

**В.Л. Чернышев**, к.т.н., доц., каф. «ДМ и ПМ» НТУ «ХПИ»;  
**Ю.А. Остапчук**, к.т.н., доц., каф. «ДМ и ПМ» НТУ «ХПИ»;  
**А.А. Шипулин**, ведущий инженер ХКБМ имени А.А. Морозова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИЛОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ТАНКА Т-64А В РЕЖИМАХ РАЗГОНА И ТОРМОЖЕНИЯ НА СУХОЙ ГРУНТОВОЙ ДОРОГЕ

В статье рассматривается динамика переходных процессов в силовой передаче танка Т-64А в режиме разгона и торможения на ровной горизонтальной грунтовой дороге. Аналитическое моделирование осуществляется методом динамического состояния. Приведены результаты работы дизеля 5ТДФ, всережимного регулятора и бортовой коробки передач (трансмиссии). Показаны законы изменения угловых скоростей вращения элементов трансмиссии и крутящих моментов, действующих на солнечные шестерни планетарных рядов, как функций времени.

**Ключевые слова:** танк, двигатель, трансмиссия, фрикционные устройства, планетарные передачи, динамика, крутящие моменты.

У статті розглядається динаміка перехідних процесів в силіній передачі танка Т-64А в режимі розгону і гальмування на рівній горизонтальній грунтовій дорозі. Аналітичне моделювання здійснюється методом динамічного стану. Приведені результати роботи дизеля 5ТДФ, всережимного регулятора і бортової коробки передач (трансмисії). Показані закони зміни кутових швидкостей елементів трансмісії та обертових моментів, що діють на сонячні шестерні планетарних рядів, як функцій часу.

**Ключові слова:** танк, двигун, трансмісія, фрикційні пристрої, планетарні передачі, динаміка, обертові моменти.

The article takes up the issues of dynamic of transient processes in power transmission of T-64A battle tank in acceleration and braking modes on horizontal dirt road. Analytic simulation is realized by dynamic state method. The results of 5TDF diesel, all-range regulator and transmission performance are presented. The principles of rotational speed changes and motive force of transmission elements interaction with center gear and planetary gear sets are shown as time-varying function.

**Keyword:** tank, diesel, transmission, planetary gear, dynamic.

### ВВЕДЕНИЕ

Колесно-гусеничные машины занимают важное место в техническом оснащении вооруженных сил. Армейские легковые и грузовые автомобили, колесные и гусеничные бронетранспортеры, боевые машины пехоты и основные боевые танки решают свои специфические задачи, выдвигаемые требованиями современного боя.

Силовая передача транспортной машины является основной системой, определяющей показатели подвижности, надежности и экономичности.

Семискоростная бортовая коробка передач (БКП), была разработана в ХКБМ им. А.А. Морозова в начале 60-х годов для танка Т-64 под двигатель 5ТДФ, мощностью 700 л.с. В 70-е годы БКП была усилена под двигатели В-46 и 6ТД. В настоящее время она является основной трансмиссией танков Т-64, Т-64А, Т-64Б, БМ «Булат», Т-80УД, Т-72, Т-84, Т-90С, тягачей МТ-Т, инженерных машин БТМ-4М «Тундра», БРМ-3, БРЭМ-1, МТУ-72, МТУ-90, выполненных на шасси МТ-Т, Т-72 и Т-90С, и гусеничных машин ГМ-831.. ГМ-835, носителей ракетного вооружения (комплексы С-300В).

В настоящее время БКП работает на пределе своих технических возможностей: повышение мощности двигателя до 1200 л.с. резко снижает ресурс подшипниковых опор и зубчатых передач. Она морально устарела и не отвечает современным требованиям по передаваемой мощности, управляемости и эргономике.

При проектировании новых транспортных средств передвижения, создании тренажеров и модернизации существующих образцов военной техники, возникает необходимость в математическом моделировании силовых передач в виде системы «водитель-двигатель-всережимный регулятор-трансмиссия», что позволяет выбрать правильные направления конструкторских работ и оценить их эффективность.

При выполнении данной работы были поставлены следующие задачи:

- аналитическое моделирование динамики танка Т-64А и его моторно-трансмиссионной установки в режимах разгона и торможения на ровной горизонтальной грунтовой дороге;
- исследование динамики переходных процессов в силовой передаче;
- определение законов изменения крутящих моментов на солнечных шестернях планетарных рядов БКП, в зависимости от режима движения машины.

### 1. Объект исследования



Рис. 1. Структурная схема силовой передачи танка Т-64А



### 1.3. Дизель 5ТДФ

Двигатель 5ТДФ - это пятицилиндровый, однорядный, двухтактный турбопоршневой дизель жидкостного охлаждения с непосредственными смесеобразованием и прямоточной двухпоршневой продувкой [3]. Общий вид двигателя представлен на рис. 3.

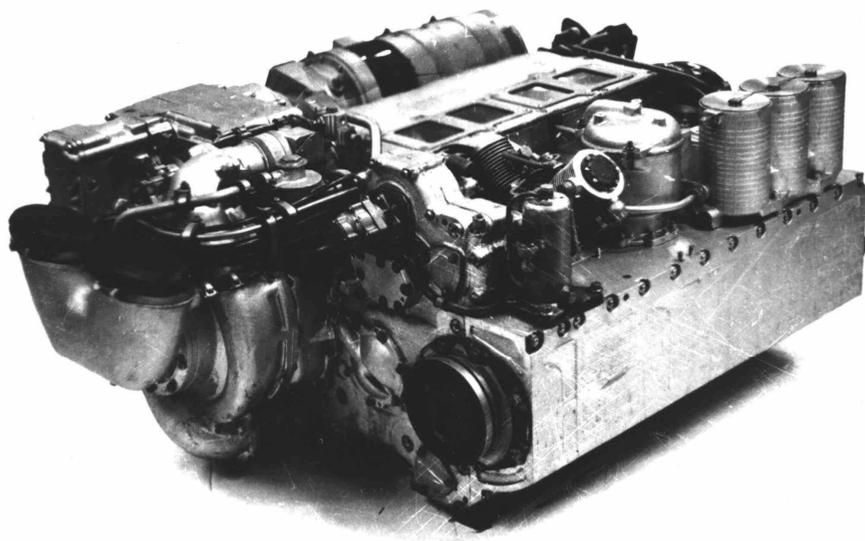


Рис. 3. Общий вид двигателя 5ТДФ.

При построении математической модели ДВС были сделаны следующие предположения:

- процессами газообмена, сжатия, смесеобразования и горения - пренебрегаем;
- крутильными колебаниями коленчатых валов и нагнетателя - пренебрегаем;
- двигатель рассматривается как одномассовая система с моментом инерции  $J_{дв}$ ;
- в качестве выходных параметров ДВС используется угловая скорость вращения коленчатых валов и крутящий момент двигателя (семейство кривых, зависящий от положения рабочей точки дизеля  $A(\omega_{дв}, h_{рпн})$ , с учетом потерь мощности на всасывание и выхлоп,

холостые потери, включая работу вспомогательных механизмов и системы охлаждения (рис. 4).

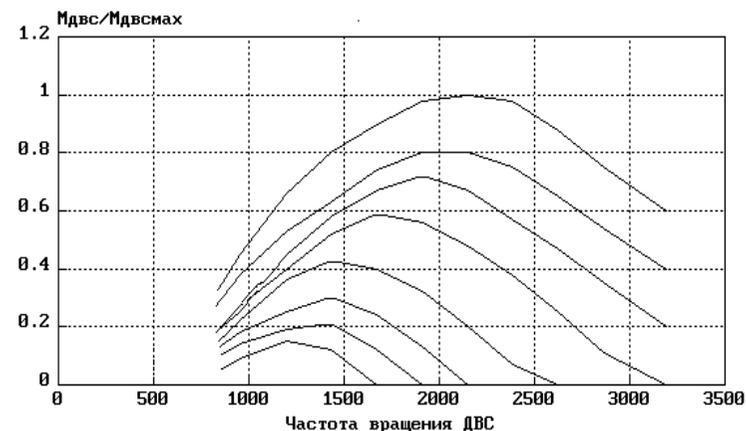


Рис. 4. Относительные зависимости крутящего момента ДВС на входе в трансмиссию для различных значений рейки топливного насоса

Исходными данными для получения выше указанных параметров является многопараметровая характеристика ДВС.

### 1.4. Бортовая коробка передач

Кинематическая схема БКП (их две, по одной на каждый борт машины) представлена на рис. 5. Она включает в себя входной вал 1, который с помощью зубчатой муфты соединяется с коленчатым валом двигателя, сложное водило 2, выходной вал коробки передач 3, бортовую передачу 4 и ведущее колесо 5.

Коробка передач механическая планетарная с 3 степенями свободы. В ее состав входят 4 планетарных ряда (ПР) - 1ПР . . 4ПР, бортовая передача (5ПР) и шесть фрикционных устройств (ФУ) Ф1 . .Ф6. Фрикционы Ф1, Ф4, Ф5 и Ф6 являются тормозными, а Ф2 и Ф3 блокировочными. В 1 и во 2 планетарных рядах солнечная шестерня общая. Водило планетарных рядов 1ПР, 2ПР и 3ПР (сложное водило) выполнено как единая сборочная единица. Каждый фрикцион состоит из пакета стальных металлокерамических дисков, работающих в масле, и сжимающего устройства - бустера.

Включение ФУ производится за счет подачи масла под давлением, в зависимости от номера текущей передачи, в полость между бустером и манжетой. В тормозные фрикционы масло поступает из системы гидроуправления, а в блокировочные - через каналы в корпусных деталях.

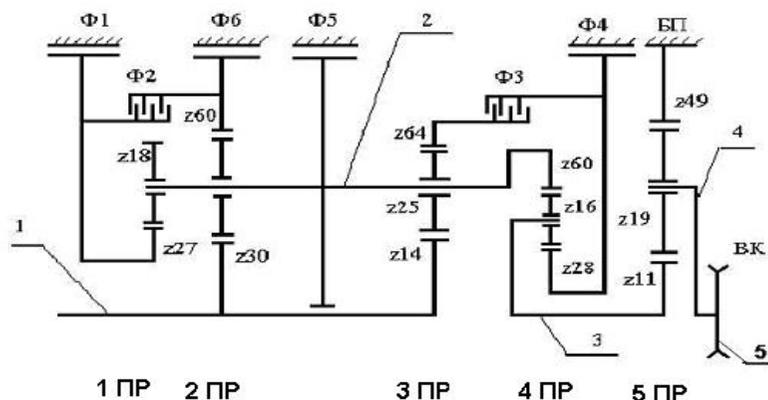


Рис. 4. Кинематическая схема БКП

Номера включаемых фрикционов, передаточные отношения и максимальные расчетные скорости движения, в зависимости от номера передачи, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Передача	3.X	1	2	3	4	5	6	7
Включаемые ФУ	Ф3, Ф5	Ф3, Ф4	Ф4, Ф6	Ф3, Ф6	Ф1, Ф4	Ф1, Ф3	Ф2, Ф4	Ф2, Ф3
$i_{БКП}$	14.35	8.713	4.20	3.485	2.787	2.03	1.467	1.00
$V_{max}$	4.22	7.41	13.80	17.40	21.80	29.80	41.20	60.50

Выключение фрикционов осуществляется за счет слива масла из бустера и разъединения дисков трения за счет отжимных пружин. В выключенном состоянии между дисками трения существует зазор, который гарантирует отсутствие передачи крутящего момента от ведущих дисков трения к ведомым.

Включение фрикционов Ф4 и Ф5, которые обеспечивают торможение и удержание машины на подъемах и спусках, производится с помощью специального механизма, который состоит из двух шариковых разжимных устройств. Включение этих устройств осуществляется за счет перемещения педали остановочного тормоза.

## 2. Аналитическое моделирование переходных процессов

### в силовой передаче танка Т-64А методом динамического состояния

В основу алгоритма расчета переходных процессов в силовых передачах, была положена авторская разработка: метод динамического состояния (МДС). Ее возможности и результаты применения изложены в работах [4], [5].

Отличительные особенности МДС следующие:

1. Планетарные трансмиссии транспортных машин, имеющие ФУ, являются неголомомными системами и их описание дифференциальными уравнениями, получаемыми на основе уравнения Лагранжа [6], является неприемлемым [7].

2. МДС описывает структурные изменения силовой передачи, вызываемые включением, выключением и буксованием фрикционных устройств, при этом учитываются возникающие в системе ударные нагрузки, обусловленные перераспределением кинетической энергии вращающихся деталей и узлов трансмиссии.

3. Данный аналитический метод учитывает автоколебания, возникающие за счет сил трения в ФУ и вызывающие “срыв” уже включенного фрикциона, что увеличивает действительное время его включения.

4. В классической постановке, число дифференциальных уравнений, описывающих поведение механической системы, соответствует числу степеней свободы (обобщенных координат). При использовании МДС в число обобщенных координат включены кинематические (ускорения) и силовые (моменты) параметры. При включении и выключении ФУ силовая передача меняет число степеней свободы, что влечет за собой изменение числа необходимых дифференциальных уравнений. МДС позволяет сохранить число дифференциальных уравнений постоянным, охватывает все возможные состояния механической системы, существенно уменьшает время интегрирования дифференциальных уравнений, сохраняет структуру алгоритма вычислений и позволяет использовать стандартные методы Рунге-Кутты.

5. Метод является аналитическим, учитывает возникновение ударных нагрузок и позволяет рассматривать комбинированные силовые передачи

(электромеханические, гидрообъемные и др.), физические процессы которых имеют малые постоянные времени.

### 3. Исследование динамики силовой передачи танка Т-64А в режимах прямолинейного разгона и торможения

В качестве примера рассмотрим разгон и торможение танка Т-64А на ровной сухой горизонтальной грунтовой дороге.

Танк имеет штатные исполнение и алгоритмы управления.

Программа движения танка предусматривает:

- начало движения с 1 передачи и последовательный выход на 7 передачу;
- максимальная скорость движения ограничивается 50 км/час;
- торможение осуществляется методом наката до скорости 2 км/час;
- остановка осуществляется тормозом и переводом кулисы в нейтральное положение.

#### 3.1. Разгонная и тормозная характеристики

В начальный момент времени кулиса установлена в нейтральном положении и механик-водитель не воздействует на органы управления.

Трогание машины начинается через 2 секунды после выжимания педали сцепления, перевода кулисы в положение 1 передачи, отпускания педали сцепления, выжимания педали подачи топлива и включения фрикционов Ф3 и Ф4.

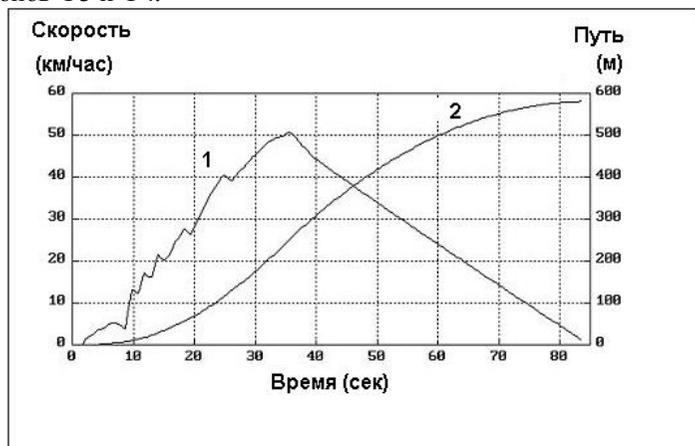


Рис. 6. Разгонная и тормозная характеристики танка Т-64 А

На рис. 6 приведены зависимости скорости движения (кривая 1) и пройденного пути (кривая 2), как функций времени.

Время разгона танка на 1 передаче занимает порядка 6 секунд, что вызвано алгоритмом управления и буксованием фрикциона Ф3.

После достижения машиной скорости 50 км/час ( $t = 35$  с), программный модуль «Водитель» начинает реализовывать торможение танка методом свободного наката, т.е. выжимается педаль сцепления, а дизель 5ТДФ переводится в режим минимальных устойчивых рабочих оборотов около 180 рад/с (1700 об/мин).

#### 3.2. Динамика дизеля и системы регулирования

В системе автоматического регулирования дизелем важное место занимает закон перемещение рейки топливных насосов. Он позволяет оценивать загрузку дизеля на различных режимах движения.

На рис. 7 представлены законы изменения во времени угловой скорости вращения двигателя 5 ТДФ (кривая 1) и ход рейки топливных насосов (кривая 2).

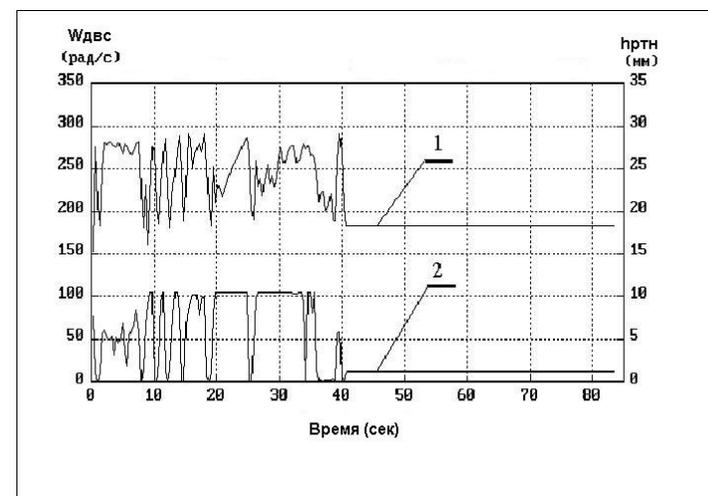


Рис. 7. Угловая скорость вращения дизеля 5 ТДФ и перемещение рейки топливных насосов при разгоне и торможении танка.

Закон изменения крутящего момента ДВС, как функция режима движения и времени, с учетом холостых потерь мощности в самом ДВС и в системах, обеспечивающих его работоспособность показан на рис. 8.

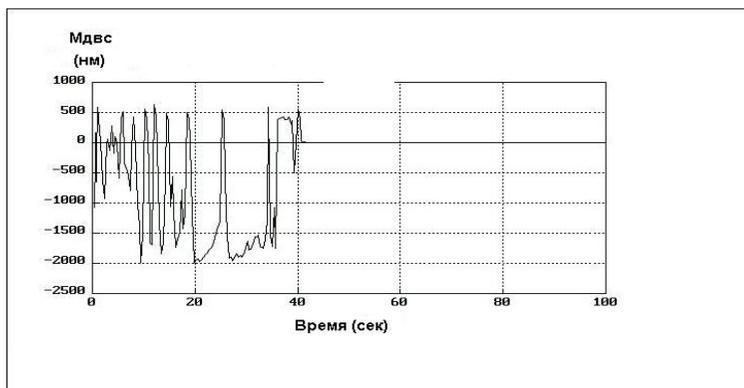


Рис. 8. Закон изменения крутящего момента дизеля 5 ТДФ

Данные характеристики ДВС позволяют определить его выходную мощность и степень загрузки.

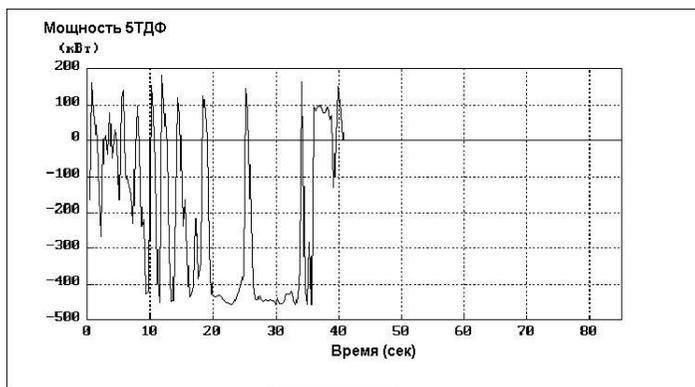


Рис. 9. Закон изменения выходной мощности дизеля 5ТДФ.

Алгоритмы управления движением танка предполагают переключать БКП на высшую передачу в точках максимальной мощности, что соответствует частоте вращения ДВС 2850 об/мин (293 рад/сек).

За счет включения фрикционов, увеличивается нагрузка на ДВС и угловая скорость дизеля падает до 200 рад/с (рис. 7).

Анализ работы дизеля 5ТДФ в объектовых условиях танка Т-64А показывает:

1. На 1 передаче дизель 5 ТДФ не догружен и его выходная мощность составляет порядка 250 кВт (рис. 9).
2. На 2, 3, 4 и 5 передачах рабочая точка дизеля выходит на режим максимальной мощности.
3. При движении на 6 передаче дизель достаточно долго «вытягивает» (5..7 сек) машину до скорости 40 км/час, что показывает на недостаточную его мощность.
4. При движении на 7 передаче разгон машины с 40 до 50 км/час занимает около 8..9 секунд, при этом система регулирования обеспечивает максимальную подачу топлива в цилиндры ( $h_{рпн} = 10.5$  мм), а угловая скорость дизеля растет достаточно медленно, со значительными сбросами (рис. 7, диапазон времени  $28 < t < 35$  сек), что свидетельствует о не достаточном коэффициенте запаса ФЗ.

### 3.3. Анализ переходных процессов в БКП

Исследование переходных процессов в БКП позволяет получить физическую картину происходящих процессов и выработать рекомендации по устранению негативных факторов.

При включении, выключении и срыве ФУ изменяется текущее состояние трансмиссии, что вызывает дополнительные особенности в построении алгоритма расчета.

В качестве примера рассмотрим движение на 5 передаче (Ф1 и Ф3) и переход с 5 на 6 передачу (Ф2 и Ф4), так называемый «клевок» (рис. 6...13).

Движение танка на 5 передаче начинается на 15 секунде (рис. 6, момент начала подачи масла в бустер Ф1), а конец соответствует моменту времени  $t = 18,5$  секунд (момент начала слива масла из бустера Ф1).

Работа БКП на 5 передаче сопровождается интенсивным скольжением фрикционов Ф1 (рис. 10) и Ф3 (рис. 12), которые носят знакопеременный характер, что и обеспечивает движение танка.

Мгновенные значения угловых скоростей скольжения Ф1 и Ф3 по модулю достигают 300..400 рад/сек, однако их длительность очень незначительная, что приводит к небольшим углам смещения дисков трения (до 10..15 градусов).

В момент времени  $t = 18.3$  сек начинается выключение Ф1 и Ф3 (слив масла из бустера) и через 0.3 . .0.5 секунды начинается включение Ф2 и Ф4 при этом возникают незначительные автоколебания ( $19.5 < t < 20.5$ ) после которых происходит их включение.

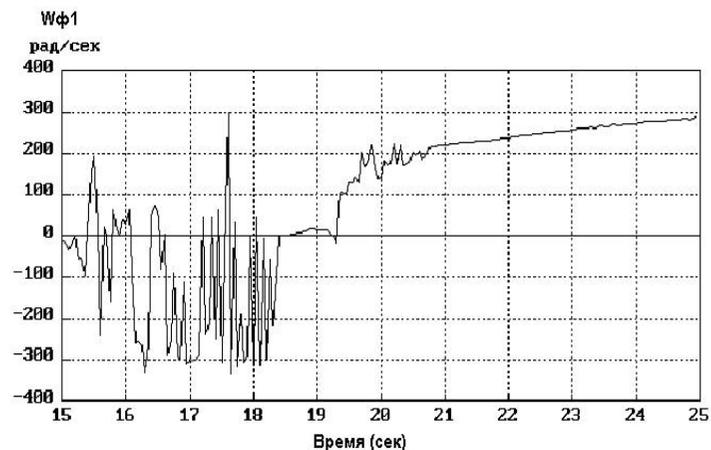


Рис. 10. Скольжение фрикциона Ф1

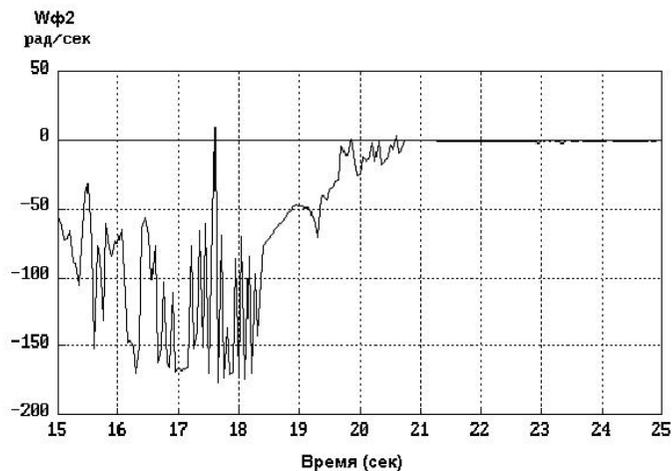


Рис. 11. Скольжение фрикциона Ф2.

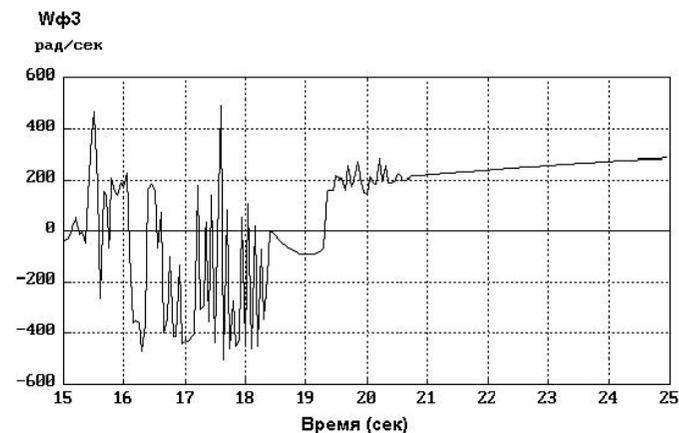


Рис. 12. Скольжение фрикциона Ф3.

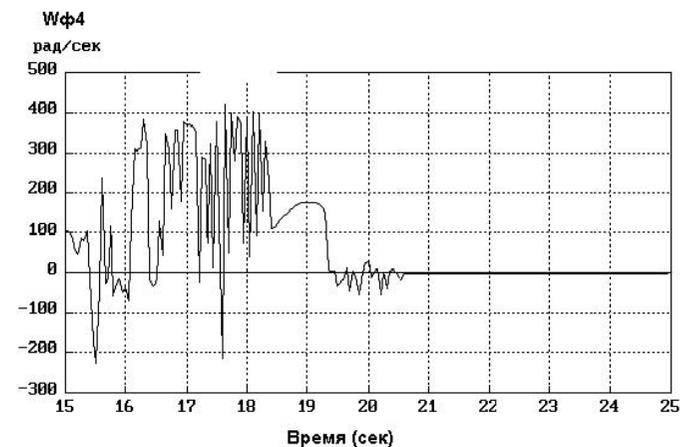


Рис. 13. Скольжение фрикциона Ф4.

Зная величины скольжения, действующие моменты трения между металлокерамическими дисками можно определить затраты мощности на буксование ФУ и сформулировать требования к системе охлаждения БКП.

Наиболее тяжелыми режимами работы фрикциона Ф4 являются 1 и 6 передачи, на которых затраты мощности на буксование составляют около 6

кВт. При выключении 6 передачи, мощность буксования Ф2 не превышает 1.0 кВт.

### 3.4. Анализ нагруженности планетарных рядов БКП

В моторно-трансмиссионной установке танка Т-64А будем рассматривать следующие нагрузки:

1. Моменты сопротивления вращению ведущих колес, которые действуют со стороны гусеницы и несущего основания. Считаем, что они известны.
2. Силы инерции звеньев БКП.
3. Моменты трения в фрикционных устройствах, зависящие от геометрических размеров ФУ, характеристик отжимных пружин и величины давления масла в бустере.
4. Входной крутящий момент в трансмиссию ( момент ДВС рис. 4).

Зависимость крутящего момента двигателя 5ТДФ на входе в трансмиссию, как функция времени, уже была рассмотрена (рис. 8). В соответствии с принятым правилом знаков для мощности (входная мощность на звено принимается положительной, а выходная – отрицательной), отрицательные значения крутящего момента соответствуют активному режиму работы ДВС, а положительные – реактивному (режим компрессора).

На рис. 14 ... рис. 17 приведены значения крутящим моментов на солнечных шестернях 1, 2, 3 и 4 планетарных рядов.

Конструктивно 1 и 2 планетарные ряды выполнены с единой солнечной шестерней. Метод динамического состояния позволяет разделить действующие нагрузки для каждого ПР в отдельности.

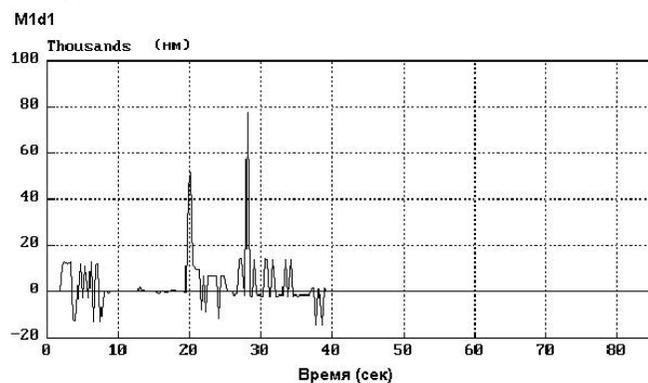


Рис. 14. Крутящий момент на солнце 1 планетарного ряда

На рис. 14 представлена зависимость крутящего момента на солнце 1ПР ( $M_{1d1}$ ). Его максимальное (пиковое) значение возникает при движении на 7 передаче ( $t=28$  с) и составляет 78 кнм.

Со стороны 2 ПР (рис. 14) действует противоположно направленный крутящий момент  $M_{1d2} = 35$  кнм. Анализ моментов  $M_{1d1}$  и  $M_{1d2}$  показывает на их кратковременный ударный характер. Причиной их возникновения является срыв фрикциона Ф3.

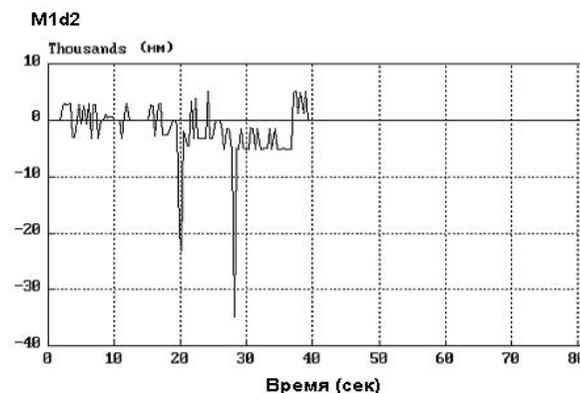


Рис. 15. Крутящий момент на солнце 2 планетарного ряда

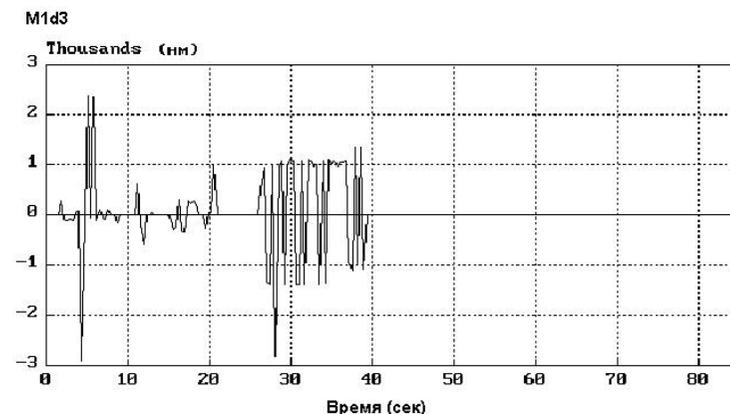


Рис. 16. Крутящий момент на солнце 3 планетарного ряда

Рассмотрим крутящий момент на солнечной шестерне 3 ПР рис.16. Его максимальное значение 2.8 кНм достигается при  $t=28$  с., что вызывает срыв ФЗ. Причиной этого явления является не согласованность передаточных чисел 5 и 6 передач, что вызывает «клевок» машины. Следствием этого явились ударные нагрузки в 1 и 2 планетарных рядах и возникновение двух встречных потоков мощности, которые сошлись на общей солнечной шестерне 1 и 2 ПР. Итогом этого явилось уменьшение суммарного, результирующего момента в 2 раза и сохранения работоспособности БКП.

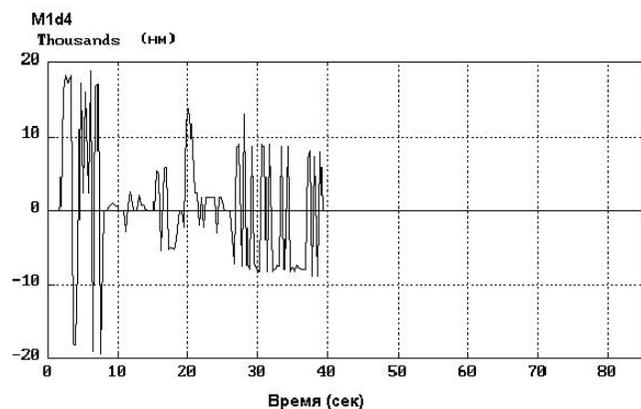


Рис. 17. Крутящий момент на солнце 4 планетарного ряда

На рис. 17 показан характер изменения крутящего момента на солнечной шестерне 4 ПР. Включение ФЗ на 7 передаче приводит к циркуляции потока мощности, которая носит знакопеременный характер.

Полученные зависимости изменения крутящих моментов позволяют построить циклограммы нагружения всех деталей и узлов БКП, оценить их прочность, надежность и ресурс.

#### 4. Выводы

1. Силовая передача танка Т-64А является сложной механической системой с гидравлическим управлением. Она имеет 13 подвижных масс (две БКП), на которые накладываются неголономные связи, обусловленные включением, буксованием и выключением фрикционных устройств.
2. Существующие методы математического моделирования силовых передач в не достаточной мере отражают конструктивные особенности трансмиссий, алгоритмы управления, действующие кинематические и силовые связи.

3. Разработанная математическая модель силовой передачи и полученные с ее помощью результаты переходных процессов позволяют оценить нагруженность деталей и узлов БКП, уровень потерь мощности, сформулировать требования к системам управления и охлаждения.

**Список литературы:** 1. *Современные танки*. Под ред. Сафонова Б.С. и Мураховского В.И. М., "Арсенал-Пресс", 1995, 320 с. 2. *Объект 434*. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, книги 1 и 2. М., Воениздат, 1986. 424с. 3. *Быстроходный танковый двигатель 5ТДФ*. Военное издательство Министерства обороны СССР, М., 1970, 184 с. 4. *Чернышев В.Л., Рагулин С.В.* Информационная технология "Gill" и ее применение в создании подвижных комплексах вооружения. [www.bvtv.narod.ru/1/gill/gill.htm](http://www.bvtv.narod.ru/1/gill/gill.htm) 5. *Чернышев В.Л.* «Проект "ЭТА". Электро-механическая трансмиссия перспективного советского танка «Молот» (изд. 477)». [www.bvtv.narod.ru/raznoe/eta.htm](http://www.bvtv.narod.ru/raznoe/eta.htm) 6. *Белоутов Г. С.* Метод математического моделирования переходных процессов в транспортных гусеничных машинах // Вестник бронетанковой техники. 1975, №5. с. 22-24. 7. *Аппель П.* Теоретическая механика т.2 . М., Изд. Физико-математической литературы, 1960, 487 с.