

А.И. Сафонов  
Л.Г. Филипова

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

Учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы  
для студентов специальности  
1-36 01 07 "Гидропневмосистемы мобильных  
и технологических машин"

*Рекомендовано учебно-методическим объединением  
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию  
в области транспорта и транспортной деятельности*

УДК 62–82+62–85

Составители:  
Сафонов А.И., Филипова Л.Г.

Рецензенты  
А.С. Поварехо, Г.А. Дыко

Пособие предназначено для выполнения курсовой работы по дисциплине «Математическое моделирование производственных процессов». В пособии изложены общие требования к выполнению работы, правила оформления пояснительной записки, примерная тематика курсовых работ, некоторые рекомендации к определению входных и внутренних параметров объектов моделирования, примеры программного описания математических моделей, а также приводится перечень рекомендуемой литературы.

## **В в е д е н и е**

«Математическое моделирование» относится к специальным дисциплинам в подготовке инженеров-механиков по специальности 1 - 36 01 07 «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин». Основной целью данной дисциплины является изучение методов построения и анализа математических моделей машин, технических устройств, механизмов и систем. В ходе обучения предусмотрено выполнение курсовой работы для закрепления полученных студентами теоретических знаний и практических навыков при выполнении лабораторных работ.

В пособии изложены общие требования к выполнению курсовой работы, правила оформления пояснительной записки. Представлены отдельные методики расчетов конструктивных параметров. Приводится список рекомендуемой литературы для более детального изучения вопросов, связанных с выполнением курсовой работы.

# 1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

## 1.1 Структура и содержание пояснительной записки

Пояснительная записка должна состоять из следующих составных частей (в содержании и в заголовках нумеруются только те разделы, которые пронумерованы в указанном ниже перечне):

Титульный лист.

Подписанное задание на курсовую работу.

Реферат.

Содержание.

Введение.

1. Цель и задачи моделирования.
2. Конструктивная схема и описание объекта моделирования.
3. Расчетная схема объекта моделирования, характеристики объекта моделирования и окружающей среды.
4. Математическое описание объекта моделирования, начальные и граничные условия.
5. Алгоритм реализации задачи.
6. Программная реализация задачи.
7. Исходные данные для моделирования.
8. Результаты расчета и их анализ.

Литература.

Пример оформления **титульного листа** представлен на рисунке 1.

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра "Гидропневмоавтоматика и гидропневмопривод"

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

к курсовой работе

по дисциплине "*Наименование дисциплины*"

***ТЕМА КУРСОВОЙ РАБОТЫ В СООТВЕТСТВИИ С ЗАДАНИЕМ***

Выполнил: ст. группы № *группы*

*Ф.И.О. студента*

Консультант: учебная степень, ученое звание

*Ф.И.О. консультанта*

Минск 20\_\_

Рисунок 1 – Пример оформления титульного листа

**Реферат** должен содержать:

- сведения об объеме пояснительной записки, количестве иллюстраций, таблиц, приложения, использованных источников;
- перечень ключевых слов;
- текст реферата.

Перечень ключевых слов должен включать от 5 до 15 слов или словосочетаний из текста пояснительной записки, которые в наибольшей мере характеризуют ее содержание, обеспечивают возможность информационного поиска. Ключевые слова приводят в именительном падеже и печатают прописными буквами в строку через запятые.

Текст реферата должен отражать:

- объект исследования или разработки;
- цель работы;
- метод и методологию проведения работы;
- результаты работы;
- основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики;
- область применения.

Пример структуры реферата представлен на рисунке 2.

**Содержание** включает введение, наименование всех разделов, подразделов, пунктов (если они имеют наименование), заключение, список используемых источников с указанием номеров страниц, с которых начинаются эти элементы.

## Реферат

пояснительная записка 85 с. , 24 рис., 50 источников.

### РАСХОДОМЕРНЫЕ УСТАНОВКИ, ПОРШНЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ, ТАХО МЕТРИЧЕСКИЕ РАСХОДОМЕТРЫ, ИЗМЕРЕНИЕ БОЛЬШИЕ РАСХОДЫ, ГАЗЫ

Объектом исследования являются поршневые установки для точного воспроизведения и измерения больших расходов газа.

Цель работы – разработка методики метрологических исследований установок и нестандартной аппаратуры их осуществления.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования отдельных составляющих и общей погрешности установок.

В результате исследования впервые были созданы две поршневые реверсивные расходомерные установки: первая на расходы до 0,07 м<sup>3</sup>/с, вторая – до 0,33 м<sup>3</sup>/с.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокая точность измерения при больших значениях расхода газа.

Обе установки могут применяться для градуировки и поверки промышленных ротационных счетчиков газа, а также тахометрических расходометров.

#### Рисунок 2 – Пример реферата

В ходе подготовки **первого раздела** студент ставит цели и задачи моделирования.

При разработке **второго раздела** курсовой работы студент должен знакомиться с объектом моделирования, привести схемные решения, объясняющие принцип работы, анализирует существующие варианты конструкции гидро(пнеumo)систем аналогичных моделируемой. Дается описание объекта моделирования, анализируются особенности, недостатки и преимущества.

В **третьем разделе** приводится расчетная схема объекта моделирования, характеристики объекта моделирования и окружающей среды.

В четвертом разделе на основании изложенного в предыдущих разделах приводится математическое описание объекта моделирования, определяются начальные и граничные условия.

В пятом разделе необходимо привести алгоритм реализации задачи.

В шестом разделе студент приводит программную реализацию задачи моделирования.

В седьмом разделе должны быть приведены исходные данные для моделирования. Необходимо обратить внимание, что все значения используемых величин приводятся в системе СИ. При необходимости в круглых скобках рядом с основным значением может быть указано значение параметра в несистемных (например, принятых в инженерной практике) единицах измерения.

В восьмом разделе должны быть представлены результаты расчета и их анализ. Результаты расчета приводятся в виде графиков, которые выполняются в соответствии с нормативно-технической документацией.

## 2 ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

Текст набирается шрифтом *Times New Roman*. Межстрочный интервал – 1,5. Поля: правое – 10 мм, верхнее – 20 мм, левое и нижнее – 20 мм. Разрешается использовать компьютерные возможности акцентирования внимания на определенных темах, формулах, теоремах, применяя шрифты разной гарнитуры.

Наименование структурных элементов записки "Реферат", "Содержание", "Введение", "Заключение", "Список использованных источников" служат заголовками структурных элементов отчета. Каждый структурный элемент следует начинать с нового листа (страницы). "Содержание" электронного варианта пояснительной записки верстается автоматически.

**Основную часть** пояснительной записки следует делить на **разделы**, подразделы и пункты. Наименование разделов должно полностью соответствовать заданию на курсовую работу. Пункты, при необходимости, могут делить на подпункты. Каждый раздел следует начинать с нового листа (страницы). Следует избегать ситуации, когда на странице в конце раздела располагаются до 3 строк.

Разделы, подразделы, пункты и подпункты следует нумеровать арабскими цифрами и записывать с абзацного отступа. Разделы должны иметь порядковую нумерацию в разделах всего текста. Номер подраздела или пункта включает номер раздела и порядковый номер подраздела или пункта, разделенные точкой. Номер подпункта включает номер раздела, подраздела, пункта и порядковый номер подпункта, разделенные точкой. После номера раздела, подраздела, пункта и подпункта в тексте точку не ставят.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты, как правило, заголовков не имеют. Заголовки разделов, подразделов и пунктов следует начи-



нать с абзаца с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

**Нумерация страниц** – в правой верхней части листа без точки. Титульный лист включают в общую нумерацию, однако номер страницы на титульном листе не проставляют.

**Иллюстрации** следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые, или на следующей странице. Допускается выполнение чертежей, графиков, диаграмм, схем посредством использования компьютерной печати. Нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если рисунок один, то он обозначается "Рисунок 1". Слово "Рисунок" и его наименование располагаются посередине строки. Допускается нумеровать иллюстрации в пределах раздела. В этом случае номер иллюстрации состоит из номера раздела и порядкового номера иллюстрации, разделенных точкой. Например, Рисунок 1.1 Иллюстрации, при необходимости, могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисовочный текст).

Слово "Рисунок" и наименование помещают после пояснительных данных, например: Рисунок 1 – Детали прибора. При ссылках на иллюстрации следует писать "... в соответствии с рисунком 2" при сквозной нумерации и "... в соответствии с рисунком 1.2" при нумерации в пределах раздела.

Название **таблицы** должно быть точным, кратким. Его следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире. Таблицу следует располагать непосредственно после текста, в котором она упоминается впервые, или на следующей странице. При ссылке следует писать слово "таблица" с указанием ее номера.

Таблицу с большим количеством строк допускается переносить на другой лист (страницу). При переносе части таблицы на другой лист (страницу) слово "Таблица" и номер ее указывают один раз слева над первой частью таблицы, над другими частями пишут слово "Продолжение" и указывают номер таблицы, например: "Продолжение таблицы 1", с выравниванием по правой границе.

Таблицы следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

Заголовки граф и строк следует писать в единственном числе с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной, если они имеют самостоятельное значение. Допускается применять шрифт в таблице меньший, чем в тексте. Разделять заголовки и подзаголовки боковика и граф диагональными линиями не допускается. Головка таблицы должна быть отделена линией от остальной части таблицы.

**Уравнения и формулы** следует выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки. Пояснение значений символов и числовых ко-

эффициентов следует проводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Нумерация формулы в отчете – порядковая в пределах всего отчета, арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке. Ссылка в тексте на порядковые номера формул дают в скобках. Пример - ... в формуле (1). Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из раздела и порядкового номера формулы, разделенных точкой, например (3.1). Допускается выполнение формул рукописным способом.

**Ссылаться (на литературу)** следует на документ в целом или его разделы и приложения. Ссылки на подразделы, пункты, таблицы и иллюстрации не допускается, за исключением подразделов, пунктов, таблиц и иллюстраций данного документа. Ссылки на иллюстрированные источники следует приводить в квадратных скобках.

Сведения об использованных источниках (литература) нумеруются арабскими цифрами без точки и печатаются с абзачного отступа.

**Не допускается оформление** пояснительной записки в виде рукописного текста.

### 3 ТЕМЫ КУРСОВЫХ РАБОТ

**В качестве тем курсовых работ** предлагается разработка наиболее распространенных в различных отраслях видов гидро- или пневмосистем с учетом тенденций их совершенствования. В задании на проектирование конкретной гидро- или пневмосистемы указываются технические характеристики объекта управления. Ниже представлена примерная тематика работ.

1. Моделирование плавности хода трактора.
2. Моделирование плавности хода трехосного автомобиля.
3. Моделирование плавности хода большегрузного автомобиля.
4. Моделирование колебаний на сидении водителя трактора ХТЗ.
5. Моделирование питающей части пневматической системы трактора.
6. Моделирование питающей части пневматической системы большегрузного автомобиля.
7. Моделирование пневматической тормозной системы прицепного состава, выполненной по однопроводной схеме.
8. Моделирование пневматической тормозной системы прицепного состава, выполненной по двухпроводной схеме.
9. Моделирование пневматической тормозной системы трактора.
10. Моделирование пневматической тормозной системы большегрузного автомобиля.
11. Моделирование питающей части пневматической системы троллейбуса.
12. Моделирование гидравлической тормозной системы грузового автомобиля.

13. Моделирование гидравлической системы подъема грузовой платформы автомобиля.
14. Моделирование гидронавесной системы трактора.
15. Моделирование плавности хода двухосного троллейбуса, оборудованного подвеской на обоих мостах.
16. Моделирование плавности хода двухосного троллейбуса, оборудованного подвеской на заднем мосту.
17. Моделирование плавности хода двухосного троллейбуса, оборудованного подвеской на переднем мосту.
18. Моделирование пневматического привода тормозной системы троллейбуса.
19. Моделирование пневматической тормозной системы прицепа сочлененного троллейбуса, выполненной по двухпроводной системе.
20. Моделирование гидравлической тормозной системы легкового автомобиля.
21. Моделирование гидравлической тормозной системы легкового автомобиля АЗЛК (Москвич).
22. Моделирование гидравлической системы подъема грузовой платформы автомобиля.
23. Моделирование колебаний на сидении водителя трактора МТЗ.
24. Моделирование трансмиссии трактора.
25. Моделирование трансмиссии большегрузного автомобиля.
26. Моделирование питающей части гидропривода трактора.
27. Моделирование гидропривода сцепления грузового автомобиля.
28. Моделирование гидропривода управление валом отбора мощности трактора Т-150К.
29. Моделирование гидропривода сцепления легкового автомобиля ВАЗ.
30. Моделирование гидропривода сцепления трактора.
31. Моделирование гидропривода поворота платформы одноковшового экскаватора.
32. Моделирование питающей части гидросистемы большегрузного автомобиля.
33. Моделирование гидропривода ходовой части одноковшового экскаватора.
34. Моделирование гидропривода главного движения протяжного станка.

## 4 РЕКОМЕНДАЦИИ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВХОДНЫХ И ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Методы математического моделирования технических объектов подробно рассмотрены в литературе [2; 3]. Однако весьма важным при разработке и рекомендации математических моделей, требующий более подробного описания, является процесс определения входных и внутренних параметров технических объектов, а именно:

- масс и моментов инерции, коэффициентов жесткости и демпфирования (трения);
- входных воздействий на систему в виде микронеровностей для систем поддрессоривания, нагрузок на исполнительные устройства, характеристик двигателей и т.п.;
- ограничений, прикладываемых на входные и выходные параметры.

Так при определении моментов инерции вращающихся масс (маховики, шестерни, валы) механических трансмиссий можно воспользоваться известной зависимостью:

$$J_a = \frac{1}{2} mR^2,$$

где  $m$ ,  $R$  – масса и радиус сплошного цилиндра.

Для определения момента инерции мобильной машины необходимого при математическом моделировании процесса разгона используется следующая зависимость:

$$J = m_1 \ell_1^2 + m_2 \ell_2^2,$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – часть массы машины, приходящаяся на передний и задний мост соответственно,  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  – расстояние от центра до передней и задней оси соответственно.

Коэффициенты трения скольжения (качения), зависящие от материалов контактирующих элементов определяются по справочной литературе или при имеющейся возможности экспериментальным путем в соответствии с известным выражением:

$$k = \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол наклона контактирующей поверхности, при котором начинается движение подвижного элемента.

Для определения коэффициентов линейных и нелинейных потерь в гидрوليнии используются уравнения

$$\mu_{\text{гл}} = \frac{25,2 \cdot \rho \cdot \nu \cdot l}{A},$$

$$\mu_{\text{тр}} = \frac{0,443 \cdot \lambda_{\text{т}} \cdot \rho \cdot l}{\sqrt{A}} + 0,5 \cdot \xi \cdot \rho,$$

где  $\rho, \nu, \lambda_{\text{т}}, \xi$  - плотность, кинематическая вязкость рабочей жидкости, а также коэффициенты шероховатости трубопровода и сопротивления (трения) по справочникам;

$l, A$  - длина и площадь сечения трубопровода.

Определить коэффициент жесткости гидравлического упругого элемента можно используя уравнение:

$$C_{\Gamma} = \frac{E}{l},$$

где  $E$  - модуль объемной упругости рабочей жидкости (для минеральной жидкости  $E \approx 1430$  МПа),  $l$  - длина трубопровода.

Одним из параметров описания внешнего воздействия на систему может являться расчетная схема и ее математическое описание механизма подъема кузова автомобиля-самосвала.

При расчете опрокидывающего механизма усилия на штоках телескопического гидроцилиндра в процессе подъема грузовой платформы определяют с использованием кинематической схемы опрокидывающего устройства. При этом можно оценить максимальный ход гидроцилиндра, необходимый для поворота платформы на заданный угол, а также диаметр и ход отдельных ступеней с целью обеспечения оптимального в процессе выдвижения ступеней.

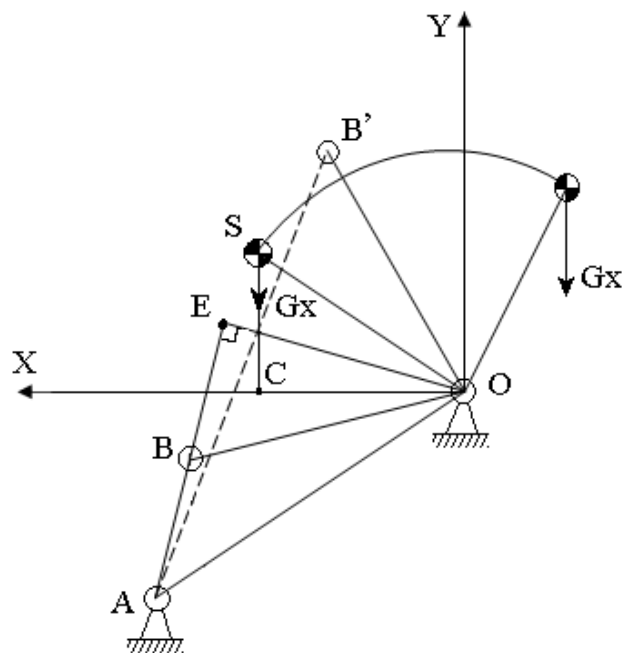


Рисунок 3 – Расчётная схема опрокидывающего механизма

Обычно принимается условие подъема кузова с равномерно распределённым насыпающимся грузом (например, при наливании груза на платформу). В этом случае гидросистема оказывается наиболее нагруженной.

Для кинематической схемы, в зависимости от углового перемещения платформы получены формулы для расчёта линейного перемещения поршня.

$$z = \sqrt{|BO|^2 + |AO|^2 - 2|BO||AO|\cos(\angle AOB_0 + \varphi)} - L_0,$$

$$\angle AOB_0 = \arccos \frac{|BO|^2 - L_0^2 + |AO|^2}{2|BO||AO|},$$

усилие гидроцилиндра

$$F_{\text{ц}} = \frac{G \sqrt{X_{\text{цм}}^2 + Y_{\text{цм}}^2} \cos \left( \varphi + \arctg \left( \frac{Y_{\text{цм}}}{X_{\text{цм}}} \right) \right)}{|AO| \sqrt{1 - \left( \frac{|AO|^2 + L_0^2 + z^2 - |BO|^2}{2L_0 + z|AO|} \right)^2}}$$

и минимально необходимой (теоретической) площади  $F_z$  поршня для преодоления нагрузки при максимальном давлении  $p_{\text{max}}$

$$F_x = \frac{G \sqrt{X_{\text{цм}}^2 + Y_{\text{цм}}^2} \cos \left( \varphi + \arctg \left( \frac{Y_{\text{цм}}}{X_{\text{цм}}} \right) \right)}{k p_{\text{max}} \eta_{\text{ц}} \eta_{\text{ом}} |AO| \sqrt{1 - \left( \frac{|AO|^2 + L_0^2 + z^2 - |BO|^2}{2L_0 + z|AO|} \right)^2}},$$

где  $G$  - вес платформы с грузом;

$X_{\text{цм}}, Y_{\text{цм}}$  - начальные координаты центра масс платформы с грузом по отношению к оси шарнира поворота платформы;

$L_0$  - расстояние между шарнирами цилиндра в начальном положении;

$|AO|$  - расстояние между осями поворота грузовой платформы и нижнего шарнира крепления гидроцилиндра;

$|BO|$  - расстояние между осью поворота платформы и осью верхнего шарнира крепления гидроцилиндра;

$p_{\text{max}}$  - максимальное давление в системе;

$\eta_{\text{ц}}, \eta_{\text{ом}}$  – КПД гидроцилиндра и механизма разгрузки;  
 $k$  – количество гидроцилиндров.

Примером ограничений, касающихся перемещений выходного звена (цилиндра) в результате его упругого взаимодействия с упором может служить следующий вариант описания позиционной нагрузки:

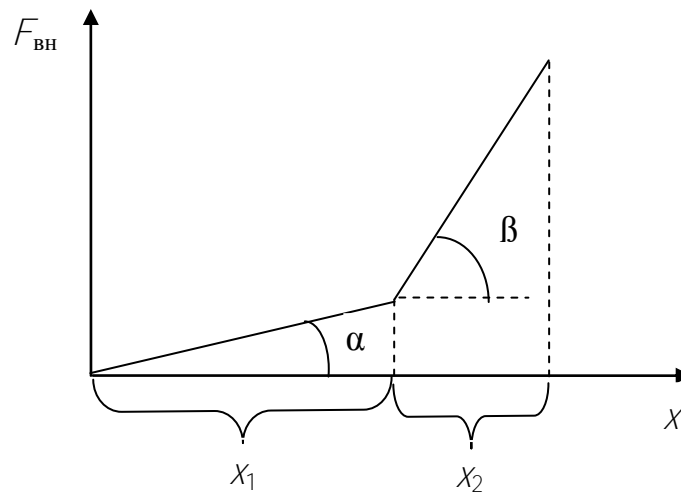


Рисунок 4 - Зависимость внешней силы (нагрузки) от положения выходного звена (поршня)

Математическое описание единой зависимости представленного следующими уравнениями:

$$\begin{cases} F_{\text{вн}} = c_1 \cdot x & \text{при } 0 < x < x_1 \\ F_{\text{вн}} = (c_1 + c_2) \cdot (x - x_1) & \text{при } x_1 < x < \infty \end{cases}$$

где  $x$  – рабочий ход (свободный ход штока тормозного цилиндра) выходного звена,  $x_1$  – зона упругой деформации материала,  $c_1$  – жесткость возвратной пружины,  $c_2$  – жесткость деформируемого материала.

Жесткость возвратной пружины и деформируемого материала определяется по известным зависимостям в ранее изученном материале по другим общетехническим дисциплинам.

## 5 ПРИМЕРЫ ПРОГРАММНОГО ОПИСАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

### Пример описания головной программы

```
program osnovn;
uses crt;
type mas=array[1..6] of real;
var
  {переменные}
  h,t      :real;
  i,n      :integer;
  y,f,hv   :mas;
  fw       :text;
  {Подключаемые процедуры описания системы уравнений, воздействий и
методов численных решений}
  {$i nelin} {$i fun} {$i rk4}

begin
  assign(fw,'rezult.dat');
  rewrite(fw);
  {ввод исходных и начальных данных}
  ....
  t:=0; h:=0.001; n:=4;
  ....
  repeat
    nelin(t,hv);
    rk4(n,h,t,y);
    write(fw,t:10:3);
    {организация цикла вывода результатов}
    for i:=1 to n do
      write(fw,y[i]:10:3);
      write(fw,f[3]:10:3,f[4]:10:3);
      writeln(fw);
      t:=t+h
    until (x>4);
  close(fw)
end.
```



### **Пример процедуры описания входного воздействия**

```
procedure nelin (x:real; var hv:mas);
begin
  h[1]:={входное воздействие по x}
  h[2]:={скорость изменения входного воздействия}
end;
```

### **Пример процедуры описания численного метода решения (Рунге-Кутта 4-го порядка)**

```
procedure rk4 (n:integer; h,x:real; var y:mas);
var
  i,j :integer;
  c2 :mas;
  k :array[1..4,1..8] of real;
  c1 :real;
begin
  for j:=1 to 4 do
    begin
      for i:=1 to n do
        begin
          case j of
            1: begin c1:=x; c2[i]:=y[i] end;
            2..3: begin c1:=x+h/2; c2[i]:=y[i]+k[j-1,i]/2 end;
            4: begin c1:=x+h; c2[i]:=y[i]+k[j-1,i] end
          end;
          end;
          fun(c1,c2,f);
          for i:=1 to n do
            k[j,i]:h*f[i]
          end;
          for i:=1 to n do
            y[i]:y[i]+(k[1,i]+2*(k[2,i]+k[3,i])+k[4,i])/6
          end;
        end;
```

### **Пример процедуры описания системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ)**

```
procedure fun (x:real; y:mas; var f:mas);
begin
  f[1]:=y[3];
  f[2]:=y[4];
  f[3]:={ż из 1-го уравнения};
  f[4]:={ÿ из 2-го уравнения}
end;
```

## Пример программирования математической модели трансмиссии автомобиля с фрикционными элементами

Расчетная схема и математическая модель трансмиссии приведены в лабораторном практикуме [1]

Головная программа

```
program transm;
uses crt;
type mas=array[1..6] of real;
var
  h,t,mu,c,J1,J2,J3,J4
  M1,M2,M3,Mf1,Mf2,
  m,Nst,fs,fi,fimax,
  rk,del,eps      :real;
  i,n,k           :integer;
  y,f             :mas;
  fw              :text;
  {$i sign}      {$i scep1}  {$i scep2}  {$i fun}  {$i rk4}
begin
  assign(fw,'transm.dat');
  rewrite(fw);
  n:=5; h:=0,0001; t:=0; eps:=0.001;
  m:=18000; fs:=0.018; rk:=0.447; fimax:=0.83; Nst:=99660;
  M1:=600*11.03;M2:=m*9.8*fs*rk; M3:=m*9.8*0.025*rk;
  J1:=166.8; J2:=7.3; J3:=45.8; J4:=3596.6;
  c:=116646; mu:=122;
  for i:=2 to n do y[i]:=0.001;
  y[1]:=30;

  repeat
    scep1(t,Mf1);
    del:=1-y[4]/y[3];

    {Ограничения}
    if y[3]<0.0 then del:=0.0;
    if del>1.0 then del:=1.0;
    if del<0.0 then del:=0.0;
    scep2(del,Mf2);
    rk4(n,h,t,y);
    write(fw,t:10:3);
    for i:=1 to n do
      write(fw,y[i]:20:5);
    write(fw,del:20:5);
    writeln(fw);
```

```

    t:=t+h
    until (t>3);
    close(fw)
end.

```

### **Система обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ)**

```

procedure fun(t:real; y:mas; var f:mas);
begin
    if ((y[1]-y[2])>eps) then
        begin
            f[1]:= (M1-Mf1)/J1;
            f[2]:= (Mf1-y[5]-mu(y[2]-y[3]))/J2
        end
        else
        begin
            f[2]:= (Mf1-y[5]-mu(y[2]-y[3]))/(J1+J2);
            f[1]:=f[2]
        end;
    f[3]:= (-M2*sign(y[3])+y[5]+mu*(y[2]-y[3])-Mf2)/J3;
    f[4]:= (Mf2-M3)/J4;
    f[5]:= c*(y[2]-y[3])
end;

```

### **Моделирование работы муфты сцепления автомобиля**

```

procedure scep1 (t:real; var Mf1:real);
begin
    Mf1:=M1*2*(1-exp(-5*t))
end;

```

### **Моделирование взаимодействия ведущих колёс с опорной поверхностью**

```

procedure scep2(del:real; var Mf2:real);
begin
    fi:=fimax*(1-exp(-13*del));
    Mf2:=rk*Nst*fi
end;

```

Результаты выполнения программы представляются в виде графиков скорости, буксования колёс и др. по указанию преподавателя.

## Литература

1. Сафонов А.И., Поварехо А.С., Новицкий С.Н. Математическое моделирование технических систем. Лабораторные работы (практикум) для студентов специальности «Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин». – Мн.: БНТУ, 2004.
2. Математическое моделирование технических устройств, механизмов и систем: Учебное пособие / А.И.Сафонов. – Мн.: БНТУ, 2005.
3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. – Мн.: Дизайн ПРО, 1997.
4. Атаманов Ю.Е., Богдан Н.В. Методическое пособие по курсу «Математические модели узлов и агрегатов трактора». В 3 ч. Ч.1. – Мн.: БПИ, 1992.
5. Метлюк Н.Ф., Автушко В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. – М.Ж Машиностроение, 1980.
6. Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. и др. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Мн.: Вышэйшая школа, 1985.

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| В в е д е н и е .....   | 3  |
| 1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ .....  | 4  |
| 2 ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ .....  | 8  |
| 3 ТЕМЫ КУРСОВЫХ РАБОТ .....   | 10 |
| 4 РЕКОМЕНДАЦИИ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВХОДНЫХ И<br>ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ<br>МОДЕЛИРОВАНИЯ ..... | 12 |
| 5 ПРИМЕРЫ ПРОГРАММНОГО ОПИСАНИЯ .....   | 16 |
| МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ .....   | 16 |
| Литература .....  | 20 |