

УДК 62-932.2

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН ПО УПРУГО-ФРИКЦИОННОЙ МОДЕЛИ.

Ширшов Андрей Геннадьевич

Студент 6 курса,

кафедра «Металлорежущие станки»

Московский государственный университет имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Чернянский П.М.,

доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки»

### Глава 1. Введение. Расчёт силовых смещений на стадии проектирования: существующие подходы и новые решения.

#### §1. Что такое силовые смещения и зачем их необходимо рассчитывать на стадии проектирования?

Во время работы машины или механической конструкции между деталями возникает силовое взаимодействие. При этом действуют следующие силы:

1. внешние силы, вызывающие деформации и смещение деталей;
2. силы упругого (реже неупругого) сопротивления деталей деформации;
3. силы трения в стыках деталей, которые влияют на величину смещений и деформаций.

Совместное влияние вышеперечисленных сил приводит к изменению положения конечного звена рабочего органа машины, от чего снижается качество её работы. Применительно к станку мы наблюдаем взаимные смещения заготовки и инструмента, что отрицательно сказывается на точности обработки.

Смещения (деформации) любой детали, происходящие под действием сил, называются силовыми смещениями (деформациями). Учёт силовых смещений при проектировании точных машин, особенно станков, имеет большое значение. Следовательно, расчёт величины силовых смещений необходимо проводить на стадии проектирования этих машин.

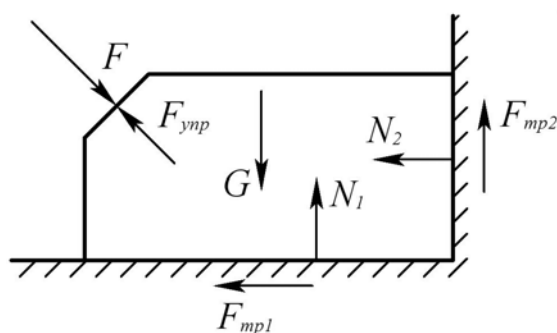


Рис. 1. Действующие силы.

#### §2. Анализ существующих подходов расчёта силовых смещений. Новые решения.

На сегодняшний день в мире учёт силовых смещений проводят путём анализа работы 3D моделей конструкций проектируемых машин под нагрузкой в САЕ программах. Работа таких программ основана на использовании метода конечных элементов (МКЭ), что позволяет учитывать только жёсткость деталей.

Однако использование физико-математической модели, учитывающей только жёсткость деталей, никогда не даст результатов, близких к тем, что будет получаться на практике. Например, известно, что основной вклад в величину силовых смещений вносят не деформации деталей, а деформации в стыках. Учёт только деформации в

стыках позволяет объяснить преимущества компоновочного решения принципиально новых станков — станков с линейной наладкой.

Кроме того, нельзя не учитывать силы трения, т.к. эти силы сопровождают смещения. Нет движения без трения. Деформация создаёт смещения. Сила трения не создаёт смещения, но влияет на его величину.

Совсем недавно удалось оценить удельное влияние каждой детали, стыка, шероховатости, вида обработки, компоновки, размера деталей на силовое смещение конечного звена рабочего органа машины (например, инструмента и заготовки). Это стало возможным благодаря теории силовых смещений, разработанной Чернянским П.М.

К сожалению, создание теории зачастую не означает её широкого применения на практике. Необходимо создать программный инструмент, с помощью которого проектировщик может исследовать силовые смещения в проектируемой конструкции, не вникая в глубины теории. При этом сам инструмент должен быть максимально доступен и удобен для всех.

Для создания программного инструмента необходимо преобразовать имеющуюся физико-математическую модель силовых смещений в вид, доступный для компьютерного моделирования. Данная работа была успешно проведена Ширшовым А.Г. Им была создана «Динара» — программное расширение для «МВТУ 3.7», аналога SimuLink (Разработчик «МВТУ 3.7» — кафедра Э7 («Ядерные реакторы и установки») МГТУ им. Н.Э.Баумана).

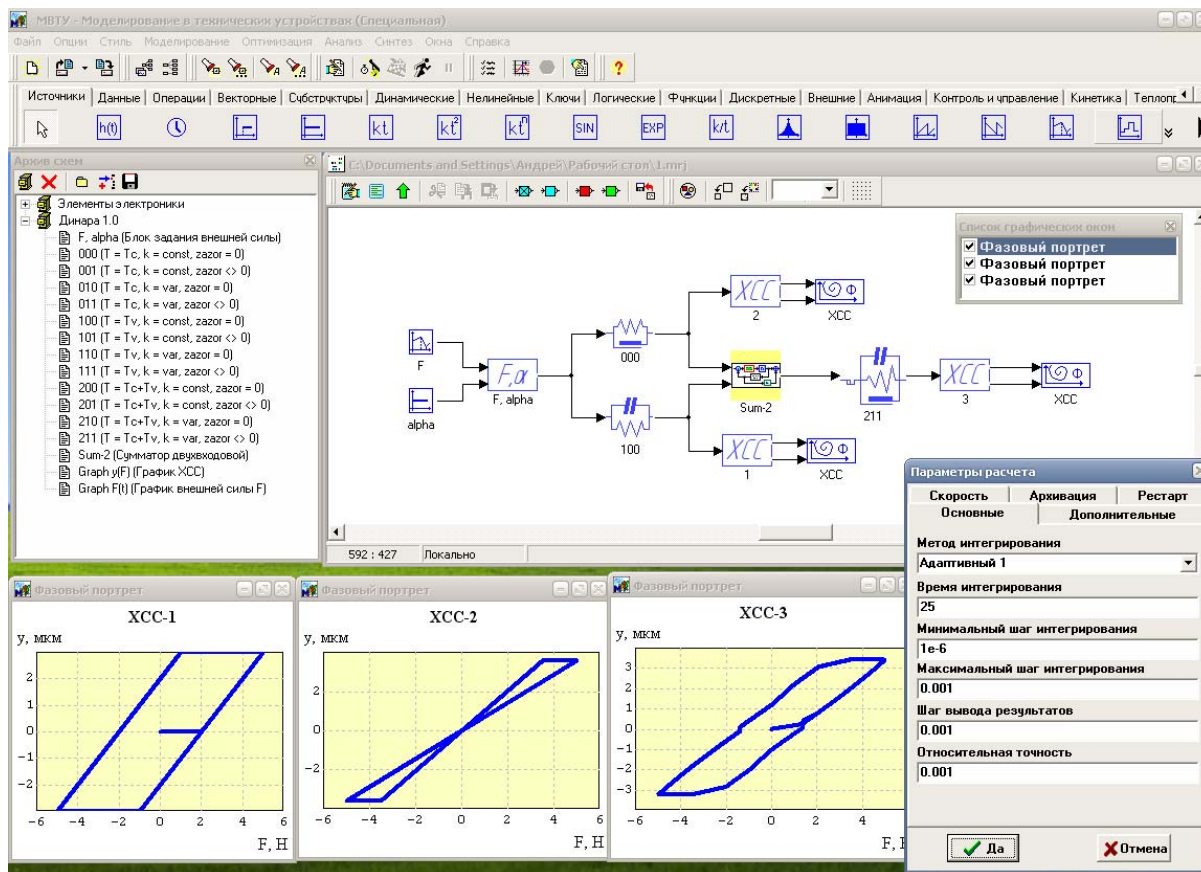


Рис. 2: Вид окна "МВТУ 3.7" + "Динара 1.0" в WindowsXP.

### §3. «Динара»: достижения и перспективы развития.

Программное расширение «Динара» представляет собой специализированную библиотеку блоков, позволяющую с помощью программы «МВТУ 3.7» моделировать работу упруго-фрикционной системы.

Необходимо отметить, что на текущий момент с помощью «Динары» можно изучать свойства не самой конструкции, а упруго-фрикционной системы, описывающей свойства рассматриваемой конструкции. Переход от конструкции к упруго-фрикционной системе осуществляется вручную. В дальнейшем планируется сделать возможным проводить компьютерный анализ непосредственно конструкции, базирующийся на упруго-фрикционной модели силовых смещений.

В самой теории силовых смещений используется одна единственная формула (см. также рис. 3):

$$y = \frac{F_{in} \pm F_{mp}}{k}, \quad (1)$$

где:

$F_{in}$  — проекция внешней силы  $F$  на плоскость стыка, Н,

$F_{тр}$  — сила трения (в стыке), Н,

$k$  — жёсткость деформируемой детали, Н/мкм,

$y$  — силовое смещение, мкм.

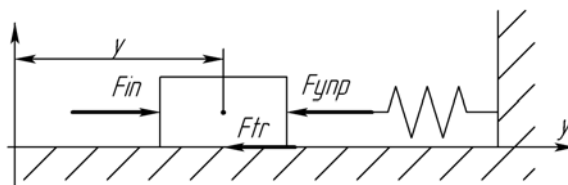


Рис. 3: К определению смещения  $y$ .

Если сила  $F_{in}$  и жёсткость  $k$  заранее известны, то для того, чтобы правильно определить силу трения  $F_{тр}$ , необходимо глубокое понимание физических процессов, происходящих в упруго-фрикционной системе. Попытки формализовать рассуждения, применяемые при определении величины силы трения, приводили к громоздким алгоритмам, надёжность которых вызывала сомнения.

В процессе длительных исследований поведения силы трения, автором «Динары» был обнаружен принцип, позволяющий вычислять силовые смещения упруго-фрикционной системы, не вдаваясь в физическую картину происходящего. Найденный принцип, формулируемый как «в пределах  $2T$  смещения нет» (здесь  $T$  — максимальная величина силы трения) позволил заменить сложные и ненадёжные алгоритмы тремя строками кода, которыми удалось охватить всё многообразие физических явлений, происходящих в рамках упруго-фрикционной системы.

Разработка программного продукта «Динара» — первый шаг в создании САЕ программ нового поколения, которые учитывают трение и жёсткость стыков наряду с жёсткостью деталей и позволяют проводить моделирование физических процессов с максимальным приближением к реальной физической картине. Впереди ещё много работы, но первые шаги уже сделаны.

## Глава 2. Основные понятия теории силовых смещений.

### §1. Введение в теорию силовых смещений.

Для эффективного использования программы «МВТУ 3.7» с расширением «Динара» (далее кратко «МВТУ 3.7» + «Динара»), необходимо иметь представление о физических процессах, которые имеют место при силовом нагружении механической системы.

При силовом взаимодействии деталей возникают силы упругости и силы трения. В определённых случаях могут возникать пластические деформации. Силы упругости приводят к смещениям. Силы трения не вызывают смещений, но влияют на его величину.

Силы упругости характеризуют упругие свойства механической системы. Силы трения и явления пластических деформаций характеризуют неупругие свойства этой системы.

Согласно законам термодинамики, не существует обратимых процессов без потерь. Деформации и потери на трение неразделимы. Этот факт позволяет рассматривать механическую систему как упруго-фрикционную, а также выделить составную часть этой системы, называемой модулем.

Модуль — это составная часть упруго-фрикционной системы, которая объединяет силы упругого и неупругого сопротивления, взаимодействующие между собой в некоторой ограниченной области механической системы. Например, модуль может описывать действие сил упругости и сил трения в стыке двух сопряжённых тел, одно из которых подвергается упругой деформации. В некоторых случаях может наблюдаться только упругое сопротивление (например, при упругой деформации выступающей части резца).

Если явление трения и неупругого сопротивления при пластическом деформировании, а также упругого сопротивления при упругом деформировании — это «атомы» упруго-фрикционной модели, то модуль — это уже «молекула». Как молекула вещества проявляет свойства самого вещества, так и модуль упруго-фрикционной системы проявляет свойства самой системы. Из молекул складывается вещество. Из модулей складывается упруго-фрикционная система. Изучив свойства конкретной упруго-фрикционной системы, мы будем хорошо представлять поведение при нагружении любой конструкции, которая может быть описана рассматриваемой системой.

## §2. Внешняя сила и её проекции.

Внешняя сила  $F$  — это сила, которая приложена к системе рассматриваемых и сопряжённых (физически контактируемых) тел извне.

Для проведения расчётов и анализа упруго-фрикционной системы удобно использовать проекции силы  $F$  (см. рис. 4):

- $F_{in}$  — проекция силы  $F$  на плоскость, касательную к поверхности стыка в точке приложения силы  $F$ :

$$F_{in} = F \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

- $N$  — проекция силы  $F$  на плоскость, перпендикулярную направлению силы  $F_{in}$ :

$$N = F \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

Используемый в расчётах угол  $\alpha$  называется углом наклона внешней силы к плоскости стыка. Знание угла  $\alpha$  позволяет устанавливать зависимости между силами  $F$ ,  $F_{in}$  и  $N$ :

$$\cos(\alpha) = \frac{F_{in}}{F} \quad (4)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{N}{F} \quad (5)$$

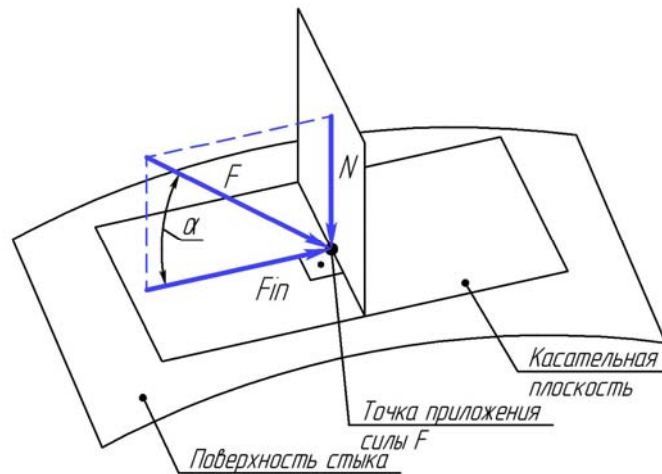


Рис. 4. Сила F и её проекции.

### §3. Сила упругости. Понятие жёсткости.

Когда к телу прикладывается сила, оно начинает деформироваться. Если напряжения, возникающие в рассматриваемом теле во время его деформации, не достигают предела текучести, то силовые деформации этого тела являются упругими и исчезают при снятии нагрузки. Силы сопротивления со стороны тела в этом случае носят характер упругого сопротивления и называются силами упругости. При чисто упругом взаимодействии тел силы упругости исчезают при снятии нагрузки. При наличии трения силы упругости при снятии нагрузки могут исчезать, а могут и оставаться.

Жёсткость — это физическая величина, характеризующая способность тела или конструкции сопротивляться упругой деформации. Жёсткость численно равна отношению силы упругости к величине силовой упругой деформации (см. рис. 5):

$$k = \frac{F_{\text{упр}}}{y_k} \quad (6)$$

Индекс k силового смещения у подчёркивает, что данное смещение является упругим.

Как правило, жёсткость k не зависит от внешней силы F ( $k = \text{const}$ ). Однако могут наблюдаться случаи, когда  $k = \text{var}$  и зависит от внешней силы F. Например, стыки деталей имеют переменную, зависящую от величины внешней силы жёсткость. В этом случае жёсткость  $k \cong F^n$ , где n — некоторый показатель степени. На текущий момент в «Динаре» реализована следующая зависимость:

$$k = k_c + \lambda \cdot F^2 \quad (7)$$

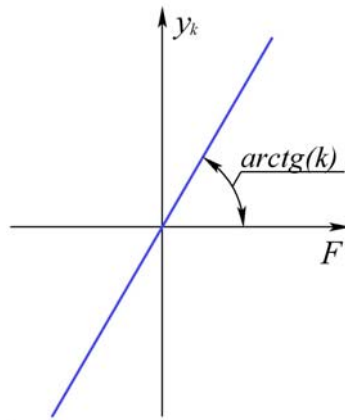


Рис. 5. К определению жёсткости.

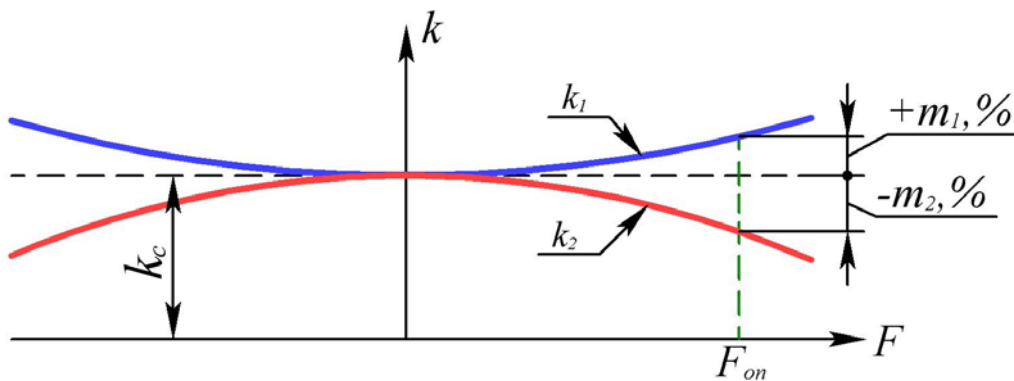


Рис. 6. Зависимость жёсткости от силы F.

Здесь:

$k_c$  – постоянная составляющая переменной жёсткости

$$k_n = \lim_{y_k \rightarrow 0} \frac{F}{y_k} \quad (8)$$

$\lambda$  — коэффициент роста жёсткости

$$\lambda = \frac{k_c \cdot m}{100 \cdot F_{оп}^2} \quad (9)$$

$m$  – коэффициент, характеризующий величину отклонения значения переменной жёсткости от её постоянной составляющей  $k_c$  для «опорной» величины внешней силы  $F_{оп}$ :

$$m = \text{sign}(k(F_{оп}) - k_c) \cdot \frac{k(F_{оп})}{k_c} \cdot 100\% \quad (10)$$

При работе в «МВТУ 3.7» + «Динара» пользователь задаёт только постоянную составляющую жёсткости  $k_c$ , коэффициент  $m$  и «опорную» величину  $F_{оп}$  внешней силы  $F$ . Остальные величины вычисляются программно. При  $m = 0$  для любой величины  $F_{оп}$  жёсткость  $k$  постоянна, т.к. не зависит от внешней силы  $F$ .

Для избежания логических ошибок ввода пользователя рекомендуется принимать  $F_{оп} \geq F_{max}$ , где  $F_{max}$  – максимальная величина внешней силы  $F$ , которая может иметь место при нагружении механической системы.

#### §4. Сила трения. Коэффициенты трения.

Внешним трением называется взаимодействие между телами, возникающее в месте их соприкосновения и препятствующее их относительному перемещению. В

зависимости от характера относительного движения тел различают: трение скольжения, возникающее при поступательном перемещении одного тела по поверхности другого, и трение качения, возникающее тогда, когда одно тело катится по поверхности другого. В чистом виде трение качения имеет место только в том случае, если линия или точка соприкосновения трущихся тел совпадает с мгновенной осью вращения катящегося тела. Во всех остальных случаях трение качения сопровождается трением скольжения.

Внешнее трение, происходящее между движущимися телами, называется кинематическим. Внешнее трение между взаимно неподвижными телами называется трением покоя. Трение покоя имеет место, когда величина силы  $F_{in} < T$ , где  $T$  – максимальная величина силы трения покоя (см. рис. 7). В итоге при  $F_{in} \leq T$  сила трения  $F_{тр} = F_{in}$ , и движение отсутствует. При  $F_{in} > T$  сила трения  $F_{тр} = T$  – одно движется по поверхности другого. И при покое и при движении одного тела по поверхности другого сила трения  $F_{тр}$  всегда направлена в сторону, противоположную направлению силы  $F_{in}$  (см. рис. 7).

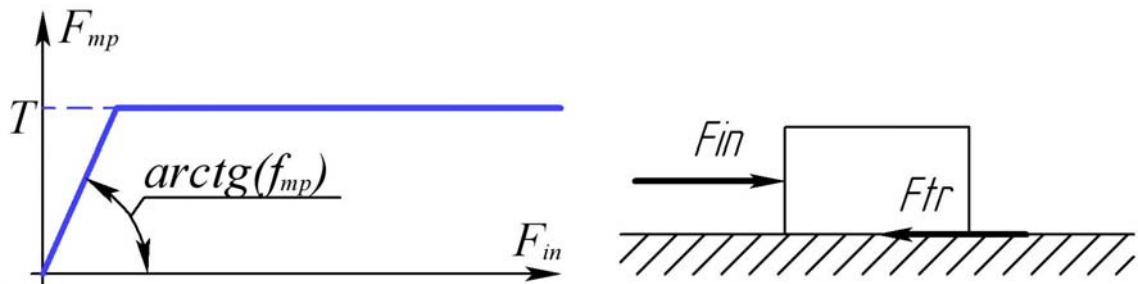


Рис. 7. Зависимость величины (слева) и направления (справа) силы трения  $F_{тр}$  от величины силы  $F_{in}$ .

Величина максимальной силы трения  $T$  для случая скольжения одного тела по поверхности другого рассчитывается по закону Амонтона:

$$T = f_{тр} \cdot N \quad (11)$$

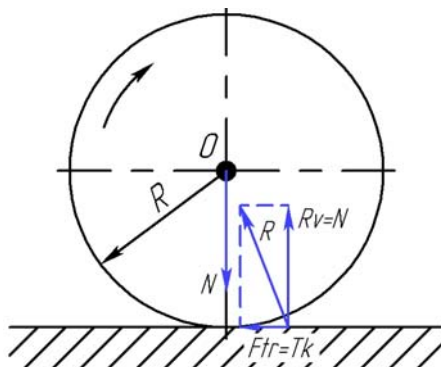


Рис. 8. Схема формирования силы трения качения

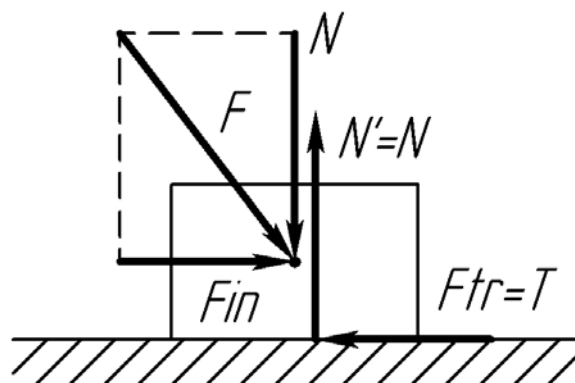


Рис. 9. Схема формирования силы трения  $T$  (закон Амонтона)

$f_{тр}$  – безразмерный коэффициент трения скольжения.

$N$  – сила, нормальная к поверхности контакта трущихся тел,  $N$  (см. формулу 3).

Коэффициент  $f_{тр}$  определяется экспериментально, зависит от материала и состояния трущихся поверхностей.

В настоящее время в «Динаре» учитывается только сила трения скольжения. Используются следующие обозначения:

- $F_{тр}$  – текущее значение силы трения,  $N$
- $T$  – максимальное значение силы трения,  $N$ :  $T = T_c + T_v$
- $T_c$  – постоянная составляющая максимальной силы трения  $T$  ( $N = \text{const}$ ),  $N$

- $T_v$  – переменная составляющая максимальной силы трения  $T$  ( $N = \text{var}$ ), Н
- $f_{\text{тр}}$  – безразмерный коэффициент трения скольжения.

Сила трения качения, возможно, будет учитываться в будущих версиях «Динары».

### §5. Смещение $y$ . Понятие ХСС — характеристики силовых смещений.

Силовое смещение вычисляется по следующей формуле:

$$y = \frac{F_{\text{in}} \pm F_{\text{мп}}}{k}, \quad (12)$$

где:

$F_{\text{in}}$  — проекция внешней силы  $F$  на плоскость стыка, Н,

$F_{\text{тр}}$  — сила трения (в стыке), Н,

$k$  — жёсткость деформируемой детали, Н/мкм,

$y$  — силовое смещение, мкм.

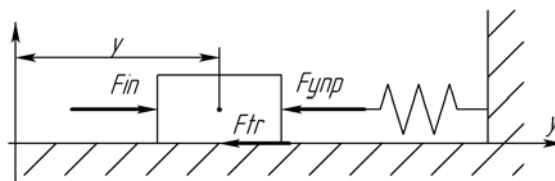


Рис. 10. К определению смещения  $y$ .

И для отдельного модуля и для всей упруго-фрикционной системы величины внешней силы  $F$  и угла  $\alpha$  наклона внешней силы к плоскости стыка являются входными параметрами. Силовое смещение  $y$  является выходным параметром (см. рис. 11).

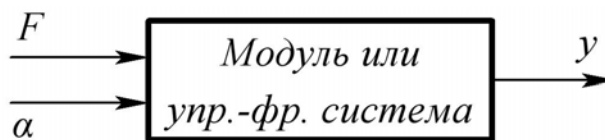


Рис. 11. Входные и выходные параметры модуля.



Рис. 12. Пример ХСС.

Для изучения поведения как отдельного модуля, так и всей упруго-фрикционной системы в целом строят графики  $y=y(F)$  зависимости силового смещения  $y$  от величины



внешней силы  $F$ . Данные графики носят название ХСС — характеристики силовых смещений.

Для построения ХСС необходимо чёткое представление, какая сила в каждом конкретном случае является движущей, а также уметь оценивать величины движущей силы и силы трения. Опыт анализа автором «Динары» упруго-фрикционной модели показывает, что задача чёткого понимания физической картины происходящего в общем случае является непростой.

### Глава 3. Расчёт силовых смещений в «МВТУ 3.7» + «Динара».

#### §1. Что такое «МВТУ 3.7»?

Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» («МВТУ») - современная среда интеллектуального САПР, предназначенная для детального исследования и анализа нестационарных процессов в ядерных и тепловых энергоустановках, в системах автоматического управления, в следящих приводах и роботах, в любых технических системах, описание динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования.

Может использоваться для моделирования нестационарных процессов в физике, в электротехнике, в динамике машин и механизмов, в астрономии и т.д., а также для решения нестационарных краевых задач (теплопроводность, гидродинамика и др.).

Может функционировать в многокомпьютерных моделирующих комплексах, в том числе и в системах удаленного доступа к технологическим и информационным ресурсам.

Является альтернативой зарубежным программным продуктам Simulink, MATRIX, VisSim и др.

Программный продукт «Динара», разработанный средствами «МВТУ 3.7», расширяет возможности последнего, позволяя решать задачи моделирования и анализа упруго-фрикционных систем. Кроме того, автору «Динары» удалось запустить «МВТУ» в операционной системе Linux, используя Wine — свободную реализацию Windows API.

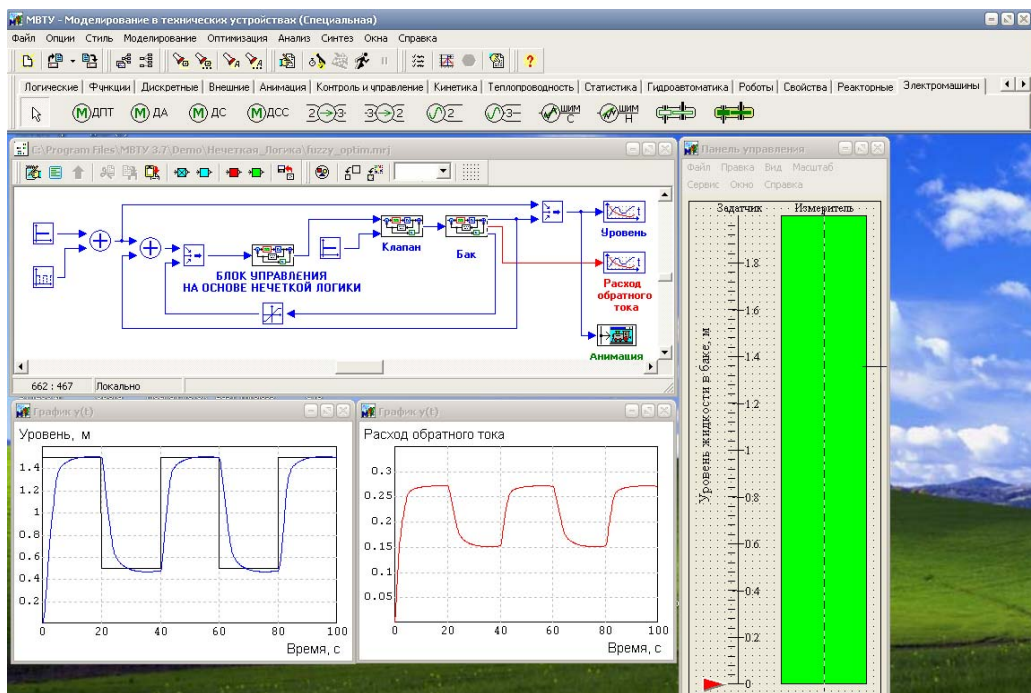


Рис. 12: Внешний вид "МВТУ" (WindowsXP).

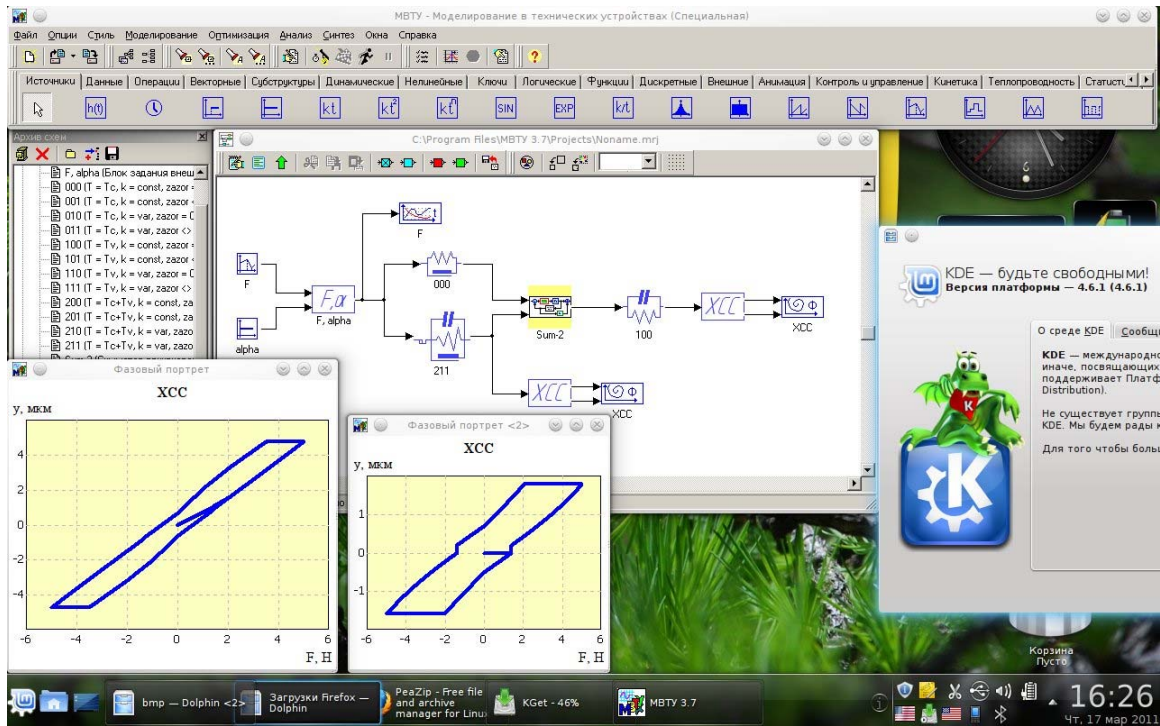


Рис. 13. "MBTU 3.7" + "Динара 1.0" в Linux Mint 10 KDE.

## §2. Обзор модулей «Динары».

В «Динаре» обозначение модуля состоит из трёх цифр. Первая цифра характеризует максимальную величину силу трения  $T$ :

$$0 \rightarrow T = T_c = \text{const}$$

$$1 \rightarrow T = T_v = \text{var}$$

$$2 \rightarrow T = T_c + T_v = \text{var}$$

Вторая цифра характеризует жёсткость:

$$0 \rightarrow k = \text{const}$$

$$1 \rightarrow k = \text{var}$$

Третья цифра характеризует зазор в стыке:

$$0 \rightarrow \text{zazor} = 0$$

$$1 \rightarrow \text{zazor} > 0$$

Пусть, например, модуль имеет код 211. Это значит, что этот модуль позволяет указать  $T = T_c + T_v$ ,  $k = k(F)$  и величину зазора  $\text{zazor}$ .

Ниже приведена таблица блоков для моделирования физических процессов, происходящих в упруго-фрикционной системе с их обозначениями.

Таблица 1: Блоки "Динары" для моделирования физических процессов, происходящих в упруго-фрикционной системе.

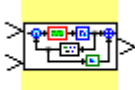
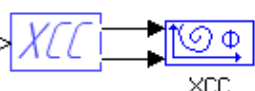
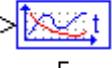
Код	T, k, zazor			Изображение
	T	k	zazor	
000	$T_c$	const	= 0	
001	$T_c$	const	> 0	

010	Tc	var	= 0	
011	Tc	var	> 0	
100	Tv	const	= 0	
101	Tv	const	> 0	
110	Tv	var	= 0	
111	Tv	var	> 0	
200	Tc + Tv	const	= 0	
201	Tc + Tv	const	> 0	
210	Tc + Tv	var	= 0	
211	Tc + Tv	var	> 0	

Кроме вышеперечисленных в «Динаре» имеется ряд вспомогательных модулей:

Таблица 2: Вспомогательные блоки "Динары".

Название блока	Назначение блока	Изображение
F, alpha (Блок задания внешней силы)	Блок для задания внешней силы. Принимает сигналы от двух блоков, один из которых задаёт величину силы, другой — угол $\alpha$ её наклона.	

Sum-2 (Сумматор двухвходовой)	Блок, складывающий сигналы от двух параллельно стоящих блоков.	 Sum-2
Graph y(F) (График ХСС)	Совокупность двух блоков для построения ХСС. Левый блок демультиплексирует сигнал и выделяет необходимые переменные, правый блок строит ХСС.	 ХСС
Graph F(t) (График внешней силы F)	Блок для построения графика изменения силы во времени. Подключается к выходу блока, задающего величину внешней силы.	 F

**§3. Пример расчёта силовых смещений с использованием модулей «Динары» в «МВТУ 3.7».**

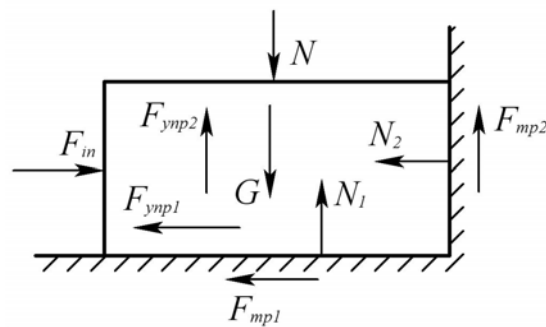


Рис. 14. Силы, возникающие при нагружении тела.

Рассмотрим следующий пример (см. рис. 15). Пусть тело зажимается в угол двумя силами  $F_{in}$  и  $N$ . Векторная сумма  $F_{in}$  и  $N$  даст нам внешнюю силу  $F$  (см. главу 2 §2). Кроме того, на тело действует её вес  $G$ . Пусть каждая из внешних сил оказывает равномерную нагрузку на грань тела (в таком случае при деформации грани последняя будет поступательно перемещаться). Рассматривая деформации в горизонтальной и вертикальной плоскости, получим две упруго-фрикционные системы (см. рис. 16).

Построение систем, представленных на рис. 16, проводится в следующей последовательности.

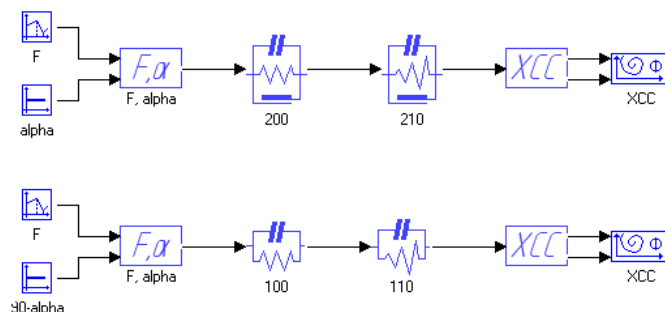


Рис. 15. Блок-схема упруго-фрикционной модели для системы на рис.15

#### §4. Переход от конструкции к блок-схеме упруго-фрикционной системы.

Рассмотрим переход от конструкции к упруго-фрикционной системе на примере схемы, показанной на рис. 15. По этой схеме можно построить две модели: одну для расчёта деформаций по горизонтали, другую — по вертикали (см. рис. 16). Рассмотрим переход к построению упруго-фрикционной модели для вертикальной деформации.

На тело действуют две силы:  $N$  и  $G$ . Разница между силами  $N$  и  $G$  состоит в том, что вес тела  $G$  имеет постоянную величину и направление (не меняется с течением времени), а усилие  $N$  зависит от внешней силы  $F$  (см. уравнение 3) и может меняться во времени. Сумма сил  $N$  и  $G$  будет внешней силой для нашей упруго-фрикционной системы.

Со стороны тела действию сил  $N$  и  $G$  сопротивляется сила упругости  $F_{упр2}$ . Жёсткость тела не зависит от внешней силы ( $k = const$ ). Т.к. при вертикальной деформации тела последнее трётся о стенку, одновременно с силой упругости  $F_{упр2}$  будет действовать и сила трения  $F_{тр2}$ . Величина  $T$  силы трения  $F_{тр2}$  зависит от силы  $F_{ин}$ , следовательно,  $T = T_v$  (имеется только переменная составляющая силы трения). В итоге получаем:  $T = T_v$ ,  $k = const$ ,  $zazor = 0$  (зазора нет). Этой ситуации соответствует модуль 100 «Динары».

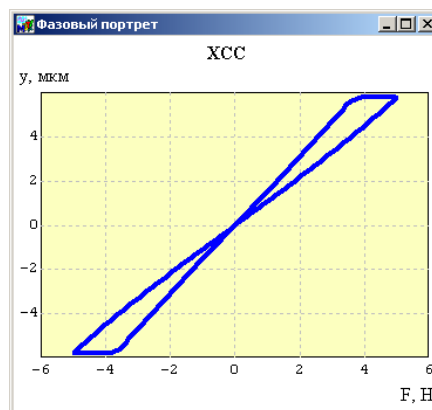


Рис. 16. Результаты моделирования.

От тела усилие  $N+G$  последовательно передаётся стыку (будет последовательное соединение модулей). Жёсткость стыков, как правило, переменна ( $k = var$ ). Деформации в стыке приведут к смещению всего тела в целом, а тело трётся об стенку. Величина силы трения тела от стенку, как было показано выше, зависит от внешней силы ( $T=T_v$ ). Зазоров нет. В итоге имеем:  $T=T_v$ ,  $k = var$ ,  $zazor = 0$ .

Этой ситуации соответствует модуль 110 «Динары». В итоге имеем последовательное соединение модулей 100 и 110. Внешний вид блок-схемы и результат моделирования (ХСС) приведены на рис. 17.

#### § 5. Анализ полученных результатов по ХСС.

Анализируя ХСС (см. рис. 17), замечаем интересную особенность поведения нашей упруго-фрикционной системы: когда начинается разгрузка, смещения некоторое время отсутствуют. Следовательно, мы можем сделать так, чтобы при изменении внешней силы смещений не было. Для этого необходимо предварительно нагрузить наше тело силой  $N+G = 5$  Ньютон, после чего изменять силу  $N$  в таких пределах, чтобы сумма сил  $3,853Н \leq N + G \leq 5Н$ .

Практическое значение данного вывода велико: если на конце тела будет находиться режущая пластина, а  $N$  – составляющая силы резания, то при указанных выше условиях вертикального смещения режущей пластины практически не будет!

Анализируя силовые смещения в горизонтальной плоскости, получим упруго-фрикционную систему из двух параллельно соединённых модулей 200 и 210. ХСС такой системы также имеет горизонтальный участок. Следовательно, можно добиться отсутствия смещений вершины резца и в горизонтальной плоскости (результаты моделирования для сил в горизонтальной плоскости показаны на рис. 18).

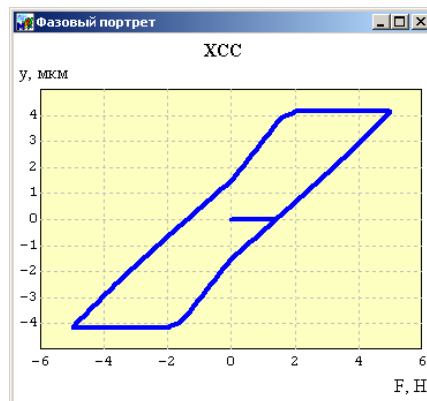


Рис. 17. Результат моделирования.

#### Глава 4. Перспективы дальнейшей работы по усовершенствованию «Динары».

Планируется выход «Динара» версии 1.1. Возможные нововведения:

1. Учёт «двухсторонних» зазоров,
2. Возможность построения ХСС для отдельного модуля системы без его выделения из блок-схемы этой системы,
3. Мультивыходовые сумматоры перемещений,
4. Дальнейшее развитие справочной информации, создание базы примеров.

В далёкой перспективе планируется изучить МКЭ (метод конечных элементов), а также слабодокументированные возможности «МВТУ» (создание анимации и виртуальных пультов, взаимодействие с внешними приложениями), провести формализацию алгоритма перехода от конструкции к упруго-фрикционной системе. Возможно появление сайта программы.

#### Литература

1. Чернянский П.М. Основы проектирования точных станков. Теория и расчёт. — М.: КНОРУС, 2010. - 240 стр.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1977.