1st to 2nd gear

с первой на вторую передачу вначале линейно снижается до нуля крутящий момент M_1 , передаваемый выключающимся фрикционом F_1 . Одновременно начинает линейно увеличиваться крутящий момент M_2 , передаваемый муфтой F_2 , которая включается для реализации второй передачи в КПП.

Крутящий момент включаемого фрикциона F_2 стремится преодолеть момент сопротивления и продолжает возрастать до максимального значения, ускоряя под действием свободного избыточного момента вращение ведомых масс муфты до синхронизации ведущих и ведомых дисков включаемого фрикциона F_2 . При этом происходит буксование фрикционной муфты. Здесь видно, что выключение муфты F_1 не приводит к снижению скорости выходного вала. Поэтому, с точки зрения обеспечения безразрывности потока мощности, дальнейшая совместная работа двух передач становится

нецелесообразной. Увеличение времени перекрытия в работе муфт приведет к возникновению циркуляции мощности, увеличению буксования муфт. При оптимальном управлении включением/выключением фрикционных муфт обеспечивается передача мощности двумя параллельными потоками в момент переключения передачи в КПП с отсутствием циркуляции мощности. Данная математическая модель позволяет проводить расчетную симуляцию этого процесса.

После окончания процесса синхронизации оборотов ведомых и ведущих частей происходит резкое снижение крутящего момента во включившейся фрикционной муфте до величины приведенного момента сопротивления.

Качественно аналогичные процессы происходят и при переключении со 2-й на 3-ю с 3-й на 4-ю передачи и т.д.

Математическое моделирование данного процесса переключения передач позволяет оценить характер изменения и пиковые значения крутящих моментов на основных звеньях, изменение оборотов звеньев, время протекания динамических процессов. Анализ результатов дает информацию о параметрах буксования фрикционных муфт, возникновения циркуляции мощности и др.

Заключение

1. Предложена методика численного моделирования динамических процессов в трансмиссиях транспортных машин на базе программного обеспечения пакета MATLAB SIMSCAPE.

2. С помощью типовых блоков библиотеки MATLAB – Simulink, Simscape – создана математическая модель коробки перемены передач колесного трактора, которая предоставляет современный интерфейс при получении, обработке, визуализации результатов расчетов, в т.ч. непосредственно, в процессе симуляции работы рассматриваемого образца.

3. Предложенная расчетная методика позволяет эффективно производить виртуальное моделирование динамических систем трансмиссий транспортных средств, амоделировать работу КПП с использованием нескольких фрикционных элементов управления в различных режимах работы, при различных временных характеристиках управляющих команд, определять оптимальные алгоритмы системы управления КПП.

Литература

1. Трансмиссии тракторов. М., Машиностроение, 1976, 280 с.
2. Бойков А.В., Шувалов Е.А., Добряков Б.А. Теория и расчет трактора «Кировец» / под общ. ред. А.В. Бойкова. Л.: Машиностроение, 1980. 208 с.
3. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов: Учебник для студентов вузов. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2009. 752 с.
4. Тарасик В.П. Фрикционные муфты автомобильных гидромеханических передач. Минск, «Наука и техника», 1973.
5. Кочнев А.М. Рабочие режимы отечественных колесных трелевочных тракторов // С.Петербург: Издательство Политехнического университета, 2008. 520 с.
6. S. Kuwahara, H. Kubonoya, H. Mizuno, M. Kaigawa, and K. Kono, "Toyota's New Integrated Drive Power Control System," SAE Paper No. 2007-01-1306, SAE International, Warrendale, PA, 2007.
7. S. Bai, D. Brennan, D. Dusenberry, X. Tao, Z. Zhang, "Integrated Powertrain Control," SAE Paper No. 2010-01-0368, SAE International, Warrendale, PA, 2010.
8. D. Kim, H. Peng, S. Bai, J. Maguire, "Control of Integrated Powertrain With Electronic Throttle and Automatic Transmission," IEEE Transactions on Control System Technology, May 2007, Volume 15, Issue 3, P474-482.
9. Kondo M., Hasegawa Y., Takanami Y., Arai K., Tanaka M., Kinoshita M., "Toyota A80E 8-speed Automatic transmission with Novel Powertrain Control System", SAE Paper No. 2007-01-1311, Detroit, 2007.
10. Bukashkin A., Galyshev Yu., Dobretsov R., "Split Transmission of Tractor with Automatic Gearbox", Procedia Engineering Vol. 206 (2017). pp 1728-1734. doi.org/10.1016/j.proeng.2017. 10.705.
11. Didikov R., ect., "Power Distribution Control in Perspective Wheeled Tractor Transmission" Procedia Engineering, Vol. 206 (2017) pp 1735–1740. doi.org/10.15866/ireme.v12i9.15646
12. Dobretsov R., Galyshev Yu., Porshnev G., Didikov R., Telyatnikov D., Komarov I. Transmission of the Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox // International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol 12, No 9. (2018). Pp. 790-796. DOI: https://doi.org/10.15866/ireme.v12i9.15646.
13. Deur J., Asgari J., Hrovat D., "Modeling and analysis of automatic transmission engagement dynamics – Linear case", ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 128, pp. 263–277, 2006.
14. Simscape™ User's Guide. COPYRIGHT 2007–2013 by The MathWorks, Inc. p. 203.
15. Using SIMULINK (December 1996). COPYRIGHT 1990–1996 by The MathWorks, Inc. p. 473.

References

1. Transmissii traktorov [Tractors transmissions]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1976, 280 p.
2. Boykov A.V., Shuvalov YE.A., Dobryakov B.A. Teoriya i raschet traktora «KiroveTS» [Theory and calculation of the Kirovets tractor]. Pod obshch. red. A.V. Boykova. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1980. 208 p.
3. Sharipov V.M. Konstruirovaniye i raschet traktorov [Design and calculation of tractors]: Uchebnik dlya studentov vuzov. 2-e izd. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2009. 752 p.
4. Tarasik V.P. Friksionn-yye mufty avtomobil'nykh gidromekhanicheskikh peredach [Friction clutches of automotive hydromechanical transmissions]. Minsk, «Nauka i tekhnika» Publ., 1973.
5. Kochnev A.M. Rabochiye rezhimy otechestvennykh kolesnykh trelevochnykh traktorov [Operating modes of domestic wheeled skidders]. S.Peterburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta Publ., 2008. 520 p.
6. S. Kuwahara, H. Kubonoya, H. Mizuno, M. Kaigawa, and K. Kono, "Toyota's New Integrated Drive Power Control System," SAE Paper No. 2007-01-1306, SAE International, Warrendale, PA, 2007.
7. S. Bai, D. Brennan, D. Dusenberry, X. Tao, Z. Zhang, "Integrated Powertrain Control," SAE Paper No. 2010-01-0368, SAE International, Warrendale, PA, 2010.
8. D. Kim, H. Peng, S. Bai, J. Maguire, "Control of Integrated Powertrain With Electronic Throttle and Automatic Transmission," IEEE Transactions on Control System Technology, May 2007, Volume 15, Issue 3, P474-482.
9. Kondo M., Hasegawa Y., Takanami Y., Arai K., Tanaka M., Kinoshita M., "Toyota A80E 8-speed Automatic transmission with Novel Powertrain Control System", SAE Paper No. 2007-01-1311, Detroit, 2007.
10. Bukashkin A., Galyshev Yu., Dobretsov R., "Split Transmission of Tractor with Automatic Gearbox", Procedia Engineering Vol. 206 (2017). pp 1728-1734. doi.org/10.1016/j.proeng.2017. 10.705.
11. Didikov R., ect., "Power Distribution Control in Perspective Wheeled Tractor Transmission" Procedia Engineering, Vol. 206 (2017), pp. 1735–1740. doi.org/10.15866/ireme.v12i9.15646
12. Dobretsov R., Galyshev Yu., Porshnev G., Didikov R., Telyatnikov D., Komarov I. Transmission of the

- Perspective Wheel Tractor with Automatic Gearbox // International Review of Mechanical Engineering (IREME), Vol 12, No 9. (2018). Pp. 790-796. DOI: <https://doi.org/10.15866/ireme.v12i9.15646>.
13. Deur J., Asgari J., Hrovat D., "Modeling and analysis of automatic transmission engagement dynamics – Linear case", ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol. 128, pp. 263-277, 2006.
14. Simscape™ User's Guide. COPYRIGHT 2007–2013 by The MathWorks, Inc. p. 203.
15. Using SIMULINK (December 1996). COPYRIGHT 1990–1996 by The MathWorks, Inc. p. 473.

NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC PROCESSES IN TRANSMISSION OF VEHICLE

DSc in Engineering **S.I. Hoodorozhkov**, PhD in Engineering **A.A. Krasilnikov**
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia
xcu-55@mail.ru, a_kr36@mail.ru

The article considers the issues of digital modeling of dynamic processes in the transmissions of transport vehicles. The purpose of this research was to develop an algorithm for numerical mathematical modeling of dynamic processes in the transmissions of transport vehicles using modern digital software packages. The method includes a systematic approach to the study of dynamic processes during switching, based on modeling the operation of the gearbox together with the internal combustion engine (taking into account its dynamic, speed and load characteristics). The order of application of the MATLAB – Simulink, Simscape software packages for numerical simulation of dynamic processes is considered. Using the fundamental blocks of these applications, models of physical components are created: the internal combustion engine, friction clutches, gearboxes, elastic shafts, damping devices, and tractor power transmission control systems. A digital model of the tractor transmission is created, its design scheme is given, and the initial characteristics are set. It was used to simulate dynamic processes in the tractor gearbox. The main attention in this paper is paid to the application of the proposed method for calculating the dynamic processes in the gearbox during gear changes under load with forward and reverse switching, including the simultaneous use of several friction clutches.

Keywords: transmission, numerical simulation, gearbox, agricultural tractor, dynamic processes.

Cite as: Hoodorozhkov S.I., Krasilnikov A.A. Numerical simulation of dynamic processes in transmission of vehicle. Izvestiya MGTU «MAMI». 2021. No 1 (47), pp. 38–45 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-38-45.