

УДК 629.3-578.222:004.9

Осипов Владислав Иванович, канд. техн. наук, проф.,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, osipovv@yandex.ru

Степанов Кирилл Вадимович, магистрант,

МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, scharfschuetze@mail.ru

Камитов Михаил Станиславович, аспирант,

Московский политехнический университет, Россия, 107023, Москва,

ул. Б. Семеновская, 38, mkamitov@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВКЛЮЧЕНИЯ СЦЕПЛЕНИЯ ПРИ ТРОГАНИИ АВТОМОБИЛЯ С МЕСТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПО MATLAB И EXCEL

Аннотация. Благодаря вычислительным мощностям современных компьютеров и возможностям среды MATLAB в процессе математического моделирования можно получить значения интересующих параметров, в том числе вычисляемых через интегралы с высокой точностью. Данная статья посвящена математическому моделированию рабочего процесса сцепления при трогании автомобиля с места в среде MATLAB. Результаты моделирования дают возможность оценки рабочего процесса сцепления: надёжности износостойкости рабочих поверхностей сцепления и его влияния на эксплуатационные свойства. Для облегчения взаимодействия пользователя с MATLAB, для ввода/вывода числовых данных используется программа MS Excel, знакомая большинству пользователей.

Ключевые слова: математическое моделирование, сцепление, MATLAB, рабочий процесс, оценка надёжности.

Osipov Vladislav I., Ph. D., professor,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, osipovv@yandex.ru

Stepanov Kirill V., master student,

MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, scharfschuetze@mail.ru

Kamitov Mikhail S., postgraduate student,

Moscow Polytechnic University, 38, Bolshaya Semenovskaya str.,

Moscow, 107023, Russia, mkamitov@yandex.ru

SIMULATION THE CLUTCH SWITCHING ON WORKING PROCESS AT THE DRIVING THE VEHICLE AWAY FROM REST WITH APPLICATION MATLAB AND EXCEL SOFTWARE

Annotation. Thanks to the computing power of modern computers and the capabilities of the MATLAB software, in the process of mathematical modeling it is possible to obtain

the values of the parameters of interest, including those calculated through integrals, with high accuracy. This article is devoted to the mathematical modeling of the clutch working process when the vehicle is moved from its place in the MATLAB software. The results of the simulation provide an opportunity to assess the working process of adhesion: the reliability of wear resistance of the working surfaces of the clutch and its effect on performance. To facilitate the interaction of the user with Matlab, the MS Excel program is being used for the input/output data entering, which is familiar to a larger number of users.

Key words: mathematical modeling, car clutch, MATLAB, working process, reliability evaluation.

Введение

Современные компьютеры, обладающие значительными вычислительными ресурсами, дают прекрасную возможность для математического моделирования, требующего вычисления значений множества параметров (часто в виде повторяющихся вычислений) с высокой точностью (другим видом моделирования, для которого часто используются компьютерные технологии, является 3D-моделирование [3]). Одной из особенностей математического моделирования на компьютере является синтаксис языка программирования, на котором описывается модель, зависящий от среды моделирования и, как правило, существенно отличающийся от математического. В остальном компьютерное моделирование мало отличается от математического, т.е. изучения объекта или явления посредством исследования замещающей модели, представляющей собой описание изучаемого объекта и/или его свойств на языке математики (формулы, уравнения и т.д.).

Основная часть

При моделировании рабочего процесса сцепления при трогании автомобиль представляется в виде эквивалентной двухмассовой системы (рис.), для которой справедливы уравнения [1]:

$$J_e \cdot \dot{\omega}_e = M_k - M_c;$$

$$J_a \cdot \dot{\omega}_a = M_c - M_\psi.$$

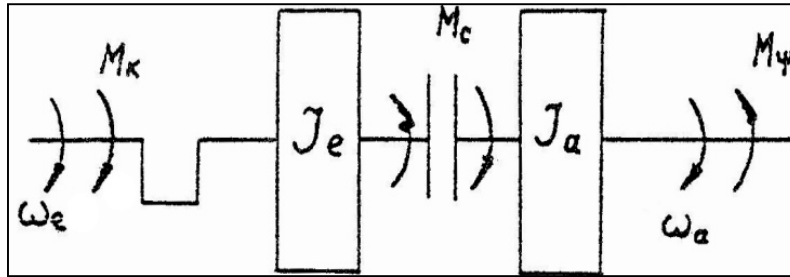


Рисунок. Двухмассовая модель процесса включения сцепления:
 J_e – момент инерции ведущих частей; J_a – момент инерции маховика, имитирующего автомобиль; M_k – крутящий момент двигателя;
 M_c – момент, передаваемый сцеплением; M_ψ – момент сопротивления движению автомобиля, приведённый к ведомому диску сцепления;
 ω_a, ω_e – угловая скорость коленчатого вала двигателя и ведомых частей сцепления

При моделировании принимаются следующие допущения:

1. Момент двигателя зависит от времени $M_k = K_2 t$ и при достижении $M_{k\max}$ остаётся постоянным.

2. Момент, передаваемый сцеплением, зависит от времени $M_c = K_1 \cdot t$, а при достижении максимального значения $M_c = M_{k\max} \cdot \beta$.

Темп включения сцепления K_1 изменяется в диапазоне:

- для легковых автомобилей $K_1 = 50 \dots 150 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$;
- для грузовых автомобилей $K_1 = 250 \dots 750 \text{ Н} \cdot \text{м/с}$.

Три варианта включения сцепления:

- $K_1 = K_2$ – интенсивность нарастания моментов двигателя и сцепления одинаковы;
- $K_1 > K_2$ – момент сцепления нарастает быстрее момента двигателя;
- $K_1 < K_2$ – момент двигателя нарастает интенсивнее момента сцепления.

3. Момент сопротивления движению постоянен, т.е.

$$M_\psi = \frac{\psi \cdot G_a \cdot r_g}{U_T \cdot \eta_T},$$

где G_a – сила тяжести автомобиля; ψ – коэффициент сопротивления движению; r_g – динамический радиус колеса; η_T – КПД трансмиссии; U_T – передаточное число трансмиссии.

4. Момент инерции автомобиля, приведённый к ведомым частям сцепления.

$$J_a = \frac{1,05 \cdot G_a \cdot r_k^2}{g \cdot U_T},$$

где r_k – радиус качения колеса.

5. Начальная угловая скорость коленчатого вала:

$$\omega_{\text{нач}} = \omega_N \cdot \left(1,5 \frac{\omega_{\text{exx}}}{\omega_N} + 0,1 \frac{300}{\omega_N} \cdot \frac{J_a}{J_e} \right),$$

где $\omega_{\text{exx}} = 0,15\omega_N$.

Решая исходные уравнения со сделанными допущениями, получаем:

$$\begin{aligned}\omega_e &= \frac{M_k}{J_e} t + \frac{M_c}{J_e} t + \omega_{\text{нач}}, \\ \omega_a &= \frac{M_c}{J_a} t + \frac{M_\psi}{J_a} + \omega_{\text{нач}}.\end{aligned}$$

Оценка рабочего процесса включения сцепления при трогании автомобиля

1. Оценка надёжности износостойкости рабочих поверхностей.

Из-за многообразия условий эксплуатации автомобиля, в том числе манеры вождения водителя, в настоящее время не существует методов определения величины износа фрикционных накладок как функции пробега автомобиля.

Оценка проходит по следующим двум косвенным показателям надёжности работы пары трения:

- по удельной работе буксования ($L_{\text{бo}}$).

Работа буксования сцепления

$$L_{\text{бo}} = \int_0^{t_{\text{б}}} M_c (\omega_e - \omega_a) dt.$$

Благодаря использованию программного ресурса MATLAB есть возможность автоматизации вычисления работы буксования именно как

интеграла функции по времени. Удастся избежать погрешностей при суммировании работы по ограниченному числу участков.

$$L_{\text{бo}} = \frac{L_{\text{б}}}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \cdot i}.$$

Удельная работа буксования при трогании автомобиля с места не должна превышать:

- для легкового автомобиля – 70 Дж/см²;
- для грузового автомобиля – 120 Дж/см²;
- по нагреву нажимного диска на одно включение (τ):

$$\tau = \frac{Y \cdot L_{\text{б}}}{481 \cdot m_{\text{нд}}},$$

где $Y = 0,5$ для однодискового сцепления; $Y = 0,25$ для двухдискового сцепления; $m_{\text{нд}}$ – масса нажимного диска.

Допускаемый нагрев нажимного диска $\tau = 10 \dots 15^\circ\text{C}$.

2. Показатели, по которым оценивают влияние рабочего процесса сцепления на эксплуатационные свойства автомобиля:

- конечная угловая скорость коленчатого вала (т.е. его угловая скорость на момент окончания неупорядоченного разгона).

Если она окажется меньше угловой скорости коленчатого вала при холостом ходе ($\omega_{\text{екон}} < \omega_{\text{ехх}}$), то двигатель заглохнет;

- время включения сцепления:
 - $t_{\text{б}} = 0,1 \dots 1,1$ с – резкое включение;
 - $t_{\text{б}} = 1,6 \dots 2,5$ с – плавное включение;
- тягово-скоростные свойства автомобиля на этапе буксования сцепления.

Скорость автомобиля к моменту окончания буксования сцепления:

$$V_{\text{a}} = \frac{\omega_{\text{au}} \cdot r_{\text{к}}}{U_{\text{T}}}.$$

Максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления:

$$j_{\max} = \frac{(M_{c\max} - M_{\psi}) \cdot U_T \cdot \eta_T}{r_k \cdot \frac{G_a}{g} \delta_{\text{вр}}},$$

где $\delta_{\text{вр}} = 1,04 + 0,04 \cdot U_k^2$ – коэффициент учёта вращающихся масс;

U_k – передаточное отношение коробки передач.

Условие сохранения комфорта у пассажиров:

$$J_{\max} \leq 3,5 \text{ м/с}^2.$$

Реализация тягово-скоростных свойств автомобиля по сцеплению колёс с дорогой

Отсутствие пробуксовывания колёс при трогании возможно при соблюдении условия:

$$M_{c\max} < M_{\varphi},$$
$$M_{\varphi} = \frac{G \cdot K \cdot \varphi_x \cdot r_k}{U_T \cdot \eta_T},$$

где M_{φ} – максимальный момент, допустимый по сцеплению колеса с дорогой; $M_{c\max}$ – максимальный момент сцепления за время включения; G – вес автомобиля, приходящийся на ведущие колёса; $K = 1,05 \dots 1,12$ – коэффициент перераспределения реакции (для заднеприводного автомобиля); $K = 0,88 \dots 0,95$ – коэффициент перераспределения реакции (для переднеприводного автомобиля).

Расчёты приводятся для значения коэффициента сцепления $\varphi_x = 0,7$. При отсутствии пробуксовки определяется критическое значение φ_x , при котором оно наступает.

Одной из отличительных черт компьютерных сред моделирования, использующих языки программирования, является возможность организации циклов. Цикл, по сути, представляет собой многократное исполнение инструкций (команд, расчётов). В математическом

моделировании, поскольку количество расчётов ограничено, используются условные циклы, в которых специальными командами задаются условие начала и количество повторений (или условие конца). Это позволяет формировать последовательности значений, рассчитываемых по определённому правилу, причём количество этих значений лимитируется лишь возможностями вычислительной машины (прежде всего, объёмом памяти) и потребностями пользователя. Многие думают, что подобное возможно сделать, например в MS Excel непосредственно в ячейках. Это не совсем так – для формирования, например, временной оси от 0 до 1 с шагом в 1 миллисекунду потребовалось бы использовать 1000 ячеек. Уже непросто. А если шаг – 0,0001 или 0,0000001 с?..

Однако при очень маленьком шаге получится огромное количество значений, которые будут относительно долго вычисляться (возможности процессора) и занимать довольно большой объём памяти. Поэтому при формировании цикла важно найти компромисс между требуемой точностью (количеством знаков после десятичного разделителя) и возможностями компьютера. Это объясняет ещё одно отличие моделирования в MATLAB: вместо расчёта значений параметров в 3–4 точках (как в графоаналитическом методе) в нём рассчитываются значения с шагом по времени в 0,0001 с, т.е. тысячи значений. Например, при времени буксования в 1 с для моделирования в MATLAB рассчитывается более 60000 значений! По 10000 значений времени, моментов двигателя, сопротивления и передаваемого сцеплением угловых скоростей ведущих и ведомых частей плюс «одиочные» значения – начальная и конечная угловая скорость ведущих частей сцепления, работа буксования, нагрев и т.д. Поэтому в работе используется шаг в 0,0001 с – это, на наш взгляд, разумный компромисс между точностью результатов и временем расчёта значений и объёмом памяти, который займут все эти значения [2].

Другим преимуществом таких систем является возможность вычислений значений интегралов и дифференциалов в конкретных точках с высокой частотой дискретизации и точностью (посредством численных методов). В данной работе именно через интегрирование (методом трапеций) рассчитываются значения угловых скоростей ведущих и ведомых частей сцепления и суммарная работа буксования.

Заданный тип автомобиля - Грузовой

$G_{\text{в}}, \text{Н}$	$M_{\text{кпп}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	$J_{\text{в}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$W_{\text{кв}}, \text{рад/с}$	$U_{\text{к}}$	$U_{\text{д}}$	K	$r_{\text{к}}, \text{м}$	ψ	β	$D_{\text{к}}, \text{см}$	$d_{\text{д}}, \text{см}$	$m_{\text{д}}, \text{кг}$	$\mu_{\text{треномский}}$	γ	$G_{\text{см}}, \%$	$\phi_{\text{к}}$
90000,00	390,00	1,60	310,00	4,10	6,60	600,00	0,4600	0,0400	1,90	34,20	18,60	9,00	0,90	0,50	60,00	0,70

Момент сопротивления движению автомобиля, Н·м: 67,99704360679970

Момент инерции приведённый к сцеплению, кг·м²: 2,78465381437943

Начальная угловая скорость вращения КВД, рад/с: 121,96225901961400

Удельная работа буксования, Дж/см²: 24,47834328444290

Нагрев нажимного диска за одно включение, °C: 3,65799272553082

Максимальное ускорение в момент включения сцепления, м/с²: 1,08478900843464

Максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой, Н·м: 774,65631929046600

$X = 1,5$ Выбрать темп включения ДВС ($K_2 = K_1 \cdot X$)

1,1144 [с] вести момент времени, когда сцепление будет включено (максимальная точность - 4 знака после запятой)

Максимальный момент, переданный сцеплением за время неупорядоченного разгона, Н·м: 668,6399999999936

Конечная угловая скорость, рад/с: 107,94760730250400

Скорость на момент окончания неупорядоченного разгона, м/с: 1,83502954024951

Данную таблицу необходимо заполнить самостоятельно:

$M_{\text{ф}}$	$M_{\text{стах}}$	$t, ^\circ\text{C}$	$L_{\text{дв}}, \text{Дж/см}^2$	$W_{\text{дв}}, \text{рад/с}$	X	$V_{\text{с.дв.к.}}, \text{м/с}$
774,6563	501,9600	1,5446	10,3364	56,3522	0,50	0,9579451
774,6563	625,6200	2,7280	18,2551	93,0500	1,00	1,58178068
774,6563	668,6400	3,6580	24,4783	107,9476	1,50	1,83502954

Построить график

Для справки:
 $g = 9,80665$ - ускорение свободного падения (условное)
 $g = 9,83$ - ускорение свободного падения на полюсах Земли
 $g = 9,78$ - ускорение свободного падения на экваторе Земли
 $g = 9,81523$ - ускорение свободного падения на широте Москвы

Рис. 1. Окно ввода данных в MS Excel

Про программную среду (пакет программ) MATLAB знают многие, но не все знают, что MATLAB – это ещё и язык программирования, используемый в этой среде! Возможность организовывать вычисления посредством языка программирования, на наш взгляд, добавляет среде гибкости, но в то же время обязывает к изучению синтаксиса этого языка. Чтобы не обременять пользователя особенностями синтаксиса MATLAB, решено использовать для ввода данных программу Excel из пакета Microsoft Office, которая знакома почти всем. Сам Excel используется

для ввода и вывода числовых значений. Обмен данными между MATLAB и Excel организуется посредством макросов (встроенных коротких наборов команд) на языке программирования Visual Basic, выполнение которых начинается нажатием кнопки на листе Excel. То есть обработка данных (расчёты) происходит в MATLAB (графики в MATLAB строятся в отдельном окне). Организация взаимодействия этих программных продуктов возможна благодаря надстройке Excel – Spreadsheet Link, которая входит в пакет установки MATLAB [4].

В данной статье рассмотрено 3 набора условий работы сцепления.

Для всех вариантов заданы следующие значения: коэффициента $\varphi_x = 0,7$; часть веса автомобиля, приходящаяся на задние ведущие колёса – 60%.

1. Первый набор данных:

Таблица 1

Данные для 1-го набора данных

G (вес)	$M_{\text{емax}}$	I_e	W_n	U_k	U_o	K_1	r	ψ	β	D	d	m	КПД	Y
90000	390	1,6	310	4,1	6,6	600	0,46	0,04	1,9	34,2	18,6	9	0,9	0,5

$Y = 0,5$, следовательно, сцепление однодисковое.

Результаты расчётов

Максимальный момент, передаваемый сцеплением: 741 Н·м.

Момент сопротивлению движения: 66,98 Н·м.

Момент инерции, подведённый к ведомым частям сцепления: 2,78 Н·м.

Максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой: 775 Н·м. Коэффициент φ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс, по расчётам составляет 0,407.

Начальная угловая скорость КВ ДВС: 121,9 рад/с.

Анализ

Интенсивность включения сцепления выше, чем увеличения подачи топлива, поэтому угловая скорость ведущих частей сцепления сразу

начинает убывать. Тот факт, что угловая скорость ведомых частей начинает возрастать не сразу, объясняется наличием момента сопротивления движению, т.е. эта угловая скорость может возрастать лишь после того, как сцепление начнёт передавать больший по величине крутящий момент.

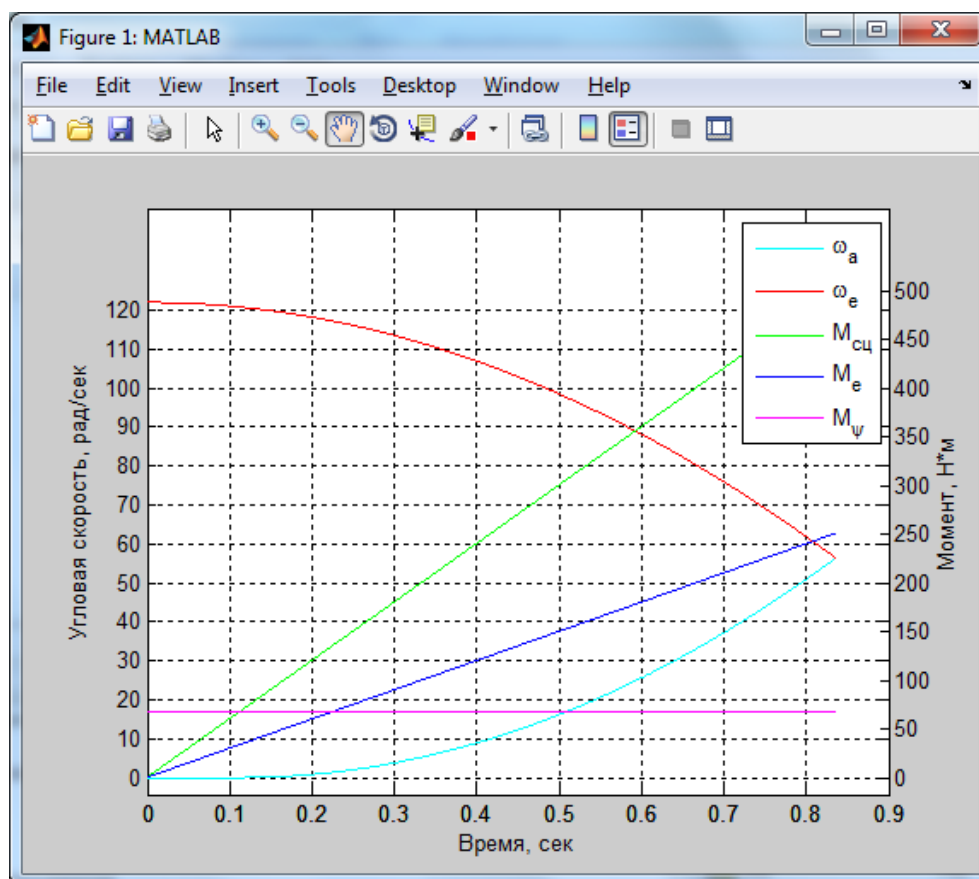


Рис. 2. График рабочего процесса при $K_2 = 0,5 \cdot K_1$
(K_2 – интенсивность воздействия на педаль подачи топлива)

Из графика видно, что ни момент ДВС, ни момент, передаваемый сцеплением, не успевают достичь своего максимума. Момент сопротивления движению остаётся постоянным (это одно из допущений при создании теории).

Неупорядоченный разгон (разгон с взаимным проскальзыванием ведущих и ведомых частей – до выравнивания их угловых скоростей) длится 0,836 с (8366 миллисекунд). Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 3):

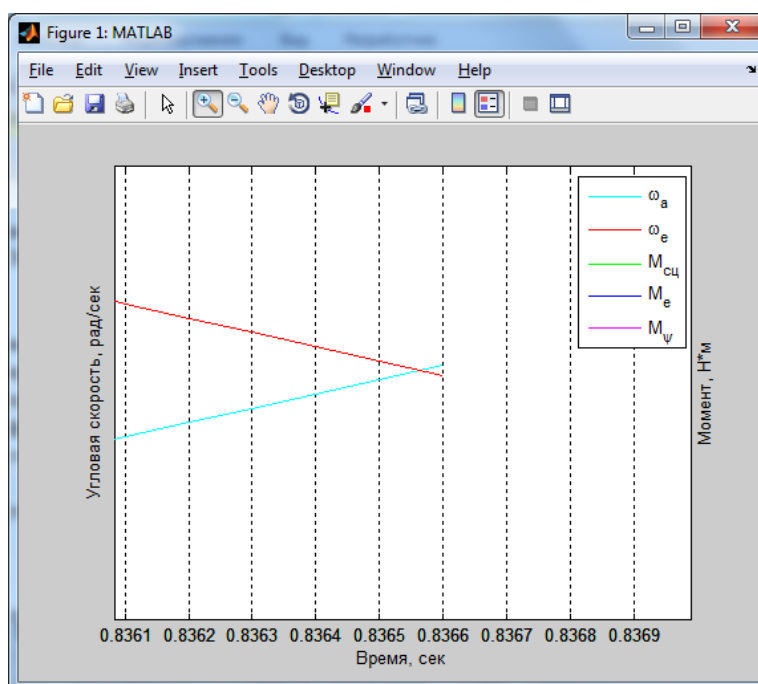


Рис. 3

Конечная угловая скорость составила 56,4 рад/с. После этого начинается упорядоченный разгон, при котором ведущие и ведомые части начинают вращаться как одно целое, без взаимного проскальзывания. Но именно во время проскальзывания происходит интенсивный нагрев элементов сцепления, в том числе фрикционных накладок, который заметно влияет на их долговечность. Поэтому в этой статье рассматривается именно неупорядоченный разгон.

Угловая скорость холостого хода равна 46,5 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 13374 Дж;
- удельная работа буксования составила: 10,33 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 1,54°C;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 0,96 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 1,08 м/с².

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы: удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 502 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\phi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента ϕ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

Рассмотрим следующий случай.

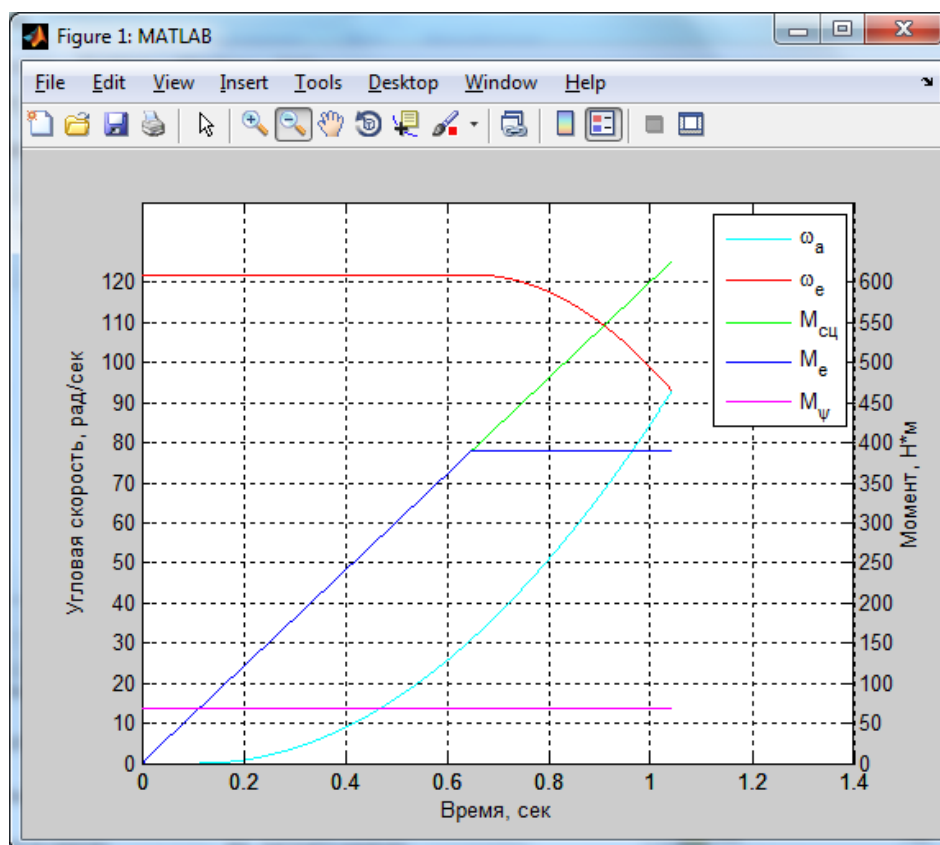


Рис. 4. График рабочего процесса при $K_2 = K_1$

Анализ

Интенсивность включения сцепления и увеличения подачи топлива одинаковы, поэтому угловая скорость ведущих частей сцепления остаётся постоянной до достижения крутящим моментом ДВС своего максимума.

По этой же причине момент ДВС и момент, передаваемый сцеплением, возрастают одинаково. Однако момент, передаваемый сцеплением, имеет больший максимум (из-за запаса сцепления), который не достигается за время неупорядоченного разгона. Тот факт, что момент, передаваемый сцеплением, продолжает возрастать, когда момент ДВС уже становится постоянным, объясняет то, что угловая скорость ведущих частей всё же начинает убывать, и именно в той точке, в которой момент ДВС достигает своего максимума!

Всё сказанное при рассмотрении предыдущего случая относительно угловой скорости ведомых частей и момента сопротивления движению относится и к рассматриваемому случаю.

Время неупорядоченного разгона, по сравнению с предыдущим случаем, увеличилось и составило 1,0427 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 5):

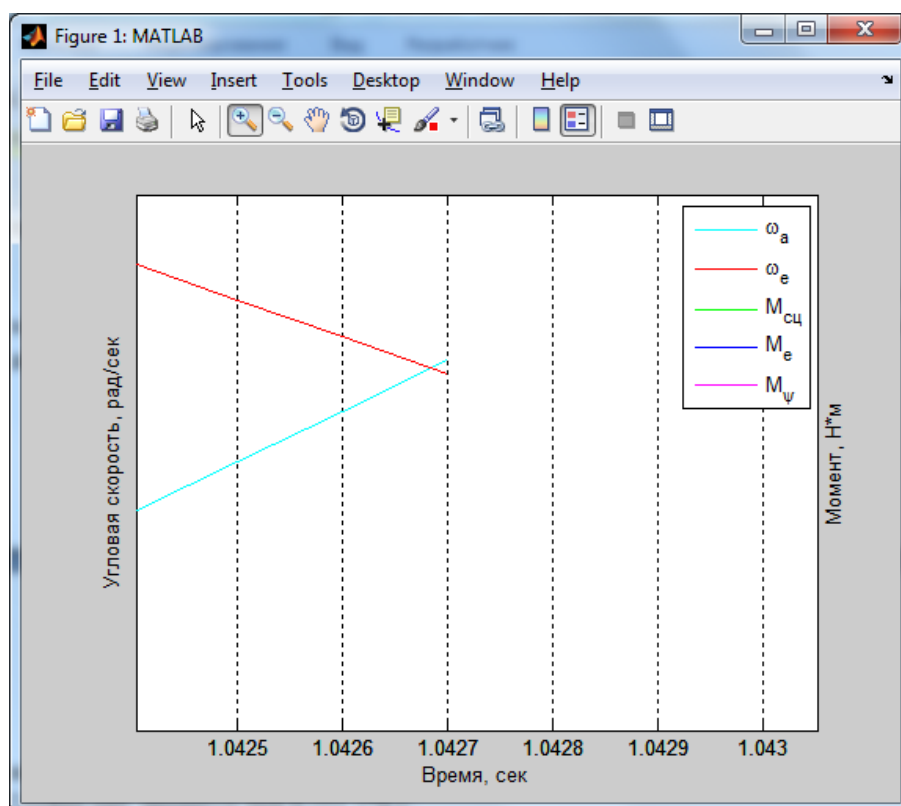


Рис. 5. График изменения частоты вращения КВ двигателя и ведомых частей сцепления

Конечная угловая скорость составила 93 рад/с. Угловая скорость холостого хода равна 46,5 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 23619 Дж;
- удельная работа буксования составила: 18,26 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 2,73°C;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 1,58 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 1,08 м/с².

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы: удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 626 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\varphi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента φ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

Теперь рассмотрим случай, когда интенсивность подачи топлива выше интенсивности включения сцепления (рис. 6).

Анализ

Интенсивность увеличения подачи топлива выше, поэтому угловая скорость ведущих частей интенсивно возрастает, пока момент ДВС не достигнет своего максимума.

После этого интенсивность её возрастания снижается. Убывание угловой скорости ведущих частей сцепления начинается тогда, когда момент, передаваемый сцеплением, численно сравнивается с моментом

двигателя. Хотя и в этом случае момент, передаваемый сцеплением, не достигает своего максимума.

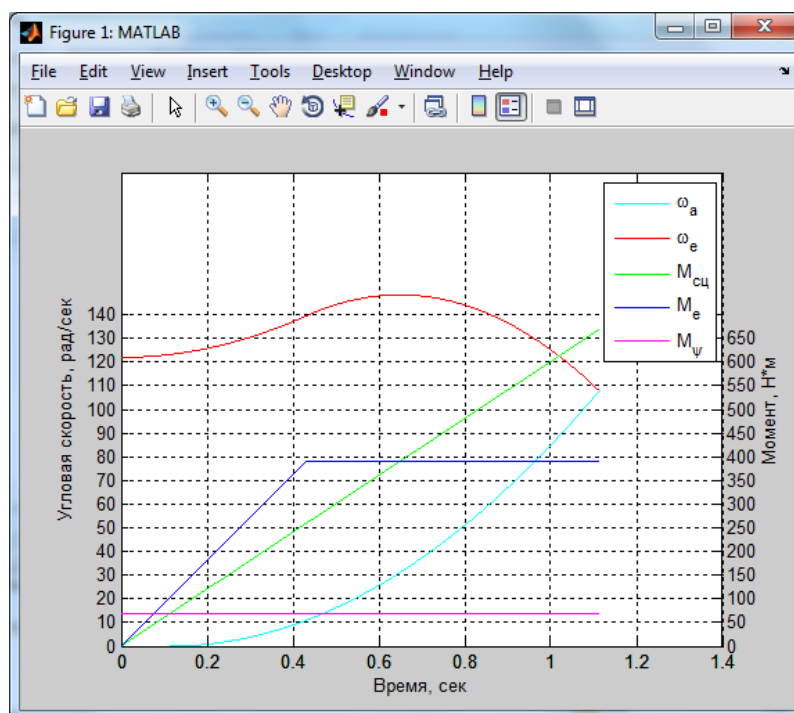


Рис. 6. График рабочего процесса при $K_2=1,5 \cdot K_1$

Время неупорядоченного разгона, по сравнению с предыдущим случаем, увеличилось и составило 1,1144 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 7).

Конечная угловая скорость составила 108 рад/с. Угловая скорость холостого хода равна 46,5 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 31671 Дж;
- удельная работа буксования составила: 24,5 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 3,7°C;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 1,84 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 1,08 м/с².

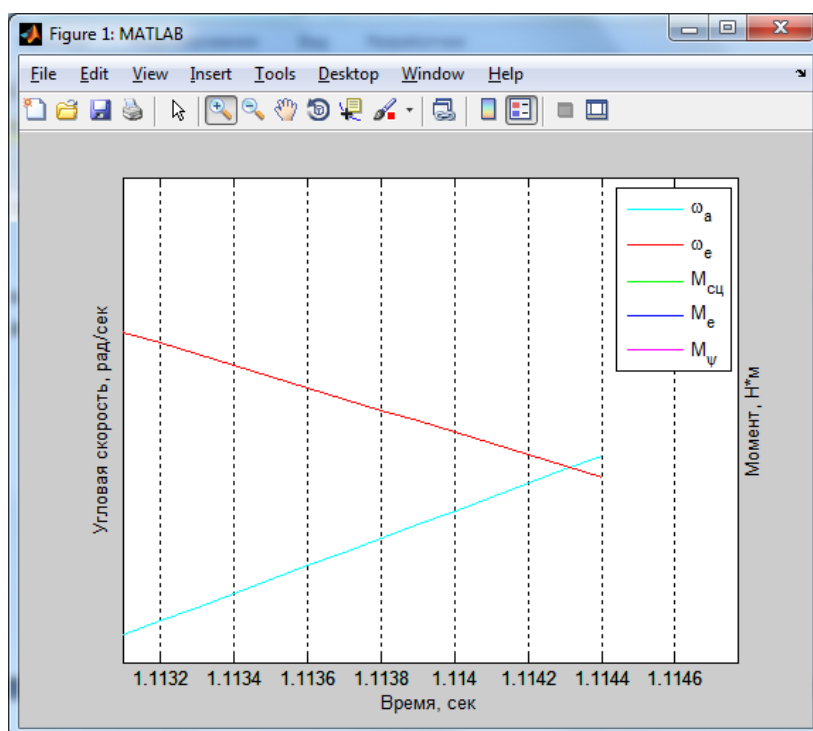


Рис. 7

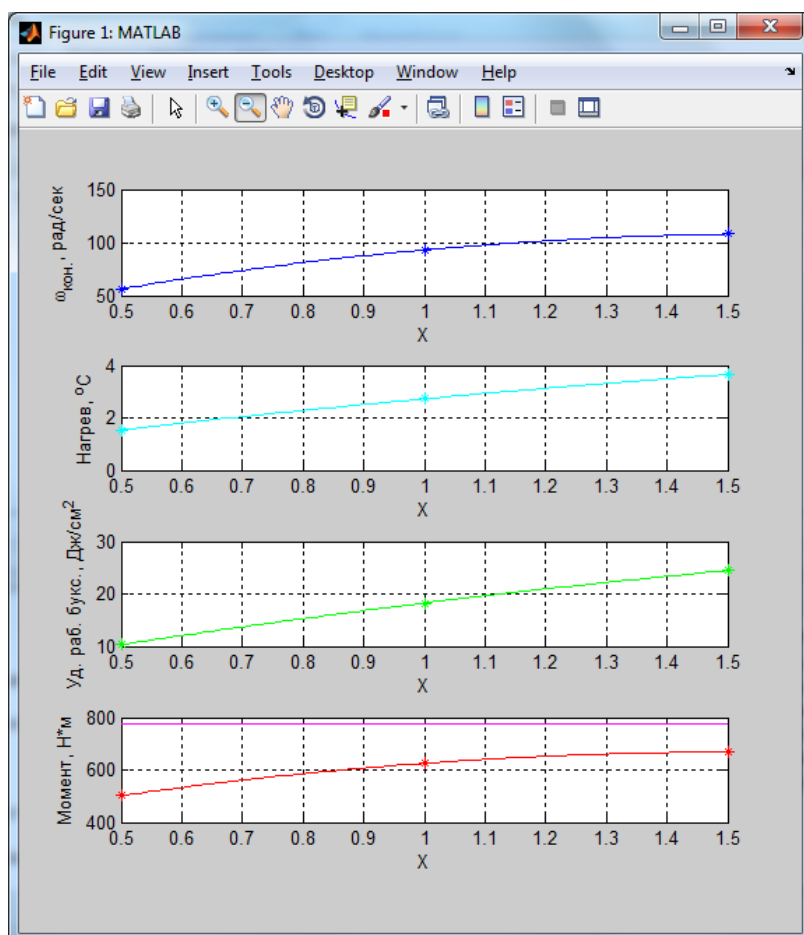


Рис. 8. Влияние соотношения интенсивности воздействия на педали подачи топлива и сцепления (X) на различные показатели для первого набора данных

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы (рис. 8): удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 669 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\phi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента ϕ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

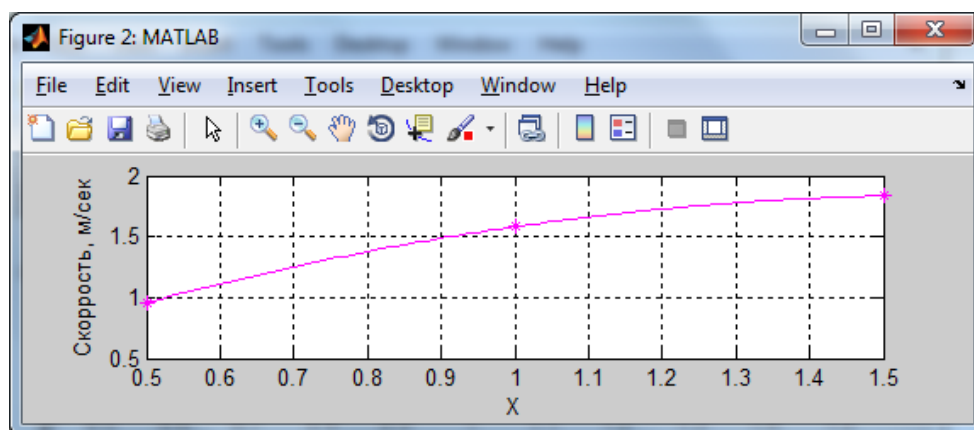


Рис. 9. Зависимость скорости автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона от соотношения интенсивности воздействия на педали подачи топлива и сцепления (X) для **первого набора данных**

Второй набор данных:

Таблица 2

Данные для 2-го набора

G (вес)	M_{emax}	I_e	W_n	U_k	U_o	K_1	r	ψ	β	D	d	m	КПД	Y
97000	430	2,1	310	4,1	6,4	250	0,47	0,035	1,9	34,2	18,6	8,7	0,9	0,5

$Y = 0,5$, следовательно, сцепление однодисковое.

Результаты расчётов

Максимальный момент, передаваемый сцеплением: 817 Нм.

Момент сопротивлению движения: 67,5 Нм.

Момент инерции, подведённый к ведомым частям сцепления: 3,3 Нм.

Максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой: 879 Н·м.

Коэффициент ϕ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс, по расчётам составляет 0,395.

Начальная угловая скорость КВ ДВС: 117,3 рад/с.

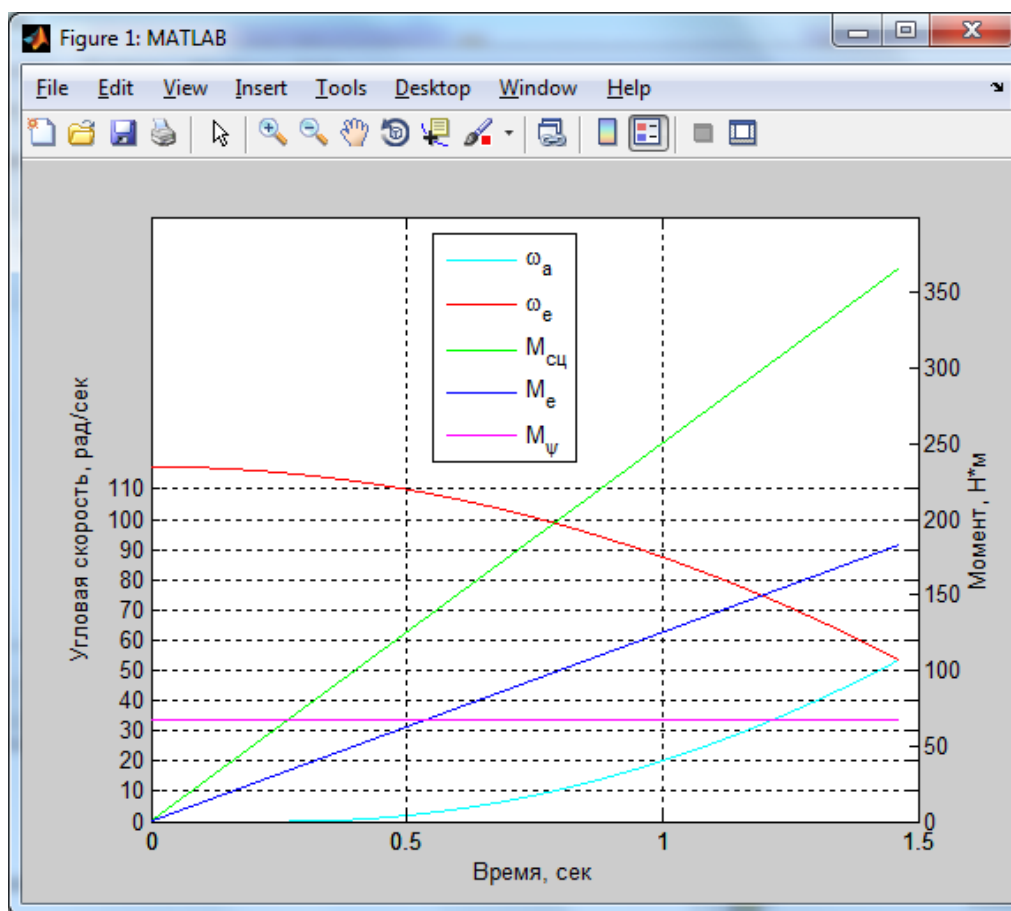


Рис. 10. График рабочего процесса при $K_2 = 0,5 \cdot K_1$

Анализ (рис. 10)

Интенсивность включения сцепления выше, чем увеличения подачи топлива, поэтому угловая скорость ведущих частей сцепления сразу начинает убывать. Тот факт, что угловая скорость ведомых частей начинает возрастать не сразу, объясняется наличием момента сопротивления движению, а значит, что эта угловая скорость может возрастать лишь после того, как сцепление начнёт передавать больший по величине крутящий момент.

Из графика видно, что ни момент ДВС, ни момент, передаваемый сцеплением, не успевают достичь своего максимума. Момент сопротивления движению остаётся постоянным (это одно из допущений при создании теории).

Неупорядоченный разгон (разгон с взаимным проскальзыванием ведущих и ведомых частей до выравнивания их угловых скоростей) длится 1,4646 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 11):

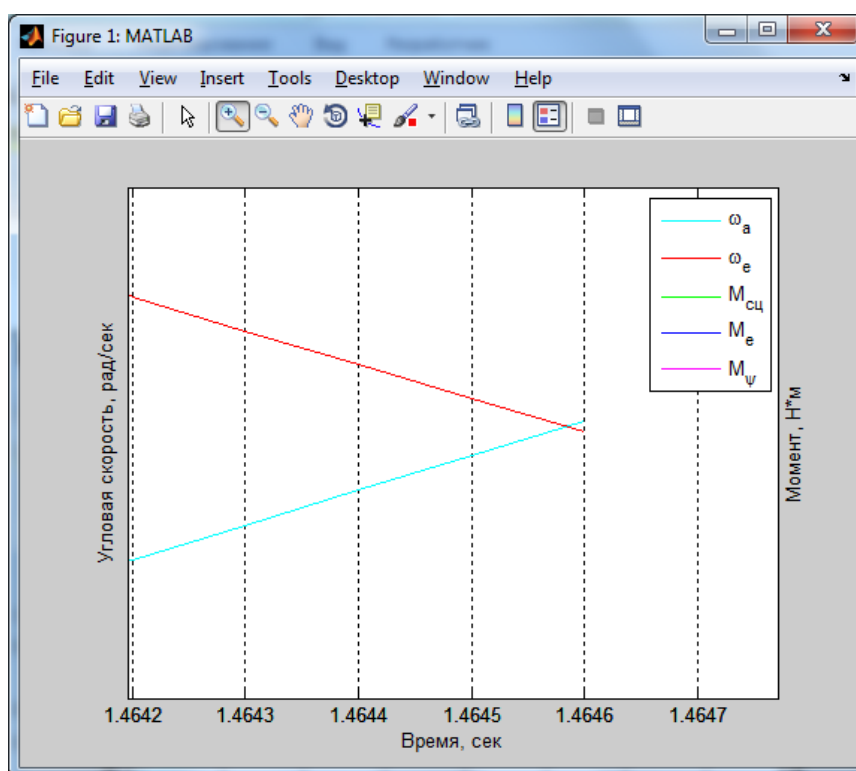


Рис. 11

Конечная угловая скорость составила 53,5 рад/с. После этого начинается упорядоченный разгон, при котором ведущие и ведомые части начинают вращаться как одно целое, без взаимного проскальзывания.

Угловая скорость холостого хода равна 46,5 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

– суммарная работа буксования составила: 16696 Дж;

- удельная работа буксования составила: $12,9 \text{ Дж/см}^2$;
- нагрев нажимного диска за включение: 2°C ;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: $0,96 \text{ м/с}$;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: $1,07 \text{ м/с}^2$.

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы: удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, $366 \text{ Н}\cdot\text{м}$, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\varphi_x = 0,7$.

А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут, что также подтверждается расчётом коэффициента φ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

Рассмотрим следующий случай.

Анализ

Интенсивность включения сцепления и увеличения подачи топлива равна, поэтому угловая скорость ведущих частей сцепления остаётся постоянной до достижения крутящим моментом ДВС своего максимума. По этой же причине момент ДВС и момент, передаваемый сцеплением, возрастают одинаково. Однако момент, передаваемый сцеплением, имеет больший максимум (из-за запаса сцепления), который не достигается за время неупорядоченного разгона. Тот факт, что момент, передаваемый сцеплением, продолжает возрастать, когда момент ДВС уже становится постоянным (достигает максимума), объясняет то, что угловая скорость ведущих частей всё же начинает убывать, и именно в той точке, в которой момент ДВС достигает своего максимума!

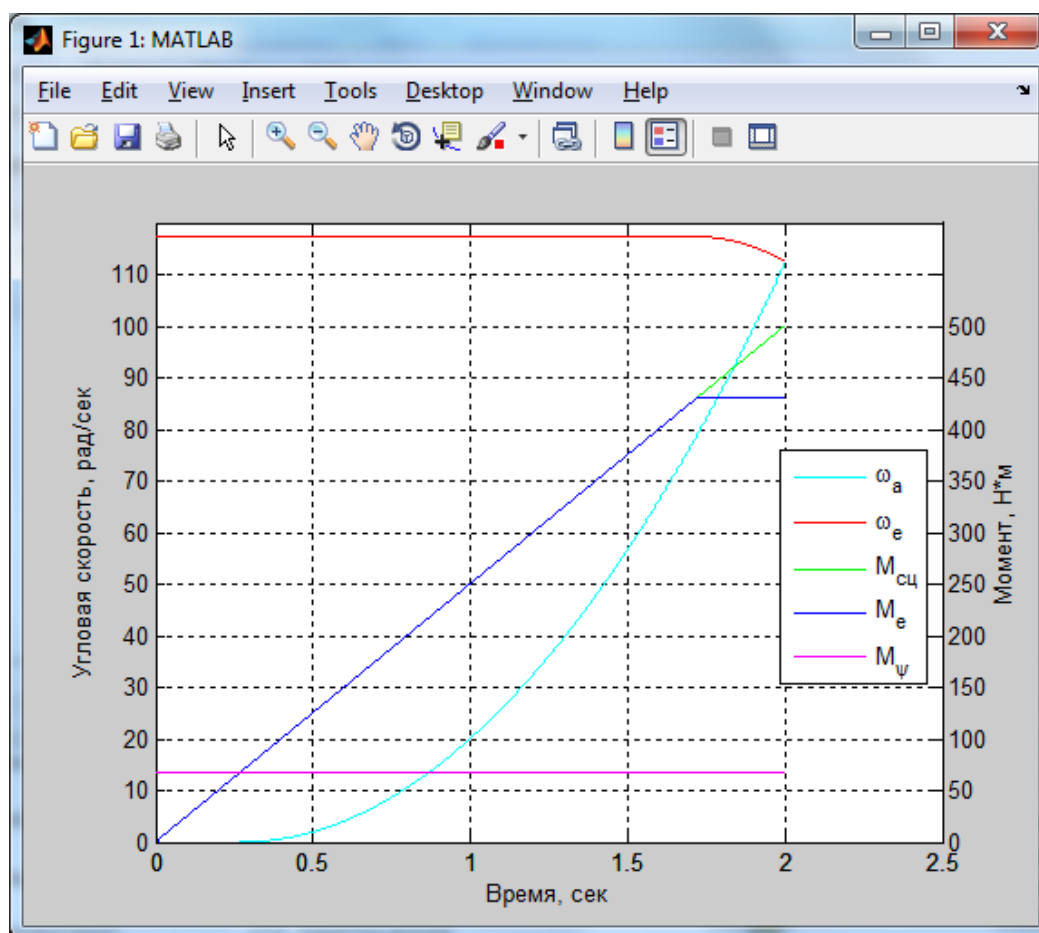


Рис. 12. График рабочего процесса при $K_2 = K_1$

Всё сказанное при рассмотрении предыдущего случая ($K_2 = 0,5 \cdot K_1$) относительно угловой скорости ведомых частей и момента сопротивления движению относится и к рассматриваемому случаю.

Время неупорядоченного разгона, по сравнению с предыдущим случаем, увеличилось и составило 2,0027 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 13).

Конечная угловая скорость составила 112,6 рад/с. Угловая скорость холостого хода равна 46,5 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 33103 Дж;
- удельная работа буксования составила: 25,6 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 3,96°C;

- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 2,02 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 1,08 м/с².

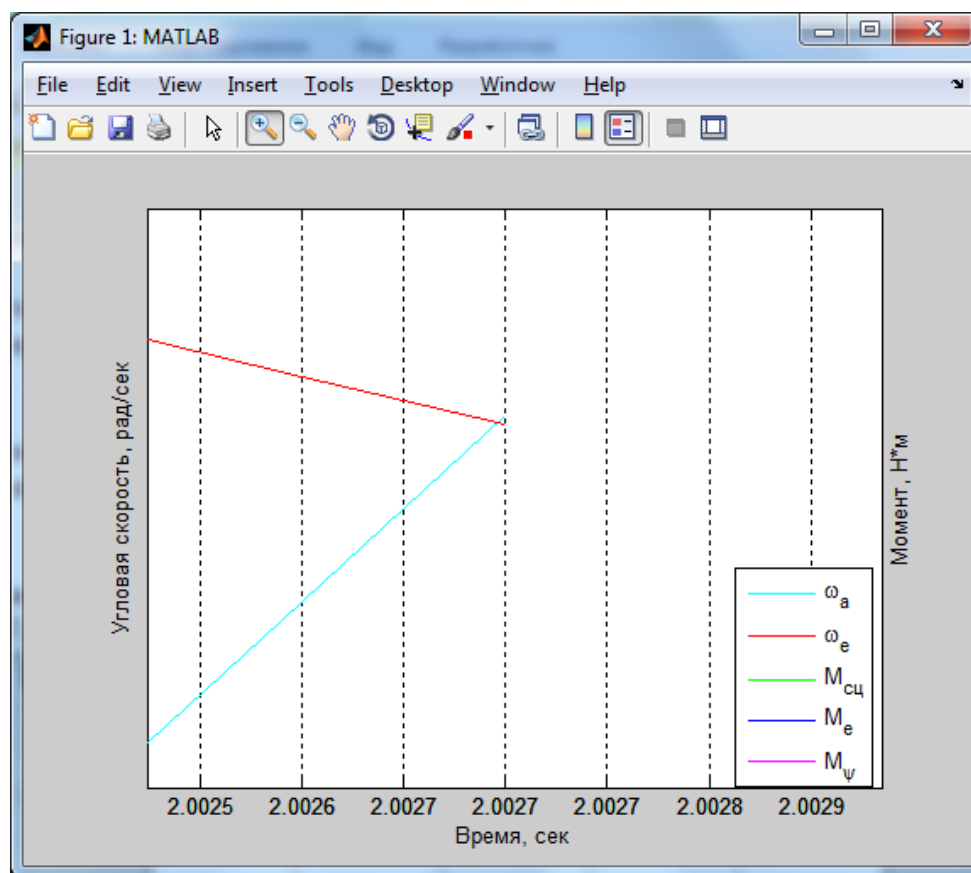


Рис. 13

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы: удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 501 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\phi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента ϕ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

Теперь рассмотрим случай, когда интенсивность подачи топлива выше интенсивности включения сцепления (рис. 14).

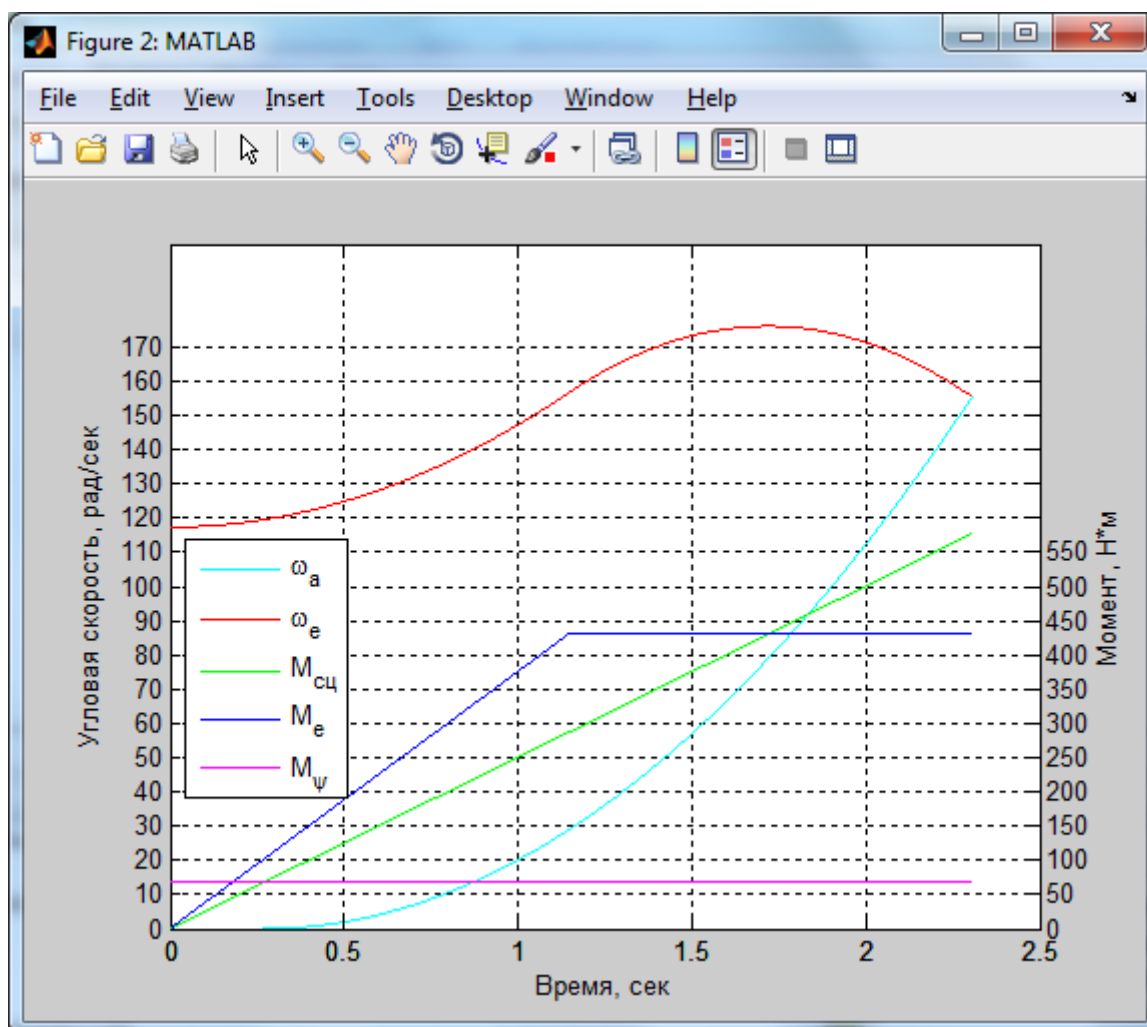


Рис. 14. График рабочего процесса при $K_2 = 1,5 \cdot K_1$

Анализ

Интенсивность увеличения подачи топлива выше, поэтому угловая скорость ведущих частей интенсивно возрастает, пока момент ДВС не достигнет своего максимума.

После этого интенсивность её возрастания снижается. Убывание угловой скорости ведущих частей сцепления начинается тогда, когда момент, передаваемый сцеплением, численно сравняется с моментом двигателя. Хотя и в этом случае момент, передаваемый сцеплением, не достигает своего максимума.

Время неупорядоченного разгона, по сравнению с предыдущим случаем, увеличилось и составило 2,3067 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 15):

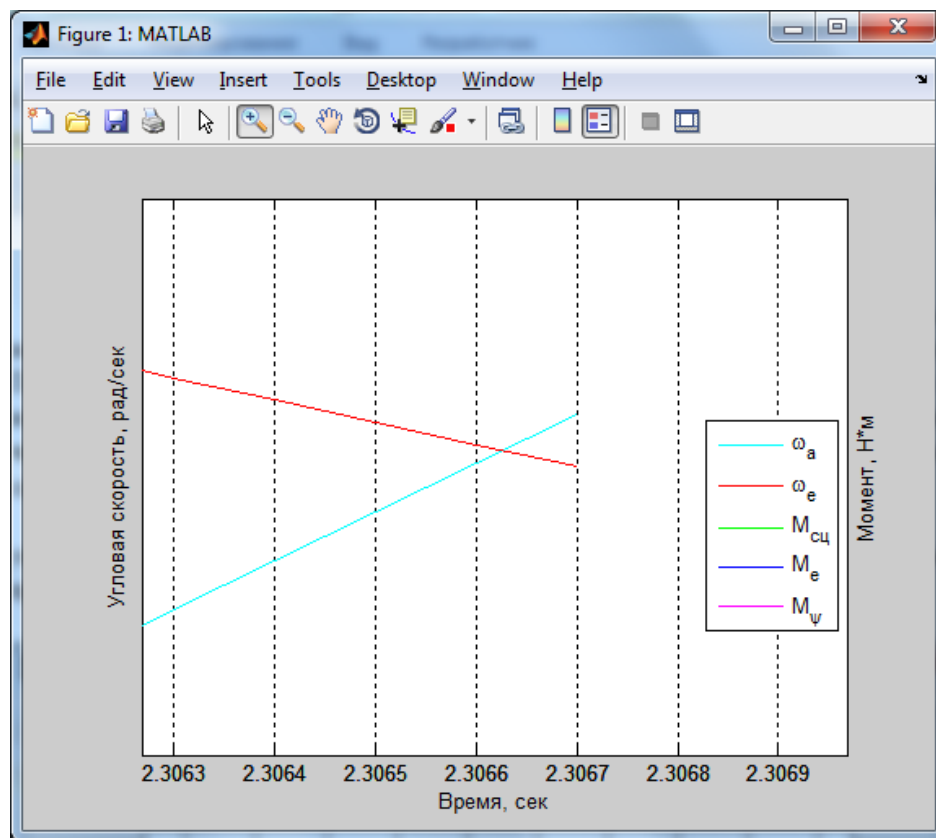


Рис. 15

Конечная угловая скорость также не изменилась – 155 рад/с. Угловая скорость холостого хода равна 46,5 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 59831 Дж;
- удельная работа буксования составила: 46,2 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 7,2°C;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 2,8 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 1,08 м/с².

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы (рис. 16, 17): удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 577 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\varphi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента φ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 16):

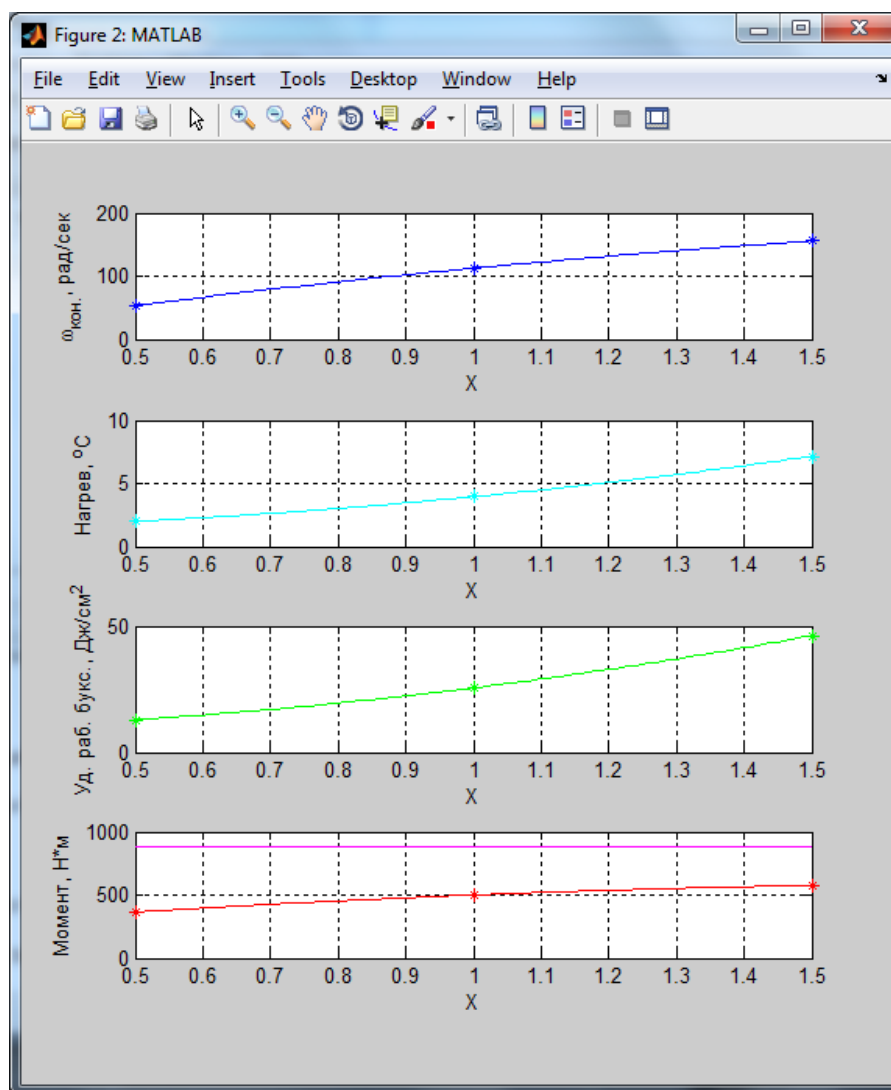


Рис. 16. Влияние соотношения интенсивности воздействия на педали подачи топлива и сцепления (X) на различные показатели для второго набора данных

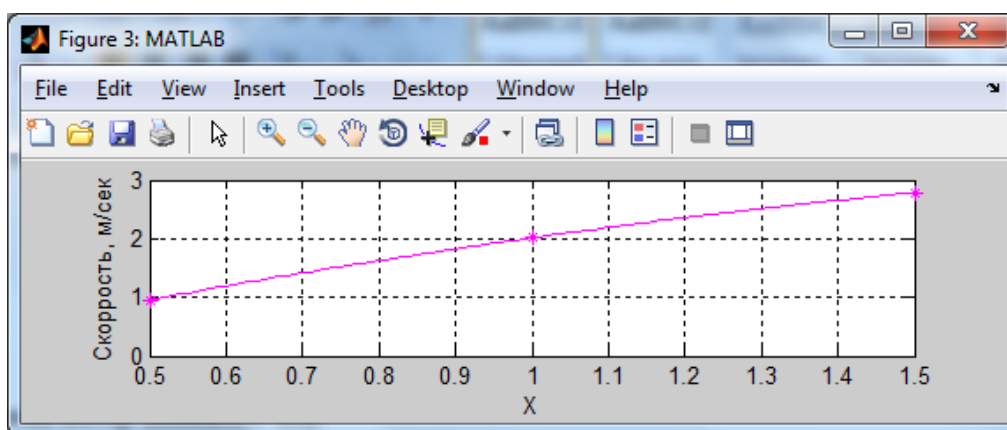


Рис. 17. Зависимость скорости автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона от соотношения интенсивности воздействия на педали подачи топлива и сцепления (X) для **второго набора данных**

Третий набор данных:

Таблица 3

Данные 3-го набора

G (вес)	M_{emax}	I_c	W_n	U_k	U_o	K_1	r	ψ	β	D	d	m	η (КПД)	Y
105000	420	1,3	320	4,1	6,5	700	0,49	0,035	1,9	34,2	18,6	10,5	0,9	0,5

$Y = 0,5$, следовательно, сцепление однодисковое.

Результаты расчётов

Максимальный момент, передаваемый сцеплением: 798 Н·м.

Момент сопротивлению движения: 75,1 Н·м.

Момент инерции, подведённый к ведомым частям сцепления: 3,8 Н·м.

Максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой: 978 Н·м.

Коэффициент ϕ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс составляет 0,347.

Начальная угловая скорость КВ ДВС: 159,7 рад/с.

Анализ (рис. 18)

Интенсивность включения сцепления выше, чем увеличения подачи топлива, поэтому угловая скорость ведущих частей сцепления сразу начинает убывать. Тот факт, что угловая скорость ведомых частей начинает возрастать не сразу, объясняется наличием момента

сопротивления движению, т.е. эта угловая скорость может возрастать лишь после того, как сцепление начнёт передавать больший по величине крутящий момент.

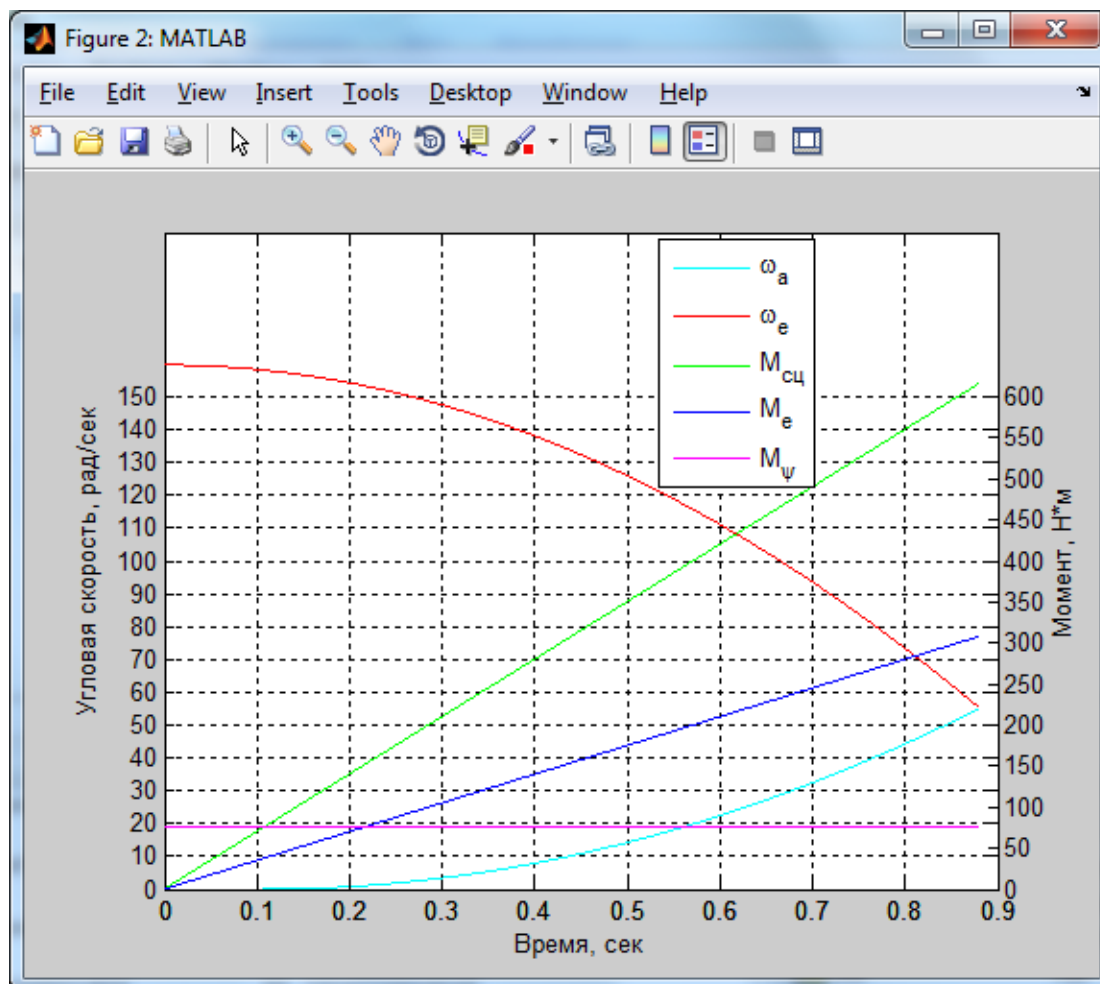


Рис. 18. График рабочего процесса при $K_2 = 0,5 \cdot K_1$
(K_2 – интенсивность воздействия на педаль подачи топлива)

Из графика видно, что ни момент ДВС, ни момент, передаваемый сцеплением, не успевают достичь своего максимума. Момент сопротивления движению остаётся постоянным (это одно из допущений при создании теории).

Неупорядоченный разгон (разгон с взаимным проскальзыванием ведущих и ведомых частей до выравнивания их угловых скоростей) длится 0,881 с (881,3 миллисекунды). Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 19):

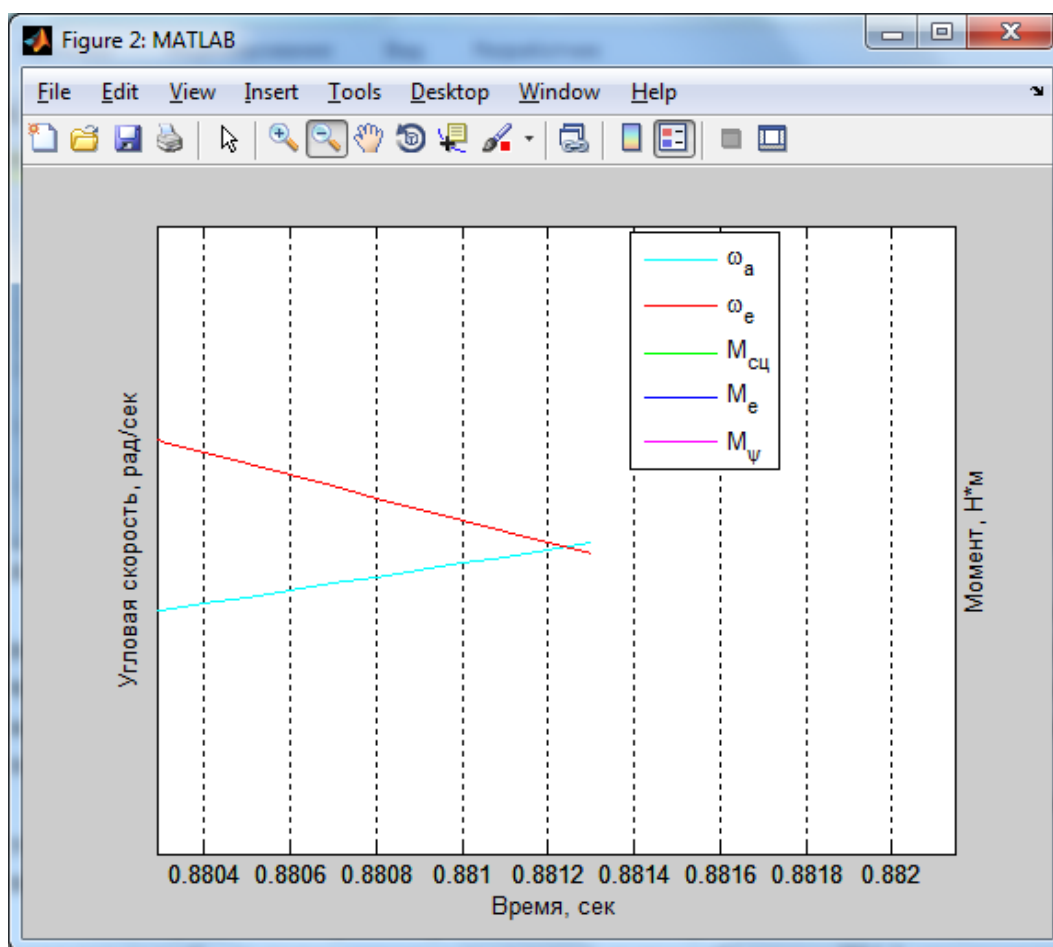


Рис. 19

Конечная угловая скорость составила 55,2 рад/с. После этого начинается упорядоченный разгон, при котором ведущие и ведомые части начинают вращаться как одно целое, без взаимного проскальзывания. Но именно во время проскальзывания происходит интенсивный нагрев элементов сцепления, в том числе фрикционных накладок, который заметно влияет на их долговечность. Поэтому в этой статье рассматривается именно неупорядоченный разгон.

Угловая скорость холостого хода равна 48 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 22350 Дж;
- удельная работа буксования составила: 17,3 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 2,2°С;

– скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 1,01 м/с;

– максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: $0,92 \text{ м/с}^2$.

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы: удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 616,9 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\varphi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента φ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

Рассмотрим следующий случай (рис. 20).

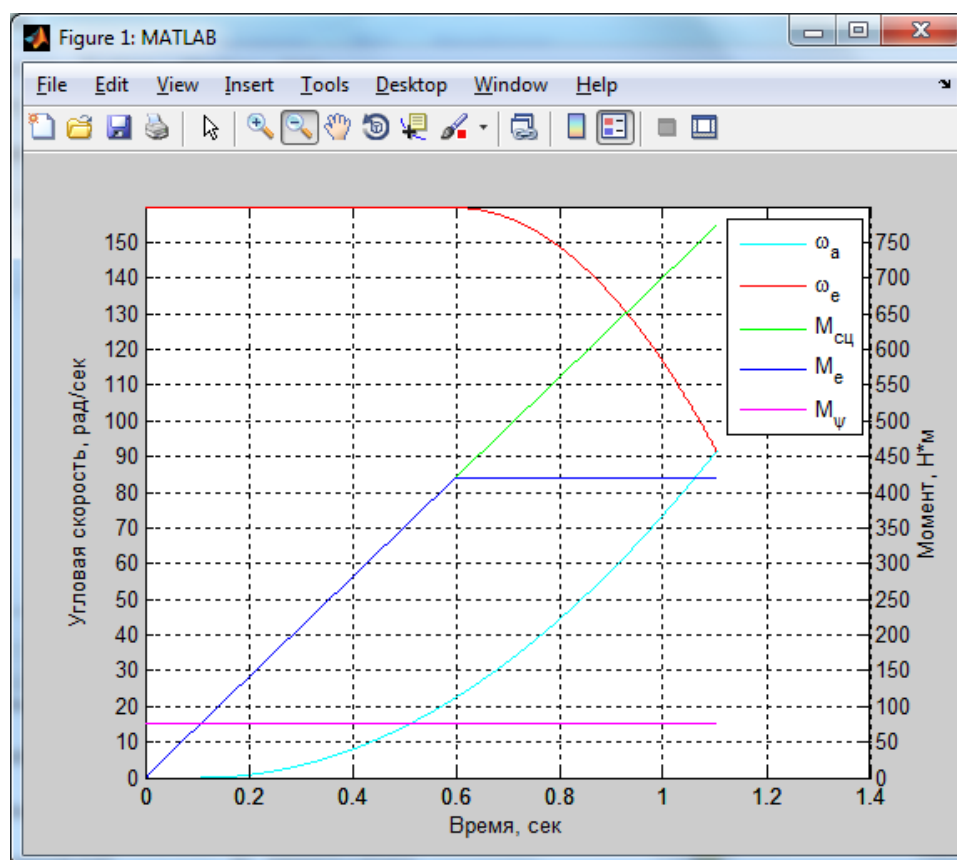


Рис. 20. График рабочего процесса при $K_2 = K_1$

Анализ

Интенсивность включения сцепления и увеличения подачи топлива равна, поэтому угловая скорость ведущих частей сцепления остаётся постоянной до достижения крутящим моментом ДВС своего максимума. По этой же причине момент ДВС и момент, передаваемый сцеплением, возрастают одинаково. Однако момент, передаваемый сцеплением, имеет больший максимум (из-за запаса сцепления), который не достигается за время неупорядоченного разгона. Тот факт, что момент, передаваемый сцеплением, продолжает возрастать, когда момент ДВС уже становится постоянным, объясняет то, что угловая скорость ведущих частей всё же начинает убывать, и именно в той точке, в которой момент ДВС достигает своего максимума!

Всё сказанное при рассмотрении предыдущего случая относительно угловой скорости ведомых частей и момента сопротивления движению относится и к рассматриваемому случаю.

Время неупорядоченного разгона, по сравнению с предыдущим случаем, увеличилось и составило 1,1036 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 21).

Конечная угловая скорость составила 91,42 рад/с. Угловая скорость холостого хода равна 48 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 42074 Дж;
- удельная работа буксования составила: 32,5 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 4,2°С;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 1,7 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 0,92 м/с².

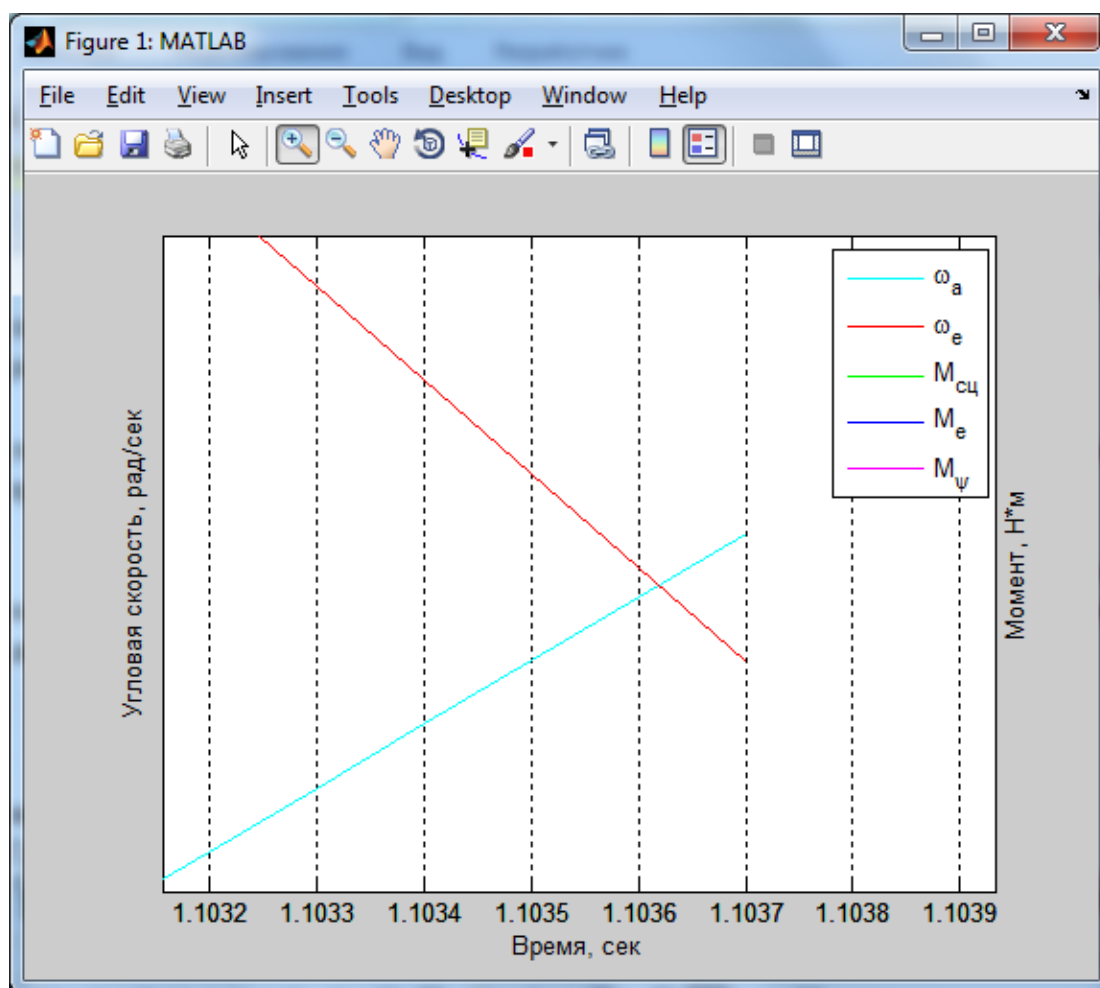


Рис. 21

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы: удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 773 Н·м, что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\phi_x = 0,7$. А это значит, что при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента ϕ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

Теперь рассмотрим случай, когда интенсивность подачи топлива выше интенсивности включения сцепления (рис. 22).

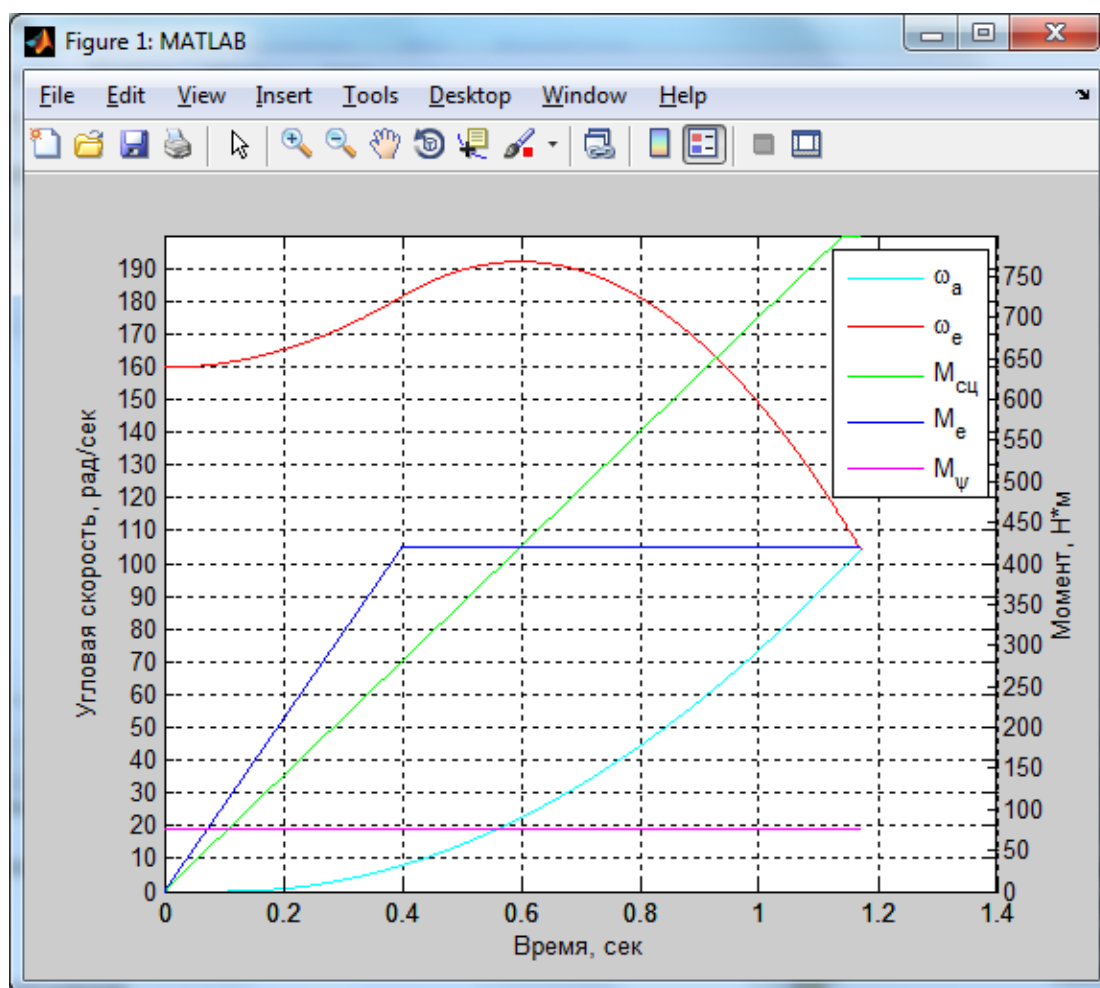


Рис. 22. График рабочего процесса при $K_2 = 1,5 \cdot K_1$

Анализ

Интенсивность увеличения подачи топлива выше, поэтому угловая скорость ведущих частей интенсивно возрастает, пока момент ДВС не достигнет своего максимума.

После этого интенсивность её возрастания снижается. Убывание угловой скорости ведущих частей сцепления начинается тогда, когда момент, передаваемый сцеплением, численно сравняется с моментом двигателя. В этом случае момент, передаваемый сцеплением, достигает своего максимума (через 1,14 с, рис. 23).

Время неупорядоченного разгона, по сравнению с предыдущим случаем, увеличилось и составило 1,1718 с. Это видно на увеличенном фрагменте графика, приведённом ниже (рис. 24).

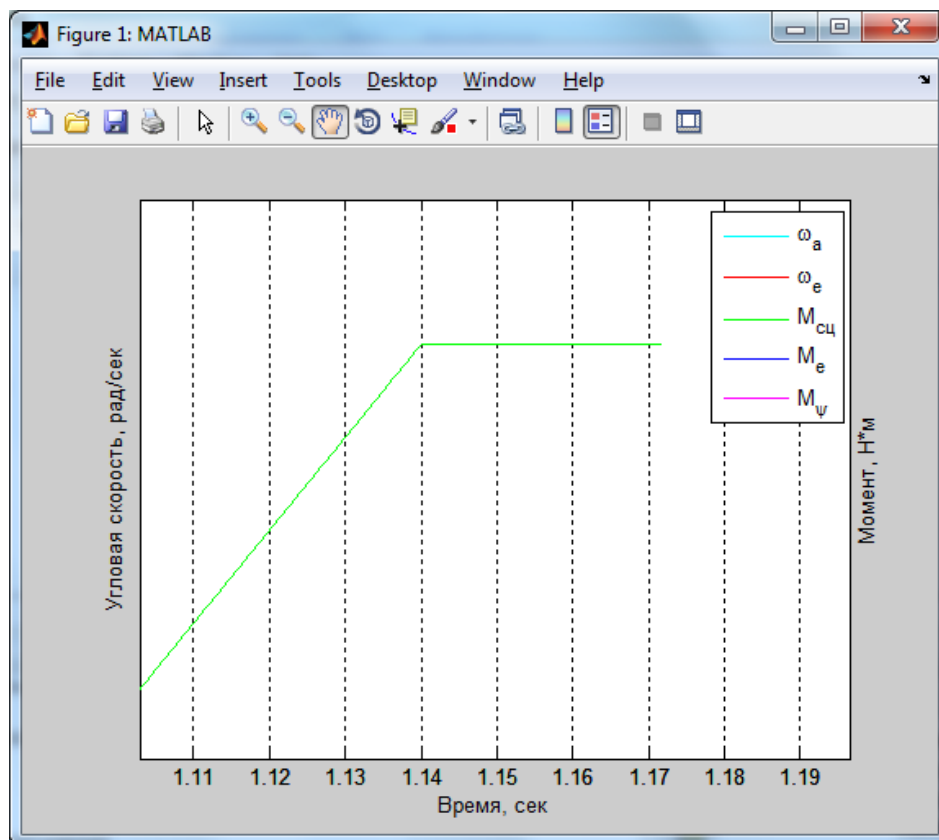


Рис. 23

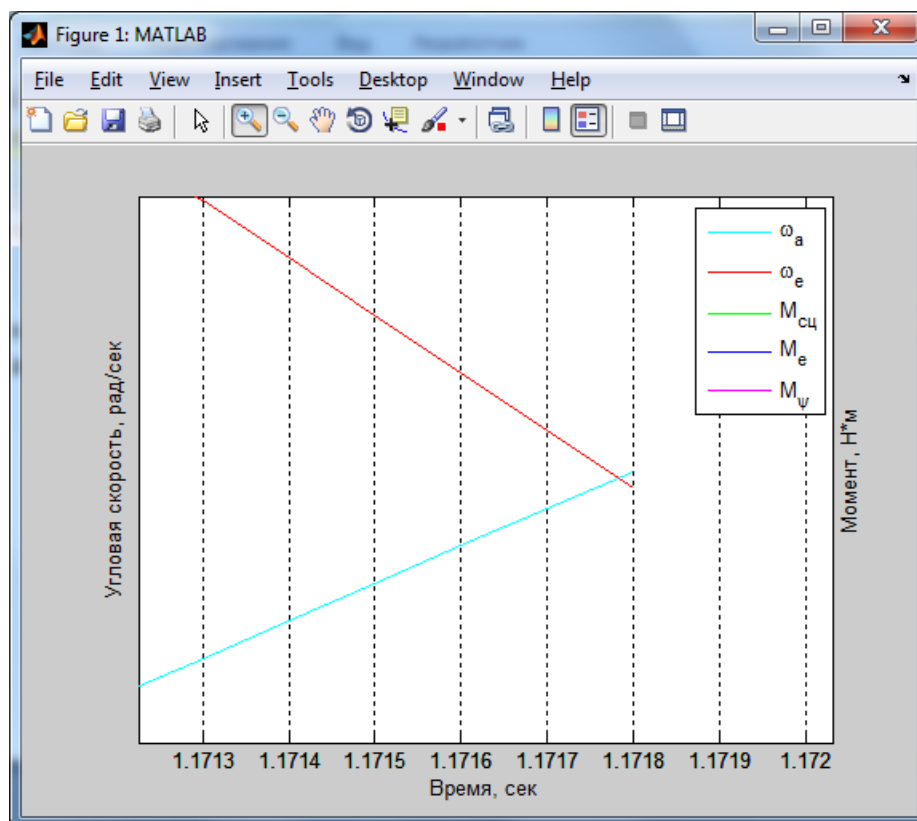


Рис. 24

Конечная угловая скорость составила 104,3 рад/с. Угловая скорость холостого хода равна 48 рад/с, что меньше, чем конечная угловая скорость, значит, двигатель не заглохнет.

В рассматриваемом случае:

- суммарная работа буксования составила: 55289 Дж;
- удельная работа буксования составила: 42,7 Дж/см²;
- нагрев нажимного диска за включение: 5,5°C;
- скорость автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона: 1,92 м/с;
- максимальное ускорение автомобиля в процессе включения сцепления: 0,92 м/с².

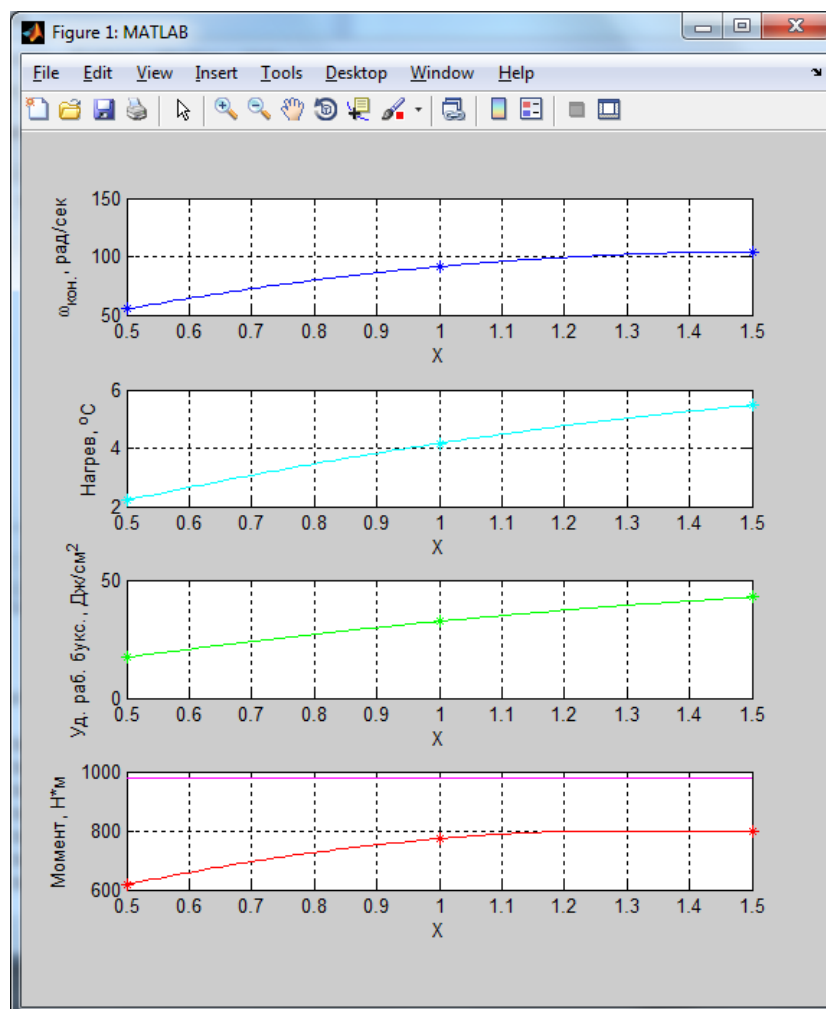


Рис. 25. Влияние соотношения интенсивности воздействия на педали подачи топлива и сцепления (X) на различные показатели для третьего набора данных

Из приведённых выше результатов можно сделать следующие выводы (рис. 25): удельная работа буксования и нагрев нажимного диска не превышают допустимых норм. Ускорение автомобиля не вызовет дискомфорта у пассажиров. Максимальный момент, передаваемый сцеплением, 798 Н·м (максимальный, передаваемый сцеплением), что меньше, чем максимальный момент, допустимый по сцеплению колёс с дорогой при значении коэффициента $\varphi_x = 0,7$. То есть при трогании автомобиля ведущие колёса пробуксовывать не будут; что также подтверждается расчётом коэффициента φ_x , при котором начнётся пробуксовка ведущих колёс.

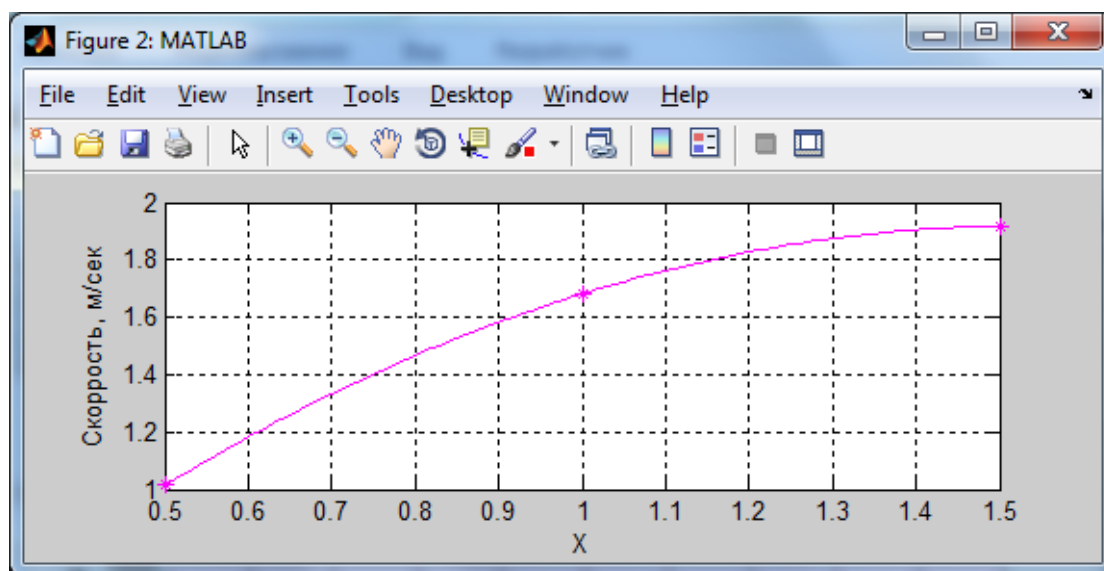


Рис. 26. Зависимость скорости автомобиля на момент окончания неупорядоченного разгона от соотношения интенсивности воздействия на педали подачи топлива и сцепления (X) для **третьего набора данных**

Выводы. Сравнительный анализ

Воздействовать на педаль подачи топлива более интенсивно, чем на педаль сцепления, на этапе неупорядоченного разгона нецелесообразно – прирост скорости небольшой, а вот увеличение удельной работы буксования и нагрева весьма значительны. Менее интенсивное воздействие на педаль подачи топлива (по сравнению

с интенсивностью воздействия на педаль сцепления) также имеет ощутимые недостатки – угловая скорость коленчатого вала ДВС сильно снижается в процессе неупорядоченного разгона, что чревато его заглоханием. Компромиссным является одинаковое по интенсивности воздействие на педали.

Также стоит отметить, что на нагрев и удельную работу буксования (факторы, сильно влияющие на износ фрикционных накладок) ощутимо влияет не только соотношение интенсивности воздействия на педали, но и время буксования (неупорядоченного разгона). По этой причине плавное воздействие на педали также приводит к увеличению нагрева и удельной работы.

Из расчётных формул очевидно (из-за сходства входных данных это не видно по результатам расчётов), что факторы, ощутимо влияющие на износ, зависят также и от конструктивных особенностей сцепления: удельная работа буксования зависит от площади накладок, а нагрев нажимного диска – от его массы. Оба эти фактора зависят также от количества дисков сцепления.

Главные преимущества программного модуля MATLAB, выявленные в этой работе:

1. Высокая точность расчета работы буксования по сравнению с традиционным методом разбиения функции на ограниченное число участков.
2. Возможность выбора оптимального значения скорости включения сцепления с одновременным учетом двух параметров.

Список литературы

1. Автомобили. Конструкция и рабочие процессы / А.М. Иванов, А.Н. Солнцев, В.И. Осипов [и др.]. – М.: Академия, 2012. – 384 с.
2. URL: <https://www.mathworks.com> (дата обращения: 10.05.2017).

3. Осипов, В.И. Методические указания к расчетным работам по теме «Рабочие процессы и расчеты агрегатов автомобиля».

В 5 ч. Ч. 2. Трансмиссия / В.И. Осипов, М.С. Камитов, И.А. Карпов. – М.: МАДИ, 2015. – 88 с.

4. Дьяконов, В.П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.

References

1. Ivanov A.M., Solncev A.N., Osipov V.I. *Avtomobili. Konstrukcija i rabochie processy* (Cars. Design and workflows), Moscow, Akademija, 2012, 384 p.

2. URL: <https://www.mathworks.com>

3. Osipov V.I., Kamitov M.S., Karpov I.A. *Metodicheskie ukazanija k raschetnym rabotam po teme «Rabochie processy i raschety agregatov avtomobilja», Transmissija* (Guidelines for design work on the theme of "Workflows and calculations units of the car", Transmission), Moscow, MADI, 2015, 88 p.

4. D'jakonov V.P. *MATLAB 7.*/R2006/R2007* (MATLAB 7.*/R2006/R2007), Moscow, DMK Press, 2008, 768 p.