Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное Государственное Бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Архитектурно-строительный факультет
Кафедра строительной механики

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент
_____
_____ 2016г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
_____ А.Н. Потапов
05. 07. 2016г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗА НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ФЕРМЫ ПОКРЫТИЯ ЦЕХА ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КВАЛИФИКАЦИОННОЙ НАУЧНОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ–08.04.01.2016.103-137 ПЗ КНР

Руководитель КНР
Старший преподаватель
_____ Е.М. Уфимцев
01 июня 2016г.

Автор КНР
Студент группы АС-241
_____ М.Д. Пятанова
01.07. 2016г.

Челябинск, 2016 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное Государственное Бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-уральский государственный университет»
(Национальный исследовательский университет)
Архитектурно-строительный факультет
Кафедра строительной механики

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент
_____
_____ 2016г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
_____ А.Н. Потапов
_____ 2016г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗА НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ФЕРМЫ ПОКРЫТИЯ ЦЕХА ГОРЯЧЕГО ЦИНКОВАНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К КВАЛИФИКАЦИОННОЙ НАУЧНОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ–08.04.01.2016.103–137 ПЗ КНР

Руководитель КНР
Старший преподаватель
_____ Е.М. Уфимцев
_____ 2016г.
Автор КНР
Студент группы АС-241
_____ М.Д. Пятанова
_____ 2016г.

Челябинск, 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ
Декан АС факультета
_____ Д.В. Ульрих
«___» _____ 2016 г.

ТЕМА И ПРОГРАММА
выпускной квалификационной научно-исследовательской работы студента гр. АС-241 Ворониной Марины Дмитриевны

Тема: «Исследование влияния отказа несущих элементов при запроектных воздействиях на параметры динамической реакции фермы покрытия цеха горячего цинкования металлоконструкций»

Цель исследования: На основе исследования динамической реакции фермы покрытия при внезапном отказе стержней вследствие коррозионного воздействия выявить ключевые элементов, наиболее влияющие на несущую способность конструкции.

Аннотация: В настоящее время в литературе нет чётких критериев выбора ключевых элементов, при отказе которых несущая способность конструкции снижается более всего. Данное исследование ориентировано на выявление таких критериев. Предполагается исследование упругой конструктивно нелинейной работы фермы при выключении несущих элементов. В качестве динамической реакции системы учитываются кинематические и силовые параметры, параметры напряжённо-деформированного состояния стержней, энергетические параметры.

Задачи и этапы исследования:
1. Обзор литературы по проблеме динамических расчётов нелинейных систем.
2. Составление компьютерной программы для проведения временного анализа реакции фермы при отказе несущих элементов.
3. Выполнение расчётов ферм при отказе различных несущих элементов.
4. Обработка и анализ полученных результатов расчётов.
5. Оформление научно-исследовательской работы. Подготовка публикаций, выступление на конференциях.

Исходные данные и библиографические источники:

1. *Потапов, А.Н.* Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях: Монография / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.
2. *Андросова, Н.Б.* Некоторые предложения к нормированию параметров живучести сооружений / Н.Б. Андросова, Н.В. Клюева, В.И. Колчунов // Вестник отделения строительных наук. – Москва-Орёл-Курск: РААСН. – 2011. – Выпуск № 15. – С. 17–25.
3. *Нгуиен, Т.С.* Расчёт стержневых систем с учётом внезапного удаления отдельных элементов : Дисс. … канд. техн. наук : Специальность 05.23.17 – Строительная механика / Т.С. Нгуиен; СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2011. – 115 с.

Зав. кафедрой строительной механики, д.т.н., проф. А.Н. Потапов

Научный руководитель, старший преподаватель Е.М. Уфимцев

Студент М.Д. Воронина

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 4

ВВЕДЕНИЕ 6

ГЛАВА I. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Характеристики земельного участка цеха горячего цинкования металлоконструкций. 11

1.2. Технологический процесс цеха горячего цинкования металлоконструкций . 12

1.3. Конструктивное решение здания цеха. 13

1.4. Описание конструкции фермы покрытия 16

ГЛАВА II. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ

2.1. Обзор состояния вопроса

2.1.1 Динамические расчёты диссипативных систем с учётом конструктивной нелинейности 18

2.1.2 Учёт влияния коррозионных процессов на несущие элементы системы . . 19

2.2. Основные положения теории временного анализа

2.2.1 Уравнения динамической реакции конструктивно нелинейной ДДС . . 23

2.2.2 Энергетические параметры реакции конструктивно нелинейной ДДС . . . 25

2.2.3 Изменение параметров реакции системы при переходе в i-е состояние . . 25

2.3. Математическая модель конструктивно нелинейных колебаний системы . 28

2.4. Алгоритм вычисления параметров реакции фермы в процессе упругого временного анализа при выключении несущих элементов 29

2.4. Выводы по главе 34

ГЛАВА III. ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ УПРУГИХ КОНСТРУКТИВНЫО НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ФЕРМЫ ПОКРЫТИЯ

3.1. Расчётная динамическая модель варианта А усиления фермы

3.1.1 Внешние динамические параметры 35

3.1.2 Внутренние динамические параметры модели фермы, напряжения в стержнях, полная механическая энергия 38

3.2. Расчётная динамическая модель варианта Б усиления фермы

3.2.1 Внешние динамические параметры 41

3.2.2 Внутренние динамические параметры модели фермы, напряжения в стержнях, полная механическая энергия 41

3.3. Временной анализ упругих колебаний фермы покрытия, вызванных внезапным выключением одного из стержней 43

3.3.1 Вариант А усиления фермы 44

3.3.2 Вариант Б усиления фермы 64

3.4. Выводы по главе 82

ГЛАВА IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЙ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФЕРМЫ

4.1. Критерии оценки несущей способности конструкции при её переходе в новое *i*-е состояние 83

4.2. Оценка влияния отказов элементов на несущую способность фермы 84

4.2.1 Вариант усиления А фермы 85

4.2.2 Вариант усиления Б фермы 91

4.3 Сравнительный анализ степени влияния отказов элементов на несущую способность 2-х вариантов усиления фермы покрытия 96

4.4. Выводы по главе 97

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ 98

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 99

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Описание компьютерной программы для проведения временного анализа конструктивно нелинейных колебаний фермы покрытия, вызванных коррозионным растрескиванием материала 113

Приложение Б. Список научных публикаций автора 117

Приложение В. Акт внедрения НИР в производственный процесс 118

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения

ДДС – дискретная диссипативная система;

РДМ – расчётная динамическая модель;

МВА – метод временного анализа;

МКУ – матричное квадратное уравнение;

ОДУ – обыкновенное дифференциальное уравнение;

ДВС – динамическая восстанавливающая сила;

НДС – напряжённо-деформированное состояние.

Условные обозначения

det A, norm A, rank A – определитель, норма и ранг матрицы A;

diag – знак диагональной матрицы;

E – модуль Юнга;

n – число степеней свободы дискретной системы;

K – матрица жёсткости конструкции;

M – диагональная матрица масс конструкции;

C – матрица демпфирования конструкции;

U, V – симметрическая и кососимметрическая матрицы в структуре решения МКУ;

S, $S_{1,2}$ – матричный корень, корни (искомые решения) МКУ;

S^{-1}, S^{T} – матрица, обратная к S; матрица, транспонированная к S;

Re S, Im S – реальная и мнимая части матрицы S;

ω_k, – k-я собственная частота колебаний с учётом затухания;

ε_k – коэффициент демпфирования k-ой собственной формы колебаний;

t, t_i – время, время начала или окончания нелинейной работы конструкции;

Q – вектор внешней статической нагрузки от собственного веса конструкции;

Y_0, $\dot{Y}_0$ – векторы начальных условий (векторы перемещений и скоростей);

$\Phi(t) = \mathrm{e}^{St}$ – фундаментальная матрица однородного ОДУ;

$Y(t)$, $\dot{Y}(t)$, $\ddot{Y}(t)$ – векторы узловых перемещений, скоростей и ускорений;

$R(t)$ – вектор ДВС;

$R_e(t)$ – вектор квазилинейных значений ДВС;

$F(t)$ – вектор диссипативных сил;

$I(t)$ – вектор инерционных сил;

$N(t)$ – вектор продольных (нормальных) сил в стержнях ДДС;

$\sigma(t)$ – векторы относительных деформаций, напряжений в стержнях ДДС;

$Э(t)$ – вектор полной механической энергии системы;

$П(t)$ – вектор полной потенциальной энергии системы;

$T(t)$ – вектор кинетической энергии системы.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Фермы широко применяются в современном строительстве, их элементы при действии узловой нагрузки работают только на растяжение и сжатие, что способствует наиболее эффективному использованию материала. Часто такие конструкции применяются для перекрытия больших пролётов мостов, промышленных зданий, спортивных сооружений и т.д.

Конструкции современных зданий и сооружений больших пролётов подвергаются действию различных нагрузок (импульсы, взрывы, удары, химическая коррозия и др.), что может стать причиной разрушения (отказа – состояния объекта, при котором он не может выполнять свои функции [102]) отдельных элементов или частей конструкции, что требует: *а*) проведения проверки несущей способности системы, работающей в повреждённом состоянии на пределе своих возможностей, и *б*) оценки последствий этих изменений (разрушений).

С 1 июля 2010 г. вступил в силу федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [153], в соответствии с которым выполнение требований безопасности строительных объектов должны быть обоснованы расчётом. Одной из мер безопасности зданий и сооружений является надёжность, которая по [153, 152, 102] определяется, как способность выполнять требуемые функции в течении расчётного срока службы (эксплуатации).

Обзор современных методов расчёта динамических систем показывает, что одним из эффективных аналитических методов, развивающихся в последние несколько лет, является метод временного анализа (МВА) дискретных диссипативных систем (ДДС), основанный на исследовании характеристического матричного квадратного уравнения (МКУ) [96]. Процесс вычисления реакции разбивается на квазилинейные интервалы времени $t \in [t_i, t_{i+1}]$, на которых жесткостные, демпфирующие, инерционные параметры расчётной динамической модели (РДМ) посто-

янны. В качестве граничных (критических) точек t_i принимаются моменты выключения (отказа) элементов из работы. Переход системы из i-го в новое (i+1)-е состояние считается мгновенным. Решение по МВА на квазилинейном интервале строится в замкнутой форме интеграла Дюамеля по аналогии с упругим анализом. В этом случае в процессе анализа необходимо учитывать изменения расчётной схемы сооружения, что порождает ряд сложных и труднодоступных для исследования проблем, таких как учёт влияния демпфирующих свойств системы на колебательные процессы при переходе системы в промежуточное состояние.

Специалисты сходятся во мнении, что в этой области существует недостаток исследований теоретического характера, и, как следствие, отсутствие надёжных и эффективных методов расчёта, которые бы позволяли адекватно учитывать реальную работу конструкции [41].

К эффективным качествам МВА можно отнести следующие возможности, которые будут раскрыты в последующих разделах диссертации:

- работа с любой моделью демпфирования (в данной работе рассматривается непропорциональное демпфирование) при единственном ограничительном требовании, заключающемся в том, что матрица демпфирования должна быть симметричной;
- моделирование конструктивно нелинейного поведения системы разрывной кусочно-линейной функцией;

Цели исследования:

1) построение динамической реакции фермы и определение напряжённо-деформированного состояния (НДС) её стержней при внезапном отказе несущих элементов вследствие воздействия химической коррозии на материал;
2) изучение влияния отказов элементов фермы на характеристики собственных колебаний, параметры реакции и параметры НДС стержней, а также на несущую способность фермы в целом;

3) определение критериев для выявления ключевых элементов, отказ которых приводит к наибольшему изменению несущей способности фермы.

Объект исследования – плоская стальная статически неопределимая ферма, как дискретная диссипативная система с конструктивно нелинейными свойствами.

Предмет исследования – изменение параметров реакции ферм и параметров НДС их элементов в процессе конструктивно нелинейных колебаний, вызванных коррозионным воздействием, а также критерии оценки несущей способности фермы.

Задачи исследования:

1) разработка алгоритма временного анализа и составление компьютерной программы на языке *MATLAB* для исследования динамической реакции и параметров НДС элементов ферм в процессе конструктивно нелинейных колебаний, вызванных коррозионным воздействием;
2) анализ динамической реакции фермы при решении упругой конструктивно нелинейной задачи;
3) выявление элементов, оказывающих наиболее сильное влияние изменение параметров фермы и на её несущую способность на основе ряда предложенных критериев.

Методы исследования. При рассмотрении задач колебаний ферм был использован метод временного анализа, в основе которого лежит исследование характеристического МКУ.

Достоверность результатов исследования подтверждается:

- использованием в диссертации апробированных методов строительной механики в сочетании с методами высшей математики и аппаратом матричной алгебры;
- замкнутой формой вычисления интеграла Дюамеля на квазилинейных временных интервалах в процессе колебаний;
- корректным применением математических моделей нелинейного расчёта как внутри квазилинейных интервалов, так и на их границах.

Научная новизна состоит в следующем:

1) использование метода временного анализа для исследования энергетических параметров реакции сложной системы (фермы);
2) использование метода временного анализа для выявления на основе ряда предложенных критериев «ключевых» элементов, способных оказать наиболее сильное влияние на изменение динамических характеристик, параметров реакции, параметров НДС элементов фермы, а также на её несущую способность в целом.

Практическая значимость. Построенная математическая модель расчёта ферм как дискретных диссипативных систем позволяет в аналитическом виде и с высокой точностью вычислять параметры реакции при нестационарном воздействии на стадиях упругой и упругопластической работы материала конструкции при внезапном выключении несущих элементов. Это даёт возможность выполнять на высоком уровне количественную и качественную оценку НДС системы при изменении внешних параметров расчётной динамической модели (РДМ) (жёсткости, характеристик демпфирования и инерции, параметров воздействия) в ходе временного анализа.

Для расчёта ферм, рассмотренных в работе, был разработан алгоритм определения критических временных точек при переходе расчётной динамической модели из одного квазилинейного состояния в другое. Этот алгоритм положен в основу программы, составленной на языке *MATLAB*, для проведения конструктивно нелинейного временного анализа ферм при действии коррозионного воздействия. Описание данной программы приведено в приложении А.

Разработки, выполненные в рамках данной исследовательской работы, были внедрены в производственный процесс ОАО «Челябтяжмашпроект», акт внедрения представлен в приложении В.

Положения, выносимые на защиту:

1) алгоритм конструктивно нелинейного временного анализа динамической реакции ферм, включающий оценку их несущей способности;
2) критерии выбора ключевых элементов фермы.

Апробация диссертационного исследования. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на:

1) 66–67-й студенческих конференциях Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск, ЮУрГУ, май 2015–2016 гг.);
2) III-й выставке-конференции научно-технических и творческих работ студентов (г. Челябинск, ЮУрГУ, апрель 2016 г.);
3) Международной научной конференции «Industrial Engineering» (г. Челябинск, ЮУрГУ, май 2016 г.).

Публикации. По результатам исследований подготовлены 3 статьи, из них 1 – в журнале из перечня ВАК и 1 – в журнале, индексируемом в международной базе Scopus (см. приложение Б).

Личный вклад автора состоит в:

- составлении программ для ЭВМ на языке *MATLAB* для проведения конструктивно нелинейного временного анализа ферм на действие коррозионного воздействия;
- обработке, анализе и оформлении полученных результатов расчётов;
- подготовке материалов для публикаций и участия в конференциях.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 118-ти страницах машинописного текста и состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 154 наименования, и 3-х приложений. В работе приведены 71 рисунок и 6 таблиц.

ГЛАВА I. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Характеристики земельного участка цеха горячего цинкования металлоконструкций

Проектируемый объект – Цех горячего цинкования металлоконструкций – расположен на юго-западной окраине города Шумиха в существующей промышленной зоне на территории ОАО "Коммуноресурс" площадью 87364 м^2. В территорию ОАО "Коммуноресурс" врезан участок ОАО "РЖД" с ж/дор путями площадью 3542 м^2. С северной стороны расположены два небольших водоёма, с северо-западной – существующее предприятие, с остальных сторон - свободная от застройки территория.

Рельеф участка спокойный с небольшим перепадом высот от 173.10 до 176.15 в Балтийской системе высот.

Территория застроена зданиями и сооружениями, находящимися в ветхом состоянии и требующими капитального ремонта.

В настоящее время имеется только один въезд на территорию. Существующие проезды и площадки имеют асфальтобетонное покрытие.

Кроме этого, на площадке есть железнодорожные пути, которые могут быть использованы для доставки необходимых грузов и отправки готовой продукции (рис. 1.1).

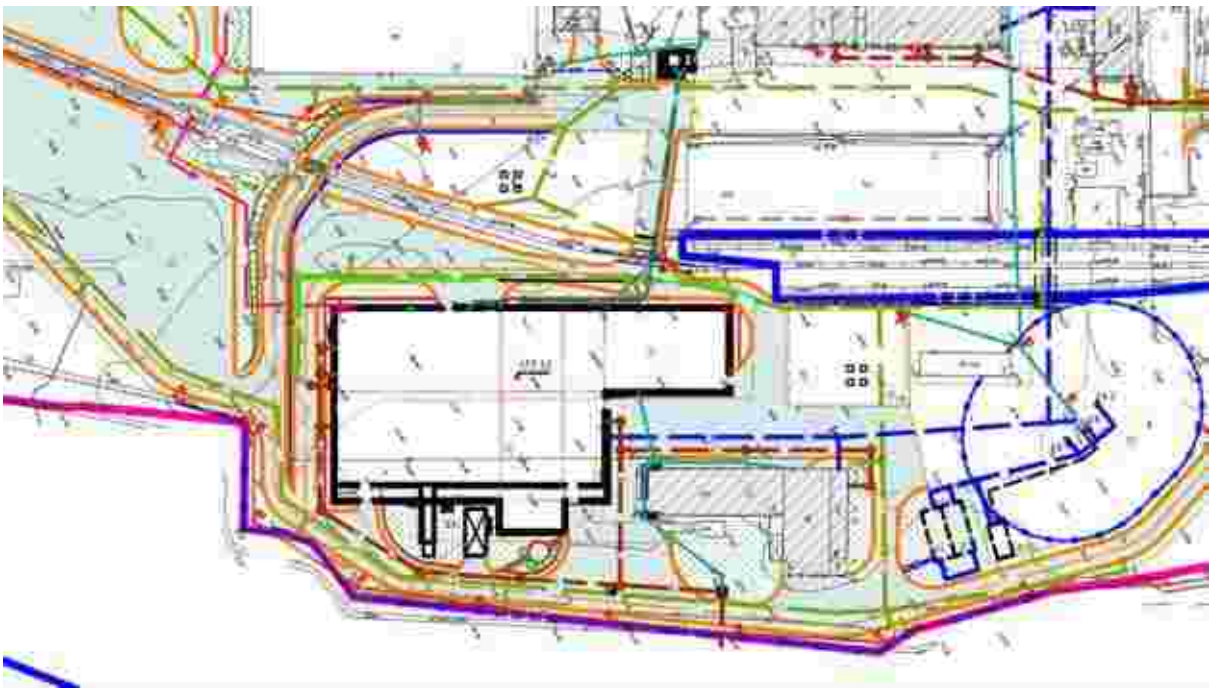


Рис. 1.1. Генеральный план цеха

1.2 Технологический процесс цеха горячего цинкования металлоконструкций

Основное назначение производства – это нанесение цинкового покрытия горячим способом на металлоконструкции различного назначения. Технологический план цеха представлен на рис. 1.2.

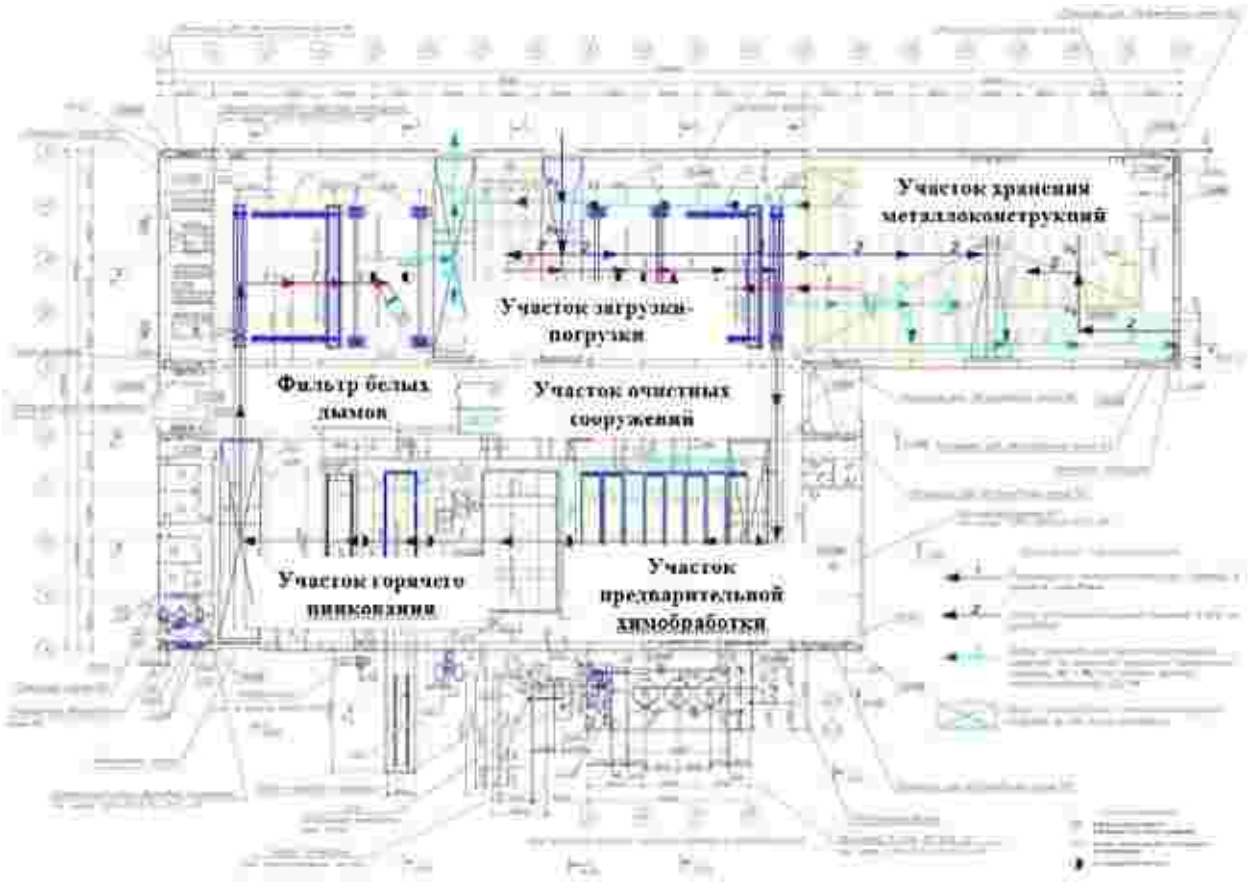


Рис. 1.2. Технологический план цеха

Технология производства состоит из нескольких стадий и предполагает определённую последовательность подготовки изделий к процессу цинкования и дальнейшей отправки их заказчикам:

1. Завоз изделий заказчиками на оцинкование и их временное хранение на открытые погрузочно-разгрузочные площадки №1 и №2 или в складе с участком погрузки – разгрузки.
2. Перемещение изделий в зону загрузки.
3. Навешивание изделий на специальные траверсы.
4. Перемещение траверсы с изделиями вагонеткой-перенос (специальная тележка с электроприводом).

5. Обезжиривание изделий в кислотном обезжиривающем растворе. Обработка металлоконструкций в ванне осуществляется до 30 мин с помощью обезжиривающей жидкости, состоящей из 1.5% HCl, 1.5% H_3PO_4, и специфического обезжиривающего раствора при рабочей температуре 35 ºС.

   Травление изделий в кислотном растворе. Обработка изделий производится от 30 до 90 мин с помощью раствора соляной кислоты (125–140 г/л). Рабочая температура соляной кислоты в ванне составляет 25 ºС.
6. Промывка изделий в воде.
7. Флюсование изделий в специальном солевом растворе. Обработка металлоконструкций в ванне осуществляется с помощью концентрированного раствора флюса, состоящего из хлорида цинка и хлорида аммония при температуре 55 ºС.
8. Сушка изделий горячим воздухом.
9. Цинкование изделий в расплавленном цинке.
10. Охлаждение изделий в воде
11. Перемещение траверсы с оцинкованными изделиями вагонеткой-перенос в зону разгрузки
12. Снятие изделий с траверс и подготовка их к перемещению на открытые погрузочно-разгрузочные площадки №1 и №2 или в склад с участком погрузки – разгрузки (здание ЦГЦ).
13. Вывоз изделий до места назначения.

1.3 Конструктивное решение здания цеха

Цех цинкования металлоконструкций представляет собой одноэтажное производственное здание со встроенными АБК в пределах осей 1-2. Состав производственных помещений обусловлен технологией, а также необходимостью размещения инженерного оборудования.

Здание цеха в плане имеет сложное прямоугольное строение и имеет габаритные размеры по осям 64.5×114 м (рис.1.3). Шаг колонн по буквенным и цифровым

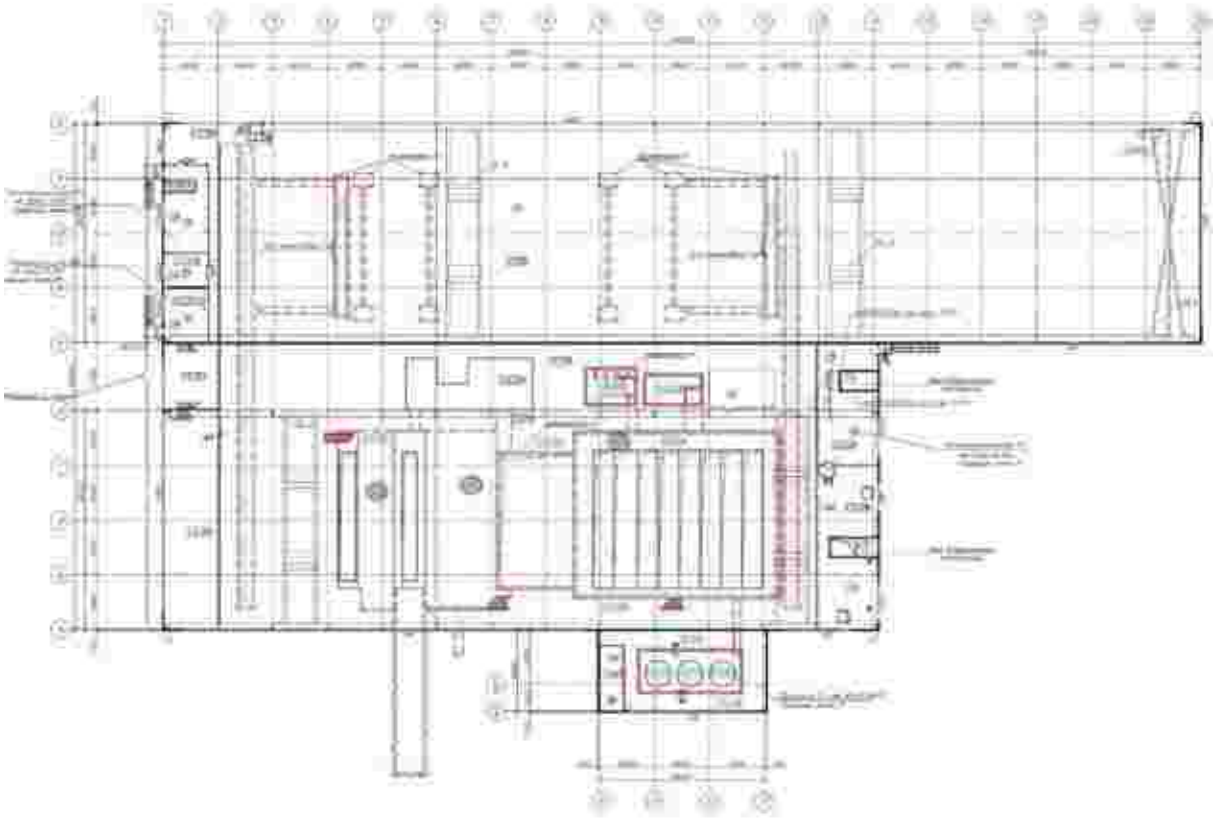


Рис. 1.3. План здания цеха

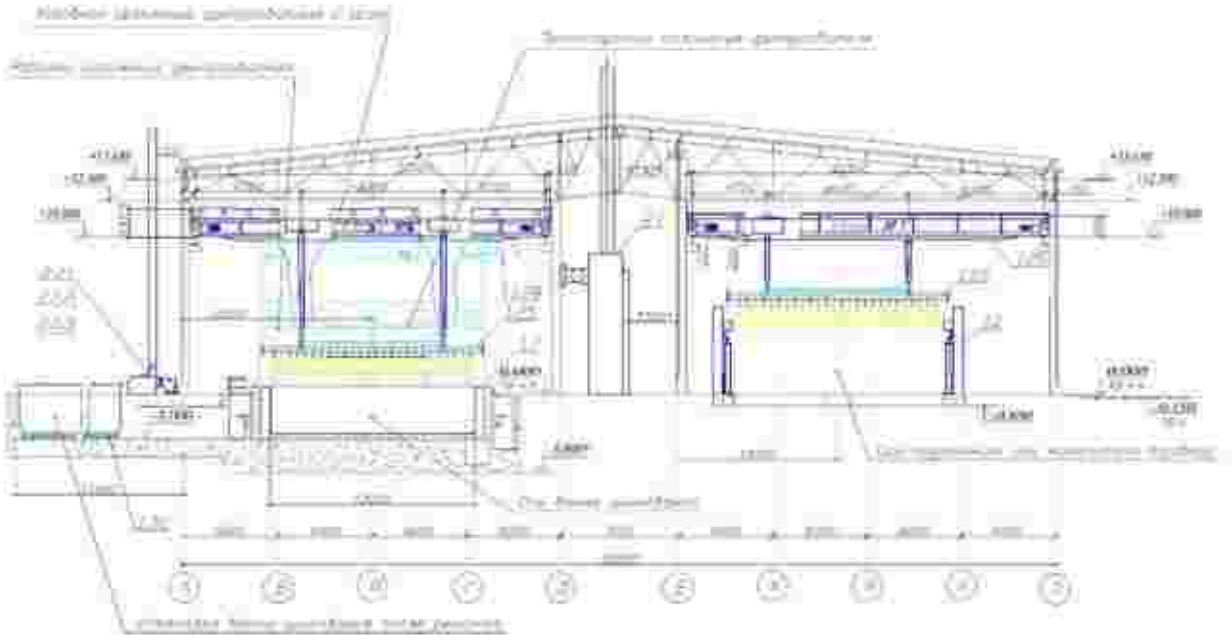


Рис. 1.4. Поперечный разрез здания с оборудованием

осям – 6.0 м. В осях Е-Л предусмотрены 2 мостовых и 1 балочный кран грузоподъёмностью по 10 тс; в осях А-Д 2 крана грузоподъёмностью по 10 тс (рис. 1.4).

Здание склада выполнено из металлических колонн и трапециевидных стальных ферм, кровля принята из трёхслойных кровельных панелей типа "Сэндвич" толщиной 150 мм:

- в осях 1-14 двускатная с уклоном 1/10 в сторону рядов А и Л;
- в осях 14-20 односкатная с уклоном 1/10 в сторону ряда Л;

За 0,000 принята отметка чистого пола здания, которая соответствует абсолютной отметке 175,300м. в Балтийской системе высот. Высота от пола до низа конструкций покрытия в осях Д-Е – 16,425 м.

План покрытия и поперечный разрез здания представлены на рис. 1.5, 1.6.

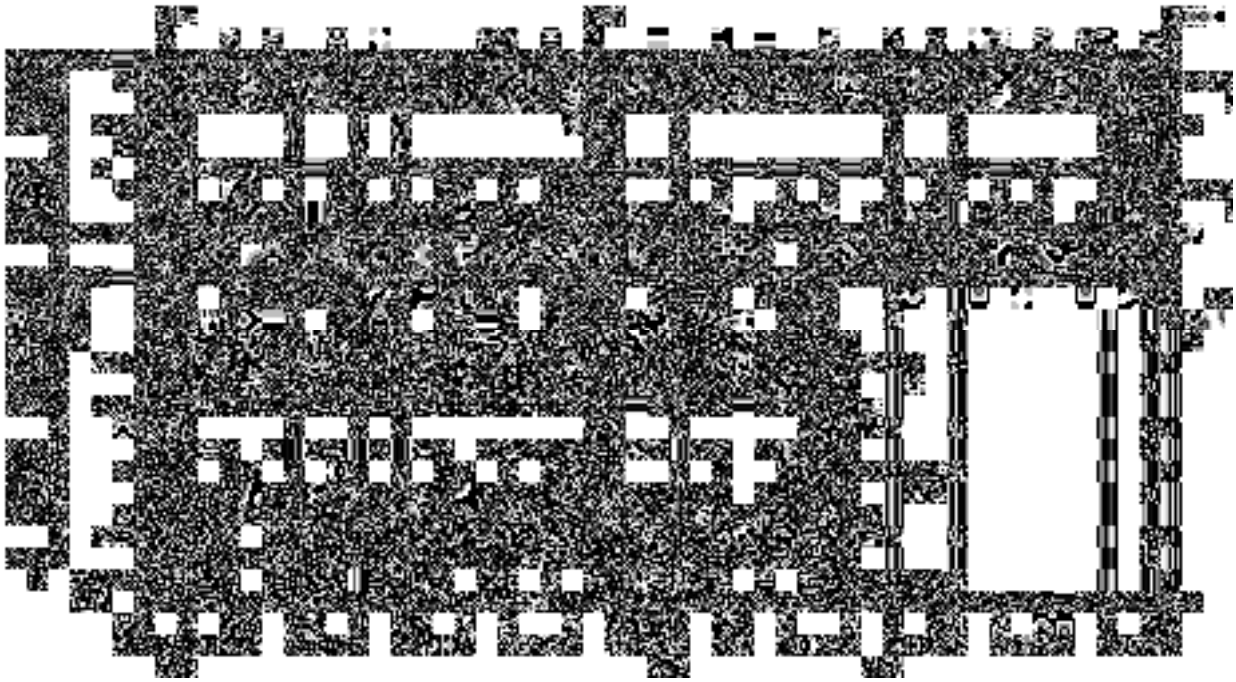


Рис. 1.5. План покрытия здания

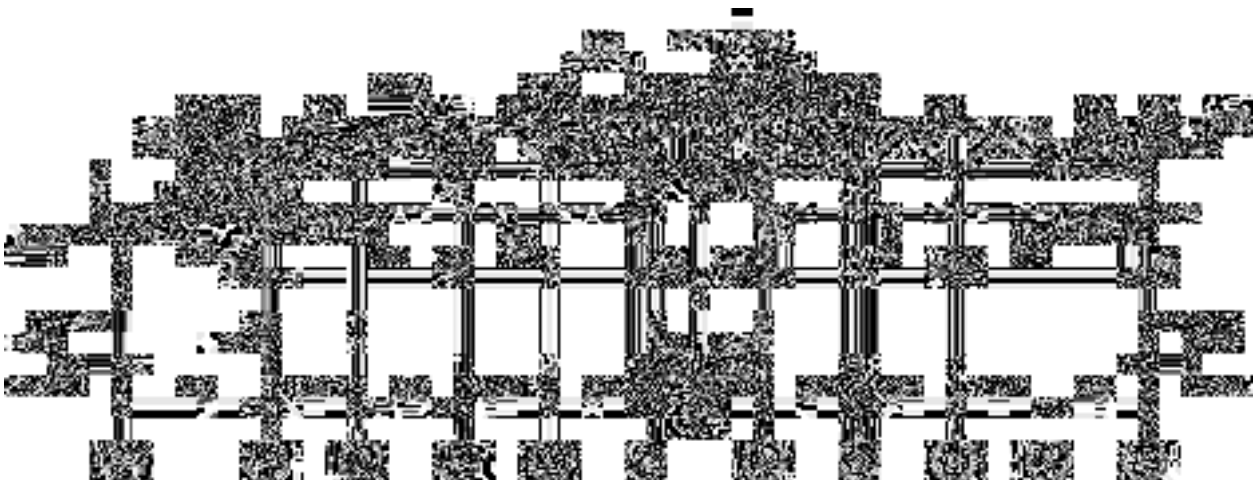


Рис. 1.6. Металлические конструкции цеха

1.4 Описание конструкции фермы покрытия

В данной работе рассматривается металлическая ферма покрытия, расположенная в пролёте между осями А-Д над участком предварительной химической обработки (рис. 1.7).

Материал фермы – сталь С245 с модулем упругости 206000 МПа. Элементы фермы – пояса, раскосы – выполнены из двух уголков [ГОСТ 8509-86], стойки – из двух крестовых уголков [ГОСТ 8509-86].

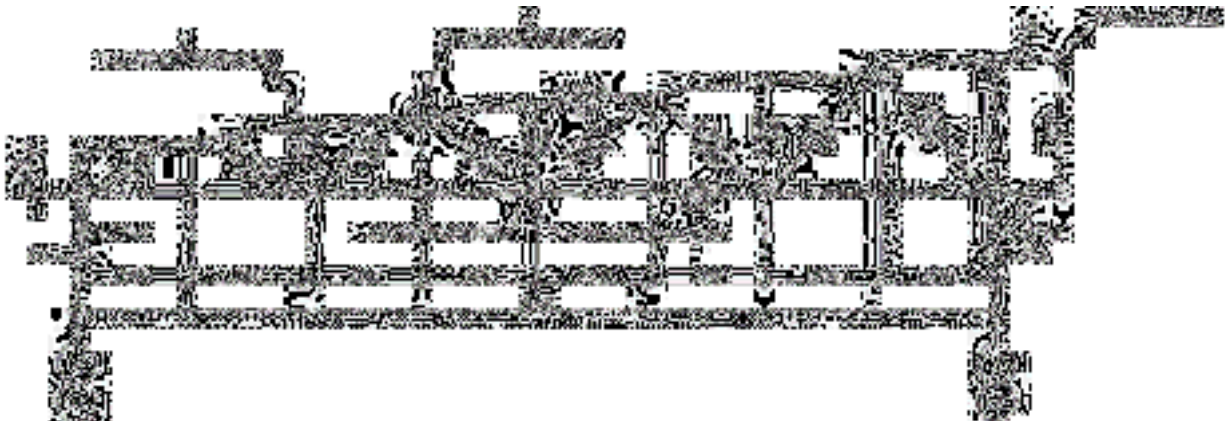


Рис. 1.7. Ферма покрытия цеха

Данная ферма является статически определимой, следовательно, при отказе какого-либо элемента ферма становится геометрически изменяемой системой и происходит её обрушение. Поэтому рассмотрим вариарты усиления фермы.

Вариант усиления А

Расчётная схема фермы приведена на рис. 1.8. Данная конструкция является 4 раза статически неопределимой.

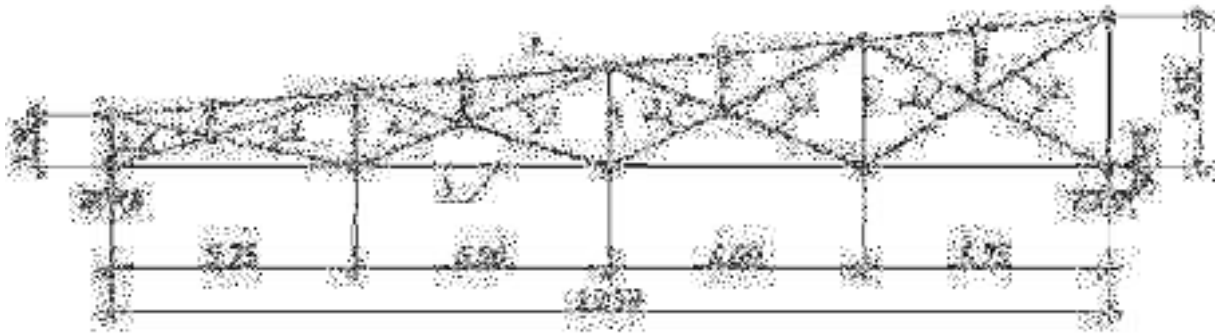


Рис. 1.8. Вариант усиления А фермы покрытия
(цифрами обозначены номера сечений)

Ферма имеет следующие размеры сечений и жесткостные характеристики:

1 – Верхний пояс ┐ ┌125×125×8 мм, жёсткость при растяжении / сжатии – $EA = 81{,}12\times10^4$ кН, при изгибе – $EI_x = 12{,}13\times10^6$ кНсм^2; $EI_y = 37{,}57\times10^6$ кНсм^2;

2 – Раскосы ┐ ┌ 110×110×8 мм, жёсткость при растяжении / сжатии – $EA = 70{,}86\times10^4$ кН, при изгибе – $EIx = 8{,}16\times10^6$ кНсм^2; $EIy = 26{,}53\times10^6$ кНсм^2;

3 – Раскосы ┐ ┌ 100×100×7 мм, жёсткость при растяжении / сжатии – $EA = 56{,}65\times10^4$ кН, при изгибе – EIx=$5{,}38\times10^6$ кНсм^2; EIy=$17{,}79\times10^6$ кНсм^2;

4 – Раскосы ┐ ┌ 63×63×6 мм, жёсткость при растяжении / сжатии – $EA = 29{,}99\times10^4$ кН, при изгибе – EIx=$1{,}11\times10^6$ кНсм^2; EIy=$4{,}512\times10^6$ кНсм^2;

5 – Нижний пояс ┘ └100×100×7 мм, жёсткость при растяжении / сжатии – $EA = 56{,}65\times10^4$ кН, при изгибе – EIx=$5{,}38\times10^6$ кНсм^2; EIy=$17{,}79\times10^6$ кНсм^2;

6 – Стойки – ┐ └ 56×56×5 мм, жёсткость при растяжении / сжатии – $EA = 22{,}29\times10^4$ кН, при изгибе – EIx=$1{,}707\times10^6$ кНсм^2; EIy=$1{,}707\times10^6$ кНсм^2.

Вариант усиления Б

Расчётная схема фермы приведена на рис. 1.8. Данная конструкция является 3 раза статически неопределимой.

Жесткостные характеристики и размеры сечений фермы аналогичные описанным для варианта усиления А фермы.

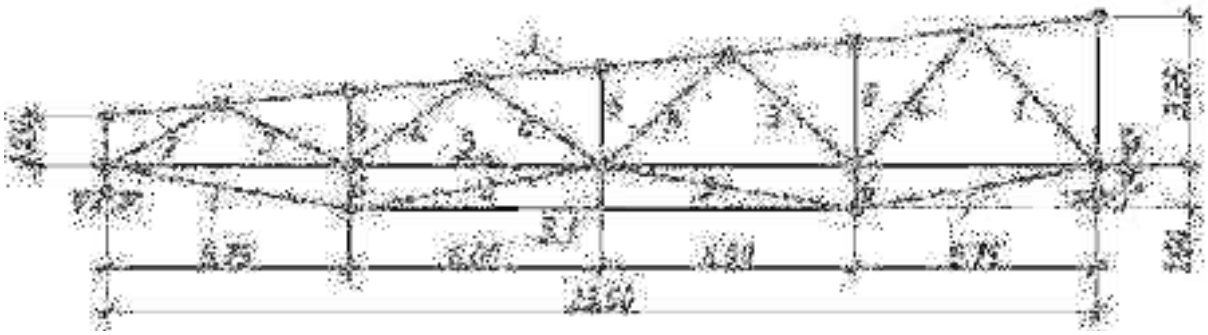


Рис. 1.8. Вариант усиления Б фермы покрытия
(цифрами обозначены номера сечений)

ГЛАВА II. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПОЛОЖЕНИЙ

2.1. Обзор состояния вопроса

2.1.1 Динамические расчёты диссипативных систем с учётом конструктивной нелинейности

Динамические методы расчёта конструкций и сооружений в строительной механике получили развитие благодаря значительному вкладу, который внесли отечественные учёные: С.А. Бернштейн [16], В.В. Болотин [17], И.Г. Бубнов, Б.Г. Галёркин, И.И. Гольденблат и Н.А. Николаенко, К.С. Завриев [45], В.А. Киселёв [52], Б.Г. Коренев и Я.Г. Пановко [60], И.Л. Корчинский [61], А.Н. Крылов [63], А.И. Лурье [66], Л.С. Ляхович [70], А.М. Масленников [71], В.В. Петров, Н.Н. Попов и Б.С. Расторгуев [89], И.М. Рабинович [101], Ю.Э. Сеницкий [112], А.Ф. Смирнов [116], Е.С. Сорокин [119], С.П. Тимошенко [121], А.П. Филиппов [123], А.И. Цейтлин [131,132], и многие другие. Среди зарубежных учёных можно отметить следующих: Дж.У. Рэлей [108], С. Кренделл [62], Р.Л. Халфман [125], К. Бате и Е. Вилсон [13], Р. Клаф и Д.Ж. Пензиен [53] и др.

Динамический анализ с учётом внутреннего трения в материале проводился во многих работах, среди которых: А.И. Ананьин [7, 8], Г.И. Гребенюк [30], А.В. Дукарт [39], Т.К. Кафи [51], А.А. Кусаинов [65], Э.Я. Неустроев [79], Я.Г. Пановко [84], Л.М. Резников [104, 105], Е.С. Сорокин [119, 120], Е. Фунайоли [124], А.И. Цейтлин [129, 130], T.K. Caughey [139, 140], D.A. Dadeppo [141], D.J. Rijlaarsdam [144], S. Sorrentino [146, 147], C.T. Sun [148] и др.

Конструктивная нелинейность систем связывается с такими понятиями, как *односторонние:* Н.А. Алфутов [6], В.П. Алёнин [5], В.А. Баженов [11], С.В. Бакушев [12], Л.А. Бернштейн [15], М.И. Горбунов-Посадов [26], В.И. Гордеев [27], В.В. Каканов [50], С.С. Кленников [54], Р.Е. Кузнецова [64], И.Е. Люминарский [67], Л.С. Ляхович [68, 69], А.М. Масленников [71], А.В. Перельмутер [86], Е.И. Путеев

[98, 99, 100], И.М. Рабинович [101], [112], А.В. Хлупин [126, 127], и *выключающиеся* связи: Я.М. Айзенберг [1], В.А. Апаринов [10], В.В. Безделев [14], Г.В. Васильков [23], Н.В. Клюева [56, 57], И.Е. Люминарский [67], П.Д Мухамеджанов [77], *прогрессирующее* (лавинообразное) *разрушение:* П.Г. Еремеев [41], Н.В. Клюева [57], Т.С. Нгуиен [78], И.Н. Серпик [113], А.С. Бухтиярова [22], *коррозионные повреждения* конструкций: В.М. Бондаренко [20], Н.В. Клюева [56, 57] и т.п.

Исследования по разработке методик и анализу колебаний систем с выключающимися связями, в настоящее время проводится достаточно большим количеством учёных: А.В. Алексейцев [4], Ю.В. Бондарев [18], Г.А. Гениев [25], В.А. Гордон [28, 29], Г.А. Джинчвелашвили [34], А.И. Долганов [36], С.В. Доронин [37, 38], Ю.А. Ивашенко [46], Н.В. Клюева [56], В.И. Колчунов [58], А.М. Масленников [71], О.В. Мкртычев [74, 75, 76], А.В. Перельмутер [87], А.Н. Потапов [91, 92, 93, 94, 95], [106]; В.М. Ройтман [107], П.П. Скрябин [114], А.А. Холодов [128], Ю.Т. Чернов [133, 134, 135], G.J. Zhai [149] и др.

Объектом исследования в настоящей работе являются фермы. Анализ колебаний конструкций при действии динамических нагрузок, а также при учёте конструктивно нелинейных свойств проводился в работах Р.В. Алдушкина [3], Ю.В. Бондарева [18], С.В. Босакова [21], В.В. Егорова [40], К.И. Ерёмина [42,43], И.В. Мишустина [73], Ю.Т. Чернова [135], L. Baeza [138], E. Masoero [143], W. Gao [142] и др.

2.1.2 Учёт влияния коррозионных процессов на несущие элементы системы

Одной из актуальных проблем для конструкций промышленных цехов является коррозионное разрушение металлоконструкций. Причинной этого является наличие коррозионно-агрессивных примесей в составе производственной атмосферы.

В науке о коррозионной прочности накоплен экспериментальный материал, на основе различают несколько видов коррозионных процессов. Однако, пока нет единой классификации коррозии.

Выделяют несколько основных признаков протекания коррозии: *механизм протекания процессов, характер коррозионного разрушения, вид коррозионной среды*.

В работах отечественных учёных принята следующая классификация коррозии: *химическая или электрохимическая, сплошная или местная*. Сплошная коррозия в зависимости от скорости протекания коррозии на разных участках подразделяется на *равномерную или неравномерную*. Различают виды местной коррозии: *язвенная, точечная, пятнистая, нитевидная, подповерхностная, межкристаллическая и транскристаллическая* [1], [24], [44], [55].

Зарубежные учёные различают классы коррозии: *избирательная, щелевая, механико-химическая, электро-химическая, химическая, биологическая, высокотемпературная*. Внутри каждого класса выделяют наиболее часто встречающиеся виды: *коррозия растрескивания, усталости, эрозия, обесцинкование, графитизация, водородное охрупчивание*.

В данной работе рассматривается местная сплошная коррозия. В качестве показателя степени коррозионного износа принята глубина коррозии – $\delta(t)$.

Существует несколько моделей определения параметра $\delta(t)$. Подход к построению теоретической модели глубины коррозии различен в направлениях различных школ: Москва – В.М. Бондаренко[19], Ю.М. Батенова, В.И. Сооматова, Е.А. Гузеева [31], Санкт-Петербург –Р.Б. Санжаровский [109], П.Г. Комохов [59], Саратов – И.Г. Овчинников [80, 81, 82], В.В. Петров [88], В.К. Иноземцев [49], Волгоград – В.А. Игнатьева, Саранск – В.П. Селяев [110], В.Д. Черкасова.

Одной из самых крупных отечественных школ является Саратовская школа. Она разделяется на два направления: *теория накопления повреждений* и *теория с учётом коррозионного износа* [82]. В данной работе для расчёта глубины коррозии используются наработки второго направления, подход которого заключается в построении математической модели с использованием механически сплошной среды с включением в систему определяющих параметров не только механических, но и физико-химических, учитывающих влияние агрессивной среды на кинетику процессов деформирования и разрушения.

Для расчёта коррозионного разрушения элементов фермы была принята математическая модель – дифференциальное уравнение, описывающее кинематику изменения коррозионного процесса во времени с учётом различных факторов.

Процесс коррозионного разрушения стержней разделяется на две стадии: 1) *инкубационный период* t_{inc}, в течение которого концентрация коррозирующих веществ в точках периметра поперечного сечения металлических стержней изменяется от начального до критического; 2) *стадия интенсивной коррозии*, в течение которой происходит коррозионный износ металлических элементов, имеющий чаще всего локальный характер.

В общем случае коррозионный износ поперечного сечения металлических стержней описывается зависимостью:

$$\delta \quad \begin{matrix} 0, & t \quad t_{,} \ ,C \quad C_{C}, \\ \delta\, t, & t \quad t \ ,C \quad C_{C}, \end{matrix}$$

где, $\delta(t)$ – функция, описывающая коррозию элемента;

C – концентрация агрессивной среды;

C_{cr} – критическая концентрация агрессивной среды.

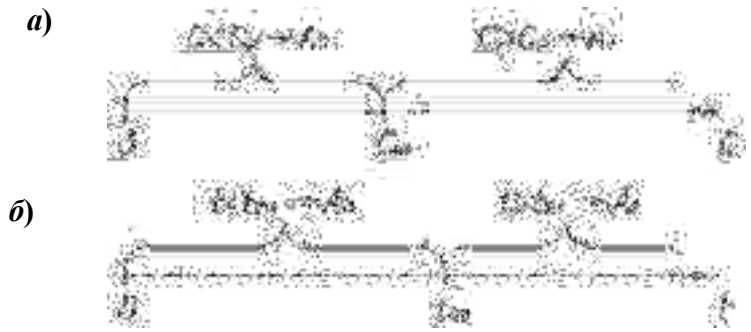


Рис. 2.1. Интервалы изменения площади поперечного сечения в зависимости от критической концентрации агрессивной среды (*а*) и времени инкубационного периода (*б*)

Площадь поперечного сечения элементов определяется так (рис.2.1):

$$At \quad \begin{matrix} A, & t \quad t \\ A \quad , & t \quad t \\ 0, & t \gg t_{,} \end{matrix}$$

В данной работе рассматривается случай $t > t_{inc}$, $C > C_{cr}$, следовательно площадь корродированного сечения (заштрихованная область на рис. 2.2) вычисляется так:

$$A_1(t) = A_0 - A_{corr}(t),$$

Здесь A_0, A_{corr} – соответственно, площади неповреждённого сечения и коррозии:

– для прямоугольного сечения (рис. 2.2, *а*):

$$A_0 = B \times H, \quad A_{corr}(t) = \delta(t)\,[\,B + H - \delta(t)\,],$$

– для сечения равнобокого уголка (рис. 2.2, *б*):

$$A_0 = T \times [\,2B - T\,], \quad A_{corr}(t) = [\,2B - 3\delta(t) - T\,]\,[\,T - 2\delta(t)\,],$$

Уменьшение площади сечения приводит к уменьшению момента инерции. Для учёта этого фактора принята пропорциональная зависимость:

$$I_1(t) = k(t)\, I_0,$$

где I_0 – момент инерции не корродированного сечения; $k(t) = A_1(t) / A_0$.

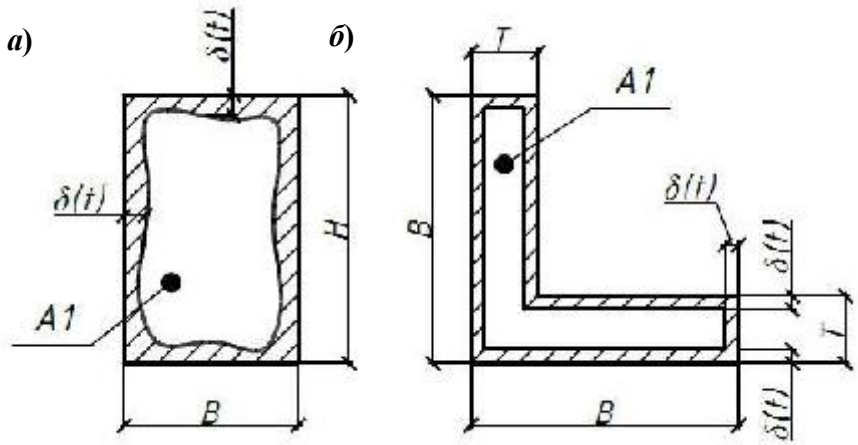


Рис. 2.2. Схема действия местного сплошного коррозионного разрушения для:
а) прямоугольного сечения; б) равнобокого уголка

Закон коррозионного износа металлического сечения в соответствии с [80] принят следующий:

$$\delta = \text{———}, t > t \quad , \qquad (2.1)$$

Рассматриваемый период времени t t t .

Для стали с модулем упругости E = 180000 МПа значение коэффициента $\delta_0 = 3{,}06\times10^{-3}$ м, для стали с модулем упругости E = 206000 МПа – $\delta_0 = 2{,}673\times10^{-3}$ м. Величина T составляет 2414суток.

2.2. Основные положения теории временного анализа

2.2.1 Уравнения динамической реакции конструктивно нелинейной ДДС

Математическая модель колебаний ДДС с n степенями свободы в i-м состоянии с учётом конструктивно нелинейной работы её несущих элементов записываются через систему ОДУ на интервале движения $t \in [t_i, t_{i+1}]$, которая вместе с начальными условиями задачи имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} M_i\ \ddot{Y}(t) + C_i\ \dot{Y}(t) + K_i\ Y(t) = Q_i, \\ Y_0 = Y(t_i), \quad \dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_i), \end{aligned}\right\} \qquad (2.2)$$

где M_i, C_i, K_i – матрицы масс, демпфирования и жёсткости системы;

$Y(t) = [y_k(t)]$ – вектор узловых перемещений дискретной модели;

Q_i – вектор, внешней статической (от собственного веса) нагрузки.

Построение решения при колебаниях ДДС на каждом квазилинейном интервале $t \in [t_i,\ t_{i+1}]$ будет связано с анализом матричному квадратному уравнению (МКУ), физический смысл которого заключается в том, что оно является уравнением движения собственных форм колебаний ДДС:

$$M_i\, S_i^2 + C_i\, S_i + K_i = 0, \qquad (2.3)$$

и вычислением матричного корня S_i .[47]

Аналитическое выражение для вычисления корневой пары согласно [96] имеет вид:

$$S_{1,2} = M^{-1}\ (-C + V \pm U) / 2,$$

Матрица S в физическом отношении является матрицей внутренних динамических характеристик системы. В спектре этой матрицы

$$S = P\Lambda P^{-1}, \quad \Lambda = -\varepsilon + i\omega$$

содержится информация о коэффициентах демпфирования ε_k, частотах ω_k и формах P_k собственных колебаний (k – номер степени свободы системы).

При переходе системы в новое (i+1)-е состояние, необходимо выполнить корректировку (изменение) параметров РДМ: в левых частях уравнений (2.2) и (2.3)

пересчитать матрицы M_{i+1}, C_{i+1}, K_{i+1}, на основе которых вычисляются новые значения матриц S_{i+1} и $\Phi(t) = e^{S_{i+1} t}$ Процесс корректировки параметров РДМ завершается обязательной сменой начальных условий (2.2).

Такое моделирование конструктивно-нелинейного процесса позволяет сводить динамическую задачу к разработанному расчётному алгоритму, при котором анализ рассматривается как последовательность расчёта упругих систем.

Полная система уравнений для построения упругой реакции ДДС на интервале времени $t \in [t_i, t_{i+1}]$, выраженной через узловые перемещения, скорости и ускорения, при действии собственного веса конструкции Q в соответствии с [96] записываются так:

$$\left.\begin{aligned} Y(t) = 2\mathrm{Re}\{\, Z(t)\,\}, \quad \dot{Y}(t) = 2\mathrm{Re}\{\, S_i\, Z(t)\,\}, \\ \ddot{Y}(t) = 2\mathrm{Re}\{\, S_i^2\, Z(t)\,\} + M_i^{-1} Q_i], \end{aligned}\right\} \qquad (2.4)$$

где:

$$\left.\begin{aligned} Z(t) = Z_0(\tilde{t}\,) + Z^{QR}(\tilde{t}\,), \\ Z_0(t) = \Phi(\tilde{t}\,)\, U_i^{-1}\, M_i\, (-\bar{S}\, Y_0 + \dot{Y}_0\,), \quad Z^{QR}(t) = [\,\Phi(\tilde{t}\,) - E\,]\,(U_i\, S_i)^{-1} Q_i. \end{aligned}\right\} \qquad (2.5)$$

Здесь: $\tilde{t} = t - t_i$; $\Phi(\tilde{t}\,) = e^{S_i \tilde{t}}$; $U_i = M_i\, S_i + S_i^{\mathrm{T}}\, M_i + C_i$. Слагаемые $Z_0(t)$ и $Z^{QR}(t)$ определяют реакцию системы при свободных колебаниях.

На основании векторов кинематических параметров (2.4) вычисляются значения векторов силовых параметров реакции ДДС – соответственно, восстанавливающих, диссипативных и инерционных сил:

$$R(t) = K_i\, Y(t), \quad F(t) = C_i\, \dot{Y}\,(t), \quad I(t) = -M_i\, \ddot{Y}\,(t). \qquad (2.6)$$

Через узловые перемещения $Y(t)$ можно перейти к параметрам НДС стержней конструкции: деформациям $\varepsilon(t)$, продольным силам $N(t)$ и нормальным напряжениям $\sigma(t)$ и др.

2.2.2 Энергетические параметры реакции конструктивно нелинейной ДДС

Характеристики (2.6) и параметры НДС стержней позволяют выполнить достаточной мере полный анализ силового сопротивления РДМ фермы на некотором временном интервале при колебательном процессе. Однако, качество анализа можно повысить, если определить энергетические параметры реакции: полную потенциальную, кинетическую и полную механическую энергии.

Полная механическая энергия системы $Э(t)$ определяется суммой полной потенциальной $П(t)$ и кинетической $T(t)$ энергий [137]:

$$Э(t) = П(t) + T(t). \qquad (2.7)$$

Слагаемое $П(t)$ зависит от взаимного расположения точек системы и определяется разностью между работой внутренних сил (энергией деформации) и потенциалом внешних сил: $П(t) = П_д(t) – П_с(t)$; слагаемое $T(t)$ – это мера движения этих точек в процессе колебаний [137]. Для дискретной системы величины правой части в (2.7) определяются суммами:

$$П(t) = \sum_{k=1}^{n} П_k(t), \quad T(t) = \sum_{k=1}^{n} T_k(t). \qquad (2.8)$$

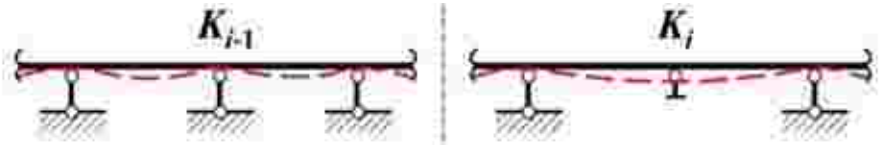
Для конструкции, находящейся под действием собственного веса Q, параметры (2.8) согласно [23] можно записать в векторной форме в зависимости от параметров реакции (2.6):

$$П(t) = [\, R(t) / 2 – Q \,]^{T}\, Y(t), \quad T(t) = \dot{Y}(t)^{T}\, M_i\, \dot{Y}(t) \,/ 2. \qquad (2.9)$$

Здесь $П_д(t) = R(t)^{T}\, Y(t) / 2$; $П_с(t) = Q^{T}\, Y(t)$.

2.2.3 Изменение параметров реакции системы при переходе в i-е состояние

Рассмотрим конструктивно нелинейную работу ДДС при действии статической нагрузки Q. При этом значения элементов матрицы масс и элементов вектора Q постоянные. В момент времени t_i происходит выключение некоторого несущего элемента, и система переходит в новое i-е состояние (рис.2.3).



ДДС до отказа элемента ДДС после отказа элемента

Рис. 2.3. **Состояния ДДС до и после выключения несущего элемента**

На интервале времени $t \in [t_{i-1}, t_i]$ реакция ДДС вычисляется с помощью уравнений (2.2), в которых динамические параметры системы определены для (i–1)-го состояния, характеризуемого матрицей жёсткости $K_{i-1} = K(t_{i-1})$ в МКУ (2.3). Начальные условия формируются в конце предыдущего временного интервала при $t = t_{i-1}$: $Y_0 = Y(t_{i-1})$, $\dot{Y}_0 = \dot{Y}(t_{i-1})$.

Состояние повреждённой конструкции моделируется с помощью матрицы жёсткости $K_i = K(t_i)$, которая посредством решения уравнения движения собственных форм (2.3), начиная с момента времени $t \geq t_i$, оказывает своё влияние на все параметры реакции при вынужденных и свободных колебаниях ДДС в уравнениях (2.3)–(2.6).

Параметры реакции, вычисленные до отказа несущего элемента, обозначим с помощью указателя t_i^-, параметры, вычисленные после, – с помощью t_i^+. Тогда изменение параметров реакции при переходе системы в новое состояние будет определяться соответствующими разностями:

$$\left.\begin{array}{c} \Delta Y(t_i) = Y(t_i^+) - Y(t_i^-), \quad \Delta \dot{Y}(t_1) = \dot{Y}(t_i^+) - \dot{Y}(t_i^-), \quad \Delta \ddot{Y} = \ddot{Y}(t_i^+) - \ddot{Y}(t_i^-); \\ \Delta R(t_i) = R(t_i^+) - R(t_i^-), \quad \Delta F(t_1) = F(t_i^+) - F(t_i^-), \quad \Delta I(t_1) = I(t_i^+) - I(t_i^-), \\ \Delta Э(t_i) = Э(t_i^+) - Э(t_i^-), \quad \Delta П(t_i) = П(t_i^+) - П(t_i^-), \quad \Delta T(t_i) = T(t_i^+) - T(t_i^-). \end{array}\right\} \quad (2.10)$$

Согласно [94, 96] аналитические выражения невязок кинематических и силовых параметров реакции на основе (2.11) имеют вид:

$$\left.\begin{array}{c} \Delta Y(t_i) = 0, \quad \Delta \dot{Y}(t_1) = 0, \quad \Delta \ddot{Y}(t_i) = M^{-1}[\Delta K_i\, Y(t_i) + \Delta C_i\, \dot{Y}(t_i)], \\ \Delta R(t_i) = -\Delta K_i\, Y(t_i), \quad \Delta F(t_i) = -\Delta C_i\, \dot{Y}(t_i), \quad \Delta I(t_i) = -[\Delta K_i\, Y(t_i) + \Delta C_i\, \dot{Y}(t_i)]. \end{array}\right\} \quad (2.11)$$

Здесь $\Delta K_i = K_{i-1} - K_i$, $\Delta C_i = C_{i-1} - C_i$, – невязки, соответственно, матриц жёсткости и демпфирования при переходе системы из (i–1)-го и i-е состояние. Данные невязки

характеризуют степень поврежденности ДДС при её внезапной структурной перестройке в процессе нелинейной работы.

Для получения уравнений невязок энергетических характеристик запишем необходимые параметры ДДС, вычисленные в моменты времени t_i^- и t_i^+. При t_i^- векторы узловых перемещений и скоростей, соответственно, равны $Y(t_i^-) = Y(t_i)$, $\dot{Y}(t_i^-) = \dot{Y}(t_i)$, вектор восстанавливающих сил определяется как $R(t_i^-) = K_{i-1}\, Y(t_i)$. После отказа элемента (при t_i^+) эти же параметры принимают значения: $Y(t_i^+) = Y(t_i)$, $\dot{Y}(t_i^+) = \dot{Y}(t_i)$, $R(t_i^+) = K_i\, Y(t_i)$. Далее, подставив указанные величины в (2.10) получим искомые невязки энергетических параметров (2.8), (2.9):

$$\Delta Э(t_i) = \Delta П(t_i) = Y(t_i)^{\mathrm{T}}\, \Delta K_i\, Y(t_i),\ \Delta T(t_i) = 0. \qquad (2.12)$$

Величина энергетического скачка $\Delta Э(t_i) = \Delta П(t_i)$ соответствует высвобожденной энергии, которая равна запасённой в несущем элементе потенциальной энергии деформации к моменту его отказа. Для стержней ферм эта величина, согласно [48], вычисляется так:

$$П_{\text{д}} = \frac{N^2 L}{2(EA)}, \qquad (2.13)$$

где L, A – соответственно, длина и площадь поперечного сечения стержня; N – продольная сила; E – модуль Юнга.

Зависимости (2.11) свидетельствуют о том, что в общем случае в моменты перехода конструктивно нелинейной системы в новое состояние (при $t = t_i$) перемещения и скорости остаются неразрывными функциями времени, что обеспечивается постановкой начальных условий (2.1), остальные параметры (ускорения и силовые параметры (2.6)) претерпевают разрывы, связанные с внезапным изменением жесткостных (ΔK) и демпфирующих (ΔC) свойств конструкции.

Наличие разрывов в ускорениях и энергиях в момент времени t_i свидетельствует о нарушении статического равновесия в системе при её структурной перестройке. Работа ДДС осуществляется следующим образом. Стремясь достичь равновесного положения, соответствующего новой жёсткости, конструкция входит в

колебательный процесс, в течение которого происходит перераспределение усилий в несущих элементах, поскольку внутренние силы должны уравновесить внешние силы, а также силы инерции и сопротивления. Если сопротивляемость системы к разрушению обеспечена, то дальнейших структурных перестроек в конструкции не происходит, и колебания затухают. В противном случае – происходит выключение одного или нескольких несущих элементов (при потере прочности или устойчивости), что, в свою очередь, может привести к обрушению всей конструкции. Оценка сопротивляемости определяется на основе значений ранга и определителя матрицы жёсткости системы K_i.

2.3. Математическая модель конструктивно нелинейных колебаний системы

При реализации математической модели конструктивно нелинейного расчёта ферм приняты следующие допущения:

1) весь процесс вычисления реакции разбивается на квазилинейные интервалы времени $t \in [t_i, t_{i+1}]$, на которых параметры РДМ постоянны;
2) в качестве граничных (критических) точек интервалов t_i принимаются – выключение элемента из работы или его включение в работу;
3) переход системы из i-го в (i+1)-е состояние считается мгновенным;
4) работа системы – упругая.

Внезапное выключение некоторого несущего элемента из работы, приведёт к возникновению эффекта кинематического воздействия вследствие внезапного изменения жесткостных характеристик системы. Графически на диаграмме жёсткости это представляется в виде разрывов ломаных линий *ABCD*, изображённых на рис. 2.4. Так, в точках *A* и *C* графика имеются разрывы, возникающие в моменты выключения элемента из работы.

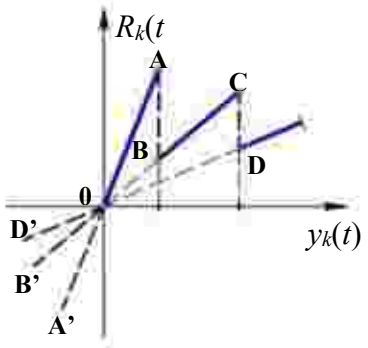


Рис. 2.4. **Диаграммы жёсткости конструктивно нелинейной системы в направлении *k*-й степени свободы**

При такой работе закон изменения *k*-й компоненты ДВС будет иметь следующий вид:

$$R_k(t) = R_{e,k}(t) = \text{tg}\ \alpha_k \cdot y_k(t). \qquad (2.14)$$

Здесь $R_{e,k}(\text{t})$ – квазилинейная компонента вектора ДВС; $\text{tg}\ \alpha_\text{k}$ – жёсткость ДДС в направлении *k*-й степени свободы на отдельном квазилинейном интервале анализа.

При условии отсутствия в системе упругопластических (остаточных) деформаций y_p линия действия отрезка *BC* на рис. 2.4 будет проходить через начало координат, в противном случае – нет.

2.4. Алгоритм вычисления параметров реакции фермы в процессе упругого временного анализа при выключении несущих элементов

На рис. 2.5 приведена блок-схема временного анализа упругих колебаний конструктивно нелинейной ДДС. Данный алгоритм состоит из пяти основных операционных блоков, структура которых показана на рис. 2.6, и цикла по времени. Ниже дадим краткое описание данных блоков:

- ***блок 1*** – формирование динамических параметров базовой РДМ фермы, задание параметров временного анализа и начальных условий задачи;
- ***блок 2*** – вычисление параметров реакции РДМ конструкции (2.4), (2.6);
- ***блоке 3*** – поиск критической временной точки t_i. Выполняется проверка условий прочности или устойчивости;
- ***блок 4*** выполняется в случае изменения состояния одного или нескольких элементов. Для нового состояния системы производится корректировка динамических параметров, а также начальных условий задачи;
- ***блок 5*** –проверка несущей способности конструкции.

Операции ***Блока 1*** выполняются один раз непосредственно перед циклом по времени; операции ***блоков 2 и 3*** – на каждом шаге цикла временного анализа до его завершения; процедуры ***блоков 4 и 5*** – от одного до нескольких раз в зависимости от количества переходов РДМ в новые состояния.

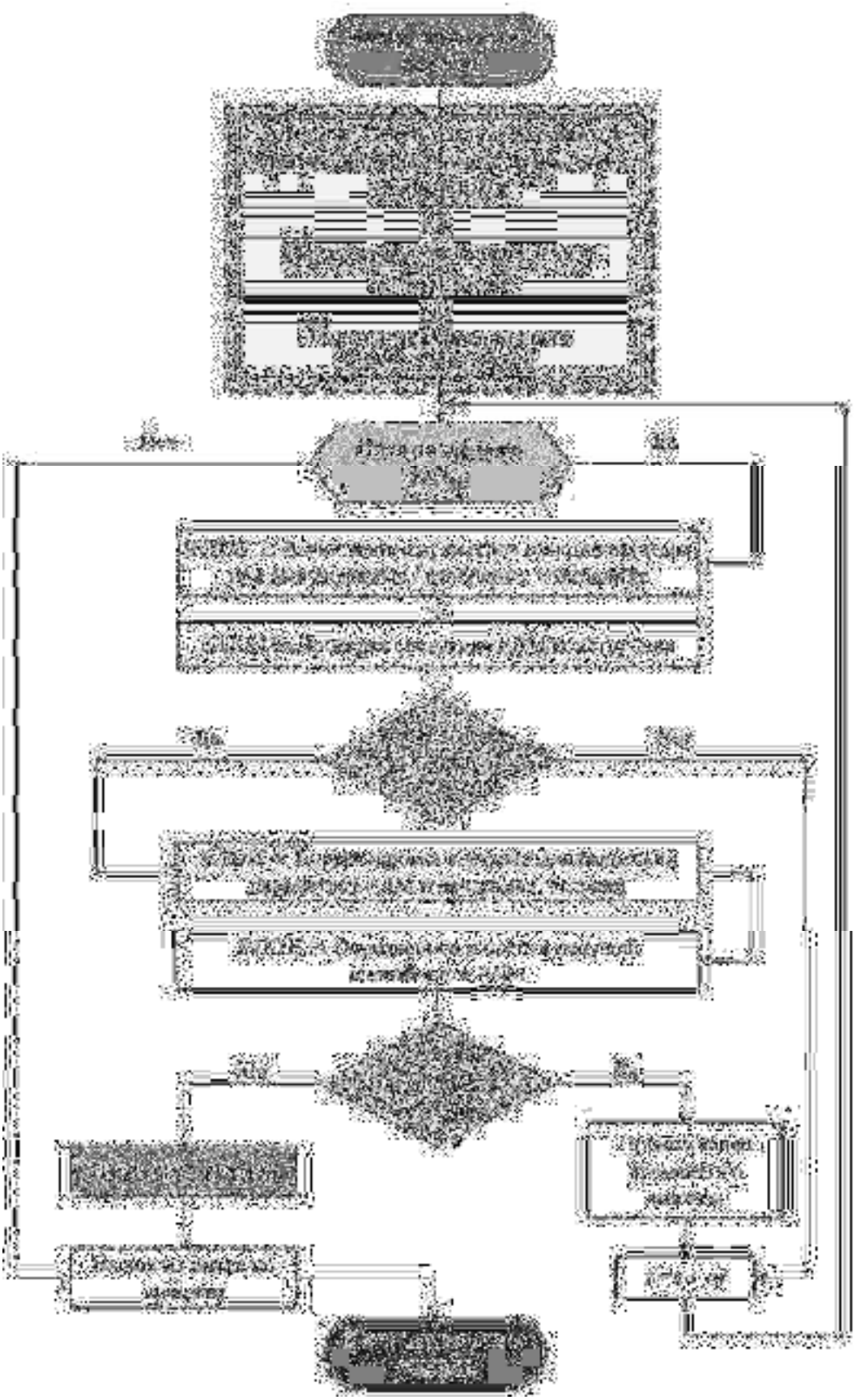


Рис. 2.5. **Блок-схема временного анализа реакции упругой конструктивно нелинейной ДДС**

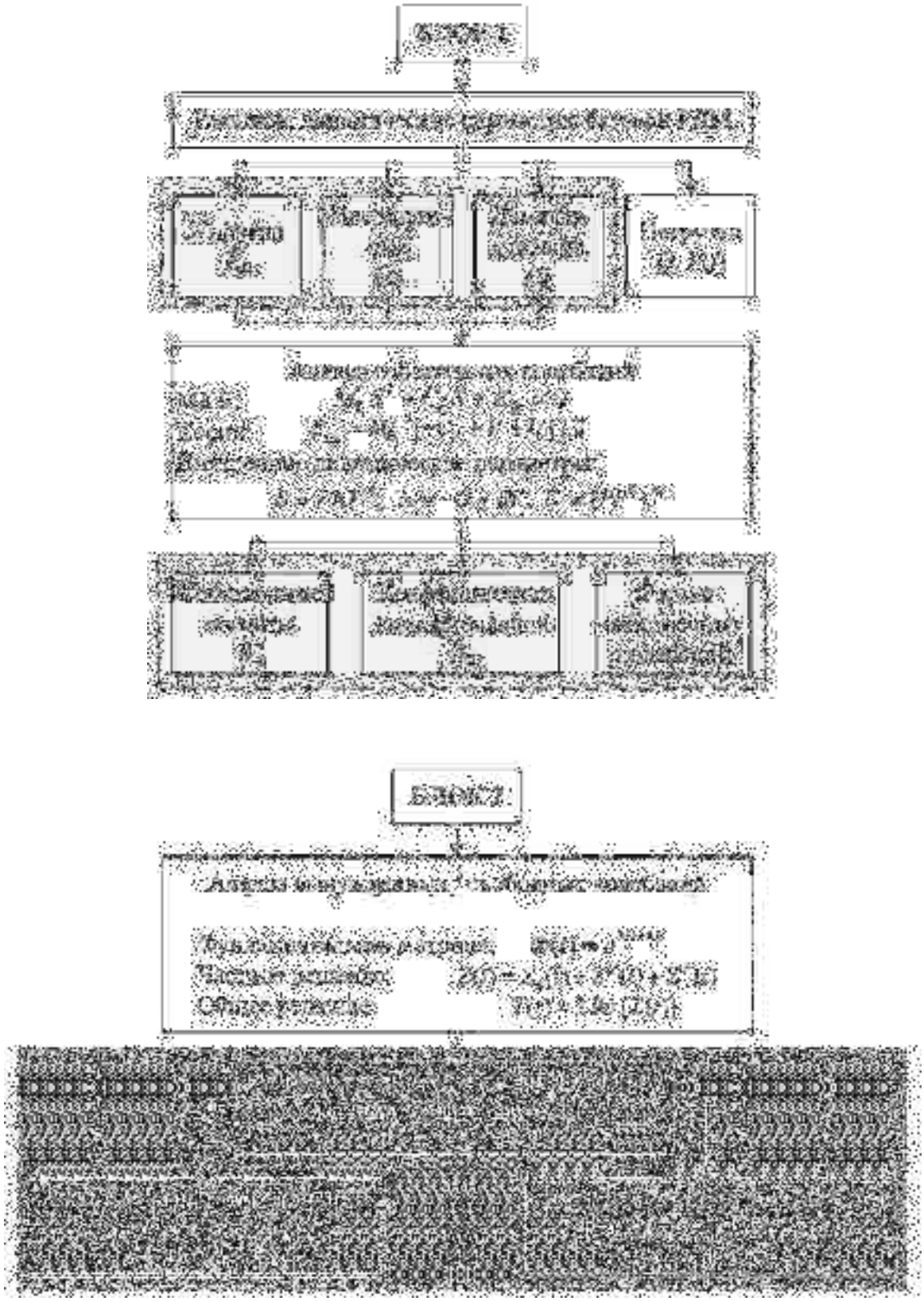


Рис. 2.6. **Структурные блоки процесса упругого временного анализа конструктивно нелинейной ДДС** (начало)

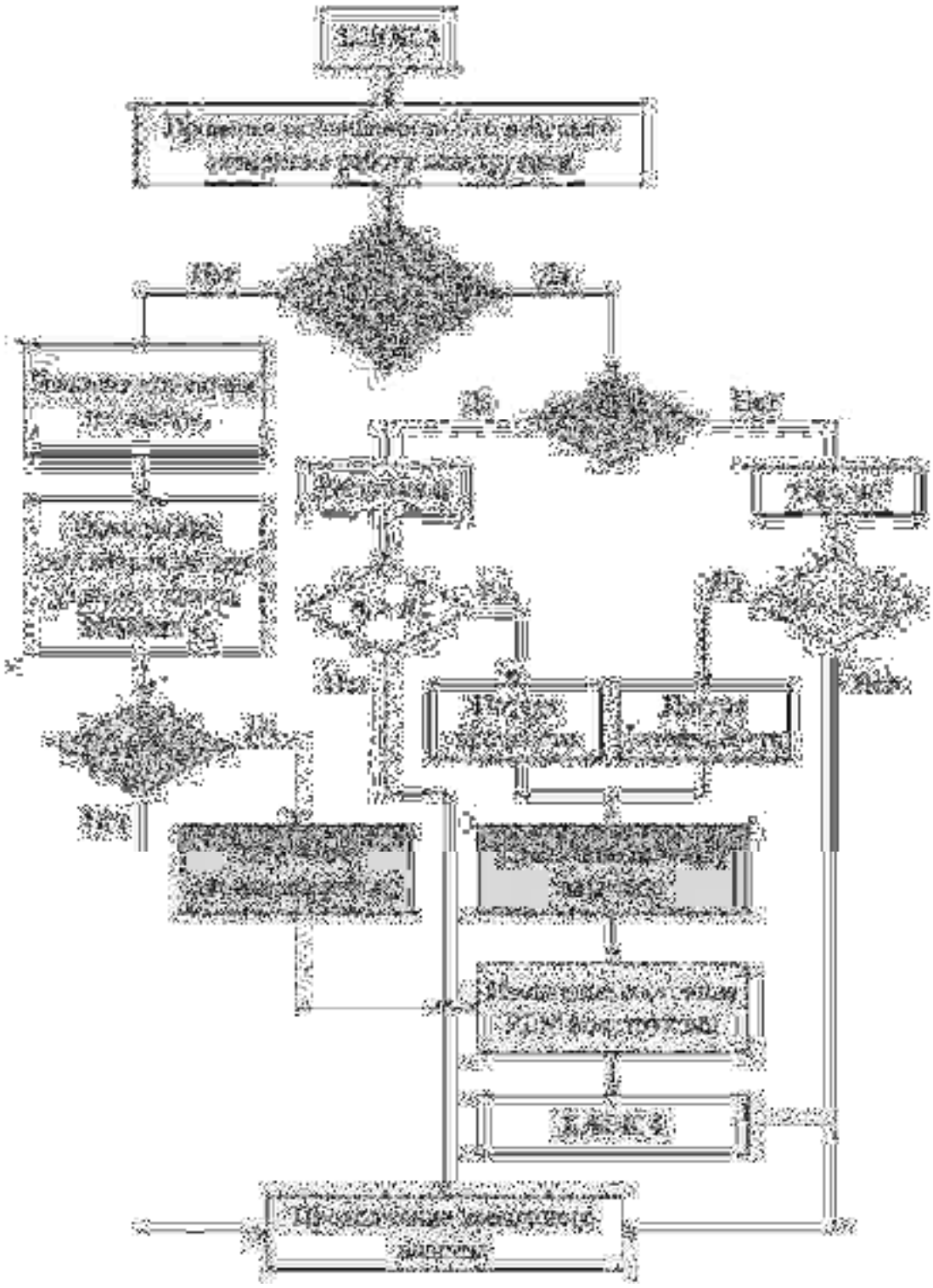


Рис. 2.6. **Структурные блоки процесса упругого временного анализа конструктивно нелинейной ДДС** (продолжение)

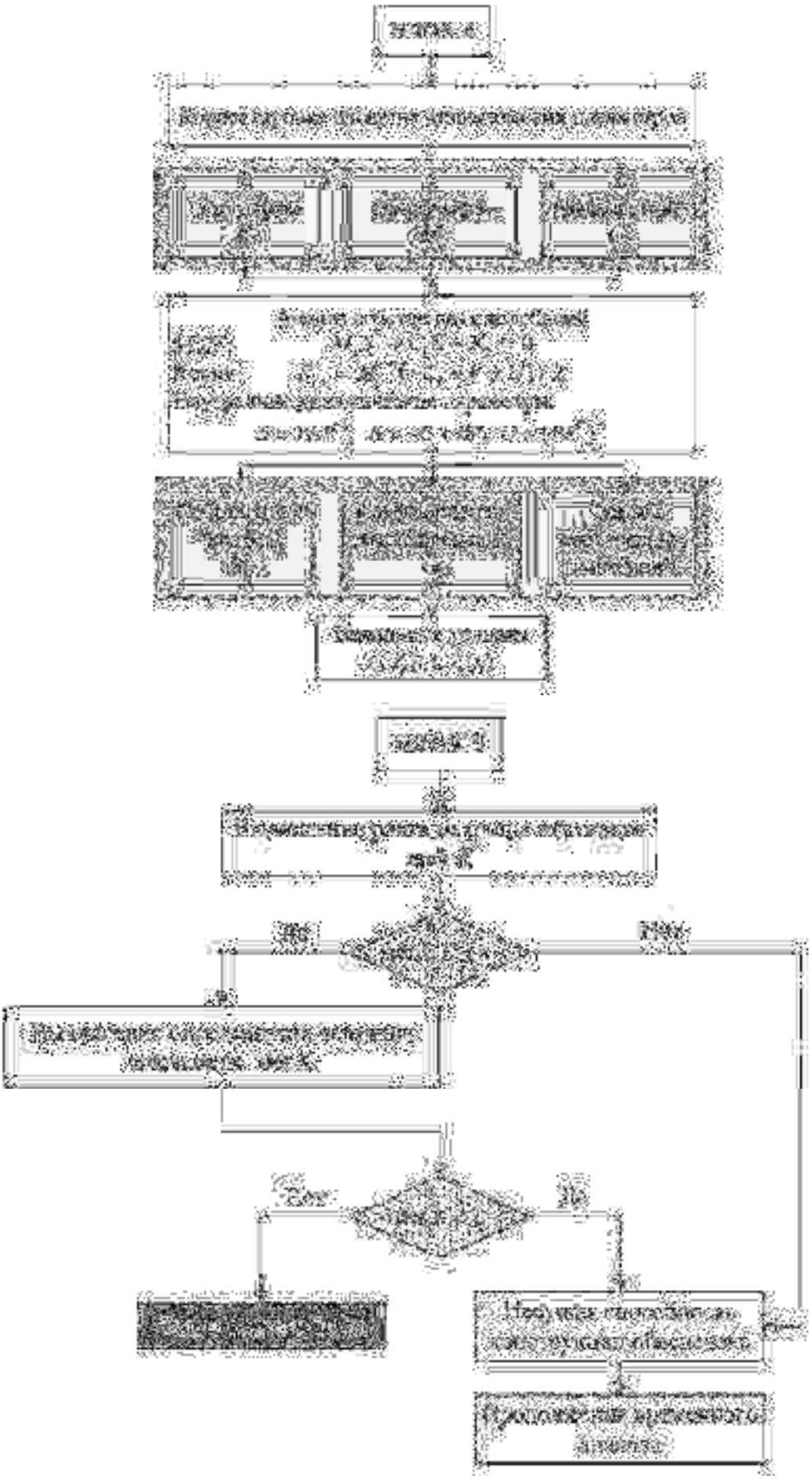


Рис. 2.6. **Структурные блоки процесса упругого временного анализа конструктивно нелинейной ДДС** (окончание)

2.6. Выводы по главе

1. Даны обзор по методам динамического расчёта диссипативных систем с учётом конструктивно нелинейных свойств, обзор современных аналитических методов расчёта конструкций, основанных на временном анализе реакции при нестационарном процессе и обзор методов учёта влияния коррозионных процессов на строительные конструкции.

2. Изложены основные положения теории временного анализа, связанные с исследованием матричного квадратного уравнения. Описана общая схема решения конструктивно нелинейной динамической задачи с использованием аппарата метода временного анализа.

3. Описана математическая модель упругих конструктивно нелинейных колебаний системы, для которой указаны допущения, принимаемые в расчёте, и диаграмма жёсткости работы конструкций, имеющая вид ломанной линии. Данная математическая модель позволяет с единых позиций проводить временной анализ конструктивно нелинейных колебаний ДДС. На отдельном отрезке времени $t \in [t_i, t_{i+1}]$ модель учитывает поведение ДДС как квазилинейной системы.

4. Приведена блок схема упругого конструктивно нелинейного временного анализа. Реализация данной схемы выполнена на языке *MATLAB*.

ГЛАВА III. ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ УПРУГИХ КОНСТРУКТИВНЫО НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ФЕРМЫ ПОКРЫТИЯ

3.1. Расчётная динамическая модель варианта усиления *А* фермы

3.1.1 Внешние динамические параметры

РДМ фермы приведена на рис. 3.1, *а*). Данная конструкция является 4 раза статически неопределимой и имеет с учётом наложенных связей $n = 33$ динамических степени свободы (рис. 3.1, *б*).

***а*)**

***б*)**

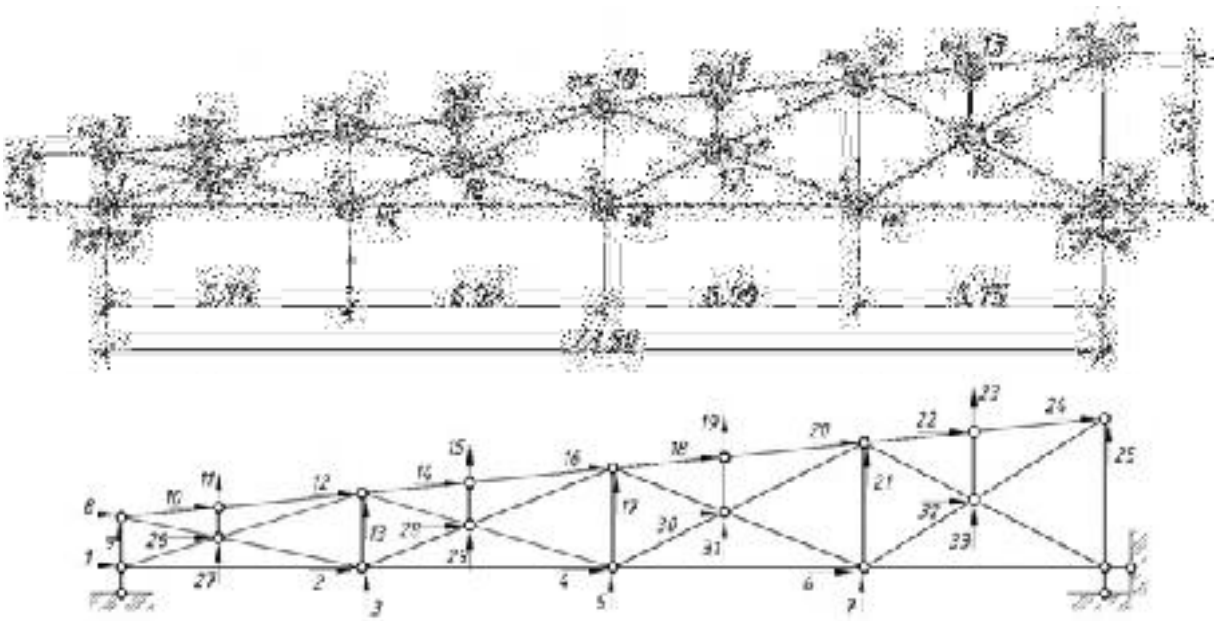


Рис.3.1. Ферма покрытия (вариант усиления А):
а) РДМ; *б*) нумерация и направление степеней свободы

Материал фермы, размеры и жесткостные характеристики сечений элементов приведены в пункте 1.4.

Матрица жёсткости исходной модели фермы *К* строится с помощью процедуры метода конечных элементов, которая реализована на языке *MATLAB*.

При формировании матрицы масс *М* учитывается масса стержней, сходящихся в узлах, и дополнительная масса от покрытия, прогонов, связей и коммуникаций, передающаяся на узлы конструкции. Масса, приложенная к узлам конструкции, собирается по формуле (3.1):

$$m = m_{с.в.,} + m_{доп}. \qquad (3.1)$$

Здесь: $m_{с.в.}$ – собственный вес стержней, сходящихся в узле;

$m_{доп.}$ – дополнительная масса, приложенная ку узлу:

$$m_{доп.} \quad m_{пан.покр.} \quad m_{прог.} \quad m_{связ.} \quad m_{комм.}, \qquad (3.2)$$

где $m_{пан.покр.}$ – масса, собранная от панелей покрытия; $m_{прог.}$ – масса, собранная от прогонов; $m_{связ.}$ – масса, собранная от связей, крепящихся к ферме; $m_{комм.}$ – масса, собранная от креплений инженерных коммуникаций.

Для расчёта $m_{доп.}$ по формуле (3.2) рассматриваются нагрузки от:

– панелей покрытия – $g_{пан.покр.} \quad 34.2кг/м$,

– прогонов – $g_{прог.} \quad 8кг/м$,

– связей – $g_{связ.} \quad 5кг/м$,

– инженерных коммуникаций – $g_{комм.} \quad 10кг/м$.Грузовая площадь для сбора дополнительной нагрузки представлена на рис.3.2.

Таким образом, величины дополнительных масс (см. рис. 3.2) равны:

$$m_{доп.,} \quad g_{связ.} \quad g_{комм.} \cdot \frac{A_{груз.}}{2} \quad 5 \quad 10 \cdot \frac{6 \cdot 6}{2} \quad 270кг$$

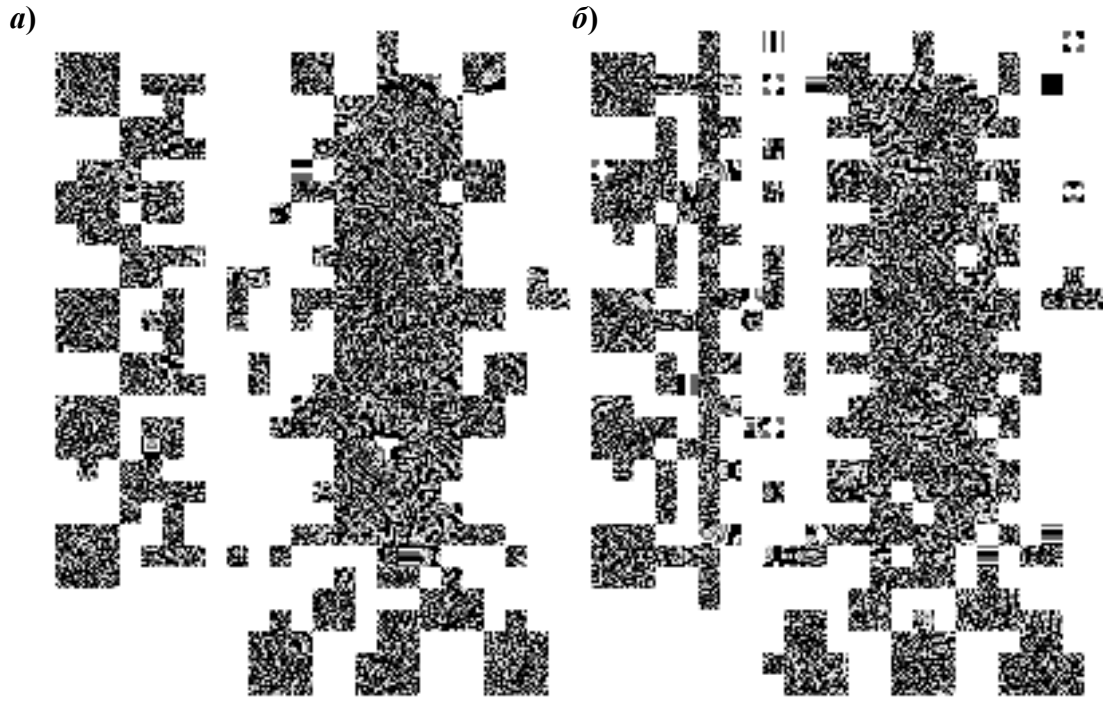


Рис. 3.2 . К определению грузовой площади для определения значений:
а) масс m_1 и m_2; *б*) масс m_3 и m_4

$m_{доп.}$ g связ. $g_{комм.}$ $\cdot A_{груз.}$ 5 10 $\cdot 6 \cdot 6$ 540кг

$m_{доп.}$ g связ. $g_{комм.}$ $g_{покр.}$ $g_{прог.}$ $\cdot A_{груз.}$

5 10 34.2 8 $\cdot 6 \cdot 3$ 1029.6кг

$m_{доп.}$ $\frac{m_{доп.}}{2}$ $\frac{1029.6}{2}$ 514.8кг

Следовательно, массы, собранные в узлах фермы по формуле (3.1) определяются так:

m $m_{с.в.}$, $m_{доп.}$,

m $m_{с.в.}$, $m_{доп.}$,

m $m_{с.в.}$, $m_{доп.}$,

m $m_{с.в.}$, $m_{доп.}$,

m $m_{с.в.}$,

В соответствии с вышеизложенным, матрица *M* и вектор узловой статической нагрузки *Q* имеют вид:

M = diag[m_1 m_2 m_2 m_2 m_2 m_2 m_2 m_3 m_3 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_4 m_3 m_3 m_5 m_5 m_5 m_5 m_5 m_5 m_5],

Q = [0 0 q_2 0 q_2 0 q_2 0 q_3 0 q_4 0 q_4 0 q_4 0 q_4 0 q_4 0 q_4 0 q_4 0 q_4 0 q_3 0 q 0 q 0 q 0 q]^T G.

где $q_i = m_i g$; g = 9,81 м/с^2 – ускорение свободного падения. Нулевые элементы в векторе Q соответствуют горизонтальным степеням свободы системы.

Матрица демпфирования *C* строится по модели непропорционального демпфирования [96]:

$$C = \alpha \frac{KT + TK}{2} + \beta MV, \qquad (3.3)$$

где K, M – соответственно, матрицы жёсткости и масс системы, находящейся в *i*-м состоянии; T, V – диагональные матрицы, вычисляемые по зависимостям:

$$T = \gamma \cdot \omega_0^{-1}, \quad V = \gamma \cdot \omega_0.$$

Здесь $\omega_0 = \mathrm{diag}(\omega_{01}, \ldots, \omega_{0n})$, $\gamma = \mathrm{diag}(\gamma_1, \ldots, \gamma_n)$ – соответственно, диагональные матрицы частот колебаний консервативного одномассового осциллятора и коэффициентов потерь; $\omega_{0k} = \sqrt{\frac{r_{k\,k}}{m_k}}$ – частота колебаний консервативного одномассового осциллятора в направлении k-й степени свободы системы; $\gamma_k = \delta_k / \pi$ – коэффициент потерь, определённый на частоте ω_{0k}. Параметры r_{kk}, m_k – диагональные элементы матриц жёсткости K и масс M; δ_k – логарифмический декремент колебаний, который в настоящей работе принят равным 0,085 – как для стальных мостов [35].

3.1.2 Внутренние динамические параметры модели фермы, напряжения в стержнях, полная механическая энергия

Параметры собственных колебаний РДМ – собственные частоты и коэффициенты демпфирования, а также определитель и норма матрицы жёсткости, энергия исходной фермы представлены в таблице №3.1.

Таблица №3.1

Степень свободы	Собств. частоты ω_k, $с^{-1}$	Коэф. демпф. ε_k, $с^{-1}$	Определитель матрицы жёсткости $\det(K_i)$	Норма матрицы жёсткости $\mathrm{norm}(K_i)$	Полная механическая энергия $E(t_0)$, Дж
1	27,61	0,33			
2	72,02	0,51			
3	106,04	0,70			
4	139,50	0,87			
5	171,46	1,23			
6	200,45	1,50			
7	241,02	1,83			
8	255,32	2,20			
9	281,62	2,79			
10	350,78	3,54			
11	417,50	5,27			
12	469,57	6,01			
13	486,24	6,22			
14	515,57	6,39			
15	536,20	7,28			
16	571,06	7,34			
17	610,14	8,45	3,0317E+106	13130,147	579,8
18	673,93	8,89			
19	763,93	10,32			
20	835,37	12,31			
21	883,46	13,65			
22	952,30	15,82			
23	990,67	16,76			
24	1062,20	17,36			
25	1405,01	20,18			
26	1443,96	22,61			
27	1479,00	23,01			
28	1794,03	28,27			
29	1845,21	28,52			
30	1889,29	29,83			
31	2024,64	31,16			
32	2149,57	31,28			
33	2730,67	45,28			

Нормальные напряжения в стержнях исходной фермы представлены в табл. 3.2

Таблица №3.2

№ стержня	№№ узлов	Напряжения σ_j, МПа
1	1-2	2,94
2	2-3	**5,56**
3	3-4	**4,41**
4	4-5	1,99
5	6-7	-2,38
6	7-8	-2,38
7	8-9	**-4,24**
8	9-10	**-4,24**
9	10-11	-3,45
10	11-12	-3,45
11	12-13	-1,19
12	13-14	-1,19
13	1-6	-3,17
14	6-15	2,77
15	1-15	-2,46
17	15-8	-2,15
18	15-2	2,56
19	2-8	-0,56
20	8-16	1,16
21	2-16	-0,23
22	16-9	-1,04
23	16-10	1,06
24	16-3	-0,09
25	3-10	-0,70
26	10-17	-0,64
27	3-17	1,24
28	17-11	-1,03
29	17-12	1,46
30	17-4	-0,96
31	4-12	-0,23
32	12-18	-3,39
33	4-18	2,88
34	18-13	-1,01
35	18-14	1,39
36	18-5	-1,57
37	5-14	-2,81

Из таблицы 3.2 видно, что наиболее нагруженные стержни располагаются в середине верхнего и нижнего поясов – стержни 2 (2-3), 3 (3-4), 7 (8-9), 8 (9-10).

3.2. Расчётная динамическая модель варианта *Б* фермы

3.2.1 Внешние динамические параметры

Данный вариант конструкции является 3 раза статически неопределимым (рис. 3.3, а) и имеет динамическую степень свободы $n = 29$ (рис. 3.3, *б*).

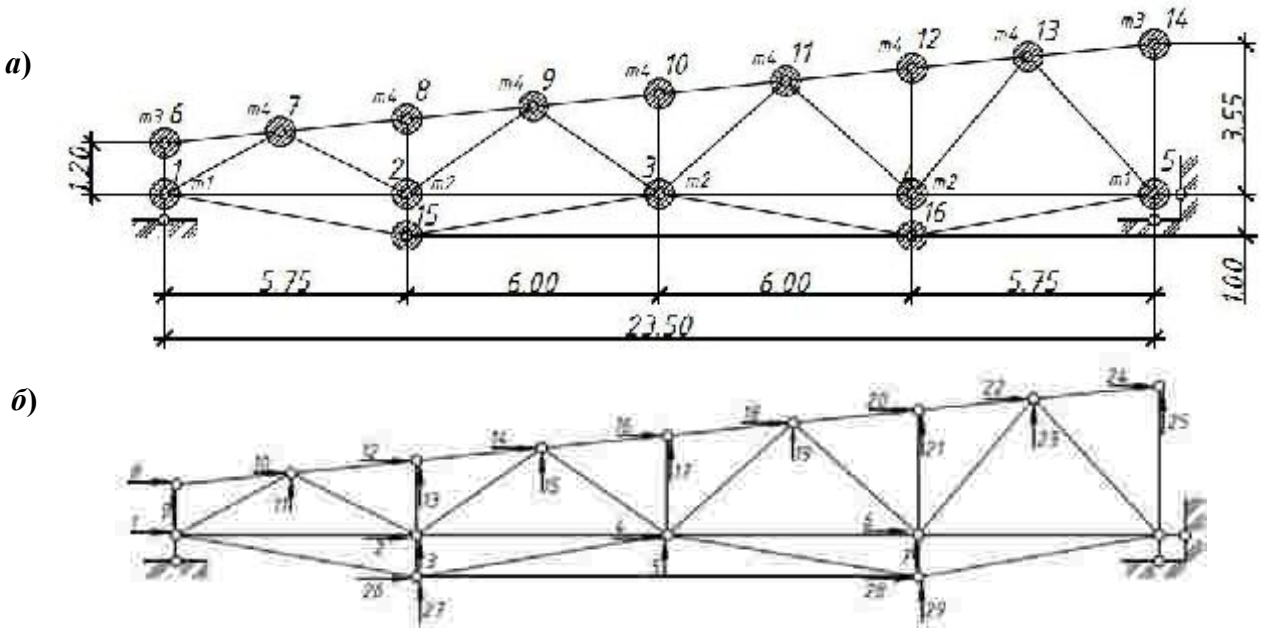


Рис.3.3. Ферма покрытия (вариант Б):
а) РДМ; *б*) нумерация и направление степеней свободы

Ферма имеет жесткостные характеристики и дополнительные нагрузки аналогичные описанным для варианта *А*. Для данного варианта фермы матрица M и вектор узловой статической нагрузки Q имеют вид:

$$M = \mathrm{diag}[\ m_1\ \ m_2\ \ m_2\ \ m_2\ \ m_2\ \ m_2\ \ m_2\ \ m_3\ \ m_3\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_4\ \ m_3\ \ m_3\ \ m\ \ m\ \ m\ \ m\ ],$$

$$Q = [\ 0\ \ 0\ \ q_2\ \ 0\ \ q_2\ \ 0\ \ q_2\ \ 0\ \ q_3\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_4\ \ 0\ \ q_3\ \ 0\ \ q\ \ 0\ \ q\ ]^{\mathrm{T}}\ G.$$

3.1.2 Внутренние динамические параметры модели фермы, напряжения в стержнях, полная механическая энергия

Параметры исходной модели фермы представлены в таблице 3.3.

Таблица №3.3

Степень свободы	Собств. частоты ω_k, $с^{-1}$	Коэф. демпф. ε_k, $с^{-1}$	Определитель матрицы жёсткости $\det(K_i)$	Норма матрицы жёсткости $\mathrm{norm}(K_i)$	Полная механическая энергия $E(t_0)$, Дж
1	38,87	0,31			
2	95,89	0,62			
3	107,35	0,69			
4	150,36	1,15			
5	202,41	2,13			
6	225,20	2,15			
7	242,72	2,27			
8	280,50	3,39			
9	329,23	4,23			
10	354,87	4,31			
11	417,63	4,38			
12	459,16	5,38			
13	489,79	5,39			
14	510,03	6,28			
15	521,82	7,48	2,892E+92	11972,48847	303,89
16	568,40	7,54			
17	619,80	7,95			
18	668,17	9,28			
19	698,19	9,70			
20	767,70	10,95			
21	854,59	13,19			
22	894,18	13,61			
23	952,41	15,61			
24	995,72	16,21			
25	1019,85	17,92			
26	1048,27	18,18			
27	1081,24	19,02			
28	1089,83	19,33			
29	1550,88	25,46			

Нормальные напряжения в стержнях исходной фермы представлены в табл. 3.4

Таблица №3.4

№ стержня	№№ узлов	Напряжения σ_j, МПа
1	1-2	-0,44
2	2-3	1,63
3	3-4	1,51
4	4-5	-1,00
6	7-8	**-2,76**
7	8-9	**-2,76**
8	9-10	**-3,37**
9	10-11	**-3,37**
10	11-12	-1,84
11	12-13	-1,84
14	1-7	-2,42
15	7-2	1,43
17	2-9	-1,82
18	9-3	0,16
20	3-11	1,30
21	11-4	-1,62
23	4-13	**3,63**
24	13-5	-1,45
26	1-15	2,20
28	15-3	0,98
29	3-16	0,20
31	16-5	1,65
32	15-16	2,13

Из таблицы 3.4 видно, что наиболее нагруженные стержни располагаются в верхнем поясе – стержни 23 (4-13), 8 (9-10), 9 (10-11), 6 (7-8), 7 (8-9).

3.3. Временной анализ упругих колебаний фермы покрытия, вызванных внезапным выключением одного из стержней

В данном параграфе рассмотрен анализ свободных упругих колебаний статически нагруженной плоской стальной фермы покрытия с усилением (рис. 3.1, 3.3). Колебания конструкции вызваны внезапным выключением одного из элементов вследствие растрескивания материала при действии химической коррозии. Решение задачи выполнено методом временного анализа [96].

3.3.1 Вариант фермы А

Рассмотрим процесс колебаний фермы, изображённой на рис. 3.1, *а*. В начальный момент времени (при t = 0) происходит внезапный отказ одного из стержней фермы. Причиной, приводящей к выходу элемента из строя, служит его потеря прочности или устойчивости вследствие коррозионного растрескивания материла. После этого ферма совершает свободные затухающие колебания. При этом конструкция может достичь нового уровня статического равновесия либо обрушиться.

В качестве начальных условий задачи (2.2) приняты следующие: $Y_0 = Y_{st}$, $\ddot{Y}_0 = 0$. Здесь: $Y_{st} = K_0^{-1} Q$ – вектор статических перемещений фермы, где K_0 – исходная матрица жёсткости.

Подробно рассмотрены сценарии изменений параметров фермы при отключении стержня нижнего пояса 2-3, раскоса 17-4, стержней верхнего пояса 8-9 и 12-13.

На рис. 3.5–3.8 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при выключении стержня. При таком сценарии ферма не обрушается, сохраняя свою несущую способность (рис. 3.4). Но изменения кинематических и силовых параметров являются наибольшими. На рис. 3.7 на приведены осциллограммы продольных сил и нормальных напряжений в стержнях, имеющих наиболее характерные изменения параметров во времени.

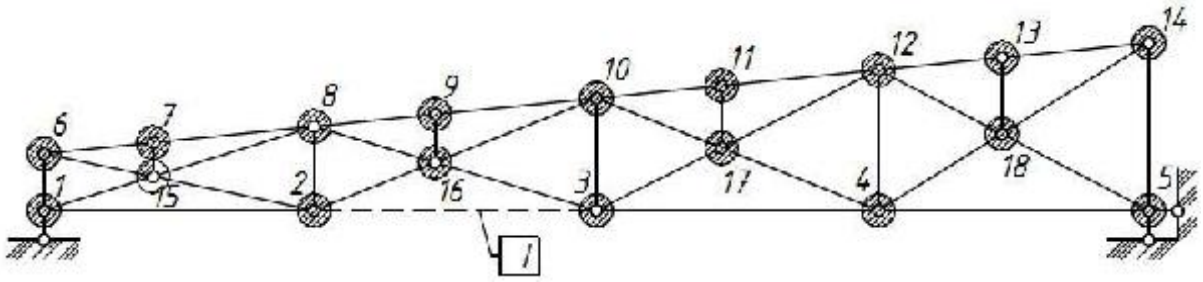


Рис. 3.4. Сценарий отказа стержня 2-3 фермы

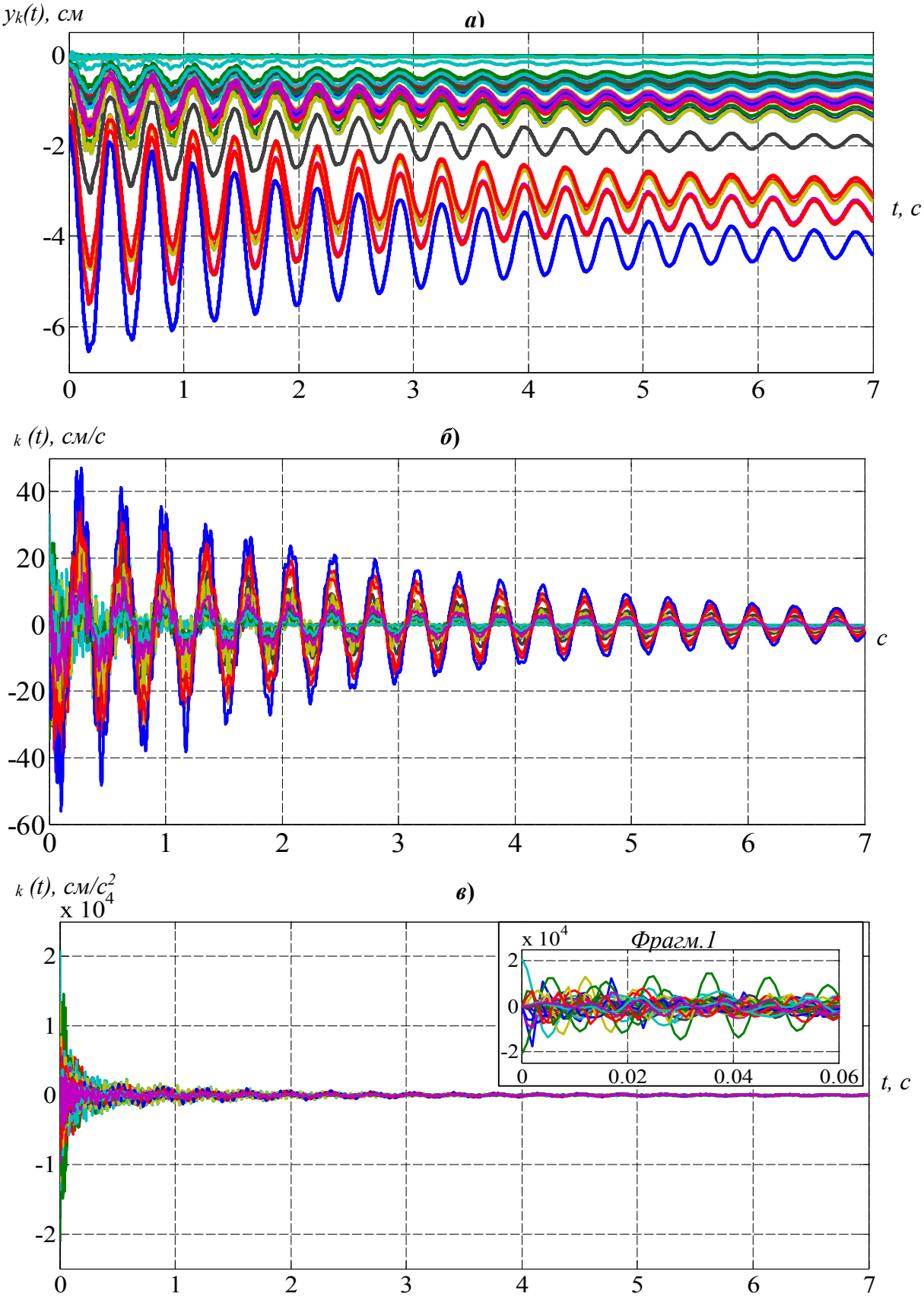


Рис. 3.5. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

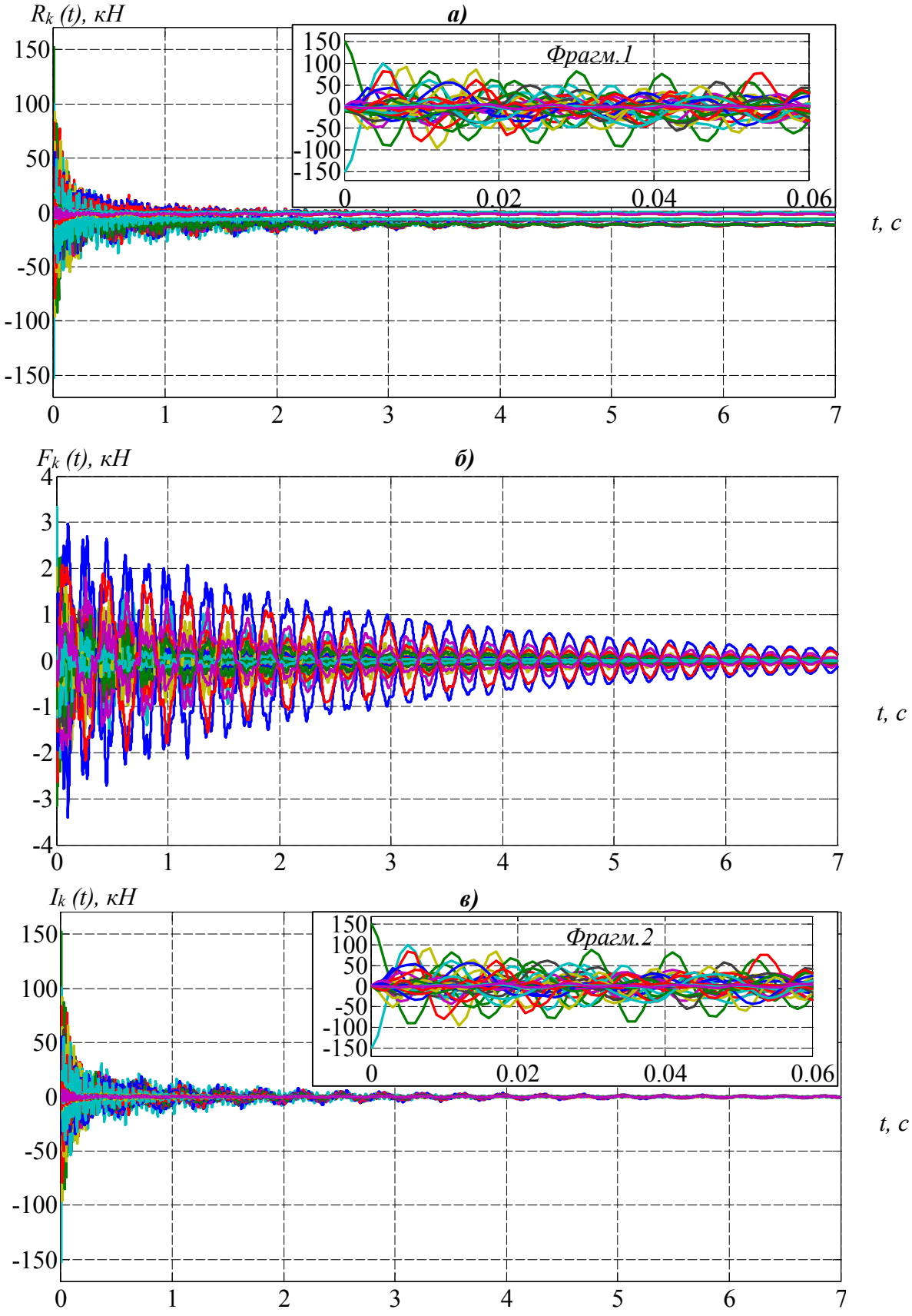


Рис. 3.6. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

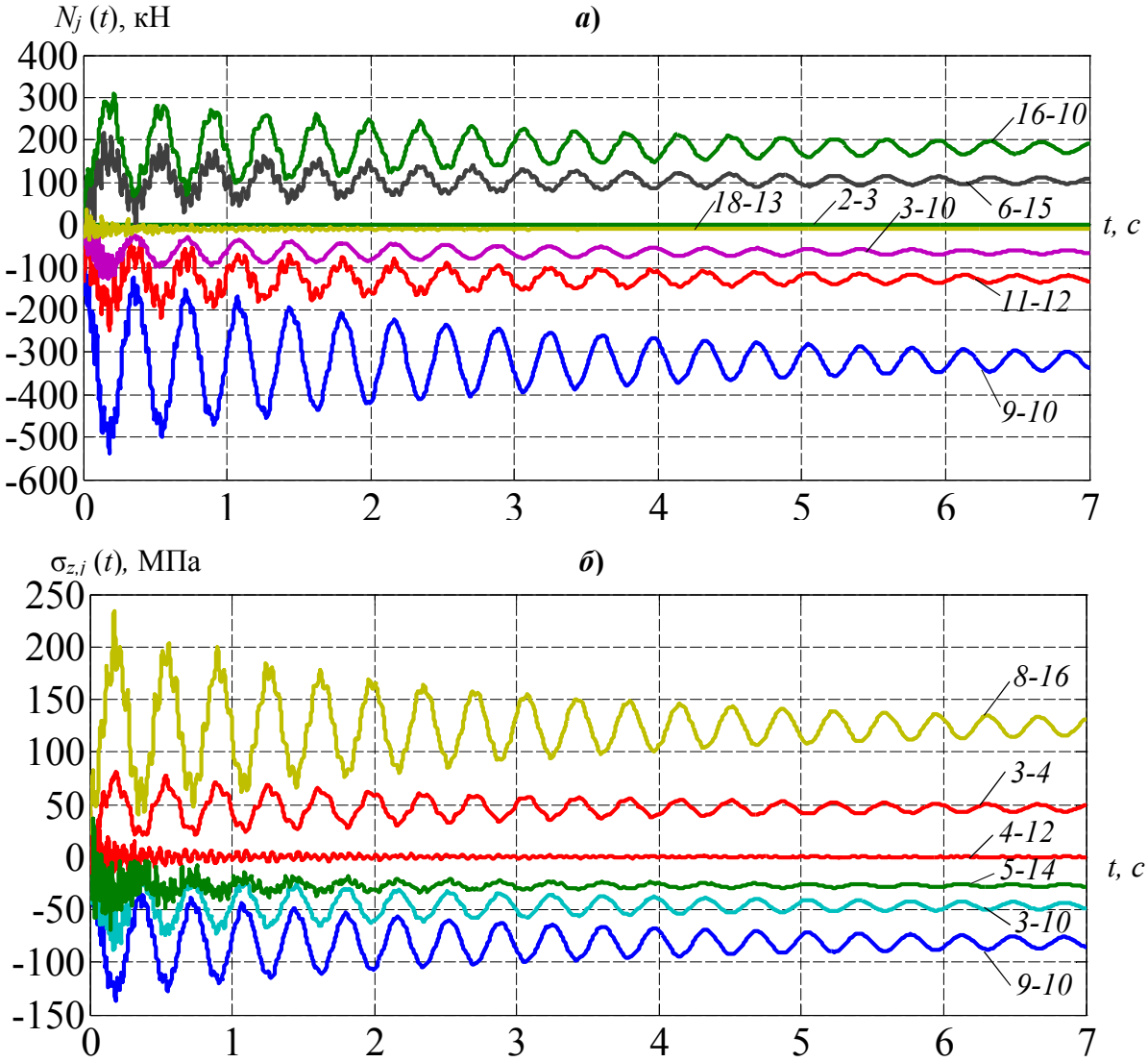


Рис. 3.7. Осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в наиболее нагруженных стержнях фермы

После выключения раскоса по графикам параметров реакции можно видеть, что первое время, около 3–5 секунд, система находится в переходном режиме, о чём свидетельствуют появление гармоник высшего порядка, наложенных на низшие гармоники (основной тон и первые обертоны). В дальнейшем система переходит в режим установившихся затухающих колебаний.

После выключения стержня происходит снижение жёсткости системы, вследствие чего колебания совершаются относительного нового положения статического равновесия, что можно видеть на осциллограммах узловых перемещений (рис. 3.5, *а*). Полная механическая энергия принимает новое значение, что видно из осциллограмм на рис. 3.8. Скорости и ускорения масс конструкции (рис. 3.5, *б*, *в*),

в отличие от перемещений, с течением времени стремятся к нулевым значениям. Также можно видеть, что ускорения в момент выключения раскоса (при $t_0 = 0$) равны нулю, а графики ускорений имеют разрывы, численно равные:

$$\Delta \ddot{Y}(t_0) = -M^{-1}\Delta K_1 \, Y_0, \qquad (3.4)$$

где $\Delta K_1 = K - K_1$ – невязка матрицы жёсткости РДМ.

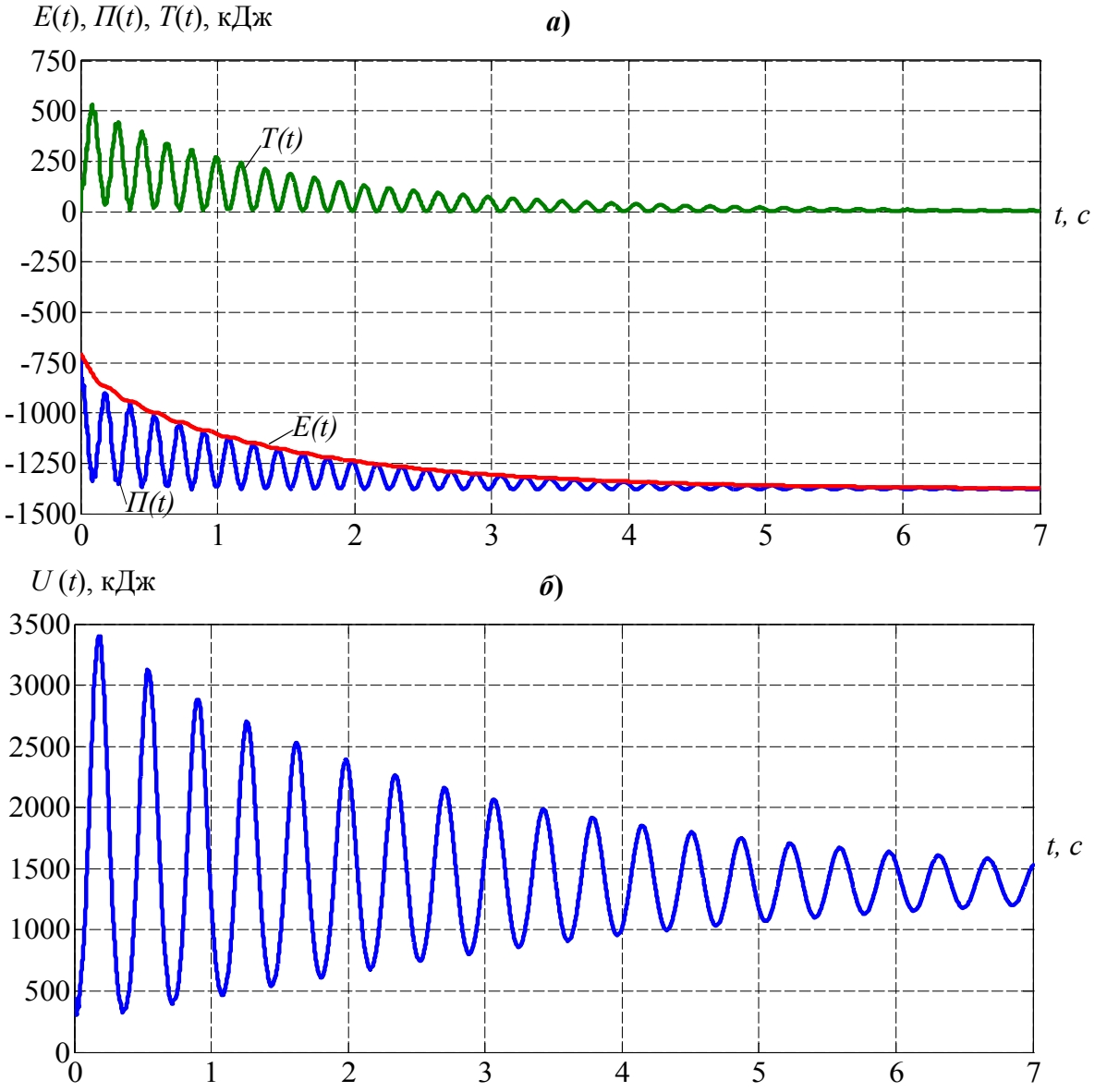


Рис. 3.8. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая E (t), полная потенциальная П(t), полная кинетическая T(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней

На осциллограмме полной механической энергии (рис. 3.8) виден скачок, составляющий 794,4 кДж, равный освободившейся энергии выключенного элемента – его потенциальной энергии деформации.

На рис. 3.10–3.13 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня 17-4. При таком сценарии ферма не обрушается, сохраняя свою несущую способность (рис. 3.9). Изменения кинематических и силовых параметров являются наименьшими.

На осциллограмме полной механической энергии (рис. 3.13) виден скачок равный освободившейся энергии выключенного элемента – потенциальной энергии деформации стержня.

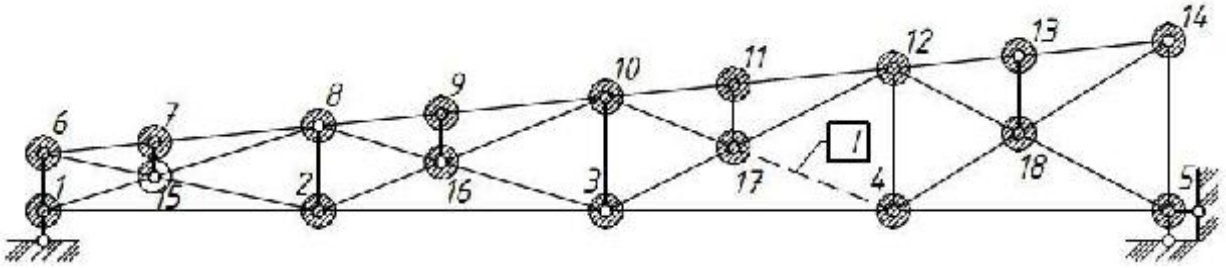


Рис.3.9. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 17-4

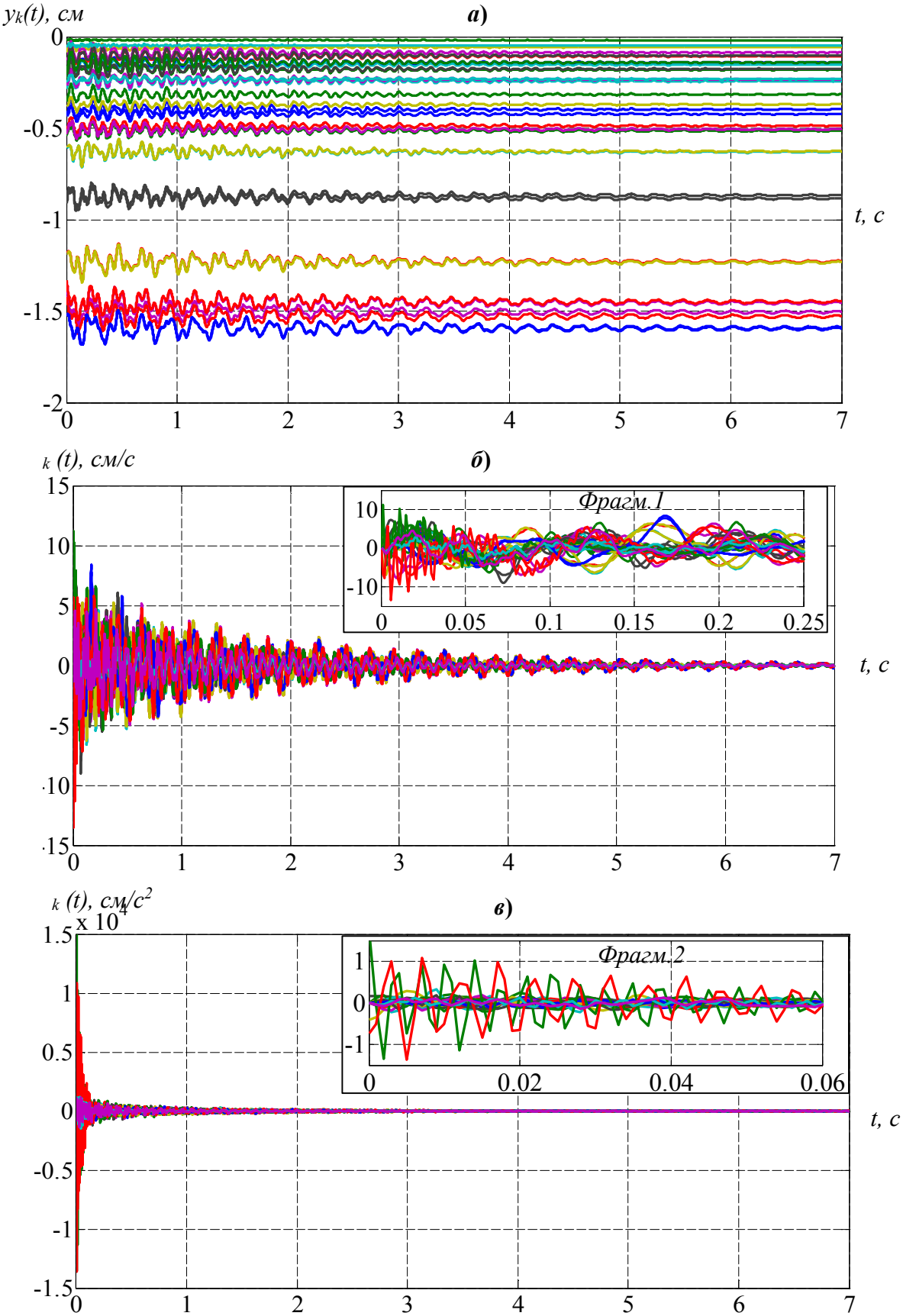


Рис. 3.10. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

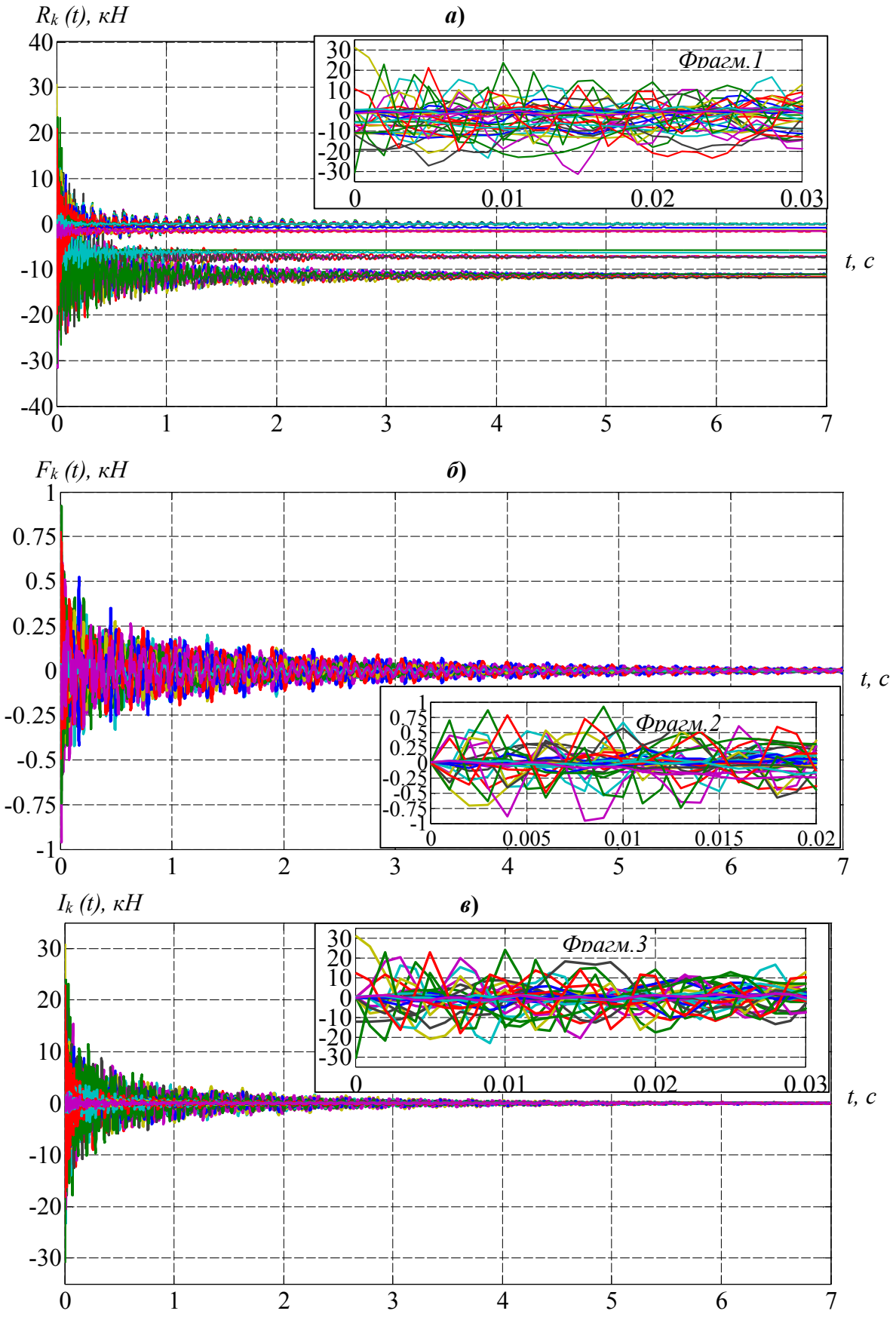


Рис. 3.11. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

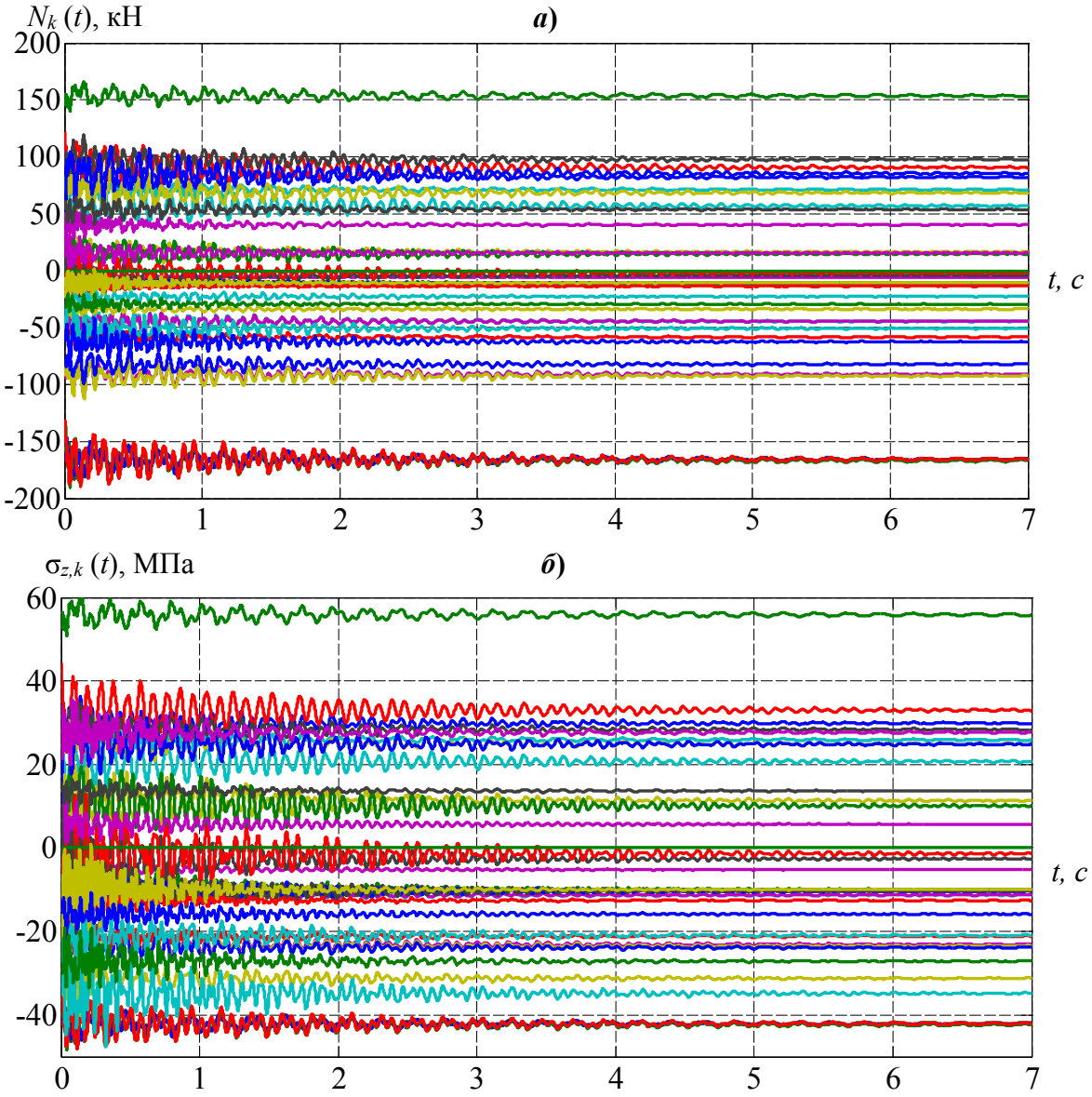


Рис. 3.12. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) Продольные силы; *б*) Нормальные напряжения;

Около 3-4 секунд после выключения стержня, система находится в переходном режиме.

После выключения стержня колебания совершаются относительного нового положения статического равновесия (рис. 3.10, *а*). А, следовательно, и потенциальная энергия деформации стержней принимает новое значение (рис. 3.13). Скачок полной механической энергии составляет 22,6 кДж. (рис. 3.13) Отключаемый стержень имеет малое влияние на параметры системы.

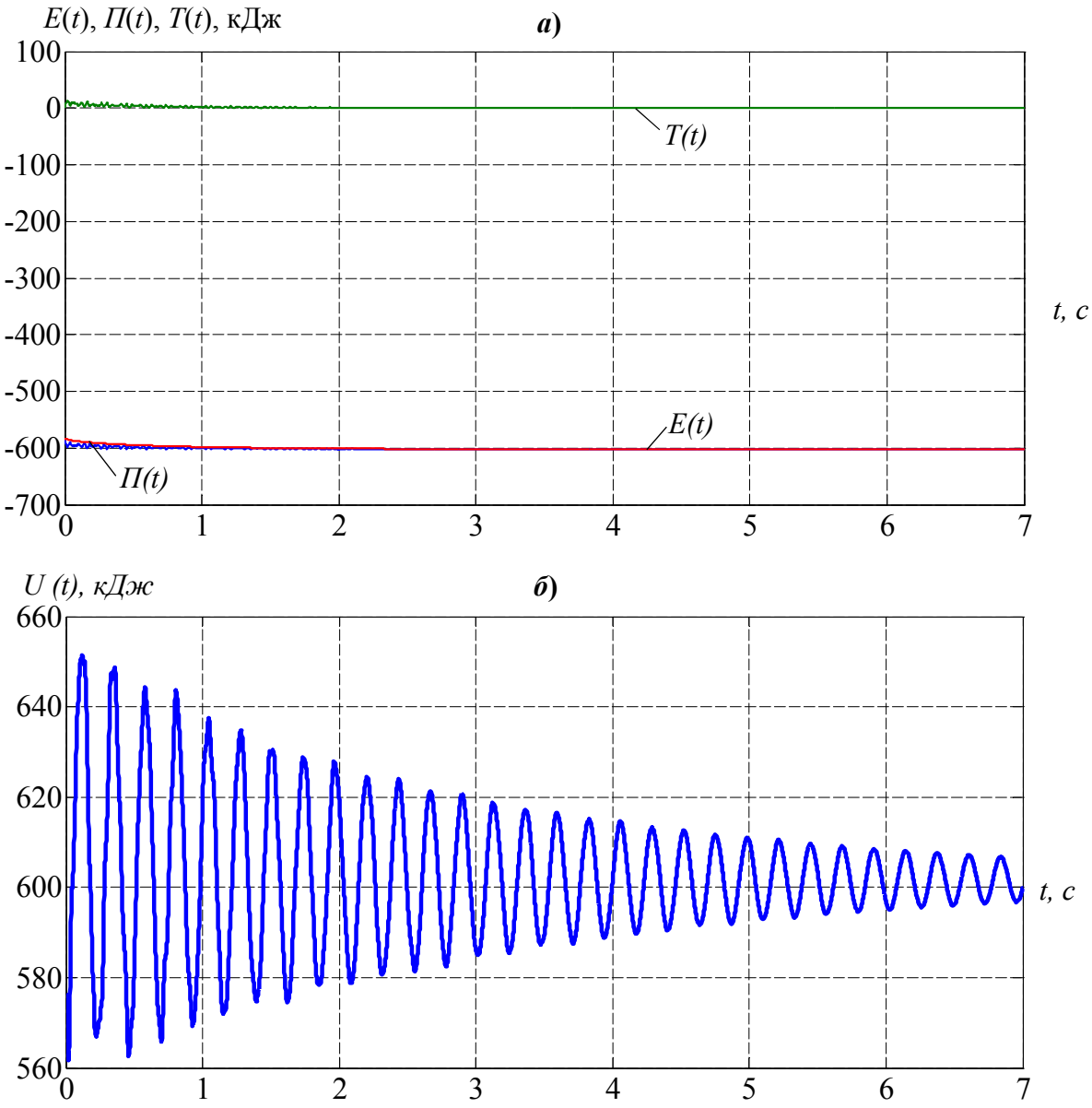


Рис. 3.13. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая T(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней

На рис. 3.15–3.18 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня верхнего пояса 8-9. При таком сценарии ферма обрушается. В момент времени t_1 = 0,009 *с* происходит выключение раскоса 16-10, (выключающиеся элементы показаны пунктиром на рис. 3.14). Отказ элемента 16-10 вызван потерей устойчивости. После этого конструкция фермы становится геометрически изменяемой системой, что приводит к потере несущей способности фермы.

При $t > t_1$, на графиках перемещений (рис. 3.15), по осциллограммам, которые соответствуют степеням свободы узлов, примыкающих к выключаемым элементам, можно видеть значительное поэтапное увеличение значений перемещений. Осциллограммы скоростей (рис. 3.15, *б*) и ускорений (рис. 3.15, *в*) узлов имеют более выраженный колебательный характер по сравнению с графиками перемещений, но их значения постепенно увеличиваются, т.к. происходит обрушение.

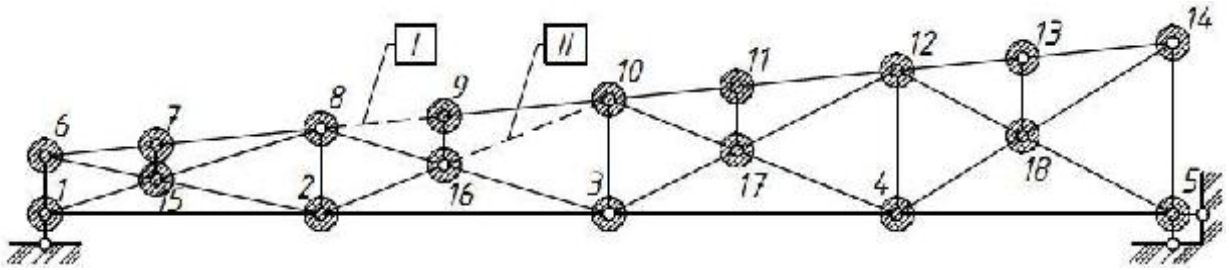


Рис.3.14. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 8-9.

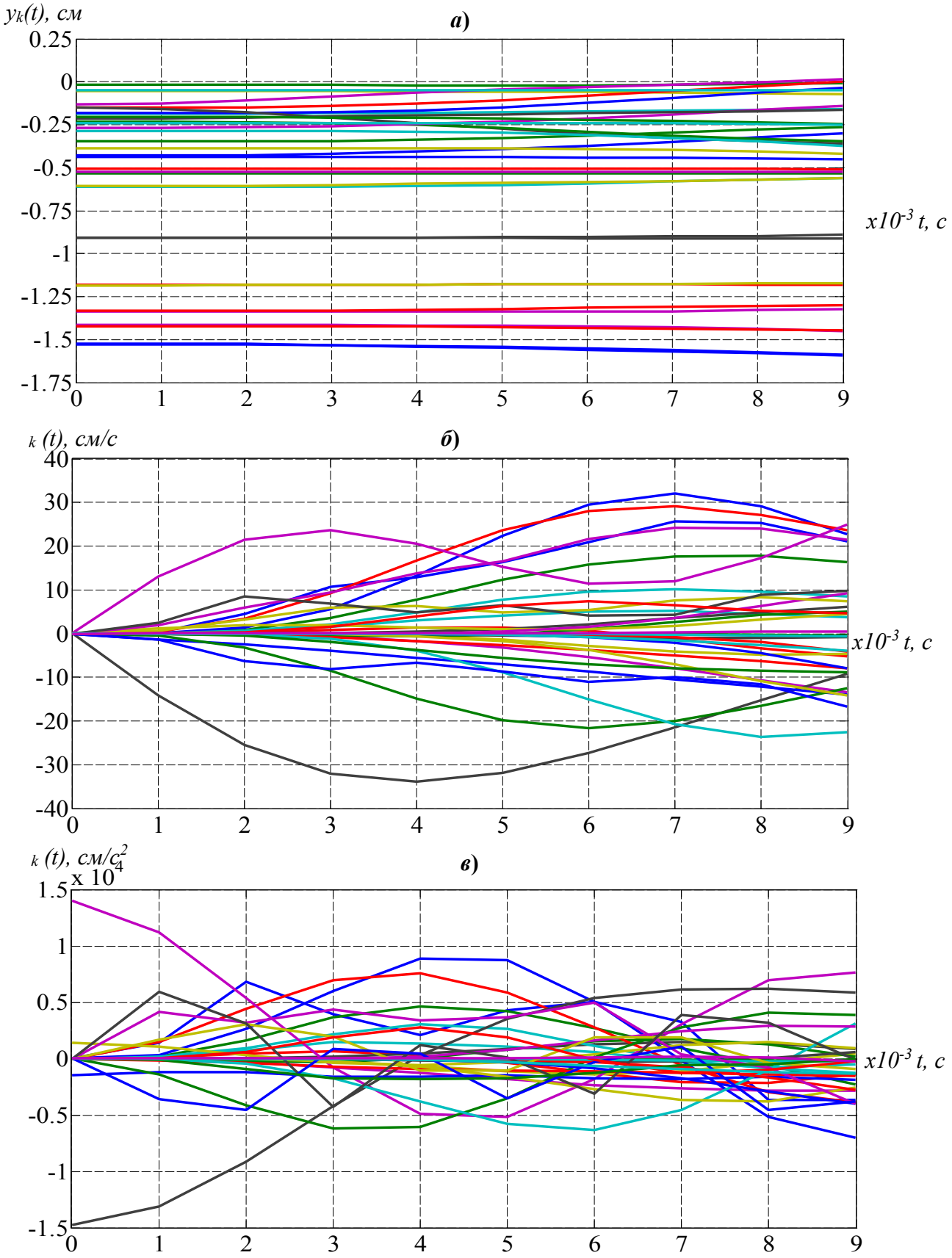


Рис. 3.15. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

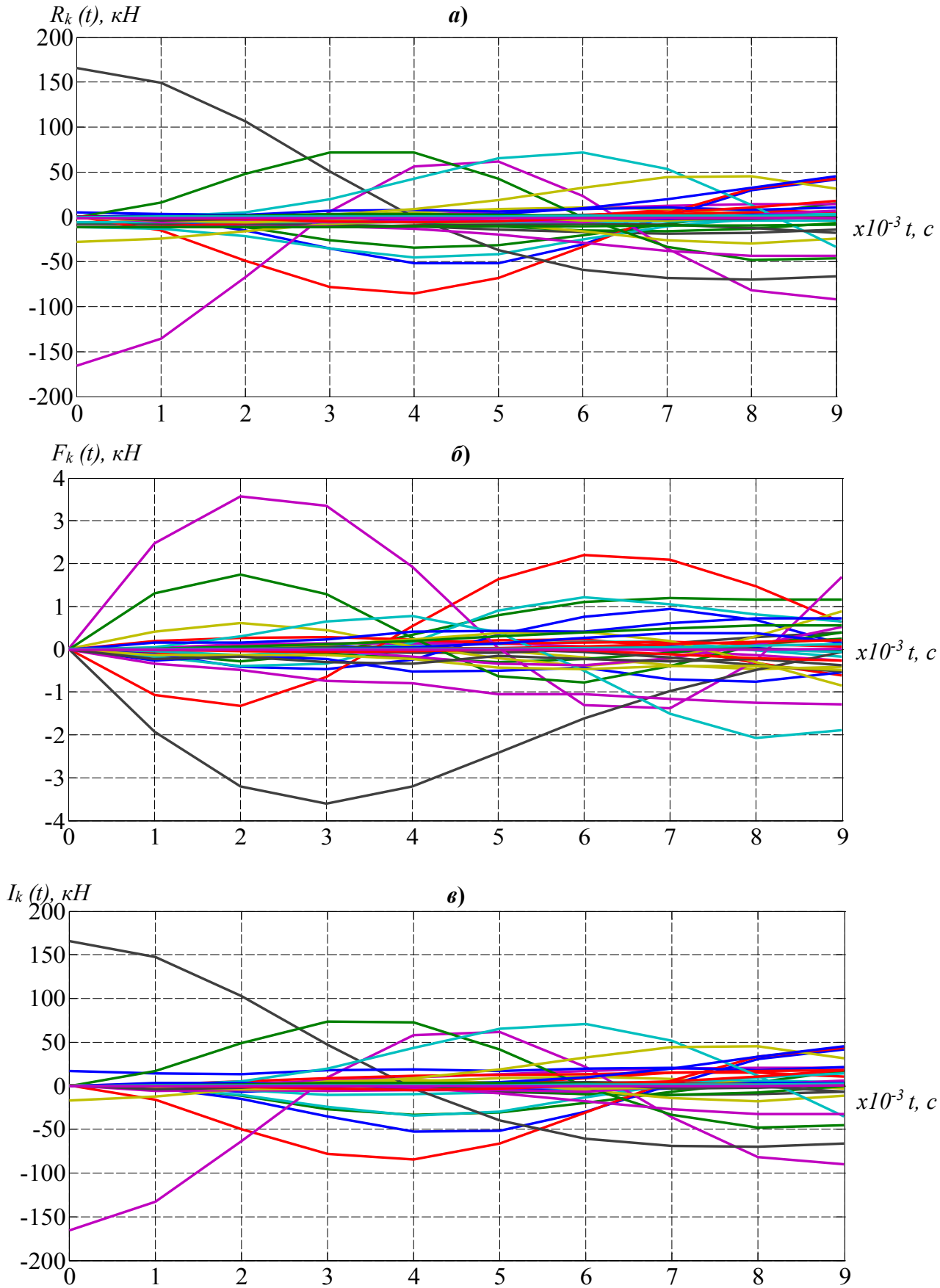


Рис. 3.16. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

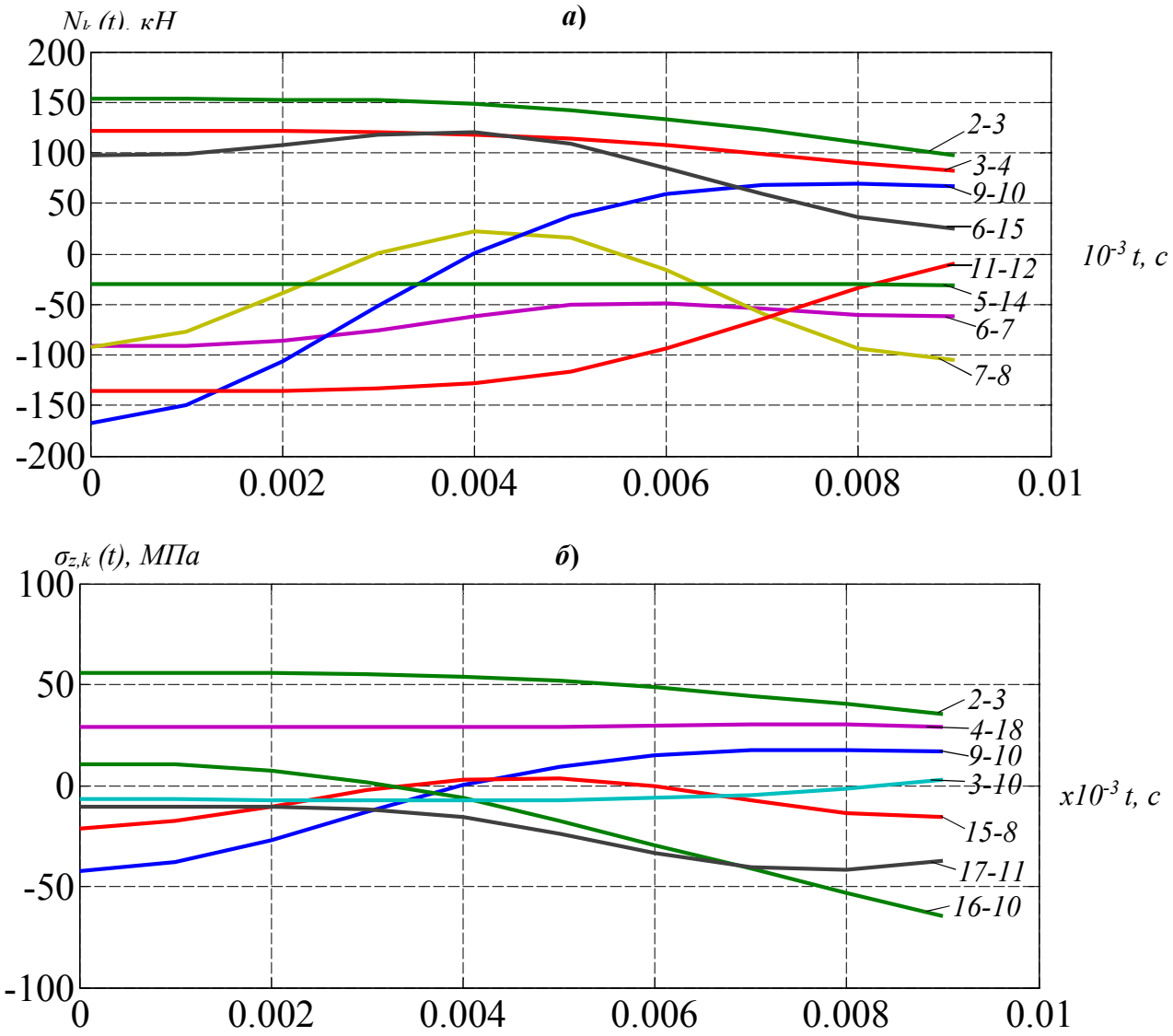


Рис. 3.17. Осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в наиболее напряжённых стержнях фермы

На рисунке 3.17 приведены осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в стержнях фермы. Показаны графики стержней, имеющих наиболее характерные изменения параметров во времени.

Согласно представленным данным (см. табл. 4.1, рис. 3.17, а) напряжения во всех стержнях изменяются, и их наибольшее изменение составляет 2317,87%.

Так как статическая система теряет несущую способность и становится движущимся механизмом, то потенциальная энергия системы уменьшается, а кинетическая увеличивается во времени рис.3.18.

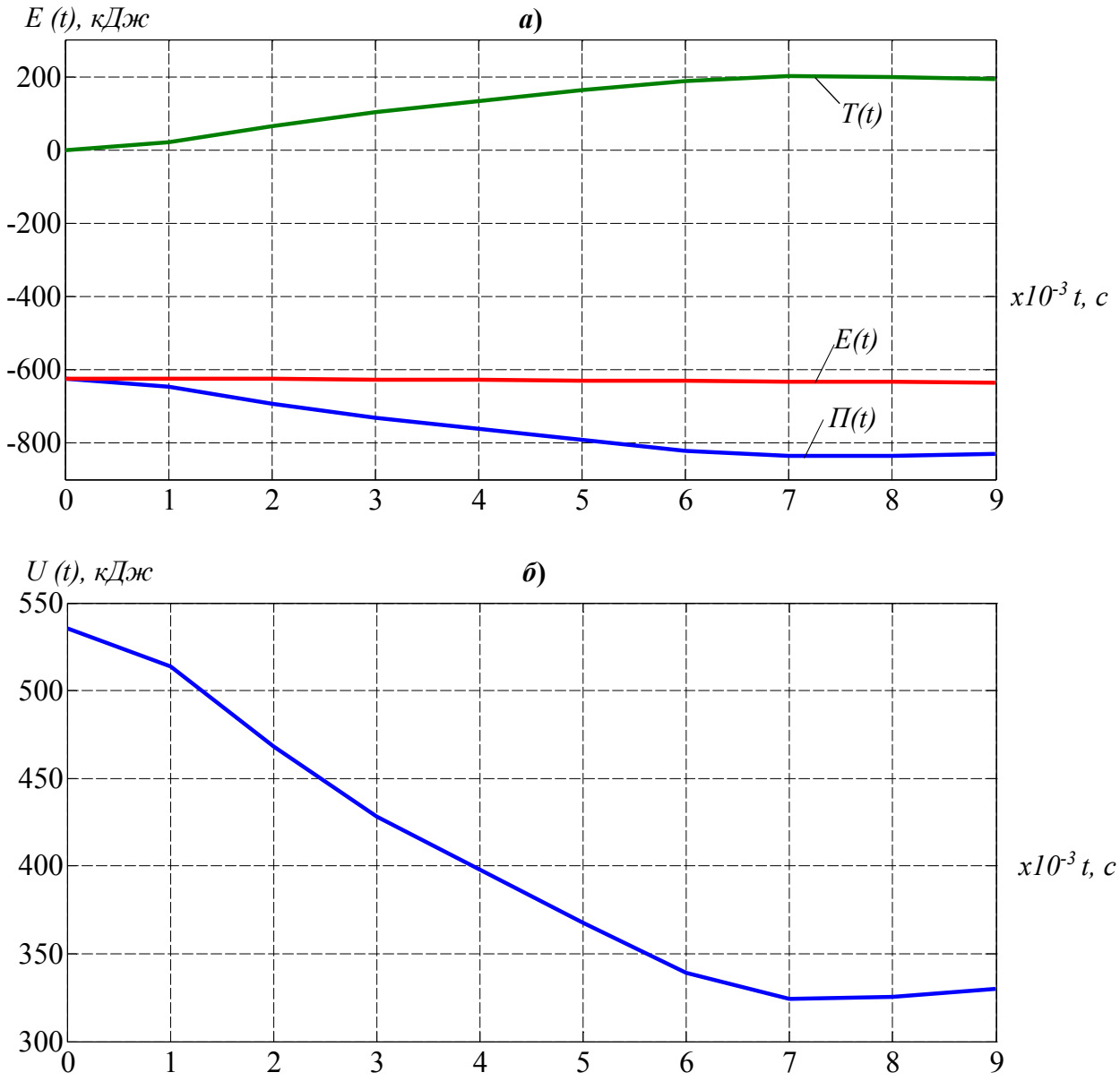


Рис. 3.18. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая T(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней

На рис. 3.20 - 3.23 приведены осциллограммы параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня 12-13. При таком сценарии ферма обрушается. В момент времени t_1=0,029 *с* происходит выключение раскоса 12-18, (выключающиеся элементы показаны пунктиром на рис. 3.19). Отказ элемента 12-18 вызван потерей устойчивости. Конструкция фермы становится геометрически изменяемой системой.

При $t = t_1$, расчёт системы заканчивается – происходит мгновенное разрушение. В период времени $t < t_1$ осциллограммы скоростей (рис. 3.20, *б*) и ускорений

(рис. 3.20, *в*) узлов имеют более выраженный колебательный характер по сравнению с графиками перемещений.

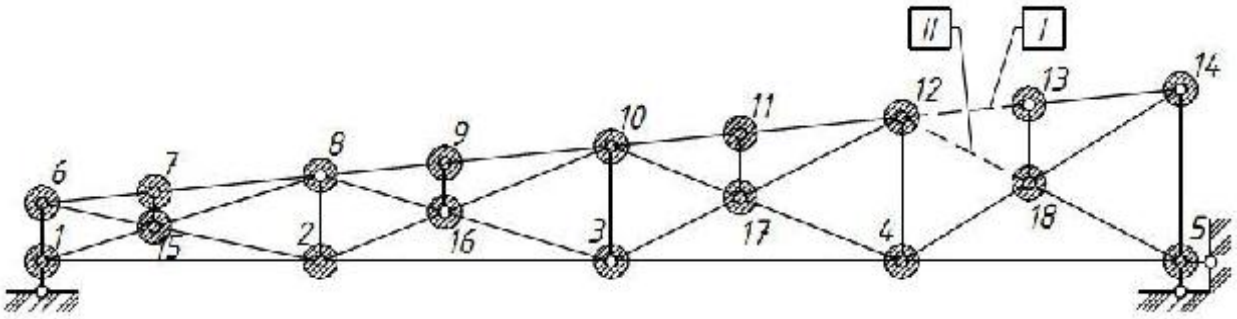


Рис.3.19. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 12-13.

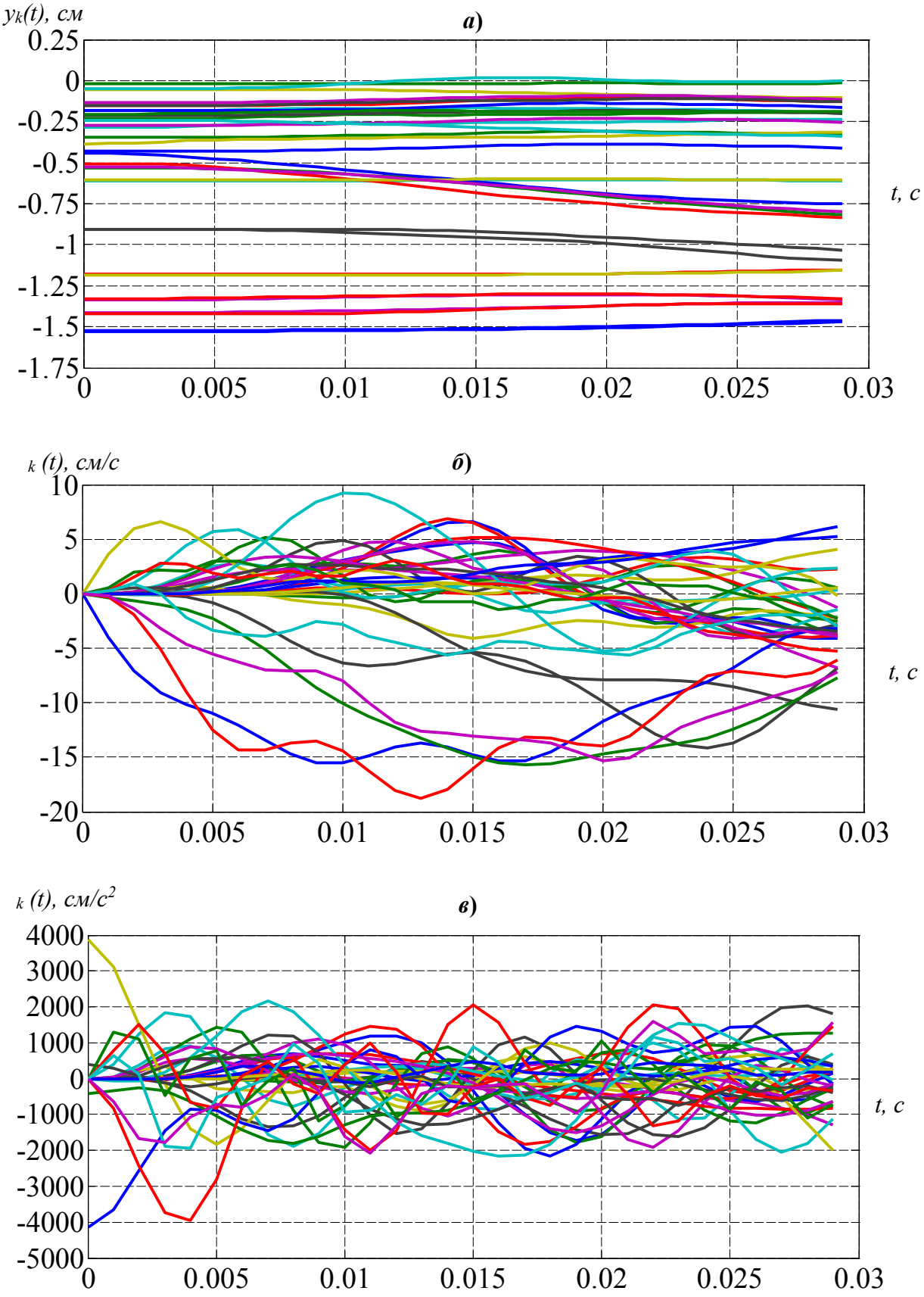


Рис. 3.20. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

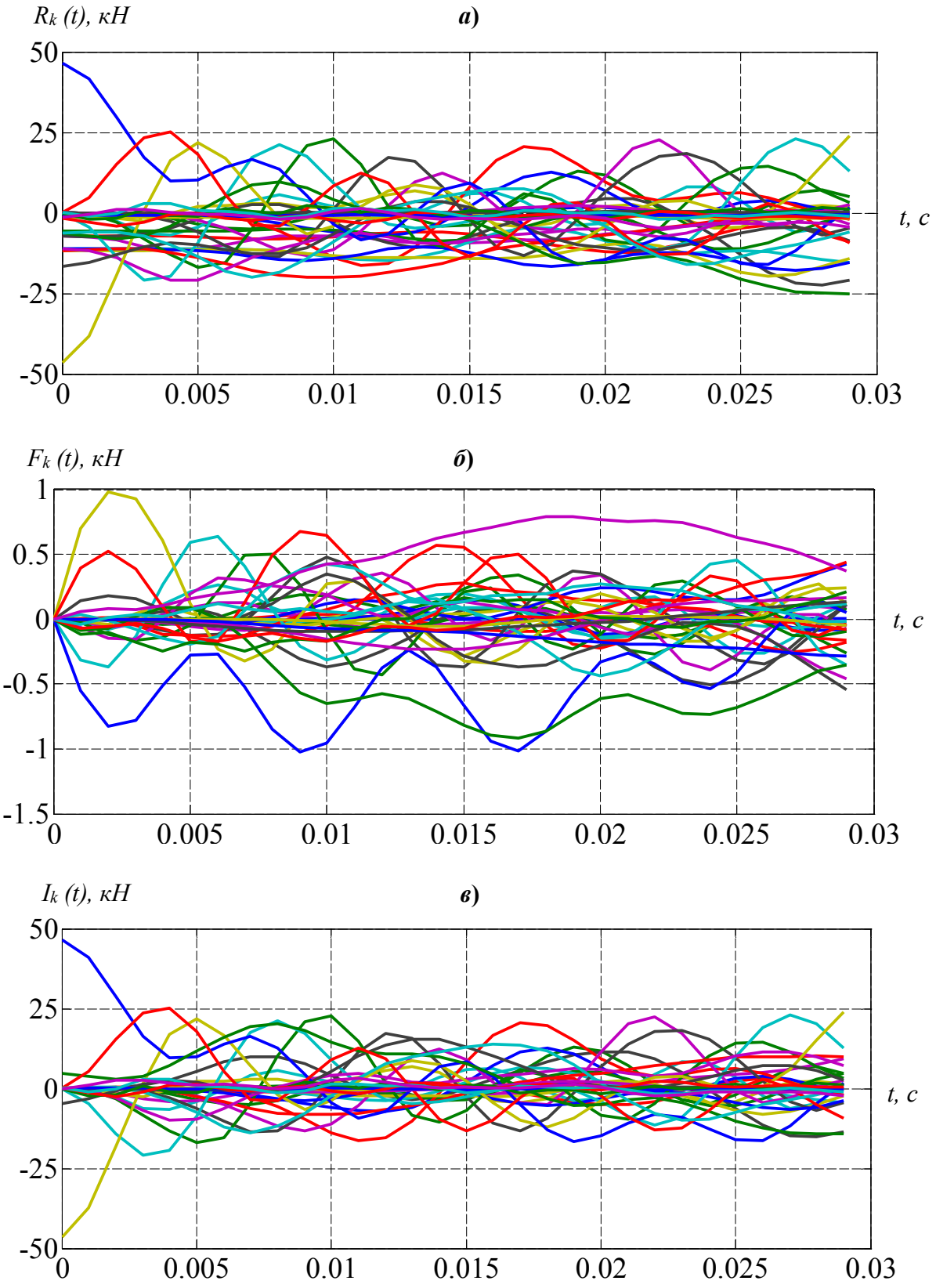


Рис. 3.21. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

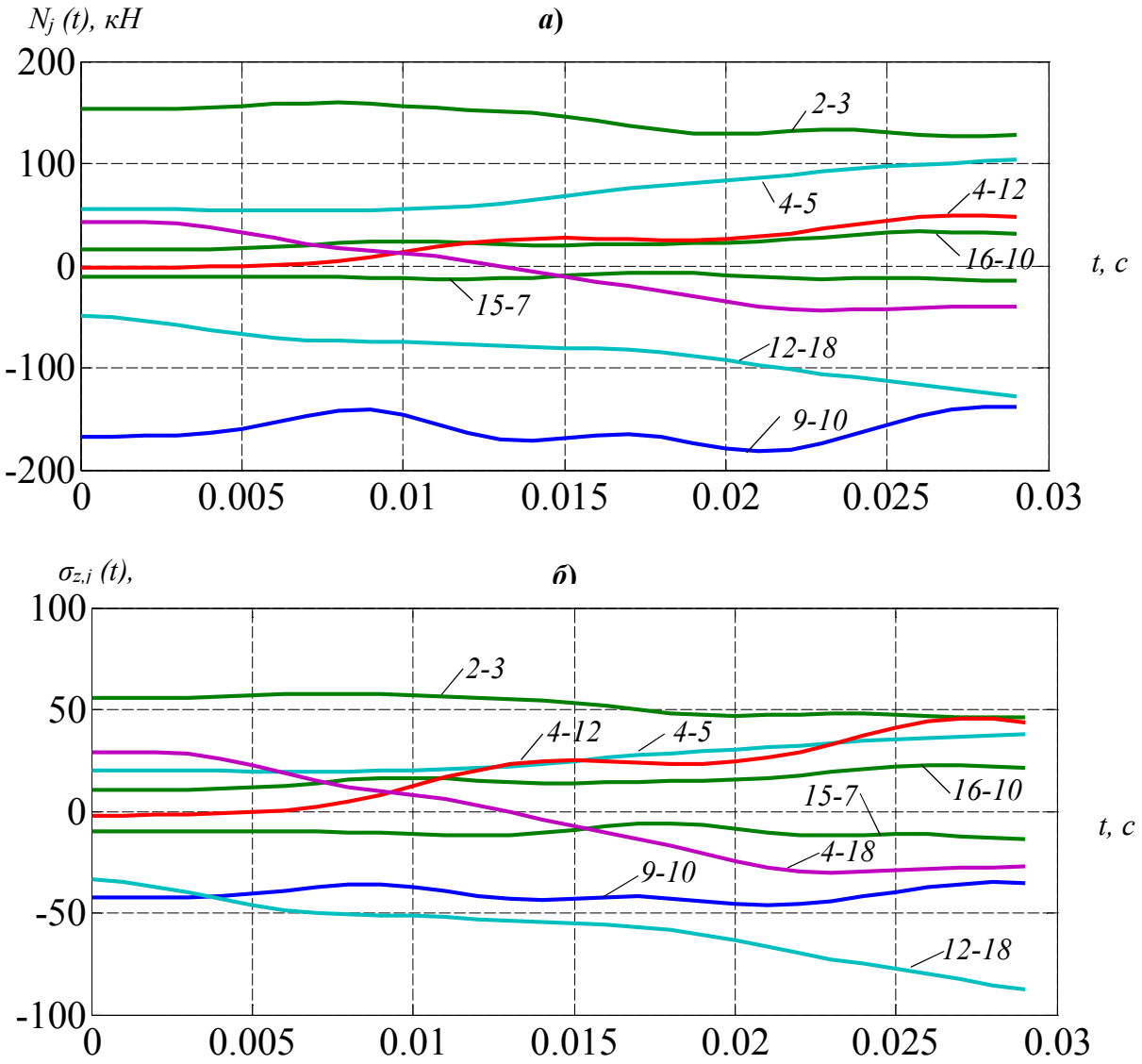


Рис. 3.22. Осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в наиболее напряжённых стержнях фермы.

На рисунке 3.22 приведены осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в стержнях фермы. Показаны графики стержней, имеющих наиболее характерные изменения параметров во времени.

Согласно представленным данным (см. табл. 4.1, рис. 3.22, а) напряжения во всех стержнях изменяются, и их наибольшее изменение составляет 65,48%.

Так как статическая система теряет несущую способность и становится движущимся механизмом, то потенциальная энергия системы уменьшается, а кинетическая увеличивается во времени рис.3.23.

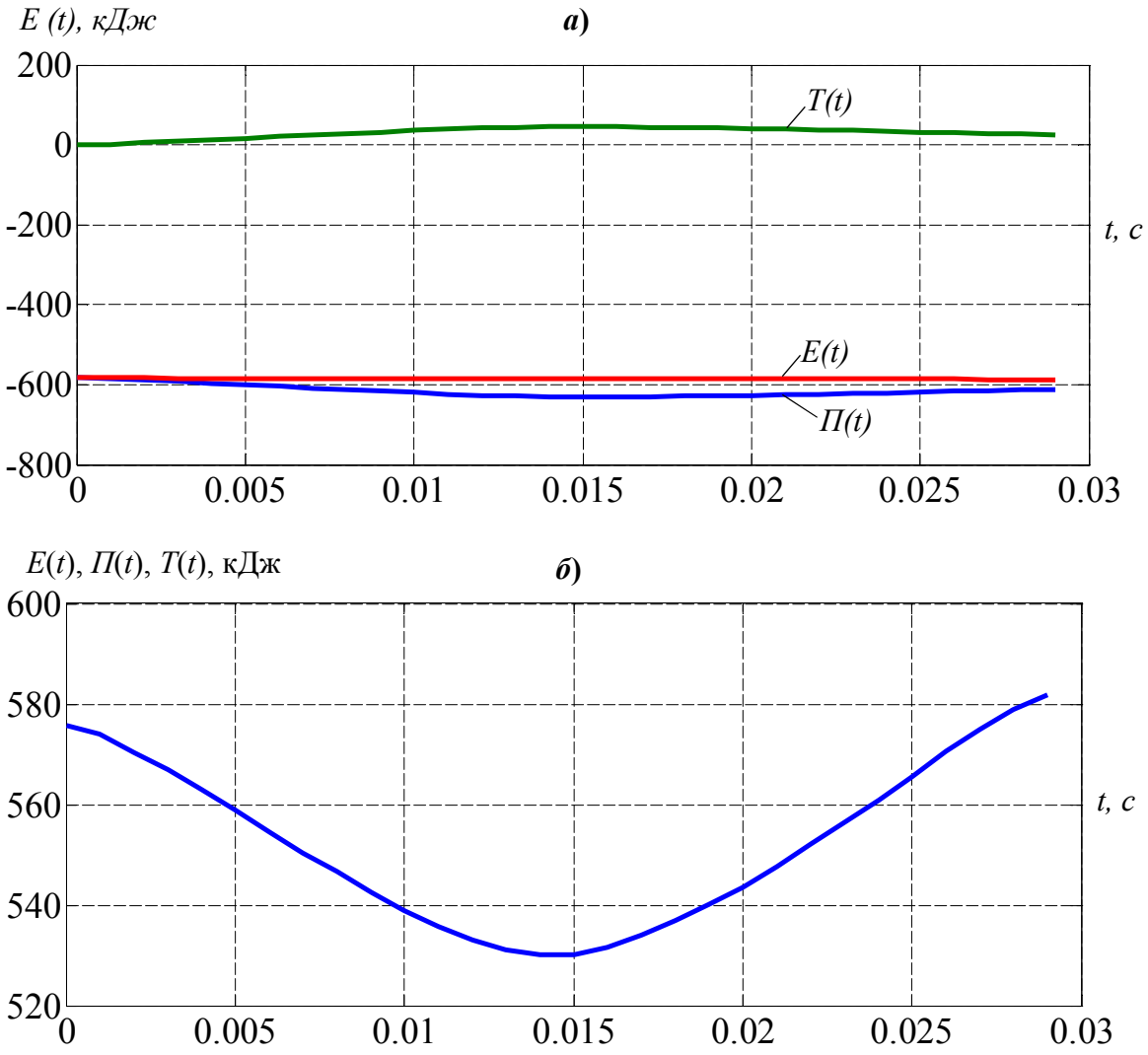


Рис. 3.23. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая Т(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней

3.3.2 Вариант фермы Б

Рассмотрим процесс колебаний фермы, изображённой на рис. 3.3. Условия анализа те же, что и в п. 3.2.1.

На рис. 3.25 - 3.28 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня 1-15 рис.3.24. При таком сценарии ферма не обрушается, сохраняя свою несущую способность. Но изменения кинематических и силовых параметров являются наибольшими по сравнению.

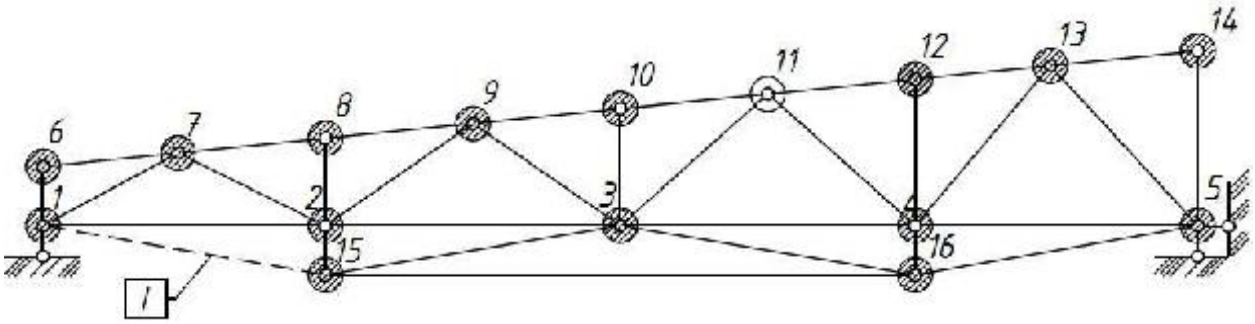


Рис.3.24. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 1-15.

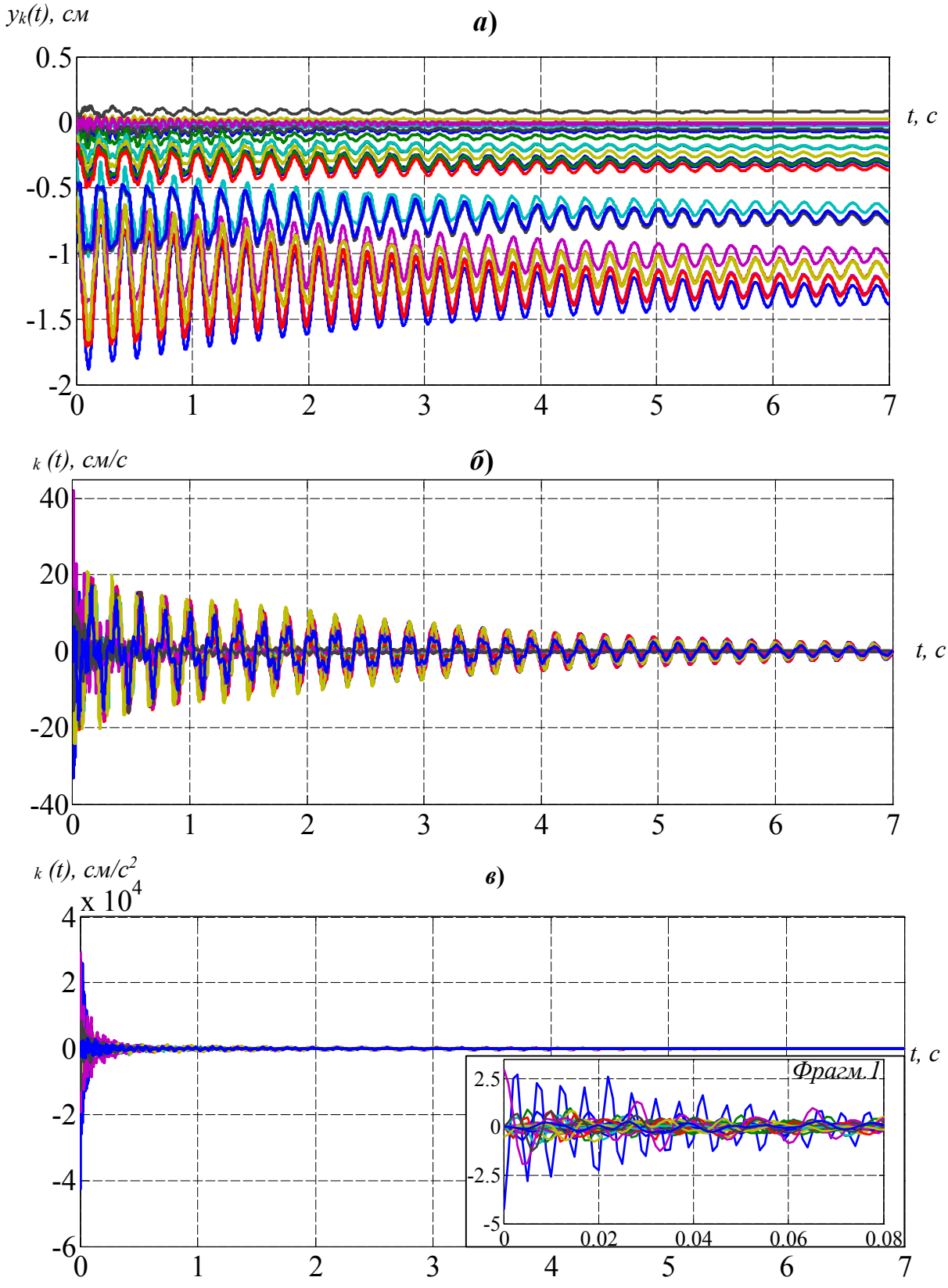


Рис. 3.25. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

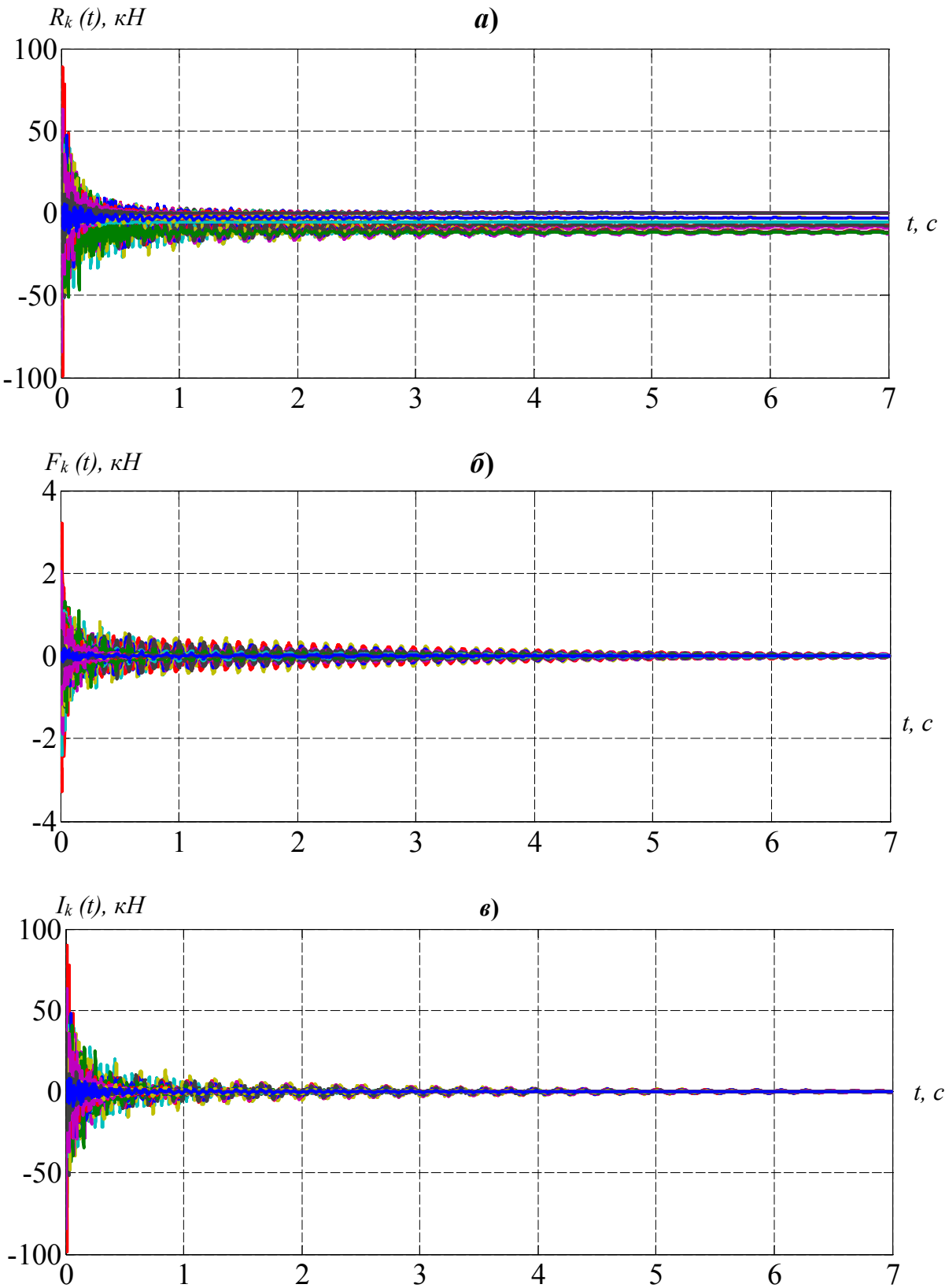


Рис. 3.26. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

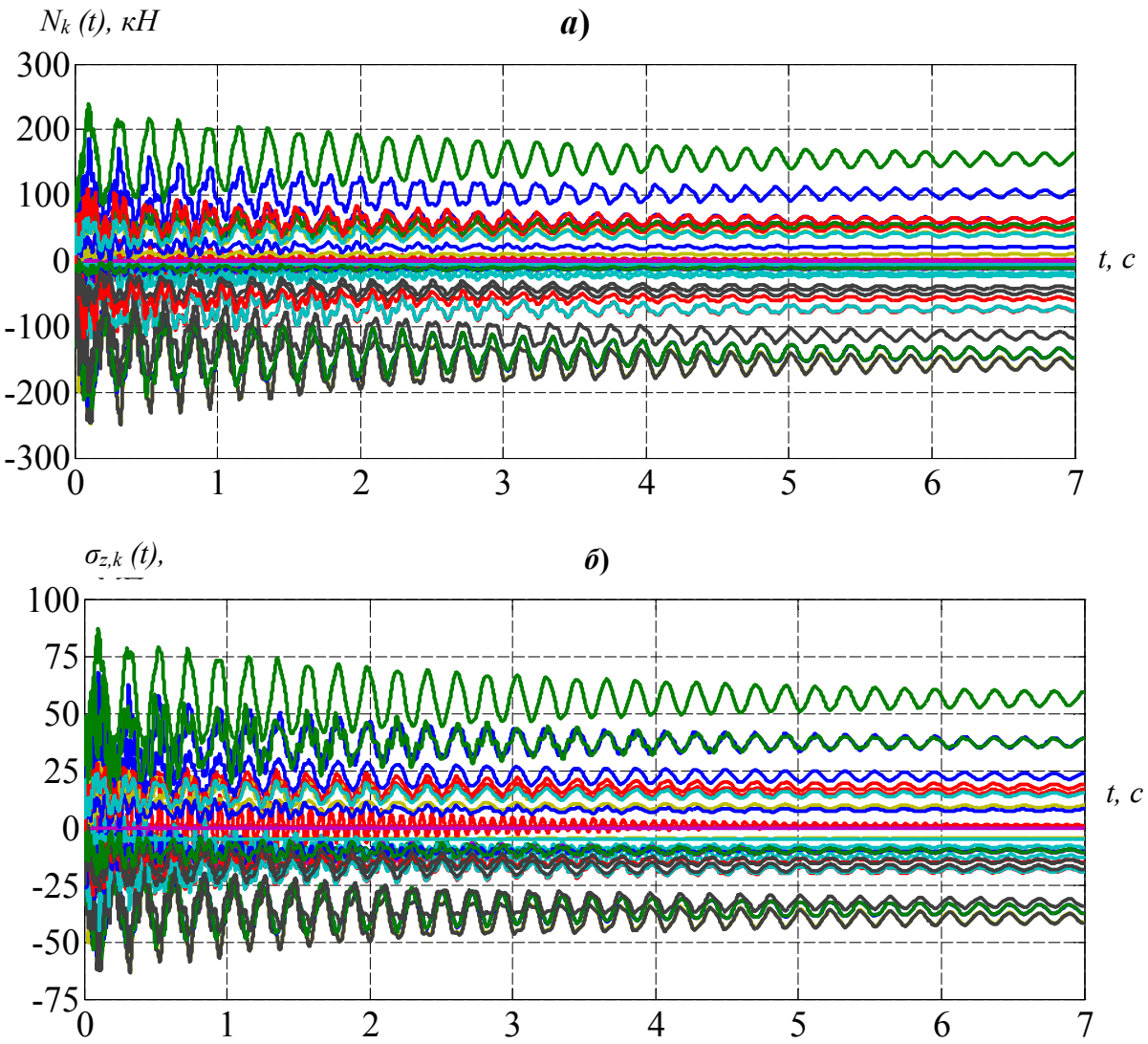


Рис. 3.27. Осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в наиболее напряжённых стержнях фермы.

После выключения раскоса первые 1-2 секунды, система находится в переходном режиме рис.3.26. В дальнейшем система переходит в режим установившихся затухающих колебаний.

На осциллограммах узловых перемещений (рис. 3.25 а) можно видеть, колебания фермы совершаются относительно нового статического равновесия. Потенциальная энергия деформации стержней принимает новое значение (рис.2.28). Скорости и ускорения масс конструкции (рис. 3.25, *б*, *в*), в отличие от перемещений, с течением времени стремятся к нулевым значениям.

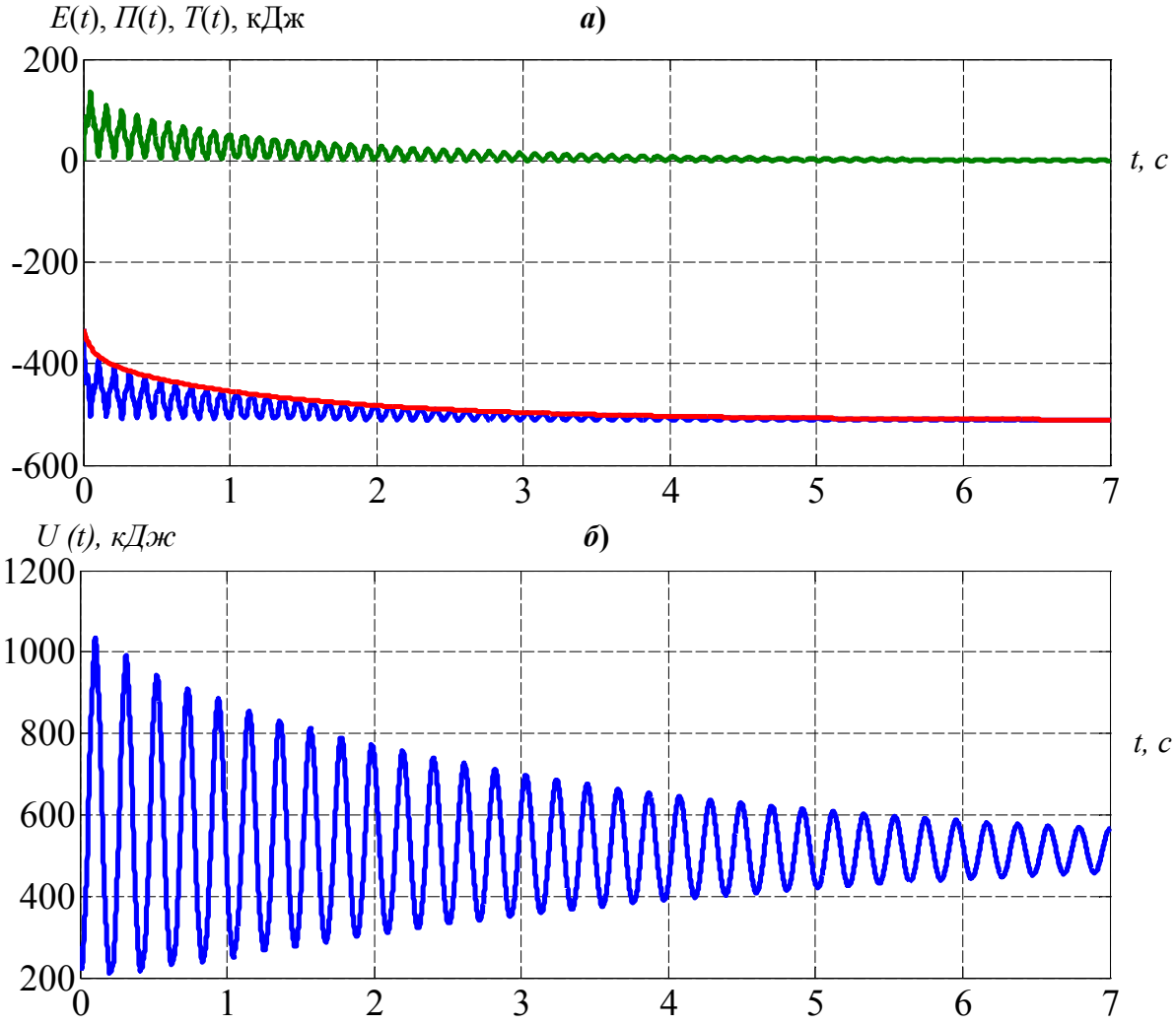


Рис. 3.28. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая Т(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней

На осциллограмме полной механической энергии (рис. 3.28, а) виден скачок, составляющий 208,01 кДж.

На рис. 3.30–3.33 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня 9-3 рис. 3.29. Ферма не обрушается. Данный стержень оказывает наименьшее влияние на параметры системы.

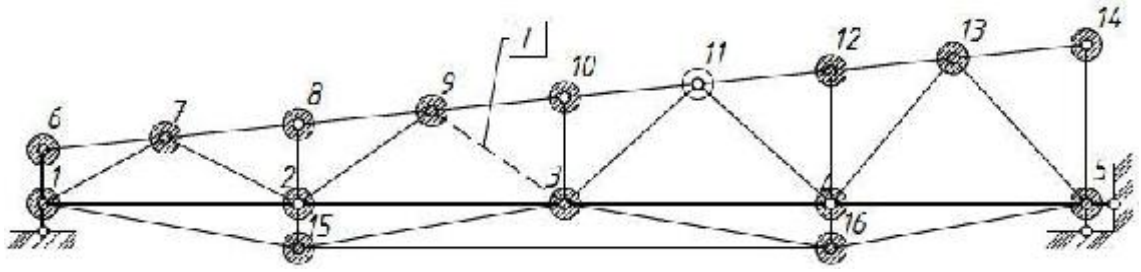


Рис.3.29. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 9-3.

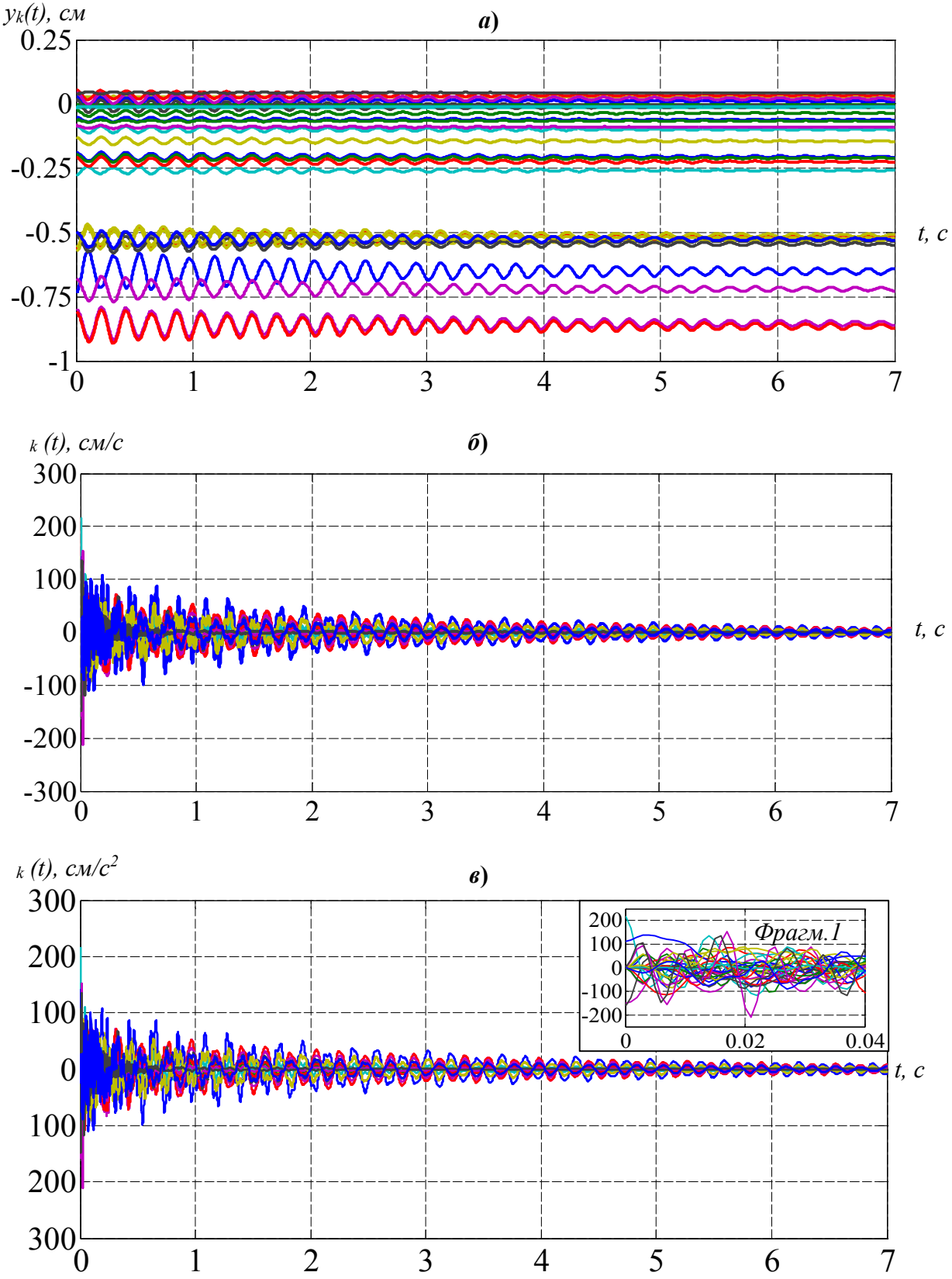


Рис. 3.30. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

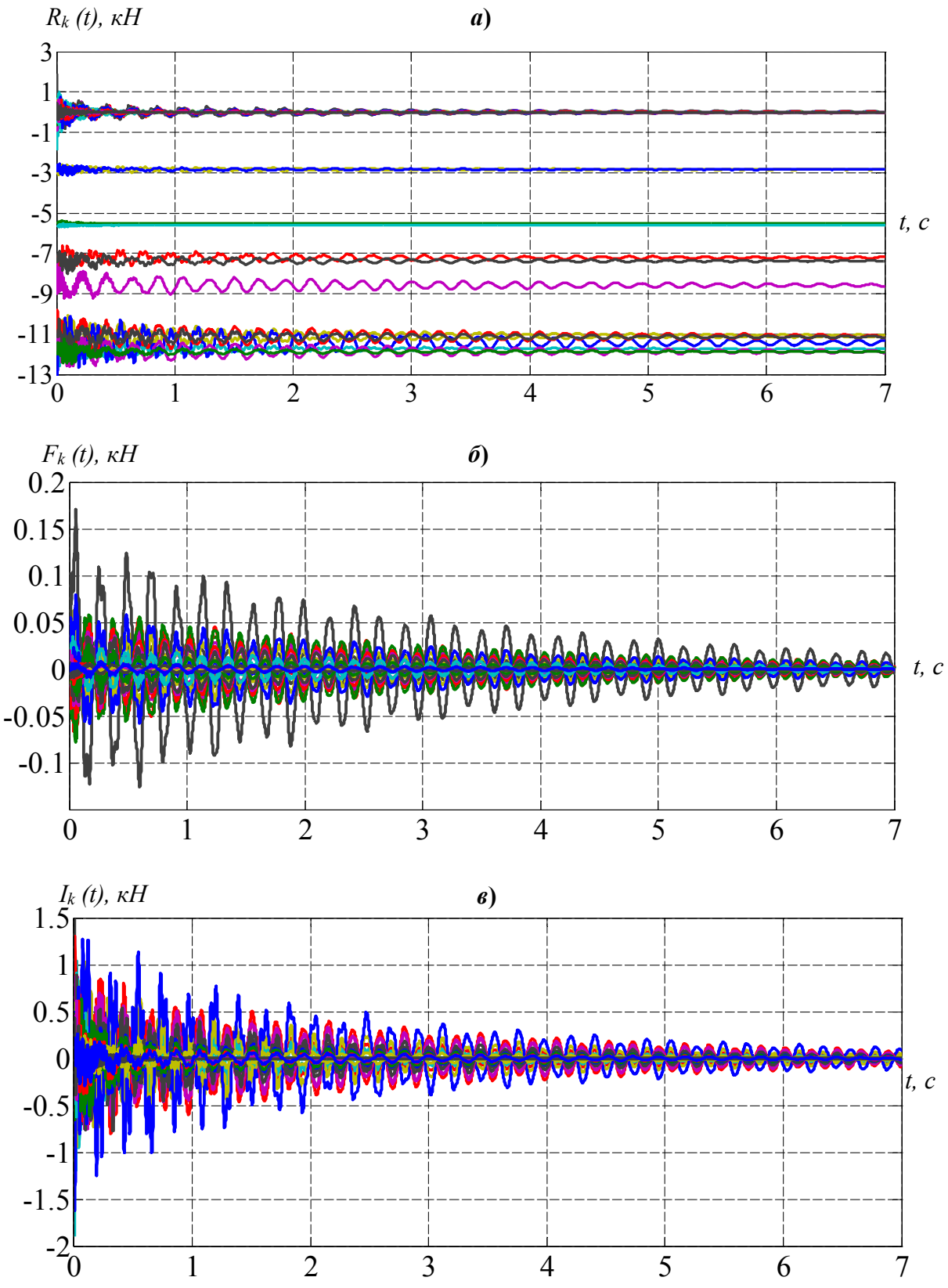


Рис. 3.31. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

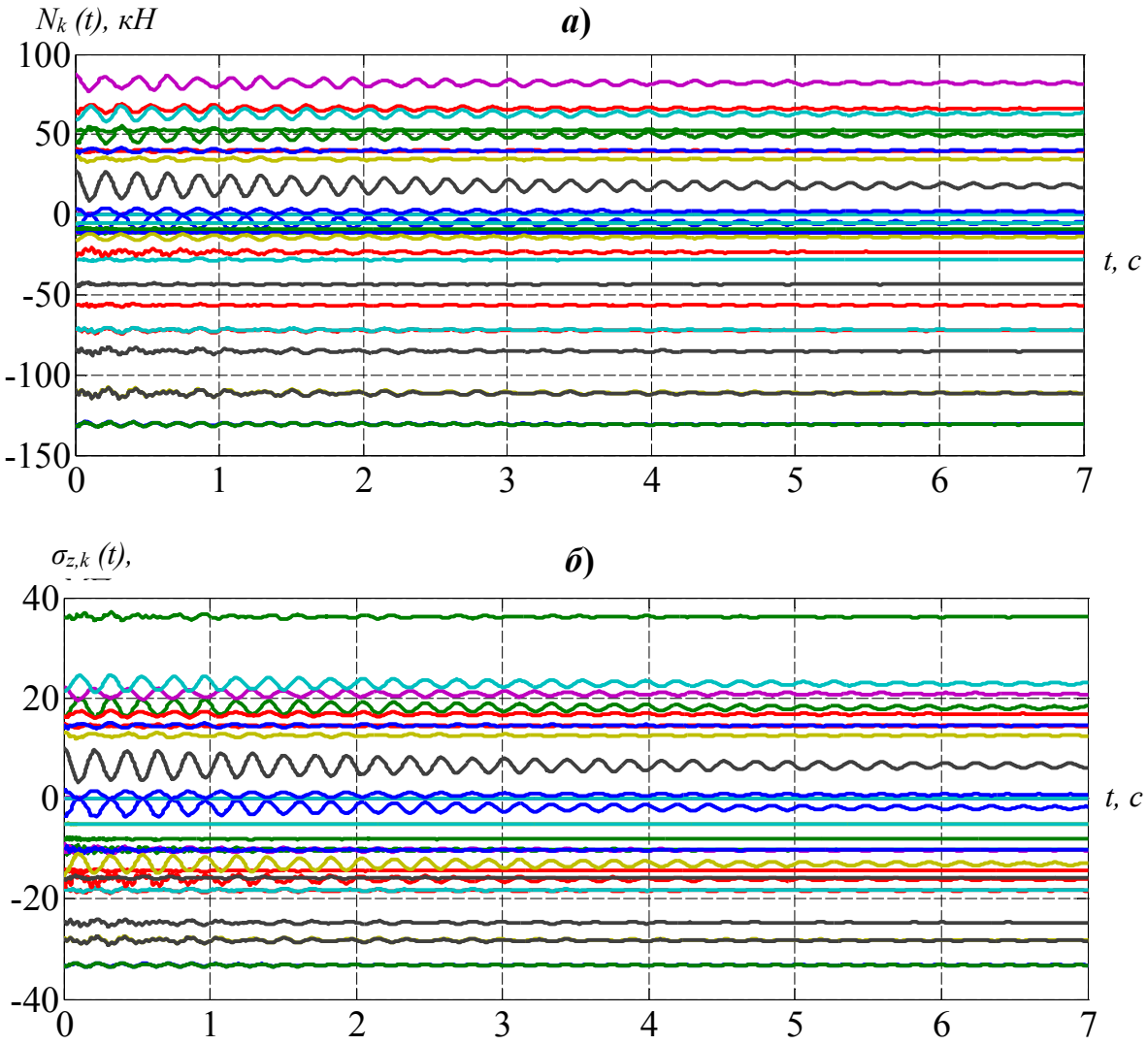


Рис. 3.32. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) Продольные силы; *б*) Нормальные напряжения

После выключения стержня колебания совершаются относительного нового положения статического равновесия (рис. 3.30, *а*). Потенциальная энергия деформации стержней принимает новое значение (рис.3.33). Скачок полной механической энергии составляет 1,31 кДж. (рис.3.33).

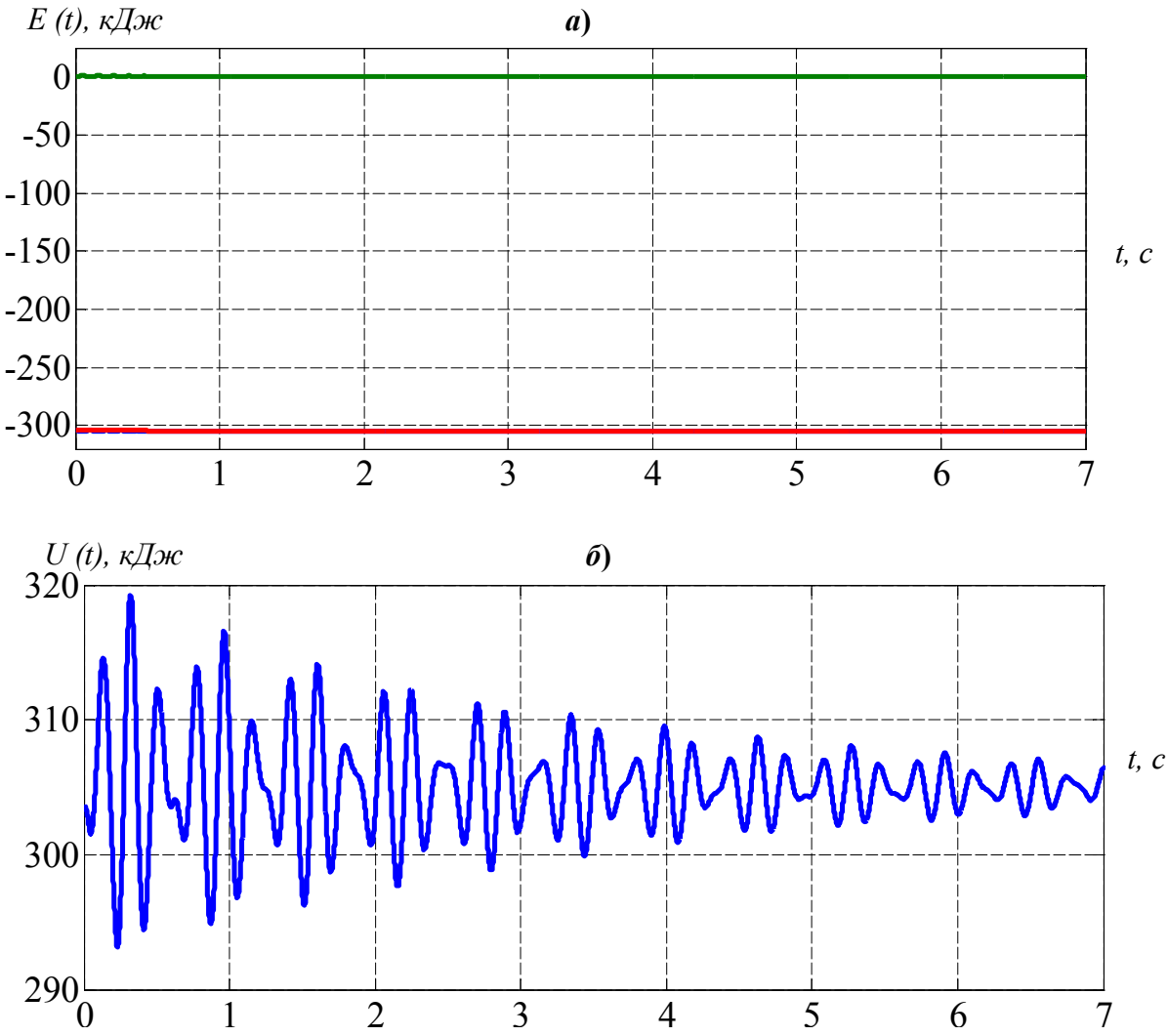


Рис. 3.33. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая Т(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней.

На рис. 3.35–3.38 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня 10-11 рис. 3.34. При таком сценарии ферма обрушается. В момент времени $t_1 = 0{,}087$ *с* происходит выключение элемента нижнего пояса 2-3, $t_2 = 0{,}091$ *с* происходит выключение раскоса пояса 15-3 (выключающиеся элементы показаны пунктиром на рис. 3.34). Отказ элементов 2-3 и 15-3 вызван потерей устойчивости. После этого конструкция фермы становится геометрически изменяемой системой, что приводит к потере несущей способности фермы.

При $t > t_1$, на графиках перемещений (рис. 3.35, а), которые соответствуют степеням свободы узлов, примыкающих к выключаемым элементам, можно видеть

значительное поэтапное увеличение значений перемещений. Осциллограммы скоростей (рис. 3.35, *б*) и ускорений (рис. 3.35, *в*) узлов имеют более выраженный колебательный характер по сравнению с графиками перемещений, но их значения постепенно увеличиваются, т.к. происходит обрушение. При $t_1 > t > t_2$ происходит резкое увеличение перемещений (рис.3.35, а) и на осциллограммах заметны скачки параметров, вызванные изменением жёсткости системы. При $t > t_2$, система обрушается, превращаясь в механизм и расчёт заканчивается.

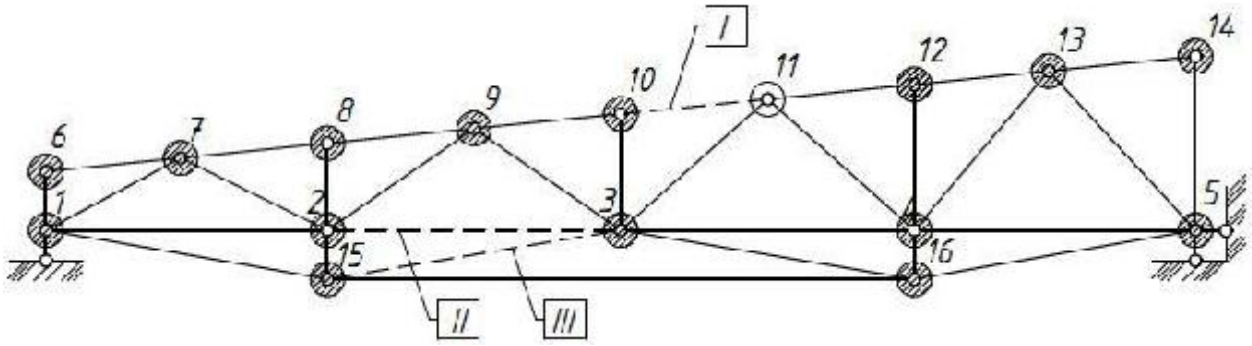


Рис.3.34. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 10-11.

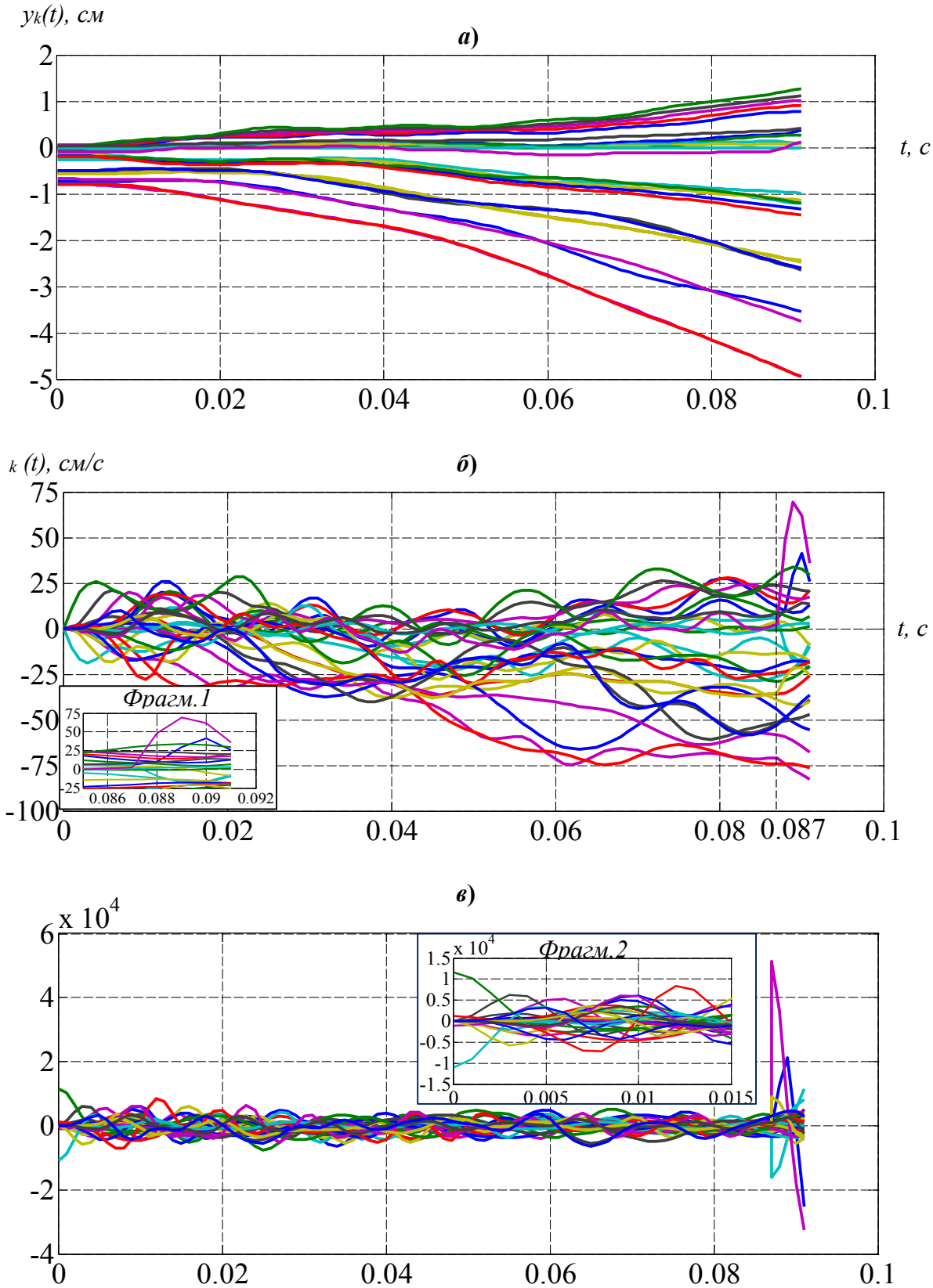


Рис. 3.35. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

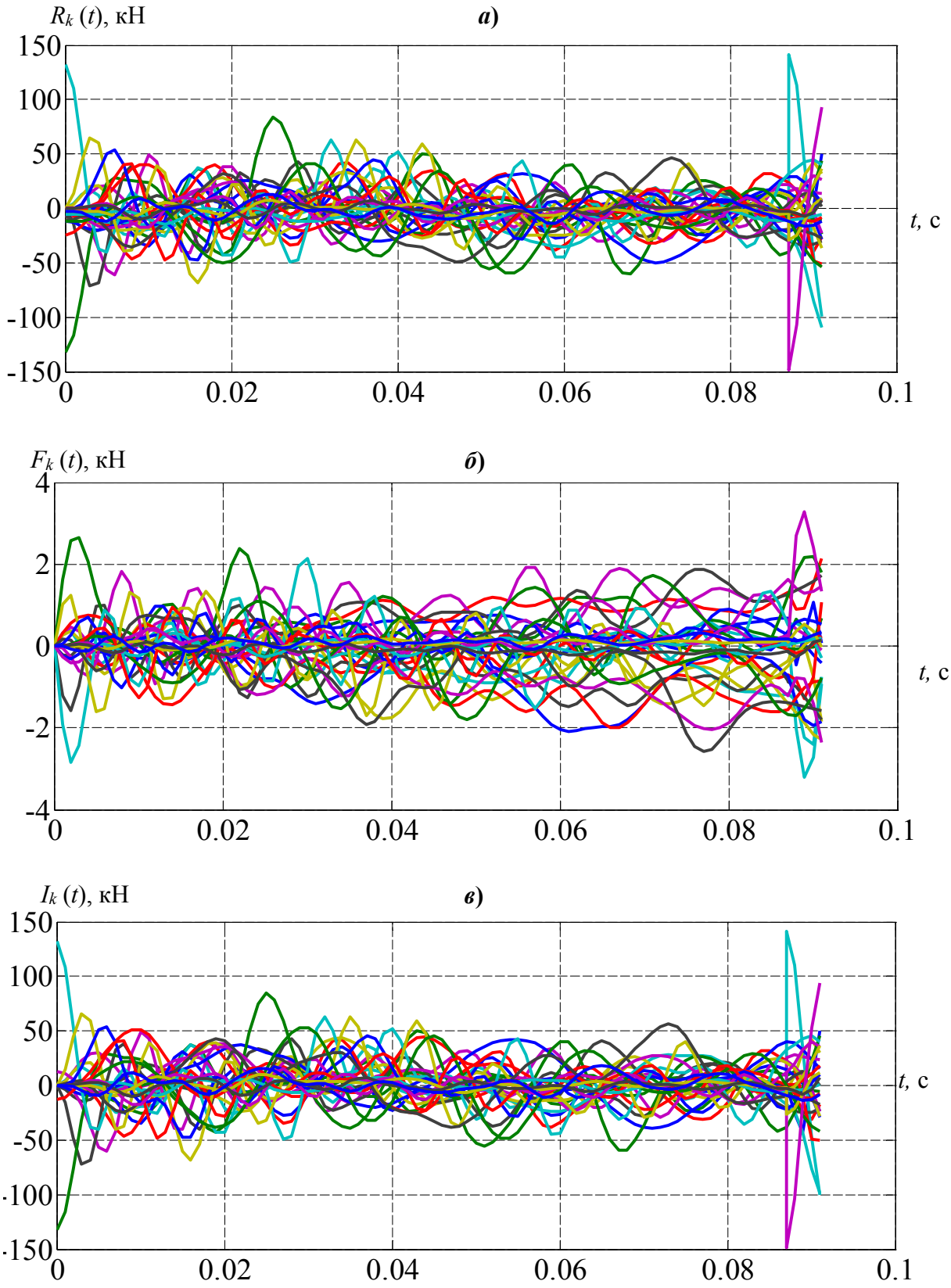


Рис. 3.36. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

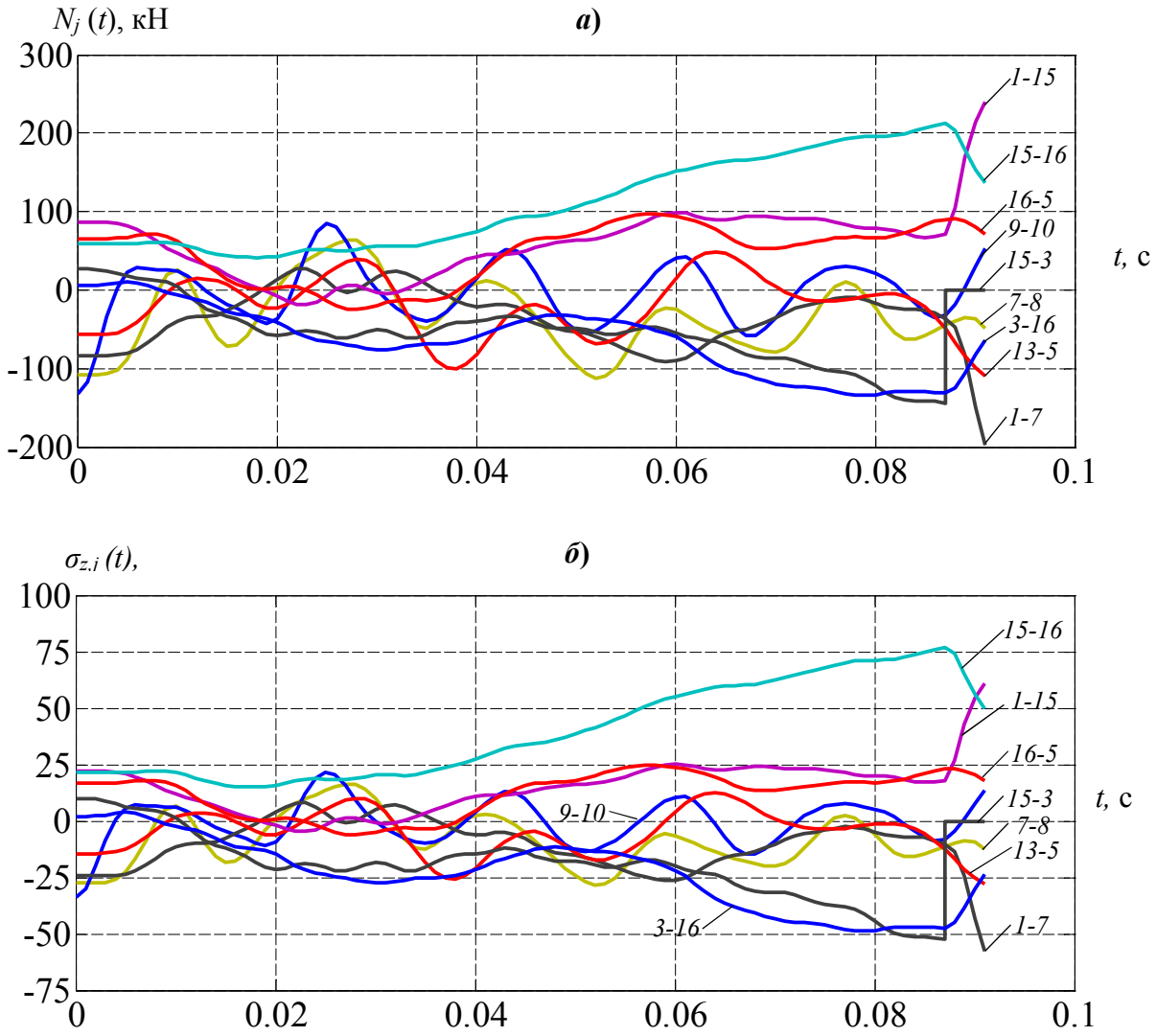


Рис. 3.37. Осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в наиболее напряжённых стержнях фермы.

На рисунке 3.37 приведены осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в стержнях фермы. Показаны графики стержней, имеющих наиболее характерные изменения параметров во времени.

Согласно представленным данным (см. табл. 4.2, рис. 3.37) напряжения во всех стержнях изменяются, и их наибольшее изменение составляет 2677,6%. Потенциальная энергия системы уменьшается, а кинетическая увеличивается во времени рис.3.38.

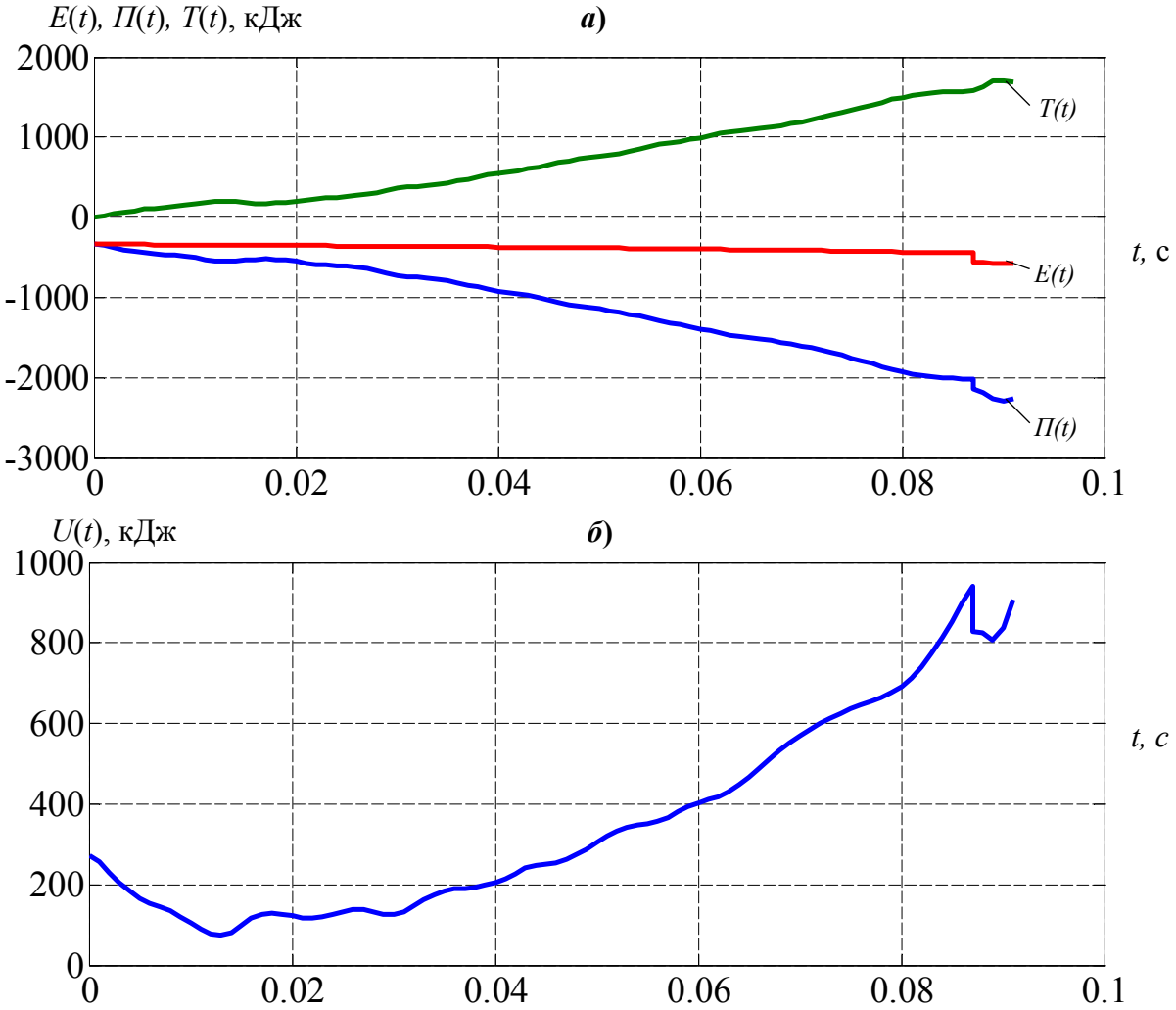


Рис. 3.38. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая T(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней

На рис. 3.40–3.43 приведены осциллограммы кинематических и силовых параметров реакции РДМ фермы при отключении стержня 7-2 рис. 3.39. Ферма обрушается. В момент времени t_1=0,083 *с* происходит выключение элемента нижнего пояса 1-2 (выключающиеся элементы показаны пунктиром на рис. 3.39, *а*). Отказ элемента 1-2 вызван потерей устойчивости. После этого конструкция фермы теряет несущую способность.

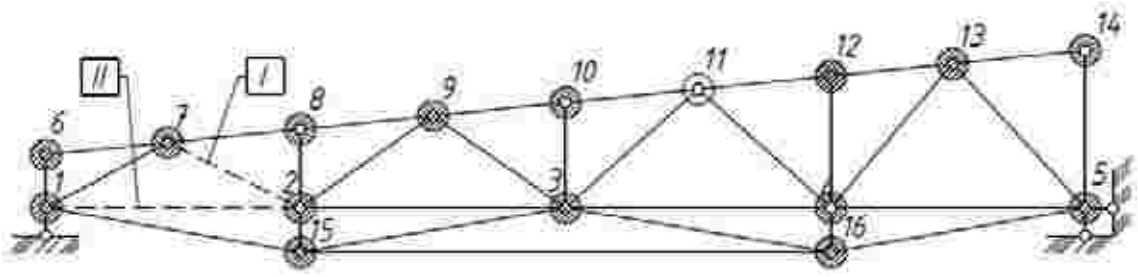


Рис. 3.39. Сценарий отказа элемента фермы в узлах 12-13.

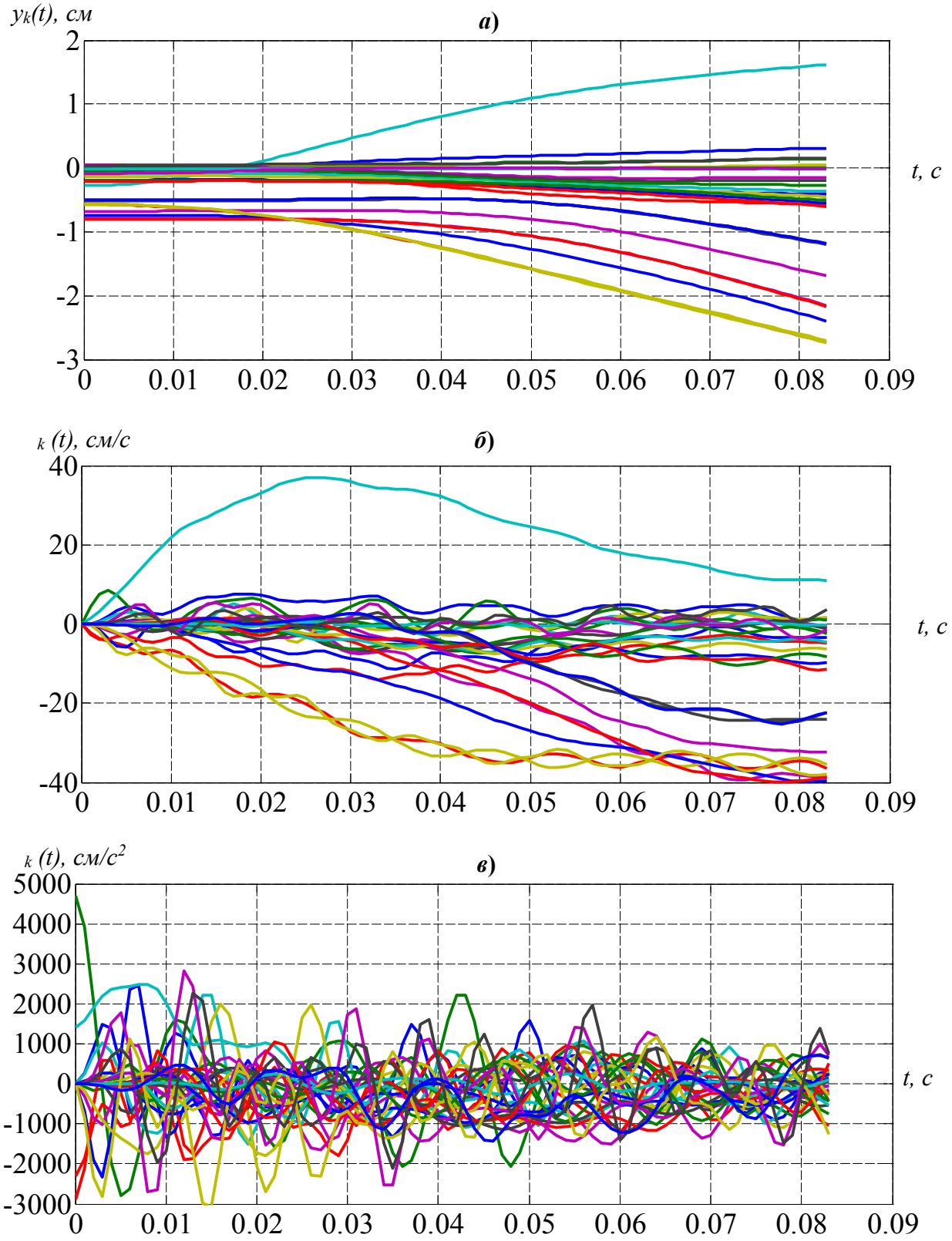


Рис. 3.40. Осциллограммы кинематических параметров реакции РДМ фермы:

а) перемещения; *б*) скорости; *в*) ускорения

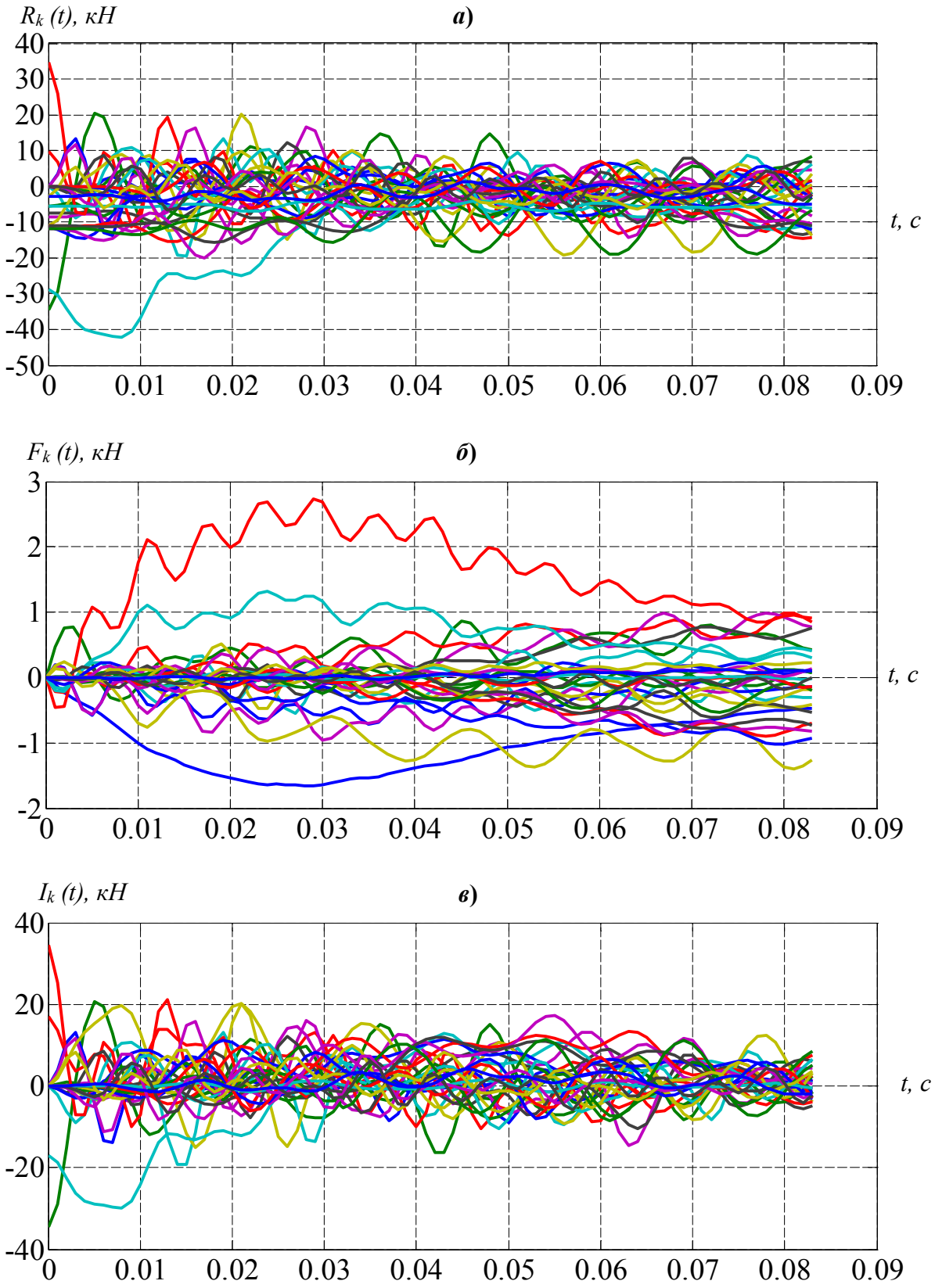


Рис. 3.41. Осциллограммы силовых параметров реакции РДМ фермы:

а) восстанавливающие силы; *б*) диссипативные силы; *в*) инерционные силы

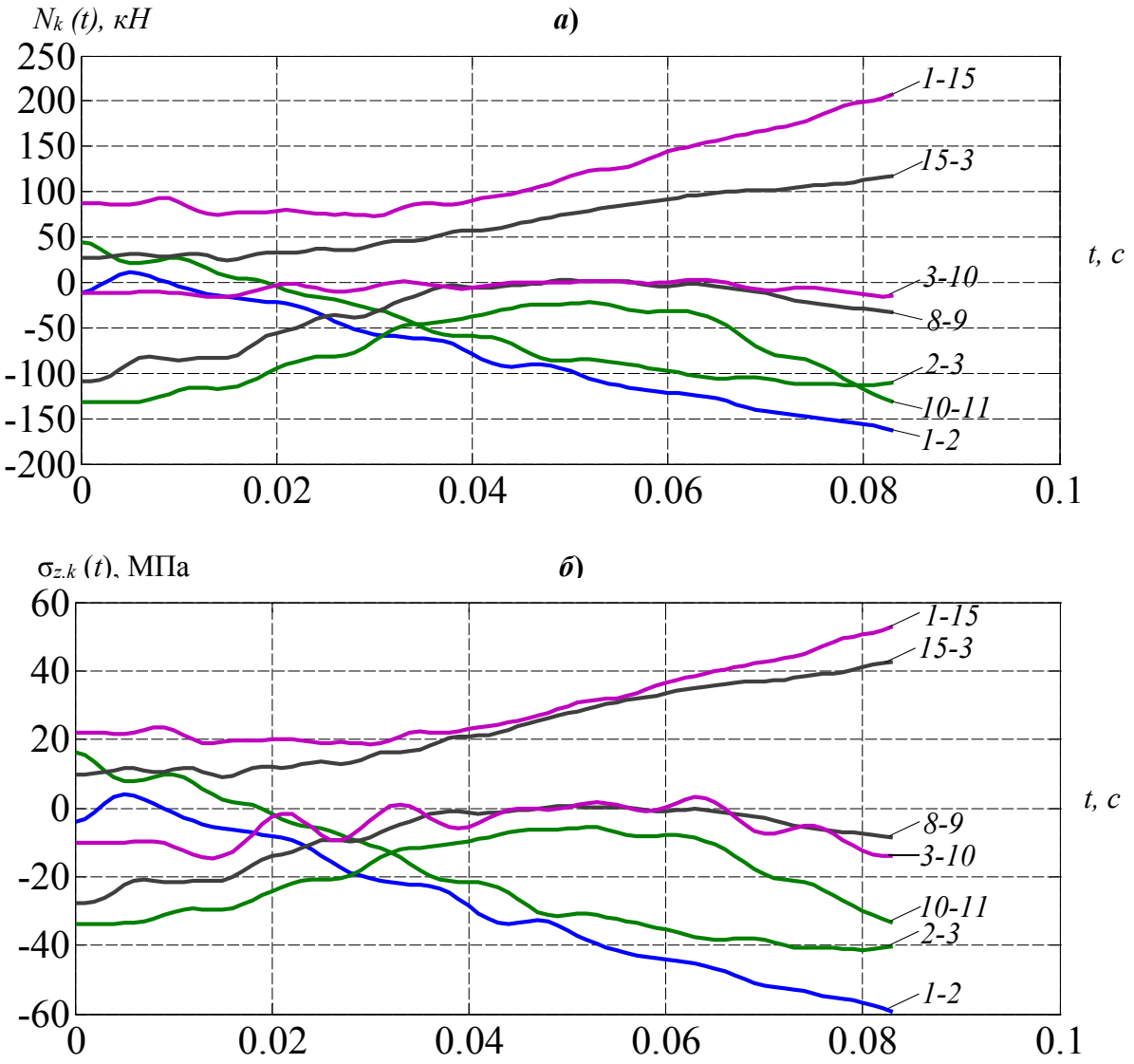


Рис. 3.42. Осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в наиболее напряжённых стержнях фермы

На рисунке 3.42 приведены осциллограммы продольных сил (*а*) и нормальных напряжений (*б*) в стержнях фермы. Показаны графики стержней, имеющих наиболее характерные изменения параметров во времени.

Согласно представленным данным (см. табл. 4.2, рис. 3.43) наибольшее изменение напряжений в стержнях составляет 1559,83%.

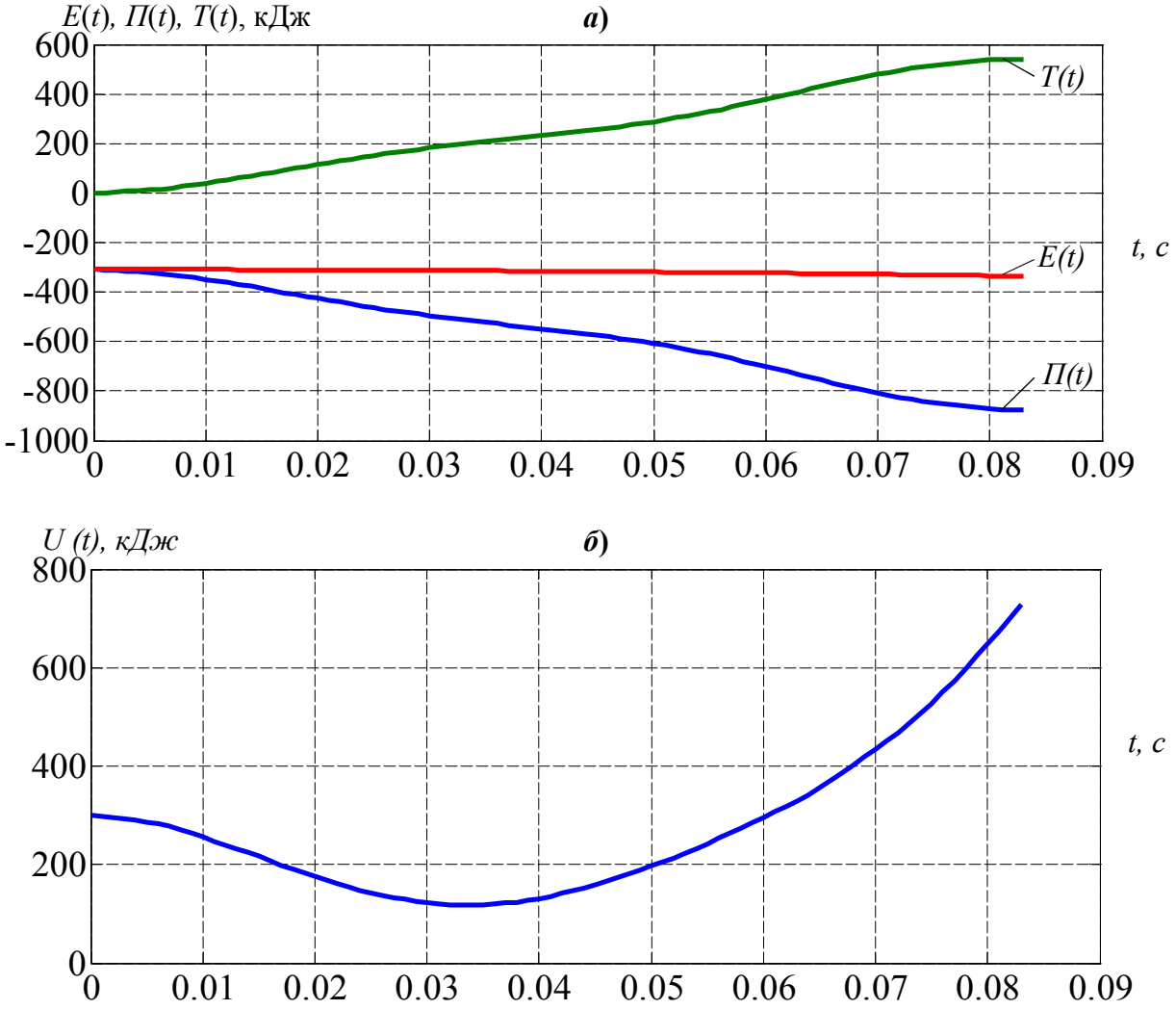


Рис. 3.43. Осциллограммы энергетических параметров реакции РДМ фермы:

а) Полная механическая *E* (*t*), полная потенциальная П(t), полная кинетическая Т(t) энергии системы; *б*) Потенциальная энергия деформации стержней.

3.4. Выводы по главе

1. Приведено описание процедур построения матриц внешних (матрицы жёсткости, масс и демпфирования) и внутренних динамических параметров системы. Реализация данных процедур при проведении временного анализа динамической реакции рассмотренных ферм выполнена на языке *MATLAB*.
2. Дано описание РДМ двух вариантов усиления фермы покрытия цеха горячего цинкования металлоконструкций.
3. Выполнены динамические расчёты упругих конструктивно нелинейных колебаний 2-х вариантов усиления фермы покрытия при нескольких вариантах сценариев отказа несущих элементов. Причиной выключения элементов явилась потеря прочности/устойчивости, вызванная химическим растрескиванием материала при действии коррозии.
4. Проанализированы особенности поведения (переломы, скачки, асимптоты и т.д.) параметров динамической реакции ферм в процессе колебаний при отказе несущих элементов.

ГЛАВА IV. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФЕРМЫ

4.1. Критерии оценки несущей способности конструкции при её переходе в новое *i*-е состояние

Рассмотренные в работе примеры динамического анализа ферм демонстрируют возможные сценарии их сложной нелинейной работы, в том числе и при обрушении вследствие запроектных (аварийных) воздействий. При этом рассматривается прогрессирующее (лавинообразное) обрушение. Данные примеры также показывают возможности технической реализации метода временного анализа по моделированию поведения конструкции при выключении несущих элементов. Результаты такого анализа могут позволить установить возможные причины выхода из строя стержней и внести соответствующие коррективы в расчётную модель для её усиления с целью увеличения ресурса несущей способности и прочностной надёжности, а также с целью предотвращения прогрессирующего обрушения.

В настоящей работе для исследования и оценки несущей способности системы при её переходе в *i*-е состояние принят ряд критетиев.

Алгебраические критерии – это ранг rank (K_i), определитель det (K_i) и невязка определителя Δ_{det} матрицы жёсткости системы.

Величины параметров rank (K_i) и det (K_i) показывают, обладает ли конструкция несущей способностью. Так, если не выполняются условия

$$\text{rank}\,(K_i) = n, \quad \det(K_i) > 0, \tag{4.1}$$

то несущая способность исчерпана, система является геометрически изменяемой. Здесь n – число степеней свободы дискретной модели.

Значение Δ_{det} вычисляется при переходе системы из одного состояния в другое (например, до и после отказа элемента):

$$\Delta_{det} = \det(K_{i\text{-}1}) - \det(K_i), \tag{4.2}$$

что позволяет оценить вклад жёсткости элемента, в общую жёсткость системы. При этом, если параметры det ($K_{i\text{-}1}$) и Δ_{det} сопоставимы по величине, то можно сказать,

что при выключении элемента жёсткость системы меняется значительно, и данный элемент может иметь ключевое значение в работе системы.

При оценке степени влияния жёсткости элемента на жёсткость всей конструкции, если степень влияния оказывается высокой (что можно оценить, например, по изменению определителя матрицы жёсткости (4.2)) или происходит обрушение системы (4.1), то в зависимости от причины отказа элемента (потеря устойчивости, разрыв и т.д.) выполняется корректировка жесткостных параметров стержней (форма сечения, размеры и пр.) и пересчитываются параметры РДМ и корректируются начальные условия задачи. В качестве усиления конструкции также возможно изменение её расчётной схемы.

К *энергетическим критериям*, рассматриваемым в работе, относятся: изменение полной механической энергии $\Delta_Э$ и полной потенциальной энергии $\Delta_П$ дискретной системы при переходе системы в новое состояние,

$$\Delta_Э = Э(t_{i-1}) - Э(t_i), \quad \Delta_П = П(t_{i-1}) - П(t_i). \tag{4.3}$$

Данные величины совместно с (4.2) могут позволить оценить степень влияния отказа элемента не несущую способность конструкции.

Стоит отметить, что в настоящее время среди специалистов активно ведутся дискуссии о выборе таких параметров, на основе которых было бы возможно проводить комплексную качественную оценку состояния конструкции при запроектных воздействиях [10, 61, 95, 97, 135, 136, 144]. Развитие метода временного анализа в данном направлении позволило бы, не прибегая к сложным натурным экспериментам, выполнить менее трудоёмкие численные эксперименты ответить на поставленные вопросы.

4.2 Оценка влияния отказов элементов на несущую способность фермы

В данном параграфе приведены результаты анализа влияния отказов несущих элементов фермы покрытия, описанной в главе 3, на её несущую способность. Исследуются изменения внутренних динамических параметров фермы, а также её несущая способность при переходе конструкции в новое состояние.

4.2.1 Вариант усиления А фермы покрытия

В данном разделе рассмотрена работа 1-го варианта усиления фермы (рис. 4.1), подробное описание которого приведено в п. 3.1. Для исходного состояния данного варианта фермы на рис. 4.2 приведены для каждого из стержней гистограммы со значениями жёсткости (*а*), продольных сил (*б*) и потенциальной энергии деформации (*в*).

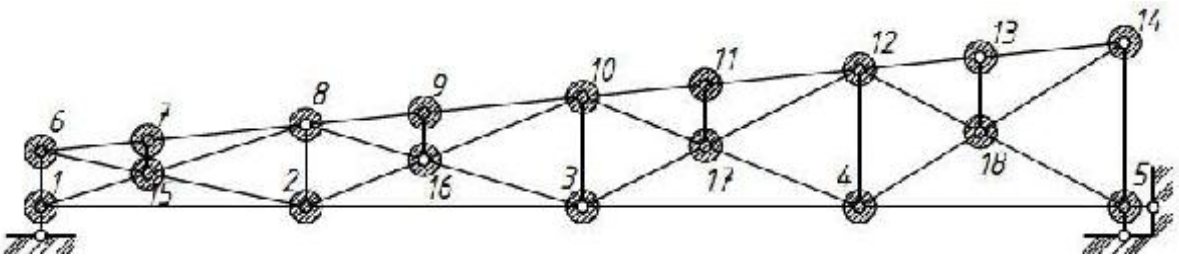


Рис. 4.1. Вариант усиления А фермы покрытия

Из рис.4.2, *а* видно, что наибольшими жёсткостями обладают элементы верхнего пояса фермы 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, 12-13, 13-14 и опорные раскосы 15-2, 4-18, 18-14. Наибольшие растягивающие силы возникают в стержнях 2-3, 3-4 нижнего пояса, сжимающие силы – в стержнях 8-9, 9-10, 10-11, 11-12 верхнего пояса. Наибольшей потенциальной энергией деформации обладают стержни 3-4 и 9-10, расположенные в середине пролёта фермы.

Для анализа влияния отказа элементов фермы на её характеристики и несущую способность делалось следующее. В начальный момент времени выключался некоторый несущий элемент и выполнялся временной анализ колебаний конструкции. В процессе анализа были определены изменения ряда характеристик: определителя det (K_i) и нормы ранга (K_i) матрицы жёсткости, спектра собственных частот ω_k и коэффициентов демпфирования ε_k, нормальных напряжений в стержнях σ_j, полной механической энергии $E(t_i)$. Количественные показатели изменения указанных параметров приведены в таблице 4.1.

Далее выключался другой несущий элемент и выполнялся анализ колебаний. Данная процедура проводилась при отказе каждого стержня фермы.

Стоит заметить, что при анализе не учитывалось выключение стоек 1-6, 15-7, 2-8, 16-9, 3-10, 17-11, 4-12, 18-13, 5-1 и также элементов верхнего пояса 6-7, 13-14, т.к.

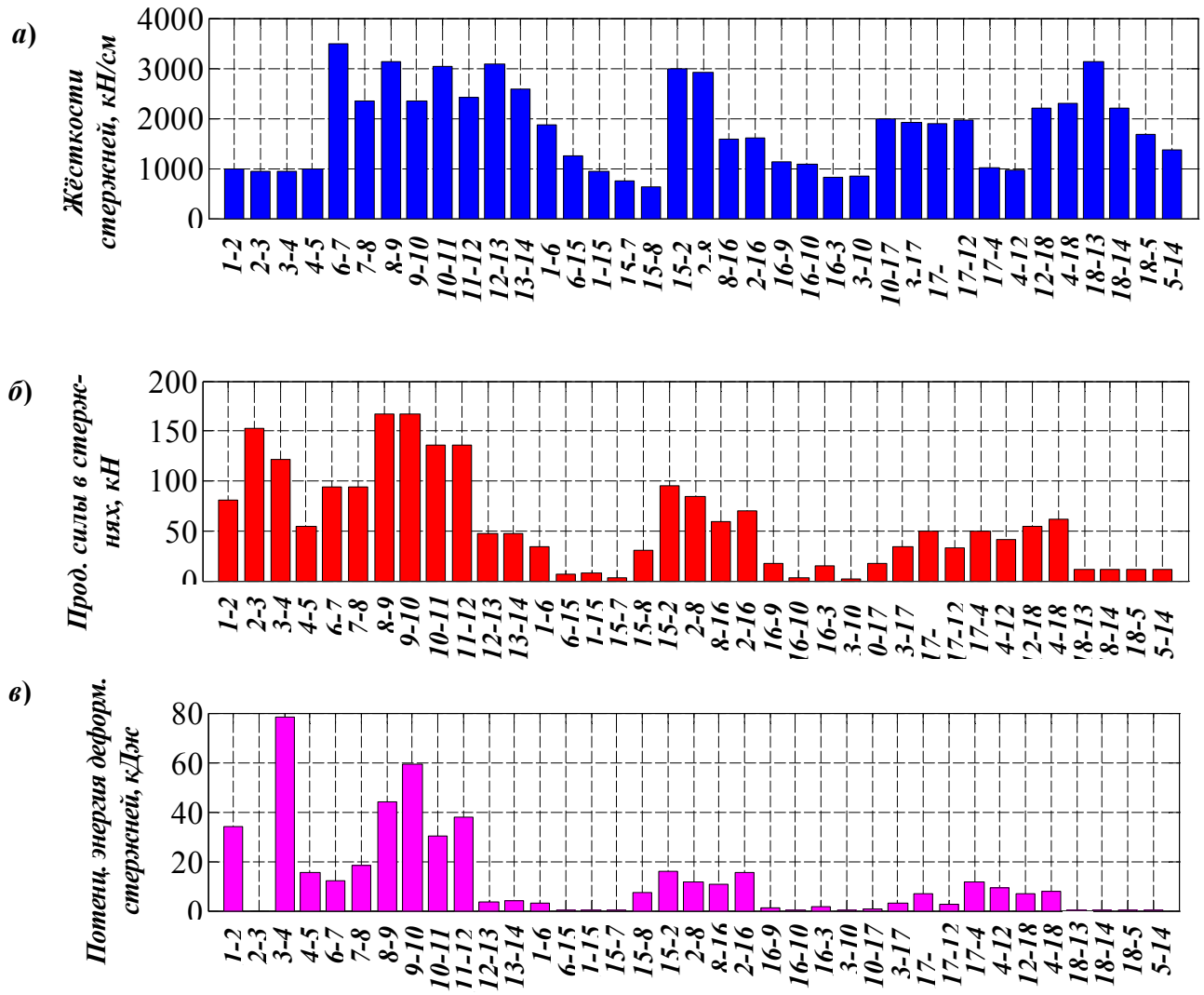


Рис. 4.2. Гистограммы параметров стержней фермы:
а) жёсткости; *б*) продольные силы; *в*) полная потенциальная энергия деформа-

их отказ приводит к вырождению матрицы жёсткости – $\det(K_i) = 0$, однако, ферма в целом не становится изменяемой системой и не теряет своей несущей способности.

Выключение остальных элементов фермы приводит к различному количеству последующих отказов стержней, что показано в правом столбце таблицы 4.1. При этом, если отказ всего один, то ферма обладает достаточной несущей способностью и в процессе колебаний принимает новое равновесное положение; если количество отказов ≥ 2, то в процессе колебаний несущая способность фермы исчерпывается, в результате чего конструкция обрушается.

Таблица №4.1

№ выключаемых стержней	Номера узлов (рис. 3.9, *а*)	Изменения параметров фермы при отказе несущих элементов										Кол-во последовательных отказов стержней
		Определитель матрицы жёсткости $\det(K_i)$,%	Норма матрицы жёсткости $\text{norm}(K_i)$,%	Собственные частоты ω_k		Коэффициенты демпфирования ε_k		Нормальные напряжения в стержнях σ_j		Полная механическая энергия *E*		
				Основной тон, %	Max, %	Основной тон, %	Max, %	Max, %	Min, %	при t_0	при t_{end}	
1	1-2	74.20	0.018	8.48	11.64	0.67	14.01	2838,85	0,00	33,30	138,60	1
2	2-3	84.52	0.026	36.90	36.90	3.31	9.40	22875,01	0,07	123,90	794,20	1
3	3-4	77.65	0.000	23.75	23.75	-0.41	10.51	3975,10	0,07	78,00	347,20	1
4	4-5	84.36	0.003	12.68	35.25	-10.32	18.84	2130,27	0,67	15,30	97,30	1
5	6-7	92.41	3.966	10.79	13.16	1.28	28.43	3377,96	1,09	12,70	166,10	1
6	7-8	88.78	4.982	10.69	18.38	1.38	26.11	3323,43	1,31	18,70	166,10	1
7	8-9	95.21	5.550	39.03	0.00	6.00	0.00	2317,87	0,03	44,40	0,00	2
8	9-10	93.60	1.594	38.98	38.98	6.05	17.77	2842,50	0,03	59,30	0,00	2
9	10-11	92.98	0.723	25.48	25.48	4.32	20.91	4083,34	0,06	30,50	431,20	1
10	11-12	91.18	0.329	24.95	24.95	4.68	26.19	5299,63	0,03	39,00	431,20	1
11	12-13	94.95	0.188	6.13	21.39	1.30	27.65	2065,48	0,03	3,60	0,00	2
12	13-14	93.97	0.058	5.06	19.15	2.11	26.73	1950,61	0,07	4,30	0,00	2
14	6-15	90.89	4.124	10.92	11.42	1.00	24.57	2922,66	1,09	15,20	166,10	1
15	1-15	90.45	3.149	8.41	21.44	1.13	27.93	2903,58	1,09	12,40	128,60	1
17	15-8	81.88	4.871	6.09	23.94	2.64	19.82	1109,05	0,75	11,10	61,10	1
18	15-2	83.58	2.343	8.78	20.63	2.32	13.02	1642,35	1,48	15,40	93,30	1
20	8-16	85.54	1.789	1.66	17.44	-0.28	20.77	2282,10	0,03	1,40	8,90	1
21	2-16	84.41	0.119	0.18	12.39	0.42	21.30	453,85	0,03	0,10	0,40	1
23	16-10	78.81	0.378	0.57	22.76	0.34	18.85	2360,42	0,03	1,50	7,00	1
24	16-3	81.02	0.041	0.02	27.32	0.27	16.80	78,45	0,03	0,10	0,10	1
26	10-17	87.67	0.549	0.47	15.87	2.14	23.61	878,45	0,03	0,90	6,50	1
27	3-17	86.22	0.085	2.26	16.24	2.43	20.81	1233,30	0,06	3,10	22,00	1
29	17-12	86.18	0.226	4.58	16.45	1.79	27.69	1480,08	0,03	6,60	47,70	1
30	17-4	87.64	0.115	1.84	18.18	2.02	21.14	1596,64	0,06	3,00	22,60	1
32	12-18	80.80	0.077	3.51	28.69	3.46	18.28	1898,23	0,74	12,10	62,20	1
33	4-18	78.13	0.005	3.51	15.59	1.50	18.11	1438,04	0,74	9,10	41,20	1
35	18-14	90.36	0.012	4.43	18.35	1.60	24.98	1915,80	0,05	6,80	0,00	2
36	18-5	91.51	0.004	4.44	31.79	3.58	23.33	2063,27	0,58	8,30	97,40	1

Из приведённых данных видно, что наибольше изменения определителя матрицы жёсткости det (K_i) происходят при отказе 8-9 и 9-10 стержня. Изменение спектра собственных частот по основному тону являются максимальными при отказе также 7-го и 8-го стержней, а также стержня 2-3. Максимальные изменения коэффициента демпфирования по основному тону наблюдаются при отказе стержней 4-5, 8-9, 9-10.

Наибольшее изменение напряжений в стержнях фермы происходит при отказе 2-3, 10-11 и 11-12 элементов. Энергия системы изменяется максимально при отключении центральных стержней верхнего и нижнего поясов – стержни 2-3, 3-4, 8-9, 9-10.

Раннее было установлено, что наиболее нагруженными стержнями исходной фермы являются элементы 2-3, 3-4 нижнего пояса и элементы 8-9, 9-10 верхнего пояса. Их отказ ведёт к наибольшим изменениям параметров системы.

На рис. 4.3–4.6 представлены гистограммы изменения параметров фермы, изображённой на рис. 4.1.

Как было отмечено ранее, отказ элементов фермы влияет на жёсткость конструкции, выраженную через величину det (K_i). Данные об этом приведены на рис. 4.3. Наибольшие изменения определителя матрицы жёсткости проявляются при отключении стержней верхнего пояса 8-9 (95,25%), 9-10 (93,6%), 10-11 (92,98%), 12-13 (94,95%), 13-14 (93,97%) (см. таблицу 4.1). Данные стержни так же обладают наибольшими жёсткостями, в них возникают наибольшие усилия (рис.4.2, а, б).

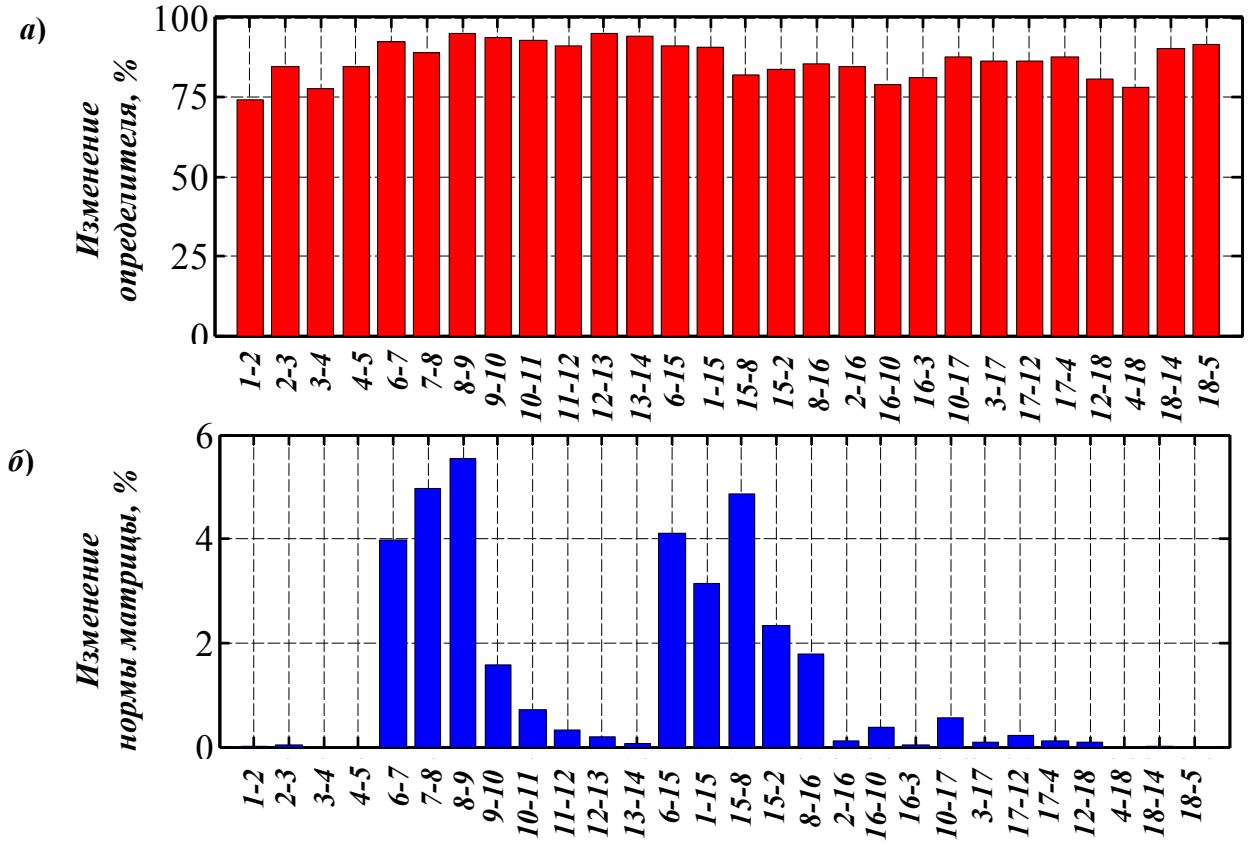


Рис. 4.3. Гистограммы изменений определителя (*а*) и нормы (*б*) матрицы жёсткости фермы при выключении различных стержней

Как видно из рис.4.3, *б* максимальное влияние на изменения нормы матрицы оказывают стержни верхнего пояса, имеющие наибольшую жёсткость: 6-7 (3,96%), 7-8 (4,98%), 8-9 (5,55%) и раскосы 6-15 (4,124%), 15-8 (4,87%) (см. таблицу 4.1).

При отказе стержней фермы наибольшему изменению в большинстве случаев подвержены основной тон собственных колебаний, коэффициенты демпфирования изменяются по более сложному закону. Пои этом изменение может достигать до 39 % для собственных частот и до 10 % для коэффициентов демпфирования. изменяется по сложным зависимостям – см. рис.4.4, *б*.

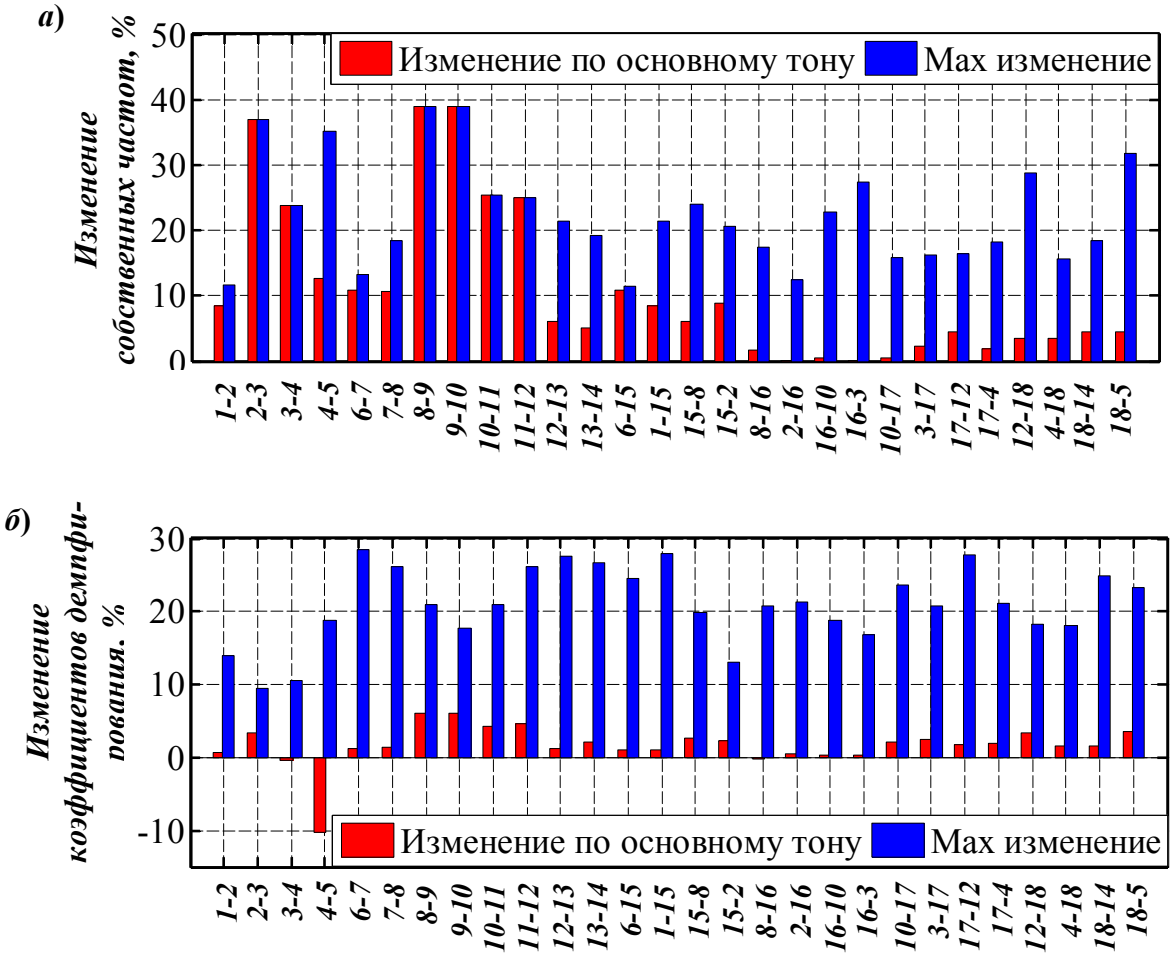


Рис. 4.4. Гистограммы изменений собственных частот (*а*) конструкции и коэффициентов демпфирования (б) при выключении различных стержней фермы

Наибольшее влияние на напряжения в элементах фермы (рис. 4.5) имеет наиболее растянутый стержень нижнего пояса 2-3. При его отказе максимальные изменения напряжений в ферме составляют 22875%, так же большое влияние оказывают наиболее жёсткие стержни верхнего пояса 11-12 – изменение на 5299,6%, 10-11 – изменение на 4083,3% (см. таблицу 4.1).

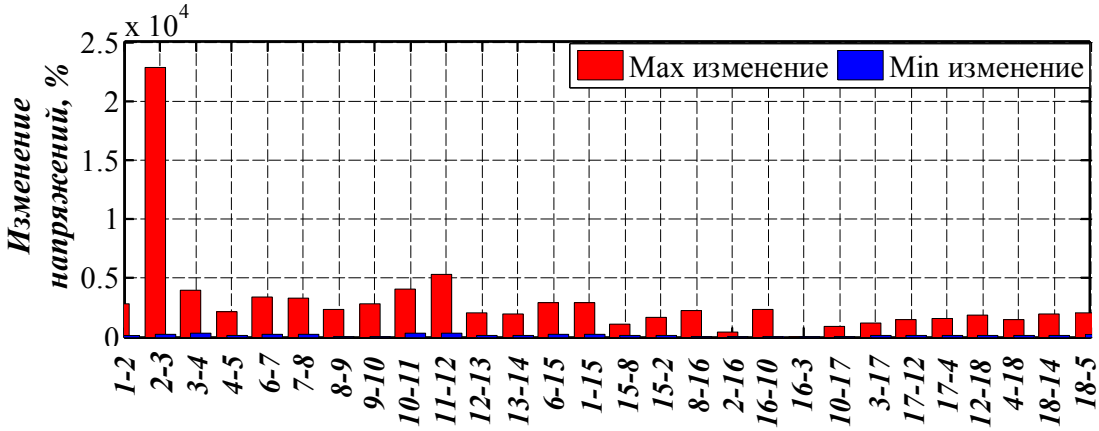


Рис. 4.5. Гистограмма изменения нормальных напряжений в элементах фермы при выключении различных стержней

Согласно рис. 4.2 и 4.6 максимальное влияние на изменение полной механической энергии в начальный и конечный моменты времени расчёта оказывают стержни с наибольшей жёсткостью, в которых возникают наибольшие нормальные напряжения, – это стержни верхнего и нижнего поясов 2-3, 10-11, 11-12 (рис. 4.1).

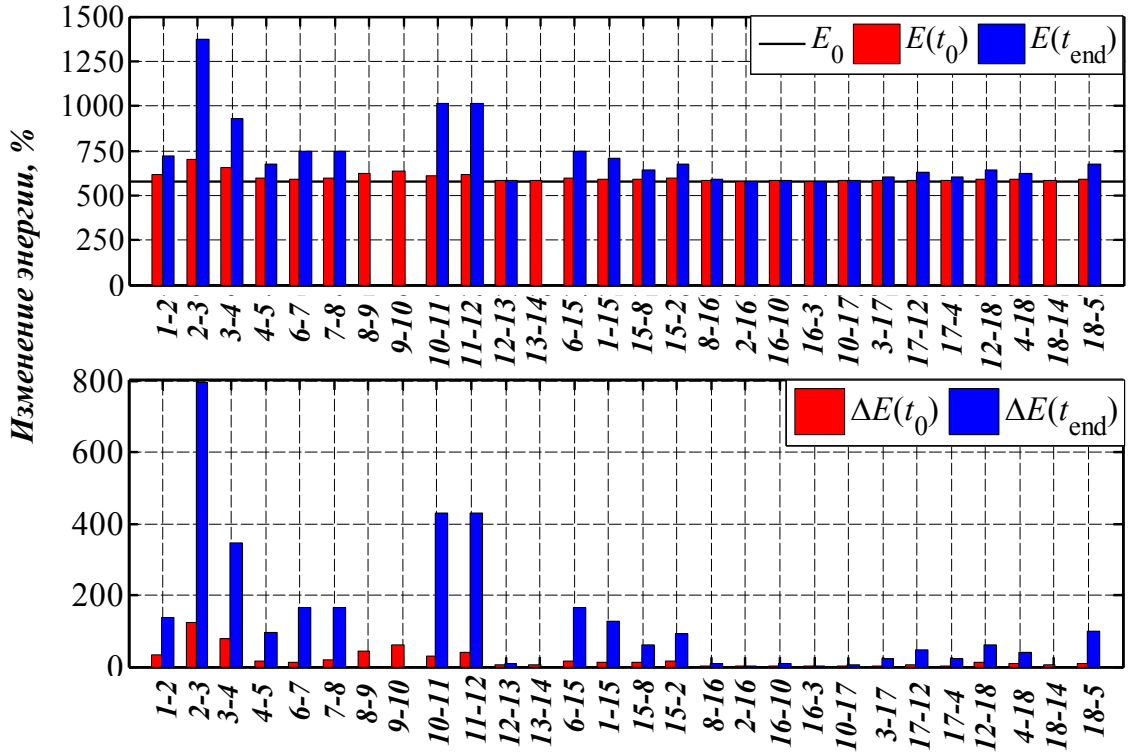


Рис. 4.6. Гистограмма изменений энергии фермы при выключении стержней

4.2.2 Вариант усиления Б фермы покрытия

Рассмотрена работа 2-го варианта усиления фермы (рис. 4.7), описание которой приведено в п. 3.2. Для исходного состояния данного варианта фермы на рис. 4.8 приведены гистограммы значений жёсткости (*а*), продольных сил (*б*) и потенциальной энергии деформации (*б*) для каждого из стержней.

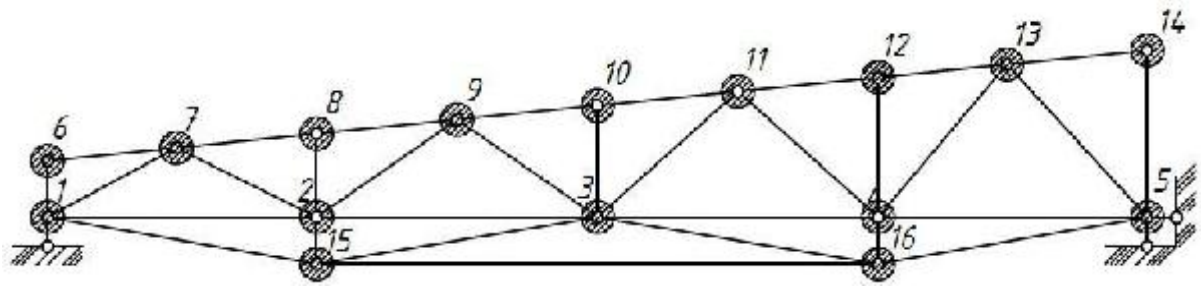


Рис. 4.7. Вариант усиления Б фермы покрытия

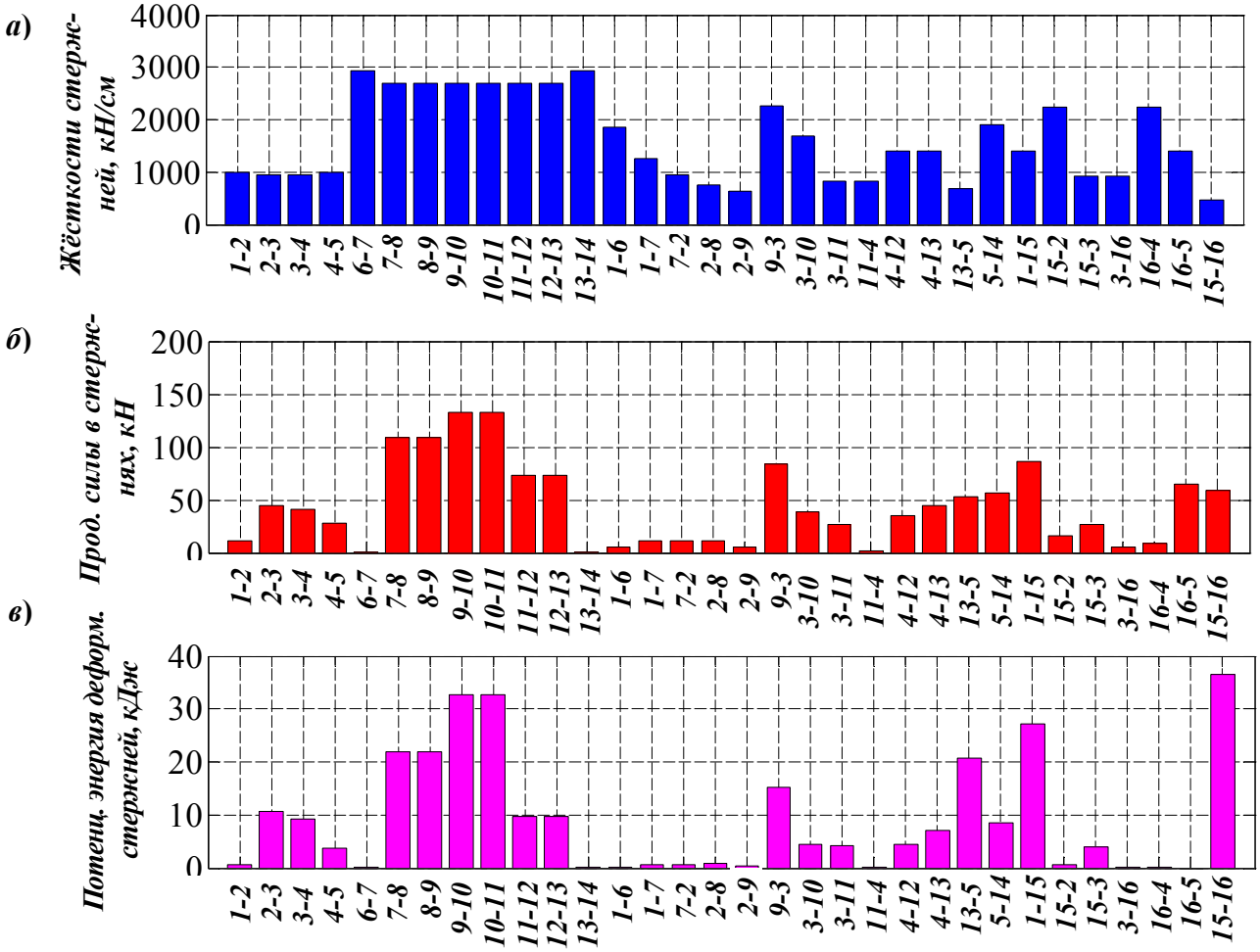


Рис. 4.8. Гистограммы параметров стержней фермы:
а) жёсткости; *б*) продольные силы; *в*) полная потенциальная энергия деформации

Из рис. 4.8, *а* видно, что наибольшими жёсткостями обладают элементы верхнего пояса фермы – 6-7, 7-8, 8-9, 9-10, 10-11, 11-12, 12-13, 13-14. Наибольшие сжимающие силы возникают в стержнях 9-10, 10-11 верхнего пояса, растягивающие силы – в раскосе 1-15. Наибольшей потенциальной энергией деформации обладают стержни 9-10 и 10-11, 15-16.

В таблице 4.2 приведены изменения параметров фермы при отказе несущих элементов в начальный момент времени. При анализе не учитывалось выключение стоек 1-6, 2-8, 3-10, 4-12, 15-2, 16-4, а также элементов верхнего пояса 6-7, 13-14, т.к. их отказ приводит к вырождению матрицы жёсткости.

Таблица 4.2

№ выключаемых стержней	Номера узлов (рис. 3.9, *а*)	Изменения параметров фермы при отказе несущих элементов										Кол-во последовательных отказов стержней
		Определитель матрицы жёсткости $\det(K_i)$,%	Норма матрицы жёсткости $\mathrm{norm}(K_i)$,%	Собственные частоты ω_k		Коэффициенты демпфирования ε_k		Нормальные напряжения в стержнях σ_j		Полная механическая энергия E		
				Основной тон, %	Max, %	Основной тон, %	Max, %	Max, %	Min, %	при t_0	при t_{end}	
1	1-2	68.9	0.01	0.90	16.80	0.41	35.60	343,72	0,00	0,71	2,21	1
2	2-3	67.6	0.05	6.61	8.97	3.31	21.70	1277,71	0,00	10,61	32,81	1
3	3-4	66.1	0.00	4.71	8.63	1.78	17.21	722,05	0,00	9,11	26,91	1
4	4-5	72.3	0.00	2.43	23.66	1.39	13.83	633,95	0,16	3,81	13,81	1
6	7-8	97.9	6.84	55.05	55.05	4.30	25.94	2989,74	0,01	22,01		3
7	8-9	97.9	5.26	55.83	55.83	3.42	27.77	2944,55	0,01	22,01		3
8	9-10	98.5	1.75	67.24	67.24	14.53	38.05	2794,53	0,03	32,71		3
9	10-11	98.5	0.63	67.33	67.33	14.39	35.48	2677,66	0,01	32,71		3
10	11-12	99.1	0.29	58.86	58.86	-0.13	34.37	2396,56	0,01	9,81		2
11	12-13	99.1	0.11	58.23	58.23	1.37	28.61	1738,91	0,00	9,81		2
14	1-7	99.0	5.30	60.39	60.39	20.01	36.46	2668,35	0,00	15,41		3
15	7-2	99.2	4.40	56.11	56.11	9.47	46.00	1559,83	0,02	4,41		2
17	2-9	95.5	0.62	30.46	46.97	17.22	33.44	1870,03	0,16	4,31	95,01	1
18	9-3	97.5	0.38	24.88	59.00	8.15	50.20	105,81	0,01	0,01	1,31	1
20	3-11	98.0	0.14	37.90	40.62	19.11	39.00	2785,94	0,06	4,51		3
21	11-4	98.7	0.11	50.05	50.05	26.92	39.07	2778,85	1,30	7,01		3
23	4-13	97.6	0.01	55.41	55.41	3.04	38,92	1795,87	0,01	20,61		2
24	13-5	99.4	0.01	61.82	61.82	15.95	55,35	2470,76	0,05	8,51		3
26	1-15	87.0	0.29	22.60	22.60	5.70	18,97	2955,39	0,03	27,01	208,01	1
28	15-3	64.6	0.02	1.33	10.00	0.20	17,48	755,25	0,00	3,91	11,01	1
29	3-16	62.1	0.01	0.04	9.09	0.01	13,51	86,68	0,00	0,11	0,41	1
31	16-5	84.6	0.00	14.87	22.15	0.24	14,11	1359,71	0,02	15,21	98,61	1
32	15-16	52.8	0.00	11.28	11.28	3.57	18,72	1327,84	0,09	36,51	77,41	1

Из приведённых данных видно, что наибольше изменения определителя матрицы жёсткости det(K_i) происходят при отказе стержней 13-5, 7-2 и стержней верхнего пояса. Изменение спектра собственных частот по основному тону являются максимальными при отказе стержней верхнего пояса – 9-10 и 10-11 и раскоса – 13-5. Максимальные изменения коэффициента демпфирования по основному тону наблюдаются при отказе стержней 11-4, 1-7, 4-13. Наибольшее изменение напряжений в стержнях фермы происходит при отказе 7-8, 8-9 и 1-15 элементов. Энергия системы изменяется максимально при отключении центральных стержней верхнего и нижнего поясов – стержни 9-10, 10-11 и 15-16.

Раннее было установлено, что наиболее нагруженными стержнями исходной фермы являются стержни 4-13, 9-10, 10-11, 7-8, 8-9 – см. таблицу 3.4.

На рис.4.9–4.12 представлены гистограммы изменения параметров фермы, изображённой на рис. 4.7.

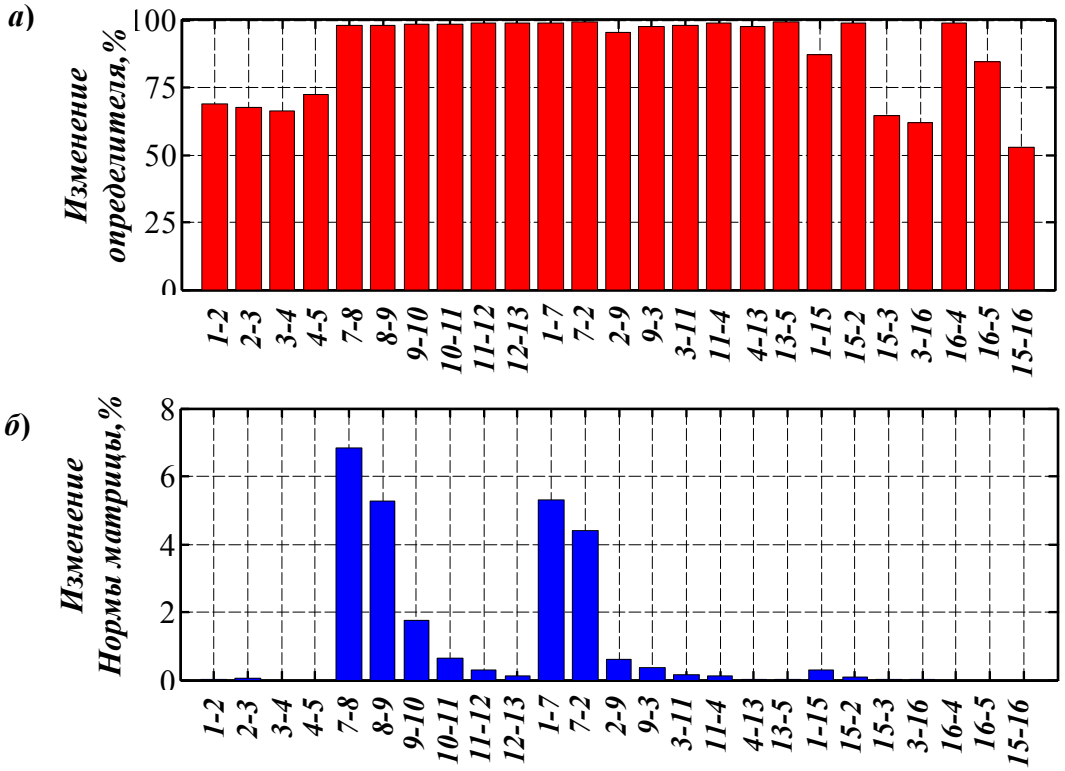


Рис. 4.9. Гистограмма изменений параметров матрицы жёсткости конструкции при выключении стержней фермы:
а) определителя, *б*) нормы

Наибольшие изменения определителя матрицы жёсткости (рис. 4.9) выявляются при отключении стержней верхнего пояса 11-12 и 12-13 (99,1%), раскоса 7-2 (99,2%), опорного раскоса 13-5 (99,4%) (см. таблицу №4.2).

Как видно из рис. 4.9, *б* максимальное влияние на изменения нормы матрицы оказывают стержни, имеющие наибольшие жёсткость и напряжения: 7-8 (6,84%), 8-9 (5,26%) и раскос 1-7 (5,3%) (см. таблицу №4.2).

Стержни верхнего пояса 9-10 и 10-11 придают максимальные изменения частот по основному тону равные 67,24% и 67,33% соответственно (рис. 4.10, *а*). При отключение опорного раскоса 13-5 частоты собственных колебаний по основному тону изменяются на 61,82% (см. таблицу №4.2). Коэффициенты демпфирования изменяется по сложным более сложным зависимостям (рис. 4.10, *б*).

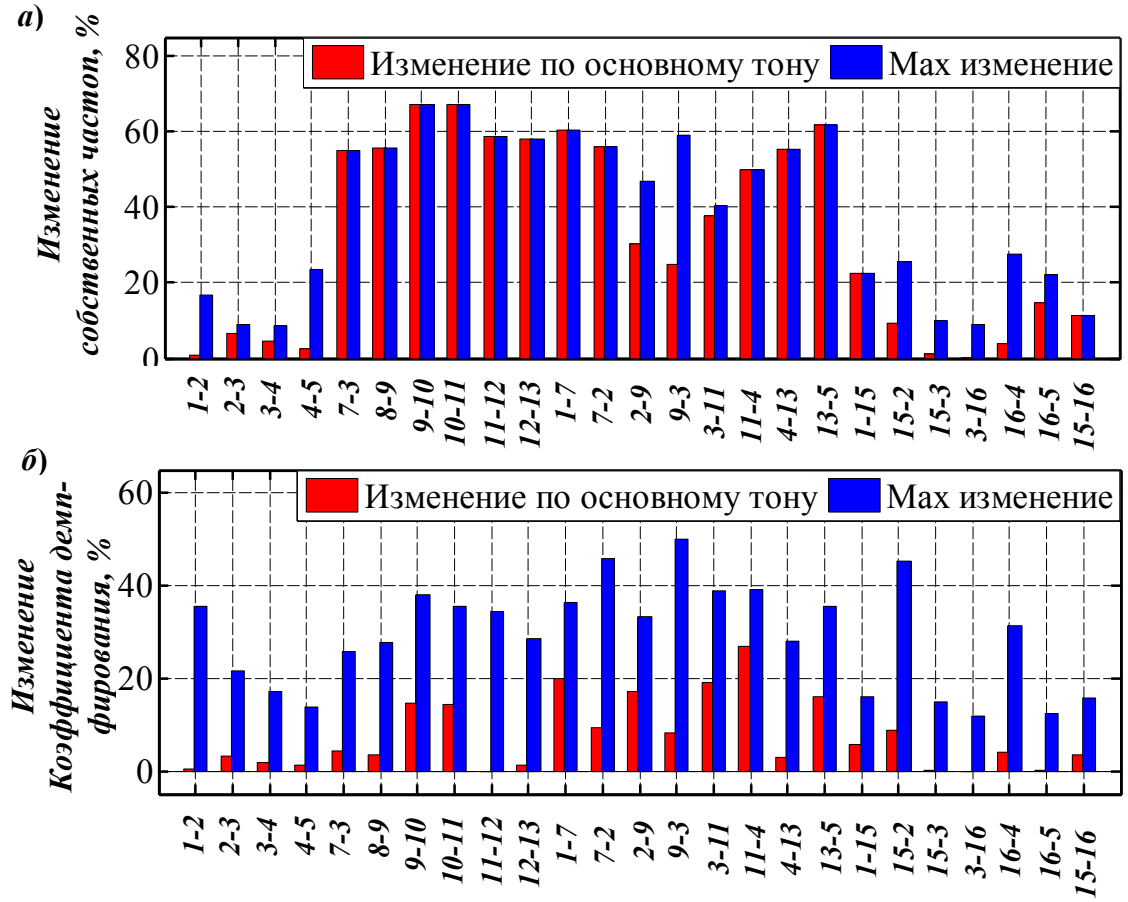


Рис. 4.10. Гистограммы изменений:
а) собственных частот конструкции при выключении стержней фермы, б) коэффициента демпфирования по основному тону и максимальное при выключении стержней фермы

Наибольшее влияние на напряжения в элементах фермы (рис. 4.11) имеют наиболее жёсткие и напряжённые стержни верхнего пояса 7-8 и 8-9. При отключении данных элементов изменения напряжений в ферме составляют 2989,7% и 2944,5%, так же влияют стержни раскосы 1-15 – 2955,4 % (см. таблицу №4.2).

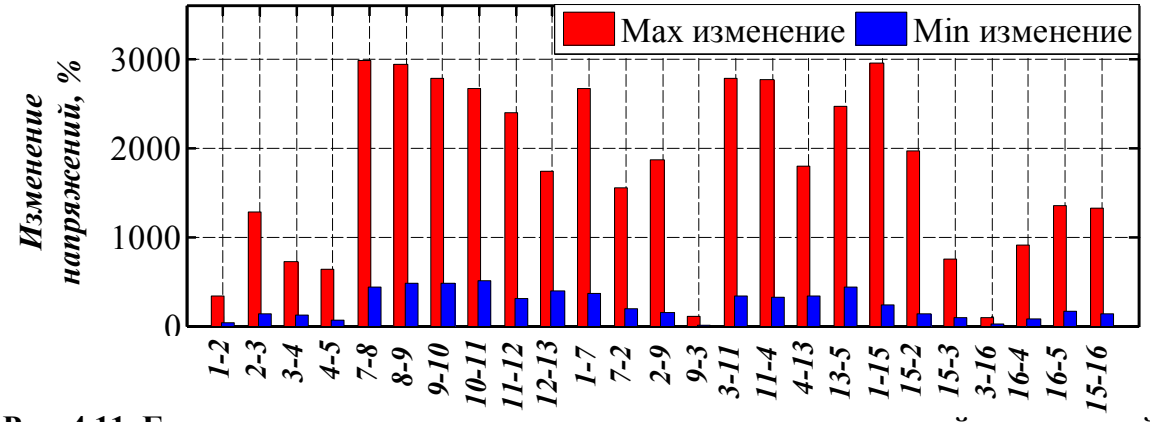


Рис. 4.11. Гистограмма максимальных и минимальных изменений напряжений в элементах конструкции при выключении стержней фермы

Соответственно рис. 4.12 и рис. 4.8 максимальное влияние на полную механическую энергию в начальный и конечный моменты времени расчёта оказывают стержни 2-9, 1-15, 9-10, 10-11.

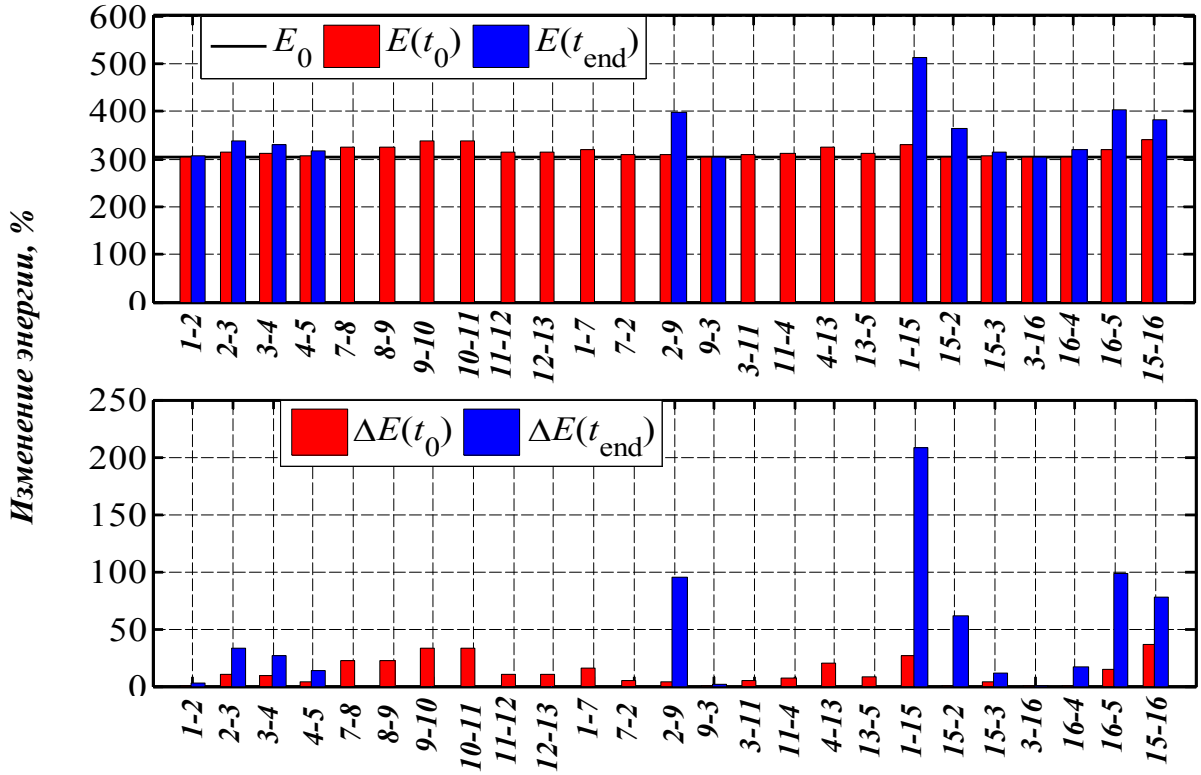


Рис. 4.12. Гистограмма изменений энергии фермы при выключении стержней

4.3. Сравнительный анализ степени влияния отказов элементов на несущую способность 2-х вариантов усиления фермы покрытия

На основании данных анализа влияния отказов несущих элементов на параметры конструкции выполним сравнение по обоим вариантам фермы покрытия (рис. 4.13). В качестве параметров для сравнения рассмотрим алгебраические параметры (ранг, изменение определителя и нормы матрицы жёсткости), а также внутренние динамические параметры (собственные частоты и коэффициенты демпфирования).

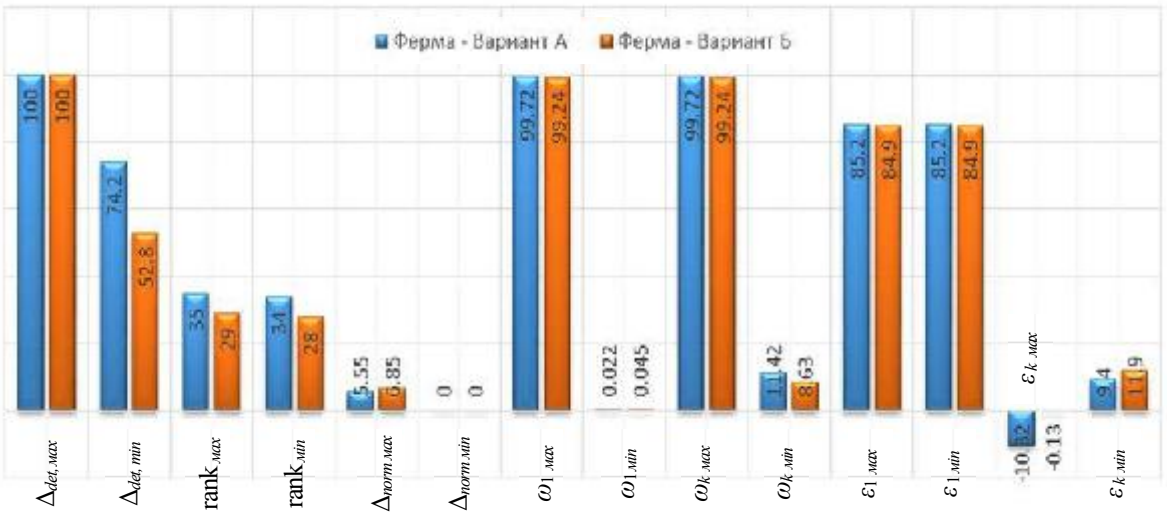


Рис. 4.13. Сравнение изменений параметров 2-х вариантов ферм покрытия при выключении отдельных стержней

Как видно из рисунка, изменение указанных параметров обоих вариантов усиления фермы носит близкий характер. Заметные расхождения наблюдаются лишь для минимальных значений Δ_{det} и ε_k.

Можно отметить, что наибольшее влияние отказы элементов фермы имеют на основной тон спектра собственных частот. При этом таким же образом меняется и главный коэффициент демпфирования.

Критическая величина изменения определителя матрицы жёсткости, которое может повлечь за собой лавинообразное обрушение всей конструкции, имеет значение более 95%.

4.4. Выводы по главе

1. Выполнено исследование влияния отказов несущих элементов фермы на её несущую способность. В качестве критериев сохранения фермой своей несущей способности выбраны: ранг и изменение определителя матрицы жёсткости системы.
2. Проведён анализ влияния отказов элементов на внутренние динамические характеристики фермы (спектры собственных частот и коэффициентов демпфирования), а также на параметры НДС и энергетические параметры реакции конструкции.
3. Выявлено, что наибольшее влияние на динамические параметры конструкции оказывают элементы, обладающие наибольшей жёсткостью, имеющие наибольшее напряжение и потенциальную энергию.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследованы особенности поведения энергетических параметров реакции ДДС (полных механической и потенциальной, кинетической энергий) – скачки, асимптоты и т.д. – в процессе упругих конструктивно нелинейных колебаний статически нагруженной фермы.

   Установлено, что в момент отказа несущего элемента на осциллограммах полной механической и полной потенциальной энергии появляется скачок $\Delta Э(t_i) = \Delta П(t_i)$, равный запасённой в выключенном элементе энергии деформации и пропорциональный невязке матрицы жёсткости системы ΔK_i. Значение кинетической энергии не изменяется. Асимптотами на графиках механической и потенциальной энергии являются уровни, соответствующие положениям статического равновесия фермы.

2. Исследовано влияние отказов элементов фермы на характеристики собственных колебаний, параметры реакции и параметры НДС стержней, а также несущую способность фермы в целом. В качестве критериев такой оценки приняты алгебраические критерии: ранг rank (K_i), определитель det (K_i) и невязка определителя Δ_{det} матрицы жёсткости системы, а также энергетические критерии: полная механическая энергия $Э$ и полная потенциальная энергия $П$.

3. На основе рассмотренных критериев выявлены ключевые элементы, оказывающие наиболее сильное влияние на изменение параметров фермы и на её несущую способность. Это элементы, имеющие, как правило, наибольшую жёсткость и, как следствие, наиболее нагруженные, с большей потенциальной энергией деформации. В данной работе – ключевыми элементами являются стержни верхнего пояса и опорные раскосы.

   Отказ ключевых элементов приводит к следующим последствиям: *а*) определитель матрицы жёсткости уменьшается на критическую величину – от 90 %, *б*) значительно изменяются спектры собственных частот и коэффициентов демпфирования (до 99,7 %), при этом наибольшее изменение основного тона ведёт к наибольшему изменению главного коэффициента демпфирования; *в*) происходит лавинообразное (многоступенчатое) обрушение конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

[1] Айзенберг, Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов / Я.М. Айзенберг. – М.: Стройздат, 1976. – 229 с.

[2] Акимов, Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов / Г.В. Акимов. – М.: Металлургиздат, 1946.

[3] Алдушкин, Р.В. Исследование работы треугольных ферм при статических и динамических воздействиях / Р.В. Алдушкин, С.Ю. Савин // Строительство и реконструкция. – 2010. – № 3–29. – С. 3–6.

[4] Алексейцев, А.В. Анализ ударного запроектного воздействия на пространственные рамные системы / А.В. Алексейцев, И.Н. Серпик, А.В. Бутенко // Известия КазГАСУ. – 2012. – № 4. – С. 400–408.

[5] Алёнин, В.П. Итерационные методы расчёта систем с внешними и внутренними связями: автореферат диссертации на соискание степени д.т.н. / В.П. Аленин. – Омск: 2002. – 31 с.

[6] Алфутов, Н.А. Влияние односторонних связей на устойчивость оболочек при осевом сжатии / Н.А. Алфутов, А.Н. Еремичев // Расчёты на прочность. – М.: Машиностроение. – 1989. – С. 179–188.

[7] Ананьин, А.И. К составлению и решению уравнений движения неконсервативных систем / А.И. Ананьин // Известия вузов. Строительство. – 1999. – № 5. – С. 21–35.

[8] Ананьин, А.И. Простые и комбинированные модели для учёта диссипации энергии при колебаниях / А.И. Ананьин // Известия вузов. Строительство. – 1998. – № 8. – С. 29–35.

[9] Ануфриев, И.Е. *MATLAB* 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.

[10] Апаринов, В.А. Изучение аэрогидродинамики плохообтекаемых тел с помощью ЭВМ / В.А. Апаринов, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, В.Н. Котовский, А.А. Михайлов // Промышленная аэродинамика. – 1988. – Вып. 3 (35). – С. 123–138.

[11] Баженов, В.А. Устойчивость и колебания деформируемых систем с односторонними связями / В.А. Баженов, Е.А. Гоцуляк, Г.С. Кондаков, А.И. Оглобля. – Киев: Выща школа. Головное изд-во, 1989. – 399 с.

[12] Бакушев, С.В. К вопросу о расчёте деформируемых тел учётом геометрической и физической нелинейности / С.В. Бакушев // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 8. – С. 20–25

[13] Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.

[14] Безделев, В.В. Численное моделирование динамического напряжённо-деформированного состояния зданий при сейсмических воздействиях с целью оптимизации параметров демпфирующих устройств / В.В. Безделев // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008. – V.4, №2. – С. 24–25.

[15] Бернштейн, Л.А. Колебания многосвязных цилиндрических конструкций с односторонними связями при динамических воздействиях / Л.А. Бернштейн, А.М. Столяр, L.S. Srubshchik // Труды III всероссийской конференции по теории упругости с международным участием (Ростов-н/Дону – Азов, 13–16 октября 2003 г.). – Ростов-на-Дону, 2004. – С. 80–82.

[16] Бернштейн, С.А. Основы динамики сооружений / С.А. Бернштейн. – М.; Л.: Госстройиздат, 1938. – 160 с.

[17] Болотин, В.В. Динамическая устойчивость упругих систем / В.В. Болотин. – М.: Гостехиздат, 1956. – 599 с.

[18] Бондарев, Ю.В. Подходы к решению задачи при внезапном удалении элементов из стержневой системы / Ю.В. Бондарев, И.С. Талантов // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 2(43). – С. 48–52.

[19] Бондаренко, В.М. К вопросу о предельных состояниях поврежденных коррозией железобетонных конструкций / В.М. Бондаренко, Б.А. Ягупов // Бетон и железобетон. – 2010. – №3. – С.28–31.

[20] Бондаренко, В.М. К расчёту сооружений, меняющих расчётную схему вследствие коррозионных повреждениях / В.М. Бондаренко, Н.В. Клюева // Известия вузов. Строительство. – 2008. – № 1(589). – С. 4–12.

[21] Босаков, С.В. К нелинейной динамике ферм / С.В. Босаков // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2011. – № 5. – С. 54–57.

[22] Бухтиярова, А.С. Живучесть железобетонных пространственных рамно-стержневых конструкций с выключающимися линейными связями : Дис.

канд. техн. наук : Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения / А.В. Бухтиярова; ГУ-УНПК. – Орёл, 2011. – 146 с.

[23] Васильков, Г.В. Теория адаптивной эволюции механических систем / Г.В. Васильков. – Ростов-на-Дону: Терра-Принт, 2007. – 248 с

[24] Воробьева, Г.А. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. Справочник / Г.А. Воробьева. – М.: Химия, 1976.

[25] Гениев, Г.А. Об оценке динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов / Г.А. Гениев // Бетон и железобетон. – М., 1992. – № 9. – С 25–27.

[26] Горбунов-Посадов, М.И. Расчёт конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.

[27] Гордеев, В.И. Расчёт упругих систем с односторонними связями, как задача квадратичного программирования / В.И. Гордеев, А.В. Перельмутер // Исследования по теории сооружений. –1967. – Вып. 15. – С. 208–212.

[28] Гордон, В.А. Математическое моделирование динамических процессов в стержневых системах при внезапных изменениях их структуры / В.А. Гордон, В.И. Брусова, Э.А. Кравцова, Т.В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 5. – С. 3–8.

[29] Гордон, В.А. Расчёт динамических усилий в конструктивно-нелинейных элементах стержневых пространственных систем при внезапных структурных изменениях / В.А. Гордон, Н.В. Клюева, Т.В. Потураева, А.С. Бухтиярова // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 2008. – № 6. – С. 26–30.

[30] Гребенюк, Г.И. Методика построения дискретного решения для вынужденных колебаний диссипативных систем / Г.И. Гребенюк, В.И. Роев // Известия вузов. Строительство. – 2006. – № 2. – С. 94–100.

[31] Гузеев, Е.А. Расчёт железобетонных конструкций с учётом кинетики коррозии бетона третьего вида / Е.А. Гузеев, Н.В. Савицкий // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. – М.: 1981.

[32] Дегтярёва, Н.В. Временной анализ конструктивно нелинейных моделей надземных газопроводов при ветровом резонансе : Дис. … канд. техн. наук : Специальность 05.23.17 – Строительная механика / Н.В. Дегтярёва; ТГАСУ. – Томск, 2009. – 187 с.

[33] Дегтярёва, Н.В. Построение аэродинамически устойчивой расчётной модели надземного газопровода с односторонней связью / Н.В. Дегтярёва // Вестник ЮУрГУ Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып. 5. – № 22(94). – С. 15–16.

[34] Джинчвелашвили, Г.А. Оценка нелинейной работы зданий и сооружений / Г.А Джинчвелашвили, О.В. Мкртычев // Проблемы безопасность российского общества. – 2012. – № 3. – С. 17–31.

[35] Динамический расчёт зданий и сооружений / М.Ф. Бернштейн, В.А. Ильичёв, Б.Г. Коренев и др.; Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Строийиздат, 1984. – 303 с.

[36] Долганов, А.И. О надёжности ферм в покрытиях зданий и сооружений / А.И. Долганов, Б.С. Расторгуев, Д.И. Калеев // Вестник ВолгГАСУ. – 2013. – № 4(29). – С. 22.

[37] Доронин, С.В. Расчётно-экспериментальный анализ аварийного разрушения пространственной стержневой системы / С.В. Доронин, Ю.Ф. Филиппова, С.В. Баранцев // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 40–43.

[38] Доронин, С.В. Расчёты прочности при восстановлении сценария аварийной ситуации / С.В. Доронин // Безопасность труда в промышленности. – 2006. – № 10. – С. 31–35.

[39] Дукарт, А.В. О переходных процессах свободных колебаний систем с тремя степенями свободы при наличии трения / А.В. Дукарт, В.Н. Фам, Т.Б. Фам // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2012. – V.8, №2. – С. 63–68.

[40] Егоров, В.В. О динамических характеристиках шпренгельных систем / В.В. Егоров, П.Н. Григорьев // Вестник ВолГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 35(54). – С. 52–61.

[41] Еремеев, П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2006. – № 2. – С 65–72.

[42] Ерёмин, К.И. Моделирование развития усталостных повреждений в подкрановo-подстропильных фермах / К.И. Ерёмин, С.Н. Шульга // Вестник МГСУ. – 2014. – № 2. – С. 30–38.

[43] Ерёмин, К.И. Сценарий прогрессирующего обрушения неразрезных подкрановo-подстропильных ферм с накопленными усталостными повреждениями / К.И. Ерёмин, С.Н. Шульга // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 5. – С. 46–49.

[44] Жук, Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов / Н.П. Жук. – М.: Металлургия, 1976.

[45] Завриев, К.С. Динамика сооружений / К.С. Завриев. – М.: Трансжелдориздат, 1946. – 288 с.

[46] Ивашенко, Ю.А. Лавинообразное разрушение конструктивных систем / Ю.А. Ивашенко // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – № 17. – С. 26–27.

[47] Икрамов, Х.Д. Численное решение матричных уравнений. Ортогональные методы. – М.: Наука, 1984. – 192 с.

[48] Икрин, В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: Учебник для вузов по направлению "Строительство" / В.А. Икрин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. – 423 с.

[49] Иноземцев, В.К. Влияние накопления коррозионных повреждений в агрессивной водосодержащей среде на динамическую устойчивость стержня / В.К. Иноземцев - Саратов: Сарат. политехн. ин-т, - 1982.

[50] Каканов, В.В. Влияние дискретных односторонних связей на динамические параметры стержневых систем : Автореф. дис. … канд. техн. Наук : Специальность 05.23.17 – Строительная механика / В.В. Каканов, УПИ. – Екатеринбург, 2006. – 26 с.

[51] Кафи, Т.К. Собственные и вынужденные колебания динамических систем с «линейным гистерезисным демпфированием» (нелинейная теория) / Т.К. Кафи, А Виджаярахаван // Периодических сб. переводов иностранных статей: Механика, № 5, вып. 129. – М.: Мир, 1971. – С. 33–52.

[52] Киселев, В.А. Строительная механика. Специальный курс: Динамика и устойчивость сооружений / В.А. Киселёв. – М.: Стройиздат, 1980. – 616 с.

[53] Клаф, Р. Динамика сооружений / Р. Клаф, Д.Ж. Пензиен. – М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.

[54] Кленников, С.С. Шаговый поиск опорных систем нагруженных односторонних связей методом введения восстанавливающих сил / С.С. Кленников, И.Е. Люминарский, С.Е. Люминарский // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – № 7. – С. 34–40.

[55] Клинов, И.Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы / И.Я. Клинов. – М.: Машиновтроение, 1967.

[56] Клюева, Н.В. К вопросу развития экспериментальных исследований деформирования и разрушения пространственных конструктивных систем при запроектных воздействиях / Н.В. Клюева, О.В. Ажзеуров, К.А. Шувалов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 1(46). – С. 111–116.

[57] Клюева, Н.В. Основы теории живучести железобетонных конструктивных систем при запроектных воздействиях : Дис. … докт. техн. наук : Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения / Н.В. Клюева; МГАКХС. – Москва, 2009. – 457 с.

[58] Колчунов, В.И. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях / В.И. Колчунов, Н.Б. Андросова, Н.В. Клюева, А.С. Бухтиярова. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2014. – 208 с.

[59] Комохов, П.Г. Долговечность бетона и железобетона / П.Г. Комохов, В.И. Латыпов, М.В. Латыпова. – Уфа: Изд. «Белая река», 1998. – 216с.

[60] Коренев, Б.Г. Динамический расчёт сооружений / Б.Г. Коренев, Я.Г. Пановко // В кн.: «Строительная механика в СССР, 1917–1967». – М.: Стройиздат, 1969. – С. 280–328

[61] Корчинский, И.Л. Расчёт строительных конструкций на вибрационную нагрузку / И.Л. Корчинский. – М.: Стройиздат, 1948. – 133 с.

[62] Кренделл, С. Роль демпфирования в теории колебаний / С. Кренделл // Периодических сб. переводов иностранных статей: Механика, № 5, вып. 129. – М.: Мир, 1971. – С. 3–22.

[63] Крылов, А.Н. О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем. Избранные труды / А.Н. Крылов. – Л.: Изд. АН СССР, 1958. – 804 с

[64] Кузнецова, Р.Е. Расчёт тоннельной обделки из крупных блоков, как системы с односторонними связями / Р.Е. Кузнецова // Исследования по строительной механике и расчёту конструкций. – Томск. 1969. – С. 24–33.

[65] Кусаинов, А.А. О моделях пропорционального и неоднородного демпфирования / А.А. Кусаинов // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1987. – № 2. – С. 73–75.

[66] Лурье, А.И. Операционное исчисление и его приложения к задачам механики / А.И. Лурье. – М.; Л.: Гостехиздат, 1951. – 431 с.

[67] Люминарский, И.Е. Расчёт упругих систем с односторонними связями / И.Е Люминарский. – М.: МГИУ, 2006. – 308 с.

[68] Ляхович, Л.С. Алгоритм определения степени неустойчивости геометрически неизменяемых систем с односторонними связями / Л.С. Ляхович // Исследования по строительным конструкциям. – Томск, 1974. – С. 15–22.

[69] Ляхович, Л.С. К расчёту систем с односторонними связями на устойчивость / Л.С. Ляхович // Исследования по строительной механике и расчёту конструкций. – Томск, 1969. – С. 43–51.

[70] Ляхович, Л.С. Метод отделения критических сил и собственных частот упругих систем / Л.С. Ляхович. – Томск: Изд. Томск. ун-та, 1970. – 161 с.

[71] Масленников, А.М. Расчёт конструкций при нестационарных воздействиях / А.М. Масленников. – Л.: Изд. Ленинградского университета, 1991. – 164 с

[72] Масленников, А.М. Энергетический подход к оценке несущей способности конструкций / А.М. Масленников // Вестник Энжэкона. Серия: Технические науки. – 2010. – № 8. – С. 94–97.

[73] Мишустин, И.В. Колебания плоских упругих ферм ортогональной структуры / И.В. Мишустин, Л.С. Рыбаков // Известия Российской Академии Наук. Механика твёрдого тела. – 2003. – № 2. – С. 168–184

[74] Чернов, Ю.Т. О некоторых методах и алгоритмах расчёта систем с выключающимися связями / Ю.Т. Чернов, И.А. Петров // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 2013. – № 2(247). – С 61–66.

[75] Мкртычев, О.В. Надёжность многоэлементных стержневых систем инженерных конструкций : Дисс. … докт. техн. наук : Специальность 05.23.17 – Строительная механика / О.В. Мкртычев; МГСУ. – Москва, 2000. – 324 с.

[76] Мкртычев, О.В. Проблемы расчёта зданий и сооружений на особые воздействия / О.В. Мкртычев // Вестник МГСУ. – 2010. – № 4–5. – С. 238–241.

[77] Мкртычев, О.В. Расчёт большепролетных и высотных сооружений на устойчивость к прогрессирующему разрушению при сейсмических и аварийных воздействиях в нелинейной динамической постановке / О.В. Мкртычев, А.Э. Мкртычев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2009. – № 4. – С. 43–46.

[78] Мухамеджанов, П.Д. Адаптивная сейсмозащита здания с первым каркасным этажом / П.Д. Мухамеджанов, Х.А. Эль-Гохари // Сейсмостойкое строительство. Безопаснсть сооружений. – 2008. – №4. – С. 66–69.

[79] Нгуиен, Т.С. Расчёт стержневых систем с учётом внезапного удаления отдельных элементов : Дисс. … канд. техн. наук : Специальность 05.23.17 – Строительная механика / Т.С. Нгуиен; СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2011. – 115 с.

[80] Неустроев, Э.Я. Колебаний двухмассовой системы, вызванные произвольной нагрузкой / Э.Я. Неустроев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1987. – № 2. – С. 63–65.

[81] Овчинников И.Г. Расчет прямоугольных пластин на упругом основании в условиях воздействия хлоросодержащих сред / И.Г. Овчинников, А.В. Кривцов, А.В. Матора // Научное издание «Известие вузов. Строительство». – 2003 – №8 (536). – С.135–140.

[82] Овчинников, И.Г. Моделирование и прогнозирование коррозионных процессов / И.Г. Овчинников, Х.А. Сабитов. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т. – 1982. – 60с.

[83] Овчинников, И.Г. Об учёте влияния агрессивной среды на характер деформирования материалов / И.Г. Овчинников // Расчёт напряжённо-деформированного состояния пластин и оболочек: кн. – Саратов: изд-во Сарат. ун-та. – 1981. – С.58–60.

[84] Паксютова, Е.В. Применение метода возмущения области интегрирования к расчёту круглой пластинки с учётом симметричного коррозионного износа / Е.В. Паксютова // Работоспособность материалов и элементов конструкций при воздействии агрессивных сред. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т. – 1986. – С.45–46.

[85] Пановко, Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я.Г. Пановко. – М.: Физматгиз, 1960. – 196 с

[86] Перельмутер, А.В. Избранные проблемы надёжности и безопасности строительных конструкций / А.В. Перельмутер. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 256 с.

[87] Перельмутер, А.В. Расчётные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 600 с.

[88] Перельмутер, А.В. Реализация расчёта монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса SCAD Office / А.В. Перельмутер, Э.З. Криксунов, Н.В. Мосина // Инженерно-строительный журнал, 2009. – № 2. – С. 13–18.

[89] Петров В.В. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с окружающей средой / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета. – 1987.

[90] Попов, Н.Н. Динамический расчёт железобетонных конструкций / Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев. – М.: Стройиздат, 1974. – 208 с.

[91] Портаев, Л.П. Методы расчёта систем с дискретными односторонними связями / Л.П. Портаев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1976. – № 6. – С. 41–45.

[92] Потапов, А.Н. Анализ колебаний конструкций с выключающимися связями / А.Н. Потапов // Морские интеллектуальные технологии. – Санкт-Петербург, 2011. – №3 – С.45–48.

[93] Потапов, А.Н. Временной анализ диссипативных систем при внезапном изменении расчётной схемы / А.Н. Потапов, В.Г. Косогоров // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2010. – V.1–2. – С. 179–180.

[94] Потапов, А.Н. Временной анализ модели надземного газопровода с односторонними связями при аэродинамической неустойчивости / А.Н. Потапов, Н.В. Дегтярёва // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2009. – Вып. 8. – № 16(149). – С. 23–28.

[95] Потапов, А.Н. Динамический анализ конструкций с обрушающимися связями / А.Н. Потапов, Е.В. Лемберг // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Доклады 2-й Всероссийской конференции, Новосибирск, НГАСУ (Сибстрин). – 2011. – 313–321 с.

[96] Потапов, А.Н. Динамический анализ конструкций с разрушающимися связями / А.Н. Потапов, В.И. Соломин, А.В. Гербенский, Е.В. Лемберг // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 17(276). – С. 8–12.

[97] Потапов, А.Н. Метод временного анализа реакции дискретных диссипативных систем в задачах строительной механики : Дисс. … докт. техн. наук : Специальность 05.23.17 – Строительная механика / А.Н. Потапов; ТГАСУ. – Томск, 2003. – 261 с.

[98] Проценко, А.М. Теория упруго-идеально-пластических систем / А.М. Проценко. – М.: Наука, 1982. – 287 с.

[99] Путеев, Е.И. Вынужденные колебания систем с односторонними связями / Е.И. Путеев // Исследования по строительным конструкциям. – Томск, 1974. – С. 38–50.

[100] Путеев, Е.И. Колебания балочных систем с односторонними связями: автореферат на соискание степени кандидата технических наук / Е.И. Путеев. – Новосибирск, 1974. – 21 с.

[101] Путеев, Е.И. Колебания систем с односторонними связями / Е.И. Путеев // Исследования по строительной механике и расчёту конструкций. – Томск, 1969. – С. 52–57.

[102] Рабинович, И.М. Энергетические свойства и особенности расчёта статически неопределимых стержневых систем с односторонними лишними связями / И.М. Рабинович // Исследования по теории сооружений. Вып. XVII. – М.: Стройиздат, 1969.

[103] Раизер, В.Д. Теория надёжности сооружений / В.Д. Райзер. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 384 с.

[104] Резников, Л.М. К расчёту систем с односторонними связями / Л.М. Резников // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1977. – № 3. – С. 54–56.

[105] Резников, Л.М. Сравнение некоторых способов учёта частотно-независимого внутреннего трения / Л.М. Резников // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1982. – № 1. – С. 54–59.

[106] Резников, Л.М. Эквивалентная модель многомассовой системы в вязким и частотно-независимым внутренним трением / Л.М. Резников // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1979. – № 4. – С. 44–48.

[107] Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения / Г.И. Шапиро, Ю.А. Эйсман, В.И. Травуш. – М.: Москомархитектура, 2006. – 33 с.

[108] Ройтман, В.М. Нормирование и проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушений: основные подходы / В.М. Роймтан // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 45–51.

[109] Рэлей, Дж. Теория звука / Дж. Рэлей. – М.; Л.: Гостехиздат, Т. 1, 1940. – 500 с.

[110] Санжаровский, Р.С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести / Р.С. Санжаровский. – Ленинград.: Ленинградский университет, 1984. – 216с.

[111] Селяев В.П. Основы теории расчёта композиционных конструкций с учётом действия агрессивных сред. / В.П. Селяев. – М.: Дис. докт.техн.наук. – 1984.

[112] Семишев, Л.Н. Статистический способ исследования динамических систем с односторонними связями / Л.Н. Семишев // Автоматизированное оптимальное проектирование конструкций: сборник научных трудов. – Хабаровск: Хабаровский политехнический институт, 1977. – С. 55–59.

[113] Сеницкий, Ю.Э. Исследование упругого деформирования элементов конструкций при динамических воздействиях методом конечных интегральных преобразований / Ю.Э. Сеницкий. – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1985. – 176 с.

[114] Серпик, И.Н. Методика оценки нагруженности конструкций при запроектных воздействиях с учётом нелинейной работы материалов / И.Н. Серпик, И.В. Мироненко // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 4. – С. 54–60.

[115] Скрябин, П.П. Об одной динамической системе с разрывной характеристикой / П.П. Скрябин // ПММ. – 1968. – Т. 32, вып. 4. – С. 65–70.

[116] Смирнов, А.Ф. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лащеников, Н.Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1984. – 616 с.

[117] Смирнов, А.Ф. Устойчивость и колебания сооружений / А.Ф. Смирнов. – М.: Трансжелдориздат, 1958. – 572 с.

[118] Соломатов, В.И. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П.Селяев. - М.: Стройиздат, 1985.

[119] Соломин, В.И. Метод конечных элементов. Плоские стержневые системы: Учебное пособие / В.И. Соломин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 73 с.

[120] Сорокин, Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем / Е.С. Сорокин. – М.: Госстройиздат, 1960. – 132 с.

[121] Сорокин, Е.С. О погрешностях общеизвестного метода теории колебаний диссипативных систем в применении к неоднородному демпфированию / Е.С. Сорокин // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 1984. – № 2. – С. 29–34.

[122] Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.

[123] Устойчивость и колебания деформируемых систем с односторонними связями / В.А. Баженов, Е.А. Гоцуляк, Г.С. Кондаков, А.И. Оглобля. – Киев: Высшая школа, 1989. – 400 с.

[124] Филиппов, А.П. Колебания деформируемых систем / А.П. Филиппов. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.

[125] Фунайоли, Е. Вынужденные колебания в вязким и кулоновым трением / Е. Фунайоли // Сборники переводов и обзоров иностранной период. литературы: Механика, № 4, вып. 38. – М.: ИЛ, 1956, – С. 145–155.

[126] Халфман, Р.Л. Динамика / Р.Л. Халфман. – М.: Наука, 1972. – 568 с.

[127] Хлупин, А.В. К расчёту систем с односторонними связями на колебания / А.В. Хлупин // Автомобильные дороги и искусственные сооружения в условиях Дальнего Востока и Крайнего Севера: Межвузовский сборник научных трудов. – Хабаровск: Изд-во Хабар. политехн. ин-та, 1978. – С. 8–11.

[128] Хлупин, А.В. Расчёт конструктивно-нелинейных стержневых систем при случайных возмущениях : автореферат на соискание степени кандидата технических наук / А.В. Хлупин. – Ленинград, 1982. – 21 с.

[129] Холодов, А.А. Определение основных характеристик стержневых систем при внезапном изменении условий крепления / А.А. Холодов // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2009. – № 2. – С. 139–146.

[130] Цейтлин, А.И. Метод разложения по формам собственных колебаний в расчётах диссипативных систем / А.И. Цейтлин // Динамика оснований фундаментов и подземных сооружений: Материалы IV Всесоюзной конференции, Кн.1. – Ташкент, 1977. – С. 290–293.

[131] Цейтлин, А.И. Методы учёта внутреннего трения в динамических расчётах конструкций / А.И. Цейтлин, А.А. Кусаинов. – Алма-Ата: Изд. Наука Казахской ССР, 1987. – 240 с.

[132] Цейтлин, А.И. О линейных моделях частотно-независимого трения / А.И. Цейтлин // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. – 1978. – № 3. – С. 52–64.

[133] Цейтлин, А.И. Прикладные методы решения задач строительной механики / А.И. Цейтлин. – М.: Стройиздат, 1984. – 336 с.

[134] Чернов, Ю.Т. Вибрации строительных конструкций. (Аналитические методы расчёта. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям): Научное издание. 2-е изд., испр. и доп. / Ю.Т. Чернов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. – 284 с.

[135] Чернов, Ю.Т. К расчёту систем с выключающимися связями / Ю.Т. Чернов // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 2010. – № 4. – С 53–57.

[136] Чернов, Ю.Т. О некоторых методах и алгоритмах расчёта систем с выключающимися связями / Ю.Т. Чернов, И.А. Петров // Строительная механика и расчёт сооружений. – М., 2013. – № 2(247). – С 61–66.

[137] Щербак, М.П. Моделирование системы абсолютно жёстких тел и односторонних связей на компьютере с параллельной архитектурой : Автореф. дис. … канд. техн. наук : Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / М.П. Щербак; ПГУ. – Петрозаводск, 2006. – 20 с.

[138] Элементарный учебник физики. Том 1: Механика. Теплота. Молекулярная физика. - Москва: Физматлит., 2000. 605 с.

[139] Baeza, L. Dynamics of a truss structure and its moving-oscillator exciter with separation and impact–reattachment / Luis Baeza, Huajiang Ouyang // The Royal Society. – 2008. – Volume 464, issue 2098. – P. 2517–2533.

[140] Caughey, T.K. Classical normal modes in damped linear dynamic systems / T.K. Caughey // ASME. – 1960. – E27, № 2. – P. 296–271.

[141] Caughey, T.K. Classical normal modes in damped linear dynamic systems / T.K. Caughey, M.E.I. O'Kelly // ASME. – 1963. – Vol. 32, № 3. – P. 583–588.

[142] Dadeppo, D.A. Damping in discrete linear elastic systems / D.A. Dadeppo // Engng Mech. Div., ASCE. – 1963. – Vol. 89, № EM2, part 1. – P. 13–18.

[143] Gao, W. A new method for random vibration analysis of stochastic truss structures / Wei Gao, Nong Zhang, Jinchen Ji // Finite Elements in Analysis and Design. – Volume 45, Issue 3. – 2009. – P. 190–199.

[144] Masoero, E. Energy-based study of structures under accidental damage / E Masoero, P. Vallini, A.P. Fantilli, B. Chiaia // Key Engineering Materials. – 2009. – Vols. 417-418. – P. 557-560.

[145] Rijlaarsdam, D.J. Modelling damping in linear dynamic systems. / D.J. Rijlaarsdam. – Eindhoven, 2005. – 50 p.

[146] Seimodaira Saburo-Corros. Eng., 1976, v. 25, n. 10, p. 627-633.

[147] Sorrentino, S. A new analytical technique for vibration analysis of non-proportionally damped beams / S. Sorrentino, S. Marchesiello, B.A.D. Piombo, // Journal of Sound and Vibration. – 265 (2003). – P. 779–792.

[148] Sorrentino, S. Analysis of non-homogeneous Timoshenko beams with generalized damping distributions / S. Sorrentino, A. Fasana, S. Marchesiello // Journal of Sound and Vibration. – 304 (2007). – P. 765–782.

[149] Sun, C.T. Vibration of multi-degree-of-freedom systems with non-proportional viscous damping / C.T. Sun, J.M. Bai // Int. J. Mech. Sci. – 1995. – Vol. 37, No. 4. – P. 441–455.

[150] Zhai, G.J. Frequency Response Analysis of Truss Spar by Considering the Viscous Damping / Gang Jun Zhai, Xiao Jie Song, Wei Diao, Bin Bin Li // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – V. 105–107. – P. 208.

[151] ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент.

[152] ГОСТ 8510-86. Уголки стальные горячекатаные не равнополочные. Сортамент.

[153] ГОСТ Р 54257-2010. Надёжность строительных конструкций и оснований. основные положения и требования.

[154] ФЗ-384. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ОПИСАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКТИВНО НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ ФЕРМЫ ПОКРЫТИЯ, ВЫЗВАННЫХ КОРРОЗИОННЫМ РАСТРЕСКИВАНИЕМ МАТЕРИАЛА

Для проведения временного анализа фермы покрытия в процессе конструктивно нелинейных колебаний, вызванных коррозионным растрескиванием материала фермы под воздействием агрессивной среды, на языке научных и технических вычислений *MATLAB* [9] была составлена специальная компьютерная программа.

В данной программе реализованы следующие основные функции:

- ввод пользовательской информации о параметрах расчёта;
- вычисление параметров собственных колебаний (частоты, коэффициенты демпфирования, формы колебаний);
- проведение по заданным исходным данным временного анализа динамической реакции системы при действии химической коррозии;
- сохранение данных расчёта на диске в файле с расширением *.*mat* для последующего использования;
- получение текстовой (листинги) и статической графической (диаграммы и осциллограммы) информации по данным расчёта;
- построение анимации процесса колебаний конструкции во времени.

Логически каждая программы разделена на смысловые блоки, каждый из которых выполняет определённое функциональное назначение. Ниже перечислены эти блоки:

- блок описания топологии модели и параметров стержней;
- блок описания параметров материала;
- блок формирования внешних и внутренних параметров РДМ конструкции;
- блок задания параметров коррозионного воздействия;

- блок задания параметров временного анализа;
- блок вычисления компонентов узловых перемещений и параметров динамической реакции РДМ конструкции;
- блок анализа текущего состояния стержней конструкции;
- блок выдачи текстовой и графической информации на экран.

Содержание смысловых блоков в программе для проведения упругого конструктивно нелинейного временного анализа представлено в виде интеллект-карты на рис. П.1.

Процедуры-функции, из которых составлены перечисленные выше смысловые блоки программы, записаны в файлах с расширением *.*m*. В одном файле может быть записано от одной до нескольких функций (в этом случае первая функция является основной, остальные – второстепенными). На рисунке П.2 (также в виде интеллект-карты) приведена иерархия этих функций.

Запуск программы на расчёт производится из процедуры *Main*, которая далее вызывает необходимые функции. Центральное место в программе занимает процедура для проведения цикла временного анализа – она реализована в соответствии с блок-схемами, приведёнными во 2-й главе настоящей диссертационной работы.

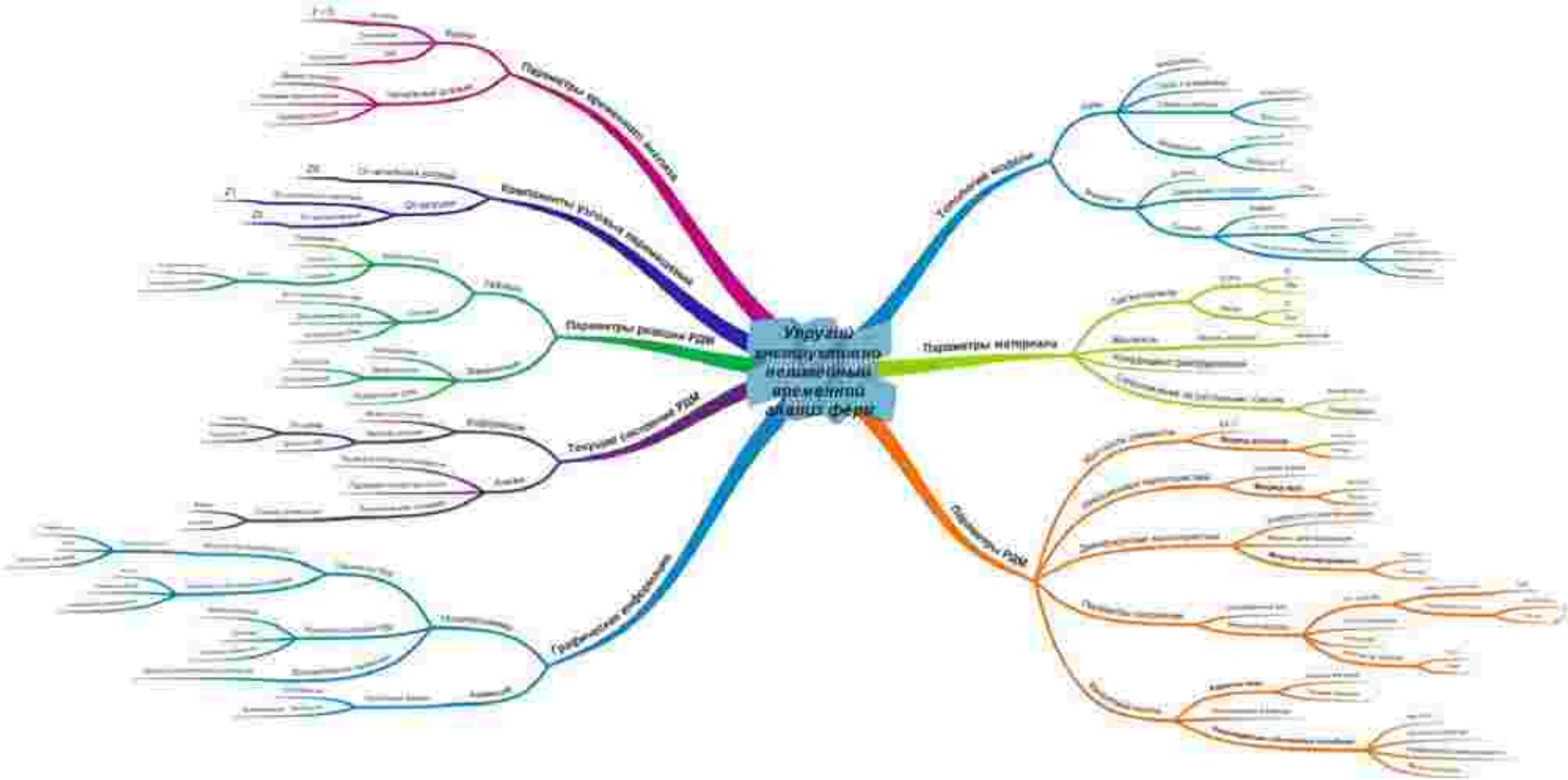


Рис. П.1. **Структурные блоки программы для проведения упругого временного анализа ферм при учёте конструктивной нелинейности**

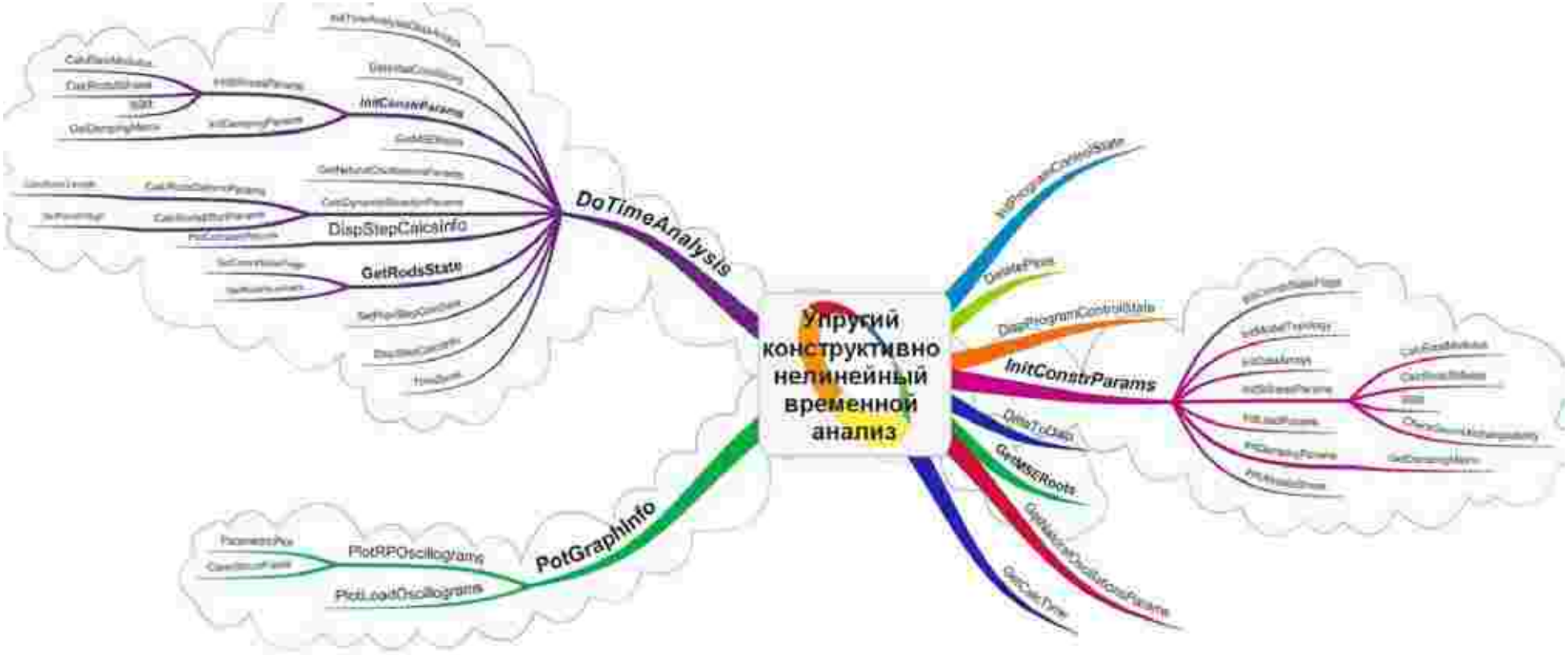


Рис. П.2. **Процедуры-функции, входящие в состав программы для проведения упругого конструктивно нелинейного временного анализа реакции ферм**

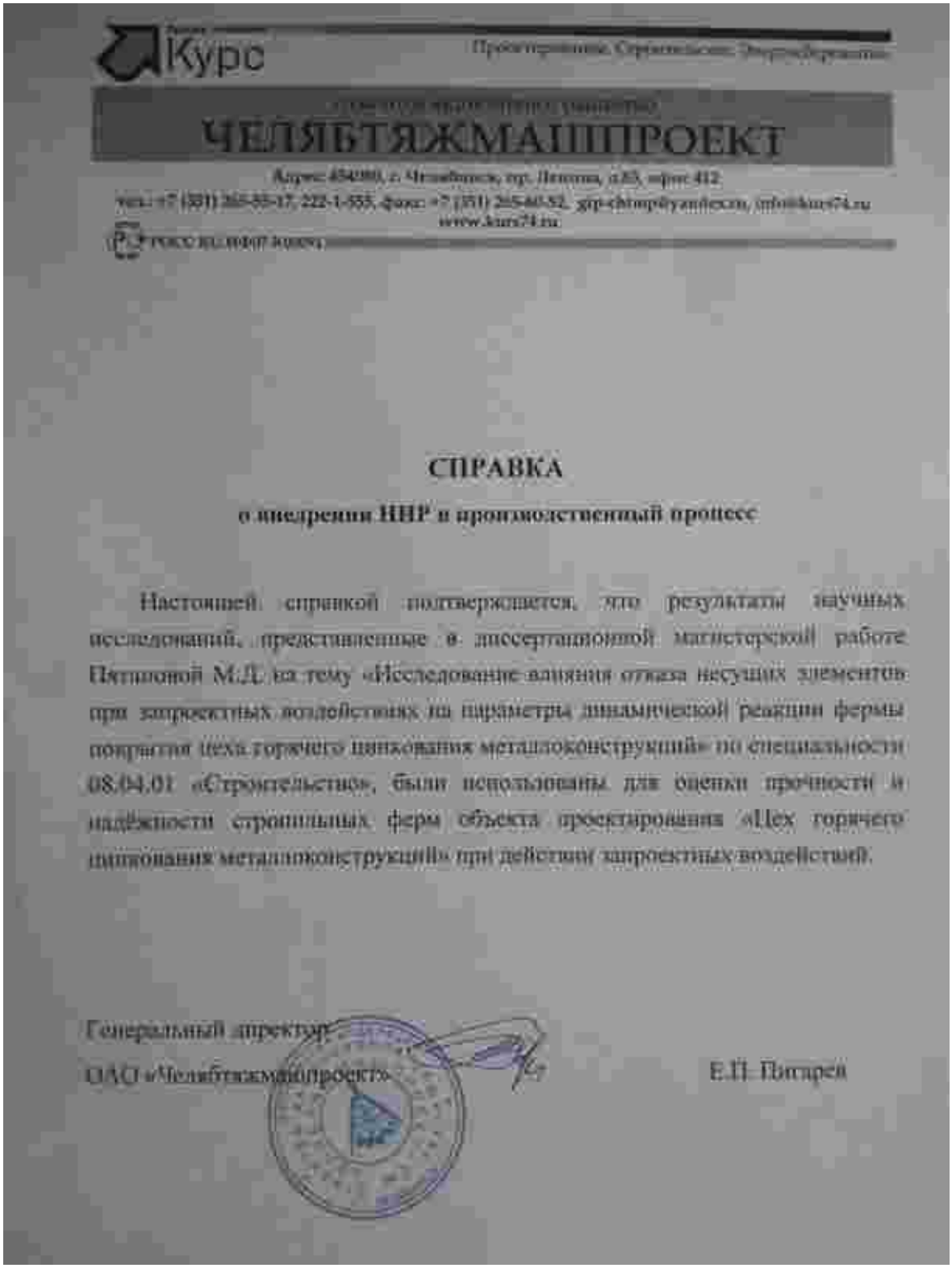
ПРИЛОЖЕНИЕ Б
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

1. *Воронина М.Д.* Исследование влияния на параметры реакции фермы покрытия отказа её несущих элементов при запроектном воздействии / **М.Д. Воронина**, Е.М. Уфимцев // Материалы 3-й научной выставки-конференции научно-технических и творческих работ студентов «Молодой исследователь». – 2016. – Том 1. – С. 81–90.

2. *Ufimtsev E.M.* Research of the Total Mechanical Energy of a Steel Roof Truss during the Process of Structurally Nonlinear Vibrations / E.M. Ufimtsev, **M.D. Voronina** // Procedia Engineering. Materials of International Conference on Industrial Engineering. – 2016. – *Готовится к публикации.*

3. *Уфимцев Е.М.* Динамический расчёт фермы покрытия при свободных конструктивно нелинейных колебаниях / Е.М. Уфимцев, **М.Д. Воронина** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – *Готовится к публикации.*

ПРИЛОЖЕНИЕ В
АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НИР В ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС



Курс

Проектирование. Строительство. Энергосбережение

ЧЕЛЯБТЯЖМАШПРОЕКТ

Адрес: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, д.83, офис 412

тел.: +7 (351) 265-55-17, 222-1-555, факс: +7 (351) 265-60-52, gip-chtmp@yandex.ru, info@kurs74.ru

www.kurs74.ru

РОСС RU.ИФ07.КОЕ04

СПРАВКА

о внедрении НИР в производственный процесс

Настоящей справкой подтверждается, что результаты научных исследований, представленные в диссертационной магистерской работе Пятаповой М.Д. на тему «Исследование влияния отказа несущих элементов при запроектных воздействиях на параметры динамической реакции фермы покрытия цеха горячего цинкования металлоконструкций» по специальности 08.04.01 «Строительство», были использованы для оценки прочности и надёжности стропильных ферм объекта проектирования «Цех горячего цинкования металлоконструкций» при действии запроектных воздействий.

Генеральный директор

ОАО «Челябтяжмашпроект» Е.П. Пигарев