

КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Приборостроение»

А.П. Муслимов, П.И. Пахомов

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ,
МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА
АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА**

УДК 621.:658.562.3/6; 622.67:622.8:621.876

Рецензенты:

акад. НАН КР, докт. техн. наук, проф. *А.В. Фролов*,
докт. техн. наук, проф. *И.В. Бочкарев*

Печатается по решению кафедры «Приборостроение»
и РИСО КРСУ

Муслимов А.П., Пахомов П.И.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ, МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2007. – 127 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Анализ существующих методов контроля.....	7
1.1. Методы приложения сил и угловых поворотов	7
1.2. Классический метод.....	11
1.3. Ультразвуковой метод	14
1.4. Метод моделирования	15
1.5. Интегральный метод контроля РСЦМ изделия.....	16
1.6. Контроль РСЦМ изделия по времени разгона и скорости его вращения на валках.....	16
1.7. Классификация и анализ методов контроля качества изделий.....	17
1.8. Метод определения динамической неуравновешенности изделий типа тел вращения.....	20
2. Разработка методов контроля и их теоретическое обоснование	23
2.1. Теория контроля метода вращения изделия в базирующем приспособлении.....	23
2.2. Теория контроля величины РСЦМ изделия, вращающегося на аэростатических опорах.....	27
2.3. Алгоритмы расчета основных параметров разработанных методов контроля	39
2.4. Определение основных характеристик контрольного устройства	41
3. Разработка устройств контроля, систем съема информации и методика проведения экспериментов.....	45
3.1. Разработка устройств контроля и систем съема информации различными методами	45
3.2. Методика проведения экспериментов	53
4. Экспериментальные исследования разработанных устройств контроля радиального смещения центра масс изделий	64
4.1. Экспериментальное исследование устройства «наклонная плоскость».....	64
4.2. Экспериментальное исследование устройства «вращение изделия в базирующем приспособлении»	68
4.3. Экспериментальное исследование устройства «вращение изделия на аэростатических опорах».....	70

5. Разработка и исследование магнитоанизатропного преобразователя (датчика) усилий (МДУ).....	76
5.1. Математическая модель МДУ	77
5.2. Геометрический расчет параметров	80
5.3. Электромагнитный расчет параметров	81
5.4. Экспериментальное исследование МДУ на образцовой силоизмерительной машине	83
5.5. Разработка универсального электронного блока (ЭБ) МДУ	85
5.6. Аппаратура универсальной системы контроля перегруза, напуска каната, массы груза в клетки.....	95
5.7. Конструктивная проработка и монтаж модуля МДУ на клетки.....	99
Литература	104
Приложения.....	109

ВВЕДЕНИЕ

В условиях рыночной экономики и конкурентной борьбе предъявляются повышенные требования к качеству продукции машин, приборов и другого оборудования, работающих с высокой точностью.

Это особо важно для машиностроительной промышленности, или массовом производстве изделий, где качество изготовления продукции оценивается косвенно на основе выборочного контроля, суть которого состоит в том, что берется определенное количество изделий из потока и по результатам их контроля судят о качестве всей продукции.

Данная система контроля имеет ряд существенных недостатков, главными из которых являются:

- 1) низкая производительность из-за применения ручного труда;
- 2) разрушение части продукции;
- 3) отсутствие обратной связи, не позволяющей оказать оперативное воздействие на технологический процесс с целью повышения качества изделий;
- 4) изготовление большого количества бракованных изделий в связи с запаздыванием информации из отдела технического контроля;
- 5) тяжелые условия труда;
- 6) относительно высокая стоимость процесса контроля.

Анализ массового производства в машиностроении выявил и другие существенные недостатки:

- 1) несоответствие между передовой технологией изготовления изделий на высокопроизводительных автоматических роторных линиях и ручными средствами контроля;
- 2) отсутствие управления качеством изготовления изделий;
- 3) отсутствие теории и методов контроля качества изделий типа тел вращения, имеющих малые массу и габариты.

Поэтому была поставлена задача создания автоматических средств, осуществляющих отбор и сортировку изделий из обычного потока по группам качества.

Четыре главы монографии посвящены решению проблемы автоматического контроля динамических характеристик изделий типа тел вращения с малыми массой и габаритами.

В пятой главе рассмотрены вопросы разработки и создания информационного устройства – магнитоанізотропного преобразователя усилий (МДУ), который является основным элементом, определяющим надежность работы всей системы автоматического контроля работы рудничных подъемных установок.

Представленные в работе материалы по разработке основ теории, методов и устройств контроля качества исполнения технологического процесса будут полезны для научных и инженерно-технических работников, работающих в области автоматизации технологических процессов во всех отраслях промышленности.

1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Известно, что существующие методы контроля радиального смещения центра масс (РСЦМ) дисбаланса [1, 2, 3, 4, 5] традиционно развивались применительно к изделиям значительно большим по размерам и массе, имеющим, как правило, установочные базы, выпускаемые в количестве не более 100 тыс. штук, допускающим нанесение меток для последовательного устранения дисбаланса, требующим и допускающим балансировку.

Важные особенности рассматриваемых изделий: малые габариты и вес, отсутствие базировочной поверхности, недопустимость нанесения меток измерения неуровненности из-за нарушения формы изделия и экономической нецелесообразности в связи с массовостью производства, что существенно затрудняет разработку методов контроля.

В связи с этим, были проанализированы все существующие методы контроля неуровненности изделий с целью их возможной модернизации, для контроля мелких изделий и разработаны новые оригинальные методы, удовлетворяющие требованиям производства.

1.1. Методы приложения сил и угловых поворотов

Если контролируемое изделие установлено в базирующем приспособлении так, что ось вращения его зафиксирована, все существующие методы контроля сводятся к двум большим группам. В первой группе силы прикладываются к массе изделий и регистрируют возникающие угловые повороты (рис. 1.1а). Во второй группе методов изменяют угловое положение изделия и регистрируют возникающие при этом неуровненные инерционные силы (рис. 1.1б).

Рассмотрим более подробно обе группы методов.

В первой группе – силы, которые прикладываются к массе изделия – это либо сила тяжести (постоянная), либо сила инерции (чаще всего изменяющаяся по гармоническому закону). Использование силы тяжести, поворачивающей неуровненную деталь в базирующем приспособлении, является одним из наиболее старых методов определения статической неуровненности, применяемых везде, где не требуется высокая точность. В качестве типичных примеров использования можно привести [1, 2, 3].

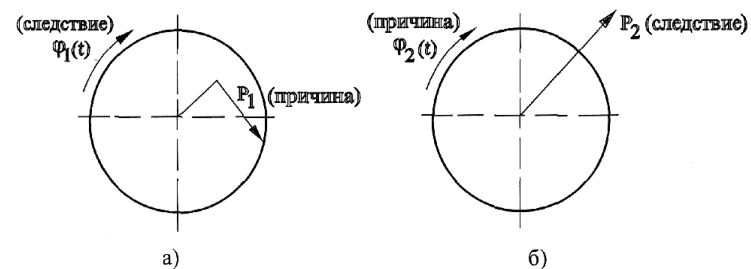


Рис. 1.1. Методы приложения сил и угловых поворотов.

Контролируемое изделие помещают его базирующими поверхностями на горизонтальную или наклонную плиту (или ножи); дисбаланс (не совпадение центра масс с геометрической осью) проявляется в виде крутящего момента, действующего до тех пор, пока изделие не уравновесится и центр масс не займет крайнее нижнее положение на горизонтальной плите. Если скатывать изделие по наклонной плите, крутящий момент от неуровненной силы алгебраически суммируется со скатывающим моментом и тем самым влияет на угловое ускорение изделия. Преимущества метода: отсутствие источников вредных вибраций, простота реализации и возможность автоматизации. Недостаток: невысокая точность горизонтального способа из-за уменьшения крутящего момента по мере занятия изделием крайнего положения.

Более высокую точность и производительность дает метод наложения вместо постоянной силы тяжести переменных сил инерции (метод линейных и угловых колебаний).

Контролируемое изделие закрепляют на опорах и с помощью вибропривода сообщают ему линейные (по координате) или круговые (по двум координатам со сдвигом фаз 90°) колебания в плоскости, перпендикулярной оси изделия. Дисбаланс проявляется в виде угловых колебаний контролируемого изделия в опорах (появляется крутящий момент инерционных сил, изменяющийся по гармоническому закону из-за несовпадения центра масс изделия с его геометрической осью поворота). Угловые колебания измеряются с помощью соответствующих датчиков и преобразуются в электрические сигналы, по амплитуде которых судят о величине дисбаланса. Преимущества метода: высокая производительность, простота привода. Недостатки: затраты времени на смену контролируемых изделий на позиции контроля, требование наличия установочных баз. Наложение круговых колебаний выгоднее наложения линейных, так как при этом исключается возможность возникновения «мертвых зон», маски-

рующих наличие дисбаланса и сокращается время контроля (не нужно его поворачивать относительно направления действия колебаний). Примеры реализации такого метода приведены в литературе [3].

Можно сравнить метод линейных или угловых колебаний с родственным ему методом наложения постоянной силы (силы тяжести) по чувствительности. Равенство ускорения свободного падения с максимальным ускорением изделия достигается тогда, когда:

$$|g| = A_2 \omega_n^2, \quad (1.1)$$

где g – ускорение свободного падения; A_2 и ω_n – соответственно амплитуда и частота колебания.

Задавая значение амплитуды колебаний A_2 , получим график зависимости от амплитуды $\omega_n = f(A)$ (рис. 1.2).

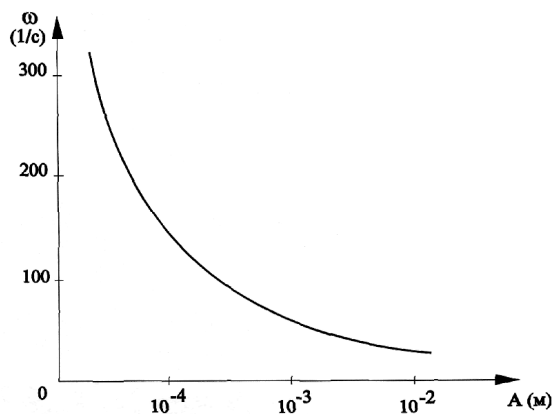


Рис. 1.2. Зависимость $\omega = f(A)$.

Из выражения (1.1) видно, что значение $g=9,81$ м/с² весьма сложно превысить, т.е. чувствительность метода колебаний может быть более высокой, чем метод наложения силы тяжести.

Интересным представляется также сравнение метода угловых колебаний с родственными ему классическими методами по чувствительности. Равенство угловой скорости ω_1 при постоянном вращении с максимальной угловой скоростью и $\omega_2(t)$ углового колебания движения достигается при такой угловой частоте колебаний ω_3 , когда:

$$\omega_1 = \omega_2(t)_{\max} = \left[\frac{d(\varphi_{\max} \sin \omega_3(t))}{dt} \right]_{\max} = [\omega_3 \varphi \cos \omega_3(t)]_{\max} = \omega_3 \varphi_{\max}. \quad (1.2)$$

При рекомендуемых значениях $\varphi_{\max} = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05$ (ряд из графика (рис. 1.3) в зависимости $\omega_3 = f(\omega_1)$) следует, что требуемые значения ω_3 весьма велики, т.е. в 20–100 раз выше угловой частоты постоянного вращения.

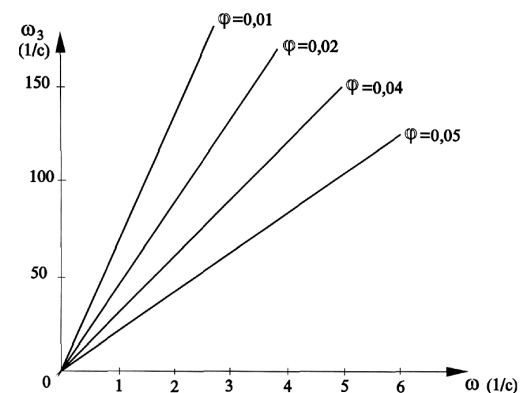


Рис. 1.3. Зависимость $\omega_3 = f(\omega)$.

Недостатком метода является сложность технической реализации контроля динамической неуравновешенности.

С точки зрения высокой производительности перспективным представляется использование временного способа контроля, при котором транспортное движение совмещено с процессом контроля.

Принцип наложения сил тяжести лежит в основе временного способа контроля дисбаланса: изделие скатывают из двух начальных угловых положений, различающихся на 90° и измеряют разницу во времени качения изделия до датчика положения у конечного выключателя.

При рассмотрении схемы действия сил (рис. 1.4.) считаем, что проскальзывание изделия не происходит, так как угол наклона в этом случае мал. Поскольку на коротком участке ската с малым углом наклона изделие не успевает приобрести значительную угловую скорость, можно пренебречь также и неуравновешенной силой.

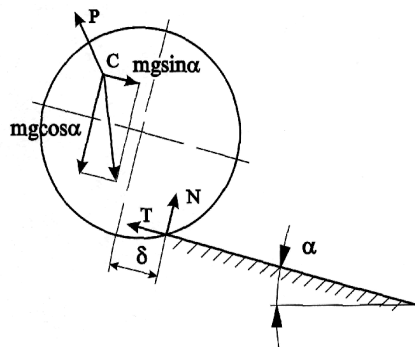


Рис. 1.4. Расчетная схема метода временного способа контроля.

Следует отметить, что разница в 90° между исходными угловыми положениями необходима только для определения фазы дисбаланса. Если это условие снимается, например применительно к нашему изделию, целесообразно процесс контроля приблизить к случайному поиску, задавая примерно $5 \div 8$ исходных положений, так как важно произвести такие ситуации, когда отклонение времени качения будет максимальным.

1.2. Классический метод

Классический метод по своей сущности является моделированием реальных условий эксплуатации контролируемых изделий. Характерной особенностью классического метода является то, что в процессе контроля изделие вращается. Данный метод в свою очередь подразделяется на следующие виды: вращение контролируемого изделия в базирующем приспособлении, ось которого зафиксирована, скатывание изделия с наклонной плоскости и свободное вращение изделия на опорных вращающихся валиках. Рассмотрим эти методы.

1.2.1. Вращение изделия в базирующем приспособлении

Контролируемое изделие (рис. 1.5) устанавливают в базирующем приспособлении 2 и вращают с определенной угловой скоростью. Благодаря смещению центра масс изделия моментная неуравновешенность проявляется в виде совокупности главного вектора и главного момента сил инерции, которая вызывает вынужденные колебания связанные с контролируемой деталью механической системы базирующе-

го приспособления. Роль чувствительного элемента выполняет само базирующее приспособление, по колебаниям которого судят о неуравновешенности контролируемого изделия. Следует отметить, что базирующее приспособление совместно с валом уравновешенно с помощью пружинных подвесов 3 и осуществлена виброизоляция прибора от привода вращения.

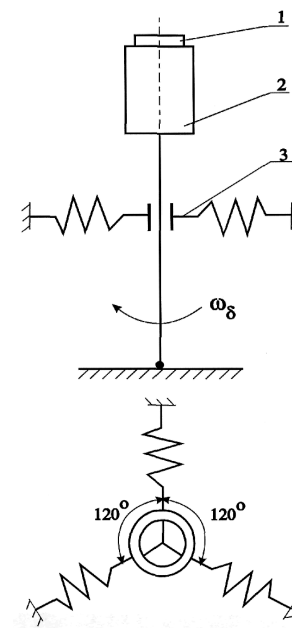


Рис. 1.5. Схема метода вращения изделия в базирующем приспособлении.

1.2.2. Амплитудный метод

Метод основан также на классическом принципе – вращение контролируемого изделия при скате по наклонной плите и снятие сигналов с датчиков. При скатывании изделия по наклонной плоскости дисбаланс проявляется в виде периодического воздействия на опору.

В данном методе необходимо, чтобы наклонная плоскость была настроена в резонанс, т.е. необходимо совпадение частот собственных опор и вынужденных колебаний изделия за счет дисбаланса.

Дополнительная реакция опоры, вызванная неуравновешенной силой, определяется как:

$$\Delta P = P \sin \omega(t) = D\omega^2(t) \sin[\omega(t)t], \quad (1.3)$$

где P – неуравновешенная сила; ω – угловая скорость вращения контролируемого изделия; D – дисбаланс (его физический смысл приводится ниже).

1.2.3. Свободное вращение изделия на вращающихся опорных валиках

В силу таких особенностей рассматриваемых изделий, как малые массы и размеры, отсутствие нормальной базирующей поверхности, предпочтительным методом является метод свободного вращения изделия.

При этом имеется возможность уменьшить вредное влияние вибраций привода на результаты контроля путем отделения датчиков от опор. Другими словами, необходимо использовать датчик, непосредственно регистрирующий колебания детали.

Что касается конструкции опор, более предпочтительно использовать аэростатический принцип, уменьшающий влияние погрешностей формы опорной поверхности изделия, однако, чтобы иметь общее представление о правильности выбранного направления, может быть разработано с использованием более простых в реализации двухвалковых приводных опор. В качестве датчиков колебаний изделия могут быть применены фотоэлектрические датчики. Датчиком также может служить само неуравновешенное изделие, срывающееся с валков при различных углах наклона в зависимости от величины неуравновешенности. Метод предельно прост и защищен авторскими свидетельствами.

Суть метода состоит в том, что контролируемое изделие 1 (рис. 1.6) устанавливается на двух вращающихся опорах 2 (валков), которые установлены на жесткой раме 3 поворота. Электропривод вращает опорные валки. Контролируемые изделия вращаются с еще большей скоростью в связи с тем, что диаметр изделия примерно в два раза меньше диаметра валков.

При вращении изделия появляется неуравновешенная центробежная сила при наличии радиального смещения центра масс (РСЦМ), которая стремится сорвать контролируемую деталь с валков. Глубина посадки изделия выбрана таким образом, чтобы при возможном максимальном значении РСЦМ исключить срыв изделия до поворота рамы.

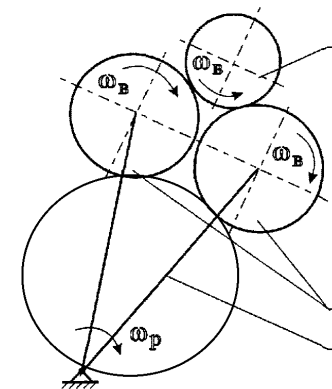


Рис. 1.6. Схема метода свободного вращения изделия на валках.

По мере наклона рамы (возрастание его угла поворота) глубина посадки изделия уменьшается, и оно срывается с валков. Чем больше радиальная неуравновешенность, тем меньше будет угол поворота рамы и наоборот. Возможности данного метода довольно широки: можно контролировать неуравновешенность изделий по углу поворота рамы, по скорости вращения валков и интегральным способом (суть способа будет изложена ниже). В принципе возможна комбинация по двум и даже трем параметрам, однако в этом случае, особенно для последнего, нецелесообразность такого сочетания очевидна из-за усложнения системы контроля.

Эти методы учитывают кроме статической неуравновешенности и моментную неуравновешенность. Само изделие, свободно вращающееся на валках, даже под действием моментной неуравновешенности испытывает соударения с валками. Причем следует заметить, что чувствительность метода к моментной неуравновешенности примерно в три раза выше, чем к чисто статической.

К достоинствам данного метода можно отнести: предельную простоту конструкции – само неуравновешенное изделие как бы является датчиком, простоту автоматизации, он позволяет осуществлять сортировку изделий по группам качества и, что немаловажно, одновременно контролируется качество изделия (отклонения формы, осевое смещение центра масс, несовпадение осей поверхностей и другие отклонения, которые в конечном итоге существенно влияют, как это будет показано ниже, на срыв изделия с опорных валков).

1.3. Ультразвуковой метод

Анализ технологического процесса изготовления, сборки контролируемых изделий, состоящих из двух деталей показал, что неуравновешенность, т.е. смещение центра масс зачастую происходит за счет колебания толщины стенки наружной детали в разных сечениях. Если есть возможность измерения толщины стенки наружной детали в разных сечениях и последующего пересчета, например, с помощью ЭВМ, то можно автоматически контролировать изделие по данному параметру и производить как индивидуальное определение смещения центра масс каждой детали, так и осуществлять сортировку изделий по группам качества по величине РСЦМ [10].

Такой метод был разработан на базе применения ультразвукового измерения толщины стенок наружной детали в связи с тем, что такое измерение возможно в случае, если детали изготовлены из разных материалов [10].

Суть метода в том, что контролируемое изделие одновременно с поступательным движением (при автоматическом контроле) совершает вращательное движение вокруг оси (деталь базируется в специальном приспособлении). Ультразвуковая головка за один оборот детали посылает определенное количество импульсов высокой частоты, задаваемых генератором через определенные промежутки времени – паузы и интервалы, которые проникают через слой жидкости, частично отражаются и проходят через оболочку металла, отражаются от поверхности другой детали и попадают на пьезокерамический элемент излучателя УЗГ (ультразвуковой головки), затем в блок автоматического контроля, где производится преобразование длительности импульса, пропорционального интервалом в $2 \div 10$ кода определения t_{\max} и t_{\min} – максимальные и минимальные значения толщины стенок наружной детали.

Основные преимущества метода:

а) высокая производительность, это связано с малым временем процесса контроля и возможностью его автоматизации;

б) сравнительно высокая точность измерения толщины стенок наружной детали;

в) отсутствие влияния вибрации на процесс контроля.

Основным недостатком метода является необходимость соблюдения ряда условий: материалы деталей должны иметь однородную структуру и одинаковую плотность по всему объему, некруглость внутренней и наружной поверхности должна быть в пределах допуска и отсутствие как внутренних, так и внешних дефектов.

1.4. Метод моделирования

Поскольку трудно определить непосредственно величину радиального смещения центра масс изделий, то ее можно выявить косвенно по величине отклонения траектории движения, моделируя реальные условия эксплуатации и применяя методы математической статистики при обработке результатов.

Для устранения погрешностей при определении неуравновешенности изделия оно предварительно контролируется на точность по форме и геометрическим размерам.

Устройство для моделирования состоит из механического приспособления, имитирующего движения изделия при его эксплуатации, электронной схемы и измерительной машины. Контролируемое изделие устанавливается в стволе механического приспособления, где оно вначале вращается до необходимой скорости вращения, затем специальным устройством ему сообщают поступательное движение. Пролетая определенное расстояние, изделие попадает в измерительную мишень, на которой нанесен слой воска толщиной 10 мм и там оставляет след. По данным мишени определяют отклонения от заданной траектории относительно результатов эталонной детали.

Преимуществом метода является то, что детали испытывают в условиях, близких к реальным, а недостатком – сложность изготовления моделирующих установок и методов проведения испытаний, а также влияние побочных результатов на точность контроля.

Такой метод контроля РСЦМ применим для изделий оборонной промышленности.

1.5. Интегральный метод контроля РСЦМ изделия

Суть метода состоит в том, что изделие с РСЦМ свободно вращается на валках и под воздействием моментной неуравновешенности испытывает соударение с валками [13]. Амплитуды и частоты колебаний при этом зависят от величины РСЦМ, некруглости изделия. Метод основан на измерении величины подпрыгиваний изделия за определенное время, что позволяет косвенно судить о величине его дисбаланса.

Для измерения величины вертикальных перемещений изделия использован фотоэлектрический датчик, оптическая ось которого расположена вдоль оси вращения валков на высоте, соответствующей верхней грани контролируемого изделия.

Основные преимущества метода: сравнительно высокая производительность, простота конструкции, легкость автоматизации и возможность оценки качества изделия в целом.

1.6. Контроль РСЦМ изделия по времени разгона и скорости его вращения на валках

Измерение параметров производится следующим образом [12]. Изделие устанавливают на вращающиеся валки с нулевой начальной скоростью. С этого момента начинается процесс измерения скорости вращения изделия до определенной предельной установившейся скорости вращения. Информация о текущем значении скорости вращения изделия поступает в усилитель, далее в компаратор, где сравнивается с сигналом, соответствующим установленной скорости. По достижении ее изделием генератор секундных импульсов, непрерывно выдающий до этого сигнал в цифровой индикации, фиксирует время разгона изделия до постоянной установленной скорости, и затем отключается. По времени разгона по специально тарировочной характеристике определяют РСЦМ изделия.

Другой способ определения РСЦМ изделия состоит в измерении датчиком скорости значения установившейся скорости изделия, которая, как известно, зависит от его РСЦМ.

1.7. Классификация и анализ методов контроля качества изделий

На основании рассмотрения и анализа существующих и разработанных методов контроля РСЦМ изделий, разработана их классификация по параметру неуравновешенности, определяющей качество изделия.

Все методы контроля неуравновешенности изделия могут быть охарактеризованы и, следовательно, классифицированы по способу воздействия, вызывающим появление неуравновешенности изделия.

На рис. 1.7 приведена классификация методов контроля. Из представленной классификации видно, что контроль РСЦМ изделий можно осуществлять четырьмя методами: приложения сил, угловых колебаний, ультразвуковым и классическим вращением изделия.

Для того чтобы провести сравнительный анализ существующих и разработанных методов применительно к контролю по неуравновешенности, отметим особенности контролируемого изделия и сформулируем основные их требования. Основные особенности изделия: малые массы и габариты; производство – массовое, отсутствие ярко выраженной базирующей поверхности.

Требования, предъявляемые к методам контроля: высокая точность, обеспечение по возможности высокой производительности и автоматизации процесса контроля.

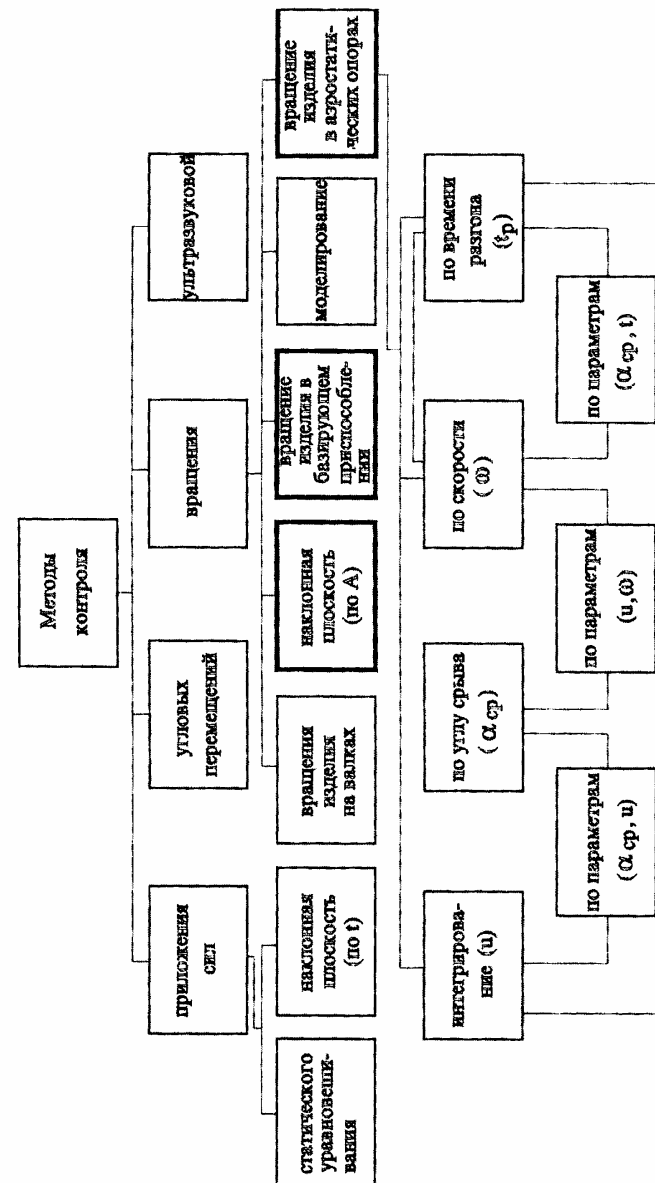


Рис. 1.7. Классификация методов контроля РСЦМ изделий типа тел вращения.

Приведем сравнительный анализ рассмотренных методов с учетом сказанного выше.

Метод угловых колебаний, хотя и дает сравнительно большую точность, чем метод приложения сил, очень сложен для практической реализации, особенно для мелких изделий с малой массой. При этом требуется время на установку и снятие изделия, что существенно снижает производительность труда и требует наличия у деталей базирующей поверхности. В связи с этим, данный метод неприемлем для контроля рассматриваемых изделий.

Метод приложения силы тяжести (временной способ) представляет интерес тем, что он высокопроизводителен благодаря совмещению движения транспортировки с контролем, кроме того, и реализация данного метода проста, поэтому необходимо его теоретическое и экспериментальное исследование.

В методе вращения представляет интерес само вращение контролируемого изделия в базирующем приспособлении. Метод обладает высокой чувствительностью и может быть применен, если процесс контроля выборочный, что имеет место в массовом производстве, а также при наличии базирующей поверхности у изделия. При этом требуется высокая точность изготовления и сборки устройства контроля для получения высокой чувствительности системы измерения.

Метод вращательно-поступательного движения контролируемого изделия («наклонная плоскость») отличающийся по сравнению с другими относительно меньшей точностью, но большей производительностью благодаря совмещению транспортного движения с процессом контроля, может быть применен для контроля изделий, к которым предъявляются не очень высокие требования по точности. Конструктивно метод прост и его реализация не требует особой сложности.

Метод свободного вращения контролируемого изделия на вращающихся опорных валках, разработанный проф., д.т.н. А.П. Муслимовым является перспективным и позволяет учитывать и другие отклонения помимо РСЦМ – погрешности формы, дефекты внутренние и наружные.

Представляет интерес и ультразвуковой метод, но он применим для сборочных деталей, т.е. изделий, состоящих из нескольких деталей, изготовленных из разных материалов.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что для создания систем контроля РСЦМ изделия подлежат разработке следующие методы: приложения сил (временной способ), вращения изделия в базирующем приспособлении, вращательно-поступательного движения изделия по наклонной плоскости и вращения изделия на аэростатических опорах.

1.8. Метод определения динамической неуравновешенности изделий типа тел вращения

При разработке методики были использованы работы [1, 2, 3].

Допустим, что изделие типа тел вращения с распределенной массой при наличии РСЦМ вращается вокруг геометрической оси с угловой скоростью ω и угловым ускорением ε .

Согласно [4] результирующая сила инерции равна:

$$P = m\varepsilon\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}, \quad (1.4)$$

где m – масса изделия; ε – величина РСЦМ.

Условие, при котором изделие будет уравновешено при его вращении вокруг геометрической оси, очевидно будет выполнено, когда силы инерции равны нулю, а это соответствует отсутствию РСЦМ, т.е. при расположении центра масс изделия на оси вращения. Изделие, удовлетворяющее данному условию, является статически уравновешенным, это означает, что его равновесное состояние будет обеспечено при любом угловом положении.

Однако следует отметить, что изделие будет полностью уравновешено (имеется ввиду динамическое уравновешивание), если кроме выше названного условия составляющие вектора момента сил инерции будут равны нулю. Момент инерции M появляется только при неустановившемся движении. Из теоретической механики известно, что центробежные моменты инерции обращаются в нуль тогда, когда оси инерции являются ее главными осями. Отсюда следует, что моменты сил инерции изделия будут равны нулю и они полностью будут уравновешены, если геометрическая ось будет главной осью инерции.

Момент инерции обращается в нуль, если движения нет, поэтому статическими методами обнаружить несовпадение главной оси инерции с осью вращения не представляется возможным.

Численное значение момента инерции [4] равно:

$$M = \sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2} I_z, \quad (1.5)$$

где I_z – момент инерции вокруг оси вращения изделия OZ. Если изделие вращается с постоянной угловой скоростью, то

$$M = \omega^2 I_z. \quad (1.6)$$

Часто на практике удобно рассматривать неуравновешенную силу и момент через дисбаланс D [4], который является мерой неуравновешенности изделия.

Величина его определяется следующим выражением:

$$D = me. \quad (1.7)$$

В соответствии с (1.7) формулы (1.4) и (1.5) принимают вид:

$$P = D\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2},$$

$$M = De\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}.$$

При установившемся процессе, т.е. $\varepsilon = 0$, имеем:

$$P = D\omega^2,$$

$$M = D\omega^2 e. \quad (1.8)$$

Анализ любого изделия типа тел вращения показывает, что значение центробежного момента инерции (1.8) колеблется в связи с несимметричным и распределениями масс относительно геометрической оси вращения, вызванными погрешностями изготовления изделия или его элементов, если оно сборное. Поэтому для оценки состояния динамической неуравновешенности изделия с его массо-геометрической характеристикой целесообразно связать положение главной центральной оси инерции (ГЦОИ) с величиной центробежного момента инерции.

Для определения углового отклонения ГЦОИ можно использовать методику, разработанную в [5]. Суть метода состоит в применении понятия вектора угла, рассмотрении ГЦОИ в соответствующих координатных плоскостях и их связи с массо-геометрическими характеристиками изделия. Такая форма представления неуравновешенности изделия удобна при исследовании процесса контроля. Кроме того, составляющие вектора центробежного момента можно представить как результат пары сил дисбаланса в плоскости, перпендикулярной выше названному вектору.

Разработанная методика определения динамической неуравновешенности изделия позволяет рассчитать неуравновешенную силу и момент в зависимости от массо-геометрических и кинематических характеристик изделия по формуле (1.8), оценить качество изготовления изделия по величине углового отклонения ГЦОИ от геометрической оси вращения, привести к одному равнодействующему при наличии неуравновешенности в нескольких сечениях, что дает возможность приступить к построению метода автоматического контроля РСЦМ.

Таким образом, с помощью этой методики можно определить значения неуравновешенной силы и момента, вызванными наличием

дисбаланса контролируемых изделий, что дает возможность приступить к разработке методов и теории контроля.

Для обнаружения РСЦМ изделия необходимо придать ему вращательное движение. При этом возникают неуравновешенная сила и момент, которые оказывают воздействие на датчик, информирующий об увеличении РСЦМ изделия.

Принцип контроля величины РСЦМ и некруглости δ в виде блок-схемы представлен на рис. 1.8, на основе которой можно разработать ряд методов автоматического контроля РСЦМ: вращения изделия в базирующем приспособлении, «наклонной плоскости» и вращения изделия на аэростатических опорах.

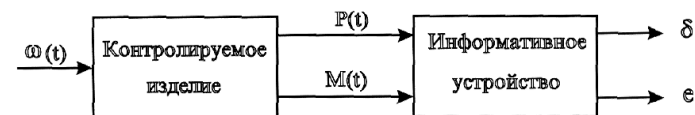


Рис. 1.8. Принципиальная схема контроля.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В данном разделе рассмотрены вопросы разработки методов контроля РСЦМ применительно к изделиям, имеющим малые массы и габариты, дано их теоретическое обоснование.

Основы теории амплитудного и временного методов («наклонная плоскость») кратко рассмотрены в разделе 1 и, по сути дела, являются частными случаями методов вращения и приложения сил, рассмотренных подробно в работе [12].

Теоретические основы контроля динамических характеристик изделия (РСЦМ), представленные в данном разделе, позволяют исследовать процессы, происходящие во время контроля, устанавливать зависимости между характеристиками изделия и параметрами устройства контроля и дают возможность разработать на их основе инженерные методы расчета и проектирования устройств контроля.

2.1. Теория контроля метода вращения изделия в базирующем приспособлении

Необходимость разработки теории контроля применительно к рассматриваемому методу обусловлена отсутствием исследований в данном направлении. Существующая теория балансировочной техники [1,2] применяется для решения задач по уравниванию роторов машин и механизмов, имеющих значительные массы, и совершенно не связана с процессом контроля.

Специфика процесса контроля по данному методу состоит в том, что вращающиеся элементы устройства должны быть полностью сбалансированы, в том числе и базирующее приспособление, последнее должно обладать высокой чувствительностью.

В связи с этим необходимо решить следующие задачи:

- установить функциональную связь между информативным параметром устройства и величиной РСЦМ изделия через массово-геометрические и кинематические параметры системы;
- провести динамические исследования по определению устойчивости процесса контроля при всех возможных значениях РСЦМ в заданном диапазоне режимов работ устройства.

Теоретическое решение данных задач позволит правильно спроектировать устройство, предназначенное для контроля РСЦМ по данному методу.

При определении информативного параметра устройства от величины РСЦМ изделия предполагаем: вращающаяся часть измерительного устройства уравновешена в пружинных подвесках, т.е. её центр масс лежит на оси вращения, величина РСЦМ равна нулю; считаем, что геометрическая ось базирующего приспособления совпадает с осью вращения вала устройства; установленные пружины в качестве подвески имеют линейные характеристики [12].

Установим контролируемое изделие в базирующее приспособление, приведем последнее во вращение вокруг оси OZ.

Расчетная схема показана на рис. 2.1. Считая, что скорость вращения базирующего приспособления в установившемся режиме постоянна, рассмотрим все действующие на систему силы в соответствии с принципом Даламбера.

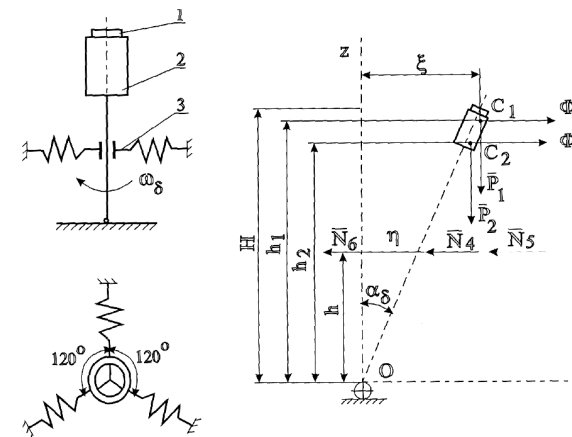


Рис. 2.1. Расчетная схема метода контроля РСЦМ в базирующем приспособлении.

Запишем уравнение моментов действующих сил на базирующее приспособление с изделием относительно точки O в произвольный момент времени.

$$\sum M_0 = \Phi_1 h_1 + \Phi_2 h_2 + P_1 (tg \alpha_\delta + e) + P_2 h_2 tg \alpha_\delta - (N_4 + N_5 + N_6) h = 0, \quad (2.1)$$

где Φ_1 и Φ_2 – соответственно силы инерции контролируемого изделия и базирующего приспособления вокруг оси O ; h_1 и h_2 – ординаты центров масс изделия и приспособления; P_1 и P_2 – соответственно силы тяжести изделия и базирующего приспособления; α_δ – угол наклона системы от оси OZ под действием РСЦМ; N_4, N_5, N_6 – усилия, возникающие на пружинных подвесках.

Полагая, что угловая скорость постоянная, рассмотрим центробежные силы инерции изделия и базирующего приспособления. Главный вектор сил инерции точек вращающегося тела определяется по формуле:

$$\vec{O} = -m \vec{W}_c, \quad (2.2)$$

где \vec{W}_c – ускорение центра масс тела.

Принимая во внимание, что равнодействующая сил инерции точек тела равна их главному вектору, запишем:

$$\begin{cases} \Phi_1 = m\omega^2(h_1 \operatorname{tg} \alpha_\delta + e), \\ \Phi_2 = m_\delta \omega^2 h_2 \operatorname{tg} \alpha_\delta, \end{cases} \quad (2.3)$$

где m – масса базирующего приспособления с учетом приводного вала.

Определим силы упругости пружины в следующих допущениях: в системе возможны три симметричных деформированных состояния; пружины в подвеске идентичны по механическим характеристикам; пружины работают в линейной области (выполняется закон Гука).

$$N_4 = c\eta; N_5 = N_6 = c\eta \cos \beta_\delta,$$

где c – коэффициент жесткости пружины; z/cm – горизонтальное смещение точки закрепления пружины; $\cos \beta_\delta$ – угол между горизонтальной осью и осью деформируемой пружины.

Выразим горизонтальное смещение точки закрепления пружины через смещение центральной точки базирующего приспособления:

$$\eta = h \operatorname{tg} \alpha_\delta,$$

где h – расстояние от точки O до центра пружин.

Тогда

$$N_4 = ch \operatorname{tg} \alpha_\delta. \quad (2.5)$$

Подставляя (2.3), (2.4), (2.5) в уравнение (2.1) и сделав соответствующие преобразования, получим:

$$\operatorname{tg} \alpha_\delta = \frac{e(m\omega_\delta^2 h_1 P_1)}{ch^2(1 + 2\cos \beta_\delta) - (mh_1^2 + m_\delta h_2^2)\omega_\delta^2 - P_1 h_1 - P_2 h_2}. \quad (2.6)$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} \alpha_\delta = \frac{\xi_\delta}{H}$, выражение (2.6) примет вид:

$$\xi_\delta = \frac{eH(m\omega_\delta^2 h_1 + P_1)}{ch^2(1 + 2\cos \beta_\delta) - (mh_1^2 + m_\delta h_2^2)\omega_\delta^2 - P_1 h_1 - P_2 h_2}, \quad (2.7)$$

где ξ_δ – величина смещения системы (информативный параметр устройства); H – расстояние от точки O до точки в базирующем приспособлении, относительно которой ведется измерение.

Анализ формулы (2.7) показывает, что:

а) чем больше величина РСЦМ контролируемого изделия, тем больше значение информативного параметра устройства;

б) увеличение массы изделия приводит к возрастанию значения информативного параметра устройства, поэтому необходимы корректировки в процессе контроля, так как изделия обычно несколько различаются по массе;

в) величина информативного параметра устройства пропорциональна квадрату скорости вращения системы и обратно пропорциональна квадрату высоты закрепления пружинной подвески;

г) с увеличением коэффициента жесткости пружины величина информативного параметра устройства уменьшается.

На основании проведенных исследований представляется возможным произвести расчет и предварительный выбор параметров устройства контроля. Окончательно параметры устройства контроля следует выбрать после проведения динамических исследований.

Дифференциальное уравнение движения системы может быть представлено в виде [17].

$$M_\delta \ddot{\xi}_\delta + v \dot{\xi}_\delta + c \xi_\delta = P_0 \cos \omega_\delta t, \quad (2.8)$$

где M_δ – масса колебательной системы; v – коэффициент вязкого трения; $P_0 = me\omega_\delta^2$ – амплитудное значение возбуждающей силы.

Полное решение уравнения (2.8):

$$\xi_{\delta} = Ae^{-\delta t} \cos(\omega_0 t - \psi) + \frac{P_0}{M_{\delta}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_c^2 - \omega_{\delta}^2)^2 + 4\omega_{\delta}^2 \delta^2}} \cos(\omega_{\delta} t - \alpha_{\phi}), \quad (2.9)$$

где A – амплитуда собственных колебаний; $\delta = \frac{v}{2M_{\delta}}$ коэффициент затухания колебаний; $\omega_0 = \sqrt{\omega_c^2 - \delta^2}$ – частота собственных колебаний;

$\omega_c = \sqrt{\frac{c_{\delta}}{M_{\delta}}}$ – собственное колебание системы при отсутствии затухания;

α_{ϕ} – сдвиг фаз между возбуждающей силой и смещением системы;

$\text{tg } \alpha_{\phi} = \frac{2\delta\omega_{\delta}}{\omega_c^2 - \omega_{\delta}^2}$.

$$\text{tg } \alpha_{\phi} = \frac{2\delta\omega_{\delta}}{\omega_c^2 - \omega_{\delta}^2}.$$

Из (2.9) видно, что собственные колебания быстро затухают при небольшом коэффициенте демпфирования.

В связи с применением датчиков, малочувствительных к низкочастотным колебаниям, значительные амплитуды системы с собственной частотой не вносят существенных погрешностей в измерение РСЦМ контролируемых изделий.

2.2. Теория контроля величины РСЦМ изделия, вращающегося на аэростатических опорах

Пусть контролируемое изделие, вращающееся на аэростатических опорах, вращается вокруг оси Z, тогда за обобщенные координаты примем геометрический центр $O(x, y)$ и угол поворота вокруг оси Z (рис. 2.2).

Пренебрегая вертикальными колебаниями изделия, найдем кинетическую энергию вращающегося изделия:

$$T = \frac{I_c \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{1}{2} m v_c^2, \quad (2.10)$$

где I_c – момент инерции изделия относительно центра масс; m – масса изделия; v_c – скорость движения центра масс.

Координаты центра масс по расчетной схеме (рис. 2.2) определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} x_c = x + e \cos \varphi \\ y_c = y + e \sin \varphi, \end{cases} \quad (2.11)$$

где $e = OC$ – РСЦМ изделия.

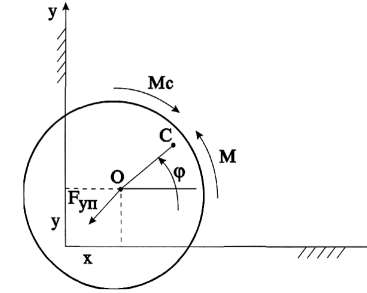


Рис. 2.2. Расчетная схема изделия, вращающегося на аэростатических опорах.

Из (2.11) следует:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = \dot{x} - e \dot{\varphi} \sin \varphi \\ \dot{y}_c = \dot{y} + e \dot{\varphi} \cos \varphi. \end{cases} \quad (2.12)$$

Следовательно, скорость движения центра масс равна:

$$v_c^2 = (\dot{x} - e \dot{\varphi} \sin \varphi)^2 + (\dot{y} + e \dot{\varphi} \cos \varphi)^2. \quad (2.13)$$

Подставляя (2.13) в уравнение (2.10), имеем:

$$\begin{aligned} & \frac{I_c \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m}{2} \left[(\dot{x} - e \dot{\varphi} \sin \varphi)^2 + (\dot{y} + e \dot{\varphi} \cos \varphi)^2 \right] = \\ & = \frac{I_c \dot{\varphi}^2}{2} + \frac{m}{2} (\dot{x}^2 - 2x e \dot{\varphi} \sin \varphi + e^2 \dot{\varphi}^2 \sin^2 \varphi + \dot{y}^2 + 2y e \dot{\varphi} \cos \varphi + e^2 \dot{\varphi}^2 \cos^2 \varphi), \end{aligned}$$

после преобразования получаем:

$$T = \frac{\dot{\varphi}^2}{2} (I_c + m e^2) + \frac{\dot{x}^2}{2} m + \frac{\dot{y}^2}{2} m + m \dot{\varphi} e (y \cos \varphi - x \sin \varphi). \quad (2.14)$$

На основании (2.14) составляем левую часть уравнения Лагранжа [14]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = (I_c + me^2) \ddot{\varphi} + me \cos \varphi (\ddot{y} - \dot{x} \dot{y}) - me \sin \varphi (\dot{x} + \dot{x} \dot{y}) + me \dot{\varphi} y \sin \varphi + me \dot{\varphi} x \cos \varphi.$$

После преобразования получим:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi} = I \ddot{\varphi} + m \cdot e (\ddot{y} \cos \varphi - \dot{x} \sin \varphi), \quad (2.15)$$

где $I = I_c + me^2$.

Аналогично составляются левые части уравнения Лагранжа по координатам \dot{x} и \dot{y} :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = m \ddot{x} - me (\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = m \ddot{y} + me (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi). \end{cases} \quad (2.16)$$

Обобщенные силы для координат x , y , φ будут:

$$\begin{cases} Q_x = -C_{\varphi} x \\ Q_y = -C_{\varphi} y \\ Q_{\varphi} = M - M_c, \end{cases} \quad (2.17)$$

где C_{φ} – коэффициент жесткости воздушной среды в аэростатических опорах; M – вращающий момент (полагаем, что $M = \text{const}$); $M_c = \beta \dot{\varphi}$ – момент сопротивления, пропорциональный угловой скорости вращения контролируемого изделия; β – коэффициент сопротивления.

Таким образом, динамические уравнения изделия на этапе разгона запишутся в виде:

$$\begin{cases} I \ddot{\varphi} + me (\ddot{y} \cos \varphi - \dot{x} \sin \varphi) = M - \beta \dot{\varphi} \\ m \ddot{x} - me (\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) = -C_{\varphi} x \\ m \ddot{y} + me (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) = -C_{\varphi} y. \end{cases} \quad (2.18)$$

Начальные условия движения контролируемого изделия имеют вид:

$$t = 0; x = 0; y = 0; \dot{x} = 0; \dot{y} = 0; \dot{\varphi} = 0. \quad (2.19)$$

При отсутствии РСЦМ изделия ($e=0$) и при нулевых начальных условиях (1.19) уравнение (2.18) имеет следующие решения:

$$\begin{cases} \omega = \frac{M}{\beta} \left(1 - e^{-\frac{\beta t}{I}} \right) \\ x = 0; y = 0 \end{cases}. \quad (2.20)$$

При $t \rightarrow \infty$; $\omega = \omega_{\max} = \frac{M}{\beta}$.

Графически решение уравнения (2.20) представлено на рис. 2.3. При наличии у контролируемого изделия РСЦМ ($e \neq 0$) решение системы уравнения (2.18) в замкнутом виде получить нельзя в силу ее нелинейности. Для отыскания приближенного решения преобразуем уравнение (2.18):

$$\ddot{x} + k^2 x = e (\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) = -e \frac{d^2}{dt^2} (\cos \varphi), \quad (2.21)$$

$$\ddot{y} + k^2 y = -e (\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) = -e \frac{d^2}{dt^2} (\sin \varphi), \quad (2.22)$$

где $k^2 = \frac{C_{\varphi}}{m}$.

Решение уравнений (2.21) и (2.22) будем искать в виде:

$$x = \frac{d^2}{dt^2} (A \cos \varphi), \quad y = \frac{d^2}{dt^2} (B \sin \varphi), \quad (2.23)$$

где $A=A(t)$, $B=B(t)$.

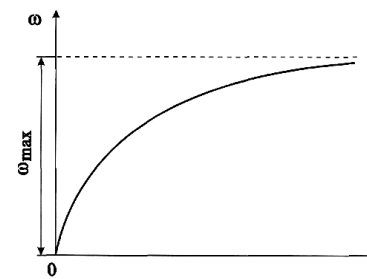


Рис. 2.3. График разгона изделия при $e = 0$.

Полагаем, что приращение функций A и B во время одного оборота τ мало по сравнению с их величинами, т.е.

$$\Delta A \ll A, \Delta B \ll B. \quad (2.24)$$

Раскладывая ΔA и ΔB в ряд, имеем:

$$\begin{cases} \Delta A = \dot{A}\tau + \frac{1}{2}\ddot{A}\tau^2 + \dots \\ \Delta B = \dot{B}\tau + \frac{1}{2}\ddot{B}\tau^2 + \dots \end{cases} \quad (2.25)$$

С учетом (2.24) получим:

$$\begin{cases} \dot{A} \ll \frac{A}{\tau} = A\omega, \ddot{A} \ll \frac{A}{\tau^2} = A\omega^2 \\ \dot{B} \ll \frac{B}{\tau} = B\omega, \ddot{B} \ll \frac{B}{\tau^2} = B\omega^2. \end{cases} \quad (2.26)$$

Примем также, что приращение угловой скорости за один оборот изделия I мало по сравнению с ω :

$$\Delta \dot{\varphi} = \ddot{\varphi}\tau + \frac{1}{2}\dddot{\varphi}\tau^2 + \dots \ll \omega.$$

Откуда имеем:

$$\ddot{\varphi} \ll \omega^2, \dddot{\varphi} \ll \omega^3, \quad (2.27)$$

Из (2.23) следует:

$$\ddot{x} = \frac{d^4}{dt^4}(A \cos \varphi); \ddot{y} = \frac{d^4}{dt^4}(B \sin \varphi).$$

Откуда после дифференцирования и исключения слагаемых, имеющих порядок малости выше первого, получим:

$$\ddot{x} = A \dot{\varphi}^4 \cos \varphi + (4 \dot{A} \dot{\varphi}^3 + 6 A \ddot{\varphi} \dot{\varphi}^2) \sin \varphi, \quad (2.28)$$

$$\ddot{y} = B \dot{\varphi}^4 \sin \varphi - (4 \dot{B} \dot{\varphi}^3 + 6 B \ddot{\varphi} \dot{\varphi}^2) \cos \varphi. \quad (2.29)$$

Выразим величины A, \dot{A}, B, \dot{B} , входящие в (2.28) и (2.29), через φ . Для этого подставим (2.23) в (2.21) и (2.22):

$$\begin{cases} \frac{d^2}{dt^2} \left((\ddot{A} - A \dot{\varphi}^2 + k^2 A + e) \cos \varphi - (2 \dot{A} \dot{\varphi} + A \ddot{\varphi}) \sin \varphi \right) = 0 \\ \frac{d^2}{dt^2} \left((\ddot{B} - B \dot{\varphi}^2 + k^2 B + e) \sin \varphi + (2 \dot{B} \dot{\varphi} + B \ddot{\varphi}) \cos \varphi \right) = 0. \end{cases} \quad (2.30)$$

Для тождественного выполнения равенств (2.30) можно полагать, что:

$$\begin{cases} \ddot{A} - A \dot{\varphi}^2 + k^2 A + e = 0 \\ 2 \dot{A} \dot{\varphi} + A \ddot{\varphi} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \ddot{B} - B \dot{\varphi}^2 + k^2 B + e = 0 \\ 2 \dot{B} \dot{\varphi} + B \ddot{\varphi} = 0 \end{cases}$$

Пренебрегая \ddot{A} и \ddot{B} , получим:

$$\begin{cases} A = \frac{e}{\dot{\varphi}^2 - k^2} = \frac{e}{\omega^2 - k^2}; B = A \\ \dot{A} = -A \frac{\ddot{\varphi}}{2\dot{\varphi}} = -\frac{e}{2(\omega^2 - k^2)} \cdot \frac{\ddot{\varphi}}{\dot{\varphi}}; \dot{B} = \dot{A}. \end{cases} \quad (2.31)$$

Подставив (2.31) в (2.28) и (2.29), получим:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{e}{\omega^2 - k^2} (\dot{\varphi}^4 \cos \varphi + 4 \ddot{\varphi} \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) \\ \ddot{y} = \frac{e}{\omega^2 - k^2} (\dot{\varphi}^4 \sin \varphi + 4 \ddot{\varphi} \dot{\varphi}^2 \cos \varphi). \end{cases} \quad (2.32)$$

Подставив выражение (2.31) в первое уравнение системы (2.18), получим:

$$\begin{aligned} I \ddot{\varphi} + \frac{me^2}{\omega^2 - k^2} (\dot{\varphi}^4 \sin \varphi \cos \varphi - 4 \ddot{\varphi} \dot{\varphi}^2 \cos^2 \varphi - \\ - \dot{\varphi}^4 \cos \varphi \sin \varphi - 4 \ddot{\varphi} \dot{\varphi} \sin^2 \varphi) = M - \beta \dot{\varphi}. \end{aligned}$$

После преобразований имеем:

$$I \ddot{\varphi} - \frac{4me^2}{\omega^2 - k^2} \dot{\varphi}^2 \ddot{\varphi} = M - \beta \dot{\varphi}. \quad (2.33)$$

Полагая здесь, что $\dot{\varphi}^2 = \omega^2$, получим:

$$\left(I + \frac{4me^2 \omega^2}{k^2 - \omega^2} \right) \ddot{\varphi} + \beta \dot{\varphi} = M. \quad (2.34)$$

Общее решение уравнения (2.34) состоит из частного:

$$\varphi = \frac{M}{\beta} t, \quad (2.35)$$

которое описывает равномерное (установившееся) вращение изделия и решение однородного дифференциального уравнения:

$$\varphi = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}, \quad (2.36)$$

где

$$\lambda_1 = 0; \lambda_2 = -\frac{\beta}{I + \frac{4me^2 \omega^2}{k^2 - \omega^2}}. \quad (2.37)$$

Выражения (2.37) являются корнями характеристического уравнения, составленного на основании (2.34), т.е.:

$$\left(I + \frac{4me^2 \omega^2}{k^2 - \omega^2} \right) \lambda^2 + \beta \lambda = 0.$$

Возможная неустойчивость вращения изделия определяется знаком знаменателя в выражении (2.37).

При $\left(I + \frac{4me^2 \omega^2}{k^2 - \omega^2} \right) < 0$ имеем $\lambda_2 > 0$, вращение изделия монотонно уходит от стационарного режима.

Таким образом, движение изделия устойчиво, если ω удовлетворяет следующему неравенству:

$$k > \omega > \frac{k}{\sqrt{1 - \frac{4me^2}{I}}}. \quad (2.38)$$

Амплитудно-частотная характеристика системы представлена на рис. 2.4, где выделены устойчивые, неустойчивые и резонансные зоны.

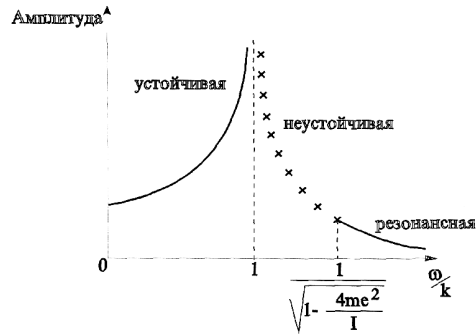


Рис. 2.4. Амплитудно-частотная характеристика системы.

Таким образом, уравнение угловой скорости движения изделия представляется в виде:

$$\dot{\varphi} = \frac{M}{\beta} (1 - e^{\lambda_2 t}) = \frac{M}{\beta} \left[1 - \exp \left(-\frac{\beta t}{I + \frac{4me^2 \omega^2}{k^2 - \omega^2}} \right) \right]. \quad (2.39)$$

График изменения угловой скорости изделия на этапе разгона представлен на рис. 2.5.

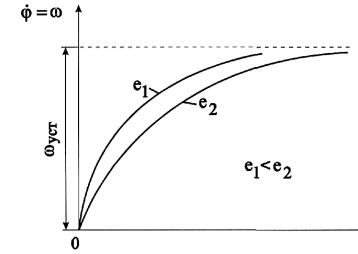


Рис. 2.5. Влияние РСЦМ изделия на график разгона.

При установившемся режиме из (2.18) следует:

$$\begin{cases} M = \beta \dot{\varphi} \\ me \dot{\varphi}^2 \cos \varphi = C_{эТМ} x \\ me \dot{\varphi}^2 \sin \varphi = C_{эТМ} y \end{cases} \quad (2.40)$$

Расчетная схема представлена на рис. 2.6, где $OC = e$;

$$OO_1 = \rho = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Пусть $\dot{\varphi} = \omega$, тогда из (2.40) имеем:

$$\rho = \frac{me \omega^2}{C_{эф}}, \quad (2.41)$$

где ρ – смещение оси вращения.

Если фиксировать максимально допустимое смещение оси, то зависимость ω_{max} от величины РСЦМ – e определяется выражением:

$$\omega_{уст} = \omega_{max} = \sqrt{\frac{\rho C_{эф}}{me}}. \quad (2.42)$$

2.2.1. Стационарное движение оси вращающегося контролируемого изделия и его устойчивость

Полагаем, что вращающееся контролируемое изделие движется плоскопараллельно, а собственное вращение вокруг оси O осуществляется с постоянной угловой скоростью ω вращающийся момент уравновешивается моментом сопротивления среды, реакция опоры приводится к равнодействующей и описывается линейной зависимостью $F_{yn}=c\rho$, где c – коэффициент жесткости упругой среды; ρ – расстояние от начала координат до центра вращения изделия. Выдерживаются условия:

$$F_{yn}(0)=0, \frac{dF_{yn}}{d\rho} > 0 \text{ при } \rho > 0.$$

Расчетная схема стационарного движения вращающегося изделия показана на рис. 2.6.

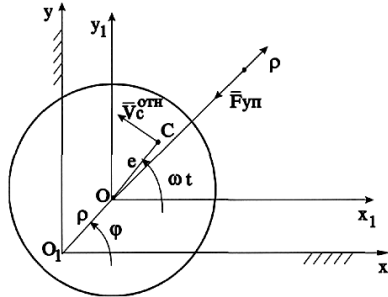


Рис. 2.6. Расчетная схема для определения величины смещения оси вращения.

Положение оси вращающегося контролируемого изделия определяется координатами ρ, φ .

С осью собственного вращения свяжем подвижную систему координат Ox_1Y_1 , перемещающуюся поступательно относительно неподвижной системы координат – O_1XY .

Тогда проекции скорости оси контролируемого изделия и относительной скорости центра масс на полярные оси координат (ρ, φ) определяются выражениями:

$$\begin{cases} v_\rho = \dot{\rho} & v_{cp}^{omu} = -\omega e \sin(\omega t - \varphi) \\ v_\varphi = \rho \dot{\varphi} & v_{cp}^{omu} = \omega e \cos(\omega t - \varphi). \end{cases} \quad (2.43)$$

Кинетическая энергия изделия находится из выражения:

$$T = \frac{1}{2} m v_0^2 + m \vec{v}_0 \vec{v}_c^{omu} + T_c^{omu}, \quad (2.44)$$

где $T_0^{omu} = \frac{I_0 \omega^2}{2}$ – кинетическая энергия изделия относительно поступательно движущихся осей Ox_1Y_1 ;

$$\vec{v}_0 \vec{v}_c^{omu} = -\omega e \dot{\rho} \sin(\omega t - \varphi) + \omega e \rho \dot{\varphi} \cos(\omega t - \varphi).$$

Таким образом,

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2) + m \omega e (\rho \dot{\varphi} \cos(\omega t - \varphi) - \dot{\rho} \sin(\omega t - \varphi)) + \frac{I_0 \omega^2}{2}. \quad (2.45)$$

Предположим, что сила сопротивления пропорциональна скорости оси O , т.е.

$$\vec{F}_c = -\mu m \vec{v}_0,$$

где μ – коэффициент пропорциональности, постоянная величина. Тогда, составляя уравнения Лагранжа, получим:

$$\frac{\partial T}{\partial \rho} = m \omega e \dot{\varphi} \cos(\omega t - \varphi) + m \rho \dot{\varphi}^2,$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\rho}} \right) = m \ddot{\rho} - m \omega e (\omega - \dot{\varphi}) \cos(\omega t - \varphi),$$

$$Q_\rho = -c\rho - \mu m \dot{\rho},$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = m \omega e \rho \dot{\varphi} \sin(\omega t - \varphi) + m \omega e \dot{\rho} \cos(\omega t - \varphi),$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = 2m\rho \dot{\rho} \dot{\varphi} + m\rho^2 \ddot{\varphi} + m \omega e \dot{\rho} \cos(\omega t - \varphi) - m \omega e \rho (\omega - \dot{\varphi}) \sin(\omega t - \varphi),$$

$$Q_\varphi = -\mu m \rho^2 \dot{\rho}.$$

Следовательно, дифференциальные уравнения движения оси изделия примут вид:

$$\begin{cases} \ddot{\rho} - \rho \dot{\varphi}^2 - \omega^2 e \cos(\omega t - \varphi) = -\frac{c}{m} \rho - \mu \dot{\rho} \\ \rho \ddot{\varphi} + 2 \dot{\rho} \dot{\varphi} - \omega^2 e \sin(\omega t - \varphi) = -\mu \rho \dot{\varphi}. \end{cases} \quad (2.46)$$

В режиме установившегося движения $\dot{\varphi} = \omega = const$, $\rho = const$, $\psi = \omega t - \varphi = const$, которые удовлетворяют равенствам:

$$\begin{cases} r\omega^2 + r\omega^2 \cos \psi = \frac{c}{m} r \\ \omega^2 e \sin \psi = \omega \mu r, \end{cases} \quad (2.47)$$

где $r = \rho$ и ψ определяются как функции ω .

При отсутствии сил сопротивления ($\mu = 0$) из второго равенства (2.47) следует, что $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = \pi$, тогда $\omega^2 = \frac{k^2 r}{r \pm e}$, «+» при $\psi_1 = 0$ и «-»

при $\psi_2 = \pi$.

График амплитудно-частотной характеристики представлен на рис. 2.7. При $\mu \neq 0$ графики (амплитудно-частотные характеристики) располагаются внутри линий ψ_1 ψ_2

При $\mu \neq 0$ из (2.47) имеем:

$$r^2 \left((k^2 - \omega^2)^2 + \mu^2 \omega^2 \right) = \omega^4 e^2. \quad (2.48)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\mu \omega}{k^2 - \omega^2}. \quad (2.49)$$

$$\omega^2 = \frac{k^2 r}{r + e \cos \psi}. \quad (2.50)$$

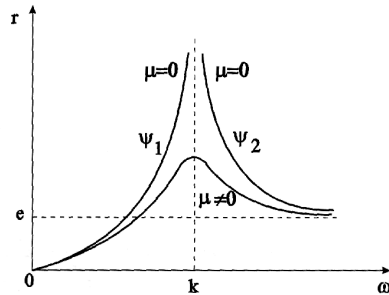


Рис. 2.7. Амплитудно-частотная характеристика.

Из (2.48), (2.49), (2.50) следует, что при $\omega \rightarrow \infty$ со происходит самоцентрирование вращающегося изделия ($\psi \rightarrow \pi$, $r \rightarrow e$).

Из (2.48) находим:

$$r = \frac{e \omega^2}{r + e \cos \psi}. \quad (2.51)$$

Из (2.51) при $\frac{dr}{d\omega} = 0$ находится ω :

$$\omega = \frac{2k^2}{2k^2 - \mu^2}. \quad (2.52)$$

Формула (2.52) определяет угловую скорость движения изделия, которая соответствует максимальному значению радиуса (2.51) смещения оси собственного вращения изделия

$$r_{\max} = \frac{2k^2 e}{\mu \sqrt{4k^2 - \mu^2}}. \quad (2.53)$$

Для исследования устойчивости вращения изделия полагаем:

$$\rho = r + \delta, \varphi = \omega t - \psi + \varepsilon, \quad (2.54)$$

где δ , ε – малые возмущения.

Подставив (2.54) в (2.46), получим:

$$\begin{cases} \delta'' - (r + \delta)(\omega + \varepsilon)^2 - \omega^2 e \cos(\psi - \varepsilon) = -k^2(r + \delta) - \mu \dot{\delta} \\ (r + \delta) \varepsilon'' + 2\delta \dot{\varepsilon}(\omega + \varepsilon) - \omega^2 e \sin(\psi - \varepsilon) = -\mu(r + \delta)(\omega + \varepsilon). \end{cases}$$

Раскладывая в ряд $\cos(\psi - \varepsilon)$, $\sin(\psi - \varepsilon)$ и ограничиваясь слагаемым первого порядка, получим:

$$\begin{cases} \sin(\psi - \varepsilon) = \sin \psi \cos \varepsilon - \sin \varepsilon \cos \psi \cong 1 \cdot \sin \psi - \varepsilon \cos \psi \\ \cos(\psi - \varepsilon) = \cos \psi \sin \varepsilon + \sin \psi \cos \varepsilon \cong 1 \cdot \cos \psi + \varepsilon \sin \psi. \end{cases} \quad (2.56)$$

Собирая члены первого порядка малости в левой части уравнений, с учетом (2.47) и (2.56) выражения (2.55) запишутся в виде:

$$\begin{cases} \delta'' + \mu \dot{\delta} + (k^2 - \omega^2) \delta - 2r\omega \varepsilon - \mu \omega \delta = r \dot{\varepsilon}^2 + 2\omega \delta \dot{\varepsilon} + \delta \dot{\varepsilon} = D \\ r \varepsilon'' + \mu r \dot{\varepsilon} + r(k^2 - \omega^2) \varepsilon + 2\omega \delta + \mu \omega \delta = -\delta \dot{\varepsilon} - 2\delta \dot{\varepsilon} - \mu \delta \dot{\varepsilon} = E. \end{cases} \quad (2.57)$$

Здесь D и E величины второго порядка малости.

Характеристическое уравнение для (правой части) однородной системы дифференциальных уравнений (2.57) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \lambda^2 + \mu\lambda + (k^2 - \omega^2) & -2r\omega\lambda - \mu\omega r \\ 2\omega\lambda + \mu\omega & r\lambda^2 + \mu r\lambda + r(k^2 - \omega^2) \end{vmatrix} = 0. \quad (2.58)$$

Раскладывая определитель (2.58) и группируя все члены по степеням λ , получим:

$$a_0\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 = 0. \quad (2.59)$$

$$\begin{cases} a_0 = 1 \\ a_1 = 2\mu \\ a_2 = 2\omega^2 + 2k^2 + \mu \\ a_3 = 2\mu(\omega^2 + k^2) \\ a_4 = (k^2 - \omega^2)^2 + \mu^2\omega^2 \end{cases} \quad (2.60)$$

Для устойчивости движения изделия необходимо выполнение следующих условий (критерий Гурвица):

$$\begin{cases} a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0 \\ \Delta = a_1a_2a_3 - a_0a_3^2 - a_1^2a_4 > 0. \end{cases} \quad (2.61)$$

Как видно из (2.60), положительность коэффициентов a_i выполняется для любых значений ω .

Значение $\Delta > 0$ также выполняется для любых значений ω , действительно, используя (2.60), получим:

$$\Delta = 4\mu^2k^2(4\omega^2 + \mu^2) > 0. \quad (2.62)$$

2.3. Алгоритмы расчета основных параметров разработанных методов контроля

2.3.1. Метод вращения изделия в базирующем приспособлении

Связь между величинами смещения системы (информативный параметр устройства) и РСЦМ определяется выражением:

$$\xi_\delta = \frac{eH(m\omega_\delta^2 h_1 + P_1)}{ch^2(1 + 2\cos\beta_\delta) - (mh_1^2 + m_\delta h_2^2)\omega_\delta^2 - P_1 h_1 - P_2 h_2}, \quad (2.63)$$

где кроме ξ остальные параметры являются известными и они конструктивно задаются.

Частота вращения базирующего приспособления определяется решением уравнений динамики

$$\xi_\delta = Ae^{-\nu t} \cos(\omega_0 - \psi) + \frac{P_0}{M_\delta} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega_c^2 - \omega_\delta^2)^2 + 4\omega_\delta^2 \delta^2}} \cos(\omega_\delta - \alpha_{mm}), \quad (2.64)$$

так, чтобы собственные колебания быстро затухали при небольшом коэффициенте демпфирования $\delta = \frac{\nu}{2\mu_\delta}$.

2.3.2. Алгоритм расчета метода вращения изделия на аэростатических опорах

Динамика движения на этапе разгона изделия, имеющего РСЦМ, определяется решением системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} I \ddot{\varphi} + me(y \cos \varphi - x \sin \varphi) = M - \beta \dot{\varphi} \\ m x - me(\ddot{\varphi} \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cos \varphi) = -C_{\gamma TM} x \\ m y + me(\ddot{\varphi} \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \sin \varphi) = -C_{\gamma TM} y. \end{cases} \quad (2.65)$$

Путем линеаризации данной системы дифференциальных уравнений, как было сделано выше, получаем следующее лениаризованное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\left(I + \frac{4me^2\omega^2}{k^2 - \omega^2} \right) \ddot{\varphi} + \beta \dot{\varphi} = M. \quad (2.66)$$

Условия устойчивости вращения изделия, по которому следует выбрать угловую скорость вращения контролируемого изделия, имеет вид:

$$k > \omega > \frac{k}{\sqrt{1 - \frac{4me^2}{I}}}. \quad (2.67)$$

Решение уравнения (2.66) относительно $\dot{\varphi} = \omega$ имеет вид:

$$\dot{\varphi} = \omega = \frac{M}{\beta} (1 - e^{-\lambda t}) = \frac{M}{b} \left(1 - \exp\left(-\frac{\beta t}{I + \frac{4me^2\omega^2}{k^2 - \omega^2}}\right) \right). \quad (2.68)$$

При установившемся режиме максимальное смещение оси вращения изделия (информативный параметр устройства) определяется формулой:

$$\rho = \frac{me\omega^2}{C_{эф}}$$

Динамика движения оси вращающегося контролируемого изделия определяется следующим дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} \ddot{\rho} - \rho \dot{\varphi}^2 - \omega^2 e \cos(\omega t - \varphi) &= -\frac{c}{m} \rho - \mu \dot{\rho}, \\ \rho \ddot{\varphi} + 2\dot{\rho} \dot{\varphi} - \omega^2 e \sin(\omega t - \varphi) &= -\mu \rho \dot{\varphi}. \end{aligned} \quad (2.69)$$

В установившемся движении уравнение (2.69) примет вид:

$$\begin{aligned} r\omega^2 + \omega^2 e \cos\psi &= \frac{c}{m} r, \\ \omega^2 e \sin\psi &= \omega\mu r. \end{aligned} \quad (2.70)$$

где r – информативный параметр контрольного устройства, который определяется следующим соотношением:

$$r = \frac{e\omega^2}{\sqrt{(k^2 - \omega^2)^2 + \mu^2\omega^2}}. \quad (2.71)$$

Вращения следует рассчитывать по следующей формуле:

$$\omega = k^2 \sqrt{\frac{2}{2k^2 - \mu^2}}. \quad (2.72)$$

Условие устойчивого вращения изделия в стационарном движении контролируемого изделия имеет вид:

$$4\mu^2 k^2 (4\omega^2 + \mu^2) > 0.$$

Длительность переходного процесса может быть определена следующей интегральной зависимостью:

$$t = \int_0^{\omega^*} \frac{Ik^2 - (I - 4me^2)\omega^2}{\beta\omega^3 - \mu\omega^2 - \beta k^2\omega + Mk} d\omega. \quad (2.73)$$

2.4. Определение основных характеристик контрольного устройства

Основными характеристиками контрольного устройства являются изменения информативного параметра за один оборот изделия, т.е. $r=f(\omega)$ и зависимость его от величины РСЦМ, т.е. $r=f(e)$.

Для вывода вышеназванных зависимостей на рис. 2.8 представлена расчетная схема.

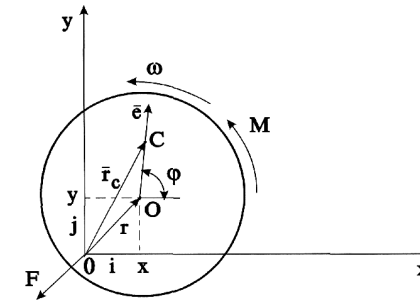


Рис. 2.8. Расчетная схема для определения параметров контроля.

Примем следующие допущения:

- а) пренебрегаем поворотом тела вокруг оси x , y и его вертикальными перемещениями;
- б) пусть $(\varphi = \omega t, \text{ при } \omega = const)$ – рассматривается установившийся режим;
- в) $\bar{F} = -C_{эф} \bar{r}$,

где $C_{эф}$ – эффективная жесткость упругой связи; \bar{r} – смещение оси вращения.

$$\begin{aligned} r_c &= \bar{i}x_c + \bar{j}y_c = (x + e \cos \omega t) \bar{i} + (y + e \sin \omega t) \bar{j}, \\ m \ddot{x} &= -C_{эф} x, \\ m \ddot{y} &= -C_{эф} y, \end{aligned}$$

Так как

$$\begin{aligned} x_c &= x + e \cos \omega t; \\ y_c &= y + e \sin \omega t, \end{aligned}$$

следовательно:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} - e\omega^2 \cos \omega t &= -C_{\phi} x, \\ m\ddot{y} - e\omega^2 \sin \omega t &= -C_{\phi} y. \end{aligned} \quad (2.74)$$

Путем преобразования (2.74) получаем:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + k^2 x &= \frac{e\omega^2}{m} \cos \omega t = h \cos \omega t, \\ \ddot{y} + k^2 y &= \frac{e\omega^2}{m} \sin \omega t = h \sin \omega t, \end{aligned} \quad (2.75)$$

$$\text{где } k^2 = \frac{C_{\phi}}{m}; h = \frac{e\omega^2}{m}.$$

Из расчетной схемы следует, что

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Решение дифференциального уравнения (2.75):

$$\begin{aligned} x &= B \sin(kt + \beta) + \frac{h}{k^2 - \omega^2} \cos \omega t, \\ y &= A \sin(kt + \alpha) + \frac{h}{k^2 - \omega^2} \sin \omega t, \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\text{где } \omega \left[\frac{p\alpha}{c} \right],$$

$$t_0 = 0,$$

$$k \neq \omega,$$

$$\omega t = 0 \div 2\pi.$$

$$\begin{aligned} t_1 &= t_0 + \Delta t; y = y_0; \dot{y}_0 = A \sin \alpha; \\ t_2 &= t_1 + \Delta t; y = y_0; \dot{y}_0 = Ak \cos \alpha + \frac{h\omega}{k^2 - \omega^2}; \\ \Delta t &= 0,001; \omega t = 2\pi; t = \frac{2\pi}{100\pi} = 0,02c. \end{aligned} \quad (2.77)$$

При учете начальных условий (2.77) уравнения (2.76) будут иметь вид:

$$\begin{cases} x = B \sin(kt + \beta) + B_1 \cos \omega t \\ y = A \sin(kt + \alpha) + B_1 \sin \omega t. \end{cases} \quad (2.78)$$

При $t = 0$; $x = x_0$; $x_0 = B \sin(\beta + B_1)$; $\dot{x} = \dot{x}_0$; $\dot{x}_0 = Bk \cos \beta$ определяем постоянные уравнения:

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{(x_0 - B_1)^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{k}\right)^2} = B_1; \\ A &= \sqrt{y_0^2 + \left(x_0 - \frac{h\omega}{k^2 - \omega^2}\right)^2 \cdot \frac{1}{k^2}} = \frac{h\omega}{(k^2 - \omega^2)k}. \\ \beta &= \arctg \frac{(x_0 - B_1)k^*}{\dot{x}_0} = \frac{\pi}{2}, \\ \alpha &= \arctg \frac{k y_0}{\dot{y}_0 - B_1 \omega} = 0, \\ & \begin{cases} x_0 = 0; \dot{x}_0 = 0 \\ y_0 = 0; \dot{y}_0 = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.79)$$

С учетом (2.79) имеем:

$$\begin{cases} x^* = B_1 \cos kt + B_1 \cos \omega t \\ y^* = A \sin kt + B_1 \sin \omega t. \end{cases} \quad (2.80)$$

Используя (2.80) при следующих значениях параметров устройства, с помощью компьютера вычисляем параметры устройства для построения характеристик:

$$\begin{aligned} t &= 0 \div 0,025 c; & m &= 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}; \\ \Delta t &= 0,002 c; & c &= 350 \text{ Н/м}; \\ \omega &= 80 \pi \text{ с}^{-1} & \pi &= 3,14; \\ e &= 0 \div 20 \cdot 10^{-6}, \end{aligned}$$

интервалы фиксированных значений e (0, 5, 10, 15, 20) 10^{-6} м.

Характеристики контрольного устройства представлены в разделе 4.

Таким образом, разработанные математические модели методов вращения изделия в базирующем приспособлении и на аэростатических опорах позволяют исследовать процесс контроля как в статическом, так и в динамическом режимах работ.

Величина информативного параметра метода вращения изделия в базирующем приспособлении пропорциональна значению РСЦМ и

квадрату скорости вращения изделия и обратно пропорциональна квадрату высоты закрепления пружинной подвески; изменение массы контролируемого изделия требует корректировки величины информативного параметра устройства.

Собственные колебания системы быстро затухают при небольшом коэффициенте демпфирования, т.е. процесс контроля является устойчивым.

Устойчивое вращение контролируемого изделия зависит от его массово-геометрических, кинематических характеристик и от величины РСЦМ. С помощью неравенства (2.39) можно обеспечить устойчивое вращение изделия в зависимости от максимального значения РСЦМ изделия.

С помощью зависимостей (2.51), (2.52) можно определить величины информативного параметра от значений РСЦМ, массово-геометрических и кинематических параметров устройства, а также условия устойчивости (2.61) стационарного движения изделия.

Алгоритмы расчета основных массово-геометрических и кинематических параметров устройств контроля (2.63), (2.64), (2.66), (2.67), (2.71), (2.72), (2.73), (2.78) позволяют решать вопросы проектирования контрольных автоматов применительно к любым изделиям машиностроения типа тел вращения.

3. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ, СИСТЕМ СЪЕМА ИНФОРМАЦИИ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данном разделе приводится описание устройств контроля, разработанных на основе методов и теоретических исследований, приведенных в разделе 2, а также методика проведения экспериментов.

Следует отметить, что устройства контроля, изготовленные в лабораторных условиях вуза, являются макетными образцами промышленных устройств контроля. Промышленные образцы будут изготовлены с соответствующей корректировкой по результатам экспериментов макетных устройств контроля.

3.1. Разработка устройств контроля и систем съема информации различными методами

3.1.1. Метод «Наклонная плоскость»

Для проверки этого метода в лабораторных условиях была изготовлена опытная экспериментальная установка, позволяющая проверить два способа контроля: амплитудный и временной [11].

Экспериментальное устройство с полуавтоматическим циклом представляет собой (рис. 3.1) наклонную плоскость 2, закрепленную консольно. Предусмотрены возможности задания различного угла наклона и изменения собственной частоты колебания плоскости путем ограничения ее свободного вылета.

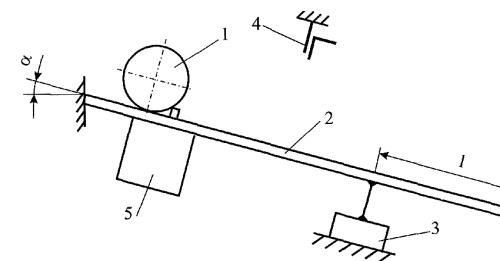


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки.

В качестве устройства, фиксирующего колебания плоскости (амплитудный метод), использован электромагнитный датчик 3, мембрана которого связана с опорной плоскостью, преобразующей колебания последней в электрические сигналы.

Кроме того имеется контактный датчик 4 для включения электрического счетчика времени (на рис. 3.1 не показан). Для устранения неоднозначности установки контролируемого изделия на позиции предусмотрено спусковое электромагнитное устройство 5.

Блок-схема устройства контроля показана на рис. 3.2 и состоит из экспериментального приспособления (наклонная плоскость), быстродействующего самопишущего прибора типа НЗ27-1 с шириной ленты 40 мм, секундомера электромеханического типа ПВ-53Л с ценой деления 0,01 с и источника стабилизированного напряжения П4105.

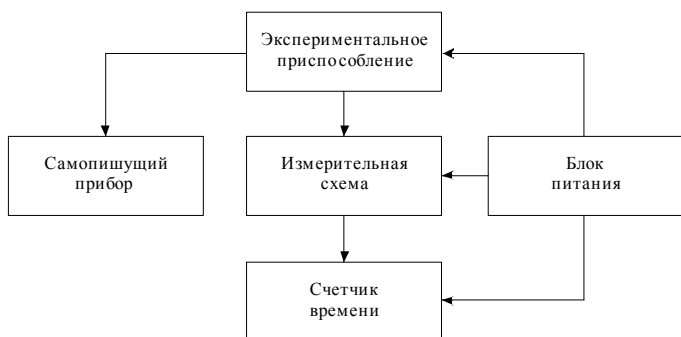


Рис. 3.2. Блок-схема устройства.

Измерительная схема для временного контроля РСЦМ изделий является релейной (рис. 3.3), которая обеспечивает срабатывание спускового устройства, запуск счетчика времени и его отклонение в конце измерения.

При нажатии кнопки S_1 «ПУСК» включается электромагнит Y_1 спускового устройства и реле K_1 . Нормально открытые контакты K_{12} запускают счетчик времени $PS_в$, обеспечивая протекание тока по его обмотке. Контролируемое изделие, скатываясь по наклонной плоскости, размыкает контакты конечного выключателя S_2 , при этом измерительная схема возвращается в исходное состояние, обмотка счетчика времени PS_1 заканчивается контактами K_{12} , электромагнит отключается. Сброс показания счетчика времени PS_1 осуществляется вручную после каждого цикла измерения.

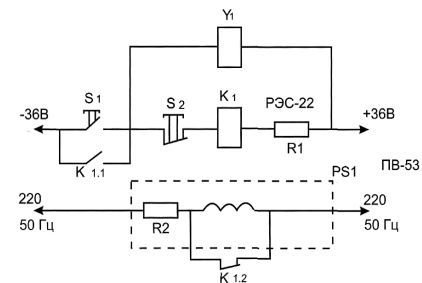


Рис. 3.3. Измерительная схема временного способа контроля.

3.1.2. Метод «Вращение изделия в базирующем приспособлении»

При разработке устройства контроля по методу вращения изделия в базирующем приспособлении, были выполнены следующие требования: простота и технологичность конструкции, минимальные габариты подвижных частей, стабильность частоты вращения контролируемого изделия, минимальное значение массы и моментов инерции относительно центра колебаний приводного вала.

На рис. 3.4 приведена кинематическая схема устройства контроля.

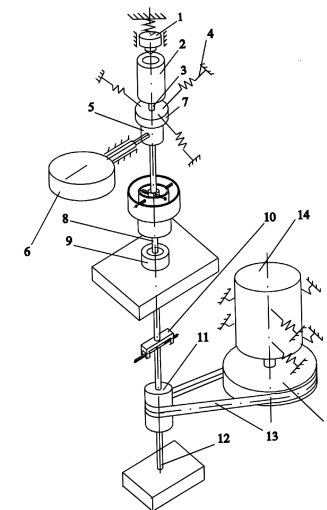


Рис. 3.4. Кинематическая схема устройства.

Контролируемое изделие устанавливают в базирующее приспособление 2, укрепленное на валу 3, вращающемся в опоре 5, последняя подвешена к корпусу на пружинных растяжках 4. Вращение вала передается четырехшарнирной муфтой 7, позволяющей ему совместно с базирующим приспособлением совершать угловые перемещения вокруг точки подвеса вала к муфте, одновременно исключая его осевые перемещения.

Ведущая часть муфты укреплена на валу 8, вращающемся на неподвижной опоре 9, жестко соединенной с корпусом. Вращение вала передается через скользящую муфту 10 от шкива 11, вращающегося в опоре 12, жестко соединенной с корпусом установки. Скользящая муфта предназначена для ослабления колебаний, передаваемых шкивом валу 8. Шкив 11 приводится во вращение при помощи резинового пассика 13 от шкива 15, установленного на валу электродвигателя 14. Электродвигатель укреплен на основании установки через эластичные виброизолирующие прокладки, позволяющие снизить уровень вибрации основания установки.

В связи с малой массой контролируемых изделий (менее 10 г), чувствительность устройства должна быть высокой, что в свою очередь накладывает строгие допуски на точность изготовления деталей и точность их сборки.

В конструкции установки предусмотрена возможность юстировки подвижного узла при сборке и в процессе эксплуатации. Для этого базирующее приспособление поджимается вращающимся центром 1, укрепленным на корпусе прибора, а к нижнему торцу опоры 5 подводится щуп индикатора 6 через технологическое отверстие в корпусе 16. При помощи регулировочных винтов четырехшарнирной муфты выставляется минимальный эксцентриситет вала 3.

На рис. 3.5 приведена блок-схема измерительной части экспериментальной установки контроля РСЦМ изделий данным методом [12].

Контролируемое изделие устанавливают в базирующем приспособлении 12, выполненном с радиально подвижной опорой. Привод базирующего приспособления осуществляется от электродвигателя 15 со стабилизированным источником питания 1, имеющим плавную регулировку напряжения, что позволяет регулировать скорость вращения базирующего приспособления от 0 до 9000 об/мин. Контроль скорости вращения осуществляется частотомером 18 и осциллографом 19, на которые поступают импульсы от оптико-механического генератора, состоящего из излучателя 14, фотоприемника 13, усилителя 16 и формирователя сигналов 17.

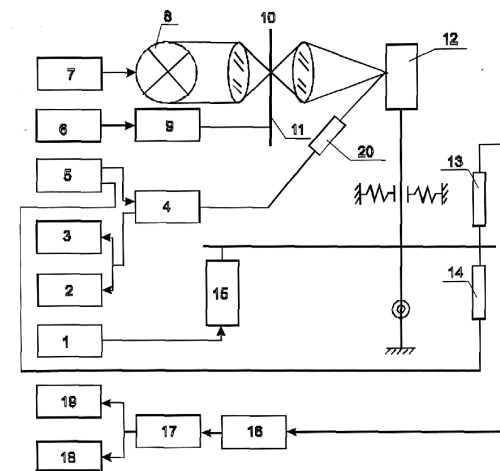


Рис. 3.5. Блок-схема измерительной части метода вращения изделия в базирующем приспособлении.

На поверхность базирующего приспособления, выполненную с высокой степенью отражения, направляют световой поток от лампы накаливания 8, питаемой стабилизированным напряжением от блока питания 7.

Световой поток на поверхности базирующего приспособления фокусируется с помощью линзовой системы 10, к фокусу первой линзы которой установлен диск модулятора 11. Привод модулятора осуществляется двигателем 9 при включении стабилизированного питания 6.

Отраженный световой поток попадая на фотоприемник 20, преобразуется в электрический сигнал с помощью блока питания усилителя 5, который с выхода усилителя 4 поступает на выход осциллографа 3 и самопишущего прибора 2. С помощью самопишущего прибора марки Н327-1 производится запись информативного сигнала.

3.1.3. Метод «Вращение изделия на аэростатических опорах»

Данный метод разработан для контроля РСЦМ изделий с высокой точностью. При создании макетного образца устройства контроля были выполнены следующие требования: элементы устройства контроля были изготовлены с высокой точностью, т.е. были соблюдены высокая точность геометрических размеров и класс чистоты сопрягаемых поверхностей, точность сборки и возможность регулировки при наладке устройства контроля, была осуществлена выборка зазоров и люфтов в сопря-

гаемых деталях. Кроме того, была обеспечена стабилизация давления и расхода воздуха в устройстве контроля, напряжения в оптоэлектронной системе съема информации и другие.

На рис. 3.6 показана схема устройства контроля с фотоэлектрическим съемом информации [13]. Контролируемое изделие 1 устанавливается в аэростатических опорах 6 и 2, последняя отличается от первой тем, что она подпружинена и имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении, что необходимо для установки изделия и для регулирования зазора в опорах.

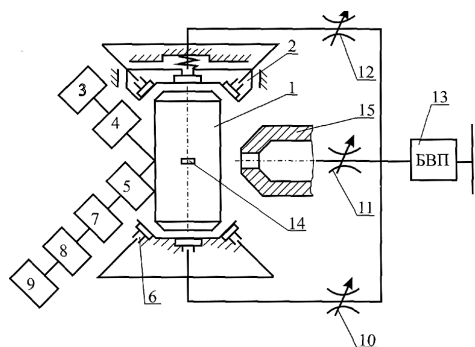


Рис. 3.6. Схема устройства контроля.

В опорах 6 и 2 сделаны карманчики, куда подается воздух с определенным давлением. Давление воздуха в карманчиках регулируется соответственно дросселями 10 и 12. Воздух к ним поступает от пневмосети через стандартный БВП-1 блок подготовки воздуха 13, который содержит стабилизатор давления, поддерживающий давление на выходе независимо от колебания нагрузки в пневмосети, дегидратор для отделения влаги из воздуха и воздушного фильтра, исключающий попадание в систему механических частиц.

Для вращения изделия применено сопло 15. Струя воздуха из сопла направляется по касательной к поверхности контролируемого изделия. Скорость вращения изделия регулируется дросселем 11. Оптоэлектронная система, измеряющая колебания изделия в радиальном направлении за счет сил инерции, вызванных колебанием РСЦМ, состоит из осветителя 3, оптической системы 4, 5, фотоприемника 7, усилителя 8, измерительного прибора 9 и источника стабилизированного питания (на рисунке не показан).

На рис. 3.7 изображена полуконструктивная схема автоматического контроля радиального смещения центра масс. В этой схеме в качестве чувствительного элемента в системе применен индуктивный датчик 4, реагирующий на изменение воздушного зазора [12]. Устройство состоит из верхней опоры 8, нижней опоры 14, стойки 1 и сопла 10.

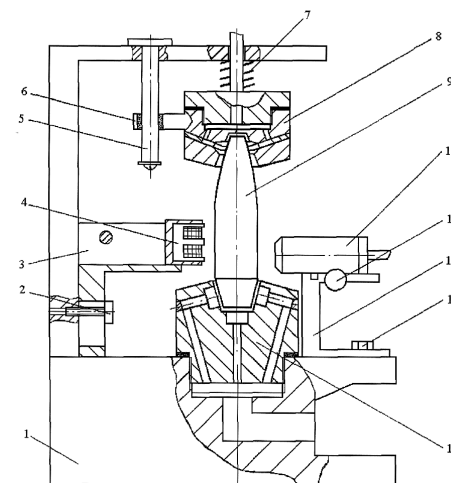


Рис. 3.7. Полуконструктивная схема устройства.

Нижняя опора выполнена из алюминия марки А1 ГОСТ 3549–55. Она имеет семь отверстий, через которые подается воздух под давлением 300 кПа. Отверстия расположены таким образом (одно отверстие снизу, а шесть других симметрично по бокам под определенным углом), что при подачи воздуха деталь 9 поднимается на один миллиметр и удерживается в вертикальном положении.

Верхняя опора выполнена подвижной и подпружиненной. Это позволяет производить контроль деталей, имеющих различные размеры. Пружина 7 служит своего рода демпфером и опора приподнимается, когда подается воздух. Колебания опоры в горизонтальном направлении ограничиваются при помощи направляющей 5. Она представляет собой ось. Для уменьшения трения применяется керамическая втулка 6. Воздух подается через два отверстия под давлением 120 кПа и распределяется по канавке, проточенной по всей внутренней поверхности опоры, этим достигается равномерная подача воздуха на всю полезную площадь.

Сопло предназначено для того, чтобы деталь могла вращаться. Воздух подается по касательной к детали под давлением 100 кПа, при этом она вращается со скоростью от 0 до 5000 об/мин. Положение сопла в продольном направлении регулируется при помощи винта 11, а в поперечном – при помощи крепления 13.

Примененный индуктивный датчик предназначен для измерения некруглости изделия и радиального смещения центра масс. В поперечном направлении положение датчика регулируется при помощи зажимных стенок крепления 3 датчика. В вертикальном направлении при помощи болта 2.

На рис. 3.8 изображена пневмосхема, состоящая из отстойника 1, кранов 2, фильтров тонкой очистки 3, регулирующих клапанов 4 и 7, используются манометры 5 и прибор для измерения скорости воздушного потока 6.

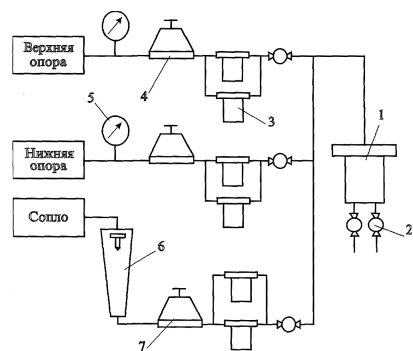


Рис. 3.8. Пневмосхема устройства.

От компрессора воздух подается в отстойник 1 через кран 2, затем воздух распределяется от центральной линии ко всем основным элементам прибора (верхняя опора, нижняя опора и сопло). Воздух, проходя через кран и два фильтра тонкой очистки, подается к верхней опоре. Показания уровня давления регистрируются манометрами 5, давление регулируется при помощи клапана 4.

Подача воздуха на нижнюю опору аналогична подаче воздуха на верхнюю опору. Проходя через кран, два фильтра тонкой очистки, воздух подается в сопло, показания регистрируются прибором 6 для измерения скорости воздушного потока. Скорость воздушного потока регулируется клапаном 7.

3.2. Методика проведения экспериментов

Для экспериментальной проверки разработанных методов автоматического контроля РСЦМ изделий были изготовлены опытные образцы устройств с выполнением всех требований, обеспечивающих качественное проведение экспериментов. Отметим главные из них: необходимая точность изготовления деталей и узлов, возможность регулирования режимов работ – скорости вращения механизмов и электродвигателей, обеспечение устойчивых режимов работ узлов без вибраций, стабилизация электрических, температурных параметров системы и др.

Все устройства контроля были оснащены соответствующей электронно-измерительной аппаратурой для регистрации основных параметров контроля.

В качестве контролируемых изделий при проведении экспериментов были использованы цилиндрические детали типа роликов с малыми массой и габаритами. При этом искусственно создавалось РСЦМ путем удаления определенного количества материала со средней наружной поверхности. Масса ролика до и после удаления определялась на точных гальванических весах. Применение в качестве контролируемых изделий роликов, обусловлено необходимостью экспериментального определения точности измерения контрольных устройств, для построения тарировочных характеристик между параметрами информативным и РСЦМ изделия.

Обязательным для всех методов контроля является проведение исследований для выявления отклонений по массе контролируемых роликов в партии, что необходимо для определения влияния этих отклонений по массе изделий на величины информативного параметра. Это позволяет провести соответствующую коррекцию на результаты измерений.

Для метода вращения изделий в базирующем приспособлении особое значение имеет настройка вращательной части устройства контроля, РСЦМ его базовой поверхности должно быть минимальным в пределах 2–5 мкм.

Пользуясь результатами теоретических выкладок (раздел 2), необходимо проверить режимы работ контролируемого устройства до и после резонансных скоростей вращения. Необходимо также тщательно проверить системы съемов информации. Особое внимание при этом надо уделить настройке заданных характеристик оптикоэлектронной системы; проверить степень стабильности напряжения источников питания, что необходимо для получения устойчивой световой марки на поверх-

ности базирующего приспособления и постоянной скорости вращения электродвигателя модулятора светового потока.

Порядок проведения экспериментов: вначале необходимо записать с помощью самописца колебания базирующего приспособления без контролируемой детали, а затем, устанавливая контролируемое изделие с различными по величине РСЦМ, зарегистрировать соответствующие отклонения базирующего приспособления. Количество измерений одной контролируемой детали должно быть осуществлено не менее трех раз. Эксперименты необходимо проводить при различных скоростях вращения контрольного устройства с целью определения диапазона оптимальных режимов работ контрольного устройства.

Для метода «наклонная плоскость» необходимо вначале установить опытным путем оптимальный угол наклона, при котором можно измерить минимальное значение РСЦМ изделий для двух способов измерения: амплитудного и временного. Для получения достоверных результатов следует скатывать изделие в контрольном устройстве из разных позиций, из различных расположений детали с РСЦМ относительно лотка устройства.

Следует тщательно проверить работоспособность контрольно-измерительной аппаратуры, элементов контрольного устройства. Одно и то же измерение необходимо провести не менее трех раз и взять в качестве информативного параметра среднее его значение.

Для метода «вращение изделия на аэростатических опорах» необходимо, чтобы давление воздуха сверху и снизу было одинаковым, что обеспечивается с помощью соответствующих регулируемых дросселей. Контроль давления производится образцовыми высокоточными манометрами. Зазор в аэростатических опорах не должен быть больше 2 мкм, контроль его производится индикатором перед началом экспериментов.

Давление струи воздуха, предназначенной для вращения контролируемого изделия, регулируется своим дросселем и его величина также устанавливается образцовым манометром. Скорость вращения изделия можно регулировать дросселем сопла, изменяя через него расход воздуха. Расход воздуха определяется по следующей формуле:

$$Q = \mu F_{dp} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta P}, \quad (3.1)$$

где μ – коэффициент расхода; F_{dp} – площадь проходного сечения дросселя; g – ускорение свободного падения; γ – удельный вес воздуха; ΔP – перепад давления.

Скорость струи равна:

$$v = \frac{Q}{F_c}, \quad (3.2)$$

где Q – расход воздуха через дроссель; F_c – площадь проходного сечения сопла.

$$F_c = \frac{\pi d^2}{4},$$

где d – диаметр сопла.

Зазор между соплом и поверхностью контролируемого изделия определяется следующим соотношением:

$$\pi d z = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.3)$$

откуда величина зазора равна:

$$z = \frac{d}{4}.$$

Однако для уменьшения потерь воздуха рекомендуется определять зазор по формуле:

$$z = \frac{d}{8},$$

т.е. следует брать величину зазора в два раза меньше расчетного значения.

В контрольном устройстве величина зазора между соплом и поверхностью контролируемого изделия устанавливается с помощью индикатора. Скорость вращения контролируемого изделия измеряется с помощью частотомера при работе оптико-электронной системы. Изменение светового потока происходит благодаря метке, нанесенной на поверхность контролируемого изделия.

Сигнал от фотоприемника через соответствующие усилительно-преобразовательные элементы поступает в частотомер, по показаниям которого определяется скорость вращения изделия.

Схема для расчета пневмопотока нижней части представлена на рис. 3.9.

Задаемся параметрами:

$$r_a = 0,0015 \text{ м};$$

$$P_d = 300 \text{ кПа};$$

$$r_d = 0,0005 \text{ м};$$

$$m = 0,0347 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$r_H = 0,005 \text{ м};$$

$$P_a = 100 \text{ кПа};$$

$$S = 0,8712 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

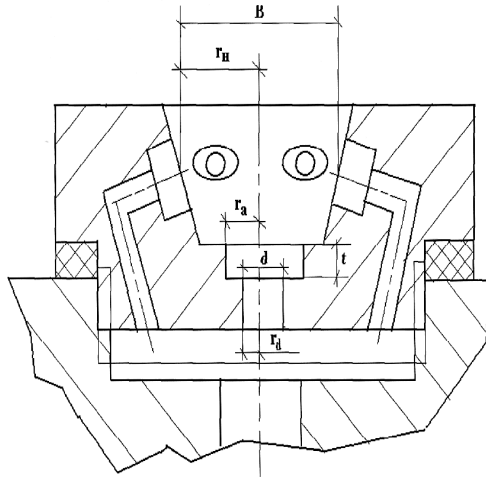


Рис. 3.9. Расчетная схема пневмотока нижней части устройства.

Величина подъемной силы определяется по формуле [19]:

$$W = \frac{1}{3} \pi (P_d - P_a) (r_a^2 + r_d r_n + r_n^2), \quad (3.4)$$

где r_a – 1/2 диаметра отверстия на выходе; r_d – 1/2 диаметра отверстия на входе; r_n – расстояние до центра другого отверстия; P_a – атмосферное давление; P_d – давление воздуха в нижней опоре.

Масса подвижной части опоры равна:

$$m = \frac{WSn}{980},$$

где S – площадь; n – количество принимаемых отверстий.

Отсюда имеем:

$$n = \frac{980}{WS},$$

$$n = \frac{980 \cdot 0,00347 \cdot 10^{-3}}{6,227 \cdot 0,8712 \cdot 10^{-4}} = 6,27 \text{ отв.} \quad (3.5)$$

Принимаем 7 отверстий.

Глубина кармана рассчитывается по формуле [39]:

$$t \leq \sqrt{0,347Bh}, \quad (3.6)$$

где h – величина зазора (принимается $h = 1$ мм); B – ширина секции.

$$t \leq \sqrt{0,347 \cdot 10 \cdot 1} = 1,86 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Определяем расход воздуха при $P_d = 3$ кг/см по известной формуле

$$Q = \alpha \frac{\pi d}{4} \sqrt{\frac{P_d}{\rho_a}},$$

где α – коэффициент истечения ($\alpha = 0,75$); d – диаметр отверстия ($d = 0,001$ м); ρ_a – плотность воздуха ($\rho_a = 1,23$ кг/м³).

Расчет пневмотока верхней части производится аналогично.

Задаемся параметрами:

$$\begin{aligned} P_d &= 120 \text{ кПа;} & m &= 0,0347 \cdot 10^{-3} \text{ кг;} \\ r_a = r_d &= 0,00025 \text{ м;} & S &= 0,8712 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \\ r_n &= 0,005 \text{ м;} \end{aligned}$$

Величина подъемной силы равна:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{3} \pi (120 \cdot 10^{-3} - 100 \cdot 10^{-3}) (0,00025^2 + \\ &+ 0,00025 \cdot 0,0019 + 0,0019^2) = 0,0868 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Число отверстий:

$$n = \frac{0,00000347}{0,0868 \cdot 0,00003} = 1,3 \text{ отв.}$$

Принимаем 2 отверстия. Рассчитываем глубину канавки:

$$t \leq \sqrt{0,347 \cdot 0,038 \cdot 0,001} = 0,00115 \text{ м.}$$

Определяем расход воздуха при $P_d = 120$ кПа:

$$\begin{aligned} Q &= 0,075 \frac{3,14 \cdot 0,0005^2}{4} \sqrt{\frac{120 \cdot 10^3}{1,23}} = 46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с.} \\ Q &= 46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} = 12677027 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{ч.} \end{aligned}$$

Для исследования переходного процесса верхней опоры используется расчетная схема, представленная на рис. 3.10.

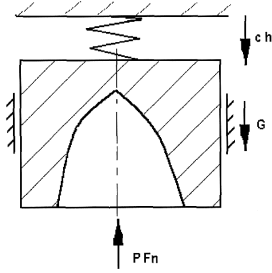


Рис. 3.10. Расчетная схема переходного процесса верхней опоры устройства.

Дифференциальное уравнение движения верхней опоры в динамике имеет вид [41]:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} + \vartheta \frac{dh}{dt} + ch + G = PF, \quad (3.7)$$

где m – масса верхней опоры; ϑ – коэффициент сопротивления воздуха; c – коэффициент жесткости пружины; G – вес верхней опоры; F – площадь верхней опоры, на которую действует давление воздуха.

Разделим все части уравнения на значение жесткости пружины (c):

$$\frac{m}{c} \frac{d^2 h}{dt^2} + \frac{\vartheta}{c} \frac{dh}{dt} + h = \frac{1}{c} B,$$

где $B = PF_{\Gamma} - G$.

Примем:

$$T_2 = \sqrt{\frac{m}{c}}; T_1 = \frac{\vartheta}{c}; k = \frac{1}{c}; p = \frac{dh}{dt},$$

где T_2 и T_1 , – постоянные времени; k – коэффициент усиления; p – оператор Лапласа.

Тогда уравнение (3.7) в изображениях Лапласа при нулевых начальных условиях примет вид:

$$h(p) T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = kB(p).$$

Отсюда передаточная функция будет иметь вид:

$$W(p) = \frac{h(p)}{B(p)} = \frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Характеристическое уравнение системы будет иметь вид:

$$T_2^2 \lambda^2 + T_1 \lambda + 1 = 0.$$

Находим корни характеристического уравнения:

$$T_1 = \frac{0,1}{0,065} = 1,538c,$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{6,5 \cdot 10^{-5}}{0,065}} = 0,032c,$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{1,538}{0,032} = 48.$$

Исходя из условия $\frac{T_1}{T_2} > 2$ оба корня характеристического уравнения являются вещественно отрицательными:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{T_1}{2T_2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4T_2^4} + \frac{1}{T_2^2}}. \quad (*)$$

Решив уравнение (*) в числах, получим:

$$\lambda_1 = -146,2,$$

$$\lambda_2 = -1355,7.$$

Передаточная функция выходного звена:

$$h_{\text{вых}}(p) = \frac{kh_{\text{вх}}}{T_2^2 p(p + \lambda_1)(p + \lambda_2)}.$$

Согласно обратному преобразованию Лапласа имеем [48]:

$$h_{\text{вых}} = kh_{\text{вх}} \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} e^{-\lambda_2 t} \right), \quad (3.8)$$

$$kh_{\text{вх}} = 1 \text{ мм.}$$

Результаты вычислений приведены ниже, а график переходного процесса представлен на рис. 3.11.

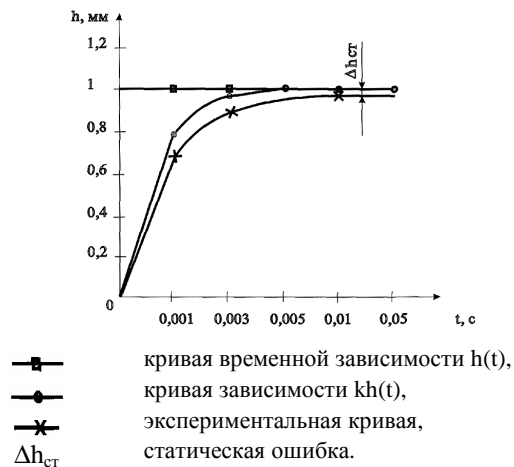


Рис. 3.11. График переходного процесса.

t, с	0	0,001	0,003	0,005	0,01	0,05
h, мм	0	0,74	0,986	0,9992	0,9999	1

Расчет сопла выполняем из условия, что n – число оборотов контролируемого изделия ($n \div 5000$ об/мин); d – диаметр специзделия ($d = 5,65$ мм).

Скорость потока воздуха рассчитывается по известной формуле:

$$v = \frac{4Q}{\pi d_{омс}^2}$$

Отсюда найдем расход воздуха, где $d_{омс}$ – диаметр сопла, подающего воздух ($d_{омс} = 0,0015$ м).

Скорость воздуха:

$$v = \frac{\pi d n}{1000}$$

$$v = \frac{3,14 \cdot 5,65 \cdot 5000}{1000} = 88,705 \text{ м/мин}$$

Тогда:

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,0015^2 \cdot 9,284456}{4} = 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$$

Из формулы:

$$Q = \mu f \Delta P \sqrt{\frac{2g}{\gamma}}$$

где $\mu = 0,75$ – коэффициент истечения; f – площадь отверстия; $\Delta P = P_d - P_a$,
 $g = 9,8$ м/с²; $\gamma = 1,23$ кг/м³ – плотность воздуха, $f = \frac{\pi d^2}{4}$,

$$f = \frac{3,14 \cdot 0,0015^2}{4} = 0,0177 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

найдем давление:

$$\Delta P \frac{Q}{\mu f \sqrt{\frac{2g}{1,23 \cdot 10^{-9}}}} = 3,1 \text{ кг/м}^2$$

Разница между подаваемым давлением и атмосферным равна $3,1$ кг/м². Такая величина сравнительно мала. Таким образом, можно принять подаваемое давление 1 кг/см².

Расчет индуктивного датчика [35] производится следующим образом:

а) по заданным габаритным размерам определяем число витков.

ℓ – длина (144 мм);

b – ширина ($b = 5$ мм);

h – высота ($h = 6$ мм);

марка провода ПЭЛШО;

d_1 – диаметр провода с изоляцией ($d_1 = 0,12$ мм);

f_0 – диаметр провода по меди ($f_0 = 0,5$ мм).

$$\omega = \frac{4 f_0 \ell}{\pi d_1^2}, \quad (3.9)$$

$$\omega = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 144}{3,14 \cdot 0,12^2} = 6368;$$

б) определяем начальный зазор согласно условию:

$$\frac{\Delta \delta}{\delta_0} = 0,15 \div 0,2;$$

в) индуктивность L катушки может быть вычислена по приближенной формуле:

$$L = \frac{0,2 \pi \omega^2 S}{\delta} \cdot 10^{-8}, \quad (3.10)$$

где ω – число витков катушки; S – сечение магнитопровода ($0,00196$ мм²).

$$Z \approx \omega L,$$

$$Z \approx 6368 \cdot 0,0006 = 3,82 \text{ Ом},$$

$$i = \frac{U}{Z},$$

$$i = \frac{220}{3,82} = 5,76 \text{ А}.$$

Тогда чувствительность элемента определяется по формуле:

$$\frac{di}{d\delta} = \frac{220 \cdot 10^8}{0,2 \cdot 3,14 \cdot 6368^2 \cdot 0,00196 \cdot 6368} = 69,215. \quad (3.11)$$

Результаты вычислений приведены ниже, а график зависимости величины индуктивности от изменения зазора представлен на рис. 3.12.

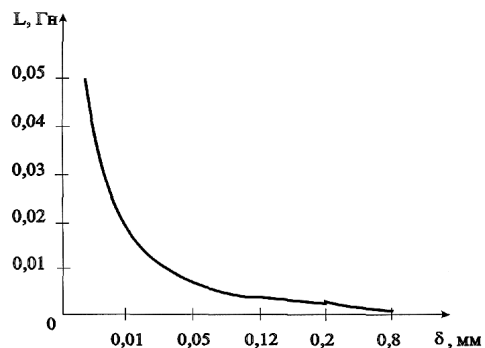


Рис. 3.12. График зависимости величины индуктивности от изменения зазора.

L, Гн	0,05	0,025	0,0125	0,00625	0,003125	0,0015625	0,00078125
δ, мм	0,01	0,05	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8

Для построения графика зависимости величины силы тока от изменения зазора (рис. 3.13) используем следующие данные:

I, А	0,06	0,346	1,384	2,768	4,222	4,845	5,76
δ, мм	0,01	0,05	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8

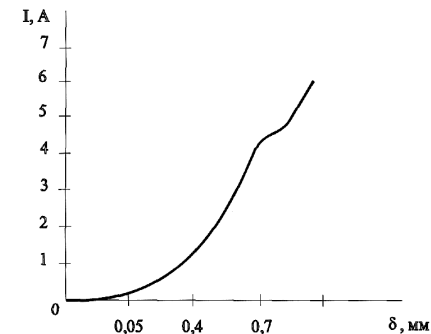


Рис. 3.13. График зависимости величины силы тока от изменения зазора.

Для проведения экспериментов были использованы детали типа роликов с различными искусственно заданными значениями РСЦМ.

Режимы работы контрольного устройства были установлены по расчетным данным, полученным в теоретической части расчетов.

Были проведены следующие виды испытаний:

- выбран устойчивый режим работы контрольного устройства с эталонным изделием;
- проверена устойчивость вращения контролируемых изделий с различными значениями РСЦМ в режимах до и после резонанса;
- определено реальное значение величины чувствительности устройств контроля;
- снята характеристика (зависимость информативного параметра от величины РСЦМ изделия) $r = f(e)$;
- определена длительность переходного процесса;
- оценена стабильность полученных результатов при измерениях.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ РАДИАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС ИЗДЕЛИЙ

Целью экспериментальных исследований является:

- а) подтверждение результатов теоретических исследований;
- б) проверка работоспособности разработанных опытных образцов устройства контроля;
- в) экспериментальное определение характеристик устройств контроля: точность измерения РСЦМ изделий, стабильность результатов измерений, диапазоны режимов работ устройства контроля, возможности измерения величин РСЦМ изделий и определение оптимальных режимов работ устройств;
- г) корректировка параметров устройств контроля и определение области их применения в промышленности.

4.1. Экспериментальное исследование устройства «наклонная плоскость»

В качестве контролируемых изделий, как было отмечено в разделе 3, использовались цилиндрические детали (рис. 4.1), изготовленные из бронзы, с искусственно заданными РСЦМ в интервале от 0 до 70 мкм.

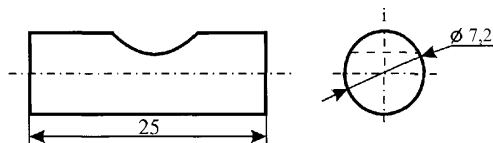


Рис. 4.1. Эскиз изделия и его исходное положение перед скатыванием.

Описание конструкции и принципа работы устройства контроля по методу «наклонная плоскость» даны в разделе 3.

4.1.1. Амплитудный способ

Снятие осциллограмм проводилось при чувствительности самопишущего прибора 50 мВ/см и скорости бумажной ленты 125 мм/с.

При проведении эксперимента опорная плоскость была настроена в резонанс, т.е. до совпадения частоты ее собственных колебаний с частотой периодического воздействия неуравновешенного контролируемого изделия в момент времени перед его отрывом от 01 опорной поверхности. Опытным путем был определен оптимальный угол наклона опорной плоскости $\alpha=3^\circ$.

Наиболее характерные, экспериментально полученные осциллограммы (представлены на рис. 4.2 а, б, в, г).

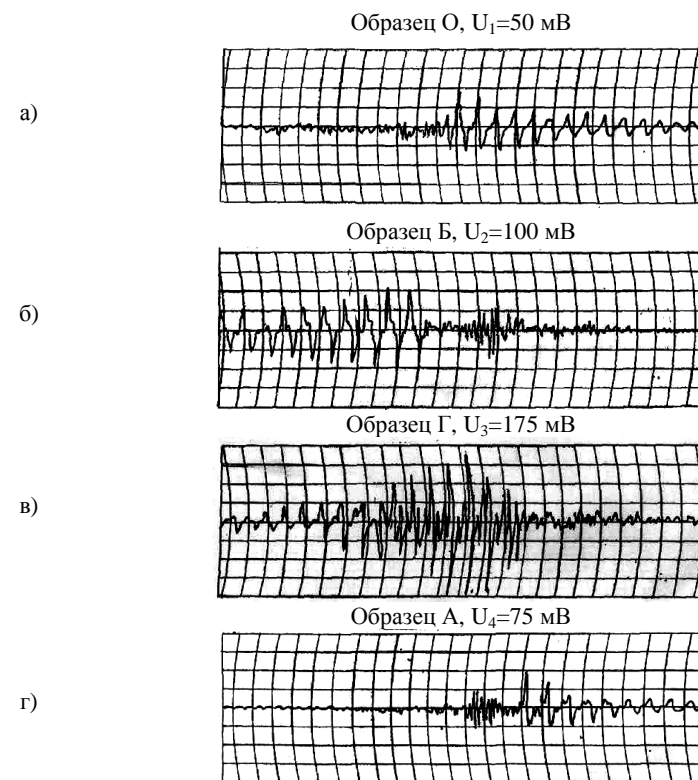


Рис. 4.2. Результаты экспериментов (амплитудный метод).

Зависимость амплитуды сигнала с датчика (что фиксируется в момент отрыва изделия от опоры) от величины РСЦМ изделия представлена на рис. 4.3 и близка к линейной.

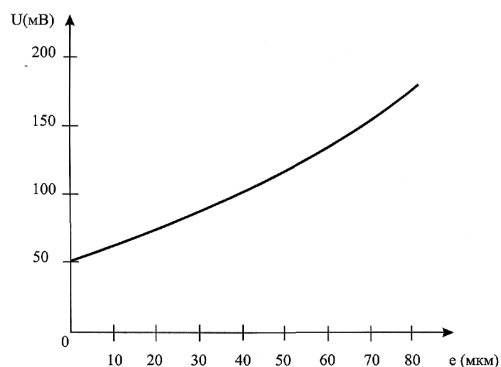


Рис. 4.3. График зависимости амплитуды сигнала датчика от величины РСЦМ.

4.1.2. Временной способ

На рис. 4.4 показаны исходные угловые положения перед каналом скатывания испытуемых образцов изделий. Цифрами I, II, III, IV обозначены исходные положения (до начала скатывания) контролируемых изделий по времени.

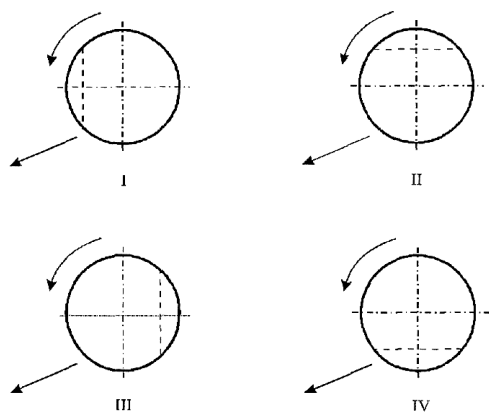


Рис. 4.4. Исходные положения изделия перед скатыванием.

Каждое контролируемое изделие скатывалось по 10 раз для всех положений, показанных на рис. 4.4, затем определялось среднее арифметическое значение времени скатывания для всей группы измерений в соответствии с его исходным положением и наибольшая разность между данными измерениями.

Зависимость времени скатывания Δt от угла наклона и от величины РСЦМ при длине траектории скатывания 25 см приведены на рис. 4.5.

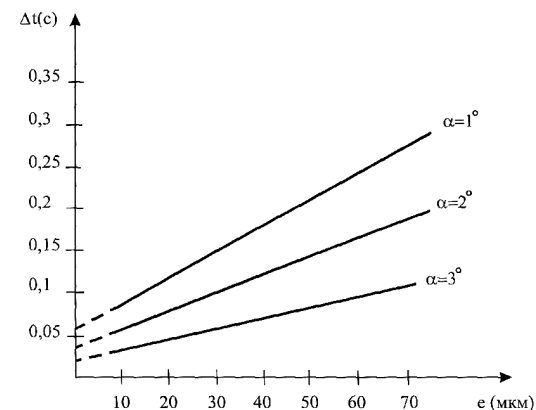


Рис. 4.5. Зависимость времени скатывания изделия от РСЦМ изделия.

Следует отметить, что разница в 90° между исходными угловыми положениями необходима для определения фазы дисбаланса. Целесообразно процесс контроля приблизить к случайному поиску, задавая примерно 5...8 исходных положений, так как важно воспроизвести такие ситуации, когда отклонение времени качения будет максимальным.

На рис. 4.6 приведена фотография экспериментальной установки регистрирующей аппаратуры. В ходе экспериментов использовались образцы: А – 10 мкм (условное РСЦМ), Б – 35 мкм, В – 65 мкм и эталонный без РСЦМ.

Результаты экспериментов по временному способу приведены на рис. 4.3.

Эксперименты показали, что амплитудным способом практически можно выявлять РСЦМ величиной более 60–70 мкм при резонансе.

В отличие от амплитудного, временной способ обеспечивает выявление РСЦМ более 10 мкм при углах наклона $\alpha = 1-3^\circ$ (рис. 4.5).

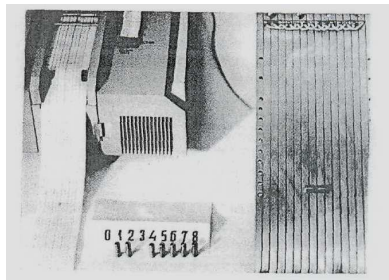


Рис. 4.6. Фотография экспериментальной установки.

Контроль изделия более сложной конфигурации возможен временным способом при условии изготовления наклонной плиты в виде желоба с точным совпадением контролируемого изделия.

4.2. Экспериментальное исследование устройства «вращение изделия в базирующем приспособлении»

Первоначально были проведены исследования по определению отклонения по массе партии изделий, полученных для проведения экспериментов.

На рис. 4.7 приведена фотография экспериментального стенда. Для всех изделий была снята зависимость выходного сигнала от частоты вращения с целью выявления ширины рабочей зоны, исходя из равномерности амплитуды выходного сигнала.

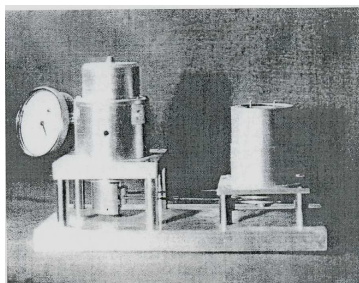


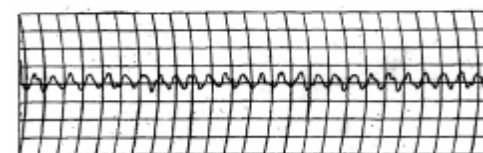
Рис. 4.7. Фотография экспериментального стенда.

Анализ полученных результатов показал, что наиболее предпочтительный диапазон скоростей вращения базирующего приспособления

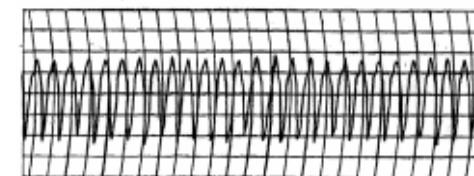
с установленным изделием лежит в интервале скоростей от 2500 до 6000 об/мин. Выбор данного интервала объясняется приемлемой равномерностью амплитуды выходного сигнала, а для интервала скоростей от 600 до 2400 об/мин такой равномерности не наблюдалось.

Без установленного изделия равномерность амплитуды выходного сигнала наблюдалась в интервале от 4500 до 8000 об/мин.

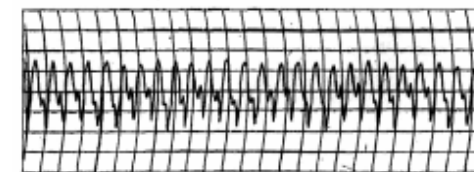
На рис. 4.8 приведены результаты экспериментов по оценке чувствительности устройства контроля. Были использованы цилиндрические детали с искусственным РСЦМ. Снятие осциллограмм производилось при чувствительности самопишущего прибора 0,5 В/см и скорости бумажной ленты 250 мм/с.



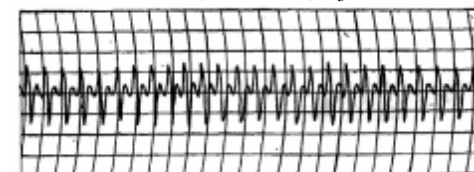
Позиция 1, без изделия, $U_1=25$ мВ



Позиция 2, $e=100$ мкм, $U_2=100$ мВ



Позиция 3, $e=50$ мкм, $U_3=85$ мВ



Позиция 4, $e=20$ мкм, $U_4=65$ мВ

Рис. 4.8. Зависимость амплитуды выходного сигнала от РСЦМ изделия.

На позиции 1 дана запись амплитуды выходного сигнала от вращающегося базирующего приспособления при $n = 3000$ об/мин без изделия.

На позиции 4 дана запись амплитуды выходного сигнала от вращающегося базирующего приспособления с изделием массой $9,5$ г при $n = 3000$ об/мин, $e = 20$ мкм.

На позиции 3 приведена осциллограмма при следующих данных: $n = 3000$ об/мин, $e = 50$ мкм, а на позиции 2 при прочих равных условиях для изделия с $e = 100$ мкм.

Дальнейшее увеличение величины РСЦМ изделия приводит к еще более ярко выраженному изменению выходного сигнала устройства контроля в сторону ее увеличения.

Результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

а) на экспериментальном устройстве контроля можно выявлять значение РСЦМ более 20 мкм и его можно применять для контроля изделий, имеющих большую массу, размеры и базовую поверхность;

б) сравнительная низкая чувствительность опытного образца контрольного устройства объясняется несовершенством его изготовления, отсутствием точной балансировки базирующего приспособления и силами сопоставления других вращающихся его элементов. Следовательно, для выявления РСЦМ малых значений (меньше 20 мкм) требуется коренная модернизация опытного образца устройства контроля с обеспечением более высокой точности изготовления и сборки, что технически вполне выполнимая задача.

4.3. Экспериментальное исследование устройства «вращение изделия на аэростатических опорах»

На рис. 4.9 приведена фотография экспериментальной установки, в которой реализован метод «вращение изделия на аэростатических опорах».

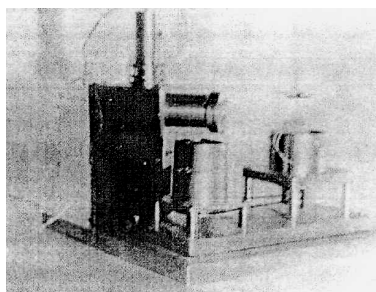


Рис. 4.9. Фотография экспериментальной установки.

Первоначально были проведены исследования переходного процесса, т.е. определение времени с момента установки изделия на аэростатические опоры приспособления до его устойчивого вращения.

Закон образования воздушного зазора в опорах представлен на рис. 3.11 и он подчиняется аperiodическому закону в соответствии с уравнением (3.8).

Разгон контролируемого изделия до установившейся скорости представлен на рис. 4.10 и происходит по закону, близкому аperiodическому. Причем длительность переходного процесса на основании уравнения (2.73) и экспериментов несколько возрастает с увеличением РСЦМ изделия.

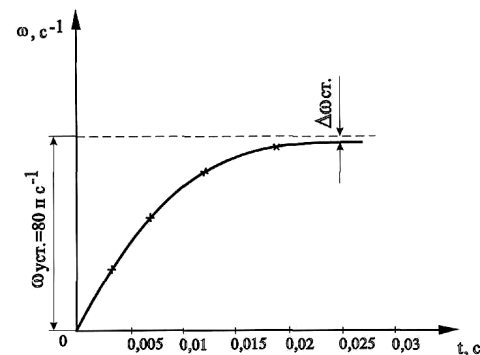


Рис. 4.10. График разгона контролируемого изделия.

Полное время длительности переходного процесса складывается из времени образования воздушного зазора в опорах и времени, необходимого для разгона изделия до установившейся скорости.

$$t_n = t_{вз} + t_p,$$

где $t_{вз}$ и t_p – соответственно время, необходимое для образования воздушного зазора в опорах и время разгона изделия до установившейся скорости.

$$t_n = 0,003 + 0,02 = 0,023 \text{ с.}$$

Эксперименты проводились при следующих исходных данных: $m = 3,3 \cdot 10^{-3}$ кг, $c = 350$ Н/м, $\omega = 80\pi \text{ c}^{-1}$, $e = 0,20 - 10^{-6}$ м, $v = 0,1$ кгс/см, $s = 0,065$ кг/см, $m_{он} = 6,5 \cdot 10^{-5}$ кгс²/см; среднее значение длительности переходного процесса $t_n = 0,023$ с.

В табл. 4.1, 4.2 и на диаграмме (рис. 4.11) приведены результаты вычислений величин информативного параметра r устройства контроля, а на рис. 4.12 представлены теоретические и экспериментальные результаты зависимости r от РСЦМ.

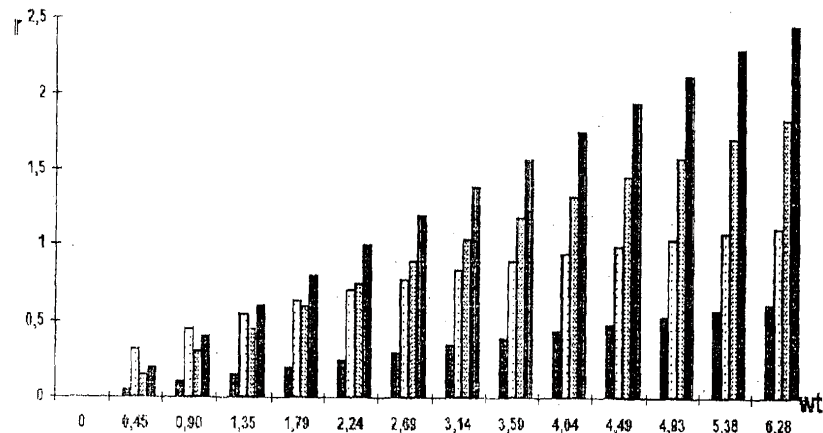


Рис. 4.11. Зависимость $r = f(x, y)$ при $wt = 0 \div 6,28$.

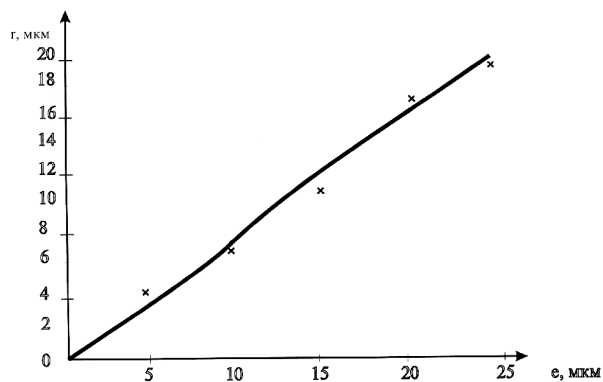


Рис. 4.12. График зависимости $r = f(e)$.

На рис. 4.13 представлен закон изменения информативного параметра r при установившейся скорости в зависимости от РСЦМ изделия

за один его оборот. Крестиком обозначены экспериментальные значения I_{\max} при различных значениях РСЦМ изделий.

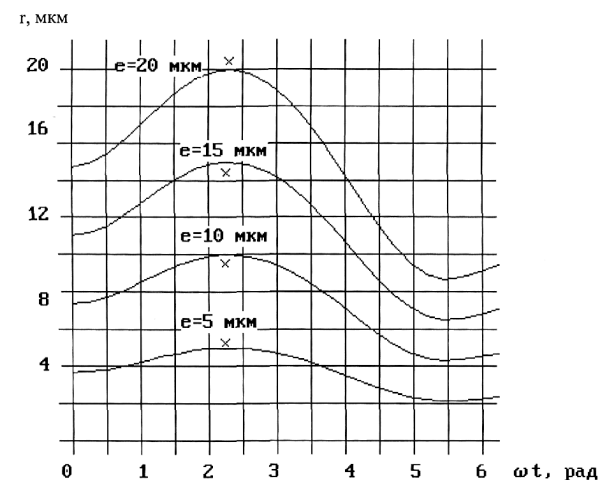


Рис. 4.13. График зависимости информативного параметра устройства контроля от РСЦМ при $wt = 0 \div 6,28$.

На основании полученных результатов путем вычислений и экспериментов было установлено, что с увеличением РСЦМ изделия смещение оси контролируемого изделия возрастает по линейному закону (рис. 4.11), а при установившейся скорости возрастает с увеличением РСЦМ изделия (рис. 4.12).

Таким образом, в результате экспериментов по методу «наклонная плоскость» показано, что амплитудный способ выявляет у изделий РСЦМ, величина которого составляет порядка $60 \div 70$ мкм, в то время как временной способ обеспечивает выявление РСЦМ изделий более 10 мкм.

Установлено, что методом «вращение изделия в базирующем приспособлении» можно выявлять значение РСЦМ более 20 мкм.

Наиболее высокой чувствительностью обладает метод «вращение изделия на аэростатических опорах». Устройство, созданное с использованием этого метода, позволило выявить РСЦМ изделий порядка $2 \div 5$ мкм.

Таблица 4.1

Результаты вычислений величин информативного параметра устройства контроля

x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	t
0	1,67·e-0,5	2,78·e-0,5	5,6·e-0,5	7,46·e-0,5	0	0	0	0	0	0
0	1,67·e-0,5	2,78·e-0,5	5,02·e-0,5	6,7·e-0,5	0	0,0500989	0,100198	0,150297	0,200395586	0,002
0	1,18·e-0,5	2,77·e-0,5	3,53·e-0,5	4,7·e-0,5	0	0,10006544	0,200131	0,300196	0,400261761	0,004
0	5,73·e-0,6	2,76·e-0,5	1,72·e-0,5	2,29·e-0,5	0	0,14976856	0,299537	0,449306	0,599074258	0,006
0	1,12·e-0,6	2,75·e-0,5	3,35·e-0,6	4,47·e-0,6	0	0,19907938	0,398159	0,597238	0,79631754	0,008
0	-2,24·e-0,7	2,72·e-0,5	-7,2·e-0,7	-9,96·e-0,7	0	0,24787148	0,495743	0,743614	0,991485909	0,01
0	2,18·e-0,6	2,7·e-0,5	6,53·e-0,5	8,7·e-0,6	0	0,29602058	0,592041	0,888062	1,184082231	0,012
0	1,12·e-0,5	2,67·e-0,5	2,2·e-0,5	2,93·e-0,5	0	0,34340383	0,686808	1,030212	1,373615335	0,014
0	7,32·e-0,6	2,63·e-0,5	3,91·e-0,6	5,21·e-0,6	0	0,38989942	0,779799	1,169698	1,559597688	0,016
0	1,3·e-0,5	2,59·e-0,5	5,06·e-0,5	6,75·e-0,5	0	0,43538621	0,870772	1,306159	1,74154483	0,018
0	1,69·e-0,5	2,55·e-0,5	5,17·e-0,5	6,89·e-0,5	0	0,47974433	0,959489	1,439233	1,918977317	0,02
0	1,72·e-0,5	2,5·e-0,5	4,15·e-0,5	5,53·e-0,5	0	0,52285622	1,045712	1,568569	2,09142488	0,022
0	1,38·e-0,5	2,45·e-0,5	2,4·e-0,5	3,2·e-0,5	0	0,5646079	1,129216	1,693824	2,258431611	0,024
0	7,99·e-0,6	2,39·e-0,5	5,96·e-0,6	7,94·e-0,6	0	0,60489013	1,20978	1,81467	2,419560523	0,026

75

Таблица 4.2

Результаты вычислений величин информативного параметра устройства контроля

e	$r=e\omega^2/((k^2-\omega^2)+\mu^2+\omega^2)^{1/2}$	$r_1=1/(x^2+y^2)^2$	$r_2=1/(x^2+y^2)^2$	$r_3=1/(x^2+y^2)^2$	$r_4=1/(x^2+y^2)^2$	$r_5=1/(x^2+y^2)^2$
0	0	0	1,86603-e-05	2,78452-e-05	5,59609-e-05	7,46412-e-05
0,000005	3,07895-e-08	0	0,050098899	0,100197797	0,150296698	0,200395597
0,00001	6,1579-e-08	0	0,100065441	0,200130882	0,300196323	0,400261764
0,000015	9,23685-e-08	0	0,149768565	0,29953713	0,449305694	0,599074258
0,00002	1,23158-e-07	0	0,199079385	0,398158771	0,597238155	0,79631754
		0	0,247871477	0,495742955	0,743614432	0,991485909
		0	0,296020558	0,592041116	0,888061673	1,184082231
		0	0,343403834	0,686807688	1,030211501	1,373615335
		0	0,389899422	0,779798844	1,169698266	1,559597689
		0	0,435386208	0,870772415	1,306158624	1,741544831
		0	0,479744329	0,959486659	1,439232988	1,918977318
		0	0,52285622	1,04571244	1,56856866	2,091424881
		0	0,564607903	1,129215806	1,693823708	2,258431611
		0	0,604890131	1,209780262	1,814670392	2,419560523

76

$$\mu_a = \mu_r \mu_0 = B/H, \quad (5.1)$$

5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (ДАТЧИКА) УСИЛИЙ (МДУ)

Развитие рудничных подъемных установок идет по пути увеличения высоты подъема, грузоподъемности и скорости движения сосудов [77]. В настоящее время высота подъема уже превысила 2000 м, грузоподъемность сосудов возросла до 100 т, максимальная скорость подъема достигла 20 м/с. Имеются установки, в клетки которых перевозится 150 человек, разрабатаны клетки, которые вмещают 200 человек одновременно [74].

В связи с этим значительно повысились требования, предъявляемые к современным автоматизированным подъемным установкам, в частности к средствам управления, контроля и защиты, для обеспечения высокоэффективной, надежной и безопасной эксплуатации. Существующие средства контроля и защиты подъемов от аварийных режимов, связанных с движением сосудов в стволе (переподъем, превышение скорости, застревание и заклинивание сосуда и др.), не всегда в полной мере выполняют свои функции, что приводит к тяжелым авариям и часто к гибели людей [50, 51]. Требуется дальнейшее совершенствование всех средств повышения функциональной безопасности эксплуатации подъемных установок, в том числе аппаратов контроля и защиты.

Одновременно возникает необходимость в разработке автоматических систем регулирования режимов работы подъемных машин, в которых основными элементами, определяющими их качественную работу (быстродействие, малое значение статистической ошибки регулирования, надежность), являются и информационные устройства (датчики и преобразователи).

Перечисленным выше требованиям в полной мере отвечает разработанный нами магнитоанизотропный преобразователь усилий (МДУ).

Принцип действия магнитоупругого преобразователя основан на магнитоупорном эффекте [46–48, 51–70]. Как известно, если на намагниченный образец ферромагнитного тела воздействовать внешней механической силой, то тело деформируется, домены (области самопроизвольного намагничивания) изменяют свою ориентацию и индукция в материале изменяется. Явление имеет упругий характер. Если силу снять, то индукция примет прежнее значение. Поскольку абсолютная магнитная проницаемость вещества:

то при заданной напряженности H изменение индукции B эквивалентно изменению магнитной проницаемости.

Рассмотренное явление используется для преобразования механической силы в электрическую величину.

5.1. Математическая модель МДУ

Преобразователь усилий в общем случае строится по схеме, показанной на рис. 5.1а. Он состоит из корпуса 1, к которому одним концом прикреплена пружина 2; на второй (подвижный) ее конец действует сила F . С подвижным концом соединен преобразователь перемещения в электрическую величину или устройство отсчета 3. Конструктивные элементы датчика, к которым приложена сила, и устройство отсчета имеют некоторую массу 4.

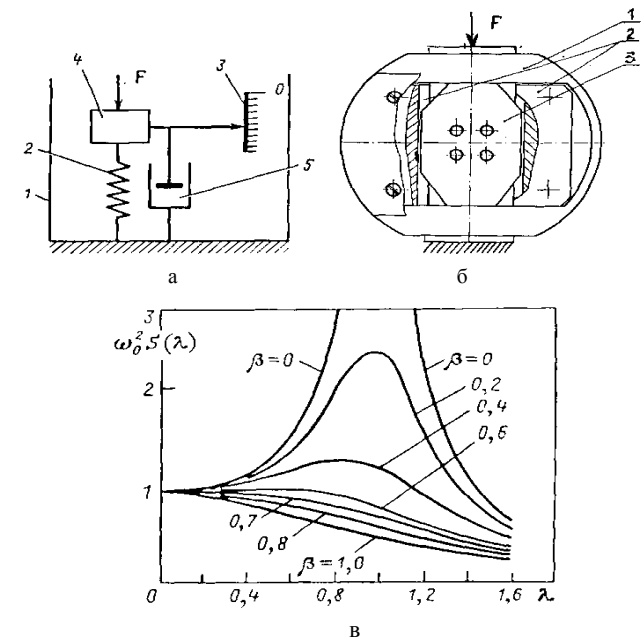


Рис. 5.1. Измерение динамических усилий магнитоанизотропным преобразователем (МДУ): а – принцип действия МДУ; б – модуль преобразователя; в – частотная характеристика.

В эту же массу входит приведенная масса подвижных деталей источника силы. Масса вместе с пружиной образует колебательную систему. Для улучшения ее динамических характеристик иногда вводят демпфер 5, создающий силу сопротивления, пропорциональную скорости движения.

Аналогичной схемой можно представить и датчик усилий МДУ (рис. 5.1б). Сила (F), прикладываемая к магнитоупругому элементу 3 равна:

$$F = K\sigma_n \cdot S, \quad (5.2)$$

где F – измеряемая сила, Н; K – коэффициент запаса прочности с учетом неравномерности нагружения, $K = 1,5-2$; σ_n – номинальная величина усредненной нагрузки, Па/м² (1 Па = $1,02 \cdot 10^{-4}$ тс/м², 1 тс = $9,81 \cdot 10^3$ Н); S – площадь поперечного сечения преобразователя, м².

Роль пружины 2 (рис. 5.1а) играет сам упругий элемент (рис. 5.1б). При измерении усилий магнитоанизотропный элемент деформируется и его линейные размеры изменяются. Это вызывает появление силы трения между элементом 3 и направляющими 2 корпуса 1, аналогичную силе, создаваемой демпфером. С учетом сказанного для анализа преобразователя усилий можно использовать схему датчика силы по рис. 5.1а.

Для определения динамических характеристик преобразователя составим и проанализируем дифференциальное уравнение движения его массы 4. Сила инерции $m\ddot{x}$ равна сумме приложенных сил:

$$m\ddot{x} = F(t) - Cx - k\dot{x}, \quad (5.3)$$

где $F(t) = \sigma_n(t)KS$ – изменяющаяся во времени измеряемая сила; Cx – сила упругости пружины; $k\dot{x}$ – сила демпфирования.

Из (5.3) получим: линейное дифференциальное уравнение, аналогичное уравнению акселерометра [73]:

$$m\ddot{x} + kx + Cx = F(t). \quad (5.4)$$

Введя вместо конструктивных параметров датчика m , k , C вибронные β и ω_0 , получим:

$$\ddot{x} + 2\beta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = F(t)/m. \quad (5.5)$$

Передаточная функция датчика:

$$K(p) = 1/[m(p^2 + 2\beta\omega_0 p + \omega_0^2)]. \quad (5.6)$$

Для получения выражения для комплексной чувствительности заменим оператор дифференцирования $p = d/dt$ на $j\omega$:

$$\underline{S}(j\omega) = \underline{X}/\underline{F} = 1/[m(\omega_0^2 - \omega^2 + 2j\omega\omega_0\beta)] = -1/[m\omega_0^2(\lambda^2 - 1 - 2j\lambda\beta)], \quad (5.7)$$

где $\lambda = \omega/\omega_0$ – относительная частота.

Амплитудно-частотная характеристика датчика силы (усилия) приведена на рис. 5.1в:

$$S(\lambda) = 1/\left[m\omega_0^2 \sqrt{(\lambda^2 - 1)^2 - 4\beta^2 \lambda^2} \right], \quad (5.8)$$

Требования, предъявляемые к датчикам силы и давления для измерения процессов, имеющих сложный частотный спектр, не отличаются от требований к датчику ускорения, предназначенному для измерения ускорения с таким же спектром [55, 73].

Опыт проектирования, изготовления и испытания магнитоанизотропных преобразователей позволил выявить некоторые недостатки существующих методик расчета их параметров, особенно в части электромагнитного расчета. Так, тенденция к повышению уровня выходного сигнала преобразователя путем увеличения ампервитков (особенно тока питающей обмотки), теоретически приводит к завышенным его значениям (на один – два порядка) и не подтверждается на практике.

Кроме этого, существенными факторами, влияющими на нелинейность градуировочной характеристики датчика, являются низкие значения частоты питающего напряжения, а также его отклонения от синусоидальной формы.

Указанные выше недостатки устранены при разработке и исследовании магнитоанизотропных преобразователей (датчиков) усилий МДУ–20, МДУ–300 (на 2, 30 тс соответственно) в виде рабочих модулей [75, 61–63], а также разработана методика расчета универсального электронного блока (ЭБ) с цифровым и аналоговыми стандартными выходами.

Испытания модулей МДУ совместно с ЭБ проведены на образцовых силоизмерительных машинах 5 и 200 тс в лабораториях Госстандарта Кыргызстана (г. Бишкек).

Расчет параметров МДУ–20 и МДУ–300 выполнен в соответствии с методикой [80] для сплава Х23Ю5.

5.2. Геометрический расчет параметров

Для МДУ-20 набираем модуль типа «б» [80], тогда его активная длина секции (ac) будет равна:

$$b_{2mc} = \frac{F_n \cdot 10^6}{K \cdot \delta_n \cdot a_c} \text{ мм}, \quad (5.9)$$

где F_n – номинальная нагрузка МДУ, тс; $K=1,2\dots 1,5$ – коэффициент запаса прочности; $\delta_n = 10200$ – номинальная величина усредненной нагрузки, тс/мм²; $a_c = 20$ – ширина секции одномодульного преобразователя, мм.

Следовательно,

$$b_{2mc} = \frac{2 \cdot 10^6}{1,22 \cdot 10200 \cdot 20} \approx 8 \text{ мм}. \quad (5.10)$$

Для МДУ-300 выбираем модуль «в» [61, 62], чувствительный элемент которого имеет прямоугольное сечение. В этом случае необходимо стремиться к равенству сторон активного сечения модуля и, следовательно, для квадратного сечения:

$$2ac = \sqrt{S_n}, \quad (5.11)$$

где S_n – номинальная площадь поперечного сечения секции преобразователя, мм².

Определим площадь поперечного сечения преобразователя для $K = 1,5$:

$$S_n = \frac{F_n \cdot 10^6}{1,5 \cdot \delta_n} = \frac{30 \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10200} = 1960,78 \text{ мм}^2. \quad (5.12)$$

Подставив значение (5.12) в формулу (5.11), найдем:

$$2ac = \sqrt{S_n} = \sqrt{1960,78} = 44,2 \text{ мм}. \quad (5.13)$$

Тогда активная длина секции модуля преобразователя будет равна:

$$b_{30mc} = \frac{S}{2ac} = \frac{1960,78}{44,2} = 49 \text{ мм}. \quad (5.14)$$

5.3. Электромагнитный расчет параметров

По результатам проведенных испытаний МДУ установлено, что с уменьшением магнитодвижущей силы первичной обмотки (I_1, W_1), когда ток обмотки питания составляет величину порядка нескольких десятков мА, – растет нелинейность градуировочной характеристики преобразователя [57]. Оптимальными, с точки зрения линейности, являются следующие диапазоны величин тока обмотки питания: $I_1=(5\dots 10)$ А; $W_1=(150\dots 250)$ витков; $(I_1 W_1) = (0,75\dots 2,5)$ А. В изготовленных образцах модулей преобразователей принято $W_1=200$ витков. Снижение величины тока в обмотке питания способствует также повышению стабильности и повторяемости выходной характеристики преобразователя, упрощению принципиальной схемы питающего генератора (в части автоматической регулировки амплитуды выходного напряжения), его мощности и т.д. [57, 61–63] Кроме того, возникают благоприятные условия для отвода тепла от преобразователя и отсутствует необходимость увеличения плотности тока в обмотке возбуждения, которую следует принимать в пределах $I = (150\dots 300)$ мА/мм². В нашем случае принято $I=240$ мА/мм².

Рассчитаем ток в первичной (питающей) обмотке преобразователя для средней величины рекомендуемого нами диапазона ампервитков, т.е. для $I_1 W_1=1,5$ А:

$$I_1 = \frac{1,5}{200} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 7,5 \text{ мА}. \quad (5.15)$$

Необходимый диаметр провода первичной обмотки для средней величины рекомендуемого диапазона плотности тока составит:

$$d = 1,13 \sqrt{\frac{I_1}{I}} = 1,13 \sqrt{\frac{7,5}{240}} \approx 0,2 \text{ мм}. \quad (5.16)$$

Обмоточный провод выбираем типа ПЭВ как для первичной, так и для вторичной (выходной) обмоток преобразователя.

Напряжение питания преобразователя рассчитаем из условия получения необходимого магнитного потока величины индукции. Для сплава Х23Ю5 в рекомендуемом диапазоне $B_{cp} = (3 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-3})$ Т. Примем для МДУ-20 $B_{cp2mc} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ Т, а для МДУ-300 – $B_{cp30mc} = 3,4 \cdot 10^{-4}$ Т.

Кроме того, рекомендуемый диапазон частот [63] питающего напряжения целесообразно принимать в пределах $f_n=(10000\dots 11000)$ Гц, для которого среднее значение равно $f_n=10500$ Гц=10,5 кГц.

Напряжение питания U_1 преобразователя определим по формуле $U_1 = (4,44 \cdot W_1 f_n \cdot B_{cp} \cdot S_o \cdot n) 10^{-6}$ В, где $S_o = B_c(\sqrt{2D} - d)$ – площадь магнитопровода, охватываемая первичной обмоткой, мм²; n – число секций (модулей) в преобразователе (в нашем случае для всех МДУ $n=1$).

Для МДУ–20 и МДУ–300 площади S_o магнитопровода соответственно равны:

$$S_{2mc} = 8(\sqrt{2 \cdot 12} - 6) = 8,776 \text{ мм}^2; \quad (5.17)$$

$$S_{30mc} = 49(\sqrt{2 \cdot 14} - 7) = 6.272 \text{ мм}^2. \quad (5.18)$$

Подставив значения (5.17), (5.18) и принятые выше значения магнитной индукции и частоты в (5.16), получим: величины напряжения питания первичных обмоток соответствующих преобразователей:

$$U_{1\ 2mc} = (4,44 \cdot 200 \cdot 10500 \cdot 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 8,776) 10^{-6} = 2\text{В}; \quad (5.19)$$

$$U_{1\ 30mc} = (4,44 \cdot 200 \cdot 10500 \cdot 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 6,272) 10^{-6} = 2\text{В}. \quad (5.20)$$

Вторичная обмотка так же, как и первичная, содержит 100+100 = 200 витков провода типа ПЭВ – 0,2 мм. Одинаковое количество витков первичной и вторичной обмоток предполагает их взаимозаменяемость (универсальность), а секционирование вторичной (выходной, измерительной) обмотки предусматривает использование преобразователей с балансowymi схемами обработки измерительной информации [70].

Выходной сигнал преобразователя при полной удельной нагрузке определим как:

$$U_2 = K_n(I_1 W_1) j_n \cdot W_2 \cdot n \cdot \xi, \text{ мВ}, \quad (5.21)$$

где $K_n=1$ – коэффициент подобия; $j_n = 17,5$ мВ/А – чувствительность сплава Х23Ю5; $n = 1$ – число модулей (секций); $\xi = (9 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2})$ – коэффициент, учитывающий общие потери в магнитопроводе (меньшие значения коэффициента относятся к МДУ-300, большие к МДУ-20).

Таким образом, выходной сигнал МДУ-20 и МДУ-300:

$$U_{2\ 2mc} = 1 \cdot 1,5 \cdot 17,5 \cdot 200 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 10^{-2} \approx 160 \text{ мВ}, \quad (5.22)$$

$$U_{2\ 30mc} = 1 \cdot 1,5 \cdot 17,5 \cdot 200 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 10^{-3} \approx 47 \text{ мВ}. \quad (5.23)$$

По результатам проведенного расчета геометрических и электромагнитных параметров преобразователей на 2 и 30 тс разработана конструкторская документация для изготовления модулей [62] для работы в тяжелых условиях ствола шахты на клетки ПУ [63].

5.4. Экспериментальное исследование МДУ на образцовой силоизмерительной машине

Модули МДУ-20 (4 шт.) и МДУ-300 (2 шт.) с чувствительными элементами из сплава Х23Ю5 были изготовлены в ЭКБ при ФПИ (рис. 5.2). Электрическая схема подключения обмоток (питающей и измерительной) к разъему МДУ аналогична приведенной в [62].

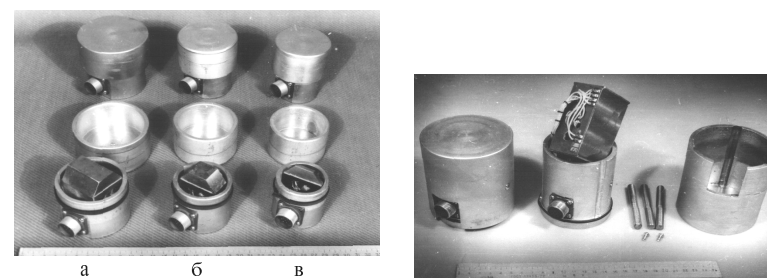


Рис. 5.2. Магнитоанизотропный датчик усилий (МДУ): а – 100 кН; б – 50 кН; в – 20 кН; г – 300 кН.

Каждый из изготовленных модулей имеет свой номер, указанный на корпусе. Так МДУ-20 имеют следующую нумерацию: МДУ-20-1, МДУ-20-2, МДУ-20-3, МДУ-20-5, соответственно МДУ-300 – МДУ-300-1, МДУ-300-2.

Программа и методика проведения испытаний МДУ включала в себя получение градуировочных характеристик, отражающих зависимость выходного переменного напряжения от приложенного усилия, на образцовых второго разряда силоизмерительных машинах Госстандарта КР по схеме, представленной на рис. 5.3 [62]. Обработанные результаты измерений (с учетом определения погрешности по ГОСТ [61]) приведены в протоколах [57, 62].

В программу испытаний МДУ-300-2 также входило получение результатов измерения выходного сигнала с увеличенным количеством витков питающей обмотки. Сопротивления обмоток преобразователей постоянному току соответственно равны: в МДУ-20 питающая обмот-

ка – 70 Ом, измерительная – 8 Ом. В МДУ-300-2 в эксперименте с 400 витками питающая обмотка имела сопротивление 50 Ом. Масса модулей: МДУ-20 – 1,4 кг, МДУ-300 – 3,5 кг.

Для пересчета значений, выраженных в килоньютонах (при испытаниях на машине образцовой ОСМ–2–200) в тонну–силу, использовалась пропорция: 10 кН – 1,0197 тс.

Анализ результатов измерения выходного сигнала МДУ-20 и МДУ-300 [62] показал, что наибольшую погрешность (от нелинейности) преобразователи имеют на начальном участке, обусловленную главным образом малым током возбуждения и вследствие этого низкой начальной чувствительностью сплава. Однако с увеличением нагрузки погрешность уменьшается и становится минимальной при предельных расчетных значениях.

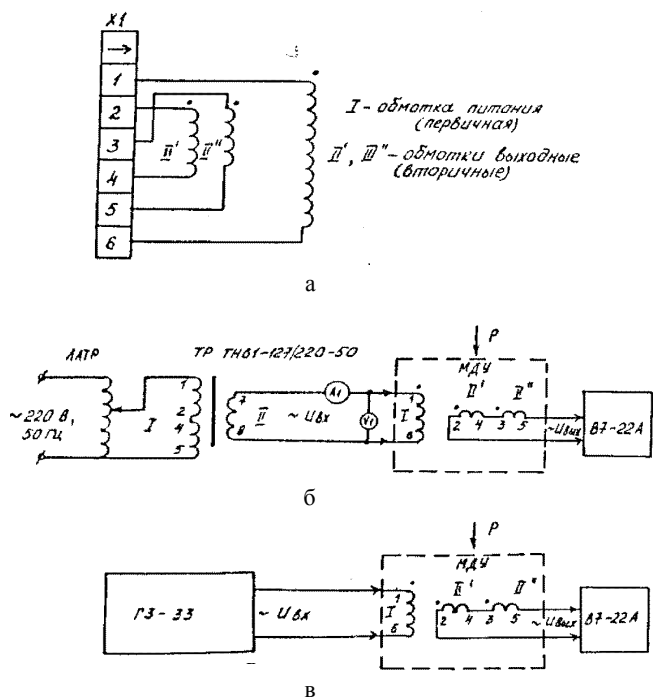


Рис. 5.3. Схемы подачи питания на МДУ для снятия градуировочной характеристики: а – электрическая схема МДУ; б – от источника промышленной частоты; в – от генератора синусоидальных колебаний.

5.5. Разработка универсального электронного блока (ЭБ) МДУ

Устройства, входящие в магнитоанізотропный силоизмеритель [59, 61, 62], должны обеспечивать правильное приложение измеряемой нагрузки к преобразователю, преобразование измеряемой нагрузки в электрический сигнал, обработку электрического сигнала для придания ему стандартного вида, индикацию и регистрацию измеряемого усилия, питание преобразователя и остальных устройств, электрическую защиту и сигнализацию.

Общий подход к построению электронной части преобразователя усилий изложен в [59, 61, 62]. Так как в большинстве практических случаев измерения проводятся двумя и более преобразователями, рассматривается вариант схемы с использованием двух преобразователей. Как правило, силоизмеритель питается от сети переменного тока напряжением промышленной или повышенной (400 Гц) частоты. Если оба преобразователя нагружаются одновременно и одинаковыми усилиями, то для уменьшения числа элементов схемы первичные обмотки преобразователей соединяются последовательно и питаются от общей обмотки понижающего трансформатора. Тем не менее, раздельное питание в большинстве случаев является предпочтительным, так как при выходе из строя одного из преобразователей о ходе процесса можно судить, хотя и менее достоверно, по показаниям другого.

В преобразователе измеряемое усилие как бы модулирует питающее напряжение, ответвляя ту или иную, в соответствии с величиной измеряемой силы, долю во вторичную обмотку. Это в данном случае и является преобразованием усилия в электрический сигнал. Этот сигнал подается на электрический фильтр низкой частоты, который выделяет из него первую гармонику. Напряжение первой гармоники демодулируется фазочувствительным выпрямителем. Благодаря применению фазочувствительного выпрямителя (ФЧВ) обеспечивается стабильность преобразования сигналов малых уровней, и градуировочная характеристика на выходе ФЧВ становится монотонной, т.е. изменяющейся лишь в сторону увеличения, даже при использовании магнитоанізотропных преобразователей с V-образной градуировочной характеристикой. Для управления работой ФЧВ используется фазовращающее устройство, позволяющее обеспечить необходимую синфазность открытия ключей в выпрямителе с измеряемым сигналом. На выходе демодулятора устанавливается сглаживающий фильтр. Устройство компенсации начального сигнала позволяет настраивать выходное напряжение датчика при отсутствии нагрузки, подлежащей измерению. Это устройство позволяет компенсировать

ровать сигнал датчика, возникший как вследствие начальной анизотропии материала, так и от нагружения датчика «тарой». В силоизмерительное устройство обычно входят показывающие приборы, инфицирующие нагрузку на каждом из преобразователей, а также сумму и разность нагрузок. В ряде случаев устанавливают регистрирующие приборы, а также релейные устройства, вырабатывающие сигнал при нагружении преобразователя выше определенного уровня. Этот сигнал может включать сигнальные либо управляющие устройства. Стандартный сигнал, пропорциональный измеряемому усилию, может быть использован в системах автоматического управления.

Практические электрические схемы магнитоанізотропных силоизмерителей представлены в [59, 61, 62].

Принципиальная схема разработанного универсального электронного блока (ЭБ) магнитоанізотропного датчика усилий (МДУ) приведена в Приложении на рис. П5.1–П5.6.

5.5.1. Методика расчета

Порядок расчета необходимо начинать с определения коэффициентов передачи каждого каскада весоизмерительного устройства с цифровым выходом, включающего в себя АЦП на микросхеме КР572ПВ2А (см. рис. П5.5).

Поскольку необходимо использовать максимальную чувствительность АЦП при преобразовании аналогового сигнала, то в этом случае выходное напряжение усилителя-преобразователя (см. рис. П5.2) будет равно:

$$U_{np} = 200,0 \text{ мВ.} \quad (5.24)$$

Необходимый коэффициент передачи усилителя-преобразователя найдем из соотношения

$$K_{необх} = \frac{U_{np}}{\Delta U_{ex1}}, \quad (5.25)$$

где $\Delta U_{ex1} = U_{ex1max} - U_{ex1min}$; U_{ex1min} – минимальное напряжение измерительного сигнала МДУ, соответствующее нулевому усилию; U_{ex1max} – максимальное напряжение измерительного сигнала МДУ, соответствующее номинальному усилию.

Определяется или принимается коэффициент передачи каскада преобразователя переменного напряжения в постоянное (каскад на операционном усилителе DA4, (см. рис. П5.2).

Как правило, принимают:

$$K_{np} = 1. \quad (5.26)$$

В случае, если $K_{np} \neq 1$, то его определяют экспериментально, подав на вход усилителя синусоидальный сигнал с амплитудой $U_{ex2} \leq 190 \text{ мВ}$ и при подключенных цепях компенсации (см. рис. П5.3), измеряя отдельно положительный и отрицательный сигнал на выходе преобразователя.

Далее, взяв отношение:

$$K_{np} = \frac{2 \cdot U_{изм}}{U_{ex2}}, \quad (5.27)$$

определяют коэффициент передачи преобразователя.

Находим коэффициент передачи усилителя переменного напряжения каскад на операционном усилителе DA3, (см. рис. П5.2):

$$K_1 = \frac{K_{необх}}{K_{np}}. \quad (5.28)$$

В случае, если $K_{np} = 1$, то $K_1 = K_{необх}$.

Далее, исходя из конкретных значений U_{ex1min} U_{ex1max} ... ΔU_{ex1} определяем необходимые напряжения на выходе DA3, с учетом коэффициента передачи (5.28).

$$\left. \begin{aligned} U_{вых2min} &= K_1 U_{ex1min}; \\ \Delta U_{вых2} &= K_1 \Delta U_{ex1}; \\ U_{вых2max} &= K_1 U_{ex1max}. \end{aligned} \right\} \quad (5.29)$$

5.5.2. Принципиальная схема

Принципиальная схема ЭБ (см. рис. П5.1–П5.6) [62] состоит из генератора (см. рис. П5.1), выполненного на операционных усилителях (ОУ) DA1, DA2 и транзисторах VT1...VT4 с параметрической стабилизацией амплитуды при помощи EL1. Генератор обеспечивает амплитуду выходного синусоидального сигнала напряжением до 8 В с частотой 10,5 кГц на комплексной нагрузке от 100 до 2000 Ом.

Усилитель-преобразователь (см. рис. П5.2) состоит из усилителя переменного напряжения, выполненного на ОУ DA3 с регулируемым коэффициентом передачи и собственно преобразователя переменного напряжения в постоянное на ОУ DA5 (измерительный канал аналоговый и пороговый).

Цифровой узел (см. рис. П5.3) содержит элементы цепей термостабильной компенсации, имеющих выходы a1, a2 (для цифровой части)

и ϵ_1, ϵ_2 (для аналоговой части). Кроме этого, узел содержит термостабильный каскад образцового напряжения на элементах $VD12, VT5, VD11, VT6$ для АЦП на микросхеме $DA6$. Нагрузкой АЦП являются цифровые индикаторы (4 разряда).

Усилитель стандартных аналоговых выходов (см. рис. П5.4) (напряжения 0...1 В или 0...10 В и тока 0...5 мА) построен соответственно на ОУ $DA8$ и ОУ $DA9$. ОУ $DA7$ является буферным.

Пороговый узел (см. рис. П5.5) содержит схемы «верхний порог» и «нижний порог», выполненные идентично на ОУ $DA10$ ($DA11$) и транзисторных $VT7, VT8$ ($VT9, VT10$), нагрузкой которых являются реле $K1$ ($K2$) с элементами индикации на светодиодах $VD14$ ($VD16$). Переключающиеся контакты $K1.1, K1.2$ ($K2.1, K2.2$) могут быть использованы в системе автоматического управления, контроля, сигнализации и т.д. Кроме этого, возможен режим работы узла с открытым коллектором.

Блок питания (см. рис. П5.6) формирует необходимые напряжения +16 В, ±12 В, ±5 В, +4,5 В при помощи соответствующих стабилизаторов, питаемых от выпрямителей $DD1$ и $DD2$. Мощность, потребляемая блоком питания от сети 220 В 50 Гц, не превышает 10 Вт.

Методика настройки универсального ЭБ для работы с любым МДУ сводится к следующему. По данным градуировочных таблиц [62] выбранного типа и номера МДУ, по средним значениям предварительно вычисляются коэффициенты ϵ_0 и ϵ_1 линейного приближения по формулам [71, 72, 78, 79]:

$$y = \epsilon_0 + \epsilon_1 x, \quad (5.30)$$

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i - N \sum_{i=1}^N x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N x_i^2} \\ \epsilon_0 &= \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N y_i - \epsilon_1 \sum_{i=1}^N x_i \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.31)$$

где y – выходной сигнал МДУ; x – усилие, прикладываемое к МДУ; N – заданное количество значений функции $y_i = f(x_i)$ в диапазоне нагрузок МДУ; y_i, x_i – текущие значения выходного сигнала МДУ и прикладываемых усилий к МДУ.

При помощи (5.30), (5.31) с минимальной погрешностью линейрируются экспериментальные градуировочные данные (средние значения), что позволяет правильно настроить ЭБ всего лишь по двум парам координатных точек линии (5.30), соответствующих минимальному и максимальному уровням сигнала (при нулевом и номинальном усилениях, прикладываемых к МДУ).

После вычисления коэффициентов и подстановки их в уравнение (5.30), получим:

$$\left. \begin{aligned} U_{exlmin} &= y_{min}, \text{ при } x = F_o = 0; \\ U_{exlmax} &= y_{max}, \text{ при } x = F_n. \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

Далее процесс настройки ЭБ выполняется в соответствии и на основании рассчитываемых значений коэффициентов передачи, получаемых по методике, изложенной выше.

Для облегчения вычисления коэффициентов уравнения (5.30) по формулам (5.31) можно воспользоваться программой расчета [70, 71], составленной для программируемого микрокалькулятора типа БЗ–34 (Прил. 2).

Покажем процесс расчета и настройки ЭБ при использовании конкретного датчика, например МДУ-20-1 (рис. 5.4). Согласно данным [62] вычислим средние значения показаний датчика при прямом и обратном ходах, а также их общие средние значения в диапазоне нагрузок 0...2000 кгс. Результаты расчетов представлены в табл. 5.1.

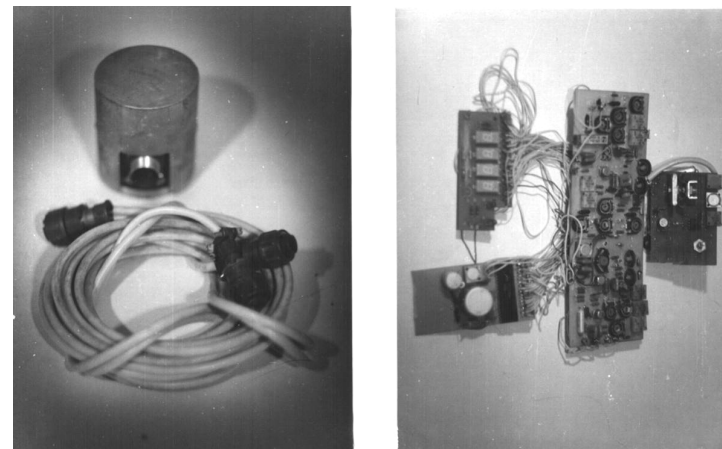


Рис. 5.4. МДУ с электронным преобразователем сигнала.

Таблица 5.1

Результаты расчетов средних значений показаний МДУ-20-1

№№ п/п	Нагрузка, кгс (x_i)	Прямой ход	Обратный ход	Прямой и обратный ходы $E_{обц,j}$, мВ
		$E_{пр,j}$, мВ	$E_{обр,j}$, мВ	
1	0	75,2	75	75,1
2	200	79,1	78,5	78,8
3	400	83	81,9	82,5
4	600	86,8	85,4	86,1
5	800	90,4	89,1	89,8
6	1000	94,1	92,9	94,5
7	1200	97,8	96,9	97,4
8	1400	101,5	101	101,3
9	1600	105,3	105	105,2
10	1800	108,8	108,8	108,8
11	2000	112,2	112,2	112,2

Таким образом, $y_i = f(x_i)$ задана $N = 11$ значениями $y_i(x_i)$: 75,1(0); 78,8(200); 82,5(400); 86,1(600); 89,8(800); 93,5(1000); 97,4(1200); 101,3(1400); 105,2(1600); 108,8(1800); 112,2(2000).

После ввода программ расчета и данных в МК, последовательно получим: $\epsilon_j=0,0187$, $\epsilon_{ц}=74,99 \approx 75,0$. Таким образом,

$$y=75,0+0,0187x, \quad (5.33)$$

или в виде табл. 5.2.

Таблица 5.2

Расчетные значения по зависимости (5.33)

x	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
y	75,0	78,7	82,4	86,2	90,0	93,7	97,4	101,2	104,9	108,7	112,4

Из полученного выражения (5.33) с учетом условия (5.32) определим значения настроечных и расчетных параметров:

$$\left. \begin{aligned} U_{\hat{\alpha}\hat{\delta}1\min} &= 75,0 \text{ i}\hat{A}, \\ U_{\hat{\alpha}\hat{\delta}1\max} &= 112,4 \text{ i}\hat{A}. \end{aligned} \right\} \quad (5.34)$$

Найдем диапазон изменения входного напряжения при изменении нагрузки в пределах 0...2000 кгс:

$$\Delta U_{\text{ex1}} = U_{\text{ex1max}} - U_{\text{ex1min}} = 112,4 - 75,0 = 37,4 \text{ мВ}. \quad (5.35)$$

Определим необходимый коэффициент передачи согласно выражения (5.25) с учетом (5.24):

$$K_{\text{необх}} = \frac{200,0}{37,4} = 5,34. \quad (5.36)$$

Полагая, что выполняется равенство (5.26), найдем передаточный коэффициент усилителя переменного напряжения:

$$K_1 = K_{\text{необх}} = 5,34. \quad (5.37)$$

Наконец, с учетом (5.29) и (5.34–5.37) определим:

$$\left. \begin{aligned} U_{\hat{\alpha}\hat{\delta}2\min} &= 5,34 \cdot 75,0 = 401,1 \text{ мВ}; \\ \Delta U_{\hat{\alpha}\hat{\delta}2} &= 5,34 \cdot 37,4 = 200,0 \text{ мВ}; \\ U_{\hat{\alpha}\hat{\delta}2\max} &= 5,34 \cdot 112,4 = 601,1 \text{ мВ}. \end{aligned} \right\} \quad (5.38)$$

Суммарная погрешность МДУ совместно с ЭБ может быть рассчитана по формуле [61, 62]:

$$\pm \Delta = \left| \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{U_{\text{ex1max}}} \right| \cdot 100\%, \quad (5.39)$$

где δ_{\max} – максимальное отклонение градуировочной характеристики; $U_{\text{МДУ}} = f(P)$ от настроечной прямой $y = \epsilon_o + \epsilon_{1x}$; δ_{\min} – ордината настроечной прямой, по которой производится отсчет отклонения; U_{ex1max} – максимальное значение настроечной прямой, соответствующее $x = F_{\text{н}}$.

В соответствии с (5.39) суммарная погрешность МДУ-20-1 и ЭБ в градуировочных точках характеристики будет иметь значения, представленные в табл. 5.3.

Как следует из анализа данных табл. 5.3, максимальная расчетная суммарная погрешность МДУ-300-1 совместно с ЭБ не превышает $\pm \Delta = 0,26\%$, или $\pm 5,33$ кгс. Следовательно, МДУ-300-1 совместно с ЭБ соответствует динамометру 3-го разряда [62].

Аналогично вышеизложенному, при использовании совместно с ЭБ датчика, например МДУ-300-1, вычислим средние значения его показаний (согласно данным [62]) в диапазоне нагрузок 0...300 кН ($\approx 0...30$ тс). Результаты расчетов представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.3

Значения суммарных погрешностей МДУ

F , кгс	$E_{общ}$, мВ	U_{ax} , мВ	$\% \Delta \pm$
0	75,1	75	0,08
200	78,8	78,8	0,17
400	83,5	82,4	0,08
600	86,1	86,2	0,08
800	89,8	90	0,17
1000	93,5	93,7	0,17
1200	97,4	97,4	0
1400	101,3	101,2	0,08
1600	105,2	104,9	0,26
1800	108,8	108,7	0,08
2000	112,2	112,4	0,17

Таблица 5.4

Результаты расчетов средних значений показаний МДУ-30-1

№№ п/п	Нагрузка, кН(x_i)	Прямой ход $E_{пр. j}$, мВ	Обратный ход $E_{обр. j}$, мВ	Прямой и обратный ход $E_{общ. j}$, мВ (y_i)
1	0	29	28,5	28,8
2	30	29,7	29,1	29,4
3	60	31,08	31,1	31,5
4	90	34	33,2	33,6
5	120	36,1	35,2	35,7
6	150	38,1	37,2	37,7
7	180	40	39,2	39,6
8	210	41,8	41,2	41,5
9	240	43,8	43,1	43,5
10	270	45,4	45,1	45,3
11	300	47,1	47,1	47,1

Настроечная характеристика для МДУ-300-1 будет иметь вид:

$$y = 28,0 \pm 0,0638x \quad (5.40)$$

или в виде табл. 5.5.

Таблица 5.5

Расчетные значения по зависимости (5.40)

x	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
y	28,0	29,9	31,9	33,8	35,7	37,6	39,5	41,4	43,4	45,3	47,2

В соответствии с (5.39) суммарная погрешность МДУ-300-1 и ЭБ в градуировочных точках характеристики будет иметь значения, представленные в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Значения суммарных погрешностей МДУ

P , кгс	$E_{общ}$, мВ	U_{axj} , мВ	$\% \Delta \pm$
0	28,8	28	1,69
30	29,4	29,9	1,05
60	31,5	31,9	0,84
90	33,6	33,8	0,42
120	35,7	35,7	0
150	37,7	37,6	0,21
180	39,6	39,5	0,21
210	41,5	41,4	0,21
240	43,5	43,4	0,21
270	45,3	45,3	0
300	47,1	47,2	0,21

Анализ данных табл. 5.6 показывает, что максимальная расчетная суммарная погрешность МДУ-300-1 совместно с ЭБ при нулевом нагружении равна $\pm \Delta = 1,69\%$ и после 10% нагружения и далее значительно уменьшается и после 50% нагружения не превышает $\pm \Delta = 0,21\%$ или $\pm 0,63$ кН $\approx 64,2$ кгс.

Таким образом, если МДУ предварительно нагрузить «тарой», составляющей 10...20% номинального усилия, то погрешность МДУ-300-1 может быть снижена вплоть до $\pm \Delta \leq 0,21$, что также будет соответствовать динамометру 3-го разряда [62]. Кроме того, поскольку любой из МДУ допускает перегрузку до 15...20%, можно сместить диапазон изме-

ряемых нагрузок в сторону увеличения и ликвидировать начальную относительно большую погрешность.

На принципиальной схеме ЭБ (рис. П5.1...П5.6) показаны следующие элементы регулировки и переключений: *R16* – амплитуда и форма синусоидального напряжения на выходе генератора; *R24, R2* – коэффициент передачи ОУ ОА3; *SA1* – переключатель «измерение – порог»; *R40* – коэффициент передачи ОУ ОА4; *R51, R56* – компенсация в цифровом измерительном канале – «грубо»; *R50, R55* – то же – «точно»; *R62, R66* – компенсация в аналоговом и пороговом измерительном канале – «грубо»; *R61, R65* – то же – «точно»; *R70* – установка и опорное напряжение +100 мВ; *SA2* – контроль работоспособности АЦП – «1888»; *R* – резисторы запятой индикаторов *HG1...HG4*; *R96* – стандартное выходное напряжение – «грубо»; *R95* – то же – «точно»; *R97* – стандартный выходной ток – «грубо»; *R98* – то же – «точно»; *R111* – верхний порог ограничения измеряемых усилий – «грубо»; *R112* – то же – «точно».

Аналогичные потенциометры «грубо» и «точно» – нижнего порога ограничения «измеряемых усилий»; *K1, VD14* (красный) – «верхний порог»; *K2, VD15* (зеленый) – «нижний порог»; *SA5* – включение сети 220 В, 50 Гц.

Изложенные выше методики расчета и настройки являются предварительными. Окончательно ЭБ настраивают следующим образом.

Подстроечным резистором *R72* выставляют напряжение около 100 мВ (контролируют вольтметром типа В7–22А). Далее, соединив неинвертирующий вход *DA4* (грубо – подстроечным резистором *R38*, точно – резистором *R37*). Затем, подав на неинвертирующий вход *DA4* напряжение амплитудой 190 мВ, резистором *R40* устанавливают такое же показание на индикаторах мультиметра. Уменьшая входное напряжение в несколько раз, следует проверить линейность преобразователя. Далее, подключая цепи компенсации (при нулевом компенсирующем напряжении), следует еще раз выставить резистором *R40* напряжение также на индикаторах АЦП, что и на входе преобразователя. Подав напряжение питания с генератора на МДУ равное 2 В, и соединив его измерительную обмотку со входом ОУ *DA8*, в точках *a1* и *a2* схемы контролируют вольтметром одинаковые уровни напряжений (должны соответствовать расчетным), подлежащих компенсации отдельно в точках *a1* и *a2*, резисторами *R51, R56* (*R50, R55*); *R62, R66* (*R61, R65*).

После компенсации начального напряжения МДУ в цифровом и аналогово-пороговом каналах вновь добиваются (регулировкой *R31* (*R30*) или *R32*) показаний на индикаторах АЦП такого же напряжения, что и на входе *DA4*, соответствующего расчетному для максимальных

усилий используемого МДУ, т.е. должно выполняться соответствие настроечных напряжений, подаваемых на вход *DA4* и индицируемых на АЦП усилий (с учетом данных табл. 5.2 или 5.5).

При необходимости процесс настройки повторяют несколько раз, а окончательного (точного) соответствия в крайних точках измеряемого диапазона усилий добиваются подстроечным резистором *R70*. Правильно настроенный цифровой измерительный канал при работе с МДУ-20 индицирует нагрузки с точностью до 1 кгс. Аналоговые стандартные выходы напряжения (*DA8*) и тока (*DA9*) настраивают соответствующими резисторами *R96* (*R95*) и *R97* (*R98*). Настройку порогового устройства (*DA10, DA11*) осуществляют путем переключения тумблера *SA1* положение «порог» и регулировкой при помощи резистора *R32* и подстроечных резисторов «верхнего» и «нижнего» порогов, необходимого ограничения (срабатывания реле *K1 K2*), с индикацией процесса настройки на цифровом дисплее АЦП.

5.6. Аппаратура универсальной системы контроля перегруза, напуска каната, массы груза в клетки

5.6.1. Геометрический и электромагнитный расчет МДУ на 75 тс

В соответствии с техническим заданием на разработку аппаратуры (входящей в систему СТАРТ) [63] для клетового подъема шахты «Восточная» ХПК, расчет параметров магнитоанізотропного преобразователя чувствительного элемента выполнен по методике [61, 62, 70, 80] для сплава Х23Ю5.

Расчетные данные для МДУ на 7,5 тс (75 кН), рис. 5.5 сведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Расчетные параметры МДУ 75 кН

Ном. напр. $F_{\text{н}}$, кН	Тип модуля	Длина секции b_c , мм	Ток перв. обм-ки I_1 , мА	Напряжение U_1 , В	Кол. витк. W_1	Напряжение $U_{2\text{max}}$, мВ	Кол. витк. W_2	Частота пит. ген., кГц	Диаметр провода d , мм
75	«б»	30	7,5	2	200	470	200	10,5	0,2

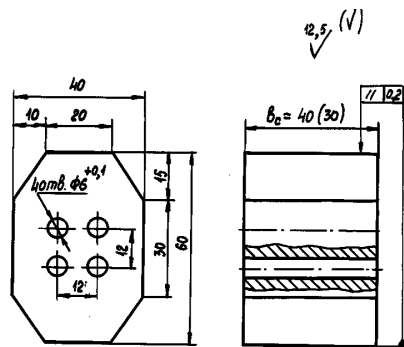


Рис. 5.5. Чувствительный элемент преобразователя усилий на 75 кН.

5.6.2. Разработка электронной аппаратуры

Общий подход к построению электронной части преобразователя усилий приведен в [61, 69]. В большинстве практических случаев измерение усилий проводится двумя и более преобразователями, поэтому рассматривается вариант схемы с использованием одного, двух, трех (и при необходимости расширения условий измерения – четырех) преобразователей.

Согласно структурной схеме (рис. 5.6) электронная аппаратура состоит из двух комплектов: первый – комплект аппаратуры ствольной (КАС) и второй – комплект аппаратуры поверхностный (КАП). Расшифровка условных наименований на блок-схеме (см. рис. 5.5) следующая: Г – генератор питания датчиков; ДУК1...ДУК3 – датчики усилий каната; ББП – батарейный блок питания; АКК – аккумулятор; УПС1, УПС2 – усилительно-преобразовательная схема; УСУ – усилительно-суммирующее устройство; УП – усилитель-преобразователь; ПНЧ – преобразователь напряжение–частота; ПУ – пороговое устройство; ИМ, ПК, НК – сигналы измерения массы, перегруза, напуска каната; УСМ – усилитель-смеситель; М – модулятор; ПЕРУ – передающее устройство; ПРИУ – приемное устройство; СБП – сетевой блок питания; ФИМ, ФПК, ФНК – фильтры сигналов ИМ (измерение массы), ПК (перегруза каната), НК (напуска каната); ЧАСТ – частотомер; СПК – сигнализация перегруза каната; СНК – сигнализация напуска каната; АЛУ – арифметическое устройство; ИНД-1 – индикатор общей массы (массы груза, вагонетки, клетки); ИНД-2 – индикатор массы груза в вагонетке; ИНД-3 индикатор суммы массы груза; ЛС – линия связи.

Принципиальные схемы блоков и узлов аппаратуры показаны на рис. П5.7–П5.17 Приложения 3, при этом на рис. П5.7–П5.12 – принци-

пиальные схемы комплекта аппаратуры КАС, а на рис. П5.13–П5.17 – принципиальные схемы комплекта аппаратуры КАП.

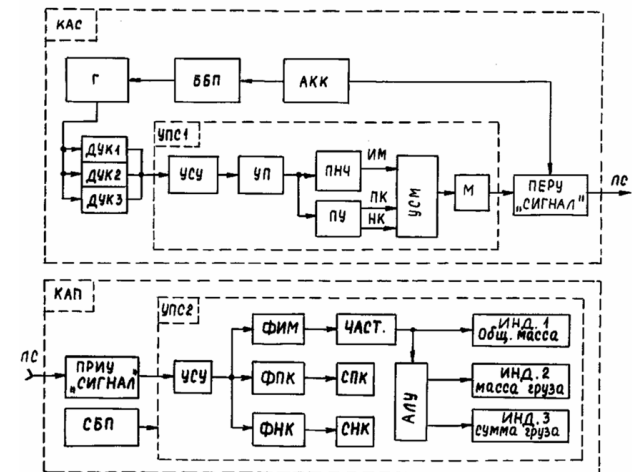


Рис. 5.6. Блок-схема аппаратуры контроля перегруза, напуска каната, измерения массы.

5.6.3. Комплект аппаратуры ствольной (КАС)

Согласно принципиальной схеме (рис. П5.7) генератор выполнен на двух микросхемах DA1, DA2 и четырех транзисторах VT1...VT4 и предназначен для питания преобразователей (датчиков) усилий каната (ДУК).

Измерительные сигналы от ДУК поступают на вход усилителя-сумматора (рис. П5.8), выполненного на микросхеме DA3, где происходит их масштабирование (усиление) с суммированием всех трех (четырёх) измерительных сигналов. Далее совокупный сигнал подается на усилитель-преобразователь с токовым выходом (рис. П5.9), выполненный на микросхемах DA4...DA6 и предназначенный для преобразования переменной составляющей измерительного сигнала в стандартные (токовый и напряжения сигналы). Стандартный сигнал напряжения поступает на схему порогового узла напуска и перегруза головного каната (рис. П5.11), выполненного на интегральных компараторах DA7, DA8, где формируются сигналы о перегрузе и напуске каната путем включения соответствующих модулирующих генераторов (микросхемы DD1, DD2, транзисторы VT5, VT6). При этом стандартный токовый сигнал

воздействует на схему ПНЧ (рис. П5.10) (микросхемы *DA9, DA10, DA22, DD4*, транзисторы *VT7, VT8*), которая формирует частотный сигнал «*d*» смесителя (рис. П5.10), выполненного на микросхеме *DA12*. На входы «*e*», «*ж*», «*к*» смесителя (также подаются частотные сигналы от соответствующих генераторов (см. рис. П5.9, П5.10) – перегруза, напуска и поднесущей частоты. Таким образом, частотные сигналы массы груза, напуска, перегруза и поднесущей с выхода смесителя воздействуют на модулятор *VT10*, который воздействует на передающее устройство аппаратуры КОНТУР (системы СТАРТ).

Питание всех блоков КАС осуществляется от аккумуляторной батареи (типа ЭШНКП-10БУ5 напряжением 3,75 В) через преобразователь напряжения ББП (рис. П5.12), который выполнен на транзисторах *VT1...VT6* по известной схеме.

5.6.4. Комплект аппаратуры поверхностный (КАП)

Поступивший по линии связи (ЛС) (см. рис. 5.5) высокочастотный сигнал о массе груза, напуске, перегрузе каната и поднесущей на вход приемного устройства аппаратуры «Сигнал» усиливается и детектируется. Далее (рис. П5.13) происходит дополнительное усиление соответствующих сигналов микросхемой *DA1*, с выхода которой они поступают на входы фильтров (*DA2, DA3, DA4, DA5*). С выходов фильтров сигналы перегруза, напуска и поднесущей воздействуют на компараторы *DA5, DA7, DA8* и при этом осуществляется их индикация светодиодами *VD7, VD8, VD9*.

Сигнал о массе груза с выхода фильтра *DA2* воздействует на вход формирователя (*DD1, VT4*), который, в свою очередь, может воздействовать на четырехзарядный цифровой индикатор *HG1*. В качестве *HG1* предполагается использовать стандартный выпускаемый промышленностью (с элементами переделки и частотомер) блок секундомера. Сигнал о массе груза с выхода формирователя воздействует на частотомер (рис. П5.14), выполненный на микросхемах *DD2, DD3, DD4* и реверсивный счетчик на микросхемах *DD10...DD13*, где происходит подсчет количества импульсов пропорциональных частоте, а следовательно, и массе перевозимого груза с последующей записью информации микросхемами *DD6...DD9*. Предварительная установка общей массы порожней вагонетки и клетки обеспечивается тумблерами *S1...S4* в коде 8–4–2–1 поразрядно. Раздельная индикация общей массы груженой клетки и массы груза в вагонетке клетки обеспечивается соответственно схемами (рис. П5.15 и П5.16) (*DD17...DD22*) и (*DD23...DD27*) при помощи жидкокристаллических индикаторов *HG2* и *HG3*. Элементы указанных схем (*DD14...DD16*) обеспечивают также формирование прерывистого сигнала

на индикаторах *HG2* и *HG3* (при переполнении счетчиков) в виде буквы «П» в старших разрядах. Величины измеренных масс отображаются на индикаторах в килограммах.

Сетевой блок питания (СБП) (рис. П5.17) выполнен по известной схеме и предназначен для питания всех блоков комплекта аппаратуры поверхностной (КАП).

5.7. Конструктивная проработка и монтаж модуля МДУ на клетки

Разработанный модуль МДУ в цилиндрическом корпусе показан на рис. 5.7. Внешнее сжимающее усилие к чувствительному элементу 3 передается через корпус 1. Чувствительный элемент 3 центрируется в корпусе модуля при помощи фиксаторов 2, выполненных с пазами. Вывод проводов питающей обмотки 4 и измерительной обмотки 5 осуществляется через штуцер 10. Герметичность корпуса модуля МДУ обеспечивается резиновой прокладкой 8 и крышкой 7, прикрепленной винтами 6 к корпусу 1.

Монтаж модуля преобразователя усилий (рис. 5.7) осуществляется на подвесном устройстве типа УП клетки (рис. 5.8), которое состоит из клинового коуша 1, балки 2, сорог 3, тяги 4, кронштейнов 5 и стоек 6. Модули МДУ 7 устанавливаются с двух сторон на балку 2 подвесного устройства УП, на упоры 8, закрепленные на коуше 1.

МДУ 3 (см. рис. 5.7, 5.9) установлен в корпусе модуля 1 в специальных гнездах. Упоры по высоте регулируются набором шайб и закрепляются на планке 4 коуша 5. Между планкой 4 и балкой 2 необходим зазор для передачи веса груженой клетки к МДУ. Разработано несколько конструктивных вариантов (модификаций) МДУ [63]. Один из вариантов показан на рис. 5.10, где чувствительный элемент 2 МДУ установлен в цилиндрическом отверстии корпуса 1. Фиксаторы 3,8, закрепленные на крышке 9, удерживают элемент 2 МДУ в вертикальном положении в центре корпуса 1. Модуль МДУ с двух сторон закрывается крышками 9 с резиновой прокладкой 10 и винтами 5. Вывод проводов обмотки питания 6 и обмотки измерения 7 осуществляется через штуцер 4. В корпусе 1 модуля МДУ предусмотрены специальные прорези, необходимые для облегчения передачи усилий к чувствительному элементу 2 датчика.

Модуль МДУ этой модификации имеет минимальную ширину и хорошо вписывается в конструкцию подвесного устройства типа УП.

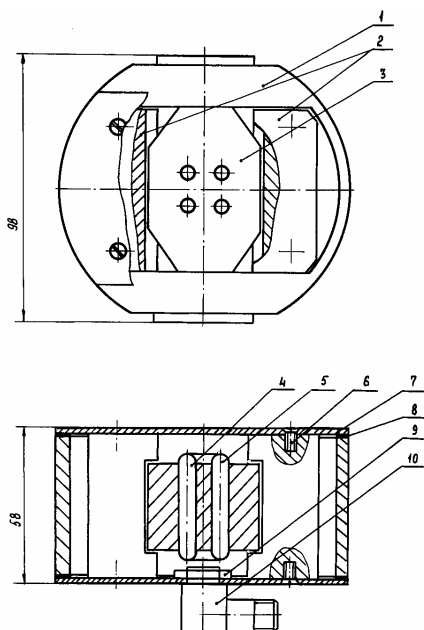


Рис. 5.7. Преобразователь усилий МДУ-75:

1 – корпус; 2 – упоры; 3 – чувствительный элемент;
4 – первичная обмотка; 5 – вторичная обмотка; 6 – болт;
7 – крышка; 8 – герметик; 9 – гайка; 10 – штуцер.

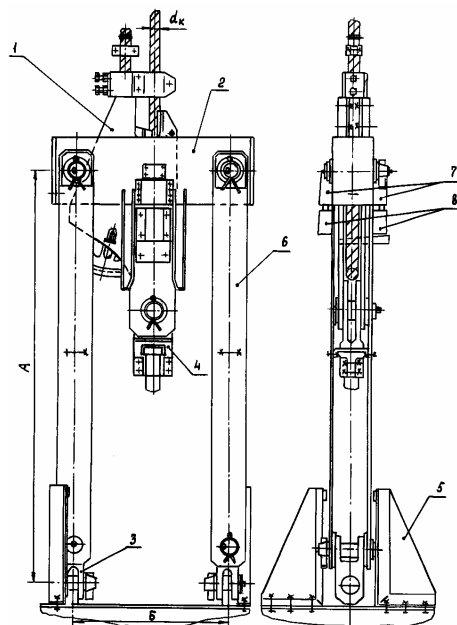


Рис. 5.8. Монтаж преобразователя усилий на подвесном устройстве клетки.

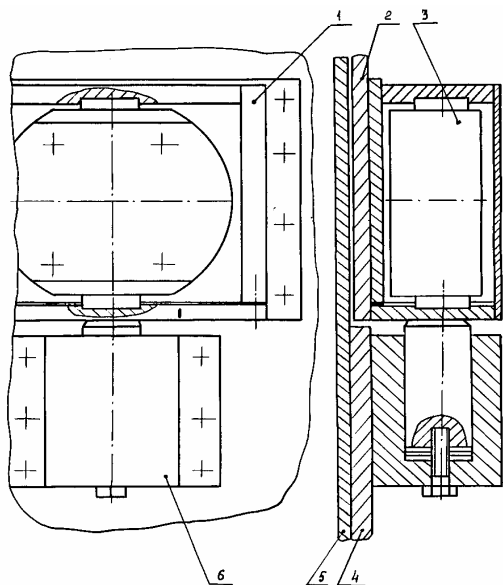


Рис. 5.9. Монтаж модуля преобразователя усилий на подвесном устройстве.

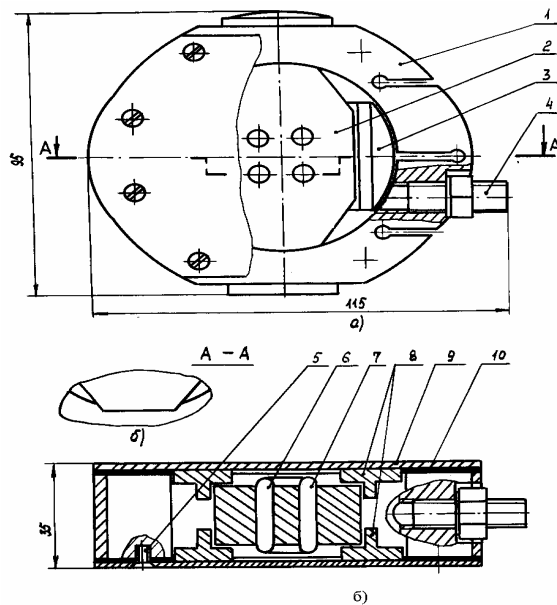


Рис. 5.10. Преобразователь усилий (модификация) МДУ-75:
а – вариант модуля датчика с плоской опорой; б – вариант модуля датчика с дуговой опорой. 1 – корпус; 2 – чувствительный элемент;
3 – компаунд; 4 – штуцер; 5 – болт; 6 – первичная обмотка;
7 – вторичная обмотка; 8 – упоры; 9 – крышка; 10 – герметик.

Таким образом, предлагаемые методики расчета и настройки магнитоанізотропного преобразователя усилий совместно с электронным блоком апробированы на практике и позволяют существенно снизить суммарную погрешность разработанных преобразователей, которая не превышает $\pm 0,3\%$ (для МДУ–20, МДУ–75, МДУ–300) в диапазоне измеряемых статических и динамических нагрузок.

Разработанная схема электронного блока преобразователя является универсальной и легко перестраиваемой для работы с любым из разработанных МДУ и обеспечивает стандартный (цифровой и аналоговый) выход информационного сигнала.

Электронная часть аппаратуры контроля перегруза, напуска каната, измерения массы груза, перевозимого в клетки, выполнена с цифровым и аналоговым стандартными выходами, с возможностью индивидуальной обработки информационных сигналов от одного до четырех преобразователей усилий.

Для передачи информационных сигналов о напуске, перегрузе каната, массе груза в клетки (аппаратура КОНТУР, системы СТАРТ) использован метод разделения сигналов по частоте, что позволяет использовать разработанные электронные комплекты (КАС, КАП) и с другой приемо-передающей аппаратурой типа СИГНАЛ, РАДУГА и др.

В заключение следует отметить основные результаты, представленные в монографии.

Основные научные и практические результаты, включают следующее:

1) разработаны новые методы контроля РСЦМ: «наклонная плоскость», «вращение изделия в базирующем приспособлении» и «вращение изделия на аэростатических опорах»;

2) разработаны математические модели для методов вращения изделия в базирующем приспособлении и на аэростатических опорах, с помощью которых исследованы статические и динамические процессы контроля;

3) установлено, что величина информативного параметра (метод вращения изделия в базирующем приспособлении) зависит пропорционально от величины РСЦМ и квадрата скорости вращения изделия и обратно пропорционально квадрату высоты закрепления пружинной подвески. Выявлено, что изменение массы контролируемого изделия требует корректировки величины информативного параметра устройства;

4) составлены алгоритмы расчета массово-геометрических и кинематических параметров устройств контроля, позволяющие решать вопросы проектирования контрольных устройств применительно к любым изделиям машиностроения типа тел вращения;

5) для информативных параметров устройств контроля были разработаны оптико-электронные и электромагнитные системы съема информации, отличающиеся высокой чувствительностью;

6) разработана математическая модель магнитоанізотропного преобразователя усилий, с помощью которой исследованы его динамические характеристики;

7) разработаны методики расчета геометрических и электромагнитных параметров преобразователей усилий (МДУ) до 300 кН и настройки универсального электронного блока (ЭБ) для работы с различными (МДУ–2, МДУ–30) преобразователями усилий;

8) разработанные устройства контроля могут быть использованы в оборонной, горной промышленности, в точном машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Advances in applied mechanics. – N.Y.a.o.: Acad Press, 1983. – 453 p. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed. by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 1982. – Vol 18. – 427 p.
2. Burch, John Gand Strater, Felix R. Information systems: Theory and practice. – Santa Barbara; Hamilton, 1984. – 494 p.
3. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed. by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 1982. – Vol 18. – 427 p.
4. Distributed parameter control systems: Theory and application / Ed. By S.G. Tzafestas. – Oxford a.o.: Pergamon Press, 1982. – 497 p.
5. А.с. 1132156, кл. Q1M 1/12 Устройство для балансировки роторов / А.П. Муслимов, С.В. Халатова (СССР). – Оpubл. 1984, Б.И. №48.
6. А.с. 1298559, кл. Q1M 1/12 Устройство для балансировки роторов / А.П. Муслимов, В.Г. Грицук (СССР). – Оpubл. 1987, Б.И. №11.
7. Активный контроль в машиностроении / Под ред. Е.И. Педь. – М.: Машиностроение, 1971. – 359 с.
8. Аналитическая механика, устойчивость и управление движением: Сер. 15 / Всесоюз. Четаевская конф. – Казань, 1987.
9. Ах. 938037, кл. Q1M 1/12 Устройство для балансировки роторов / Муслимов А.П., Борзых Б.А. (СССР). – Оpubл. 1982, Б.И. №23.
10. Балансировка машин и приборов / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с.
11. Гостехнадзор СССР: Техническое управление: О предупреждении травматизма на подземном транспорте и подъемах в горнорудной и нерудной промышленности: Информационный бюллетень №11 (796)–84. – М., 1984. С.24–32.
12. Гостехнадзор СССР: Техническое управление: Об авариях на подъемных установках угольных шахт: Информационный бюллетень. № 24 (622)–30. – М., 1980. – С. 3–5.
13. Датчики для автоматизации в угольной промышленности / В.А. Ульшин, Г.И. Бедняк, В.П. Давженко и др.; Под ред. В.А. Ульшина. – М.: Недра, 1984. – 245 с.
14. Динамика механических систем: Сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т техн. механики; редкол.: В.Ф. Ушкалов и др. – Киев: Наукова думка, 1983. – 216 с.
15. Динамика управляемых колебательных систем: Сб. науч. тр. / Иркутск. политехн. ин-т. – Иркутск: ИПТИ, 1983. – 162 с.
16. Динамическое уравнивание, колебание и устойчивость движений: Межвуз. науч. сб. / Уфим. авиац. Ин-т им. Серго Орджоникидзе; Редкол.: СМ. Идин и др. – Уфа: УАИ, 1985. – 138 с.
17. Дифференциальные уравнения и обратные задачи динамики: Сб. науч. тр. – М.: УДН, 1983. – 159 с.
18. Зарубежные приборы неразрушающего контроля: Машины и приборы для измерения механических величин. – М., 1985. – 14 с.
19. Измерение электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие для вузов / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский и др.; Под ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 332 с.
20. Основы балансировочной техники: В 2 т. / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1975.
21. Нелинейный анализ поведения механических систем / Г.В. Горр, А.А. Илюхин, А.М. Ковалев, А.Я. Сивченко / Отв. ред. П.В. Харламов. – Киев: Наукова Думка, 1984. – 285 с.
22. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: В 2 кн. / Под ред. В.В. Клюева – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.
23. Проблемы аналитической механики, теории устойчивости и управления / Сб. АН СССР, отделение механики и процессов управления. – М.: Наука, 1975. – 342 с.
24. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под общ. ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
25. Проектирование, изготовление и испытание магнитоанизотропных датчиков усилий на 1 тс, 3 тс, 10 тс: Промежуточный отчет по научно-исследовательской работе: №ГР 01790068486 / Научн. рук. П.И. Пахомов. – Фрунзе: Фрунзенск. политехн. ин-т, 1989. – 65 с.
26. Разработка и изготовление преобразователя усилий: Заключительный отчет о научно-исследовательской работе: № ГР 01790068486: Инв. № 02900023520 / Научн. рук. П.И. Пахомов. – Фрунзе: Фрунзенск. политехн. ин-т, 1990. – 91 с.
27. Разработка универсального устройства с целью определения веса грузонесущей вагонетки и контроля напуска, перегруза головного каната: Промежуточный отчет по научно-исследовательской работе: № ГР 01880066507/ Научн. рук. П.И. Пахомов. – Фрунзе: Фрунзенск. политехн. ин-т, 1991. – 51 с.
28. Справочник по средствам автоматики / Под ред. В.Э. Низэ, И.В. Антика. – М.: Энергоатомиздат, 1983 – 503 с.

29. Теория и практика балансировочной техники / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1973. – 455 с.
30. Теория и приемка уравнивания машин и приборов / Под ред. В.А. Щепетильникова. – М.: Машиностроение, 1970. – 439 с.
31. Электромагнитные методы измерений и неразрушающего контроля: Сб. статей / АН СССР, Урал. науч. центр; Под ред. Халилеев П.А. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982. – 118 с.
32. *Архангельский Ю.А.* Динамика быстровращающегося твердого тела. – М.: Наука, 1985. – 192 с.
33. *Березовский Б.А.* Курс теоретической механики. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 645 с.
34. *Бухгольц В.П.* Датчики и реле автоматического контроля в горной промышленности. – М.: Недра, 1971. – 224 с.
35. *Волосов С.С., Педь Е.И.* Приборы для автоматического контроля в машиностроении. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
36. *Вульвет Дж.* Датчики в цифровых системах / Пер. с англ.; Под ред. А.С. Яровенка. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 200 с.
37. *Герчинский Д.А., Рыгалин В.Г.* Мгнитоиндуктивные установки оперативной связи. – М.: Связь, 1970. – 72 с.
38. *Гинзбург В.Б.* Магнитоупругие датчики. – М.: Энергия, 1980.
39. *Гуманюк М.Н.* Магнитные датчики в автоматике. – Киев: Техника, 1972. – 264 с.
40. *Гутников В.С.* Интегральная электроника в измерительных устройствах. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 304 с.
41. *Дьяконов В.П.* Расчет нелинейных и импульсных устройств на программируемых микрокалькуляторах. – М.: Радио и связь, 1984. – 176 с.
42. *Дьяконов В.П.* Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. 2-е изд. испр. – М.: Наука, 1986. – 224 с.
43. *Жедь В.П.* Аэростатические направляющие. – М.: ЭНИМС, руководящие материалы, 1977. – 87 с.
44. *Залманзон Л.А.* Поточные элементы пневматических приборов контроля и управления. – М.: Высшая школа, 1984. – 275 с.
45. *Зубов В.И.* Аналитическая динамика систем тел: Учеб. пособие для вузов по спец. «Механика». – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 344 с.
46. *Иващенко Н.Н.* Автоматическое регулирование и управление. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.
47. *Иващенко Н.Н.* Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1973. – 736 с.
48. *Иорши Ю.И.* Виброметрия. – М.: Гос. науч.-техн. издат. машиностроит. лит-ры, 1963. – 756 с.

49. *Клюев А.С.* Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1973. – 391 с.
50. *Колесник Н.В.* Статическая и динамическая балансировка. – М.: Машгиз, 1954. – 452 с.
51. *Колчин И.И.* Механика машин: В 2 т. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд., 1971–1972.
52. *Ложкин О.В.* и др. Пневматические устройства и системы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.
53. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1961. – 824 с.
54. *Михайлов О.П., Глебов А.П.* Магнитоупругий датчик малых перемещений // Приборы и системы управления. – 1971. – №8 – 38 с.
55. *Муслимов А.П.* Автомат контроля дисбаланса изделий ультразвуковым методом. – Фрунзе: КиргизНИИНТИ, 1987. – 4 с.
56. *Муслимов А.П.* Автоматическое устройство контроля величины неуравновешенности изделий. – Фрунзе: КиргизНИИНТИ, 1987. – 4 с.
57. *Муслимов А.П.* Исследование величины дисбаланса временным способом // Тез. докл. на респ. конф. – Фрунзе, 1985. – С. 69–80.
58. *Муслимов А.П., Семенов В.Ф.* Теоретические основы и методы контроля радиального смещения центра масс изделий типа тел вращения / Деп. в КиргизНИИНТИ, 1988. – 52 с.
59. *Носырев Б.А., Кубарев С.М.* Подъемные установки: Учеб. пособие. – Свердловск: Изд-во СГИ, 1986. – 84 с.
60. *Осецкий В.М.* Введение в аналитическую механику. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – 166 с.
61. *Пахомов П.И.* Магнитоанизотропный датчик усилий // Научные достижения горного Кыргызстана: тез. докл. – Бишкек, 2000. – С. 148.
62. *Пахомов П.И.* Электростимулятор одноканальный малогабаритный МИЦАР 001 / Кырг.-Росс. Слав. ун-т. – Бишкек, 2000. – 16 с.
63. *Пахомов П.И., Фролов А.В.* Методы и средства контроля и защиты рудничных подъемов от аварий. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2004. – 171 с.
64. *Пахомов П.И., Шабданалиев Э.Ш.* Весоизмерительное устройство // Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья: Тез. докл. III Всесоюзн. сем. – Бишкек, 1991. – С. 181.
65. *Пахомов П.И., Шабданалиев Э.Ш.* Силоизмерительное устройство с магнитоанизотропным преобразователем // Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья. Тез. докл. III Всесоюзн. сем. – Бишкек, 1991. – С. 182.
66. *Педь В.П.* Аэростатические направляющие и опоры: Руковод. техн. мат-лы. – М.: ЭНИМС, 1987. – 372 с.

67. Раусе Э.Дж. Динамика системы твердых тел: В 2 т. – Т. 1. – М.: Наука, 1983. – 463 с.
68. Рыбальченко Ю.И. Магнитоупругие датчики крутящегося момента. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
69. Столбун М.И. Магнитоупругий датчик для измерений усилий // Электричество. – 1964. – №1 – С. 43
70. Твердин Л.Н. Автоматические устройства с магнитоупругими преобразователями. – М.: Энергия, 1974. – 96 с.
71. Тищенко Н.М. Проектирование полупроводниковых элементов автоматики. – М.: Энергия, 1979. – 442 с.
72. Траубе Е.С. Наладка и эксплуатация защит шахтных подъемных установок. – М.: Недра, 1969.
73. Траубе Е.С., Найдено И.С. Тормозные устройства и безопасность шахтных подъемных машин. – М.: Недра, 1980. – 256 с.
74. Трохименко Я.К., Любич Ф.Д. Инженерные расчеты на микрокалькуляторах. – Киев: Техника, 1980. – 394 с.
75. Трохименко Я.К., Любич Ф.Д. Радиотехнические расчеты на программируемых микрокалькуляторах: Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
76. Хомерики О.К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
77. Шепетьников В.А. Современные методы и средства балансировки. – М.: Машиностроение, 1985. – 398 с.
78. Шепетьников В.А. Теория и конструкция балансировочных машин. – М.: Машгиз, 1973. – 383 с.
79. Шишкинский В.И. Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители. – М.: Машиностроение, 1981.
80. Шепетьников В.А. Уравновешивание механизмов. – М.: Машиностроение, 1982. – 255 с.

110

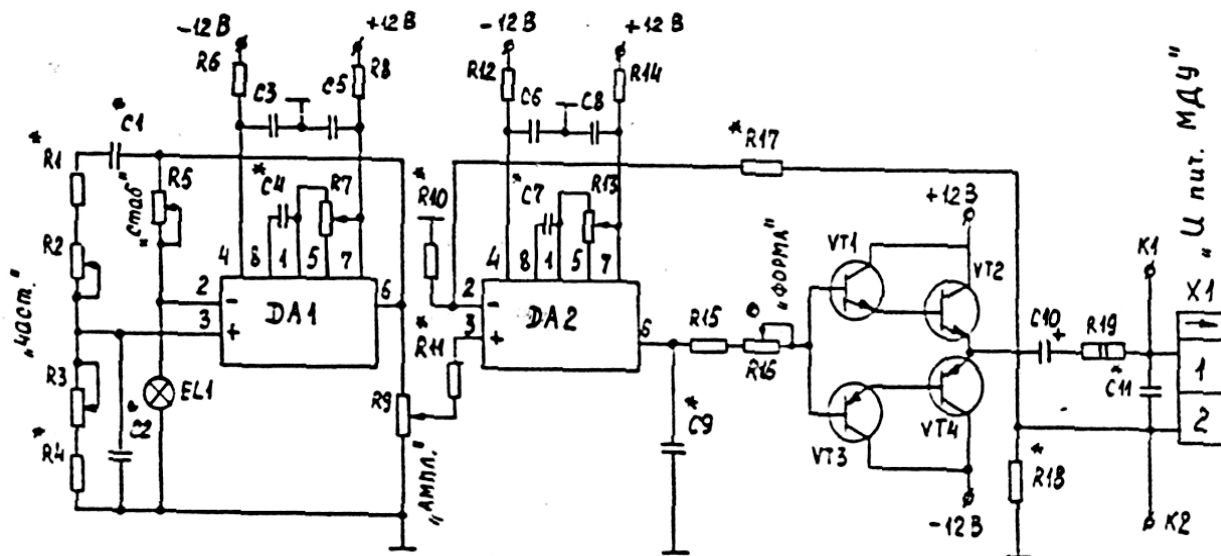


Рис. П5.1. Принципиальная схема электронного блока (ЭБ) магнитоанизотропного датчика усилий (МДУ). Генератор.

111

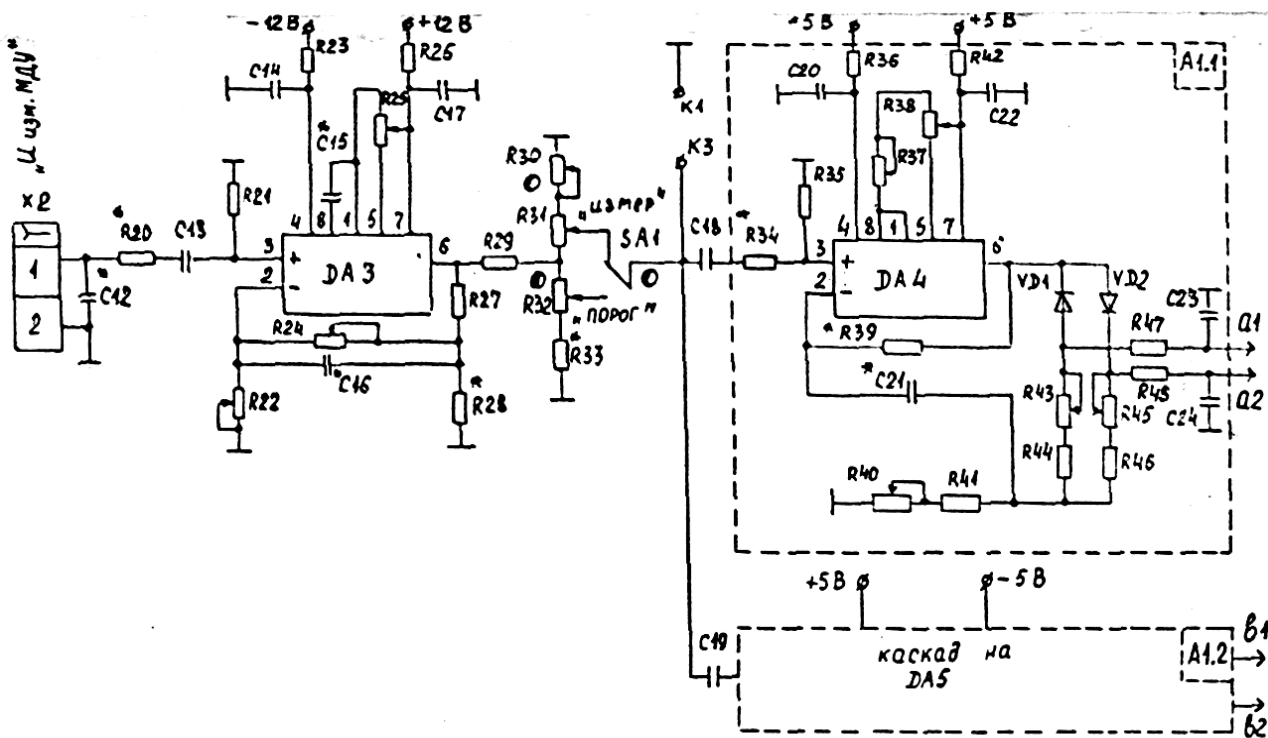


Рис. П5.2. Усилитель-преобразователь (продолжение рис. П5.1).

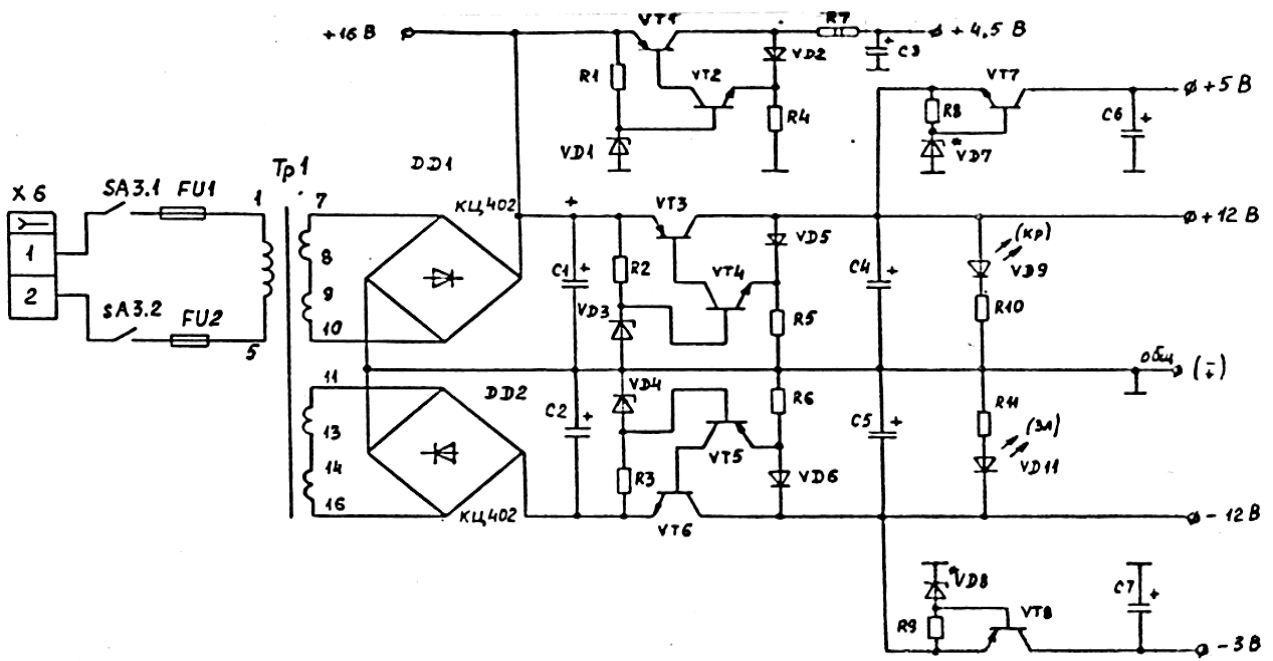


Рис. П5.5. Пороговый узел (продолжение рис. П5.4).

Приложение 2

Программа вычисления коэффициентов линейного приближения
 $y = v_0 + v_1 x$ для микрокалькулятора БЗ–34

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
П1	П0	0	П4	П5	П6	П7	ИП1	ИП0	–
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	+	С/П	П2	С/П	П3	ИП6	+	П6	ИП2
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ИП4	+	П4	ИП2	Fx^2	ИП5	+	П5	ИП2	ИП3
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
×	ИП7	+	П7	FL0	07	ИП4	Fx^2	ИП1	ИП5
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
×	–	П8	ИП4	ИП6	×	ИП1	ИП7	×	–
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
ИП8	+	ПА	С/П	ИП6	ИПА	ИП4	×	–	ИП1
61	62	63	64	65					
÷	ПВ	С/П	БП	00					

Инструкция к программе и контрольный пример.

Пусть $y_i = f(x_i)$ задана $N=5$ значениями $y_i(x_i)$: 5,5(2), 6,3(4), 7,2(6), 8(8), 8,6(10).

Вводим данные: вначале $N=5$ (после нажатия клавиши С/П на дисплее высвечивается цифра 1, что вначале вводится x_1 , нажимается клавиша С/П и после останова машины на дисплее высвечивается цифра 2, что говорит о необходимости ввода второй пары $y_i(x_i)$ и т.д. После ввода последней пары данных и нажатия клавиши С/П через 5...6 с на дисплее высвечивается коэффициент $v_1=0,395$ (продублирован в регистре ПА) и после второго нажатия на клавишу С/П на дисплее индицируется (через 5...6 с) коэффициент $v_0=4,75$ (продублирован в регистре ПВ).

Следовательно, функция $y(x)$ имеет вид: $y=4,75+0,395x$.

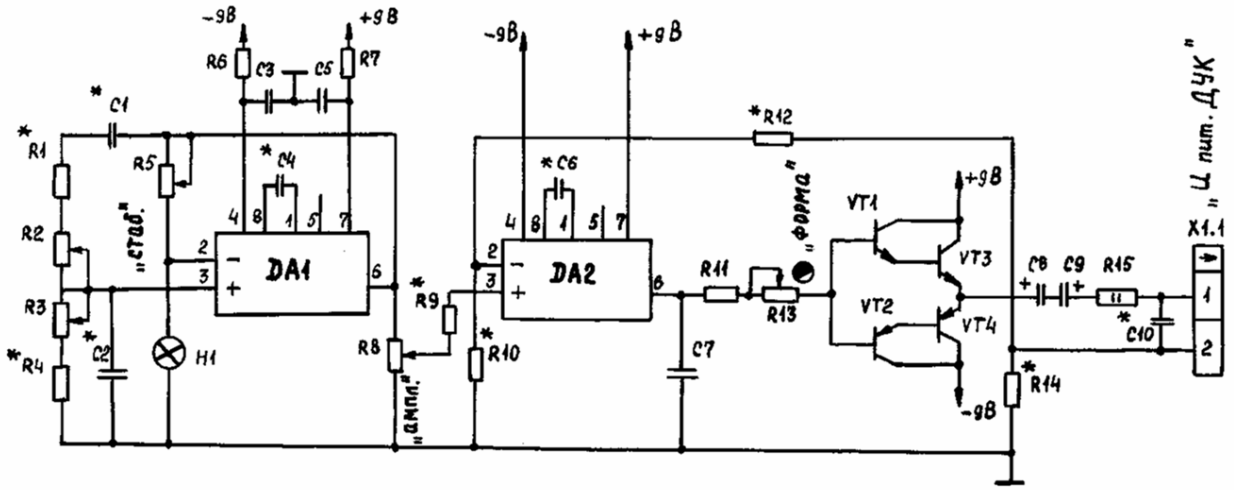


Рис. П5.7. Схема генератора питания датчика усилий каната (ДУК).

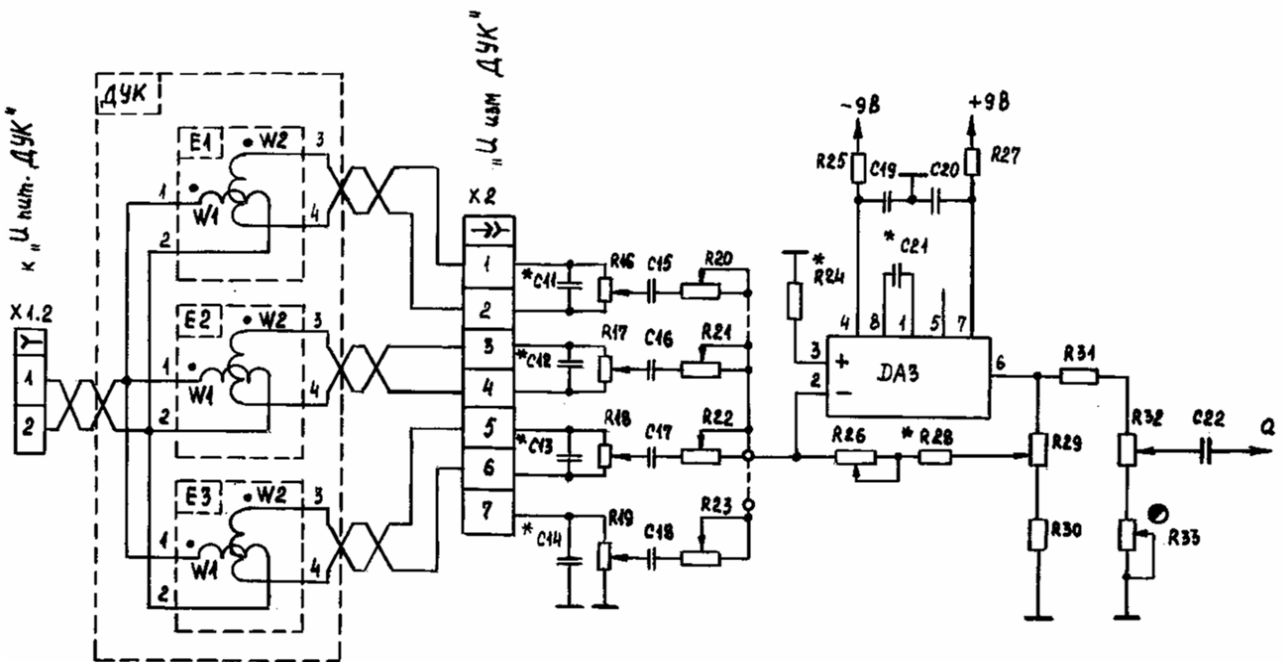


Рис. П5.8. Схема усилителя-сумматора измерительного напряжения ДУК.

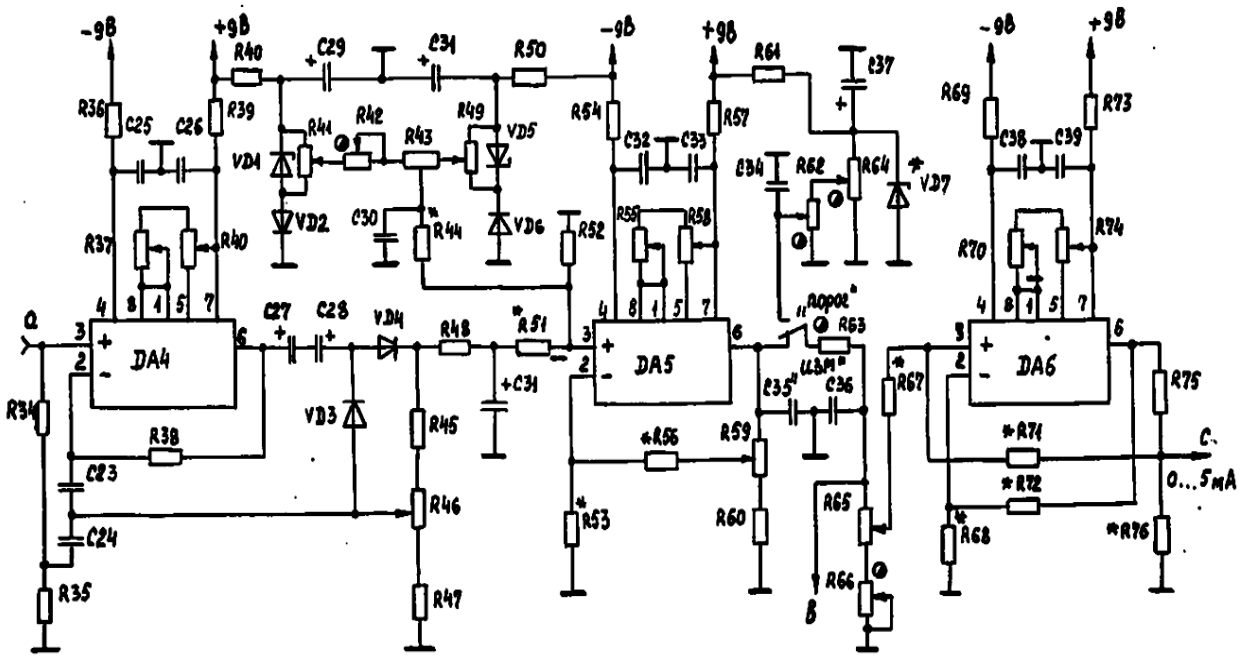


Рис. П5.9. Схема усилителя-преобразователя с токовым выходом.

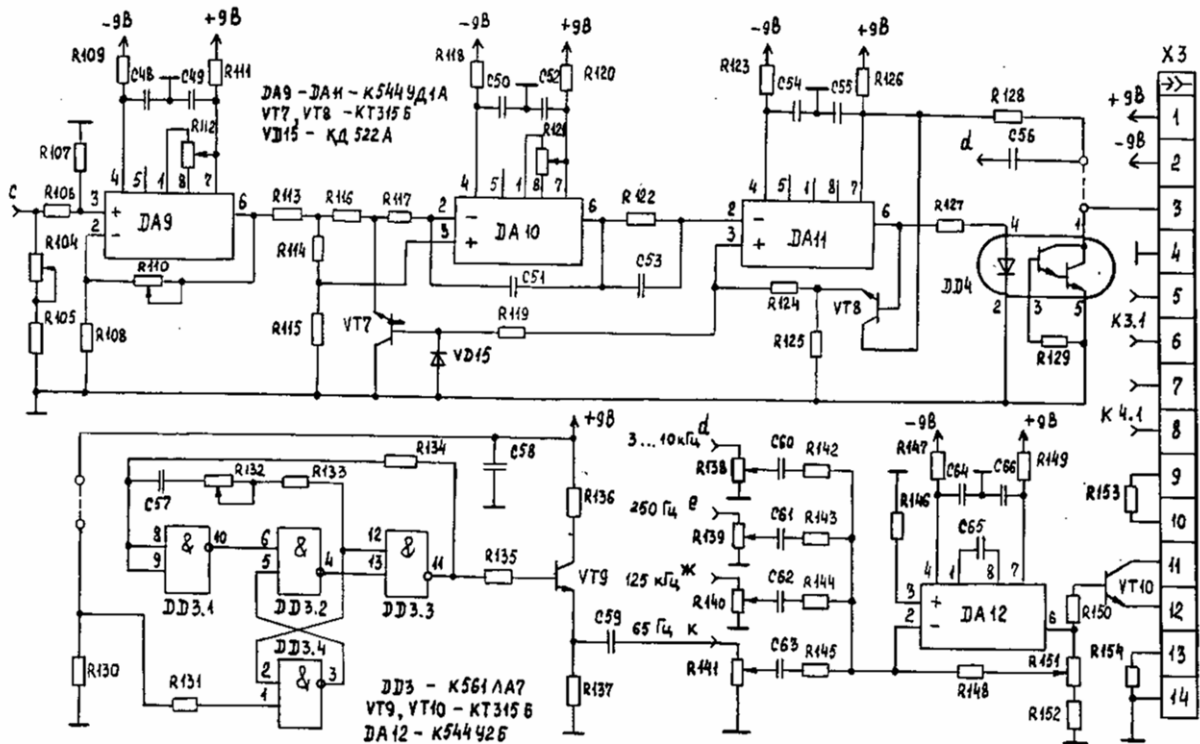


Рис. П5.10. Схема преобразователя напряжение-частота (ПНЧ), генератора поднесущей и смесителя.

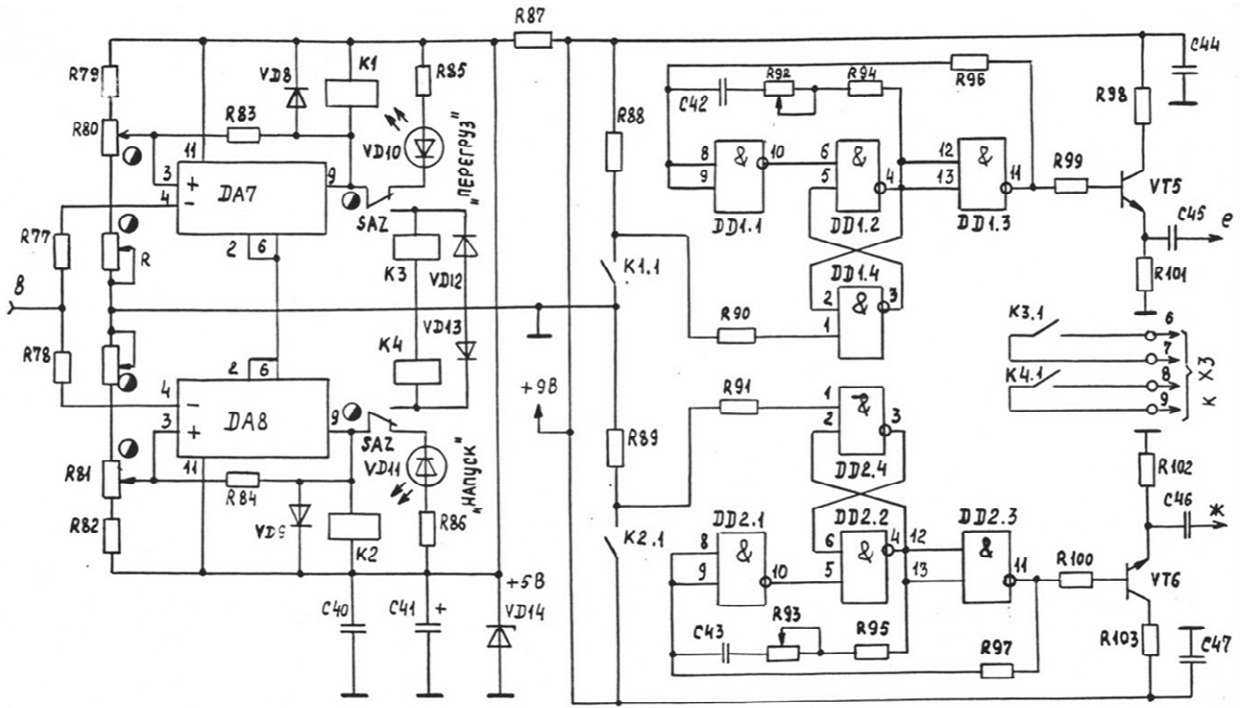


Рис. П5.11. Схема порогового узла напуска и перегруза канала.

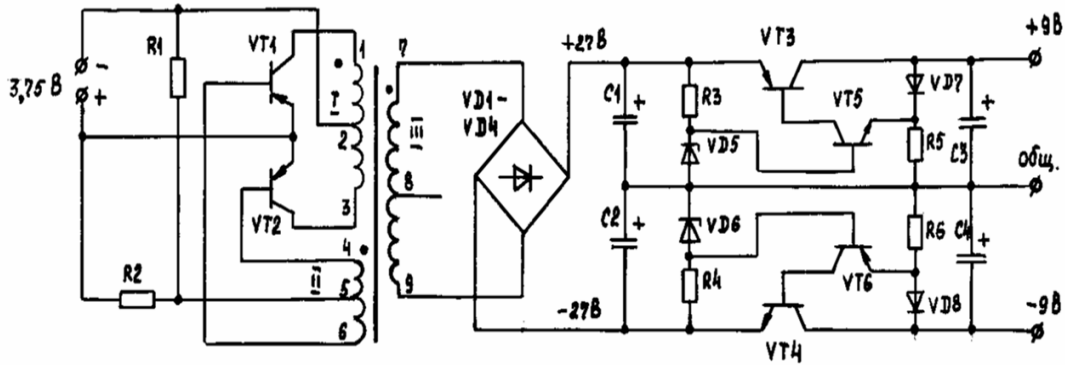


Рис. П5.12. Преобразователь напряжения.

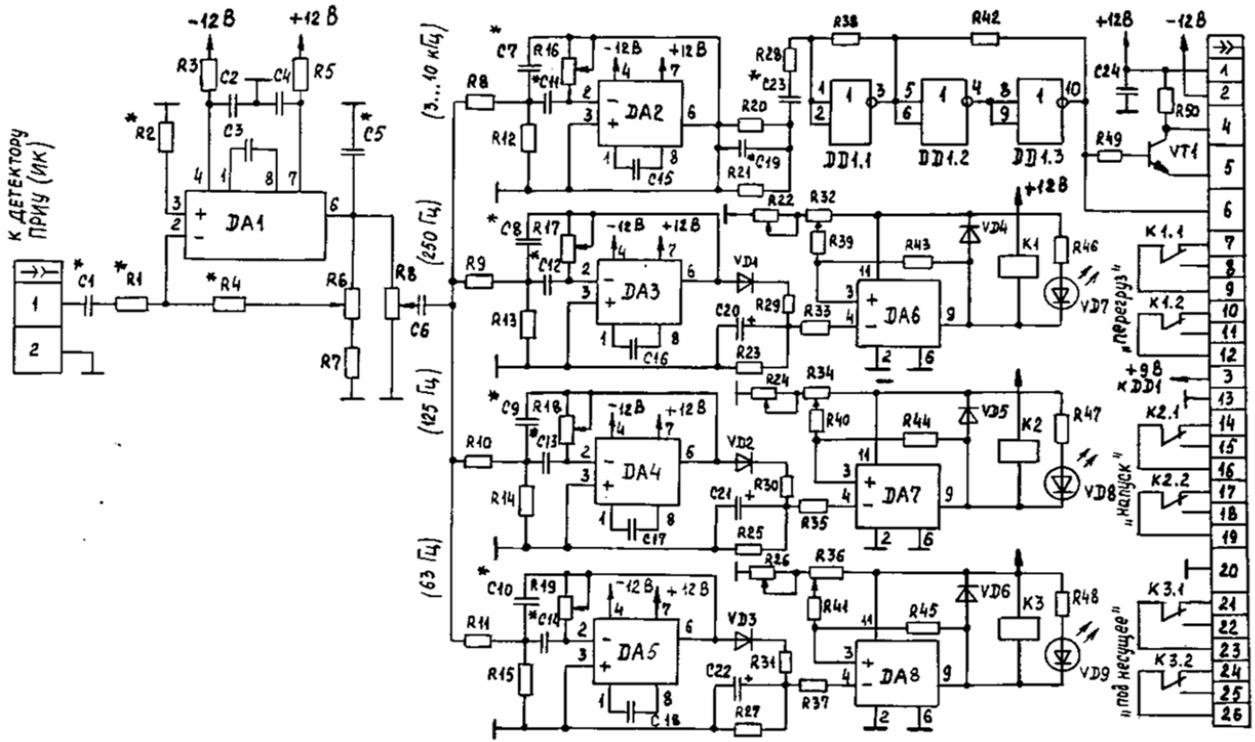


Рис. П5.13. Схема фильтров сигналов измерения, перегруза, напуска и поднесущей.

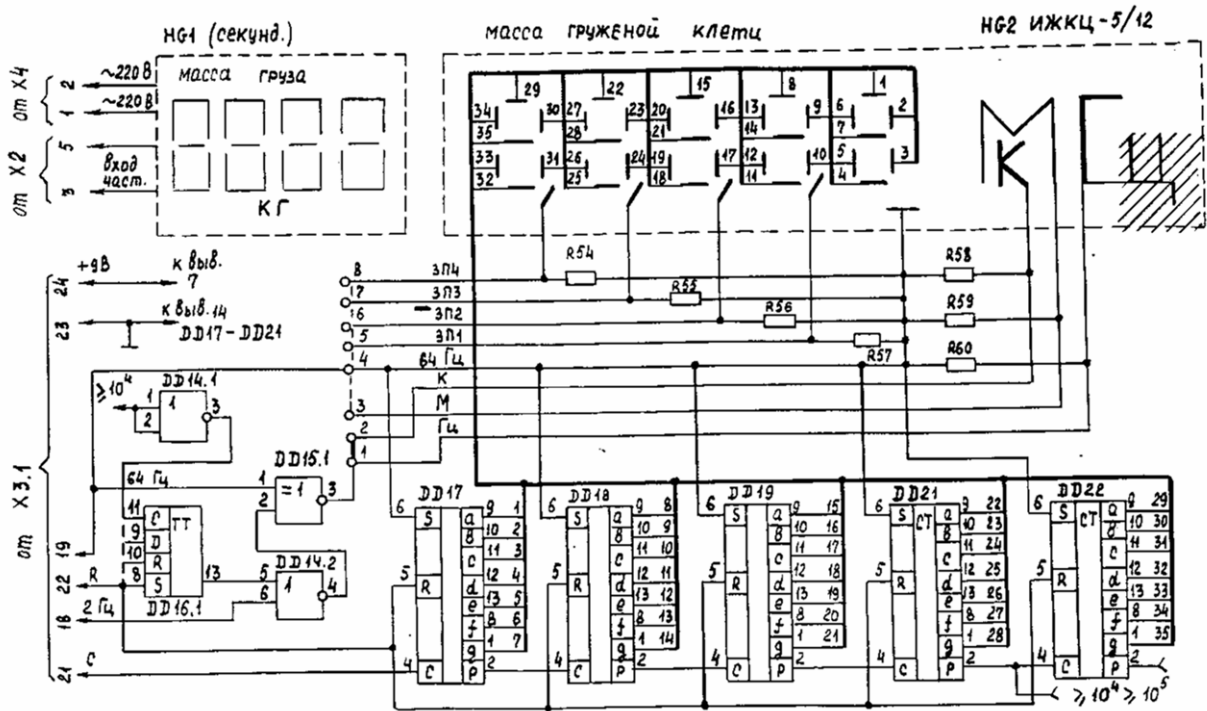


Рис. П5.14. Схема индикации массы груженой клетки.

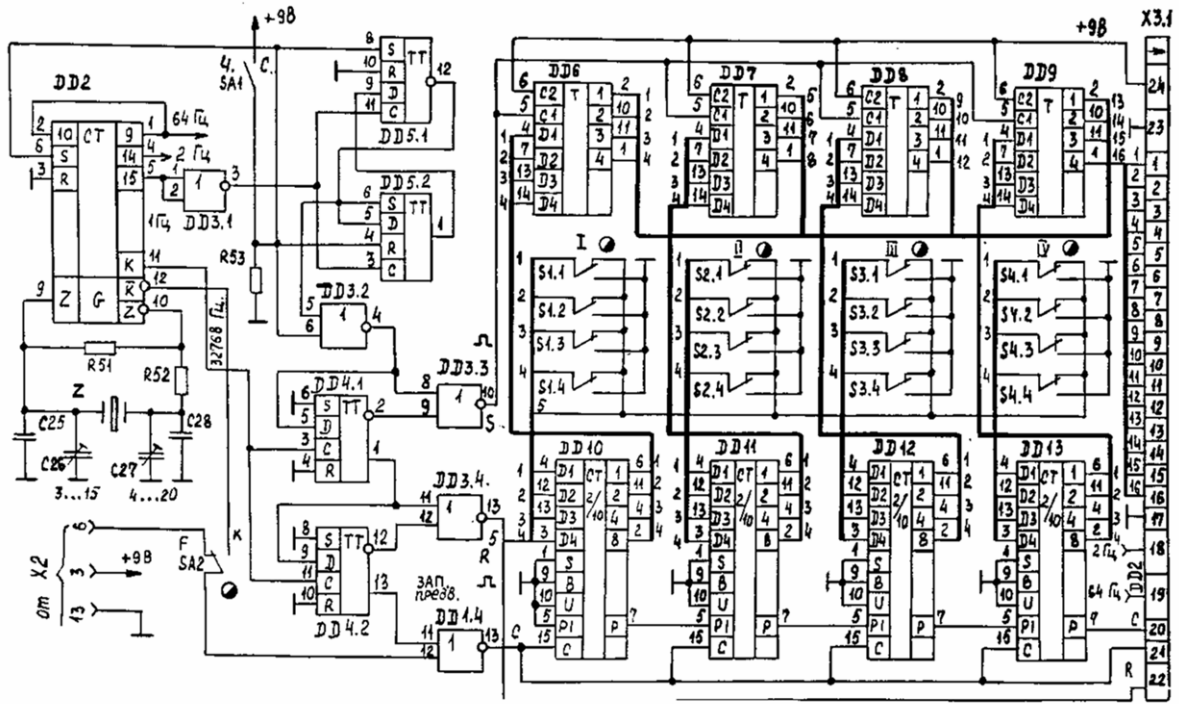


Рис. П5.15. Схема частотомера с записью и хранением информации о массе груза.

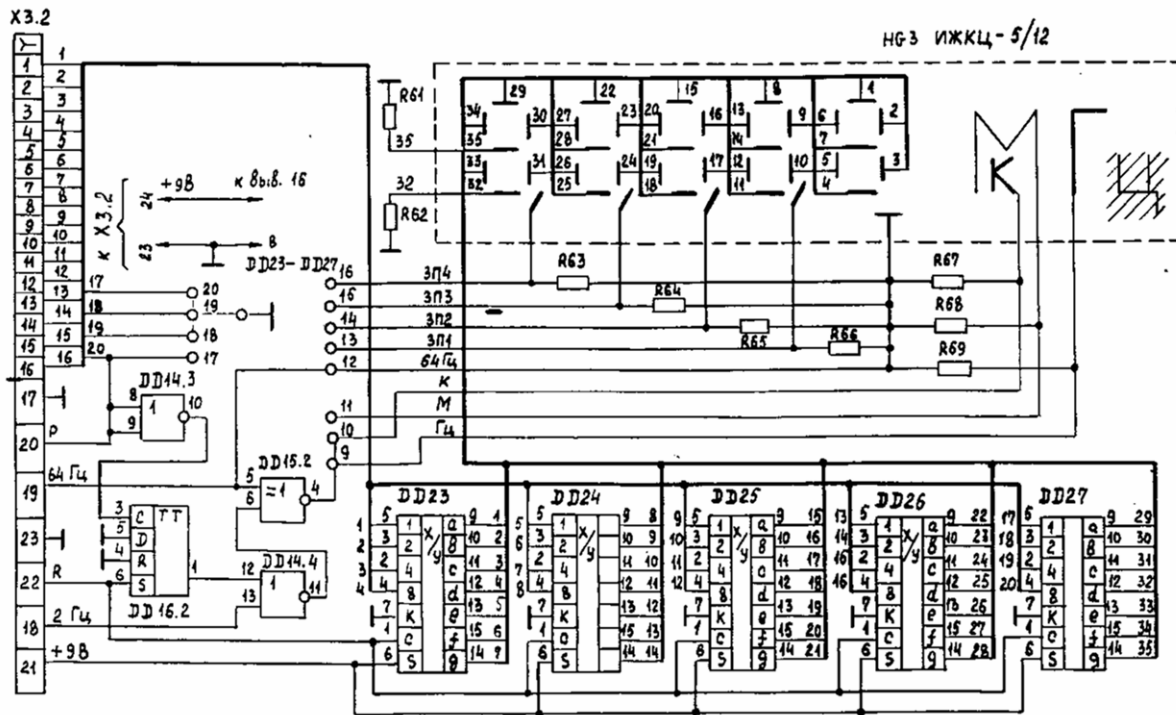


Рис. 5.16. Схема индикации массы груза в вагонетке.

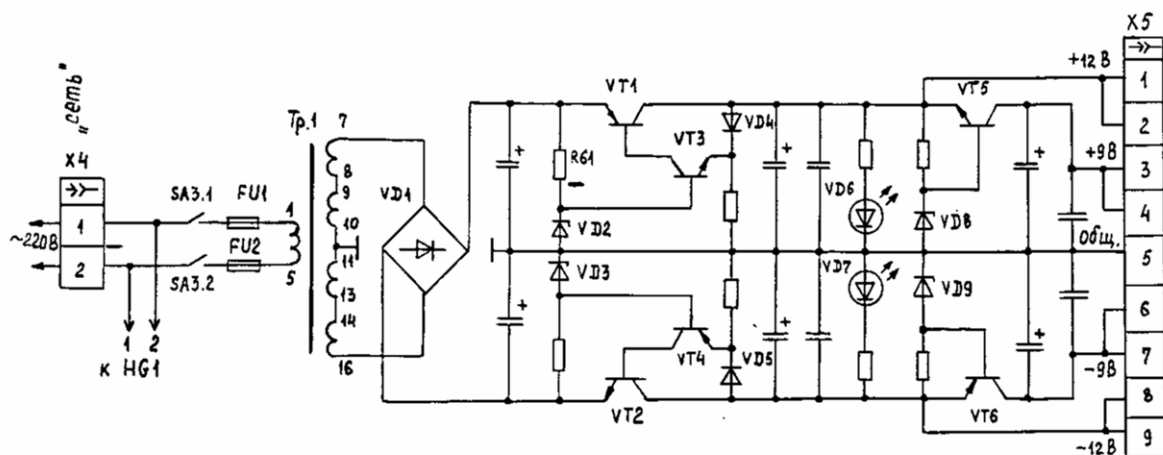


Рис. П5.17. Схема сетевого блока питания ПРИУ.

А.П. Муслимов, П.И. Пахомов

ОСНОВЫ ТЕОРИИ,
МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА
АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА

Редактор И.С. Волоскова
Технический редактор М.Р. Зайнулина
Корректор Е.И. Полихова
Компьютерная верстка Э.Ю. Вислевской

Подписано в печать 18.09.2006. Формат 60×84^{1/16}
Офсетная печать. Объем 8,0 п.л.
Тираж 300 экз. Заказ 239.

Издательство Кыргызско-Российского
Славянского университета
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ
720000, г. Бишкек, ул. Шопокова, 68