

УДК 62-83-52: 621.3
КП
№ госрегистрации 0105U009179
Инв. №

Министерство образования и науки Украины
Сумский государственный университет
(СумГУ)
40007, г.Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2; тел. (0542) 33 34 58;
факс 60 44 78

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
д-р физ.-мат. наук, проф.

А.Н.Черноус

2009.06.15

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
Объектно-ориентированные системы управления процессами
движения технологических машин
РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ
(заключительный)

Начальник НИЧ
канд. техн. наук, доцент

В.А.Осипов

Руководитель НИР
зав. кафедрой Компьютеризованных
систем управления
канд. техн. наук, доцент

В.Д.Червяков

2009

Этот отчет подготовлен как часть работы, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

СПИСОК АВТОРОВ

Руководитель НИР зав. кафедрой Компьютеризованных систем управления канд. техн. наук, доцент	В.Д.Червяков (реферат, введение, выводы, рекомендации, разд. 1)
Ответственный исполнитель ст. преподаватель	А.А.Паныч (разд. 2, разд. 3, приложение А)
Студент	А.М.Щекотов (разд. 1)
Студент	А.А.Доброжан (разд. 2, приложение А)

РЕФЕРАТ

Отчет о НИР (заключительный): 55 с., 5 рис., 1 приложение, 17 источников.

Объект исследования – методология концептуального проектирования и методы синтеза систем управления процессами движения рабочих органов технологических машин широкого применения.

Цель работы – повышение экономической эффективности систем управления несущими органами летучих пил возвратно-поступательного движения на этапах их разработки и эксплуатации.

Методы исследования – методы теории автоматизированного электропривода, математическое моделирование.

Летучие механизмы имеют циклический режим работы, причем их рабочий цикл характеризуется большой ресурсоемкостью. Наибольшей ее составляющей является энергопотребление приводов несущих органов, с помощью которых формируются законы движения последних. В работе получены выражения для определения оптимальной величины рывка в приводе несущего органа. Определены ключевые относительно влияния на качество работы летучей пилы параметры, которые применяются в математическом описании процессов управления приводом несущего органа. Получены формулы, по которым предложено выбирать оптимальную величину рывка в приводе несущего органа летучей пилы. Предложен общий алгоритм управления приводом несущего органа. Он позволяет объединить методы определения оптимальных параметров рабочих циклов летучей пилы в целенаправленную процедуру формирования закона движения несущего органа. Данный алгоритм, может служить базой для построения программного обеспечения системы управления летучей пилы. Разработана математическая модель системы управления электроприводом несущего органа летучей пилы, которая может служить инструментом для анализа качества процессов управления, использоваться в практике проектирования и исследований. Модульное построение модели обеспечивает возможности свободного исследования различных законов управления и применения различных моделей механической части несущего органа и обрабатываемого изделия и их приводов. Структура предложенной модели может служить базой при построении моделей для исследования систем управления других механизмов со сложными алгоритмами работы и их приводов. Работоспособность предложенных законов управления подтверждается моделированием серии рабочих циклов летучей пилы.

Полученные результаты в их совокупности позволяют снизить ресурсоемкость систем управления несущих органов летучих пил на этапах их проектирования и эксплуатации, а также могут применяться в системах автоматического управления электроприводами механизмов передвижения технологических машин и многих других для снижения энергоемкости технологических процессов.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЛЕТУЧАЯ ПИЛА, МОДЕЛЬ, ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОПТИМАЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ СКОРОСТИ В ПРИВОДЕ НЕСУЩЕГО ОРГАНА	9
2 ОБЩИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ НЕСУЩЕГО ОРГАНА	15
3 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ НЕСУЩЕГО ОРГАНА	19
ВЫВОДЫ	24
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	25
Приложение А Рабочий лист MapleVR4 расчета параметров движения несущего органа летучей пилы с учетом ограничения второй производной скорости.....	27

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

Основные сокращения:

ЛП	– летучая пила
НО	– несущий орган
ОИ	– обрабатываемое изделие
СУ	– система управления
СУЛП	– система управления летучей пилой
ЭМС	– электромеханическая система

Основные обозначения:

τ	– время в относительных единицах
α	– путь перемещения несущего органа в относительных единицах
$\dot{\nu}$	– ускорение несущего органа в относительных единицах
$\dot{\mu}_{\text{зад}}$	– заданное значение рывка в приводе несущего органа в относительных единицах
μ_0	– момент сопротивления в относительных единицах
$\Delta L_{\text{м}}$	– допустимое отклонение мерной длины отрезков профиля, м
F_2	– сила, действующая на несущий орган летучей пилы со стороны привода, Н
$F_{2\delta}$	– значение силы, соответствующее выборке зазоров (окончание первого этапа рабочего цикла летучей пилы), Н
$F_{2\text{нат}}$	– усилие взаимодействия несущего органа летучей пилы с обрабатываемым изделием (четвертый этап рабочего цикла), Н
i и ν	– ток якоря и скорость вращения вала двигателя привода несущего органа в относительных единицах

I и Φ	– ток якоря, А и магнитный поток, Вб двигателя привода несущего органа
i_p	– ток двигателя при разгоне несущего органа в относительных единицах
l_0	– значение координаты начального положения несущего органа летучей пилы (по окончании пятого этапа рабочего цикла), м
l_1	– координата положения опорной точки (плоскости) обрабатываемого изделия (текущая координата положения сечения реза), м
l_2	– координата положения опорной точки (плоскости) несущего органа, м
L_m	– заданная длина отрезков, на которые необходимо порезать профиль (мерная длина), м
Q	– суммарный расход электроэнергии в приводе несущего органа за время рабочего цикла (количество тепла, выделившееся в цепи якоря электродвигателя), Дж
Q_i	– расход электроэнергии в приводе несущего органа на i -м этапе рабочего цикла, Дж
t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5	– момент времени, соответствующий началу первого, второго, третьего, четвертого и пятого этапов рабочего цикла соответственно, с
V_1	– скорость движения обрабатываемого изделия (скорость движения профиля), м/с
V_2	– скорость движения несущего органа, м/с
M_2	– момент, развиваемый приводом несущего органа летучей пилы, Н·м

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики конкурентная борьба за потребителей требует от производителей постоянного повышения качества продукции, максимального удовлетворения требований заказчиков. Объективная реальность, характеризуемая этими обстоятельствами, обуславливает актуальность научно-технической проблемы ресурсосбережения на всех этапах жизненного цикла технологических объектов [1, 2]. Системы управления технологических объектов в значительной мере определяют ресурсоемкость последних и качество выпускаемой продукции, поэтому непреходяще актуальными являются задачи совершенствования методологии разработки систем управления и методов синтеза последних, обеспечивающих минимизацию ресурсозатрат на таких этапах их жизненного цикла, как проектирование и эксплуатация. На первом из указанных этапов задача ресурсосбережения решается путем сокращения временных и финансовых затрат на разработку (проектирование) изделия, в нашем случае – систем управления технологическими объектами. На этапе эксплуатации ресурсосбережение рассматривается в аспектах минимизации энергозатрат в процессе функционирования автоматизированного технологического объекта, минимизации потерь от выпуска некондиционной продукции и возникновения аварийных ситуаций. Особую актуальность проблема ресурсосбережения имеет по отношению к технологическим объектам широкого применения, образующим классы с большим количеством экземпляров).

В [3] выбран **объект исследования** "Методология концептуального проектирования и методы синтеза систем управления процессами движения рабочих органов технологических машин широкого применения", рассмотрен один из видов технологических объектов широкого применения – несущие органы летучих пил, относящихся к классу летучих механизмов [4], и определены **цели** работы, заключающиеся в повышении экономической эффективности систем управления несущими органами летучих пил возвратно-поступательного движения на этапах их разработки и эксплуатации.

Летучие механизмы имеют циклический режим работы, причем их рабочий цикл характеризуется большой ресурсоемкостью. Наибольшей ее составляющей является энергопотребление приводов несущих органов, с помощью которых формируются законы движения последних. Снижение энергоемкости приводов технологических машин циклического действия является актуальной задачей. Второй составляющей ресурсоемкости являются потери от выпуска некондиционной продукции и возникновения аварийных ситуаций (например, при поломках конструктивных элементов технологической машины). Перечисленные составляющие ресурсоемкости летучих механизмов имеют место на одном из этапов их жизненного цикла, а именно – во время эксплуатации. В свете сказанного закономерно актуальной является научно-техническая проблема снижения ресурсоемкости приводов несущих органов летучих механизмов на данном этапе. Указанная проблема решается путем совершенствования процессов управления рабочими органами летучих механизмов и улучшения за счет этого экономических показателей их функционирования.

В соответствии с выбранным предметом исследования общей **задачей работы** определена разработка метода синтеза объектно-ориентированной системы управления несущим органом летучей пилы, методов и алгоритмов ресурсосберегающего управления процессами его движения [3].

Одной из частных задач исследования является разработка алгоритма ресурсосберегающего управления приводом несущего органа летучей пилы, отвечающего принципам объектно-ориентированной технологии создания объектов новой техники. Результатом решения этой задачи должен быть алгоритм, предусматривающий минимизацию энергозатрат в приводе несущего органа летучей пилы при соблюдении требуемой точности мерного пореза длинномерного материала и ограничения по силовому взаимодействию несущего органа летучей пилы с обрабатываемым изделием. Решению этой задачи посвящен данный этап работы.

1 ОПТИМАЛЬНАЯ ВЕЛИЧИНА ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ СКОРОСТИ В ПРИВОДЕ НЕСУЩЕГО ОРГАНА

Объективные свойства реальных двигателей и преобразователей, прочностные характеристики механических передач накладывают ограничения на максимально достижимое и допустимое значения рывка в приводе НО ЛП. Ограничение рывка позволяет повысить надежность и срок службы оборудования ЛП вследствие уменьшения динамических нагрузок в приводе [5], позволяет повысить управляемость процесса движения НО и точность прогнозирования временных интервалов рабочего цикла ЛП [6]. Это необходимо для выполнения требований по точности мерного пореза, представленных в задаче ресурсосберегающего управления приводом НО [7]. Однако, ограничение рывка приводит к увеличению длительности переходных процессов и пути перемещения НО. В связи с этим необходимо выполнить оптимизацию величины рывка в приводе НО, которая сводится к задаче выбора его наименьшего значения, при котором не происходит существенного увеличения длительности пускотормозных режимов и пути перемещения НО. Сформулировать и решить такую задачу позволяют аналитические выражения для определения длительности участков диаграмм переходных процессов привода НО и рабочего цикла ЛП в целом с учетом рывка, представленные в [7].

Из множества временных и пространственных параметров, которые применяются в математическом описании процессов управления приводом НО, определим такие, которые являются критическими с точки зрения влияния на качество работы ЛП.

Точность мерного пореза непосредственно зависит от алгоритмов управления приводом НО на третьем этапе рабочего цикла ЛП, когда производится запуск привода НО в направлении движения ОИ, который завершается синхронизацией скоростей линейного перемещения соответственно ОИ и НО и совпадением координат сечения реза на ОИ и плоскости пильного диска. Момент запуска НО идентифицируется по значению $\alpha_{ОИ}^*$ координаты положения сечения реза на ОИ.

Согласно [7] $\alpha_{\text{ОИ}}^* = \alpha_c - v_{\text{ОИ}} \Delta \tau_{\text{в}}$, где $\alpha_c = \alpha_{\text{н}} + \Delta \alpha_{\text{в}}$. В приведенных выражениях зависимыми от заданного значения рывка $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ являются продолжительность третьего этапа $\Delta \tau_{\text{в}}$ и путь перемещения НО во время этого этапа $\Delta \alpha_{\text{в}}$. С ограничением на допустимое крайнее положение НО, которое входит в задачу ресурсосберегающего управления приводом НО, связано значение $\alpha_{\text{к}}$ контролируемой координаты, которая характеризует положение НО в начальный момент разгона в обратном направлении. С ограничением на длительность рабочего цикла ЛП связано значение $\tau_{\text{д}}$ общего прогнозируемого времени движения НО.

Таким образом, для выбора оптимального значения рывка целесообразно использовать формулы [7] для определения $\Delta \alpha_{\text{в}}$, $\Delta \tau_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$. В эти формулы величина $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ входит в виде множителей $\frac{1}{\dot{\mu}_{\text{зад}}}$, а в формулы для $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$, кроме того, величина $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ входит в виде множителей $\frac{1}{\dot{\mu}_{\text{зад}}^2}$. Указанные зависимости $\Delta \alpha_{\text{в}}$, $\Delta \tau_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$ от $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ приводят к тому, что соответствующие величины уменьшаются при увеличении $\dot{\mu}_{\text{зад}}$. Другими словами, для уменьшения влияния рывка на процессы в приводе НО необходимо увеличивать его величину $\dot{\mu}_{\text{зад}}$. Однако, величину $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ по техническим причинам нельзя увеличивать неограниченно. Кроме того, из-за обратно-пропорциональной зависимости соответствующих параметров от $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ и $\dot{\mu}_{\text{зад}}^2$ можно найти такую граничную величину рывка $\dot{\mu}_{\text{зад}}$, при существенном увеличении которой уже не происходит заметного уменьшения величин $\Delta \alpha_{\text{в}}$, $\Delta \tau_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$.

Введем общее обозначение выражений для определения $\Delta \alpha_{\text{в}}$, $\Delta \tau_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$ в виде функции $f(v_{\text{ОИ}}, \dots, \dot{v}_{\text{зад.в}}, \dots, \dot{\mu}_{\text{зад}})$. Поставим задачу определения такой величины рывка $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$, при увеличении которой в k раз соответствующее значение $f(v_{\text{ОИ}}, \dots, \dot{v}_{\text{зад.в}}, \dots, \dot{\mu}_{\text{зад}})$ изменяется в $(1-r)$ раз ($r < 1$). Иначе говоря, необходимо найти такое $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$, которое удовлетворяет уравнению

$$f(v_{\text{ОИ}}, \dots, \dot{v}_{\text{зад.в}}, \dots, k \cdot \dot{\mu}_{\text{зад}}^*) / f(v_{\text{ОИ}}, \dots, \dot{v}_{\text{зад.в}}, \dots, \dot{\mu}_{\text{зад}}^*) = 1 - r. \quad (1.1)$$

В соответствии с уравнением (1.1) найдены (см. прил. А) выражения для расчета значений $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$, которые соответствуют параметрам $\Delta\alpha_{\text{в}}$, $\Delta\tau_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$. Для автоматизации работы с математическими выражениями использован пакет MapleVR4, соответствующий рабочий лист которого приведен в приложении А. Получены формулы для определения величины рывка $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$ при $k=10$ и $r=0,05$. При увеличении вычисленной в соответствии с этими формулами величины $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$ в 10 раз (на 1000 %) значение соответствующего параметра (или $\Delta\alpha_{\text{в}}$, или $\Delta\tau_{\text{в}}$, или $\alpha_{\text{к}}$, или $\tau_{\text{д}}$) изменяется в 0,95 раз, т.е. уменьшается на 5 %.

Для варианта значений $\mu_0=0,1$; $v_{\text{ОИ}}=0,8$; $\mu_{\text{нач}}=0,05$; $\dot{v}_{\text{зад.в}}=1$; $v_{\text{обр}}=0,8$; $\dot{v}_{\text{зад.н}}=0,8$; $\alpha_{\text{н}}=0,1$; $\Delta\tau_{\text{п}}=5$ рассчитаны величины $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$: для $\Delta\alpha_{\text{в}}$ величина $\dot{\mu}_{\text{зад}}^* = 21$, для $\Delta\tau_{\text{в}}$ – $\dot{\mu}_{\text{зад}}^* = 22$, для $\alpha_{\text{к}}$ – $\dot{\mu}_{\text{зад}}^* = 3$, для $\tau_{\text{д}}$ – $\dot{\mu}_{\text{зад}}^* = 5$. Таким образом, тот же самый эффект влияния рывка на процессы в приводе НО ЛП для параметров $\Delta\alpha_{\text{в}}$ и $\Delta\tau_{\text{в}}$ достигается при наибольших значениях $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$ ($\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$ равно 21 и 22 соответственно). Это обстоятельство объясняется тем, что параметры $\Delta\alpha_{\text{в}}$ и $\Delta\tau_{\text{в}}$ относятся к третьему этапу рабочего цикла НО, который представляет собой переходной процесс. При относительно небольшой общей продолжительности данного этапа при его исполнении два раза происходит изменение ускорения НО согласно заданному значению $\dot{\mu}_{\text{зад}}$. Параметры $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$, наоборот, связаны с процессами, которые имеют достаточно большую продолжительность, преимущественно благодаря достаточно продолжительным участкам движения с постоянной скоростью на четвертом и пятом этапах, при относительно кратковременных участках движения с заданным $\dot{\mu}_{\text{зад}}$. Таким образом, заданный рывок $\dot{\mu}_{\text{зад}}$ в приводе НО ЛП имеет относительно большое влияние на параметры $\Delta\alpha_{\text{в}}$ и $\Delta\tau_{\text{в}}$ сравнительно с влиянием на $\alpha_{\text{к}}$ и $\tau_{\text{д}}$.

Таким образом, выбор наименьшего значения рывка $\dot{\mu}_{\text{зад}}^*$ (с учетом возможностей привода НО) целесообразно производить по формулам, полученным

по (1.1), которые соответствуют параметрам $\Delta\alpha_v$ и $\Delta\tau_v$. При необходимости полученное значение $\dot{\mu}_{зад}^*$ следует уменьшить до допустимого для применяемого привода НО. Отметим, что при расчетах граничных рывков, которые соответствуют параметрам $\Delta\alpha_v$ и $\Delta\tau_v$, получены достаточно малые величины $\dot{\mu}_{зад}^*$. С учетом типовых характеристик распространенных приводов НО ЛП это обеспечивает достаточно большой запас для возможного уменьшения величины $\dot{\mu}_{зад}^*$.

Величина $\dot{\mu}_{зад}^*$ по условию ее влияния на $\Delta\alpha_v$ рассчитывается по формуле

$$\dot{\mu}_{зад}^* = \frac{\dot{v}_{зад.в}^2 (k-1-rk)}{rk v_{ОИ}}. \quad (1.2)$$

При $k=10$ и $r=0,05$ получим

$$\dot{\mu}_{зад}^* = 17 \frac{\dot{v}_{зад.в}^2}{v_{ОИ}}. \quad (1.3)$$

Величина $\dot{\mu}_{зад}^*$ по условию ее влияния на $\Delta\tau_v$ рассчитывается по формуле

$$\dot{\mu}_{зад}^* = \dot{v}_{зад.в} (\mu_0 - \mu_{нач} - \dot{v}_{зад.в} + k(\mu_0 - \mu_{нач} + \dot{v}_{зад.в}) - rk(\mu_0 - \mu_{нач} + \dot{v}_{зад.в})) / rk v_{ОИ}. \quad (1.4)$$

При $k=10$ и $r=0,05$ получим

$$\dot{\mu}_{зад}^* = 17 \frac{\dot{v}_{зад.в} (\mu_0 - \mu_{нач} + \dot{v}_{зад.в})}{v_{ОИ}}. \quad (1.5)$$

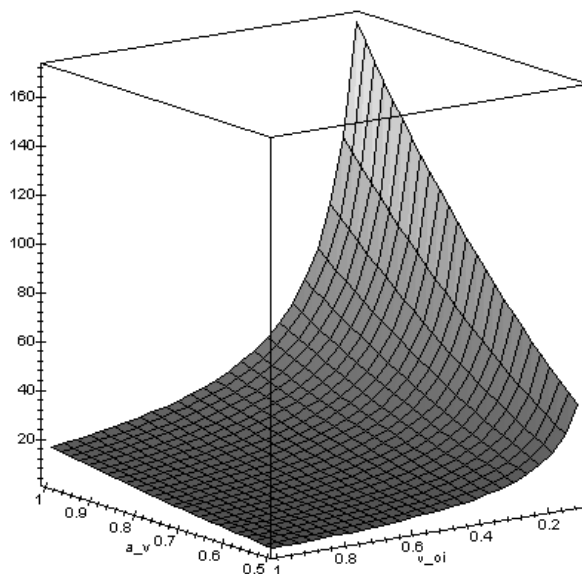


Рисунок 1.1 – График зависимости $\dot{\mu}_{зад}^*(\dot{v}_{зад.в}, v_{ои})$

На рис. 1.1 в соответствии с (1.3) построен график зависимости $\dot{\mu}_{зад}^*(\dot{v}_{зад.в}, v_{ои})$, $\dot{v}_{зад.в}$ меняется от 0,5 до 1, $v_{ои}$ – от 0,1 до 1. Из рисунка видно, что в соответствии с (1.3) величина $\dot{\mu}_{зад}^*$ уменьшается при увеличении $v_{ои}$ и уменьшении $\dot{v}_{зад.в}$. Это объясняется уменьшением относительной части участков движения с заданным $\dot{\mu}_{зад}$ за счет увеличения общей продолжительности разгона и соответствующего пути перемещения (с увеличением скорости $v_{ои}$ или с уменьшением ускорения $\dot{v}_{зад.в}$).

В результате проведенного исследования определены ключевые относительно влияния на качество работы ЛП параметры, которые применяются в математическом описании процессов управления приводом НО. Это продолжительность $\Delta\tau_v$ третьего этапа и соответствующий путь $\Delta\alpha_v$ перемещения НО, значение α_k контролируемой координаты, характеризующей положение НО в начальный момент разгона в обратном направлении, и общее прогнозируемое время τ_d движения НО. Установлено, что указанные параметры обратно пропорционально зависят от $\dot{\mu}_{зад}$ и $\dot{\mu}_{зад}^2$, что позволяет найти оптимальную величину рывка $\dot{\mu}_{зад}^*$, при

существенном увеличении которой уже не происходит заметного уменьшения величин $\Delta\alpha_v$, $\Delta\tau_v$, α_k и τ_d . В общем виде поставлена задача (1.1) нахождения такой величины рывка $\dot{\mu}_{зад}^*$, при увеличении которой в k раз значение соответствующего параметра изменяется в $(1-r)$ раз ($r < 1$). В соответствии с (1.1) получены формулы для расчета значений $\dot{\mu}_{зад}^*$ для параметров $\Delta\alpha_v$, $\Delta\tau_v$, α_k и τ_d . Из них отдельно выделены формулы (1.2) и (1.4), которые соответствуют параметрам $\Delta\alpha_v$ и $\Delta\tau_v$, для которых значение $\dot{\mu}_{зад}^*$ наибольшее. По этим формулам предлагается выбирать оптимальную величину $\dot{\mu}_{зад}^*$ рывка в приводе НО ЛП. Если рассчитанное $\dot{\mu}_{зад}^*$ превышает значение, допустимое по механической прочности или электродинамическим параметрам двигателя (коммутации), следует ограничить значение рывка $\dot{\mu}_{зад}$ допустимым значением. Результаты исследования опубликованы в [8].

2 ОБЩИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ НЕСУЩЕГО ОРГАНА

В [7] и в разд.1 сформулирована задача ресурсосберегающего управления приводом НО в виде задачи оптимизации, предложена методика выбора параметров технически оптимального закона движения НО, получены аналитические выражения для нахождения длительности участков диаграмм переходных процессов привода НО с регламентированным значением рывка и выражения для определения оптимального значения рывка в приводе НО. Указанные материалы позволяют сформировать закон движения НО ЛП, удовлетворяющий требованиям энерго- и ресурсоэффективности.

В соответствии с [9, 10] в структуре системы управления летучей пилой можно выделить пять укрупненных функциональных блоков: систему управления технологической линией, систему управления мерным порезом, пульт управления, комплекс локальных систем управления приводами НО и других исполнительных механизмов, набор информационных устройств. Наиболее сложной в функциональном отношении является система управления приводом НО, что следует из технологических требований к его движению. Общий алгоритм работы системы управления ЛП подразумевает наличие трех режимов: "Ожидание", "Ввод начальных условий" и "Автомат". Процедуры автоматического мерного пореза после запуска линии на рабочую скорость реализует режим "Автомат". При этом ЛП работает в циклическом режиме, рабочий цикл ЛП состоит из пяти последовательно исполняемых этапов [3].

В соответствии с результатами [7] и разд.1 можно предложить алгоритм формирования закона движения НО ЛП, показанный на рис. 2.1. В начале (блок 1) необходимо задать исходные параметры рабочего цикла, которыми являются прежде всего скорость V_1 и мерная длина L_m отрезков, на которые необходимо разрезать ОИ, а также величины, связанные с конструктивными ограничениями линии и привода – продолжительность $t_{Э4}$ обработки (четвертого этапа рабочего цикла), координаты $l_{нзо}$ и $l_{кзо}$, координаты l_{min} и l_{max} , максимально допустимая скорость НО V_{max} , максимально допустимое ускорение НО a_{max} . После задания

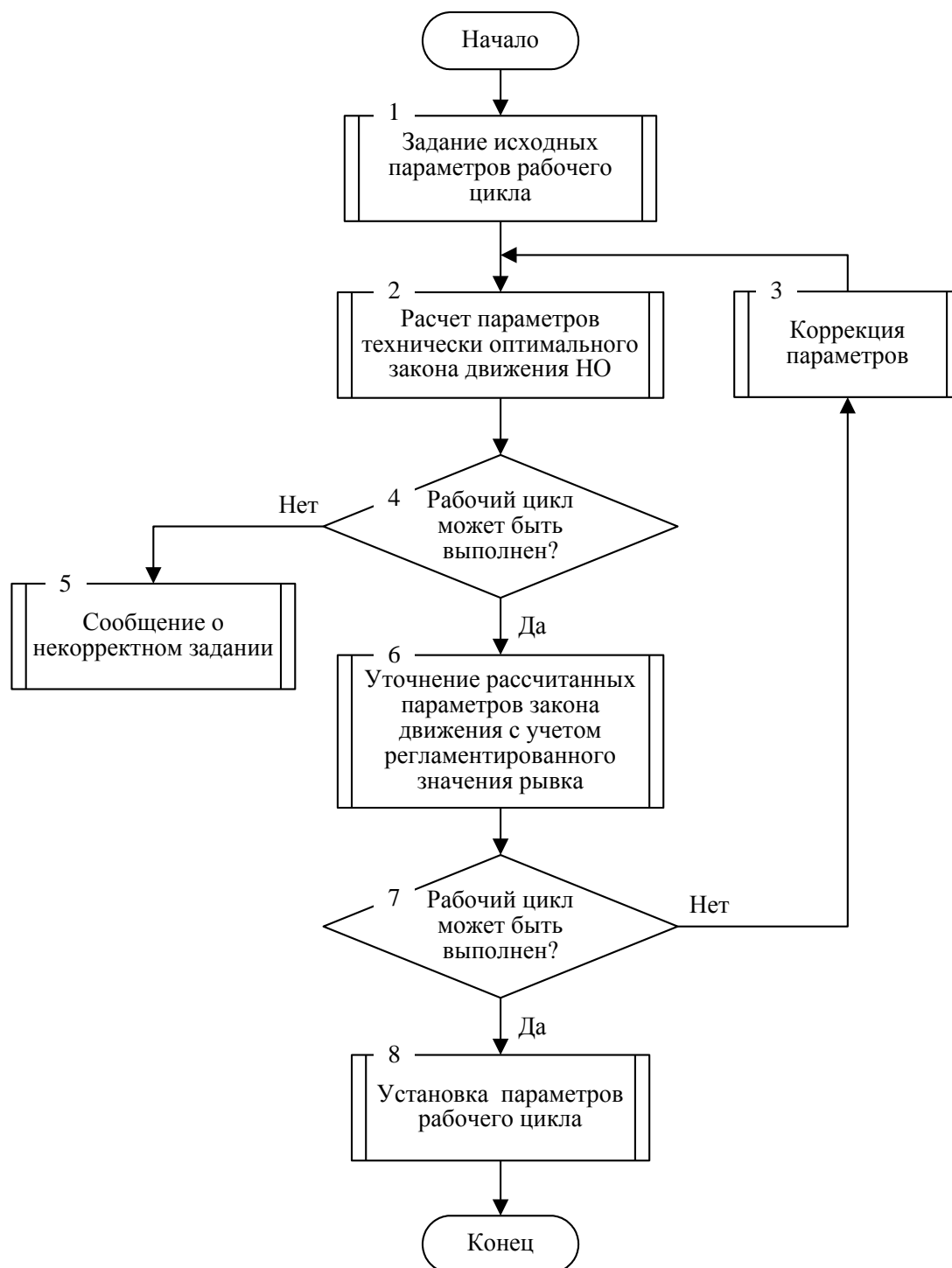


Рисунок 2.1 – Алгоритм формирования закона движения НО ЛП

исходных параметров с помощью методики, предложенной в [7], производится расчет параметров технически оптимального закона движения НО (блок 2). Результатом данного расчета будет в общем случае набор параметров $(t_{\text{в}}, t_{\text{н}}, t_{\text{обр}}, V_{\text{обр}})$, где $t_{\text{в}}$ – продолжительность разгона и торможения при движении НО "вперед",

t_n – продолжительность разгона и торможения при движении НО "назад", $t_{обр}$ – продолжительность движения НО "назад" на участке тахограммы с постоянной скоростью $V_{обр}$. Величины t_v и t_n могут быть пересчитаны в соответствующие ускорения привода НО.

Существуют такие наборы исходных параметров, задаваемых в начале расчета, которым соответствуют рабочие циклы, нереализуемые данной ЛП. Это связано с соотношением величин V_1 , L_m , $t_{Э4}$ и конструктивных параметров ЛП. В случае если в результате расчета получится нереализуемый рабочий цикл, необходимо выдать сообщение о некорректном задании исходных параметров (блок 5). Реакция на это сообщение зависит от текущей ситуации. В лучшем случае задание меняется и производится новый расчет, в худшем случае линия останавливается.

Если полученные параметры соответствуют реализуемому рабочему циклу, производится их уточнение с учетом регламентированного значения рывка $\dot{\mu}_{зад}$ по формулам, полученным в [7] (блок 6). При этом длительности переходных процессов и пути перемещения НО увеличиваются. Величина $\dot{\mu}_{зад}$ выбирается с помощью выражений, полученных в разд.1. Они позволяют найти оптимальную величину рывка, при существенном увеличении которой уже не происходит заметного улучшения ключевых относительно влияния на качество работы ЛП параметров.

Так как уменьшение рывка оказывает замедляющее действие на динамические процессы в приводе, полученные уточненные параметры проверяются на реализуемость соответствующего им рабочего цикла (блок 7). Если полученный рабочий цикл может быть выполнен, то его параметры принимаются и используются системой при управлении НО (блок 8). Иначе, производится коррекция заданных исходных параметров рабочего цикла (блок 3) и производится новый цикл расчета. Коррекцию можно производить, например, в направлении увеличения расчетной длительности второго $t_{Э2}$ этапа, что позволяет компенсировать увеличение длительности переходных процессов.

Предложенный алгоритм формирования закона движения НО ЛП является обобщенным. Каждому блоку данного алгоритма отвечают подалгоритмы, реализующие соответствующие методы расчета и проверки результатов. Расчет по данному алгоритму выполняется в течение второго этапа рабочего цикла ЛП (формирование целеуказания). При наличии возможности (постоянная технологическая программа работы ЛП, неизменяемые ключевые параметры и т.п.) соответствующий расчет может выполняться заранее, на более мощных машинах с целью сокращения затрат вычислительных мощностей системы управления при работе в режиме реального времени.

Программное обеспечение, которое соответствует рассмотренному алгоритму, располагается в системе управления мерным порезом. Базой для ее построения могут быть разные виды управляющих машин, однако наиболее подходящими можно назвать программируемые логические контроллеры или промышленные компьютеры. При этом может применяться предлагаемое фирмами-производителями программное обеспечение, имеющее в своем составе средства для регламентации рывков, задания требуемых тахограмм и др.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет объединить методы определения оптимальных параметров рабочих циклов ЛП в целенаправленную процедуру формирования закона движения НО ЛП. Представленный алгоритм в совокупности с методами, изложенными в [7] и разд.1, может служить базой для построения программного обеспечения системы управления летучей пилой. Результаты исследования опубликованы в [11].

3 ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ НЕСУЩЕГО ОРГАНА

Предложенные в [3, 7, 9, 10] и разд.1-2 принципы построения системы управления летучей пилой (СУЛП) и законы управления приводом НО требуют конкретной реализации и последующего экспериментального исследования. Для решения данной задачи воспользуемся подсистемой Simulink пакета Matlab [12, 13]. Математическая модель СУЛП (работа в автоматическом режиме), построенная в Simulink, приведена на рис. 3.1. Она имеет иерархическое построение и состоит из нескольких подсистем (модулей), в соответствии с предложенными ранее объектными моделями [3], структурно-алгоритмическим базисом [9] и функциональной схемой [10] системы управления летучей пилой. В состав модели рис. 3.1 входит несколько моделей-подсистем:

модель привода обрабатываемого изделия (ОИ);

модель связи НО с ОИ, осуществляемой между НО и ОИ на четвертом этапе рабочего цикла ЛП посредством механизма сцепления;

модель двухрежимного электропривода НО ЛП), которая, в свою очередь, включает подсистему контура тока;

модель контроллера ЛП.

В модели привода ОИ (1) принята двухконтурная система регулирования скорости с П-регулятором скорости и фильтром Баттерворта 2-го порядка в качестве контура тока. Сигнал задания скорости ОИ подается в момент запуска модели и затем не изменяется.

Порез ОИ производится при сжатом состоянии механизма сцепления, посредством которого обеспечивается неподвижность НО относительно ОИ. При этом между НО и ОИ образуется упругая связь и возникает соответствующий упругий момент, который приложен к НО и ОИ и зависит от разности их скоростей на момент сцепления. В другие моменты времени, т.е. при отключенном механизме сцепления (все этапы рабочего цикла ЛП, кроме четвертого) указанный упругий момент не воздействует на НО и ОИ. Данное обстоятельство отражено посредством

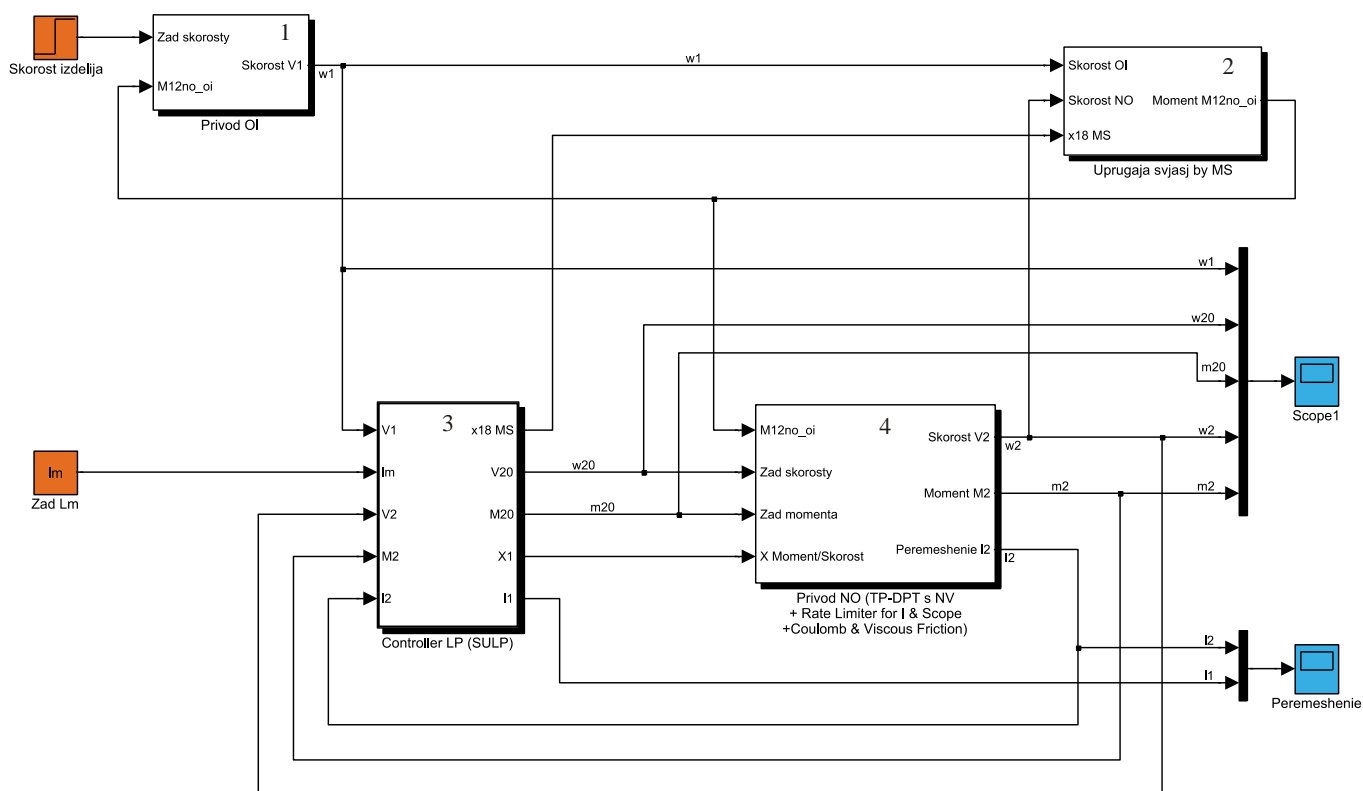


Рисунок 3.1 – Модель системы управления электроприводом НО летучей пилы

модели (2) и обеспечивается применением интегратора с триггерным портом и переключателя.

Модель двухрежимного электропривода НО (4) содержит контуры скорости и момента, настроенные на модульный оптимум. Ограничение рывка и переключение между режимами регулирования момента и скорости организовано в системе в соответствии с [14].

Модель контроллера ЛП (3) включает в себя подсистему переключения режимов работы электропривода НО, подсистему формирования заданной тахограммы электропривода НО с регламентированными значениями первой и второй производных скорости (ускорения и рывка), контроллер НО летучей пилы в виде Stateflow-диаграммы [16], представленной на рис. 3.2. Контроллер НО организует последовательное выполнение этапов рабочего цикла ЛП с реализацией предложенных в [7] и разд.1-2 законов управления приводом НО. В системе циркулируют логические сигналы, полученные при сигнальном анализе рабочего цикла ЛП [3] и сигналы, принятые при построении функциональной схемы

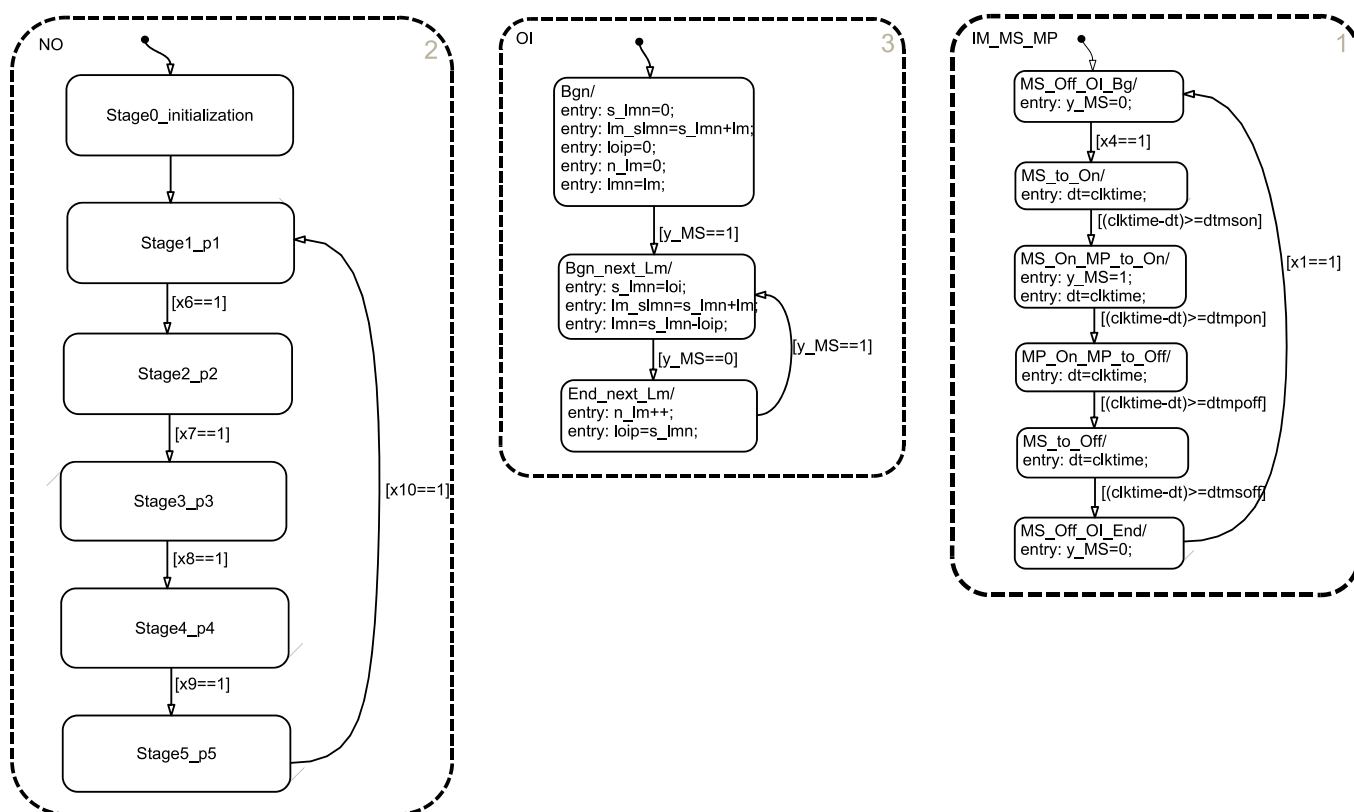


Рисунок 3.2 – Stateflow-диаграмма

системы управления ЛП [10]. Stateflow-диаграмма рис. 3.2 согласована с сетевой моделью рабочего цикла ЛП [15] и включает в себя три параллельно выполняемых диаграммы. Они определяют последовательности событий, связанных с функционированием расположенных на НО исполнительных механизмов ЛП (механизмов сцепления и подачи), движением точки обработки на ОИ, исполнением электроприводом НО задач, соответствующих каждому из этапов рабочего цикла ЛП. Последняя диаграмма (определяющая задачи электропривода НО) также имеет иерархическое построение и содержит диаграммы, раскрывающие содержание каждого этапа. Переходы между этапами рабочего цикла ЛП осуществляются посредством логических переменных перехода x_6 - x_{10} , формируемых по соответствующим признакам [3].

Применение в модели рис. 3.1 Stateflow-диаграмм как инструмента моделирования сложных событийно-управляемых систем [16] позволяет исследовать серию рабочих циклов ЛП с заданными мерными длинами, скоростями движения ОИ, тахограммами движения НО. При этом благодаря модульному

построению, имеется возможность несложной замены (и отдельной отладки) основных блоков модели – моделей привода НО и привода ОИ, модели связи между НО и ОИ, модели контроллера ЛП. Таким образом, имеется возможность комплексного исследования поведения всей системы, приводов и управляющего алгоритма в течение последовательности всех этапов рабочего цикла или серии рабочих циклов. Анимированное поведение Stateflow-диаграмм во время симуляции дает возможность наглядного наблюдения последовательной смены этапов рабочего цикла и ключевых блоков управляющего алгоритма, что, кроме всего, также облегчает отладку модели и алгоритмов. Последнее, в связи с большой сложностью модели, имеет немаловажное значение. Все необходимые параметры модели задаются в отдельном m-файле, который загружается при ее запуске. В связи со сложностью модели вычисления производятся с фиксированным шагом методом Рунге-Куты 4-го порядка точности.

На рис. 3.3 приведены результаты моделирования одной из серий рабочих циклов с заданными мерной длиной, скоростью движения ОИ, параметрами движения НО. Они показывают работоспособность предложенных в [7] и разд.1-2 алгоритмов и способов управления ЛП, которые заложены в модели контроллера ЛП и двухрежимного электропривода НО: при работе ЛП обеспечивается приемлемая точность реза ОИ, нет подпора ОИ, НО возвращается в исходное положение.

Таким образом, предложенная модель системы управления электроприводом НО летучей пилы может служить инструментом для анализа качества процессов управления, успешно использоваться в практике проектирования и исследований. Модульное построение модели обеспечивает возможности свободного исследования различных законов управления и применения различных моделей механической части НО и ОИ и их приводов. Например, для более точного отражения процессов приводов НО и ОИ при исследовании системы управления электроприводом НО летучей пилы в дальнейшем можно использовать соответствующие модели с двухмассовыми механическими частями с зазорами. Кроме того, в модели контроллера ЛП можно реализовать другие режимы работы ЛП, организовать

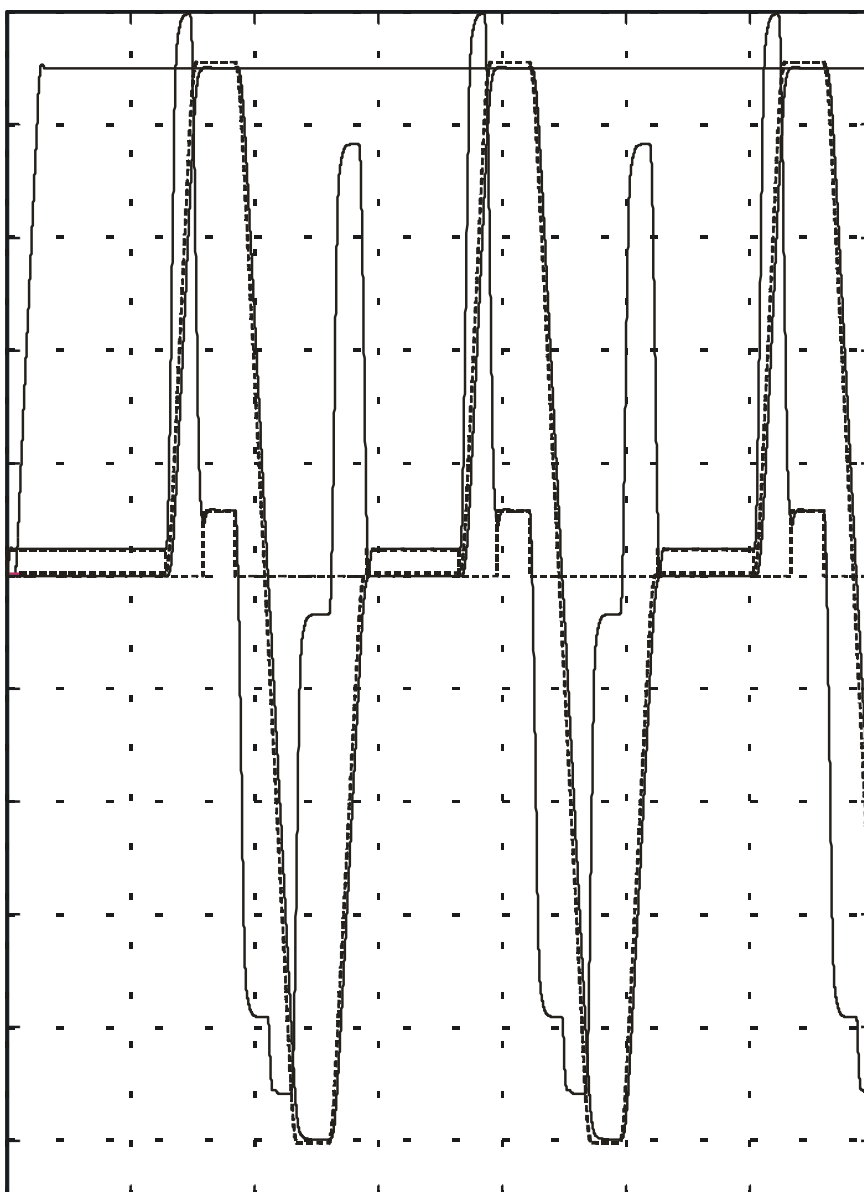


Рисунок 3.3 – Графики изменения сигналов скорости ОИ, скорости и момента двигателя НО и их заданий (пунктиром) для серии рабочих циклов ЛП

реакцию системы на различные внештатные ситуации. Структура предложенной модели может служить базой при построении моделей для исследования систем управления других механизмов со сложными алгоритмами работы и их приводах. Моделирование с помощью данной модели серии рабочих циклов ЛП показывает работоспособность предложенных законов управления ЛП. Результаты исследования опубликованы в [17].

ВЫВОДЫ

В ходе решения поставленных задач получены выражения для определения оптимальной величины рывка в приводе НО. Определены ключевые относительно влияния на качество работы ЛП параметры, которые применяются в математическом описании процессов управления приводом НО. Это продолжительность третьего этапа и соответствующий путь перемещения НО, значение контролируемой координаты, характеризующей положение НО в начальный момент разгона в обратном направлении, и общее прогнозируемое время движения НО. Получены формулы, по которым предложено выбирать оптимальную величину рывка в приводе НО ЛП.

Предложен общий алгоритм управления приводом НО. Он позволяет объединить методы определения оптимальных параметров рабочих циклов ЛП в целенаправленную процедуру формирования закона движения НО ЛП. Данный алгоритм, может служить базой для построения программного обеспечения системы управления летучей пилой.

Предложена модель системы управления электроприводом НО летучей пилой, которая может служить инструментом для анализа качества процессов управления, успешно использоваться в практике проектирования и исследований. Модульное построение модели обеспечивает возможности свободного исследования различных законов управления и применения различных моделей механической части НО и ОИ и их приводов. Структура предложенной модели может служить базой при построении моделей для исследования систем управления других механизмов со сложными алгоритмами работы и их приводов. Моделирование с помощью данной модели серии рабочих циклов ЛП показывает работоспособность предложенных законов управления ЛП.

Результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе Сумского государственного университета. Это позволяет повысить уровень подготовки специалистов с высшим образованием в области информационных технологий и ресурсосбережения.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Евгеньев Г.Б. Системология инженерных знаний: Учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2001. – 376 с.
2. Тимченко А.А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів: Основы САПР та системного проектирования складних об'єктів: Підручник/ За ред. В.І. Бикова. – 2-ге вид. – К.: Либідь, 2003. – 272 с.
3. Разработка объектно-ориентированных моделей систем управления исполнительными органами технологических машин: Отчет о НИР (промежуточный)/ СумГУ. – № ГР 0105U009179; Инв. №0206U007616. – К., 2006. – 142 с.
4. Червяков В.Д., Паньч А.А. Летучие механизмы как класс рабочих машин в аспекте задач управления// Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ. – 1998. – Вып. 3. – С.176-182.
5. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
6. Чермалых А.В. Универсальная многоканальная задающая модель для систем управления позиционным электроприводом// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004(25). – С. 139-143.
7. Разработка методов и алгоритмов энергосберегающего управления приводами исполнительных органов технологических машин циклического действия: Отчет о НИР (промежуточный)/ СумГУ. – № ГР 0105U009179; Инв. №0208U005630. – К., 2008. – 75 с.
8. Панич А.О. Оптимальна величина ривка в приводі несучого органа летучої пили// Вісник Сумського державного університету. – Суми: Видавництво СумДУ, 2004. – № 12(71). – С.20-25.
9. Паньч А.А., Червяков В.Д. Структурно-алгоритмический базис объектно-ориентированной системы управления летучими пилами// Контроль і

- управління в складних системах (КУСС-99). Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. м. Вінниця, 3-5 лютого 1999 року. У 3-х томах. Том 2. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця". – 1999. – С.66-72.
10. Червяков В.Д., Паньч А.А. Функциональная схема объектно-ориентированной системы управления летучими пилами// Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПИ. Вып. 1 – Кременчуг: КГПИ. – 1999. – С.60-64.
 11. Паньч А.А., Червяков В.Д. Алгоритм формирования закона движения несущего органа летучей пилы// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2005. – Вип. 4/2005(33). – С.162-164.
 12. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.
 13. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
 14. Панич А.О., Петренко М.О. Обмеження ривка в двоережимній системі управління електропривода несучого органа летучої пили// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44). – С.35-39.
 15. Паньч А.А., Червяков В.Д. Ситуационный анализ рабочего цикла летучей пилы// Праці П'ятої Української конференції з автоматичного управління "Автоматика-98" – ч.ІІІ – Київ: видавництво НТУУ КПІ. – 1998. – С.226-230.
 16. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
 17. Червяков В.Д., Паньч А.А. Анализ законов движения электропривода несущего органа летучей пилы методом компьютерного моделирования// Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С.289-291.

$$t_{\text{accel_nr}} := \frac{v_{\text{oi}}}{a_{\text{v}}}$$

>

Анализ длительности разгона

Разность

> `dt_accel:=t_accel_r-t_accel_nr;`

$$dt_{\text{accel}} := \frac{m0 - mn}{dm} + \frac{a_{\text{v}}}{dm}$$

> `simplify(dt_accel);`

$$\frac{m0 - mn + a_{\text{v}}}{dm}$$

Предел при dm=infinity

> `dt_accel_lim:=limit(dt_accel, dm=infinity);`

$$dt_{\text{accel_lim}} := 0$$

Отношение dt_accel/t_accel_nr

> `rdt_accel:=dt_accel/t_accel_nr;`

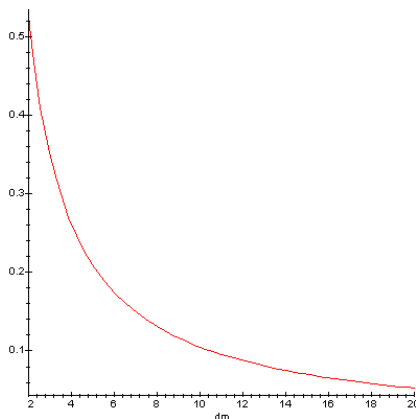
$$rdt_{\text{accel}} := \frac{\left(\frac{m0 - mn}{dm} + \frac{a_{\text{v}}}{dm}\right) a_{\text{v}}}{v_{\text{oi}}}$$

Подстановка конкретных значений

> `s_rdt_accel:=subs(m0=.1, mn=.05, a_v=1, v_oi=1, rdt_accel);`

$$s_{\text{rdt_accel}} := \frac{1.05}{dm}$$

> `plot(s_rdt_accel, dm=2..20);`



Приведение подобных членов относительно dm

> `collect(rdt_accel, dm);`

$$\frac{(m0 - mn + a_{\text{v}}) a_{\text{v}}}{v_{\text{oi}} dm}$$

>

Реверс

Длительность реверса с учетом трех случаев

Промежутки времени при реверсе

> `dt_rev_1:=a_v/dm;`

$$dt_{\text{rev_1}} := \frac{a_{\text{v}}}{dm}$$

> `dt_rev_2:=v_oi/a_v-a_v/(2*dm);`

$$dt_{rev_2} := \frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm}$$

> dt_rev_31:=da_rn/dm;

$$dt_{rev_31} := \frac{da_{rn}}{dm}$$

> dt_rev_32:=-da_rn/dm;

$$dt_{rev_32} := -\frac{da_{rn}}{dm}$$

> dt_rev_33:=0;

$$dt_{rev_33} := 0$$

> dt_rev_41:=v_obr/a_n-a_n/dm+da_vn^2/(2*dm*a_n);

$$dt_{rev_41} := \frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n}$$

> dt_rev_42:=v_obr/a_n-a_n/dm+da_rn*(2*da_vn-da_rn)/(2*dm*a_n);

$$dt_{rev_42} := \frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n}$$

> limit(dt_rev_42, dm=infinity);

$$\frac{v_{obr}}{a_n}$$

> dt_rev_43:=v_obr/a_n-a_n/(2*dm);

$$dt_{rev_43} := \frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm}$$

> dt_rev_5:=a_n/dm;

$$dt_{rev_5} := \frac{a_n}{dm}$$

Суммарное время на реверс с учетом рывка

> t_rev_r1:=dt_rev_1+dt_rev_2+dt_rev_31+dt_rev_41+dt_rev_5;

$$t_{rev_r1} := \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{v_{oi}}{a_v} + \frac{da_{rn}}{dm} + \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n}$$

> t_rev_r2:=dt_rev_1+dt_rev_2+dt_rev_32+dt_rev_42+dt_rev_5;

$$t_{rev_r2} := \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{da_{rn}}{dm} + \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n}$$

> t_rev_r3:=dt_rev_1+dt_rev_2+dt_rev_33+dt_rev_43+dt_rev_5;

$$t_{rev_r3} := \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{v_{oi}}{a_v} + \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm}$$

> simplify(t_rev_r1);

$$\frac{1}{2} \frac{a_v^2 a_n + 2 v_{oi} dm a_n + 2 da_{rn} a_v a_n + 2 v_{obr} dm a_v + da_{vn}^2 a_v}{dm a_v a_n}$$

>

Суммарное время на реверс без учета рывка

> t_rev_nr:=v_oi/a_v+v_obr/a_n;

$$t_{rev_nr} := \frac{v_{oi}}{a_v} + \frac{v_{obr}}{a_n}$$

>

Реверс по участкам - торможение и разгон (три случая)

Торможение-----

> dt_rev_t:=dt_rev_1+dt_rev_2;

$$dt_{rev_t} := \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{v_{oi}}{a_v}$$

```
> simplify(dt_rev_t);
```

$$\frac{1}{2} \frac{a_v^2 + 2 v_{oi} dm}{dm a_v}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
дельта_тау_тп

```

```
> collect(dt_rev_t, dm);
```

$$\frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{v_{oi}}{a_v}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
>

```

Разгон-----

```
> dt_rev1r:=dt_rev_31+dt_rev_41+dt_rev_5;
```

$$dt_rev1r := \frac{da_{rn}}{dm} + \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n}$$

```
> simplify(dt_rev1r);
```

$$\frac{1}{2} \frac{2 da_{rn} a_n + 2 v_{obr} dm + da_{vn}^2}{dm a_n}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
дельта_тау_пп1

```

```
> collect(dt_rev1r, dm);
```

$$\frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{da_{rn} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n}}{dm}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
>

```

```
> dt_rev2r:=dt_rev_32+dt_rev_42+dt_rev_5;
```

$$dt_rev2r := -\frac{da_{rn}}{dm} + \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n}$$

```
> simplify(dt_rev2r);
```

$$-\frac{1}{2} \frac{2 da_{rn} a_n - 2 v_{obr} dm - 2 da_{rn} da_{vn} + da_{rn}^2}{dm a_n}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
дельта_тау_пп2

```

```
> collect(dt_rev2r, dm);
```

$$\frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{-da_{rn} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n}}{dm}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
>

```

```
> dt_rev3r:=dt_rev_33+dt_rev_43+dt_rev_5;
```

$$dt_rev3r := \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm}$$

```
> simplify(dt_rev3r);
```

$$\frac{1}{2} \frac{2 v_{obr} dm + a_n^2}{dm a_n}$$

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
дельта_тау_пп3

```

```
> collect(dt_rev3r, dm);
```


$$ds_rev_32 := -\frac{1}{2} \frac{da_vn da_rn^2}{dm^2} - \frac{1}{6} \frac{da_rn^3}{dm^2}$$

> ds_rev_33:=0;

$$ds_rev_33 := 0$$

> ds_rev_41:=(-da_rn(a_n+da_vn)/(2*dm))*dt_rev_41-a_n*dt_rev_41^2/2;

$$ds_rev_41 := -\frac{1}{2} \frac{da_rn(a_n + da_vn) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{dm a_n} \right)}{dm} - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{dm a_n} \right)^2$$

> ds_rev_42:=(-da_rn(da_rn-2*da_vn)/(2*dm))*dt_rev_42-a_n*dt_rev_42^2/2;

ds_rev_42 :=

$$-\frac{1}{2} \frac{da_rn(da_rn - 2 da_vn) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_rn(2 da_vn - da_rn)}{dm a_n} \right)}{dm} - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_rn(2 da_vn - da_rn)}{dm a_n} \right)^2$$

> ds_rev_43:=-a_n*dt_rev_43^2/2;

$$ds_rev_43 := -\frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} \right)^2$$

> ds_rev_5:=(-v_obr+a_n^2/(2*dm))*dt_rev_5-a_n*dt_rev_5^2/2+dm*dt_rev_5^3/6;

$$ds_rev_5 := \frac{\left(-v_obr + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} - \frac{1}{3} \frac{a_n^3}{dm^2}$$

>

>

Сумма

> ds_rev1:=ds_rev_1+ds_rev_2+ds_rev_31+ds_rev_41+ds_rev_5;

$$ds_rev1 := \frac{a_v v_oi}{dm} - \frac{1}{6} \frac{a_v^3}{dm^2} + \left(v_oi - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_oi}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_oi}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{da_vn da_rn^2}{dm^2} - \frac{1}{6} \frac{da_rn^3}{dm^2} - \frac{1}{2} \frac{da_rn(a_n + da_vn) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{dm a_n} \right)}{dm} - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{dm a_n} \right)^2 + \frac{\left(-v_obr + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} - \frac{1}{3} \frac{a_n^3}{dm^2}$$

> simplify(ds_rev1);

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{24}(-12 a_v^2 v_{oi} dm a_n + a_v^4 a_n - 12 a_n v_{oi}^2 dm^2 + 12 da_{vn} da_{rn}^2 a_v a_n \\
& + 4 da_{rn}^3 a_v a_n + 12 da_{rn}(a_n + da_{vn}) a_v v_{obr} dm \\
& - 12 da_{rn}(a_n + da_{vn}) a_v a_n^2 + 6 da_{rn}(a_n + da_{vn}) a_v da_{vn}^2 \\
& + 12 a_v v_{obr}^2 dm^2 + 12 a_v v_{obr} dm da_{vn}^2 + 8 a_n^4 a_v - 12 a_v a_n^2 da_{vn}^2 \\
& + 3 a_v da_{vn}^4) / (dm^2 a_v a_n)
\end{aligned}$$

> **collect(ds_rev1, dm);**

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \\
& \frac{\frac{1}{2} a_v v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(a_n + da_{vn}) v_{obr}}{a_n} - \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n}\right) v_{obr} - v_{obr} a_n}{dm} \\
& + \left(\frac{1}{6} a_n^3 - \frac{1}{24} a_v^3 - \frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 - \frac{1}{2} da_{rn}(a_n + da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n}\right) \right. \\
& \left. - \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n}\right)^2 - \frac{1}{6} da_{rn}^3\right) / dm^2
\end{aligned}$$

>

> **ds_rev2:=ds_rev_1+ds_rev_2+ds_rev_32+ds_rev_42+ds_rev_5;**

$$\begin{aligned}
ds_rev2 := & \frac{a_v v_{oi}}{dm} - \frac{1}{6} \frac{a_v^3}{dm^2} + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm}\right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm}\right) \\
& - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm}\right)^2 - \frac{1}{2} \frac{da_{vn} da_{rn}^2}{dm^2} - \frac{1}{6} \frac{da_{rn}^3}{dm^2} \\
& - \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n}\right)}{dm} \\
& - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n}\right)^2 + \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm}\right) a_n}{dm} \\
& - \frac{1}{3} \frac{a_n^3}{dm^2}
\end{aligned}$$

> **simplify(ds_rev2);**

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{24}(-12 a_v^2 v_{oi} dm a_n + a_v^4 a_n - 12 a_n v_{oi}^2 dm^2 + 12 da_{vn} da_{rn}^2 a_v a_n \\
& + 4 da_{rn}^3 a_v a_n + 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v v_{obr} dm \\
& - 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v a_n^2 \\
& + 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v da_{rn} da_{vn} \\
& - 6 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v da_{rn}^2 + 12 a_v v_{obr}^2 dm^2 \\
& + 24 a_v v_{obr} dm da_{rn} da_{vn} - 12 a_v v_{obr} dm da_{rn}^2 + 8 a_n^4 a_v \\
& - 24 a_v a_n^2 da_{rn} da_{vn} + 12 a_v a_n^2 da_{rn}^2 + 12 a_v da_{rn}^2 da_{vn}^2 \\
& - 12 a_v da_{rn}^3 da_{vn} + 3 a_v da_{rn}^4) / (dm^2 a_v a_n)
\end{aligned}$$

> **collect(ds_rev2, dm);**

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \left(\frac{1}{2} a_v v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) v_{obr}}{a_n} \right. \\
& \quad \left. - \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) v_{obr} - v_{obr} a_n \right) / dm + \left(\frac{1}{6} a_n^3 \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{24} a_v^3 - \frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{2} da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) \right. \\
& \quad \left. - \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right)^2 - \frac{1}{6} da_{rn}^3 \right) / dm^2
\end{aligned}$$

>

> ds_rev3:=ds_rev_1+ds_rev_2+ds_rev_33+ds_rev_43+ds_rev_5;

$$ds_rev3 := \frac{a_v v_{oi}}{dm} - \frac{1}{6} \frac{a_v^3}{dm^2} + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{3} \frac{a_n^3}{dm^2}$$

$$-\frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} \right)^2 + \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm}$$

> simplify(ds_rev3);

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{24} (12 a_v^2 v_{oi} dm a_n - a_v^4 a_n + 12 a_n v_{oi}^2 dm^2 - 12 a_v v_{obr}^2 dm^2 \\
& \quad - 12 a_v v_{obr} dm a_n^2 + a_n^4 a_v) / (a_v a_n dm^2)
\end{aligned}$$

> collect(ds_rev3, dm);

$$-\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{\frac{1}{2} a_v v_{oi} - \frac{1}{2} v_{obr} a_n}{dm} + \frac{\frac{1}{24} a_n^3 - \frac{1}{24} a_v^3}{dm^2}$$

>

Реверс по участкам - торможение и разгон (три случая)**Торможение**-----

> ds_revt:=ds_rev_1+ds_rev_2;

ds_revt:=

$$\frac{a_v v_{oi}}{dm} - \frac{1}{6} \frac{a_v^3}{dm^2} + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2$$

> simplify(ds_revt);

$$\frac{1}{24} \frac{12 v_{oi} dm a_v^2 - a_v^4 + 12 v_{oi}^2 dm^2}{a_v dm^2}$$

дельта_альфа_тр

> collect(ds_revt, dm);

$$\frac{1}{2} \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{1}{2} \frac{a_v v_{oi}}{dm} - \frac{1}{24} \frac{a_v^3}{dm^2}$$

Без учета рывка

> ds_revt_nr:=(1/2)*v_oi^2/a_v;

$$ds_rev_nr := \frac{1}{2} \frac{v_{oi}^2}{a_v}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{24} (12 da_{vn} da_{rn}^2 a_n + 4 da_{rn}^3 a_n + 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) v_{obr} dm \\
& - 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_n^2 + 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) da_{rn} da_{vn} \\
& - 6 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) da_{rn}^2 + 12 v_{obr}^2 dm^2 + 24 v_{obr} dm da_{rn} da_{vn} \\
& - 12 v_{obr} dm da_{rn}^2 + 8 a_n^4 - 24 a_n^2 da_{rn} da_{vn} + 12 a_n^2 da_{rn}^2 \\
& + 12 da_{rn}^2 da_{vn}^2 - 12 da_{rn}^3 da_{vn} + 3 da_{rn}^4) / (dm^2 a_n)
\end{aligned}$$

~~~~~  
**дельта\_альфа\_pp2**

> **collect(ds\_rev2r, dm);**

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} + \left( -\frac{1}{2} \frac{da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) v_{obr}}{a_n} - v_{obr} a_n \right. \\
& \left. - \left( -a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) v_{obr} \right) / dm + \left( -\frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 \right. \\
& \left. - \frac{1}{6} da_{rn}^3 - \frac{1}{2} da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) \left( -a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{6} a_n^3 - \frac{1}{2} a_n \left( -a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right)^2 \right) / dm^2
\end{aligned}$$

~~~~~  
> **combine(collect(ds_rev2r, dm));**

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} + \left(-\frac{1}{2} \frac{da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) v_{obr}}{a_n} - v_{obr} a_n \right. \\
& \left. - \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) v_{obr} \right) / dm + \left(-\frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 \right. \\
& \left. - \frac{1}{6} da_{rn}^3 - \frac{1}{2} da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) \right. \\
& \left. + \frac{1}{6} a_n^3 - \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right)^2 \right) / dm^2
\end{aligned}$$

> **limit(ds_rev2r, dm=infinity);**

$$-\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n}$$

>

> **ds_rev3r:=ds_rev_33+ds_rev_43+ds_rev_5;**

$$ds_{rev3r} := -\frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} \right)^2 + \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} - \frac{1}{3} \frac{a_n^3}{dm^2}$$

> **simplify(ds_rev3r);**

$$\frac{1}{24} \frac{-12 v_{obr}^2 dm^2 - 12 v_{obr} dm a_n^2 + a_n^4}{a_n dm^2}$$

~~~~~  
**дельта\_альфа\_pp3**

> **collect(ds\_rev3r, dm);**

$$-\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{v_{obr} a_n}{dm} + \frac{1}{24} \frac{a_n^3}{dm^2}$$

~~~~~  
Без учета рывка

> ds_revr_nr := -(1/2)*v_obr^2/a_n;

$$ds_revr_nr := -\frac{1}{2} \frac{v_obr^2}{a_n}$$

>

Торможение - по участкам (дельта альфа - ds)

> ds_torm_1 := -v_obr*dt_torm_1+dm*dt_torm_1^3/6;

$$ds_torm_1 := -\frac{v_obr a_n}{dm} + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2}$$

> ds_torm_2 := (-v_obr+a_n^2/(2*dm))*dt_torm_2+a_n*dt_torm_2^2/2;

$$ds_torm_2 := \left(-v_obr + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_tn (2 a_n - da_tn)}{dm a_n} \right) + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_tn (2 a_n - da_tn)}{dm a_n} \right)^2$$

> ds_torm_3 := (-da_tn*(2*a_n-da_tn)/(2*dm))*dt_torm_3+a_n*dt_torm_3^2/2-dm*dt_torm_3^3/6;

$$ds_torm_3 := -\frac{1}{2} \frac{da_tn^2 (2 a_n - da_tn)}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_n da_tn^2}{dm^2} - \frac{1}{6} \frac{da_tn^3}{dm^2}$$

Сумма

> ds_torm := ds_torm_1+ds_torm_2+ds_torm_3;

$$ds_torm := -\frac{v_obr a_n}{dm} + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} + \left(-v_obr + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_tn (2 a_n - da_tn)}{dm a_n} \right) + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_tn (2 a_n - da_tn)}{dm a_n} \right)^2 - \frac{1}{2} \frac{da_tn^2 (2 a_n - da_tn)}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_n da_tn^2}{dm^2} - \frac{1}{6} \frac{da_tn^3}{dm^2}$$

>

> simplify(ds_torm);

$$\frac{1}{24} \frac{-12 v_obr a_n^2 dm + a_n^4 - 12 v_obr^2 dm^2 - 4 da_tn^3 a_n + 3 da_tn^4}{a_n dm^2}$$

~~~~~  
дельта\_альфа\_т

> collect(ds\_torm, dm);

$$-\frac{1}{2} \frac{v\_obr^2}{a\_n} - \frac{1}{2} \frac{v\_obr a\_n}{dm} + \left( -\frac{1}{2} da\_tn^2 (2 a\_n - da\_tn) + \frac{1}{6} a\_n^3 + \frac{1}{2} a\_n^2 \left( -\frac{1}{2} a\_n - \frac{1}{2} \frac{da\_tn (2 a\_n - da\_tn)}{a\_n} \right) + \frac{1}{2} a\_n \left( -\frac{1}{2} a\_n - \frac{1}{2} \frac{da\_tn (2 a\_n - da\_tn)}{a\_n} \right)^2 - \frac{1}{6} da\_tn^3 + \frac{1}{2} a\_n da\_tn^2 \right) / dm^2$$

~~~~~  
> combine(collect(ds_torm, dm));

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{v_{obr} a_n}{dm} + \left(-\frac{1}{2} da_{tm}^2 (2a_n - da_{tm}) + \frac{1}{6} a_n^3 \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tm} (2a_n - da_{tm})}{a_n} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tm} (2a_n - da_{tm})}{a_n} \right)^2 - \frac{1}{6} da_{tm}^3 + \frac{1}{2} a_n da_{tm}^2 \right) / dm^2 \end{aligned}$$

Без учета рывка

> **`ds_torm_nr := -(1/2)*v_obr^2/a_n;`**

$$ds_{torm_nr} := -\frac{1}{2} \frac{v_{obr}^2}{a_n}$$

>

Общее время рабочего цикла

Движение в прямом направлении - путь

Путь, проходимый при порезе (четвертый этап рабочего цикла)

> **`ds_porez := v_oi*dt_porez;`**

$$ds_{porez} := v_{oi} dt_{porez}$$

Путь, проходимый при движении в прямом направлении

(альфа_к)^^

> **`ds_pr := s_nach+ds_accel+ds_porez+ds_rev1r;`**

$$\begin{aligned} ds_{pr} := & s_{nach} + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 \\ & + \frac{\left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} + v_{oi} dt_{porez} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} \\ & + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 \end{aligned}$$

^^

> **`collect(ds_pr, dm);`**

$$v_{oi} dt_{porez} + s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} - \frac{1}{24} \frac{a_v^3}{dm^2}$$

>

Путь, проходимый при движении в прямом направлении без учета рывка

> **`ds_pr_nr := s_nach+ds_accel_nr+ds_porez+ds_rev1r_nr;`**

$$ds_{pr_nr} := v_{oi} dt_{porez} + s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v}$$

>

Движение в обратном направлении - время (дельта_тау_рм для трех случаев)

Случай 1

> **`dt_obr1 := (ds_pr-ds_rev1r-ds_torm)/v_obr;`**

$$\begin{aligned}
dt_obr1 := & \left(s_nach + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_oi}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_oi}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 \right. \\
& + \frac{\left(v_oi - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} + v_oi dt_porez + \frac{a_v v_oi}{dm} \\
& + \left(v_oi - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_oi}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_oi}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_vn da_rn^2}{dm^2} \\
& + \frac{1}{6} \frac{da_rn^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{da_rn(a_n + da_vn) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{dm a_n} \right)}{dm} \\
& + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{dm a_n} \right)^2 - \frac{\left(-v_obr + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} \\
& + \frac{v_obr a_n}{dm} - \left(-v_obr + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_tn (2 a_n - da_tn)}{dm a_n} \right) \\
& - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_obr}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_tn (2 a_n - da_tn)}{dm a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_tn^2 (2 a_n - da_tn)}{dm^2} \\
& \left. - \frac{1}{2} \frac{a_n da_tn^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_tn^3}{dm^2} \right) / v_obr
\end{aligned}$$

> **simplify(dt_obr1);**

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{24} (12 a_v v_obr dm da_vn^2 + 3 a_v da_vn^4 - 3 a_v da_tn^4 + 24 a_v v_obr^2 dm^2 \\
& + 4 da_tn^3 a_v a_n + 6 da_rn(a_n + da_vn) a_v da_vn^2 - 12 a_v a_n^2 da_vn^2 \\
& - 12 da_rn(a_n + da_vn) a_v a_n^2 - a_v^4 a_n + 24 a_v^2 v_oi dm a_n \\
& + 12 da_vn da_rn^2 a_v a_n + 4 da_rn^3 a_v a_n + 7 a_n^4 a_v \\
& + 24 v_oi dt_porez dm^2 a_v a_n + 24 a_n v_oi^2 dm^2 + 24 s_nach dm^2 a_v a_n \\
& + 12 v_obr a_n^2 dm a_v + 12 da_rn(a_n + da_vn) a_v v_obr dm) / (dm^2 a_v a_n \\
& v_obr)
\end{aligned}$$

> **collect(dt_obr1, dm);**

$$\begin{aligned}
& \frac{s_nach + \frac{v_oi^2}{a_v} + \frac{v_obr^2}{a_n} + v_oi dt_porez}{v_obr} + \\
& \frac{a_v v_oi + \frac{3}{2} v_obr a_n + \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_vn^2}{a_n} \right) v_obr + \frac{1}{2} \frac{da_rn(a_n + da_vn) v_obr}{a_n}}{v_obr dm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left(-\frac{1}{3} a_n^3 - \frac{1}{24} a_v^3 + \frac{1}{6} da_{rn}^3 + \frac{1}{2} da_{rn}(a_n + da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} \right) \right. \\
& + \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} \right)^2 - \frac{1}{2} a_n da_{tn}^2 + \frac{1}{6} da_{tn}^3 \\
& - \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2a_n - da_{tn})}{a_n} \right) + \frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 \quad v_{obr} dm^2) \\
& \left. + \frac{1}{2} da_{tn}^2 (2a_n - da_{tn}) - \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2a_n - da_{tn})}{a_n} \right)^2 \right) / (
\end{aligned}$$

>

Случай 2> **dt_obr2 := (ds_pr-ds_rev2r-ds_torm)/v_obr;**

$$\begin{aligned}
dt_{obr2} := & \left(s_{nach} + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 \right. \\
& + \frac{\left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} + v_{oi} dt_{porez} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} \\
& + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{vn} da_{rn}^2}{dm^2} \\
& + \frac{1}{6} \frac{da_{rn}^3}{dm^2} \\
& + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n} \right)}{dm} \\
& + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n} \right)^2 - \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} \\
& + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} + \frac{v_{obr} a_n}{dm} \\
& - \left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right) \\
& - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{tn}^2 (2a_n - da_{tn})}{dm^2} \\
& \left. - \frac{1}{2} \frac{a_n da_{tn}^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_{tn}^3}{dm^2} \right) / v_{obr}
\end{aligned}$$

> **simplify(dt_obr2);**

$$\frac{1}{24} (-12 a_v da_{rn}^3 da_{vn} + 12 a_v da_{rn}^2 da_{vn}^2 - 6 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v da_{rn}^2 - 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v a_n^2 - 3 a_v da_{tn}^4 + 24 a_v v_{obr}^2 dm^2 + 4 da_{tn}^3 a_v a_n - a_v^4 a_n + 24 a_v^2 v_{oi} dm a_n + 12 da_{vn} da_{rn}^2 a_v a_n + 4 da_{rn}^3 a_v a_n + 7 a_n^4 a_v + 24 v_{oi} dt_{porez} dm^2 a_v a_n + 24 a_n v_{oi}^2 dm^2 + 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v v_{obr} dm + 12 da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v da_{rn} da_{vn} + 12 a_v a_n^2 da_{rn}^2 + 3 a_v da_{rn}^4 + 24 a_v v_{obr} dm da_{rn} da_{vn} - 12 a_v v_{obr} dm da_{rn}^2 - 24 a_v a_n^2 da_{rn} da_{vn} + 24 s_{nach} dm^2 a_v a_n + 12 v_{obr} a_n^2 dm a_v) / (dm^2 a_v a_n v_{obr})$$

> **collect(dt_obr2, dm);**

$$\frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}} + \left(a_v v_{oi} + \frac{3}{2} v_{obr} a_n + \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) v_{obr}}{a_n} \right) / (v_{obr} dm) + \left(-\frac{1}{3} a_n^3 - \frac{1}{24} a_v^3 + \frac{1}{6} da_{rn}^3 + \frac{1}{2} da_{rn}(da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) + \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn}(2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right)^2 - \frac{1}{2} a_n da_{tn}^2 + \frac{1}{6} da_{tn}^3 - \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right) + \frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 + \frac{1}{2} da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn}) - \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right)^2 \right) / (v_{obr} dm^2)$$

>

Случай 3

> **dt_obr3 := (ds_pr - ds_rev3r - ds_torm) / v_obr;**

$$dt_{obr3} := \left(s_{nach} + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{\left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} + v_{oi} dt_{porez} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} \right)^2 - \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} + \frac{v_{obr} a_n}{dm} - \left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn}(2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right) \right)$$

$$-\frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn})}{dm^2} - \frac{1}{2} \frac{a_n da_{tn}^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_{tn}^3}{dm^2} \Big|_{v_{obr}}$$

> **simplify(dt_obr3);**

$$\frac{1}{24} (-3 a_v da_{tn}^4 + 24 a_v v_{obr}^2 dm^2 + 4 da_{tn}^3 a_v a_n - a_v^4 a_n + 24 a_v^2 v_{oi} dm a_n - 2 a_n^4 a_v + 24 v_{oi} dt_{porez} dm^2 a_v a_n + 24 a_n v_{oi}^2 dm^2 + 24 s_{nach} dm^2 a_v a_n + 24 v_{obr} a_n^2 dm a_v) / (a_v a_n dm^2 v_{obr})$$

> **collect(dt_obr3, dm);**

$$\frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}} + \frac{a_v v_{oi} + v_{obr} a_n}{v_{obr} dm} + \left(-\frac{1}{24} a_v^3 - \frac{5}{24} a_n^3 - \frac{1}{2} a_n da_{tn}^2 + \frac{1}{6} da_{tn}^3 - \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right) - \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn}) \right) / (v_{obr} dm^2)$$

>

Без учета рывка

> **dt_obr_nr := (ds_pr_nr - ds_revr_nr - ds_torm_nr) / v_obr;**

$$dt_{obr_nr} := \frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}}$$

>

Общее время движения (длительность рабочего цикла - дельта_тау_д), для трех случаев

Случай 1

> **t_rcl := t_accel_r + dt_porez + dt_revt + dt_revlr + dt_obr1 + t_torm_r;**

$$t_{rcl} := \frac{m0 - mn}{dm} + \frac{3}{2} \frac{a_v}{dm} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + dt_{porez} + \frac{da_{rn}}{dm} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n} + \left(s_{nach} + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{\left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} + v_{oi} dt_{porez} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{vn} da_{rn}^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_{rn}^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (a_n + da_{vn}) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n} \right)}{dm} \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n} \right)^2 - \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} \\
& + \frac{v_{obr} a_n}{dm} - \left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right) \\
& - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn})}{dm^2} \\
& \left. - \frac{1}{2} \frac{a_n da_{tn}^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_{tn}^3}{dm^2} \right) \left/ v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} + \frac{da_{tn}}{dm} \right.
\end{aligned}$$

> **simplify(t_rc1);**

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{24} (-3 a_v da_{tn}^4 + 72 a_v v_{obr}^2 dm^2 + 4 da_{tn}^3 a_v a_n - a_v^4 a_n \\
& + 24 a_v^2 v_{oi} dm a_n + 7 a_n^4 a_v + 24 v_{oi} dt_{porez} dm^2 a_v a_n \\
& + 24 a_n v_{oi}^2 dm^2 + 12 da_{vn} da_{rn}^2 a_v a_n + 4 da_{rn}^3 a_v a_n \\
& + 12 da_{rn} (a_n + da_{vn}) a_v v_{obr} dm + 24 dm a_v a_n v_{obr} m0 \\
& - 24 dm a_v a_n v_{obr} mn + 36 a_v^2 dm a_n v_{obr} + 48 v_{oi} dm^2 a_n v_{obr} \\
& + 24 dt_{porez} dm^2 a_v a_n v_{obr} + 24 da_{rn} dm a_v a_n v_{obr} \\
& - 12 a_v a_n^2 da_{vn}^2 + 12 a_v v_{obr} dm da_{tn}^2 \\
& + 6 da_{rn} (a_n + da_{vn}) a_v da_{vn}^2 - 12 da_{rn} (a_n + da_{vn}) a_v a_n^2 \\
& + 24 a_v v_{obr} dm da_{vn}^2 + 3 a_v da_{vn}^4 + 24 s_{nach} dm^2 a_v a_n \\
& + 24 v_{obr} a_n^2 dm a_v) / (dm^2 a_v a_n v_{obr})
\end{aligned}$$

> **collect(t_rc1, dm);**

$$\begin{aligned}
& 2 \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + dt_{porez} + \left(m0 - mn \right. \\
& + \frac{3}{2} a_v + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} + da_{rn} + \frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} + \\
& \left. \frac{a_v v_{oi} + \frac{3}{2} v_{obr} a_n + \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} \right) v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (a_n + da_{vn}) v_{obr}}{a_n}}{v_{obr}} \right) \\
& + da_{tn} \left/ dm + \left(-\frac{1}{3} a_n^3 - \frac{1}{24} a_v^3 + \frac{1}{6} da_{rn}^3 \right. \right. \\
& + \frac{1}{2} da_{rn} (a_n + da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} \right) + \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} \right)^2 \\
& - \frac{1}{2} a_n da_{tn}^2 + \frac{1}{6} da_{tn}^3 - \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right) \\
& + \frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 + \frac{1}{2} da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn}) \\
& \left. \left. - \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right)^2 \right) / (v_{obr} dm^2) \right.
\end{aligned}$$

>

Случай 2

> **t_rc2:=t_accel_r+dt_porez+dt_rev+dt_rev2r+dt_obr2+t_torm_r;**

$$\begin{aligned}
 t_{rc2} := & \frac{m0 - mn}{dm} + \frac{3 a_v}{2 dm} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + dt_{porez} - \frac{da_{rn}}{dm} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n} \\
 & + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n} + \left(s_{nach} + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} \right) \\
 & + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{\left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} + v_{oi} dt_{porez} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} \\
 & + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{vn} da_{rn}^2}{dm^2} \\
 & + \frac{1}{6} \frac{da_{rn}^3}{dm^2} \\
 & + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n} \right)}{dm} \\
 & + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{a_n}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{dm a_n} \right)^2 - \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} \\
 & + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} + \frac{v_{obr} a_n}{dm} \\
 & - \left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right) \\
 & - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn})}{dm^2} \\
 & - \left. \frac{1}{2} \frac{a_n da_{tn}^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_{tn}^3}{dm^2} \right) / v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} + \frac{da_{tn}}{dm}
 \end{aligned}$$

> **simplify(t_rc2);**

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{24} (-12 a_v da_{rn}^3 da_{vn} + 12 a_v da_{rn}^2 da_{vn}^2 + 12 a_v a_n^2 da_{rn}^2 - 3 a_v da_{tn}^4 \\
 & + 72 a_v v_{obr}^2 dm^2 + 4 da_{tn}^3 a_v a_n - a_v^4 a_n + 24 a_v^2 v_{oi} dm a_n \\
 & + 7 a_n^4 a_v + 24 v_{oi} dt_{porez} dm^2 a_v a_n + 24 a_n v_{oi}^2 dm^2 \\
 & + 12 da_{vn} da_{rn}^2 a_v a_n + 4 da_{rn}^3 a_v a_n \\
 & - 12 da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v a_n^2 - 6 da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v da_{rn}^2 \\
 & + 24 dm a_v a_n v_{obr} m0 - 24 dm a_v a_n v_{obr} mn + 36 a_v^2 dm a_n v_{obr} \\
 & + 48 v_{oi} dm^2 a_n v_{obr} + 24 dt_{porez} dm^2 a_v a_n v_{obr} \\
 & - 24 da_{rn} dm a_v a_n v_{obr} + 48 a_v v_{obr} dm da_{rn} da_{vn} \\
 & - 24 a_v v_{obr} dm da_{rn}^2 - 24 a_v a_n^2 da_{rn} da_{vn} + 12 a_v v_{obr} dm da_{tn}^2 \\
 & + 3 a_v da_{rn}^4 + 12 da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v v_{obr} dm \\
 & + 12 da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) a_v da_{rn} da_{vn} + 24 s_{nach} dm^2 a_v a_n \\
 & + 24 v_{obr} a_n^2 dm a_v) / (dm^2 a_v a_n v_{obr})
 \end{aligned}$$

> **collect(t_rc2, dm);**

$$\begin{aligned}
& 2 \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + dt_{porez} + \left(m0 - mn \right. \\
& + \frac{3}{2} a_v + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} - da_{rn} + \frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \\
& + \left(a_v v_{oi} + \frac{3}{2} v_{obr} a_n + \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) v_{obr} \right. \\
& + \left. \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) v_{obr}}{a_n} \right) / v_{obr} + da_{tn} \Big) / dm + \left(-\frac{1}{3} a_n^3 - \frac{1}{24} a_v^3 \right. \\
& + \frac{1}{6} da_{rn}^3 + \frac{1}{2} da_{rn} (da_{rn} - 2 da_{vn}) \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right) \\
& + \frac{1}{2} a_n \left(-a_n + \frac{1}{2} \frac{da_{rn} (2 da_{vn} - da_{rn})}{a_n} \right)^2 - \frac{1}{2} a_n da_{tn}^2 + \frac{1}{6} da_{tn}^3 \\
& - \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right) + \frac{1}{2} da_{vn} da_{rn}^2 \quad v_{obr} dm^2) \\
& + \left. \frac{1}{2} da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn}) - \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right)^2 \right) / (
\end{aligned}$$

>

Случай 3> **t_rc3:=t_accel_r+dt_porez+dt_rev+dt_rev3r+dt_obr3+t_torm_r;**

$$\begin{aligned}
t_{rc3} := & \frac{m0 - mn}{dm} + \frac{3}{2} \frac{a_v}{dm} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + dt_{porez} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{a_n}{dm} + \left(s_{nach} + \frac{1}{3} \frac{a_v^3}{dm^2} \right. \\
& + \frac{1}{2} \frac{a_v^2 \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)}{dm} + \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{\left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) a_v}{dm} \\
& + v_{oi} dt_{porez} + \frac{a_v v_{oi}}{dm} + \left(v_{oi} - \frac{1}{2} \frac{a_v^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right) \\
& - \frac{1}{2} a_v \left(\frac{v_{oi}}{a_v} - \frac{1}{2} \frac{a_v}{dm} \right)^2 + \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} \right)^2 - \frac{\left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) a_n}{dm} \\
& + \frac{1}{6} \frac{a_n^3}{dm^2} + \frac{v_{obr} a_n}{dm} \\
& - \left(-v_{obr} + \frac{1}{2} \frac{a_n^2}{dm} \right) \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right) \\
& - \frac{1}{2} a_n \left(\frac{v_{obr}}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn})}{dm^2} \\
& \left. - \frac{1}{2} \frac{a_n da_{tn}^2}{dm^2} + \frac{1}{6} \frac{da_{tn}^3}{dm^2} \right) / v_{obr} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} + \frac{da_{tn}}{dm}
\end{aligned}$$

> **simplify(t_rc3);**

$$\frac{1}{24} (24 dm a_v a_n v_{obr} m0 - 24 dm a_v a_n v_{obr} mn + 36 a_v^2 dm a_n v_{obr} + 48 v_{oi} dm^2 a_n v_{obr} + 24 dt_{porez} dm^2 a_v a_n v_{obr} + 72 a_v v_{obr}^2 dm^2 + 48 v_{obr} a_n^2 dm a_v - 3 a_v da_{tn}^4 + 4 da_{tn}^3 a_v a_n - a_v^4 a_n + 24 a_v^2 v_{oi} dm a_n - 2 a_n^4 a_v + 24 v_{oi} dt_{porez} dm^2 a_v a_n + 24 a_n v_{oi}^2 dm^2 + 24 s_{nach} dm^2 a_v a_n + 12 a_v v_{obr} dm da_{tn}^2) / (a_v a_n dm^2 v_{obr})$$

> **collect(t_rc3, dm);**

$$2 \frac{v_{obr}}{a_n} + dt_{porez} + \frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + \frac{m0 - mn + \frac{3}{2} a_v + \frac{a_v v_{oi} + v_{obr} a_n}{v_{obr}} + a_n + da_{tn} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n}}{dm} + \left(-\frac{1}{24} a_v^3 - \frac{5}{24} a_n^3 - \frac{1}{2} a_n da_{tn}^2 + \frac{1}{6} da_{tn}^3 - \frac{1}{2} a_n^2 \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right) - \frac{1}{2} a_n \left(-\frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} \right)^2 + \frac{1}{2} da_{tn}^2 (2 a_n - da_{tn}) \right) / (v_{obr} dm^2)$$

>

Без учета рывка

>

t_rc_nr := t_accel_nr + dt_porez + dt_rev_t_nr + dt_rev_r_nr + dt_obr_nr + t_torm_nr;

$$t_{rc_nr} := 2 \frac{v_{obr}}{a_n} + dt_{porez} + \frac{s_{nach} + \frac{v_{oi}^2}{a_v} + \frac{v_{obr}^2}{a_n} + v_{oi} dt_{porez}}{v_{obr}} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v}$$

>

Все переходные процессы

Суммарное время (случай 1)

С учетом рывка

> **t_pp_r1 := t_accel_r + t_rev_r1 + t_torm_r;**

$$t_{pp_r1} := \frac{m0 - mn}{dm} + \frac{3}{2} \frac{a_v}{dm} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + \frac{da_{rn}}{dm} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} + \frac{da_{tn}}{dm}$$

> **simplify(t_pp_r1);**

$$\frac{1}{2} (2 a_v a_n m0 - 2 a_v a_n mn + 3 a_v^2 a_n + 4 v_{oi} dm a_n + 2 da_{rn} a_v a_n + 4 v_{obr} dm a_v + da_{vn}^2 a_v + a_n^2 a_v + da_{tn}^2 a_v) / (dm a_v a_n)$$

> **collect(t_pp_r1, dm);**

$$2 \frac{v_{oi}}{a_v} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n}$$

$$+ \frac{m0 - mn + \frac{3}{2} a_v + \frac{1}{2} a_n + da_{rn} + da_{tn} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n}}{dm}$$

Без учета рывка

```
> t_pp_nr:=t_accel_nr+t_rev_nr+t_torm_nr;
```

$$t_{pp_nr} := 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n}$$

Разность

```
> dt_pp1:=t_pp_r1-t_pp_nr;
```

$$dt_{pp1} := \frac{m0 - mn}{dm} + \frac{3}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{da_{rn}}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} + \frac{da_{tn}}{dm}$$

```
> simplify(dt_pp1);
```

$$\frac{1}{2} \frac{2 a_n m0 - 2 a_n mn + 3 a_v a_n + 2 da_{rn} a_n + da_{vn}^2 + a_n^2 + da_{tn}^2}{dm a_n}$$

Приведение подобных членов относительно dm

```
> collect(dt_pp1, dm);
```

$$\frac{m0 - mn + \frac{3}{2} a_v + da_{rn} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} + \frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} + da_{tn}}{dm}$$

>

Анализ (случай 1) - попытка

>

Предел при dm=infinity

```
> dt_pp1_lim:=limit(dt_pp1, dm=infinity);
```

$$dt_{pp1_lim} := 0$$

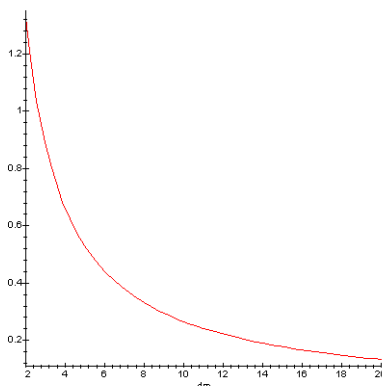
Подстановка конкретных значений

```
> s_dt_pp1:=subs(da_vn=a_v-2*m0, da_rn=a_n-(a_v-2*m0), da_tn=a_n-m0,
m0=.1, mn=.05, a_v=1, a_n=.8, v_oi=.9, dt_pp1);
```

$$s_{dt_pp1} := \frac{2.656250000}{dm}$$

Построение графика

```
> with(plots):
> plot(s_dt_pp1, dm=2..20);
```



```
> collect(dt_pp1/subs(dm=10*dm, dt_pp1), dm);
```


$$\left(m0 - mn + \frac{3}{2} a_v + da_{rn} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} + \frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} + da_{tn} \right) / \left(\frac{1}{10} m0 - \frac{1}{10} mn + \frac{3}{20} a_v + \frac{1}{10} da_{rn} + \frac{1}{20} \frac{da_{vn}^2}{a_n} + \frac{1}{20} a_n - \frac{1}{20} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} + \frac{1}{10} da_{tn} \right)$$

> `simplify(dt_pp1/subs(dm=10*dm, dt_pp1));`
10

>

Отношение dt_pp1/t_pp_nr

> `rdt_pp1:=dt_pp1/t_pp_nr;`

$$rdt_pp1 := \frac{\frac{m0 - mn}{dm} + \frac{3}{2} \frac{a_v}{dm} + \frac{da_{rn}}{dm} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{dm a_n} + \frac{1}{2} \frac{a_n}{dm} - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{dm a_n} + 2 \frac{v_{oi}}{a_v} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n}}{2 \frac{v_{oi}}{a_v} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n}}$$

Приведение подобных членов относительно dm

> `collect(rdt_pp1, dm);`

$$\frac{m0 - mn + \frac{3}{2} a_v + da_{rn} + \frac{1}{2} \frac{da_{vn}^2}{a_n} + \frac{1}{2} a_n - \frac{1}{2} \frac{da_{tn} (2 a_n - da_{tn})}{a_n} + da_{tn}}{\left(2 \frac{v_{oi}}{a_v} + 2 \frac{v_{obr}}{a_n} \right) dm}$$

>

Подстановка конкретных значений

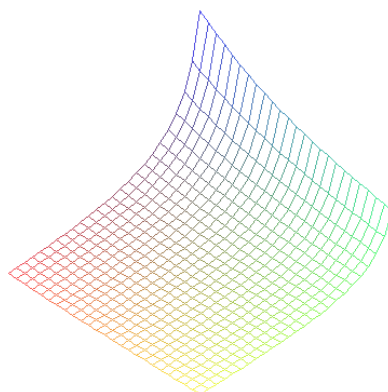
> `s_rdt_pp1:=subs(da_vn=a_v-2*m0, da_rn=a_n-(a_v-2*m0), da_tn=a_n-m0, m0=.1, mn=.05, a_v=1, a_n=.8, v_oi=.9, rdt_pp1);`

$$s_rdt_pp1 := \frac{2.656250000}{dm (1.8 + 2.500000000 v_{obr})}$$

Построение графика

> `with(plots):`

> `plot3d(s_rdt_pp1, dm=2..20, v_obr=.1..1);`



Определение производной (нахождение экстремума)

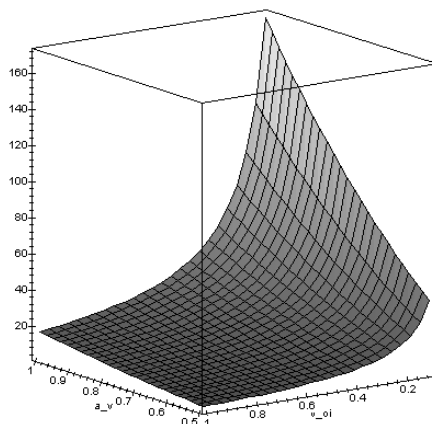
> `dif_t_pp_r1:=collect(diff(t_pp_r1, dm), dm);`

>

Представим зависимость `dm_sacc_r` (соответствующего 5%) от заданной скорости и ускорения в виде графика

> `dm_sacc_r;`

$$17. \frac{a_v^2}{v_{oi}}$$

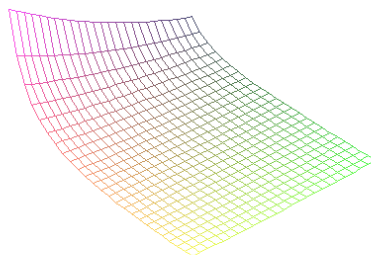
> `plot3d(subs(m0=.1, mn=.05, dm_sacc_r), a_v=.5..1, v_oi=.1..1);`

>

Представим зависимость `dm_acc_r` (соответствующего 5%) от заданной скорости и ускорения в виде графика

> `dm_acc_r;`

$$17. \frac{a_v (m0 - 1. mn + a_v)}{v_{oi}}$$

> `plot3d(subs(m0=.1, mn=.05, dm_acc_r), a_v=.5..1, v_oi=.1..1);`

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Выбираем значение `dm=25`

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

>

>

Влияние рывка на процессы в приводе

>

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Увеличение длительности разгона

>

