

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технической эксплуатации автомобилей

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе
**«Моделирование крутильной системы привода главного движения» по
дисциплине «Математическое моделирование и САПР процессов резания,
станков и инструментов»**

для студентов специальности

36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»

Брест 2002

УДК 621.7/9+681.3

Методические указания к лабораторной работе «**Моделирование крутильной системы привода главного движения**» по дисциплине «Математическое моделирование и САПР процессов резания, станков и инструментов» для студентов специальности 36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» содержат руководство для выполнения лабораторной работы и могут быть использованы при выполнении курсового проекта по дисциплине «Конструирование и расчет станков» и дипломного проекта.

Составители: С.В. Монтик, доцент, к.т.н.
Я.А. Акулич, старший преподаватель

Рецензент: В.Н. Павлюк, зам. начальника машиностроительного комплекса
Брестского электролампового завода

© Учреждение образования
«Брестский государственный технический университет» 2002

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Тема: Моделирование крутильной системы привода главного движения

Цель: 1. Изучить методику и выполнить анализ статических и

динамических характеристик крутильной системы ПГД

2. Приобрести практические навыки работы с комплексом программ для автоматизированного расчета статических и динамических характеристик крутильных систем приводов

Программное обеспечение: комплекс программ DYNAR

1. Моделирование крутильной системы привода главного движения

Привод главного движения при обработке детали нагружен крутящим моментом, который вследствие особенностей кинематики процесса резания, переменности припуска на детали и физико-механических свойств ее материала, изменяется во времени. В результате в нем возникают крутильные колебания, вызывающие динамические нагрузки, появление изгибных колебаний, снижения производительности обработки, уменьшение долговечности станка, а в некоторых случаях и потерю устойчивости его динамической системы. С целью обеспечения требуемого качества станка динамические характеристики привода рассчитывают при его проектировании и при необходимости производят корректировку конструкции.

Для выполнения расчета статических и динамических характеристик крутильной системы привод главного движения составляет расчетная схема привода. Пример расчетной схемы привода, изображенного на рис. Б.1, а, приведен на рис. А.1.

Основными элементами расчетной схемы являются:

1. *Стержни*, которые моделируют участки вала, характеризуются крутильной податливостью участка вала, погонным моментом инерции участка вала и относительным коэффициентом рассеивания энергии
2. *Пружины*, которые моделируют крутильную податливость зубчатой передачи, крутильную податливость муфты, крутильную податливость электромагнитного поля электродвигателя и характеризуются крутильной податливостью и относительным коэффициентом рассеивания энергии.

3. *Моменты инерции вращающихся масс*, которые моделируют моменты инерции зубчатых колес, режущих инструментов, приспособлений, ротора электродвигателя и характеризуются моментом инерции.

Параметры элементов расчетной схемы определяются по методике, изложенной в п. 4.

Полученную расчетную схему динамической системы привода заменяют линейной, при этом моменты инерции вращающихся масс J_k и крутильные податливости e_k приводят к одному валу, обычно валу электродвигателя, используя формулы:

$$J_{Ik} = J_k i_k^2, \quad e_{Ik} = \frac{e_k}{i_k^2},$$

где i_k^2 - передаточное отношение от I вала к k – му валу. Полученную динамическую систему привода можно рассматривать как вал, вращающийся с частотой вращения электродвигателя, на котором расположены массы с приведенными моментами инерции J_{Ik} . Данная динамическая система имеет число степеней свободы и частот собственных колебаний равное числу имеющих в ней инерционных элементов.

В практических расчетах обычно определяют две низшие собственные частоты колебаний динамической системы привода. Для их расчета используют приближенные методы, приводя многомассовую систему к двух или трех массовой (см. рис. 1). При этом две низшие собственные частоты полной системы определяются с достаточной точностью (с ошибкой $\pm 5\%$).

Возбуждение колебаний в приводе может быть следствием переменности сил резания, погрешностей элементов привода, дисбаланса вращающихся частей. Часто встречается случай, когда привод возбуждается крутящим моментом, приложенным к шпинделю, переменная часть которого $M(t)$ рассматривается как функция времени t .

Если в качестве переменных состояния системы принять угловые отклонения $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$ приведенных масс J_1 и J_2 от угла поворота шпинделя, вращающегося с постоянной скоростью и обозначить C_1 и C_2 жесткости участков цепи привода, то система линейных дифференциальных уравнений привода (рис.1) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} J_1 \varphi_1''(t) + (h_1 + h_2) \varphi_1'(t) + (c_1 + c_2) \varphi_1(t) - h_2 \varphi_2'(t) - c_2 \varphi_2(t) &= 0 \\ J_2 \varphi_2''(t) + h_2 \varphi_2'(t) + c_2 \varphi_2(t) - h_2 \varphi_1'(t) - c_2 \varphi_1(t) &= M(t) \end{aligned}$$

где J_1 – момент инерции ротора электродвигателя; J_2 – приведенный момент инерции механической части привода; C_2 – приведенная жесткость механической части привода; $C_1 = l/e_1$, где e_1 – податливости электромагнитного поля электродвигателя; h_1 – коэффициент демпфирования электродвигателя; h_2 – коэффициент демпфирования механической части привода.

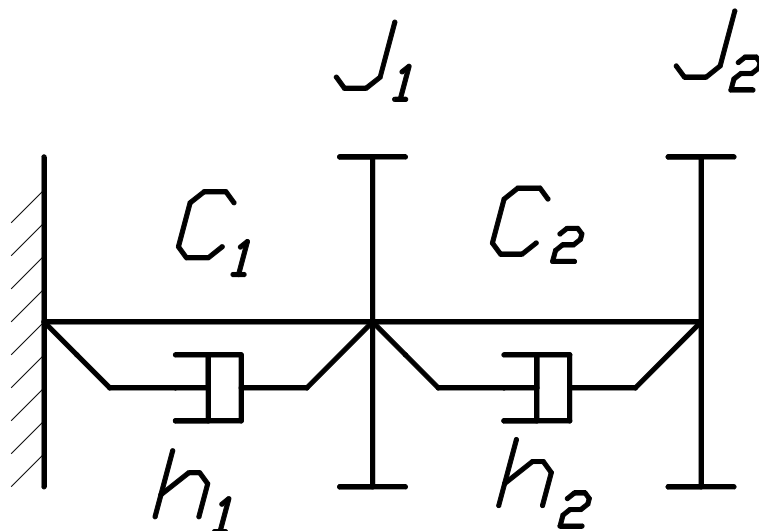


Рис. 1. Расчетная схема двухмассовой крутильной системы привода главного движения

Переходя к операторной форме и используя оператор Лапласа $p = \frac{d}{dt}$,

получаем:

$$\begin{aligned} [J_1 p^2 + (h_1 + h_2)p + (c_1 + c_2)] \varphi_1(p) - (h_2 p - c_2) \varphi_2(p) &= 0 \\ [J_2 p^2 + h_2 p + c_2] \varphi_2(p) - (h_2 p + c_2) \varphi_1(p) &= M(p) \end{aligned}$$

где $\varphi_1(p)$ и $\varphi_2(p)$ – изображения $\varphi_1(t)$ и $\varphi_2(t)$, $M(p)$ – изображение составляющей $M(t)$ крутящего момента на шпинделе. Решая данную систему, находят функции $\varphi_1(p)$ и $\varphi_2(p)$.

Для анализа крутильных колебаний шпинделя используют передаточную функцию

$$W_1(p) = \frac{\varphi_2(p)}{M(p)}$$

Динамические нагрузки в механической части привода исследуют на основе передаточной функции

$$W_2(p) = \frac{M_1(p)}{M(p)},$$

где $M_1(p) = c_2[\varphi_2(p) - \varphi_1(p)]$ - изображение упругого момента в механической части привода.

Для улучшения динамических свойств привода необходимо свести к минимуму упругие моменты (упругий момент в элементах привода определяется $M_{упр}(t) = c_2[\varphi_2(t) - \varphi_1(t)]$). При совпадении возмущающих (рабочих) и собственных частот привода возможен резонанс. В этом случае значения моментов в элементах привода сильно возрастают, поэтому необходимо вывести собственные частоты из диапазона рабочих частот за счет изменения конструкции привода. Как правило, стремятся повысить собственные частоты привода.

Для повышения собственных частот необходимо:

- уменьшить длину кинематических цепей.
- увеличить крутильную жесткость валов (увеличить их диаметр).
- повысить жесткость соединений.
- избегать повышающих передач.

Для снижения собственных частот в кинематическую цепь можно включать податливое звено (ременная передача, муфта с упругим элементом) либо применять маховик.

Для увеличения демпфирования можно сближать собственные частоты механической части привода и электродвигателя.

В том случае, если конструктивно не удастся вывести собственные частоты из рабочего диапазона, то производится анализ форм колебаний и находят участки кинематической цепи, где моменты наибольшие. Эти участки упрочняют для повышения долговечности привода.

Для автоматизации расчета статических и динамических характеристик крутильной системы привода главного движения используется комплекс программ (КП) DYNAR, разработанном в МГТУ "Станкин" (г. Москва).

2. Назначение комплекса программ

КП DYNAR предназначен для автоматизированного расчета крутильных систем приводов (например, механической части привода главного движения станка) на основе использования метода конечных элементов (МКЭ) и модального анализа, применительно к крутильным системам приводов.

КП DYNAR позволяет проводить следующие виды расчетов:

1. Статический расчет:

- расчет углов закручивания элементов привода от приложенного в произвольном месте крутящего момента и приведение их к заданному валу;
- расчет моментов в упругих элементах;

2. Динамический расчет.

Модальные параметры крутильной системы:

- собственные частоты и модальные коэффициенты демпфирования;
- собственные формы колебаний по углу, приведенные к заданному валу;
- собственные формы колебаний по упругому моменту;
- распределение модального демпфирования по упругим элементам.

Частотные характеристики:

- динамическая податливость (АЧХ) по углу;
- динамическая податливость (АЧХ) по упругому моменту.

Переходные характеристики:

- реакция по углу на единичное ступенчатое воздействие;
- реакция по упругому моменту на единичное ступенчатое воздействие.

5. Оценка влияниястройки динамического демпфера на динамические характеристики привода.

КП DYNAR позволяет использовать расчетные схемы максимально с 20 - ю узловыми точками.

Считается, что все элементы привода вращаются со скоростью, определяемой скоростью вращения вала, на котором данный элемент расположен. В качестве обобщенной координаты принимается отклонение угла $\varphi_i(t)$ (угла закручивания) элемента от идеального, определяемого кинематикой выбранной цепи. Упругие элементы и сосредоточенные моменты инерции являются идеализацией соответствующих конструктивных элементов.

Точность полученных результатов определяется точностью исходных данных и качеством расчетной схемы. Поскольку в настоящее время не всегда имеется надежная информация по контактной жесткости, демпфированию, получение абсолютно точных результатов расчетным путем невозможно. Однако, *проводя расчеты при сравнительном анализе вариантов, конструктор получает информацию, позволяющую ему принять обоснованное решение о выборе лучшего варианта конструкции привода.*

3. Работа комплекса программ.

3.1. Подготовка к работе

Перед началом работы с программой DINAR скопируйте из каталога **S:\SAPR** подкаталог **DINAR** на свой диск **R:.** Комплекс программ работает под управлением MS DOS, для запуска комплекс программ необходимо выбрать файл **DINAR.EXE** и запустить его.

3.2. Ввод исходных данных.

Данные по расчетной схеме - топология и параметры заносятся в режиме "Редактирование" в специальные таблицы (см. приложение А).

В таблицу 1. "**Общие сведения**" заносится следующая информация:

- количество узловых точек;
- количество упругих элементов (стержни + пружины);
- количество валов;
- настройка динамического демпфера (1-да;0-нет).

Таблица 2. "**Топология и параметры элементов**" описывает топологию расчетной схемы привода и сведения о параметрах упругих элементов. Каждая строка соответствует одному упругому элементу. Количество строк определяется при задании количества упругих элементов. В первый столбец заносят код элемента из 2-х возможных:

1 – «стержень»

0 - «пружина» ,

во второй и третий столбцы заносят номера начальной и конечной узловых точек упругого элемента. Если элемент имеет заделанный конец, то номер заделанной конечной точки должен быть равен нулю. РС должна быть закреплена, т.е. наличие хотя бы одного нулевого узла обязательно. Нулевые узлы в общее количество узловых точек не входят. В четвертый столбец заносится номер вала, на котором расположен данный упругий элемент. В пятый и шестой - соответственно, податливость элемента на кручение и

коэффициент рассеяния энергии. Податливость задается в $[\text{рад}/(\text{н} \cdot \text{м})] \cdot 1000$, т.е. умноженная на 1000. Для стержневого элемента в седьмом и восьмом столбцах вводятся погонный момент инерции вала $[\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{м}]$ и его длина $[\text{мм}]$.

В таблицу 3. "**Инерционные характеристики**" в соответствии с номерами узловых точек записываются моменты инерции сосредоточенных в узлах масс. В первый столбец заносят момент инерции $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$, во второй - номер вала, на котором масса расположена на РС.

В таблицу 4. "**Передаточные отношения**" заносятся числа зубьев колес или диаметры шкивов, передающих вращение с предыдущего вала на данный вал. В первый столбец заносят число зубьев ведущего колеса (ведущего шкива), во второй ведомого. Поскольку первый вал на РС обычно вращается с частотой вращения двигателя, то для него передаточное отношение равно 1.

В таблицу 5. "**Параметры динамического демпфера**" вводится следующая информация:

- номер узла встройки динамического демпфера;
- податливость $[\text{рад}/(\text{н} \cdot \text{м})] \cdot 1000$;
- момент инерции $[\text{кг} \cdot \text{м}^2]$;
- коэффициент рассеяния энергии.

3.3. Управление комплексом программ.

Функционирование КП построено на принципе диалога с пользователем посредством управляющих меню. Выбор режимов в меню осуществляется клавишами перемещения курсора, а активизация выбранного действия - нажатием клавиши - <ENTER>.

Ввод исходных данных в соответствующих меню производится в текущем поле (выделенном черным фоном), перемещение текущего поля с помощью клавиш управления курсора.

Клавиши <ESC> и <F10> обеспечивают передачу управления в меню более высокого уровня.

Клавиша <F1> обеспечивает вывод подсказки по работе в текущем окне.

Клавиша <F3> обеспечивает вывод числовых значений из текущего окна на принтер.

3.4. Выполнение расчета

Для того, чтобы начать работу с КП нужно запустить его на выполнение. На экране появится заставка, прохождение которой может быть прекращено нажатием клавиши <Esc>. После окончания прохождения заставки перед Вами

появится главное меню, представленное в виде окна, оно предоставляет следующие возможности:

- "Данные" - работа с исходными данными;
- "Расчет" - провести расчет;
- "Выход" - конец работы КП, выход в операционную систему.

Меню "Данные" предоставляет следующие возможности:

- "Считать данные из файла" ;
- "Сохранить данные в файле" ;
- "Вывод данных на печать " ;
- "Редактирование данных " ;

При выборе позиций меню "Считать данные из файла"; "Сохранить данные в файле" появляется запрос : "Введите спецификацию файла". После ввода имени файла осуществляется считывание или запись на диск.

Меню "Редактирование данных" позволяет производить начальный ввод данных или редактирование уже введенных данных по топологии и параметрам РС привода и имеет следующие позиции:

- "Общие сведения" - ввод таблицы А.1 ;
- "Топология и параметры РС"- ввод таблицы А.2 ;
- "Инерционные характеристики"- ввод таблицы А.3 ;
- "Передаточные отношения" - ввод таблицы А.4 ;
- "Параметры динамического демпфера"- ввод таблицы А.5.

КП осуществляет проверку корректности ввода исходных данных, как по топологии, так и по параметрам расчетной схемы. При попытке ввода некорректных данных по выходе из таблицы появляется предупреждение об ошибке. Дальнейшая работа возможна только при исправлении ошибок. Пример заполнения таблиц А.1-А.5 приведен в приложении А.

Меню. "Расчет" имеет следующие пункты :

- "Статические характеристики" ;
- "Модальные параметры" ;
- "Частотные характеристики" ;
- "Переходные характеристики" .

В пункте «Статические характеристики» определяются:

1. Углы закручивания - расчет и приведение к заданному валу углов закручивания в узлах РС от момента, приложенного в заданном узле. Ввод

номера узла приложения момента и номера вала приведения осуществляется после соответствующих запросов КП.

2. **Моменты в упругих элементах** - расчет моментов в упругих элементах.

В пункте «**Модальные параметры**» определяются:

1. **Собственные частоты, модальные коэффициенты и формы колебаний по углу** - расчет собственных частот, модальных коэффициентов демпфирования и форм колебаний по углу и их приведение к заданному валу. На печать выводятся первые пять собственных частот и соответствующие им формы колебаний

2. **Формы колебаний по упругим моментам** - расчет форм колебаний по упругим моментам, при приложении внешнего момента в заданном узле

3. **Распределение модального демпфирования по упругим элементам** - расчет распределения модального демпфирования по упругим элементам на первых пяти формах колебаний.

В пункте «**Частотные характеристики**» определяются:

1. **Динамической податливости (АЧХ) по углу** - расчет динамической податливости (АЧХ) по углу в заданном частотном диапазоне с автоматическим выбором шага. Номер узла определения угла, приложения момента и границы частотного диапазона вводятся по соответствующему запросу КП.

2. **Динамической податливости (АЧХ) по моменту** - расчет динамической податливости (АЧХ) по упругому моменту.

В пункте «**Переходные характеристики**» определяются:

1. **Переходная характеристика по углу** - расчет реакции по углу на единичный ступенчатый момент, приложенный в заданном узле;

2. **Переходная характеристика по моменту** - расчет реакции по упругому моменту на единичный ступенчатый момент, приложенный в заданном узле. Выводится на печать примерно 100 точек переходной характеристики.

Меню "**Выход**" :

1. "**Закончить работу**" - завершить работу КП, выйти в операционную систему;
2. "**Продолжить работу**" - продолжить работу с КП, выйти в головное меню.

Результаты расчета сохраняются в текстовых (текст DOS) файлах SREZ1.LST, SREZ2.LST, SREZ3.LST, SREZ4.LST, которые можно

просмотреть и распечатать использую FAR, Volkov Commander, Norton Commander.

4. Расчет характеристик элементов расчетной схемы

Расчет характеристик элементов расчетной схемы привода главного движения дан для рис. А.1, соответствующего приводу на рис.Б.1.

1. Электродвигатель

*Крутильная податливость электромагнитного поля, рад/(Н*м),*

$$e_1 = \frac{1}{2pM_H},$$

где p – число пар полюсов двигателя (предпоследняя цифра в обозначении марки электродвигателя равна числу полюсов);

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_H} - \text{кратность максимального момента;}$$

$$M_H = 9.55 \cdot 10^3 \frac{P}{n_{\omega}} - \text{номинальный момент двигателя, Н*м;}$$

P – мощность, кВт; n_{ω} – частота вращения электродвигателя, мин⁻¹

Момент инерции ротора

$$J_1 = 0.25GD^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

GD^2 – маховый момент ротора, Н*м².

Относительный коэффициент рассеивания энергии $\psi = 0,2 - 0,4$

2. Муфта

Крутильная податливость муфты

$$e_2 = \frac{1}{C_{\text{муфты}}}, \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}}$$

Относительный коэффициент рассеивания энергии $\psi = 0,2 - 0,4$

3. Валы

Крутильная податливость участка вала (e_3, e_5, e_7, e_8)

$$e = \frac{32l}{\pi Gd_{\text{вала}}^4}, \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}}$$

где l – длина участка вала, м; $d_{\text{ВАЛА}}$ – диаметр вала, м; $G = 81 \cdot 10^9 \text{ Па}$ – модуль сдвига

Погонный момент инерции участка вала ($J_{П3}, J_{П5}, J_{П7}, J_{П8}$)

$$J_{II} = \frac{\pi \rho d_{\text{вала}}^4}{32}, \text{ кг} \cdot \text{м}^4,$$

где $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ - плотность стали.

Относительный коэффициент рассеивания энергии $\psi = 0,01$

4. Зубчатые передачи

Крутильная податливость зубчатой передачи (e_4, e_6)

$$e_{zn} = \frac{4 \cdot 10^{-5} k}{bd^2 \cos^2 \alpha}, \frac{\text{рад}}{\text{Н} \cdot \text{м}},$$

где $k = 6$ – для прямозубой передачи; $\alpha = 20^\circ$ - угол зацепления передачи; b – ширина венца, м; d – делительный диаметр ведущего колеса, м, который определяется по формуле: $d = m \cdot z$

Относительный коэффициент рассеивания энергии $\psi = 0,1$

5. Зубчатые колеса, фреза

Момент инерции (J_3, J_4, J_5, J_7, J_8)

$$J = \frac{\pi \rho (d^4 - d_{\text{вала}}^4) l}{32}, \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где d – делительный диаметр зубчатого колеса, диаметр фрезы, м; l – ширина венца, длина фрезы, м; $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ - плотность стали.

Для блока зубчатых колес (J_5 – на рис. А.1) – момент инерции блока равен сумме моментов инерции зубчатых колес, входящих в подвижный блок.

5. Анализ результатов расчета

1. Определите частоты вращения привода n_1 и n_2 для различных вариантов включения привода

$$n_1 = \frac{z_1 z_3}{z_2 z_4} n_{\text{э}}, \quad n_2 = \frac{z_1 z_5}{z_2 z_6} n_{\text{э}}$$

Определите частоты вынужденных колебаний привода, Гц :

$$f_{\text{вын1}} = \frac{n_1}{60}, \quad f_{\text{вын2}} = \frac{n_2}{60},$$

$$f_{вын3} = \frac{n_1 Z_{фрезы}}{60}, \quad f_{вын4} = \frac{n_2 Z_{Фрезы}}{60}$$

Определите области нежелательных частот работы привода

$$0,7f_i \leq f \leq 1,3f_i,$$

где f_i – собственная i – я частота привода, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (см. таблицу А.7).

Если $f_{вынi}$ попадают в области нежелательных частот, то возникает резонанс. В этом случае необходимо указать методы исключения резонанса (см. п. 1).

2. Определите упругие элементы, в которых возникают максимальные статические крутящие моменты (см. таблицу А.6). Укажите, какие элементы привода они моделируют.

3. Определите упругие элементы, которые оказывают определяющее влияние на демпфирование на каждой собственной частоте, укажите, какие элементы привода они моделируют. Данные элементы имеют наибольшее модальное демпфирование, в процентах, на собственной частоте (см. таблицу А.7).

4. Постройте АЧХ по упругому моменту в координатах: отношение упругого момента $M_{упр}$ к моменту на шпинделе $M_{шпн}$ – частота колебаний f (см. рис. А.2 и таблицу А.8)

5. Постройте переходную характеристику по упругому моменту (см. рис. А.3 и таблицу А.9)

Определите по переходной характеристике логарифмический декремент затухания $\lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$, где A_n, A_{n+1} – амплитуды следующих друг за другом колебаний.

Определить время переходного процесса $t_{пп}$. Переходный процесс считается завершенным, если конечная амплитуда колебаний $A_{конечная}$ в 10 раз меньше начальной амплитуды $A_{начальная}$, т. е. $A_{конечная} = 0,1A_{начальная}$.

6. Порядок выполнения

1. Изучите содержание пунктов 1-7, пример подготовки исходных данных и анализа результатов расчета (см. приложение А).
2. В соответствии со своим вариантом (см. приложение Б) выполните чертеж кинематической схемы и запишите исходные данные

3. В соответствии с кинематической схемой составьте расчетную схему привода с указанием элементов и описанием, какие элементы привода они моделируют (см. рис. А.1)
4. Рассчитайте характеристики элементов расчетной схемы, необходимые для выполнения расчета статических и динамических характеристик привода с использованием КИ DINAR (см. п. 4 и приложение А). Заполните необходимые таблицы с исходными данными по приведенной форме (см. таблицы А.1 – А.5)
5. Введите исходные данные и выполните расчет. Перед выполнением расчета желательно сохранить файл с исходными данными. Распечатайте результаты расчета. Выполните следующие виды расчеты:
 - расчет статических характеристик привода, а именно моментов в упругих элементах, при этом крутящий момент в 1 Н*м прикладывается к последнему упругому элементу (8 упругому элементу) расчетной схемы
 - расчет модальных параметров, а именно распределение модального демпфирования по упругим элементам
 - расчет частотных характеристик, а именно динамической податливости (АЧХ) по упругому моменту, при этом крутящий момент прикладывается к последнему узлу (к 8 узлу) расчетной схемы, номер упругого элемента, в котором определяется динамическая податливость (АЧХ) по упругому моменту – 8, частота изменяется от 0 до 100 Гц, первая собственная частота учитывается.
 - расчет переходной характеристики по упругому моменту, при этом крутящий момент в виде единичного ступенчатого воздействия прикладывается к последнему узлу (8 узел), а упругий момент определяется в последнем упругом элементе (8 упругий элемент) расчетной схемы.
6. Выполните анализ характеристик привода главного движения (см. п. 5)
7. Письменно ответьте на контрольные вопросы

7. Содержание отчета

1. Тема, цель
2. Исходные данные, кинематическая схема привода
3. Расчетная схема привода
4. Расчет характеристик элементов расчетной схемы, необходимых для выполнения расчета с использованием КИ DINAR
5. Таблицы с исходными данными для ввода в программу

6. Распечатка результатов расчета статических и динамических характеристик привода
7. Анализ результатов расчета с графиками АЧХ и переходной характеристики по моменту
8. Ответы на контрольные вопросы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С какой целью выполняется моделирование крутильной системы привода главного движения и расчет ее характеристик?
2. Как повысить собственные частоты крутильных колебаний привода главного движения ?
3. Как понизить собственные частоты крутильных колебаний привода главного движения ?
4. Назовите основные элементы расчетной схемы для моделирования крутильной системы привода главного движения, какими параметрами они характеризуются ?
5. Что делается для повышения долговечности привода в случае, если не удастся вывести собственные частоты из рабочего диапазона привода и возможно возникновение резонанса?
6. С помощью какого графика можно определить величину упругого момента в упругом элементе в механической части привода на заданной частоте колебаний?
7. С помощью какого графика можно определить время переходного процесса в крутильной системе привода главного движения?
8. Какие передаточные функции используются для анализа крутильных колебаний и динамической нагрузки в механической части привода?
9. Что необходимо сделать для улучшения динамических свойств привода?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочергин А.И. Конструирование и расчет станков и станочных комплексов. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов. - Мн.: Выш.шк., 1991. - 382 с.
2. Автоматизированная система DINAR для расчета статических и динамических характеристик крутильной системы привода главного движения. Руководство пользователя./ МГТУ "Станкин". - М.,1990.

Приложение А - Пример подготовки исходных данных и анализа характеристик крутильной системы привода главного движения

Исходные данные

Схема привода – рис. Б.1,а. Двигатель 4А100S4УЗ, мощность $P_{\text{Э}} = 3$ кВт, частота вращения $n_{\text{Э}} = 1435$ мин⁻¹. Зубчатые колеса с модулем $m = 5$ мм и шириной зубчатого венца $b = 30$ мм. Числа зубьев зубчатых колес: $Z_1=50$; $Z_2=50$; $Z_3=30$; $Z_4=90$; $Z_5=90$; $Z_6=30$. Фреза с диаметром $D = 200$ мм и высотой $L = 50$ мм, число зубьев фрезы $Z = 60$. Жесткость муфты 125000 (Н*м)/рад. Диаметры валов – 40 мм, длины участков валов – 100 мм.

Расчетная схема привода представлена на рис. А.1.

Расчет характеристик расчетной схемы

В результате расчета по методике п. 4 были получены следующие параметры:

1. Электродвигатель

Крутильная податливость электромагнитного поля $e_1 = 0,005$ рад/(Н*м)

Момент инерции ротора $J_1 = 0.0868$ кг*м²

2. Муфта

Крутильная податливость муфты $e_2 = 0,000008$ рад/(Н*м)

3. Валы

Крутильная податливость участка вала $e_3 = e_5 = e_5 = e_7 = e_8 = 0,000005$ рад/(Н*м)

Погонный момент инерции участка вала $J_{п3} = J_{п5} = J_{п7} = J_{п8} = 0,002$ кг*м

4. Зубчатые передачи

Крутильная податливость зубчатой передачи $e_4 = 0,145$ рад/(Н*м);

$e_6 = 0,403$ рад/(Н*м)

5. Зубчатые колеса и фреза.

Моменты инерции

$J_3 = 0.09$ кг*м²

$$J4 = 0.09 \text{ кг*м}^2$$

$$J5 = 0.0116 + 0.5878 = 0.5994 \text{ кг*м}^2 \text{ (блок зубчатых колес)}$$

$$J6 = 0.5878 \text{ кг*м}^2$$

$$J7 = 0.0116 \text{ кг*м}^2$$

$$J8 = 0.0368 \text{ кг*м}^2 \text{ (фреза)}$$

На основании полученных данных заполняемые таблицы для ввода в программу.

Таблица А.1 - Общие сведения

Количество узловых точек	8
Количество упругих элементов	8
Количество валов	3
Встройка дин. демпф.	0

Таблица А.2 - Топология и параметры элементов

№ эл.	Код (0 – пружина, 1 – стержень)	Узловые точки		№ вала	Подат- ливость элемента (рад/Н*м) *1000	Относи- тельный коэффициент рассеяния энергии	Погонный момент инерции вала (кг*м ² /м)	Длина участка вала (мм)
		от	до					
1	0	0	1	1	5	0,3	0	0
2	0	1	2	1	0,008	0,3	0	0
3	1	2	3	1	0,005	0,01	0,002	100
4	0	3	4	1	145	0,1	0	0
5	1	4	5	2	0,005	0,01	0,002	100
6	0	5	6	2	403	0,1	0	0
7	1	6	7	3	0,005	0,01	0,002	100
8	1	7	8	3	0,005	0,01	0,002	100

Таблица А.3 - Инерционные характеристики

№ узла	Мом. ин. массы (кг*м ²)	Вал №
1	0,0868	1
2	0	1
3	0,096	1
4	0,09	2
5	0,5994	2
6	0,5878	3
7	0,0116	3
8	0,0368	3

Таблица А.4 - **Передаточные отношения**

Вал №	D ведущ. (мм) или Z	D ведом. (мм) или Z
1	1	1
2	50	50
3	30	90

Таблица А.5 - «**Параметры динамического демпфера**» - не заполняется

Далее вводятся данные и выполняются расчеты с использованием КП DINAR. При расчетах нагрузка прикладывается к 8 элементу, там же определяется угол закручивания и упругий момент, колебания приводятся к 1 валу, максимальная частота колебаний при построении АЧХ – 100 Гц, первая собственная частота учитывается.

В результате выполнения вычислений получаем следующие данные, которые записаны в текстовых (текст DOS) файлах SREZ1.LST, SREZ2.LST, SREZ3.LST, SREZ4.LST, которые можно просмотреть и распечатать используя FAR, Volkov Commander или Norton Commander.

Результаты расчета

Таблица А.6. (файл SREZ1.LST)

СТАТИЧЕСКИЕ МОМЕНТЫ В УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТАХ N" ЭЛЕМЕНТА -> МОМЕНТ [Н*М]				
1-> .334	2-> .334	3-> .334	4-> .334	5-> .334
6-> .334	7-> 1.00	8-> 1.00		

Таблица А.7. (файл SREZ2.LST)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОДАЛЬНОГО ДЕМПИРОВАНИЯ ПО УПРУГИМ ЭЛЕМЕНТАМ В %					
СОВ. ЧАСТ. [Гц]	.5	1.0	5.4	210.1	254.5
МОД. КОЭФ. ДЕМП.	.0085	.0080	.0233	.0152	.0012
УПР. ЭЛ. N"					
1	9.13	.00	98.81	.11	.00
2	.01	.00	.04	96.87	.00
3	.00	.00	.00	3.02	.00
4	86.91	4.02	1.16	.00	.02
5	.00	.00	.00	.00	99.98
6	3.95	95.98	.00	.00	.00
7	.00	.00	.00	.00	.00
8	.00	.00	.00	.00	.00

Таблица А.8. (файл SREZ3.LST)

А Ч Х ПО УПР. МОМЕНТУ			НОМЕР УЗЛА ПРИЛОЖЕНИЯ МОМЕНТА- 8 НОМЕР УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА - 8					
N"	Частота [Гц]	Податливость -	N"	Частота [Гц]	Податливость -	N"	Частота [Гц]	Податливость -
1	,0	1,0241	23	14,0	,94516	45	58,0	,98779
2	1,5	,90435	24	16,0	,94599	46	60,0	,99111
3	1,8	,91911	25	18,0	,94690	47	62,0	,99457
4	2,0	,92638	26	20,0	,94791	48	64,0	,99817
5	2,3	,93064	27	22,0	,94901	49	66,0	1,0019
6	2,5	,93340	28	24,0	,95021	50	68,0	1,0058
7	2,8	,93531	29	26,0	,95151	51	70,0	1,0099
8	3,0	,93670	30	28,0	,95292	52	72,0	1,0141
9	3,3	,93774	31	30,0	,95444	53	74,0	1,0184
10	3,5	,93855	32	32,0	,95607	54	76,0	1,0229
11	4,0	,93973	33	34,0	,95780	55	78,0	1,0276
12	4,3	,94016	34	36,0	,95965	56	80,0	1,0325
13	4,5	,94053	35	38,0	,96161	57	82,0	1,0375
14	4,8	,94084	36	40,0	,96368	58	84,0	1,0427
15	5,0	,94111	37	42,0	,96587	59	86,0	1,0481
16	5,3	,94135	38	44,0	,96817	60	88,0	1,0537
17	5,5	,94156	39	46,0	,97060	61	90,0	1,0594
18	5,8	,94175	40	48,0	,97315	62	92,0	1,0654
19	6,0	,94192	41	50,0	,97582	63	94,0	1,0716
20	8,0	,94293	42	52,0	,97862	64	96,0	1,0780
21	10,0	,94368	43	54,0	,98154	65	98,0	1,0846
22	12,0	,94440	44	56,0	,98460	66	100,0	1,0914

Таблица А.9. (файл SREZ4.LST)

ПЕРЕХОДНАЯ Х-КА ПО МОМЕНТУ			НОМЕР УЗЛА ПРИЛОЖЕНИЯ МОМЕНТА - 8 НОМЕР УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА - 8					
N"	ВРЕМЯ [С]	МОМЕНТ [Н*М]	N"	ВРЕМЯ [С]	МОМЕНТ [Н*М]	N"	ВРЕМЯ [С]	МОМЕНТ [Н*М]
1	,00750	,845E-13	34	,25500	,144E+01	67	,50250	,930E+00
2	,01500	,142E+00	35	,26250	,151E+01	68	,51000	,858E+00
3	,02250	,297E+00	36	,27000	,151E+01	69	,51750	,802E+00
4	,03000	,336E+00	37	,27750	,148E+01	70	,52500	,771E+00
5	,03750	,508E+00	38	,28500	,145E+01	71	,53250	,760E+00
6	,04500	,815E+00	39	,29250	,137E+01	72	,54000	,767E+00
7	,05250	,100E+01	40	,30000	,125E+01	73	,54750	,797E+00
8	,06000	,112E+01	41	,30750	,114E+01	74	,55500	,848E+00
9	,06750	,136E+01	42	,31500	,102E+01	75	,56250	,909E+00
10	,07500	,156E+01	43	,32250	,894E+00	76	,57000	,978E+00
11	,08250	,160E+01	44	,33000	,779E+00	77	,57750	,106E+01
12	,09000	,163E+01	45	,33750	,701E+00	78	,58500	,113E+01
13	,09750	,170E+01	46	,34500	,641E+00	79	,59250	,120E+01
14	,10500	,165E+01	47	,35250	,597E+00	80	,60000	,125E+01
15	,11250	,149E+01	48	,36000	,596E+00	81	,60750	,129E+01
16	,12000	,138E+01	49	,36750	,633E+00	82	,61500	,132E+01
17	,12750	,127E+01	50	,37500	,685E+00	83	,62250	,132E+01
18	,13500	,106E+01	51	,38250	,757E+00	84	,63000	,131E+01
19	,14250	,853E+00	52	,39000	,860E+00	85	,63750	,128E+01
20	,15000	,731E+00	53	,39750	,970E+00	86	,64500	,123E+01
21	,15750	,599E+00	54	,40500	,107E+01	87	,65250	,118E+01
22	,16500	,445E+00	55	,41250	,117E+01	88	,66000	,112E+01

23	,17250	,378E+00	56	,42000	,127E+01	89	,66750	,105E+01
24	,18000	,384E+00	57	,42750	,134E+01	90	,67500	,988E+00
25	,18750	,381E+00	58	,43500	,139E+01	91	,68250	,933E+00
26	,19500	,411E+00	59	,44250	,141E+01	92	,69000	,889E+00
27	,20250	,529E+00	60	,45000	,142E+01	93	,69750	,856E+00
28	,21000	,666E+00	61	,45750	,138E+01	94	,70500	,839E+00
29	,21750	,781E+00	62	,46500	,133E+01	95	,71250	,838E+00
30	,22500	,929E+00	63	,47250	,127E+01	96	,72000	,853E+00
31	,23250	,111E+01	64	,48000	,119E+01	97	,72750	,879E+00
32	,24000	,124E+01	65	,48750	,110E+01	98	,73500	,918E+00
33	,24750	,134E+01	66	,49500	,101E+01	99	,74250	,966E+00

Анализ результатов расчета

Определяем вынужденные частоты колебаний привода (см. п. 5): 7,97Гц; 478,3 Гц; 71,75 Гц; 4305 Гц. Собственные частоты колебаний по табл. А.7 равны: 0,5 Гц; 1,0 Гц; 5,4 Гц; 210,1 Гц; 254,5 Гц. Определяем диапазон нежелательных частот для собственно частоты 5,4 Гц , т. к. остальные собственные частоты значительно отличаются от вынужденных частот. Область нежелательных частот: $3,78 \leq f \leq 7,02$. Резонанс не возникнет.

Определяем упругие элементы, которые оказывают определяющее влияние на демпфирование на каждой собственной частоте:

Собственная частота	Номер упругого элемента	Что моделирует
0,5	4	Зубчатую передачу Z1/Z2
1,0	6	Зубчатую передачу Z3/Z4
5,4	1	Электродвигатель
210,1	2	Муфту
254,5	5	Участок вала между зуб. колесами Z2 и Z3

Определяем упругие элементы, в которых возникают максимальные статические крутящие моменты:

Номер упругого элемента	Величина момента, Н*м	Что моделирует
7	1,00	Участок вала между зуб. колесами Z4 и Z6
8	1,00	Участок вала между зуб. колесом Z6 и фрезой

Выполняем построение АЧХ по упругому моменту (см. рис. А.2).

АЧХ по упругому моменту

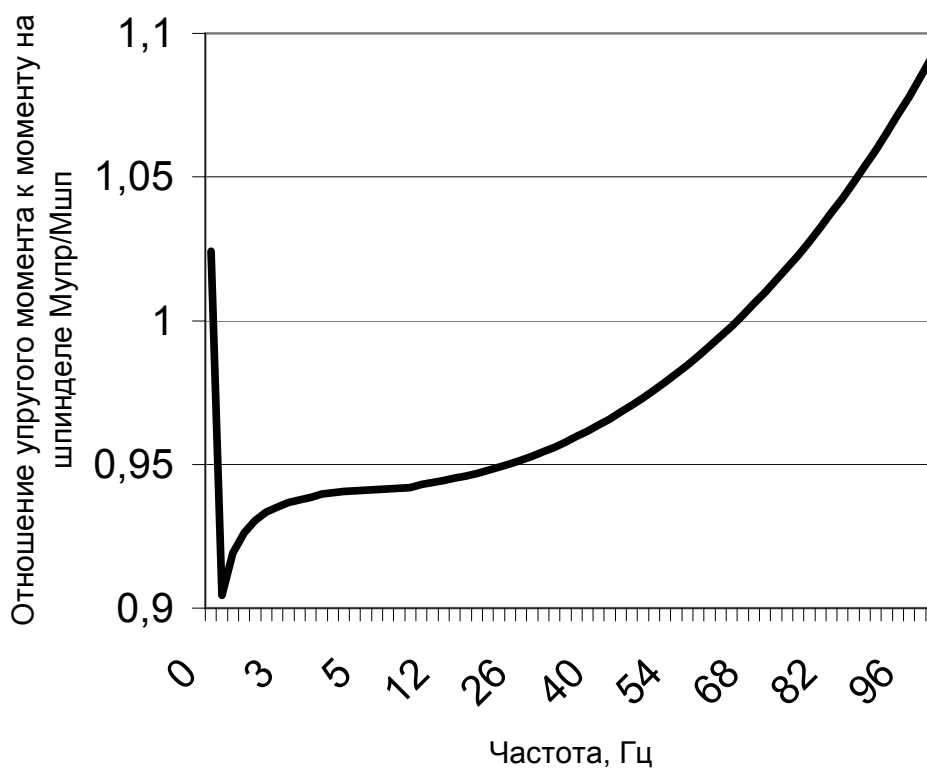


Рис. А.2.

Переходная характеристика по моменту

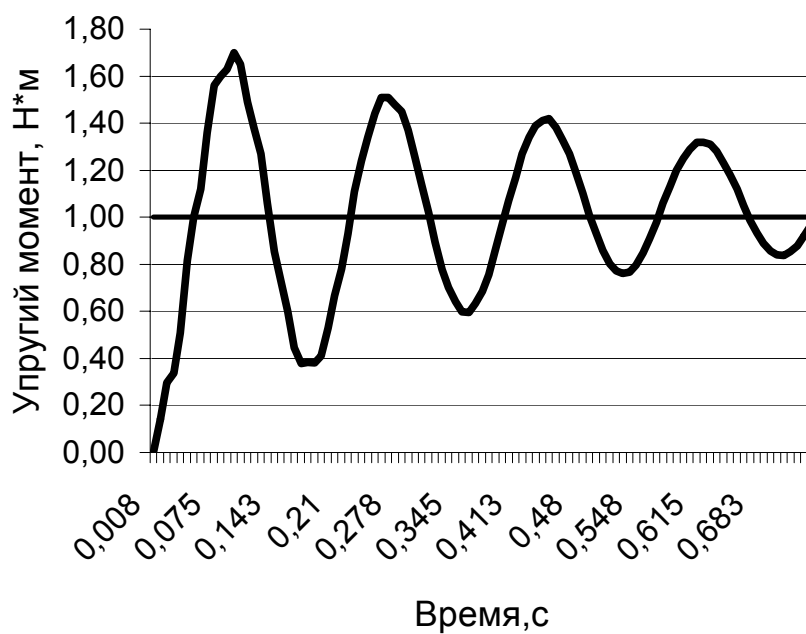


Рис. А.3.

Выполняем построение переходной характеристики по упругому моменту (см. рис. А.3). Определяем по переходной характеристике логарифмический

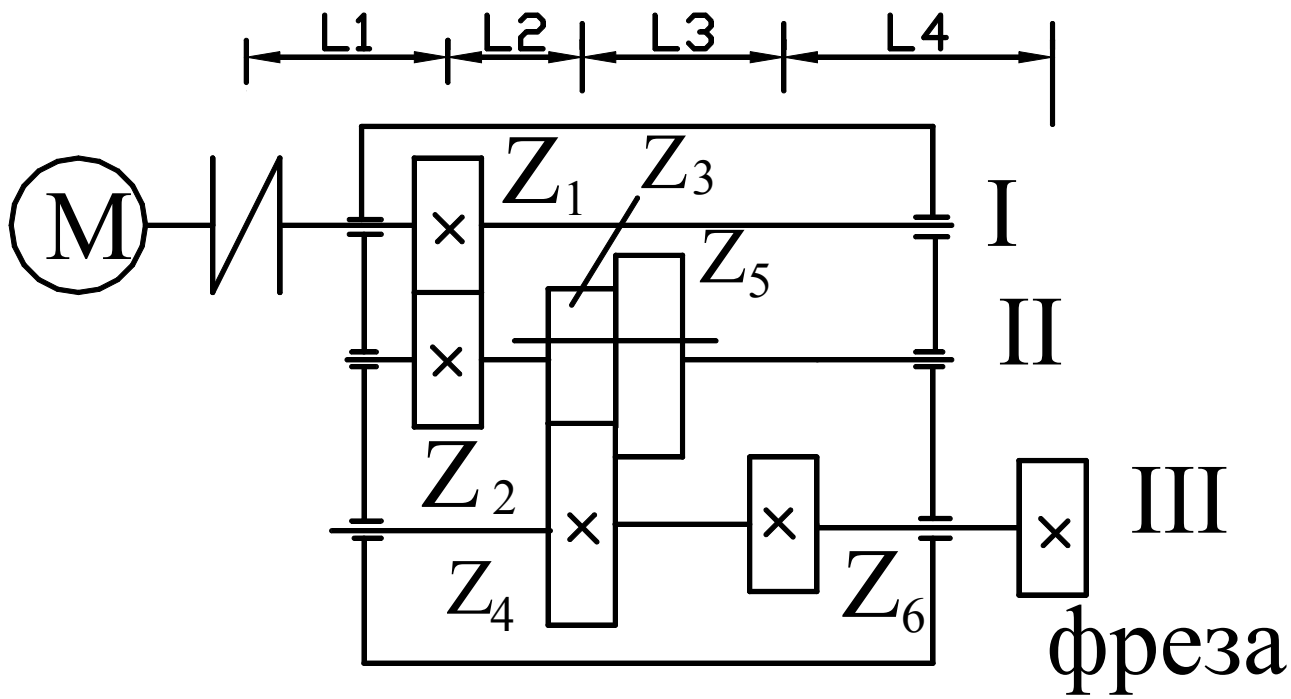
декремент затухания $\lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ln \frac{1,70}{1,51} = 0,12$. Время переходного

процесса по данной переходной характеристике не возможно определить, т. к. за время наблюдения конечная амплитуда не уменьшилась в 10 раз по сравнению с начальной амплитудой.

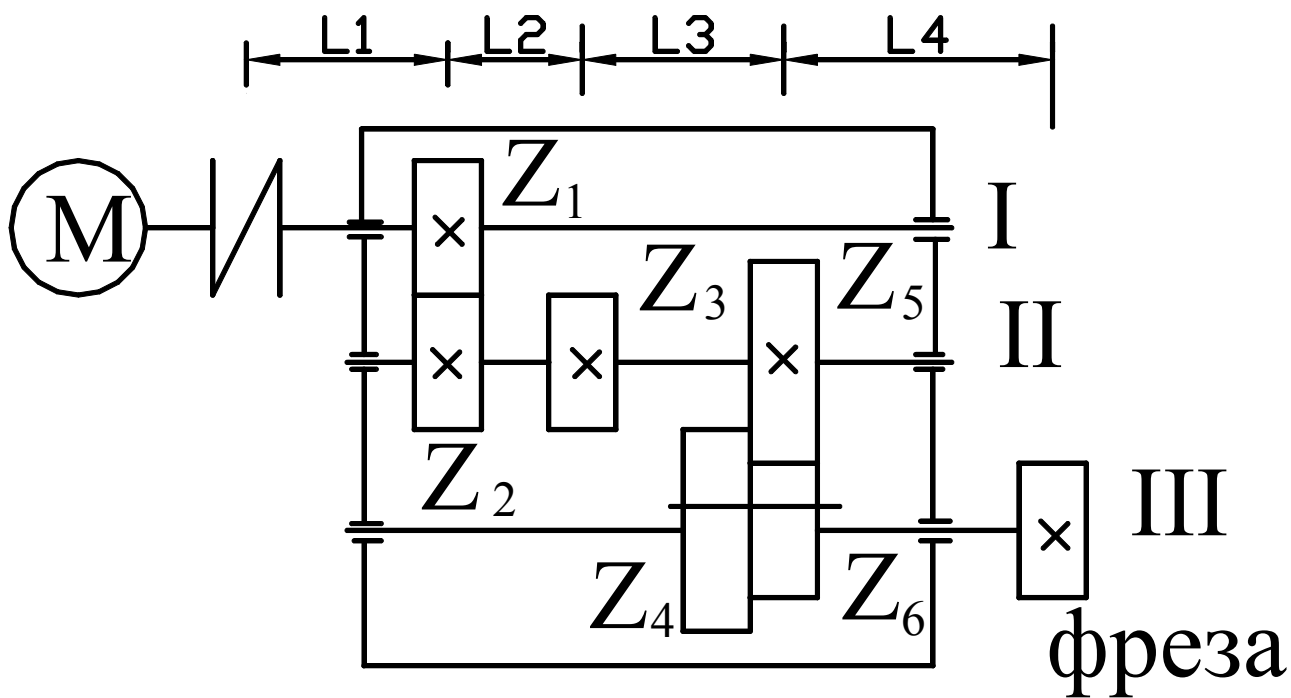
Приложение Б – Варианты заданий

Таблица Б.1 – Параметры электродвигателя

№ вар	Мощность Р, кВт	Частота вращения nэ, мин ⁻¹	Кратность максимального момента λ	Маховый момент ротора GD ² , Н*м ²	Марка электро-двигателя
1	2,2	700	2,2	0,7	4A112L8Y3
2					
3	5,5	965	2,5	1,6	4A132S6Y3
4					
5	1,5	1415	2,2	0,133	4A80B4Y3
6					
7	2,2	1425	2,4	0,224	4A90L4Y3
8					
9	3	1435	2,4	0,347	4A100S4Y3
10					
11	1,5	935	2,2	0,294	4A90L6Y3
12					
13	1,1	700	1,9	0,345	4A90L8Y3
14					
15	2,2	950	1,6	0,524	4A100L6Y3
16					
17	1,5	2850	2,6	0,073	4A80A2Y3
18					
19	2.2	2850	2.6	0.085	4A80B2Y3
20					



a)



б)

Рис. Б.1. Кинематическая схема привода