

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



В.И. Жуковицкий

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ
АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
В ГОРНОРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Монография

Днепропетровск
НГУ
2014

УДК 681.269.6
ББК 34.96
Ж86

Затверджено вченою радою ДВНЗ «Національний гірничий університет»
(протокол № 2 від 25.02.2014).

Рецензенти:

В.В. Ткачов, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем Державного ВНЗ «НГУ»;

О.І. Міхальов, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій та систем Національної металургійної академії України.

Жуковицкий В.И.

Ж86 Основы теории и принципы построения автоматических весоизмерительных комплексов в горнорудной промышленности: монография / В.И. Жуковицкий; М-во образования и науки Украины; Нац. горн. ун-т. – Д. : НГУ, 2014. – 243 с.

ISBN 978-966-350-468-1

Посвящена теории и принципам построения автоматических весоизмерительных комплексов для взвешивания груза в потоке на ленте конвейера, а также взвешивания в движении большегрузных автомобилей на горнорудных предприятиях.

Книга предназначена для ученых, инженеров, аспирантов, студентов высших учебных заведений горнорудной промышленности.

Ил. 91. Табл. 10. Библиогр.: 305 наим.

УДК 681.269.6
ББК 34.96

© В.И. Жуковицкий, 2014
ISBN 978-966-350-468-1 © ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2014

СОДЕРЖАНИЕ

От редактора	7
ВВЕДЕНИЕ	8
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1. Конвейерные весы, разработанные в СНГ и странах дальнего зарубежья.....	10
1.2. Взвешивание движущихся автосамосвалов и поездов: состояние разработок	19
2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВЗВЕШИВАНИЯ ГРУЗА В ПОТОКЕ НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА	24
2.1. Классификация методов и средств взвешивания груза на ленте конвейера.....	24
2.2. Обоснование принципа интегрирования производительности при взвешивании груза на ленте конвейера.....	25
2.2.1 Однороликовые весы	26
2.2.2.Многороликовые весы	29
2.2.3.Весы с двумя однороликовыми ГУ	31
2.3. Обоснование принципа суммирования интегралов погонной массы при взвешивании груза на конвейере	32
2.4. Грузоприемные устройства конвейерных весов.....	34
2.5. Условия работы и необходимые классы конвейерных весов для предприятий горной и металлургической промышленности	41
2.6. Перспективные методы и схемы автоматических конвейерных весов	42
3 АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗВЕШИВАНИИ ГРУЗА НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА.....	48
3.1. Классификация погрешностей.....	48
3.2. Исследование влияния конвейерной ленты на статическую точность преобразования $q_t \rightarrow P_{ВЭ}$	48
3.2.1.Функция преобразования однороликового ГУ	48
3.2.2.Функция преобразования многороликового ГУ	60
3.3. Анализ погрешностей грузоприемного устройства	62
3.3.1.Погрешность $\delta M_{гу}$ однороликовых весов	62

3.3.2. Погрешность $\delta M_{гв}$ многороликовых весов	69
3.4. Теоретический анализ сил, вызывающих динамическую погрешность взвешивания.....	71
3.4.1. Силы и погрешность, вызванные непрямолинейным движением ленты с грузом	71
3.4.2. Погрешность, вызванная ударами кусков груза о ролики ГУ	74
3.4.3. Погрешность, вызванная боковым сходом ленты	80
3.4.4. Влияние колебаний ленты и ГУ	83
3.5. Погрешность от изменения среднего значения погонной массы ленты	84
3.6. Погрешность от изменения коэффициента сопротивления $W_{гв}$ роликов ГУ	84
3.7. Погрешность от изменения начальной нагрузки на датчик веса	86
3.8. Погрешность от изменения передаточного отношения рычажной системы.....	87
3.9. Погрешность, вызванная нелинейностью характеристики датчика веса	88
3.10. Погрешность от нестабильности минимального значения сигнала и коэффициента преобразования датчика веса	89
3.11. Дополнительная погрешность от изменения температуры	90
3.12. Погрешность измерительного преобразователя скорости (перемещения)	90
3.13. Погрешности вторичного прибора.....	94
3.14. Погрешность тарирования и градуировки.....	95
3.14.1. Градуировка перевешиванием	95
3.14.2. Градуировка калиброванными гирями	97
3.15. Общая погрешность конвейерных весов	97
4. АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВЗВЕШИВАНИЯ ГРУЗА НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА	100
4.1. Выбор метода взвешивания и ГУ для весов средней точности	100
4.2. Принцип действия интегробирующих конвейерных весов с частотными датчиками.....	100
4.3. Методическая погрешность интегробирующих конвейерных весов	109

4.4. Погрешность, вызванная дискретностью обрабатываемой информации	120
5. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА С ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЗВЕШИВАНИЯ ГРУЗА НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА	132
5.1. Принципы построения и функционирования микропроцессорных конвейерных весов	132
5.2. Структурная схема и алгоритмы управления для микропроцессорных конвейерных весов средней точности.....	136
5.3. Структурная схема и алгоритм функционирования конвейерных весов повышенной точности	147
5.4. Методы автоматического контроля и коррекции нуля конвейерных весов	151
5.4.1. Детерминированный контроль и корректировка нуля конвейерных весов	151
5.4.2. Метод статистического контроля и автоматической корректировки нуля конвейерных весов.....	153
6. МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ НА ТОЧНОСТЬ ВЗВЕШИВАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ	157
6.1. Обзор методов уменьшения динамической помехи на точность взвешивания	157
6.2. Метод фильтрации частотного сигнала	166
6.3. Интегрирование с умножением на весовую функцию вида $0,5-1-0,5$	168
6.4. Весовая функция $0,5-1-0,5$ с дополнительными интервалами деления по периоду интегрирования.....	174
6.5. Интегрирование с умножением на весовую функцию вида $1-0-1$	178
6.6. Использование цифровых фильтров для обработки сигналов силоизмерительных датчиков	178
7. ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АСУ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ ГОКОВ	188
7.1. Выбор и обоснование метода взвешивания. Структурная схема автомобильных весов	188
7.2. Структурная схема и алгоритм обработки информации в МП автомобильных весах	190
7.3. Весоизмерительный комплекс КВАРЦИТ	198

7.4. Электронные вагонные весы.....	198
8. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ВЕСОВ.....	200
8.1. Классификация погрешностей.....	200
8.2. Погрешность, вызванная динамической помехой.....	200
8.3. Погрешность от различия коэффициентов преобразования датчиков веса.....	202
8.4. Погрешность, вызванная нелинейностью характеристик датчиков веса.....	208
8.5. Погрешность от нестабильности параметров датчиков веса.....	214
8.6. Погрешность дискретности.....	214
8.7. Погрешность градуировки.....	220
8.8. Общая погрешность автомобильных весов.....	222
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИТЕРАТУРЫ.....	225

От редактора

Профессор Жуковицкий Владимир Иванович (1924-2009) один из основателей в Днепропетровском горном институте (ныне – Национальный горный университет) научной школы "Автоматизация процессов взвешивания транспортируемых грузов". Под его руководством и непосредственном участии с 1956 года и до конца прошлого века велись работы по исследованию, проектированию и изготовлению конвейерных весов, весов для взвешивания в движении большегрузных самосвалов и грузовых железнодорожных вагонов. Только конвейерных весов на кафедре промышленной электроники и вычислительной техники горного института (Владимир Иванович основал эту кафедру и заведовал ею с 1964 по 1976 г.), было изготовлено и смонтировано на действующих конвейерах горнорудного производства Украины почти сто комплектов.

Владимир Иванович один из первых предложил принципы построения микропроцессорных систем для взвешивания грузов, транспортируемых конвейерами и автосамосвалами.

Профессор Жуковицкий В.И. автор 32 изобретений и 119 научных трудов. Большая часть этих работ посвящена вопросам автоматизации процессов взвешивания транспортируемых грузов. На основании этих работ составлена настоящая монография, в которой изложены базовые вопросы теории весоизмерительных процессов.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях все возрастающих требований к экономии сырья и материалов, топлива, руд черных и цветных металлов, кокса, строительных материалов и т.д. особо важное значение приобретает учет их добычи и расходования. Такой учет должен вестись и, как правило, ведется в единицах массы, т.е. необходимо взвешивание этих материалов на различных стадиях их переработки.

Государственные стандарты требуют, чтобы взвешивание руд, углей, кокса, флюсов, строительных материалов производилось с точностью $\pm 1\%$. С еще большей точностью (доли процента) учитывается масса материалов при коммерческих расчетах.

На предприятиях горной и металлургической промышленности взвешивание сырья и материалов позволяет осуществить:

- контроль производительности горных машин и транспортного оборудования на карьерах, а также технологического оборудования на обогатительных фабриках и металлургических заводах (роторные комплексы, транспортно-отвальные мосты, автосамосвалы, магистральные конвейеры, секции РОФ, коксовые батареи и т.п.) с целью оптимизации работы этих машин и оборудования;
- систематический учет производительности отдельных участков, смен, цехов и предприятий в целом с целью анализа их работы, вскрытия резервов производства, улучшения организации труда и повышения производительности;
- оперативный контроль и учет добычи полезного ископаемого из каждого забоя и доставки его конкретным транспортным средством с целью усреднения качества руды, оптимизации хода технологического процесса в АСУ ТП для получения готовой продукции с заданными свойствами;
- учет количества отгружаемой потребителям конечной продукции.

В условиях горных и металлургических предприятий все без исключения материалы транспортируются от места добычи, затем – на разных стадиях в процессе переработки, и, наконец, как готовый продукт – потребителю. Взвешивание грузов должно производиться в движении, т.к. остановка на весах автомобиля или поезда повлекла бы заметное снижение производительности [31, 292]. Что касается конвейера, то остановка его для взвешивания груза вообще не имеет смысла.

Одной из сфер применения устройств для взвешивания грузов в потоке являются АСУ ТП. В горной промышленности все более широкое применение получают автоматизированные системы управления горно-транспортным комплексом карьеров (АСУ ГТК).

Широкое внедрение АСУ ГТК сдерживается не только ограниченностью опыта эксплуатации и незавершенностью разработки математического обеспечения, но не в меньшей мере – отсутствием (или недостаточным объемом) серийного производства ряда современных технических устройств, необходимых для автоматического ввода в управляющую ЭВМ информации о работе горных машин и транспортного оборудования. В частности, это касается производства автоматических весоизмерительных устройств и комплексов для взвешивания в

движении автомобилей, железнодорожных вагонов и материалов, перемещаемых ленточными конвейерами. Поэтому организации, проектирующие АСУ ТП, либо используют малопригодное серийное оборудование, либо применяют, а часто и сами разрабатывают, нестандартное оборудование, либо, наконец, совсем не используют весовые устройства, считая возможным определять массу перевозимого ископаемого косвенными способами: по числу ходок и грузоподъемности автосамосвалов, по результатам маркшейдерских замеров и т.п. Это, естественно, снижает эффективность автоматизированных систем управления.

В Днепропетровском горном институте (ныне Национальный горный университет) под руководством автора в течение ряда лет (с 1956 г.) велись работы по созданию и внедрению автоматических устройств и комплексов для взвешивания грузов в потоке (конвейерные, автомобильные и вагонные весы), а также технических средств контроля и учета производства продукции на карьерах.

Учитывая острую потребность в современных устройствах для взвешивания грузов в движении, а также накопленный опыт автор считал себя вправе взяться за разработку и обобщение основ теории автоматических устройств для взвешивания грузов на ленте работающего конвейера, взвешивания движущихся в потоке автосамосвалов, а также разработку указанных весоизмерительных устройств и комплексов для работы в условиях предприятий горной и металлургической промышленности. Ряд результатов выполненной работы оформлены в настоящей монографии.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Конвейерные весы, разработанные в СНГ и странах дальнего зарубежья

Конвейерные весы известны с 1907 г. [246, 270]. До 50-х годов прошлого века выпускались исключительно механические конвейерные весы, иногда с электрическими приставками (например, для передачи показаний на расстояние). Паспортная погрешность механических конвейерных весов чаще всего указывалась в пределах 0,5...1%, иногда - меньше [278, 286].

В Советском Союзе заводом Госмер выпускались весы периодического взвешивания, а с 50-х годов – интегрирующие весы ЛТ [132]. Эти весы с некоторой модернизацией выпускаются до настоящего времени под маркой ЛТМ. Согласно паспорту их погрешность не должна превышать 1%, фактически же, особенно при переменной нагрузке, их погрешность в несколько раз больше [32, 131]. Механическим конвейерным весам присущи известные недостатки [96], затрудняющие использование их в автоматизированных системах управления горными предприятиями.

Начиная с 50-х годов, все более широкое применение получают электрические методы взвешивания. Электронные конвейерные весы по сравнению с механическими имеют ряд преимуществ: простота грузоприемного устройства; большая жесткость датчиков веса; отсутствие движущихся частей; высокая точность выполнения операций умножения, суммирования, интегрирования; получение информации о весе и производительности в виде, удобном для передачи и ввода в ЭВМ; простота обслуживания; высокая точность и надежность и др. Принимая во внимание указанные достоинства, некоторые зарубежные фирмы еще в 50-х годах организовали серийный выпуск электронных конвейерных весов.

Электронные весы строились преимущественно на базе датчиков веса с проволочными преобразователями, серийный выпуск которых был к тому времени налажен рядом фирм (например, датчики SR-4 фирмы Baldwin-Lima-Hamilton Corp. [105, 291, 299]). Измерение сигнала датчиков производилось при помощи автоматического моста-компенсатора.

Интегрирование сигнала осуществлялось обычно дисковым или коническим фрикционным интегратором. Диск или конус приводились во вращение при помощи сельсина, причем сельсин-датчик вращался от ролика, который прижимался к ленте транспортера, вводя таким образом в прибор скорость перемещения груза. Таковы весы фирм Fairbanks-Morse [295], Bell Automation Corp. [253] и Trans-Weigh Co. [296].

В некоторых весах датчиком скорости служил тахогенератор, приводимый в движение лентой транспортера. Мост, собранный из сопротивлений датчиков веса, питался напряжением тахогенератора. Напряжение на выходной диагонали моста, пропорциональное производительности конвейера, интегрировалось каким-либо электромеханическим интегратором. Такой принцип был

положен в основу работы весов фирмы Trans-Weigh Co. [242, 249], Graven Electronics Ltd. [252] и др.

Достаточно подробный обзор весоизмерительных устройств, разработанных в начале 60-х годов прошлого века, приведен в [123].

Дальнейшее развитие электронной техники привело в середине 60-х годов прошлого века к созданию весов с цифровой обработкой и индикацией данных. К этому времени прочно утвердились датчики веса с тензорезисторными преобразователями. С целью дискретной обработки информации аналоговый сигнал тензодатчиков в этих весах преобразуется в цифровой код или частоту. Такими преобразователями снабжается большинство конвейерных весов, выпускаемых фирмами Cars Schenck [119], VEB Grosswaagen [230], Siemens [229], Santelma [263], Fourray [139], Avery [273], Metripond [205] и др. В качестве датчиков скорости в интегрирующих весах обычно используются тахогенераторы постоянного [119, 230, 250] или переменного [139, 266] тока, а в суммирующих весах в качестве датчиков перемещения применяются генераторы импульсов [205, 273] или сельсины, как, например, в весах с фотоэлектрическим сумматором фирмы Elliott [5].

В некоторых интегрирующих весах, чтобы исключить тахогенератор, используют импульсный датчик скорости. Так, в США и Франции в 1972 г. запатентована схема [304], в которой производится весьма сложные, на наш взгляд, преобразования для получения частотного сигнала, пропорционального производительности. Упрощенная структурная схема этих весов показана на рис. 1.1.

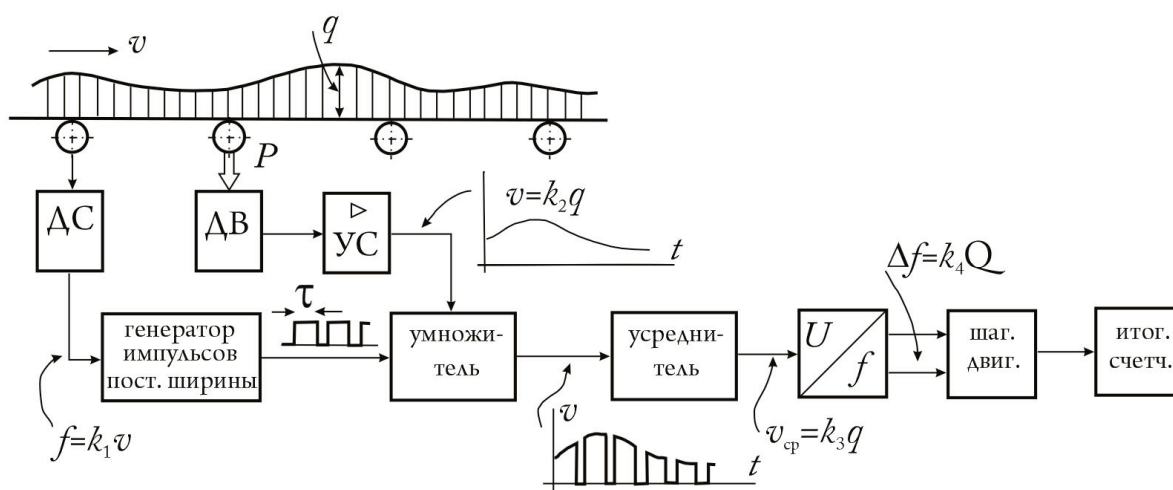


Рисунок 1.1 – Структурная схема конвейерных весов с преобразователем $U \rightarrow f$.

Сигнал частотного датчика скорости ДС преобразуется в последовательность импульсов постоянной ширины τ . Частота импульсов пропорциональна скорости ленты конвейера¹. Эти импульсы модулируются по амплитуде уси-

¹ Такое преобразование с последующим модулированием калиброванного по длительности сигнала датчика скорости частотным сигналом датчика веса предложено в 1966 г. в ДГИ [76].

ленным сигналом тензорезисторного датчика веса ДВ. Среднее значение полученного аналогового сигнала пропорционально производительности. После усреднения полученное напряжение преобразуется в частотный сигнал, который управляет шаговым двигателем. Итоговый счетчик соединен с валом шагового двигателя.

В 70-е годы разрабатываются весы, в которых электронная схема выполняет ряд сервисных функций: тарирование, градуировку, функциональный контроль, а кроме индикации – регистрацию и программное отключение конвейера. Подобные весы запатентованы фирмой Howe Richardson Scale Co. [268]. Сигнал тензорезисторного датчика веса, предварительно усиленный, подается на аналоговый умножитель, причем на второй его вход подается сигнал частотного датчика скорости, преобразованный в пропорциональное напряжение. Результирующее напряжение, пропорциональное производительности конвейера, с помощью интегратора, преобразуется в частотный сигнал, поступающий на реверсивный счетчик. На второй вход счетчика подаются импульсы, компенсирующие начальную частоту. Накопленный сигнал индицируется и регистрируется. В режиме тарирования к схеме подключается счетчик длины ленты, чтобы тарирование осуществлялось за целое число ее обегов. Градуировка осуществляется полуавтоматически при навешенных на ГУ калиброванных гирях.

Последнее время разработаны способы и устройства, реализация которых целесообразна только с помощью микропроцессоров [262].

В периодической литературе встречается большое количество рекламных сообщений об электронных конвейерных весах, применяемых в различных отраслях промышленности, в том числе – в горной [240, 250, 269, 279, 280]. В ряде случаев конвейерные весы используются на карьерах для дозированной загрузки автомашин и железнодорожных вагонов [240].

Гарантируемая точность серийно выпускаемых весов обычно составляет 0,5 или 1% при одно- или двухроликовом грузоприемном устройстве. Некоторые из них аттестованы по среднему классу точности и используются для коммерческих расчетов [251, 115].

В последние годы все более широкое применение получают частотные силоизмерительные датчики. Достоинства методов измерения с помощью частотных датчиков хорошо известны [144, 145]. Их применение позволяет существенно упростить вторичную аппаратуру цифровых весов при одновременном увеличении их точности. Частотные датчики уже сейчас широко применяются в торговых весах, и даже складывается мнение, что их основной областью применения останутся рычажные весы для измерения масс до 20 кг [226]. Однако, вопреки такому мнению, разрабатываются и выпускаются весоизмерительные устройства для взвешивания груза в кузове автосамосвала [41, 294], для взвешивания в движении автомобилей [26], железнодорожных вагонов [128, 173], и материалов, перемещаемых конвейерами [29, 74, 113, 135, 144, 241, 288].

Особо следует сказать о конвейерных весах, разработанных австралийской фирмой Inflo Belt Weighers Pty. Ltd. и выпускаемых в ряде стран (Австралия, США, Великобритания и др.) филиалами этой фирмы [113, 116, 232, 241, 260, 265, 280, 288]. Судя по рекламным сообщениям, это самые точные из се-

рийно выпускаемых весов. Гарантируемая точность взвешивания в течение годового периода между калибровками составляет $\pm 0,25\%$ ¹ при нагрузках 30...100% от номинальной производительности конвейера.

Столь высокая точность могла быть достигнута благодаря тому, что в весах Inflo Resometric применено грузоприемное устройство относительно большой длины (4 роlikоопоры), усилие передается через систему рычагов непосредственно на струну (а не на «силовой шунт»), применен частотный метод измерения силы и скорости, а также цифровая обработка информации.

В венгерском журнале *Meres es automat* в статье «Дискретные весы-конвейеры с системой обработки частотных сигналов» [254] описан принцип работы конвейерных весов, в которых сигнал тензорезисторных датчиков веса преобразуется в частоту, а затем обрабатывается электронной схемой. Принцип работы весов состоит в следующем.

Каждый импульс частотного сигнала датчика скорости преобразуется в калиброванный импульс длительностью T_p (рис. 1.2), периодически открывающий две схемы И. Через одну схему И на вход «+» реверсивного счетчика проходит сигнал от датчика веса с частотой $f_s = f_{s0} + K_1 P(x)$, где $P(x)$ – сила, действующая на датчик веса. Через другую схему И на вход «-» проходят импульсы генератора с частотой f_a . Если установить $f_a = f_{s0}$, и $T_p = 1/K_1$, то на выход реверсивного счетчика придут импульсы в количестве $N = \sum_{i=0}^n \overline{P(x_i)}$, где n –

число циклов взвешивания. Количество импульсов N пропорционально массе перемещенного груза. Эта схема по принципу действия полностью соответствует схеме, разработанной в ДГИ в 1966 году [76] и описанной в последующих разделах.

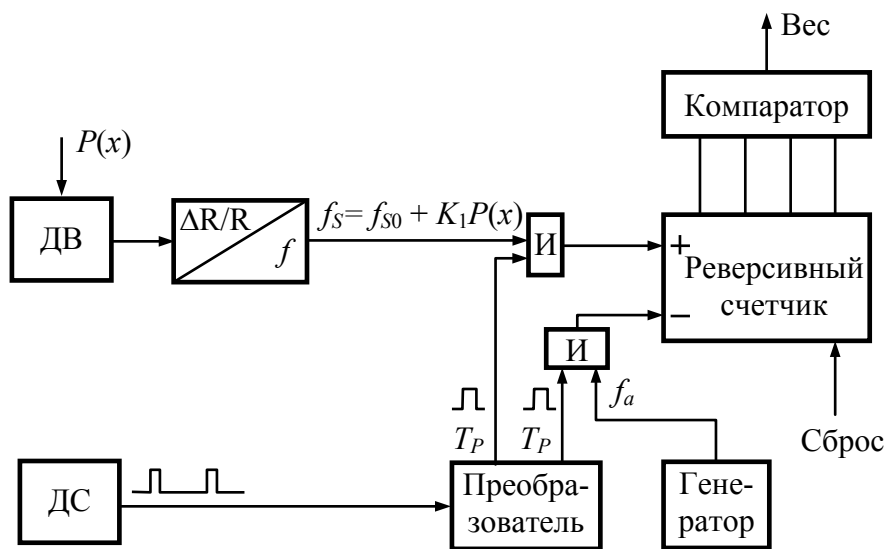


Рисунок 1.2 – Схема конвейерных весов с дискретной обработкой частотных сигналов (по [254])

¹ О весах с точностью $\pm 2, 1, 1/2$ и $1/4\%$, выпускаемых фирмой Fairbanks Morse, коротко говорится также в [250].

Описанные весы свидетельствуют о перспективности применения датчиков с частотным выходом в устройствах для взвешивания в движении больших масс.

Интересна также идея, положенная в основу работы конвейерных весов, запатентованных фирмой Merric Scale Mfg. Co. [247]. В этих весах (рис. 1.3) измерение массы производится по частоте колебаний механической системы, состоящей из грузоприемной платформы 1 (с грузом), рычагов 2,3,4 и плоской пружины 5. Колебания возбуждаются электромагнитом 6, на катушку которого поступают калиброванные импульсы от формирователя 7. Линеаризация зависимости частоты колебаний f_1 от массы груза m , находящегося на платформе 1, осуществляется при помощи специального механического устройства 8. Колебания сердечника возбуждают в катушке 9 напряжение, частота которого f_1 , обратно пропорциональна массе m . После усиления (10) напряжение поступает на смеситель (вычитатель) 11. Частота напряжения на выходе вычитателя пропорциональна массе m . Усилитель-формирователь 13 периодически замыкает ключ 14, при этом (если замкнут ключ 18) на счетчик 19 поступают и фиксируются импульсы. Периодическим размыканием ключа 18 управляет датчик скорости (15, 16) и усилитель-формирователь 17. Ключи 14 и 18 выполняют логическую функцию И. При этом количество импульсов, поступающих на счетчик 19, пропорционально массе груза, перемещенного конвейером. Конструкция весов отличается значительной сложностью. В изученной нами литературе нет теоретического обоснования работы весов, анализа погрешностей или результатов их испытаний.

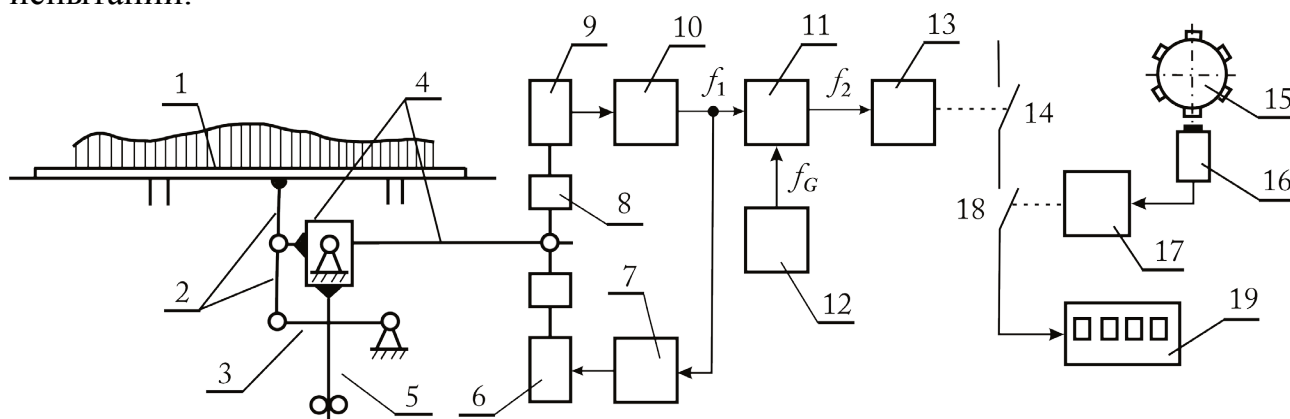


Рисунок 1.3 – Упрощенная схема конвейерных весов с частотными сигналами фирмы Merric Scale Co.

Несмотря на значительное количество разработанных и выпускающихся конвейерных весов, за рубежом еще ощущается их недостаток и отмечается отставание уровня автоматизации технологических процессов, в которых используются сыпучие материалы, из-за отсутствия необходимых весоизмерительных устройств [178].

В СССР электрические конвейерные весы начали разрабатывать в конце 50-х годов, почти одновременно и независимо друг от друга в нескольких организациях.

Одной из первых была опубликована схема конвейерных весов, разработанных Ленинградским филиалом ВНИИСтройдормаш [48]. Для получения напряжения, пропорционального погонной массе, использовались датчики веса с проволочными преобразователями. Напряжение датчиков измерялось автоматическим потенциометром и при помощи вращающегося трансформатора преобразовывалось в более мощный сигнал переменного тока. Это напряжение, пропорциональное погонной массе, интегрировалось индукционным электро-счетчиком. Датчика скорости в схеме не было.

В это же время (1959-60 гг.) в научно-исследовательском и конструкторском институте испытательных машин, приборов и средств измерения масс (НИКИМП, Москва) были разработаны электротензометрические конвейерные весы на базе прибора ЭГВД-05 [209]. Мост из сопротивлений двух датчиков веса питался напряжением тахогенератора, приводимого в движение лентой транспортера. Напряжение, пропорциональное производительности конвейера, измерялось автоматическим потенциометром, преобразовывалось в угол поворота и интегрировалось встроенным в прибор время-импульсным интегратором¹.

В 1960-62 гг. в НИКИМПе разрабатывались конвейерные весы с интегрирующим приводом, однако нам неизвестны публикации этих разработок.

В 60-х годах НИКИМП обращается к частотным методам измерения веса. Разрабатываются вибрационно-частотные датчики веса, на базе которых строятся различные весоизмерительные устройства.

В 1967 году в этом институте были разработаны конвейерные весы с частотными датчиками. Макетный образец испытан на Московском коксогазовом заводе. После усовершенствования схемы и конструкции весов НИКИМПом разработаны и испытаны на Коммунарском коксохимическом заводе ленточные весы ДВЛ-1Т, а также изготовлена партия весов для металлургического завода в Бокаро (Индия) [133, 135]².

В 1972 г. сообщалось, что завод «Прибордеталь» (Орехово-Зуево) изготавливает три модификации (ВН-6ТВ, ВН-7ТВ и ВН-8ТВ) конвейерных весов с вибрационно-частотными датчиками на производительность 500, 600 и 900 т/ч [29].

В 1976 – 1980 гг. в НИКИМПе был разработан агрегатный комплекс средств измерения и дозирования масс (АСИМ). Среди блоков комплекса АСИМ – интегратор конвейерных весов и другие устройства [137].

По имеющимся сведениям конвейерные весы с частотными датчиками прошли испытания на Челябинском металлургическом заводе, но в серийное производство не переданы. В 80-е годы в НИКИМПе начата разработка конвейерных весов с микропроцессорным управлением.

С конца 50-х годов электронные весы разрабатываются в киевском Институте автоматики. Разработано и испытано несколько схем электронных кон-

¹ Несколько позднее, в 1967 году, такие же по принципу действия и схемным решениям конвейерные весы были разработаны институтом УКРНИИгидроуголь (Ворошиловград).

² По принципу действия эти весы аналогичны весам, разработанным в ДГИ и описанным в главе 4.

вейерных весов. В [183] описано весоизмерительное устройство для контроля производительности роторных экскаваторов, в котором в качестве интегратора используется счетчик вольтчасов типа М642¹. Переменное напряжение тензорезисторных датчиков веса измеряется автоматическим потенциометром. Скорость ленты вводится тахогенератором. Точность взвешивания – 2,5 %.

В работах [23, 107] дано описание и анализ работы конвейерных весов с интегрирующим приводом. Весы предназначены для определения производительности и выработки роторных экскаваторов, поэтому в них введен датчик угла наклона роторной стрелы. Датчик веса – тензорезисторный. Входная диагональ моста питается выпрямленным напряжением от тахогенератора – датчика скорости. Выходное напряжение моста компенсируется напряжением второго тахогенератора, приводимого во вращение серводвигателем. Угол поворота вала серводвигателя, связанный со счетчиком, пропорционален массе перемещенного груза.

В этом же институте разработаны конвейерные весы с множительно-интегрирующим устройством дискретного действия [24, 181, 182]. Импульсы, количество которых пропорционально массе перемещенного груза, генерируются при модуляции магнитного потока движущимся относительно зубцов сердечником. Кроме описанных схем, в Киевском институте автоматики разработан ряд других весов [22, 24, 216], в частности для конвейеров с изменяющимся углом наклона [157].

В институте ПечорНИИпроект разработаны и аттестованы электронные тензометрические конвейерные весы ТКВ-1 [28, 200], имеющие взрывобезопасное исполнение. Весы разработаны для трех модификаций конвейеров с плоской или лотковой лентой, шириной 1000, 1200 и 1400 мм. Тензорезисторный датчик веса выполнен в виде измерительного ролика. Один или два таких ролика устанавливаются на специальной роликоопоре. Напряжение тензометрического моста измеряется автоматическим компенсатором. Серводвигатель компенсатора перемещает также движок перемножающего реохорда, на который подается напряжение от тахогенератора – датчика скорости. Напряжение, пропорциональное производительности конвейера, интегрируется двигателем интегратора ИМ-6. На валу интегратора укреплен постоянный магнит, который вызывает периодическое замыкание магнитоуправляемого контакта. Формируемые импульсы фиксируются электромеханическим счетчиком. Указывается, что погрешность взвешивания не превышает 1% при изменении погонной массы в пределах 50...100% от номинальной.

Длительное время конвейерные весы разрабатываются в Карагандинском научно-исследовательском угольном институте (КНИУИ) и Карагандинском политехническом институте. Опубликован ряд работ по теории взвешивания груза на конвейере, динамике конвейерных весов, исследованию разработанных схем [16, 17, 50, 52, 55, 56, 57, 58, 59, 60].

¹ Схема электронных весов со счетчиком вольтчасов разработана также в институте УкрНИИпроект [121, 122].

В разработанных и испытанных в производственных условиях конвейерных весах ЭТВ-2 погонная нагрузка измеряется тензорезисторными датчиками веса. Скорость ленты вводится с помощью тахогенератора. Измерение сигнала, пропорционального производительности, производится электронным потенциометром ЭПД. Интегрирование сигнала, пропорционального производительности, осуществляется индукционным или электродинамическим счетчиком¹. Точность взвешивания 1,5...2,0%.

В 1972 г. на конвейере ОФ Джекказганского ГОКа испытаны весы без датчика скорости [49]. Сигнал четырех датчиков веса, на которых подвешено грузоприемное устройство, измеряется электронным потенциометром. Выходной частотный сигнал, полученный от струнного преобразователя ПС, после пересчета и вычитания начальной частоты суммируется на итоговом счетчике. Наибольшая погрешность, зафиксированная при испытаниях, – 1,1%

Весы для измерения производительности горно-обогатительного комплекса с преобразованием аналог-частота и последующим интегрированием частотного сигнала разработаны и испытаны на Верхнеднепровском горно-металлургическом комбинате [11, 37]. В качестве весоизмерителя использован магнито-анизотропный датчик, сигнал которого при помощи прибора ПНС-Т преобразуется в частоту. Сигнал, усиленный в конце линии связи, поступает на электронный счетчик, выполняющий функцию интегратора. Погрешность взвешивания – 2,5%.

Конвейерные весы с серийным преобразователем напряжение/частота (ПНС-Т), используемые в системе автоматической стабилизации мельницы на свинцово-цинковом комбинате ОФ Алмалыкского ГМК, описаны в [179]. Напряжение, пропорциональное производительности, снимают с диагонали моста тензорезисторного датчика веса, подключенного к тахогенератору постоянного тока. Оригинально (но не просто в изготовлении) однороликовое неуравновешенное грузоприемное устройство. Нелинейность – 0,5%. Нестабильность градуировки – в пределах 0,8% (за три месяца).

Схема и принцип действия весов, в которых сигнал магнитоупругих датчиков преобразуется в последовательность импульсов, получаемых с помощью простого интегратора на транзисторах, описаны в [201]. О точности весов не говорится.

В Одесском политехническом институте разработан комплекс унифицированных приборов и устройств Государственной системы приборов для автоматизации взвешивания движущихся объектов [199]. Среди возможных областей использования комплекса приборов указаны и конвейерные весы. Описание принципа действия этих весов приведено также в [102]. Сигнал от тензорезисторных датчиков веса 2 (рис. 1.4) поступает в измерительный блок 5, где быстродействующим следящим автокомпенсатором 6 преобразуется в цифровой код. По сигналу импульсных датчиков перемещения 3 и 4 цифровой код из автокомпенсатора переносится в сумматор 7, откуда результат передается на

¹ Эта схема в принципе не отличается от схемы, разработанной в киевском Институте автоматики

выходное устройство 8. Перенос кода в сумматор происходит после перемещения ленты на длину l_B/n . Число измерений на длине весоизмерительного участка (n) выбирается из условия подавления динамической помехи. Конструкция грузоприемного устройства весов ВКТС приведена в [32].

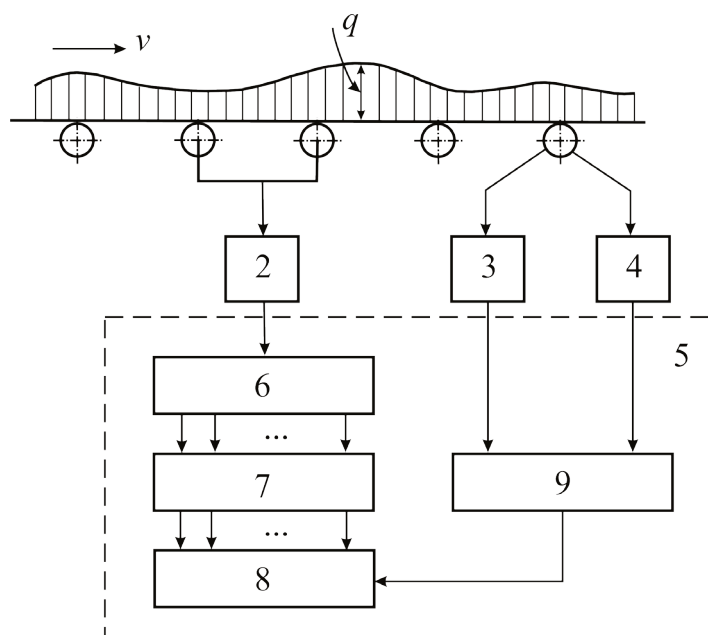


Рисунок 1.4 – Структурная схема электронных конвейерных весов Одесского политехнического института.

В заключение обзора отметим, что в 1969 году Институтом горной механики и технической кибернетики им. М.М. Федорова (г. Донецк) разработаны электронно-гидравлические весы (ЭГВ), предназначенные для учета веса груза, транспортируемого ленточными конвейерами в условиях шахт углебогатительных и брикетных фабрик, угольных складов и т.п. Весы имеют искровзрывобезопасное исполнение [208, 225]. Производство весов ЭГВ освоено производственным объединением «Точмаш» (Одесса). Совершенствование весов продолжается [155].

В Днепропетровском горном институте разработано несколько вариантов конвейерных весов, о которых отдельно сказано в следующих главах.

Как следует из приведенного обзора, за 100 лет сменилось три поколения конвейерных весов:

I – механические конвейерные весы, часто с электрическими устройствами передачи показаний на расстояние и передачи управляющих воздействий на исполнительные механизмы.

II – электронные конвейерные весы с силоизмерительными датчиками (чаще всего – тензорезисторными), тахометрическими или сельсинными датчиками скорости и электромеханическими интеграторами (фрикционными, интегрирующим приводом и т.п.). Элементная база – лампы или транзисторы.

III – электронные конвейерные весы с тензометрическими (или частотными) датчиками веса, импульсным датчиком скорости, преобразователем

напряжения в частоту или код и интегрированием частотного сигнала с помощью электронного счетчика или суммированием кодов. Элементная база – транзисторы или интегральные микросхемы.

Далее характерными становятся весы с программным управлением, построенные на больших интегральных микросхемах, имеющие в качестве основы один или несколько микропроцессоров, микроконтроллеров.

Кроме весов, основанных на измерении силы тяжести, в СССР и за рубежом в 60-х годах начали разрабатывать и изготавливать конвейерные весы, принцип действия которых основан на поглощении гамма- или бета-лучей, пронизывающих поток материала, перемещаемого конвейером [243, 245, 248, 283]. Погрешность таких весов больше, чем гравитационных, и обычно составляет 2...3% [245], однако при мало меняющейся производительности погрешность может быть существенно меньше [243, 248, 273].

Одновременно с разработкой и совершенствованием схем и конструкций конвейерных весов разрабатывались основы теории. Особое внимание уделялась анализу погрешностей, как общих (влияние работающего конвейера), так и частных (специфических для анализируемой схемы). Необходимо отметить глубокие теоретические исследования, выполненные Б.А. Кузнецовым [124, 125], Е.М. Высочиным [33, 34, 35, 124], Е.Б. Карпиным [108, 109, 110], З.К. Донисом [16, 50, 52, 55, 56, 57], В.Ф. Бырькой [16, 17], Е.А. Дашевским [43, 44], Л.А. Верещагиным [23, 24], Г.Я. Ильштейном [74, 78, 117, 118], Ю.В. Гудовским [39, 40, 55] и др. Значительное количество теоретических работ выполнено зарубежными авторами [246, 248, 276, 277, 299]. В течение ряда лет вопросами теории конвейерных весов занимался и автор этой монографии [71, 72, 74, 78, 85, 94, 96, 99, 100, 101].

Несмотря на большой объем выполненных исследований, все еще нельзя считать, что основы теории конвейерных весов полностью разработаны. В частности, ввиду чрезвычайной сложности, не полностью выяснено влияние на работу весов конвейерной ленты с учетом ее упругих свойств и переменной жесткости, влияние динамической нагрузки (в частности ударов) и неравномерности движения ленты (движение с ускорениями в боковом и вертикальных направлениях), влияние неточности монтажа и упругих свойств платформы и некоторые другие.

1.2. Взвешивание движущихся автосамосвалов и поездов: состояние разработок

Проблема взвешивания движущихся объектов возникла в связи с необходимостью автоматизировать процесс определения массы грузов, перевозимых в железнодорожных вагонах, и тем самым сократить весьма значительные потери времени и расходы, связанные с маневровыми работами и собственно взвешиванием¹. За рубежом электронные весы для взвешивания железнодорожных ва-

¹ По данным [3, 104], общий простой вагонов под операциями взвешивания составляет примерно 60 млн. вагоно-часов в год, а затрата маневровых средств – около 3 млн. локомотиво-часов.

гонов на ходу были разработаны и внедрены в эксплуатацию в начале 50-х годов [261, 267]. В настоящее время электронно-тензометрические вагонные весы серийно выпускаются несколькими ведущими зарубежными фирмами, в том числе – International Railroads Weighting Corp. (США), Fairbanks-Morse (США), Avery, (Великобритания), Canadian National Railwais, Toledo Svenska и др.

Взвешиваемые вагоны движутся в составе поезда через грузоприемную платформу, устанавливаемую, как правило, на четырех [150, 300, 303] датчиках веса с тензорезисторными преобразователями, иногда нагрузка передается на два [301] или даже на один датчик веса, если используется грузоприемная платформа от механических весов с рычажной системой [150, 303]. Сигналы датчиков суммируются, усиливаются и преобразуются в частоту [301] или цифровой код [2], пропорциональный силе, действующей на платформу. Для уменьшения погрешности, которая может быть вызвана динамической составляющей нагрузки, используются методы, обзор которых дан в разд. 6.1.

С помощью весов производится повагонное [264, 301], потележечное [3, 150] или поосное [258, 259] взвешивание.

Обычно весы снабжаются устройствами для отображения и печати веса каждого вагона, его номера, веса состава, а также даты и времени взвешивания [150, 258, 300]. Обычно весы имеют связь с ЭВМ [303]. Согласно сообщениям в журнальных статьях и проспектах фирм, выпускаемые электронные весы обеспечивают точность взвешивания $0,2...0,1\%¹$ при скорости $6...25$ км/ч [3, 5, 150, 258, 259, 264, 299].

Стоимость вагонных весов – $80\ 000...125\ 000$ долларов [3, 150]. При этом затраты окупаются в течение нескольких месяцев.

В 60-х годах в связи с разработкой и внедрением автоматизированных систем управления (АСУ) возникла потребность в автоматических весах как средствах сбора и передачи на вычислительный центр информации о работе технологического транспорта. На ряде шахт и карьеров в США, Канаде, Швеции смонтированы весоизмерительные и информационные устройства, осуществляющие сбор и обработку технологической и коммерческой информации [258, 264, 300, 301, 303], причем используются как вагонные, так и автомобильные [228, 257, 285, 292] весы.

В автомобильных весах автосамосвалы взвешиваются поосно [103, 120, 257, 285, 298] или в один прием [257, 292], при этом грузоприемная платформа иногда имеет весьма большую длину (до $45...70$ футов), и устанавливается на четырех или восьми тензорезисторных датчиках веса [257, 292]. Если весы используются для коммерческих расчетов, то взвешивание производится в статике. В [287] описаны электронные автомобильные весы, установленные в 1974 г.

¹ Имеются веские основания, чтобы сомневаться в приведенных цифрах. Действительно, при пути взвешивания $l_B = 2...2,5$ м и скорости $v = 20...25$ км/ч время взвешивания $\tau = 0,3...0,4$ с. При частоте динамической помехи $F = 2,5...3$ Гц во времени взвешивания укладывается $0,75...1,2$ периода помехи. Известные в настоящее время методы уменьшения влияния динамической помехи эффективны только при $\tau / T > 2$. Согласно анализу, выполненному в институте НИКИМП, погрешность меньше чем $0,5\%$ может быть обеспечена только для суммарного веса состава из $10...20$ вагонов [3].

на одном из песчаных карьеров во Франции. Грузоприемная платформа 13х3 м установлена на шести тензодатчиках, сигнал которых преобразуется в частоту и интегрируется в течение постоянного интервала времени. Наибольший предел взвешивания – 50 т. Цикл взвешивания 25...30 с.

Современные весоизмерительные системы имеют цифровую индикацию, документальную регистрацию, выход на ЭВМ, а часто и встроенную ЭВМ для автоматического управления процессом взвешивания, исключения тары и др. операций [228, 233, 257, 266, 287, 292].

В некоторых случаях разрабатывается и используется также весоизмерительные устройства, встроенные в автомашину [25, 27, 272]. Наиболее точное из таких устройств, разработанное в Швеции и названное Aton, использует частные датчики веса, сигнал которых обрабатывается микропроцессором 4040 фирмы Intel. Максимальная погрешность – 1% [41, 294].

Создание и освоение серийного производства микропроцессоров и микро-ЭВМ позволяет перейти к качественно новому поколению устройств для взвешивания в движении, обладающих повышенной чувствительностью, точностью, расширением функциональных возможностей. Ряд зарубежных фирм уже освоили выпуск или ведут разработки весоизмерительных устройств на основе микропроцессоров [112, 129, 140, 168, 231, 257, 294, 302] в том числе для взвешивания автомобилей и поездов [207, 255, 251, 294].

В Советском Союзе работы по созданию электронных весов для взвешивания железнодорожных вагонов в составе движущегося поезда начаты одесским политехническим институтом (ОПИ) в 1959 г. [199], а затем – институтом НИКИМП.

Одесским политехническим институтом совместно с Особым конструкторским бюро средств измерения масс (ОКБ СИМ – Одесса), разработаны электронно-тензометрические вагонные весы 75 х 2ТВД-4 [32], 100 х 2ТВД-5 [32] и ТВД-6 [214]. В 1972 г. Одесским заводом тяжелого весостроения им. П.Старостина (ныне - производственное объединение "Точмаш") освоено производство весов 100 х 2ТВД-5 для взвешивания железнодорожных составов с точностью $\pm 1,5$ (1,75)% при $v < 6$ км/ч [4, 191]. Ведутся также работы по созданию автомобильных весов с тензорезисторными силоизмерительными датчиками.

В автомобильных весах 1-ВАТ [15], разработанных ОПИ и изготовленных заводом им. П. Старостина, грузоприемная платформа длиной 8,8 м, подвешена на четырех маятниковых подвесках и укреплена растяжками. В подвески встроены теизометрические датчики веса. Максимальная нагрузка на платформу – от 20 до 70 т. Уменьшение динамической помехи осуществляется с помощью управляемого RC-фильтра [199]. Точность взвешивания $\pm 1\%$ при скорости автомобиля до 6 км/ч.

Автомобильные весы ТС-150Д24А с наибольшим пределом взвешивания 150 т предназначены для взвешивания автосамосвалов БЕЛАЗ при скорости до 5 км/ч [32]. Погрешность взвешивания $\pm 1\%$ от предельной нагрузки. Размеры грузоприемной платформы – 9х5 м. Вторичный прибор снабжен RC-фильтром нижних частот с ненулевыми начальными условиями для уменьшения влияния динамических помех.

В ОПИ также разработаны унифицированные вторичные приборы [199], которыми комплектуются весоизмерительные устройства различного назначения, в том числе весы для взвешивания на ходу автосамосвалов.

В выпущенном ЦНИИТЭИ приборостроения проспекте сообщается об автомобильных весах ТС-60Д24АД¹, предназначенных для взвешивания движущихся автосамосвалов и осуществления оперативного учета производительности горнотранспортного оборудования на открытых горных работах. Допускаемая погрешность $\pm 1\%$ при скорости движения до 6 км/ч и нагрузке 60 т.

В институте НИКИМП разработано несколько типов вагонных весов. В числе разработок – весы 1826 ВЧС-200В для потележечного взвешивания вагонов в составе поезда, выполненные на базе вибрационно-частотного датчика, на который нагрузка передается через систему рычагов. Точность взвешивания $\pm 1\%$ при $v \leq 10$ км/ч [4, 191]. Эти весы готовились к серийному производству [126, 190]. Разработаны также весы 1723 ВЧС-200В для поосного взвешивания железнодорожных вагонов с точностью $\pm 1\%$ при $v \leq 10$ км/ч [4, 128]. Разрабатывается усовершенствованный вариант устройства – 1945 УР [169, 191]. В 1980 г. прошли государственные испытания вагонные весы 1959 ТС - 200В для поосного взвешивания, построенные на основе тензорезисторных силоизмерительных датчиков и прибора Ф4231.

В этом же институте в 1973 г. разработаны автомобильные весы 1719 ВЧС-100А грузоподъемностью до 100..120 т для поосного взвешивания автосамосвалов БЕЛАЗ, движущихся со скоростью до 10 км/ч. Весы предназначены для включения их в АСУ горнодобывающими карьерами [26]. Допускаемая погрешность весов $\pm 2\%$ от наибольшей взвешиваемой массы. Грузоприемная платформа весов устанавливается на четырех вибрационно-частотных датчиках. Вторичная аппаратура осуществляет линеаризацию характеристик датчиков, суммирование их сигналов и интегрирование с умножением на весовую функцию вида $1 - 0,85\cos\xi t$, причем плавная функция заменяется ступенчатой с равномерным разбиением по оси абсцисс на 16 уровней аппроксимации. При времени интегрирования $\mathcal{T} = 0,8$ с этим обеспечивается эффективное подавление динамической помехи при частоте ее больше $2,5 \text{ Гц}^2$. Для уменьшения погрешности от дрейфа нуля предусмотрена автоматическая компенсация веса платформы. Проводились работы по модернизации этих весов [169]. Разработаны также весы для поосного взвешивания автомобилей (1948ТС-160Д24А) [137]. Дальнейшее развитие работ в НИКИМПе связано с построением весов на основе агрегатного комплекса АСИМ. Выполнялись также разработки весоизмерительных устройств на базе микропроцессорных наборов БИС.

В автоматизированной системе управления «АСУ-КАРАТ», разработанной ЦНИИКА для контроля и учета выемочно-транспортных работ на карьерах, в числе других устройств используются автомобильные весы. В первом варианте использовались весы с магнитоупругими силоизмерительными датчиками

¹ Разработчик не указан, но судя по [12, 14, 32] – это совместная разработка ОКБ СИМ и Куйбышевского филиала института Оргэнергострой.

² По данным завода-изготовителя и по результатам исследований [31, 127] частота динамической помехи автосамосвалов БЕЛАЗ обычно лежит в пределах 1,3...2,3 Гц.

[106] для поосного взвешивания без использования каких-либо методов уменьшения влияния динамической помехи. В более поздних разработках [1], используются весоизмерительные устройства с наибольшим пределом взвешивания 150 т. Точность взвешивания $\pm 2\%$ при скорости до 8 км/ч.

Разработка электронных автомобильных весов с 1968 г. велась также в Днепропетровском горном институте (ныне – Национальный горный университет Украины). Разработанные весы подробно описаны в данной монографии.

Несмотря на значительное количество выполненных разработок и испытанных образцов, в нашей стране до сих пор не организован серийный выпуск автомобильных весов, которые удовлетворяли бы всем требованиям и могли бы использоваться в АСУ промышленным транспортом горных предприятий. Вместе с тем теоретические основы работы устройств для взвешивания движущихся объектов, и в частности – методы уменьшения влияния динамической помехи к настоящему времени достаточно хорошо разработаны. Глубокие теоретические исследования этих вопросов выполнены Ю.С. Плискиным, А.П. Ракаевым, Ю.М. Сергиенко, Г.Ф. Маликовым, Д.Е. Вакманом, Н.П. Похило, В.В. Скалевым, Г.А. Трофименко, Э.М. Бромберггом, а также зарубежными учеными J. Leonovich, A. Ferguson, T. Kemeny и др.

Вопросами теории, разработкой методов взвешивания и аппаратуры автомобильных и вагонных весов в течение ряда лет занимался также автор этой монографии. Результаты этих исследований изложены в представленной работе.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВЗВЕШИВАНИЯ ГРУЗА В ПОТОКЕ НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА

2.1. Классификация методов и средств взвешивания груза на ленте конвейера

Все весоизмерительные устройства в зависимости от способа измерения массы транспортируемого груза делятся на две группы:

- устройства с прямым измерением массы,
- устройства с косвенным измерением массы.

В последних масса перемещенного груза определяется косвенно, например, по степени поглощения радиоактивного излучения, по расходу электроэнергии на транспортирование массы груза конвейером и т.п. В настоящей работе эти методы не рассматриваются, так как с нашей точки зрения они не перспективны ввиду невысокой точности, а иногда и небезопасности в обслуживании.

Устройства прямого измерения веса могут быть условно разделены на три класса: механические весы, электромеханические (электронные) весы и прочие весы.

В работе рассматриваются только наиболее перспективные электромеханические (электронные) весы, состоящие из грузоприемного устройства, датчиков веса, скорости или перемещения и электронного устройства, осуществляющего обработку электрических сигналов, поступающих от датчиков.

О недостатках механических весов достаточно полно сказано в работе [96]. К прочим относятся, например, электронно-гидравлические конвейерные весы.

В основу работы конвейерных весов может быть положен один из следующих принципов:

– принцип суммирования масс «порций» груза (m_i), сменяющих друг друга на весоизмерительном участке конвейера (суммирующие весы); масса груза \mathfrak{M} определяется как

$$\mathfrak{M} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} m_i, \quad \mathfrak{N} = \frac{v_{cp.\mathfrak{T}} \mathfrak{T}}{l_B}, \quad (2.1)$$

где \mathfrak{N} – число циклов за время взвешивания \mathfrak{T} ; $v_{cp.\mathfrak{T}}$ – средняя скорость; l_B – длина весоизмерительного участка;

– принцип интегрирования (по перемещению) погонной массы (интегрирующие весы):

$$\mathfrak{M} = \int_L q(x) dx \approx \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} q_i \Delta x; \quad L = v_{cp.\mathfrak{T}} \mathfrak{T}; \quad (2.2)$$

– принцип интегрирования (по времени) производительности конвейера:

$$\mathfrak{M} = \int_{\mathfrak{T}} Q(t)dt = \int_{\mathfrak{T}} q(t)v(t)dt \approx \sum_{i=1}^n Q_i \Delta t; \quad (2.3)$$

– принцип суммирования (с частотой $f_c=1/T_c$) интегралов погонной массы за постоянное время τ (интегросуммирующие весы):

$$\mathfrak{M} = k \sum_{(T_c)}^{\mathfrak{T}} \int_{\tau} q(t)dt, \quad f_c = k_{vf}v, \quad \tau < T_c = \frac{1}{f_c}, \quad k = \frac{x_{rc}}{\tau} = \frac{1}{k_{vf}\tau}; \quad (2.4)$$

– принцип суммирования произведений интегралов погонной массы на среднюю (на интервале T_m) скорость груза:

$$\mathfrak{M} = \sum_{(T_n)}^{\mathfrak{T}} \left(v_{cp.T_n} \int_{T_n} q(t)dt \right), \quad T_n = nT_c. \quad (2.5)$$

Запись вида $\sum_{(T_n)}^{\mathfrak{T}}$ означает, что суммирование производится с периодом

повторения T_n в течение времени взвешивания \mathfrak{T} .

Вопрос об использовании того или иного принципа решается при сравнительном анализе вариантов, так как принципиальных преимуществ ни один из этих методов не имеет.

Суммирующие весы точны принципиально, их методическая погрешность равна нулю. Что касается интегрирующих весов, то их принципиальная точность не очевидна и требует доказательства. Интегросуммирующие весы (с паузами), впервые предложенные в 1966 году В.И. Жуковицким и Г.Я. Ильштейном [76, 78], не являются принципиально точными, однако, как будет показано ниже, их методическая погрешность достаточно быстро стремится к нулю. Интегросуммирующие весы с умножением интегралов на скорость предложены автором монографии и рассматриваются здесь впервые. Они принципиально точны, их алгоритм реализован в микропроцессорных весах.

2.2. Обоснование принципа интегрирования производительности при взвешивании груза на ленте конвейера

Принцип интегрирования в конвейерных весах был обоснован в работах [96, 125]. Однако, в работе [156], где также рассматривается этот вопрос, указано на неточность, допущенную в [125]. Некоторые авторы вообще считают метод интегрирования принципиально неточным [102]. Ниже приводится обоснование принципа интегрирования при наименьших допущениях.

2.2.1. Однороликовые весы

Известно, что масса перемещенного конвейером груза

$$\mathfrak{M} = \int_{\mathfrak{T}} q_{\Gamma}(t) v_{\Gamma}(t) dt, \quad (2.6)$$

где Q - погонная масса груза на ленте в каком-либо сечении (например, проходящем через весоизмерительный ролик); v_{Γ} – скорость перемещения груза в этом сечении; \mathfrak{T} – время взвешивания.

Обычно, при обосновании принципа действия интегрирующих конвейерных весов считают, что сигнал датчика веса пропорционален погонной массе q_{Γ} . В действительности этот сигнал пропорционален силе $P_{\text{в}}(t)$, действующей на датчик веса, которая является сложной функцией погонной масса $q_{\Gamma}(x,t)$. С некоторым приближением можно считать, что сила $P_{\text{в}}$ пропорциональна средней на длине весового участка $l_{\text{в}}$ погонной массе

$$q_{\Gamma, \text{ср.}/l_{\text{в}}} = \frac{1}{l_{\text{в}}} \int_{l_{\text{в}}} q_{\Gamma}(x,t) dx. \quad (2.7)$$

Строго говоря, измерительный прибор конвейерных весов интегрирует сигнал, пропорциональный произведению силы $\Delta P_{\text{в}}$ (а не погонной массы q_{Γ}) на скорость ленты $v_{\text{л}}$ (а не скорость груза v_{Γ}), т.е.

$$A = k \int_{\mathfrak{T}} \Delta P_{\text{в}}(t) v_{\text{л}}(t) dt, \quad (2.8)$$

где $\Delta P_{\text{в}}$ – приращение силы, вызванное действием веса транспортируемого груза; k – коэффициент пропорциональности.

На рис. 2.1 показан участок конвейера, прилегающий к весоизмерительной роликоопоре Рл2.

Проведем через центры роликов Рл1 и Рл2 ось x , а затем – касательные к ленте (в точках В1 и В2) таким образом, чтобы они были параллельны оси x .

Рассматривая равновесие участка ленты с грузом, расположенного между сечениями, проходящими через точки В1 и В2, найдем силу, действующую на датчик веса, –

$$P_{\text{в}}(t) = gm_{\text{п}} \frac{a_1}{a_2} + gm_{\text{п}} w_{\text{п}} \frac{a_4}{a_3} + g \frac{a_3 + w_{\text{п}} a_4}{a_2} \cos \beta \int_{-\zeta_1(t)l_1}^{\zeta_2(t)l_2} q_{\text{п}}(x,t) dx + \\ + g \frac{a_3 + w_{\text{п}} a_4}{a_2} \cos \beta \int_{-\zeta_1(t)l_1}^{\zeta_2(t)l_2} q_{\Gamma}(x,t) dx. \quad (2.9)$$

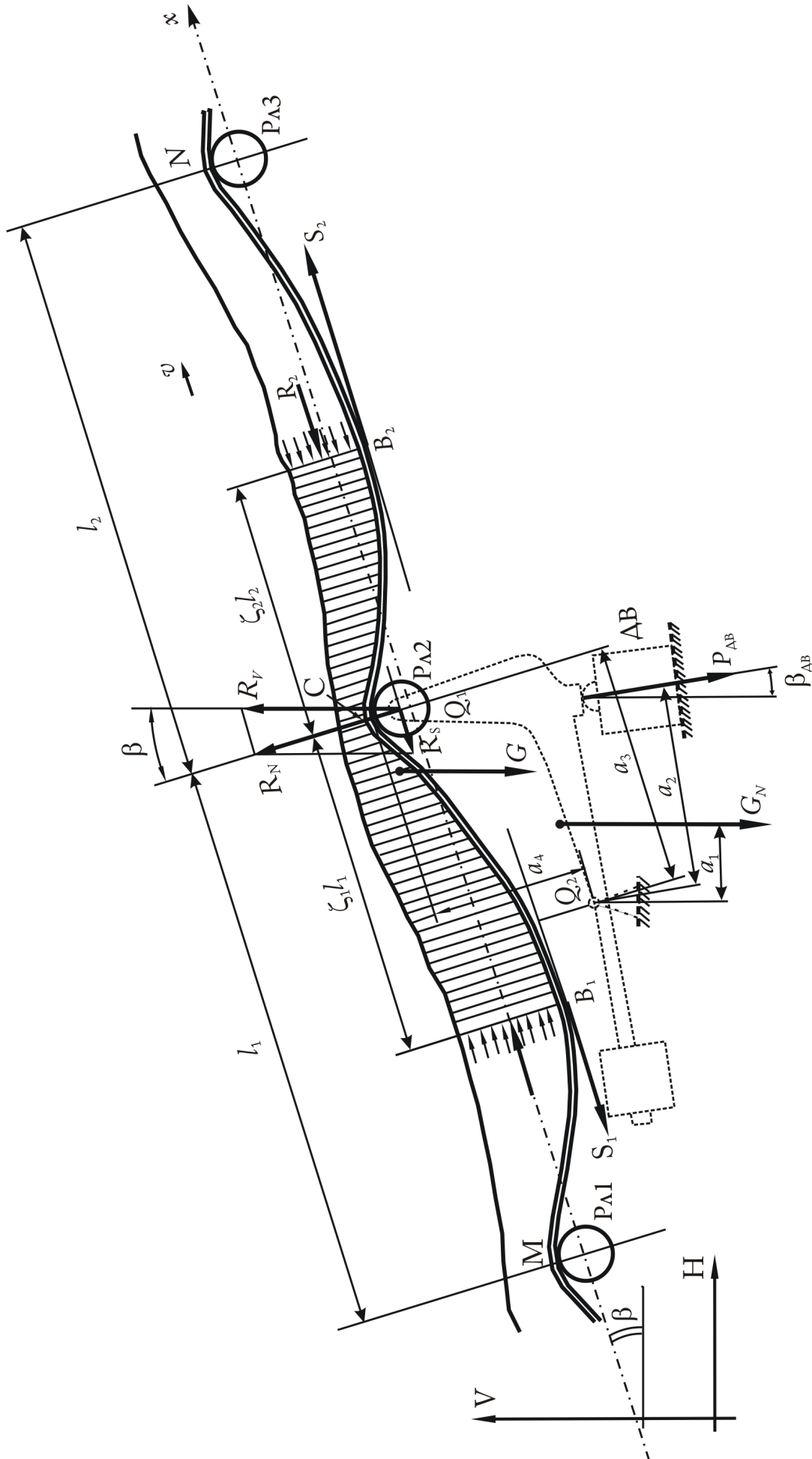


Рисунок 2.1 – Весоизмерительный участок однорольниковых конвейерных весов

где $m_{\text{п}}$ – масса грузоприемного устройства (с роликом и противовесом); $m_{\text{р}}$ – масса ролика; $w_{\text{п}}$ – коэффициент сопротивления движению (для ролика ГУ); a_1, a_2, a_3, a_4 – плечи моментов сил (см. рис. 2.1); β – угол наклона конвейера; ζ – коэффициент, показывающий, какая часть длины ленты, находящейся между роликоопорами (между точками M и C или C и N) принадлежит весоизмерительному участку; l_1, l_2 – длина ленты на участках MC и CN ; $q_{\text{л}}$ – погонная масса ленты; g – ускорение силы тяжести.

Первое, второе и третье слагаемое в формуле (2.9), постоянные для целого числа обегов ленты, исключаются в измерительном приборе весов, а на интегрирование поступает сигнал, пропорциональный четвертому слагаемому. Подставляя это значение в (2.8) и изменяя порядок интегрирования, получим:

$$A = kg \frac{a_3 + w_{\text{п}} a_4}{a_2} \cos \beta \int_{-\bar{\zeta}_1 l_1}^{+\bar{\zeta}_2 l_2} \int_{\mathcal{T}} q_{\Gamma}(x, t) v_{\text{л}}(t) dt dx, \quad (2.10)$$

где $\bar{\zeta}$ – среднее значение коэффициента ζ за время взвешивания \mathcal{T} .

Внутренний интеграл этого равенства при условии, что $v_{\Gamma} = v_{\text{л}}$, или $v_{\Gamma} = k_v v_{\text{л}}$ равен массе \mathcal{M} груза, перемещенного конвейером за время \mathcal{T} . Следовательно,

$$A = kg \frac{a_3 + w_{\text{п}} a_4}{a_2} \cos \beta (\bar{\zeta}_2 l_2 + \bar{\zeta}_1 l_1) \mathcal{M} = kg \frac{a_3 + w_{\text{п}} a_4}{a_2} \cos \beta \bar{l}_{\text{в}} \mathcal{M} = C_{\text{м}} \mathcal{M}, \quad (2.11)$$

то есть, учтенная измерительным прибором величина A пропорциональна массе перемещенного груза \mathcal{M} .

Средняя за время \mathcal{T} длина весоизмерительного участка $\bar{l}_{\text{в}}$ весьма быстро приближается к своему математическому ожиданию $M[l_{\text{в}}]$.

В ы в о д

Введение в интегрирующий прибор средней на длине $l_{\text{в}}$ погонной массы

$$q_{\Gamma, \text{ср. } l_{\text{в}}}(t) = \frac{1}{l_{\text{в}}(t)} \int_{l_{\text{в}}(t)} q(x, t) dx \quad (2.12)$$

не приводит к возникновению методической погрешности взвешивания.

В дальнейшем вместо обозначения $q_{\Gamma, \text{ср. } l_{\text{в}}}$ будет использоваться обозначение q_{Γ} .

З а м е ч а н и е

При выводе формулы (2.11) не учитывались следующие факторы: жесткость конвейерной ленты, осадка роликоопоры под действием груза, изменение натяжения ленты. Влияние этих факторов на работу конвейерных весов анализируется в п.3.2.

2.2.2. Многороликовые весы

Совершенно очевидно, что полученный вывод полностью распространяется на многороликовые весы, если нагрузка передается на один датчик веса, или если все датчики, на которые опирается платформа, идентичны. Можно, однако, показать, что условие идентичности датчиков веса не обязательно.

На рис. 2.2 изображен весоизмерительный участок многороликовых конвейерных весов.

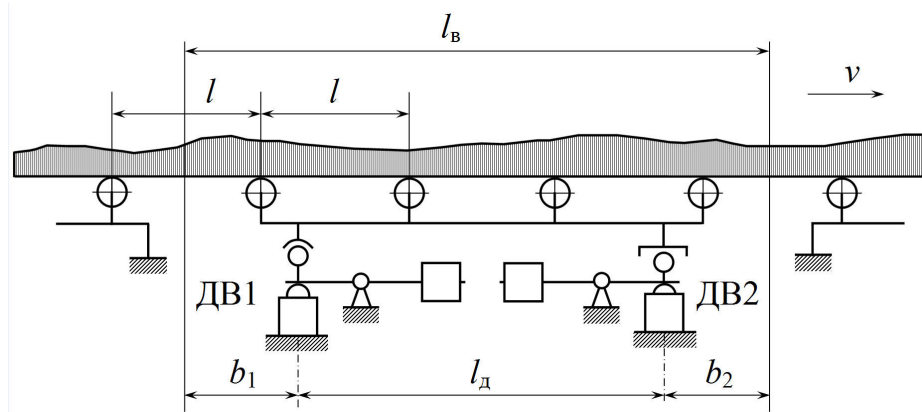


Рисунок 2.2 – Весоизмерительный участок многороликовых конвейерных весов

Нагрузка от веса конструкции, ленты и груза передается на датчики веса ДВ1 и ДВ2. С каждой стороны может быть установлено по одному или по два датчика веса, причем, в последнем случае коэффициенты преобразования (K_{PV}) силы P в электрический сигнал V должна быть одинаковы.

Для разгрузки датчиков от веса тары (металлоконструкции, ролики, лента) могут быть использованы рычажные устройства.

Определив

- силы, действующие на левую и правую опоры,
- сигналы V_1 и V_2 , генерируемые датчиками веса ДВ1 и ДВ2,

а также учитывая, что в измерительном приборе

- сигналы V_1 и V_2 суммируются,
- результирующий сигнал умножается на сигнал, пропорциональный скорости ($k_{vV}V$),
- из произведения вычитается сигнал, соответствующий нагрузке при холостом ходе,
- результат интегрируется в течение времени взвешивания \mathcal{T} ,

найдем, что показание измерительного прибора (A) пропорционально массе \mathfrak{M} перемещенного груза:

$$A = \frac{k_{vV}}{2} \cdot \frac{gl_B}{l_B - (b_1 + b_2)} [(l_B - 2b_1)k_{PV1} + (l_B - 2b_2)k_{PV2}] \mathfrak{M} = C_{\mathfrak{M}} \mathfrak{M}. \quad (2.13)$$

В частности, при $b_1 = b_2$ (см. рис. 2.2) коэффициент пропорциональности

$$C_{\mathfrak{M}} = gk_{vV} \frac{k_{PV1} + k_{PV2}}{2} l_{\text{в}}. \quad (2.14)$$

Из полученной формулы также следует, что один из датчиков веса может вообще отсутствовать.

Полученные формулы и следующие из них выводы справедливы только для горизонтального конвейера. Если конвейер наклонный, то, кроме нормальной силы, передающейся на датчики веса, возникает тангенциальная сила, уравновешиваемая растяжкой (или иным способом) и парой сил, изменяющей нагрузки на датчики веса. При этом показание прибора изменяется на величину

$$\Delta A = gk_{vV} (k_{PV1} - k_{PV2}) \frac{l_{\text{в}}}{l_{\text{д}}} y \mathfrak{M} \sin \beta. \quad (2.15)$$

Относительное изменение, характеризующее погрешность взвешивания,

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta k_{PV12}}{k_{PV\text{ср}}} \cdot \frac{y}{l_{\text{д}}} \text{tg} \beta. \quad (2.16)$$

В этих формулах:

$l_{\text{д}} = l_{\text{в}} - (b_1 - b_2)$ – расстояние между датчиками веса;

y – расстояние между линией действия силы в растяжке и тангенциальной составляющей силы веса груза на весоизмерительном участке;

$$\Delta k_{PV12} = k_{PV1} - k_{PV2}; \quad (2.17)$$

$$\Delta k_{PV\text{ср}} = \frac{k_{PV1} + k_{PV2}}{2}. \quad (2.18)$$

При обычных значениях параметров конвейера и датчиков возможная погрешность может составить сотые доли процента.

2.2.3. Весы с двумя однороликовыми ГУ

В том случае, если по условию точности может быть применено двухроликовое ГУ, оно может быть выполнено в виде двух однороликовых (рис. 2.3). Такая конструкция проще, чем конструкция двухроликового ГУ.

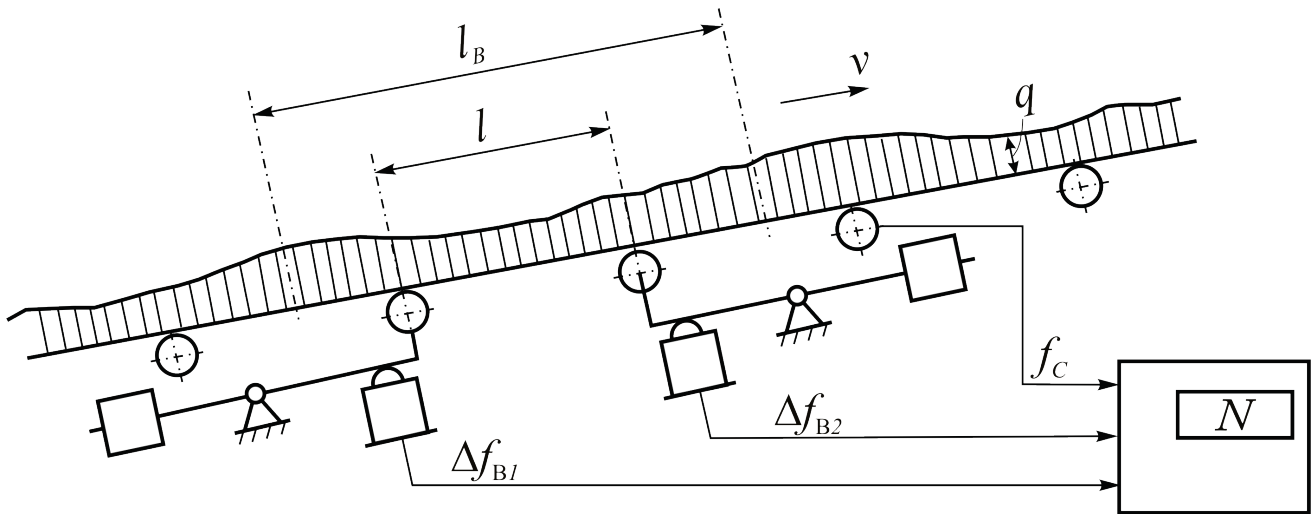


Рисунок 2.3 – Конвейерные весы с двумя однороликовыми ГУ

Покажем, что и в этом случае могут быть использованы датчики веса с разными коэффициентами преобразования.

Сигналы $\Delta V_{B1}(t)$ и $\Delta V_{B2}(t)$, поступающие от датчиков веса на измерительный прибор, пропорциональны погонной массе груза, –

$$\Delta V_{B1}(t) = k_{PV1} k_{qP1} q(t), \quad (2.19)$$

$$\Delta V_{B2}(t) = k_{PV2} k_{qP2} q\left(t - \frac{l}{v}\right), \quad (2.20)$$

где k_{qP1} и k_{qP2} – коэффициенты пропорциональности между погонной массой и силой, действующей на датчик веса.

Показание A интегрирующего прибора по истечении времени взвешивания \mathfrak{T} определится как

$$A = C \int_{\mathfrak{T}} [\Delta V_{B1}(t) + \Delta V_{B2}(t)] k_{vV} v(t) dt, \quad (2.21)$$

а после подстановки $\Delta V_{B1}(t)$ (2.19) и $\Delta V_{B2}(t)$ (2.20), –

$$A = C k_{PV1} k_{qP1} k_{vV} \int_{\mathfrak{T}} q(t) v(t) dt + C k_{PV2} k_{qP2} k_{vV} \int_{\mathfrak{T}} q\left(t - \frac{l}{v}\right) v(t) dt. \quad (2.22)$$

Интеграл в первом слагаемом равен массе груза \mathfrak{M}_1 , прошедшего за время \mathfrak{T} через первую (левую) роликоопору, а интеграл во втором слагаемом – массе груза \mathfrak{M}_2 прошедшего за то же время через вторую роликоопору. Если в начале и в конце периода взвешивания на весовом участке не было груза, то $\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_2 = \mathfrak{M}$, и показание прибора

$$A = Ck_{vV}(k_{qP1}k_{PV1} + k_{qP2}k_{PV2})M. \quad (2.23)$$

Очевидно, что пропорциональность между показанием интегрирующего прибора и массой груза, прошедшего через весы, сохраняется для любого числа роликоопор.

При симметричном (относительно поперечной оси) расположении грузоприемных устройств можно ожидать взаимной компенсации погрешностей, которые могут возникать при несимметричном (относительно продольной оси) расположении груза на ленте конвейера. Такая компенсация должна быть особенно заметна на наклонных конвейерах.

Метод уменьшения погрешности при «двухканальном» измерении рассмотрен также в [51].

2.3. Обоснование принципа суммирования интегралов погонной массы при взвешивании груза на конвейере

В интегросуммирующих весах датчик веса генерирует аналоговый сигнал V_q , пропорциональный погонной массе q , –

$$V_q = k_{qV}q, \quad (2.24)$$

где k_{qV} – коэффициент пропорциональности.

Датчик скорости вырабатывает импульсы, частота повторения которых f_v пропорциональна скорости, –

$$f_v = k_{vf}v. \quad (2.25)$$

В электронном приборе специальный блок вырабатывает импульсы постоянной длительности τ (рис. 2.4), следующие с той же частотой f_v , причем коэффициент заполнения последовательности

$$\theta = \frac{\tau}{T_c} < 1 \quad (2.26)$$

и обычно составляет 0,7...0,95.

¹ Выше было показано, что введение в интегрирующий прибор величины $q_{ср.l}$ вместо q не вызывает методической погрешности.

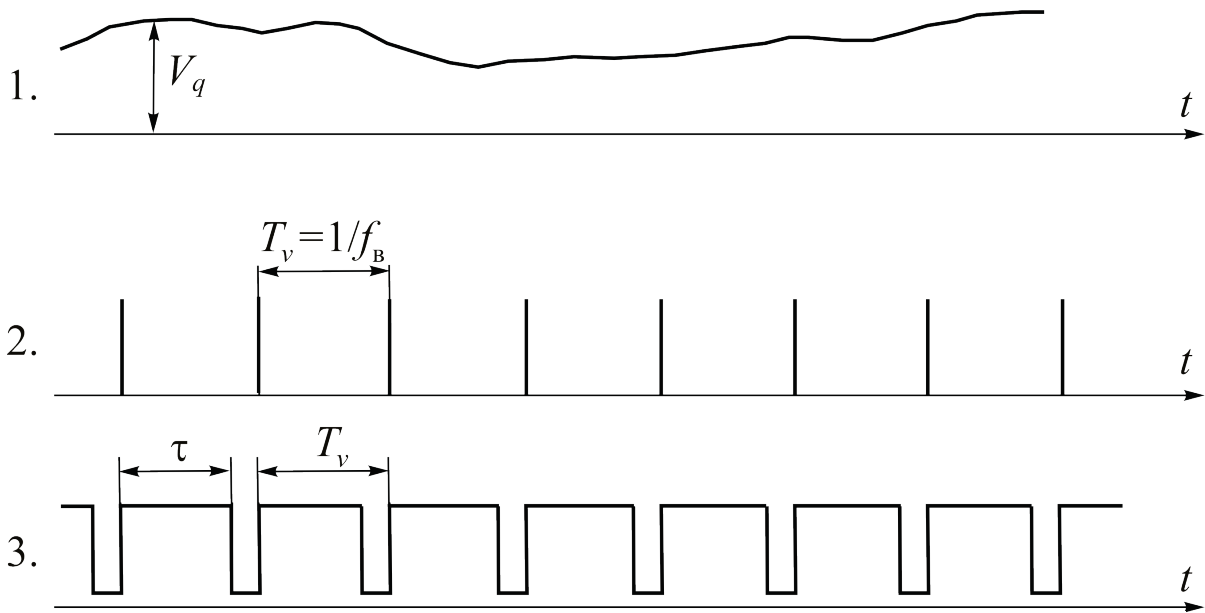


Рисунок 2.4 – Сигналы датчика веса (1), датчика скорости (2) и блока импульсов скорости (3)

Электронный интегратор интегрирует сигнал V_q в течение времени τ , а сумматор в течение времени взвешивания \mathfrak{N} суммирует частные интегралы, т.е. интегросумматор выполняет действия:

$$a_{\tau i} = \int_{\tau} V_q(t) dt = k_{qV} \int_{\tau} q(t) dt; \quad (2.27)$$

$$A_{\mathfrak{z}} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} a_{\tau i} = k_{qV} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \int_{\tau} q(t) dt, \quad (2.28)$$

где $A_{\mathfrak{z}}$ – показание интегросумматора; $\mathfrak{N} = \mathfrak{z} / T_{c.c.p.}$ – количество циклов суммирования за время взвешивания.

Умножив и разделив правую часть равенства (2.28) на среднюю за время τ скорость $V_{\tau i}$, найдем:

$$A_{\mathfrak{z}} = k_{qV} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{1}{V_{\tau i}} \int_{\tau} q(t) v_{\tau i}(t) dt = k_{qV} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{m_{\tau i}}{V_{\tau i}}, \quad (2.29)$$

где $m_{\tau i} = \int_{\tau} q(t) v_{\tau i}(t) dt$ – масса груза, прошедшего через весы за время τ в i -м цикле интегрирования.

Подставив, согласно (2.25),

$$v_{\tau i}(t) = \frac{f_v(t)}{k_{fv}} = \frac{1}{k_{fv} T_{ci}(t)}, \quad (2.30)$$

а также умножив и разделив правую часть равенства на τ , получим:

$$A_{\Sigma} = k_{qv} k_{vf} \tau \sum_{i=1}^n m_{\tau i} \frac{T_{ci}(t)}{\tau}. \quad (2.31)$$

Если допустить, что средняя производительность конвейера за время τ и время T_{ci} в i -м цикле одинакова, т.е. если считать, что

$$\frac{m_{\tau i}}{\tau} = \frac{m_{T_{ci}}}{T_{ci}}, \quad (2.32)$$

где $m_{T_{ci}}$ – масса груза, перемещенного конвейером за время цикла T_{ci} , то на основании (2.31) и (2.32) запишем

$$A_{\Sigma} = k_{qv} k_{vf} \tau \sum_{i=1}^n m_{T_{ci}} = k_{qv} k_{vf} \tau \mathcal{M} = C_{\mathcal{M}} \mathcal{M}. \quad (2.33)$$

Согласно полученной формуле существует прямая пропорциональность между показанием интегросумматора A_{Σ} и массой прошедшего через весы груза \mathcal{M} .

Приведенное доказательство в то же время свидетельствует о принципиальной неточности метода интегросуммирования ввиду неточного равенства (2.32). Тем не менее, ввиду большого количества суммируемых интегралов, статистическая точность метода высока: при обычных условиях работы конвейера и весов через несколько минут погрешность взвешивания с вероятностью 0,9...0,95 не превышает 0,1...0,2% (подробно см. п. 4.3)

2.4. Грузоприемные устройства конвейерных весов

Кинематическая схема и конструкция грузоприемного устройства (ГУ) оказывает определяющее влияние на основные параметры конвейерных весов. ГУ вместе с датчиками веса является первичным измерительным преобразователем, назначение которого – преобразовать вес груза, находящегося на ленте конвейера в пределах весоизмерительного участка, в пропорциональный электрический сигнал.

Основные трудности такого преобразования состоят в следующем:

- 1) между грузом и ГУ располагается лента конвейера, изменяющая величину силы, передаваемой от груза к роликам, причем эта дополнительная сила не постоянна и зависит от ряда факторов, влияние которых рассмотрено ниже;
- 2) передача веса от груза к датчикам происходит в процессе движения ленты и груза; при этом на ролики ГУ, кроме веса, действует дополнительная динамическая нагрузка, вызванная колебаниями ленты с грузом, неравномерным

(не прямолинейным) движением груза, ударами кусков груза о ролики (через ленту) и другими факторами.

Конструкция ГУ должна быть по возможности простой и вместе с тем должна обеспечить точность преобразования, достаточную для весов соответствующего класса. Кроме того, схема ГУ должна соответствовать принципу работы весов. Исследованию грузоприемных устройств посвящен ряд работ [34, 40, 52, 53, 55, 57, 124, 125, 156, 246, 305]. В них, однако, не приводится классификация известных ГУ и не даются рекомендации по выбору тех или иных ГУ для весов различного класса точности и принципа действия.

Классифицировать ГУ можно по различным признакам.

В зависимости от количества роликов на весоизмерительном участке ГУ могут быть однороликовыми, многороликовыми (в том числе двухроликовыми) и безроликовыми (платформенными).

Многороликовые и платформенные ГУ, в зависимости от характера взаимосвязи между массой груза на весоизмерительном участке и силой, действующей на ДВ, делятся на две группы: пропорциональные ГУ, у которых передаваемая на ДВ сила пропорциональна массе груза, находящегося на весоизмерительном участке, и непропорциональные ГУ, у которых передаваемая на ДВ сила зависит от расположения груза на весоизмерительном участке. Непропорциональные ГУ могут быть использованы только в интегрирующих конвейерных весах.

Усилие может быть передано от роликов на ДВ непосредственно, через рычажные (или другого типа) механизмы, а также через раму, на которой монтируются роlikоопоры, причем усилие от рамы на ДВ передается либо через систему рычагов, либо непосредственно.

Количество ДВ может быть 1, 2 или 4, причем они могут работать как на растяжение, так и на сжатие.

В зависимости от наличия устройства уравнивания веса ленты и роликов можно различать ГУ с уравниванием (частичным) тарной нагрузки и ГУ без уравнивания. Уравнивание обычно производится грузами; возможно также уравнивание пружинами.

Классификация грузоприемных устройств и способов передачи нагрузки от роликов к силоизмерительным датчикам показана на рис.2.5.

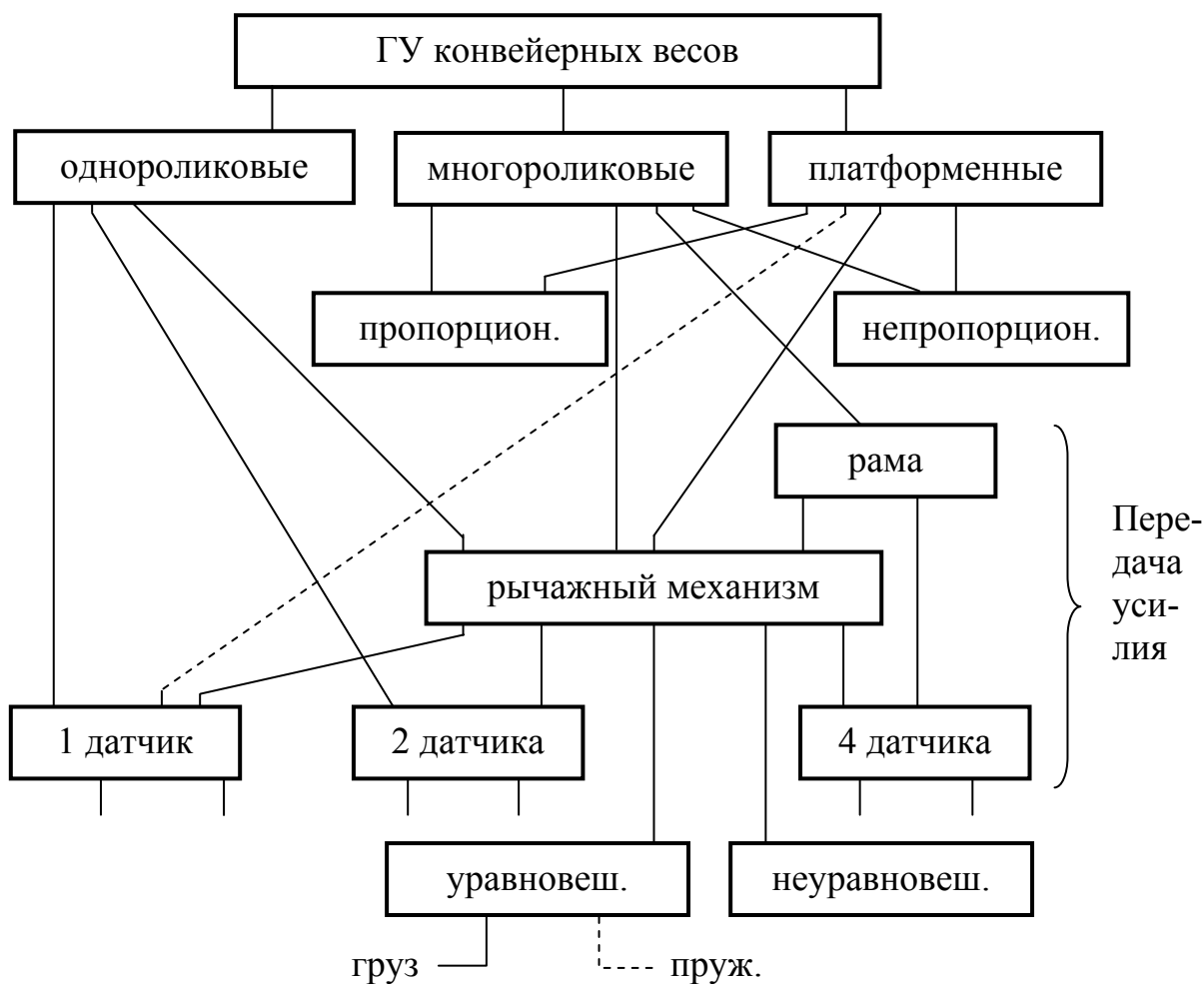


Рисунок 2.5 – Классификация грузоприемных устройств конвейерных весов

На рис. 2.6. показаны основные схемы ГУ электронных конвейерных весов. Каждая схема сопровождается четырехместной формулой: на первом месте указано количество роликоопор, на втором – пропорциональность (П или Н), на третьем, в скобках, – путь передачи усилия от роликов к датчикам, причем указывается количество датчиков и вид деформации (растяжение – Р, сжатие – С); на четвертом месте указывается уравновешена (У) или неуравновешенна (Н) тарная нагрузка. Особые признаки указываются после наклонной черты.

Наиболее часто применяются ГУ, обозначенные на рис. 2.6 цифрами 3, 5, 8, 10, 15, 17, причем одно- и двухроликовые – в весах класса 1,0 и 0,5, а многороликовые – в весах класса 0,5 и 0,25.

В весах повышенной точности при большой скорости и переменной нагрузке рекомендуется применять следящие ГУ [40,55].

Платформенные ГУ (рис. 2.6. сх. 22...26) целесообразно применять на конвейерах, транспортирующих крупнокусовый материал.

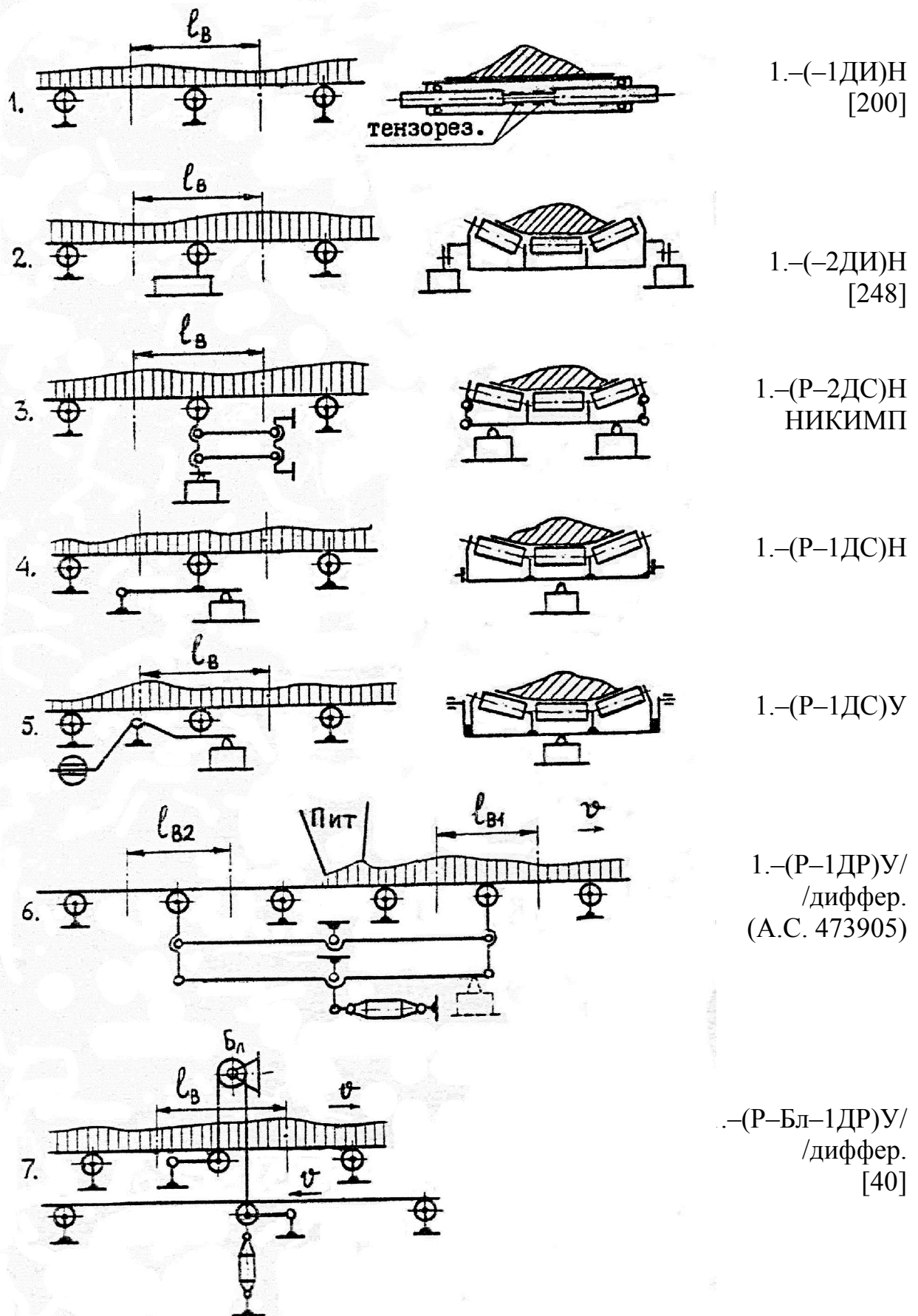
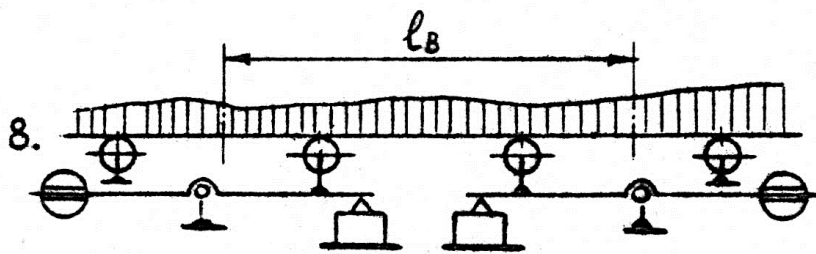
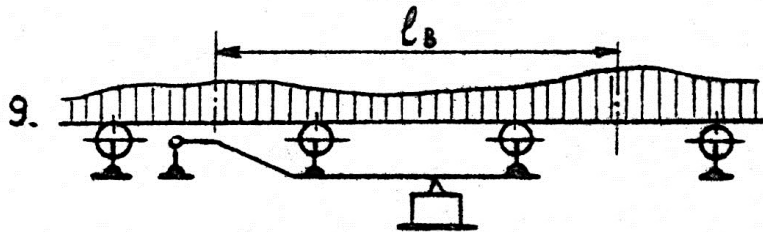


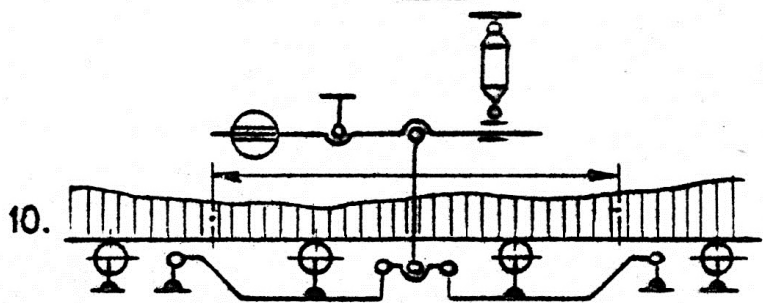
Рисунок 2.6 – Схемы механизмов ГУ конвейерных весов



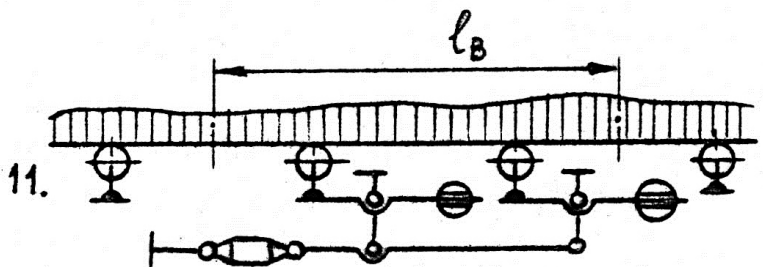
(2×1)П(Рч-2ДС)У
ЭКВД-76
(А.С. 410259)



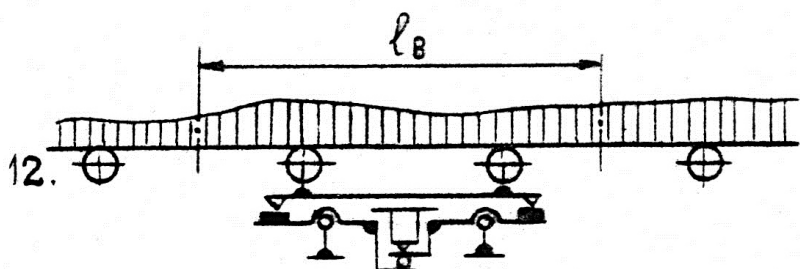
2Н(Рч-2ДС)Н



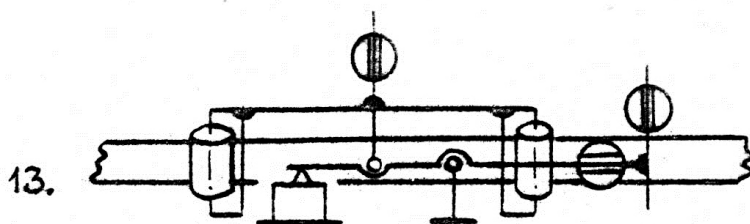
2П(Рч-1ДР)У
Siemens



2П(Рч-1ДР)У
(А.С. 373542)

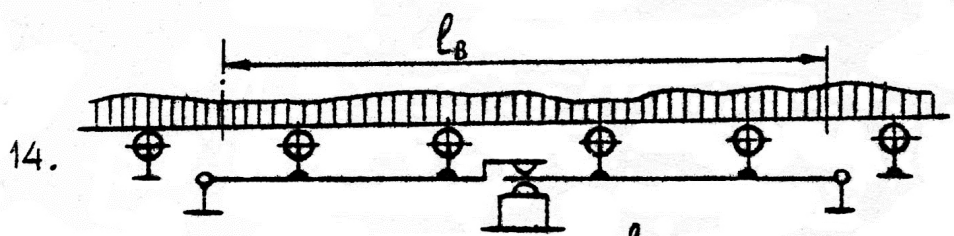


2П(П-Рч-1ДС)Н
[248]

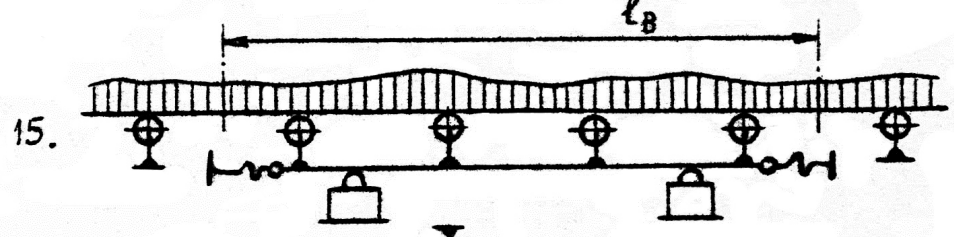


2П(П-Рч-1ДС)У/
/сбалансир
(А.С. 714160)

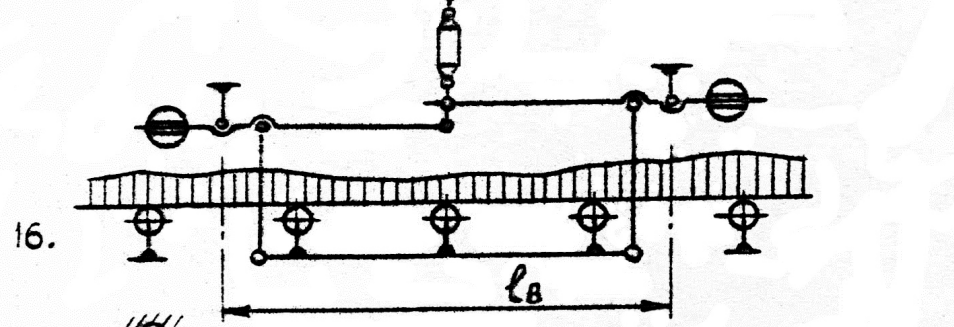
Рисунок 2.6 – Продолжение



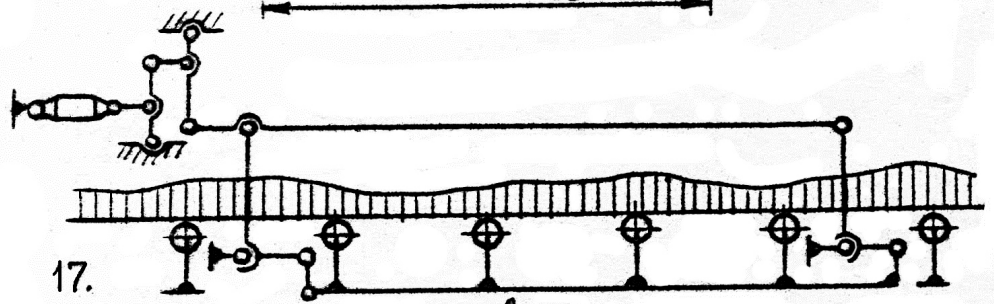
4Н(П-Рч-1ДС)Н



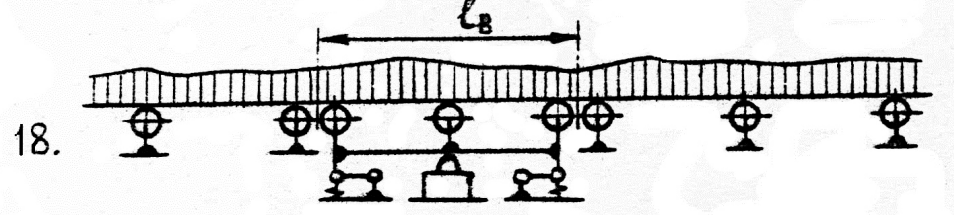
4П(-4ДС)Н
Schenk
6П(П-4ДИ)Н
[96]



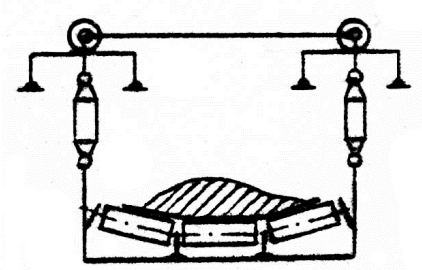
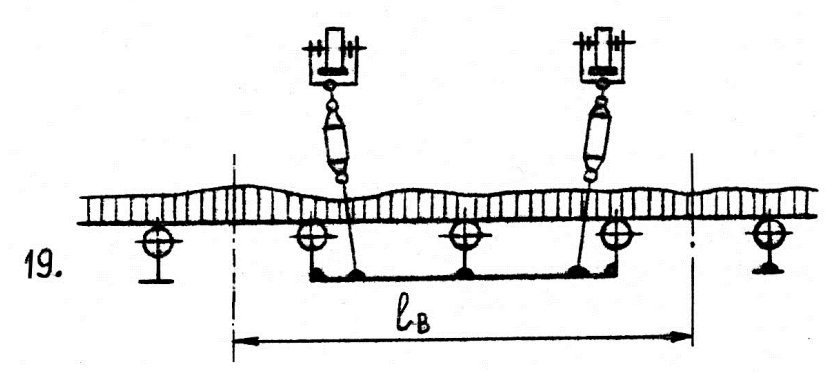
3П(П-Рч-1ДР)У



4П(П-Рч-1ДР)Н
Inflo Resometric

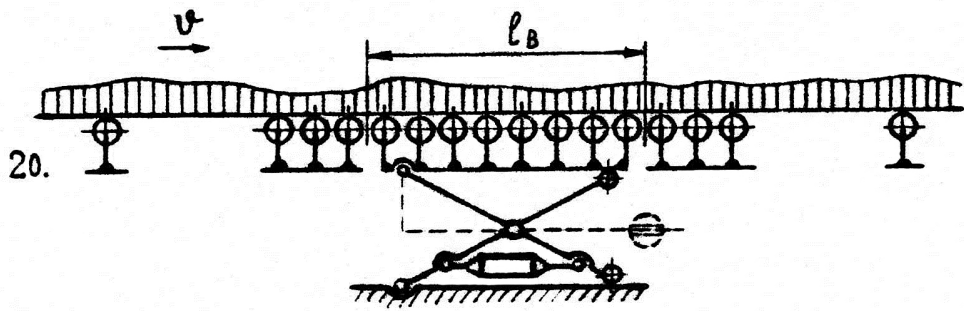


3Н(П-1ДС)Н
ЭГВ

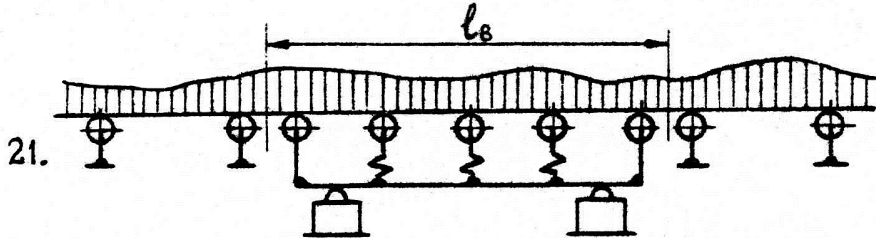


3П(П-4ДР)Н/след.
(А.С. 354279)

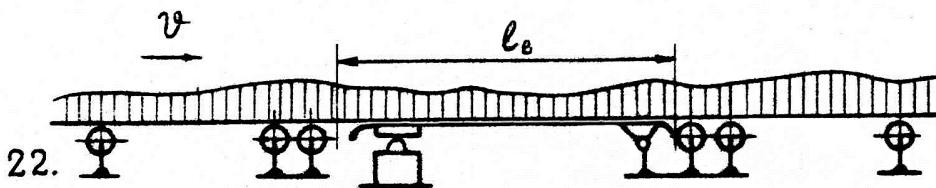
Рисунок 2.6 – Продолжение



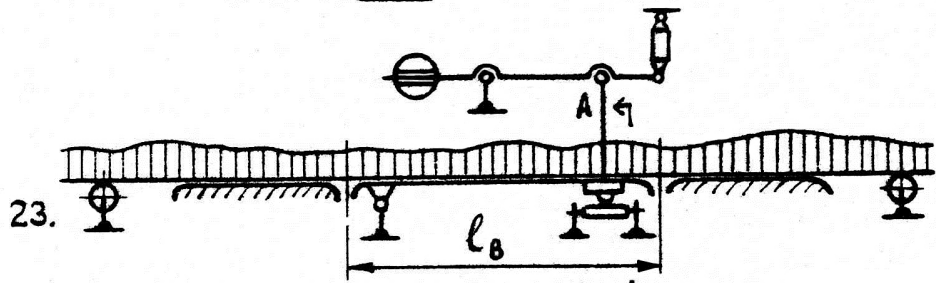
МП(П-Рч-1ДР)У
(А.С. 207425)
(А.С. 347586)



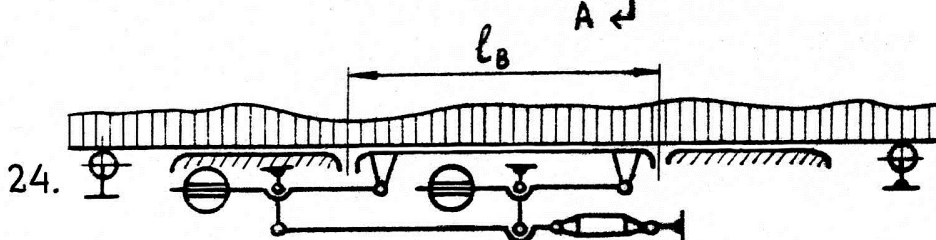
5П(П-4ДС)Н/
/упр.РО



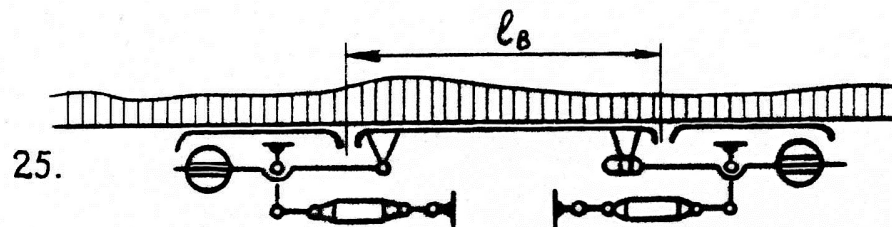
ПН(П-1ДС)Н
(А.С. 480919)



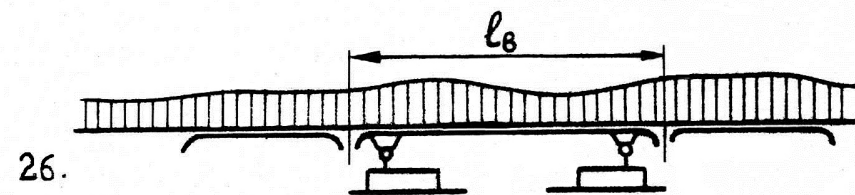
ПН(П-Рч-1ДР)У
(А.С. 334486)



ПП(П-Рч-1ДР)У
(А.С. 322645)



ПП(П-Рч-2ДР)У



ПП(П-4ДИ)Н

Рисунок 2.6 – Продолжение

2.5. Условия работы и необходимые классы конвейерных весов для предприятий горной и металлургической промышленности

На предприятиях горной и металлургической промышленности конвейеры, на которых необходимо взвешивать материалы, работают в существенно различных режимах и условиях.

Для ленточных конвейеров, работающих на рудных и угольных карьерах, характерны:

- высокая производительность – от 1000 т/ч до 10000 т/ч и более;
- преимущественно большие скорости – 2,5...6,3 м/с;
- транспортирование крупнокускового груза; например, на железорудных карьерах крупность кусков (гранулометрический состав) после взрыва составляет:

фракции до 200 мм	– 55...85%,
200...400 мм	– 10...25%,
более 400 мм	– 5...20%;

- сложные климатические условия: температура окружающей среды - от минус 45° до плюс 50°С; относительная влажность – до 98...100%.

Точность взвешивания руды и угля на конвейерах роторных экскаваторов, а также на передаточных и магистральных конвейерах с целью учета и оперативного управления качеством должна быть 1,5...2,5%.

При отгрузке продукции потребителям (в вагоны, баржи), точность взвешивания должна быть не хуже 1%. Для контроля объемов выемки горных пород и размещения их в отвалах достаточна точность 2,5...4%.

Для ленточных конвейеров, на обогатительных фабриках (рудных, угольных), фабриках спекания и окускования, коксохимических заводах и др. подобных предприятиях горной и металлургической промышленности характерны более легкие условия:

- производительность – до 1000 т/ч;
- скорость ленты – 1...2,5 м/с;
- крупность материала – от порошкообразных (0,1 мм и менее) до среднекусковых (100...160 мм);
- температура окружающей среды – от минус 5° до плюс 40° С при влажности до 98%; температура транспортируемого материала – до 100°С, иногда больше (например, не полностью погашенный кокс).

Необходимая, точность взвешивания – 1...2% для технологических целей и 0,5...1,0% для взаимных расчетов с потребителями.

На основании изложенного можно констатировать, что для предприятий горной и металлургической промышленности необходимы конвейерные весы трех классов, удовлетворяющих следующим требованиям.

1. Весы малой точности для конвейеров большой производительности:

относительная погрешность взвешивания	2,5...4%;
погонная масса груза	200...600 кг/м;
скорость ленты	2...5 м/с;

кусковатость до 320 мм,
отд. куски до 0,5 м;
температура окружающей среды от –45 до +50 °С;
дистанционная передача показаний на расстояние до 3 км;
применение: роторные экскаваторы, транспортно-отвальные мосты,
передаточные, магистральные и подъемные конвейеры.

2. Конвейерные весы средней точности:

относительная погрешность взвешивания 1,0...2,0%;
погонная масса груза 50...300 кг/м;
скорость ленты 1...2,5 м/с;
кусковатость груза до 160 мм;
температура окружающей среды от –10° до +40°С;
температура материала до 100°С;
дистанционная передача показаний на расстояние до 2 км;
применение: взвешивание (в основном для технологических целей) угля, руды, продуктов обогащения, шихты, кокса и др. материалов на фабриках окускования и обогащения, коксохимических и металлургических заводах; весы класса 1,0 могут быть использованы для расчетов за отгружаемую конечную продукцию.

3. Конвейерные весы повышенной точности:

относительная погрешность взвешивания 0,25...0,5%;
остальные параметры те же, что для весов средней точности;
применение: взвешивание конечных продуктов производства (угольный и рудный концентрат, брикеты, окатыши, кокс и т.п.) при отгрузке потребителю.

Весы средней и повышенной точности могут также найти широкое применение на других предприятиях: электростанциях, химических заводах, в производстве строительных материалов и др.

Особую группу составляют конвейерные весы, предназначенные для работы в подземных условиях – на рудных и угольных шахтах. Всем требованиям для работы в этих условиях удовлетворяют электронно-гидравлические весы ЭГВ, серийно выпускаемые п/о ТОЧМАШ (г. Одесса).

2.6. Перспективные методы и схемы автоматических конвейерных весов

Учитывая тенденции развития элементной базы электроники, можно с уверенностью утверждать, что наиболее перспективными являются весоизмерительные устройства с программным управлением, построенные на основе микропроцессорных систем. Однако, в течение некоторого времени всем современным требованиям могут полностью удовлетворять весы, реализованные аппаратными средствами на базе ИМС средней степени интеграции.

Из пяти известных принципов, которые могут быть положены в основу работы конвейерных весов (см. п. 2.1), наиболее перспективными являются:

- для весов с программным управлением – принцип суммирования и оба принципа интегросуммирования (второй – предпочтительнее);

- для весов с аппаратной реализацией – принципы суммирования, интегрирования производительности и интегросуммирования (с интегрированием погонной массы за постоянное время τ).

Среди известных типов силоизмерительных датчиков наиболее перспективными для конвейерных весов являются тензорезисторные и вибрационно-частотные.

Разработанные и выпускающиеся в настоящее время силоизмерительные датчики с тензорезисторными преобразователями характеризуются параметрами, приведенными в таблице 2.1 (по данным [5 т.2, 114, 137, 228, 271, 297]).

Таблица 2.1

Основные параметры силоизмерительных тензодатчиков

Наименование параметра	Ед. изм	Значение параметра для	
		датчиков, освоенных в серийном производстве	лучших образцов
1. Класс точности	%	0,25; 0,1	0,05; 0,04
2. Нелинейность и гистерезис	%	0,05; 0,03	0,02
3. Временная нестабильность коэффициента преобразования	% в течение месяца		0,005
4. Температурный коэффициент дрейфа нуля	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$	$(2...4) 10^{-5}$	10^{-5}
5. Температурная нестабильность коэффициента преобразования	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$	$(2...5) 10^{-5}$	10^{-5}
6. Уровень выходного сигнала	мВ	20...50, 300	300
7. Деформация под действием номинальной нагрузки	мм	0,2...0,5	0,05...0,2

Тензодатчики обладают также малой чувствительностью к боковым нагрузкам, а в некоторых конструкциях – и к точке приложения силы [228, 271], к внешним электрическим и магнитным полям, стойки к вибрациям и перегрузкам, изготавливаются в пылевлагозащищенном исполнении.

Основным недостатком тензодатчиков является сравнительно низкий уровень выходного сигнала, обычно составляющий 20...50 мВ при чувствительности ~ 2 мВ/В). Выпускаются, однако, высокоомные датчики с выходным сигналом до 300 мВ [228]. При низком уровне сигнала различные помехи (термо-э.д.с, падение напряжения на переходных сопротивлениях и в линии связи, наводки и т.п.) становятся соизмеримыми с информационным сигналом. Борьба с возникающей при этом погрешностью затруднительна и не всегда эффективна.

В качестве датчиков веса могут быть использованы частотные силоизмерительные преобразователи, бесспорными достоинствами которых является высокая помехоустойчивость при передаче сигнала на значительные расстояния, простота преобразования частоты в код и высокая точность интегрирования частотного сигнала. Основными недостатками вибрационно-частотных датчиков является сложность конструкции (по сравнению с тензорезисторными) и нелинейность характеристики. Линеаризация характеристики может быть осуществлена конструктивными мерами [144], аппаратными средствами [9], или при вычислительных преобразованиях в микропроцессорных весах.

Основные параметры выпускаемых частотных датчиков приведены в таблице 2.2. (по данным [137, 144, 190, 194, 228]).

Таблица 2.2.

Основные параметры вибрационно-частотных датчиков

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение параметра
1. Класс точности	%	0,4; 0,1; 0,04
2. Нелинейность.	%	0,1; 2
3. Гистерезис	%	0,1; 0,04
4. Максимальная частота	кГц	1; 12
5. Девиация частоты	%	70...90; 10...20
6. Температурная нестабильность коэффициента преобразования	$\frac{1}{^\circ\text{C}}$	$(6...2) \times 10^{-5}$

Прогрессивными датчиками скорости и перемещения являются тахогенераторы (постоянного тока и синхронный), а также импульсный датчик, отличающийся простотой, надежностью, точностью и являющийся наиболее перспективным для микропроцессорных весов.

Современные весы, кроме основной функции – взвешивания, должны выполнять ряд вспомогательных функций, таких как автоматическое (полуавтоматическое) тарирование, автоматический контроль точности, контроль и автоматическая корректировка нуля весов, выдача управляющих сигналов, связь с УВМ и др.

Ниже приводятся структурные схемы конвейерных весов, которые с позиций сегодняшнего дня являются наиболее перспективными.

На рис. 2.7 показана структурная схема микропроцессорных суммирующих весов с тензорезисторными датчиками веса ДВ1...ДВ4.

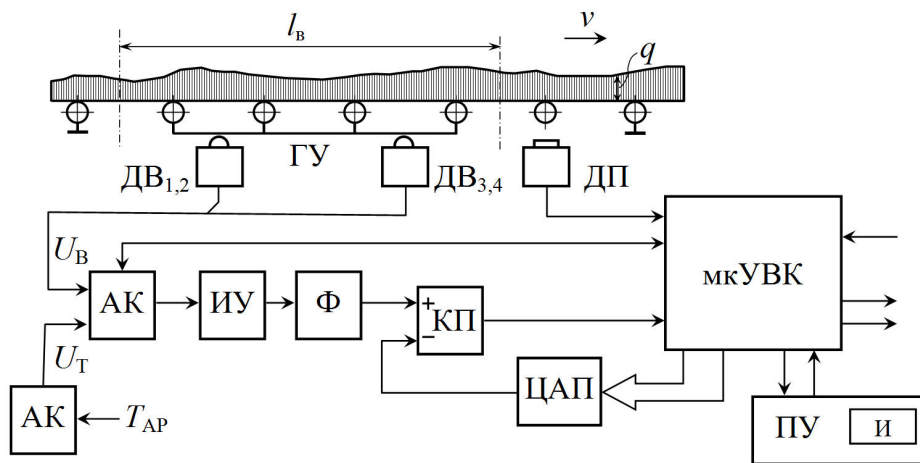


Рисунок 2.7 – Структурная схема микропроцессорных суммирующих конвейерных весов

При поступлении сигнала от датчика перемещения ДП микроэлектронное управляющее и вычислительное устройство (мкУВУ) обращается к подпрограмме аналого-цифрового преобразования и с помощью компаратора (КП) и ЦАП преобразует в код сигнал датчиков веса, усиленный измерительным усилителем ИУ и отфильтрованный от высокочастотной помехи фильтром Ф. Затем сигналом мкУВУ аналоговый ключ АК подключает ко входу усилителя напряжение U_T , компенсирующее «тару», и снова происходит обращение к подпрограмме аналого-цифрового преобразования. После вычитания полученных кодов и масштабирования образуется код, численно равный массе «порции» груза. Получаемые таким образом коды суммируются, а индикация о массе груза и производительности выводится на индикатор панели управления (ПУ). Более детальное описание этой схемы выполнено в п. 5.3 и 5.4.

При использовании частотного датчика веса схема 2.7 упрощается за счет исключения блоков АК, ИУ, Ф, КП и ЦАП.

Схема интегрирующих весов с тензорезисторными датчиками показана на рис. 2.8.

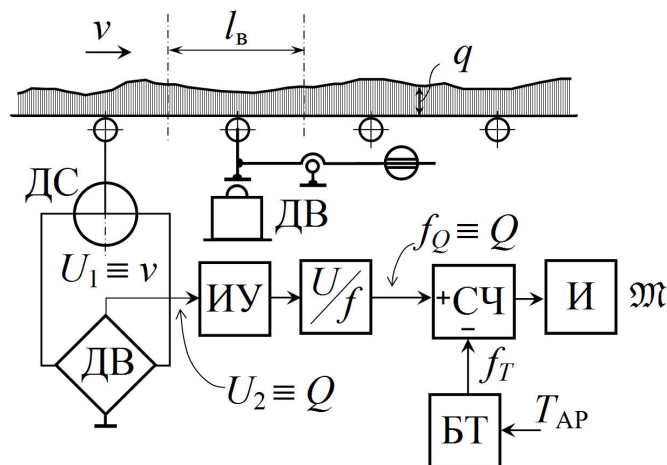


Рисунок 2.8 – Структурная схема интегрирующих конвейерных весов

Питание моста тензодатчиков напряжением тахогенератора приводимого лентой транспортера применялось еще в 50-х годах [96]. Так как наиболее просто интегрировать частотный сигнал, то напряжение U_2 , пропорциональное производительности Q , преобразуется в частоту f_0 , что может быть осуществлено с помощью специализированных ИМС достаточно просто и точно [138, 161, 162, 163, 164, 282]. Частотный сигнал поступает на вход «+» электронного счетчика, а на вход «-» подается сигнал с частотой f_T , компенсирующий «тару». Импульсы с выхода счетчика поступают на индикатор И. Некоторые зарубежные фирмы (Schenk, VLB Grosswaagen, Siemens, Fougray и др.) выпускают весы, в основе которых лежит рассмотренная схема.

Структурная схема конвейерных весов, в которых реализуется первый принцип интегросуммирования, показана на рис. 2.9. В весах используется частотный датчик веса (или тензорезисторный с преобразователем U/f) и импульсный датчик скорости (ДС). Блок импульсов скорости (БИС) вырабатывает импульсы постоянной длительности τ с частотой следования f_c , пропорциональной скорости ленты. Проходящие через схему И пачки импульсов от датчика веса поступают на вход «+» реверсивного счетчика, а на его вход «-» подаются импульсы с частотой f_T для компенсации "тары". Выход счетчика подключен к индикатору по показаниям которого судят о массе груза.

Обоснование принципа дано в п. 2.3, а детальное исследование схемы – в главе 4. Схема реализована в ряде разработок России, Украины и в дальнем зарубежье.

Возможна реализация этого принципа и в микропроцессорных весах (см. п. 5.2).

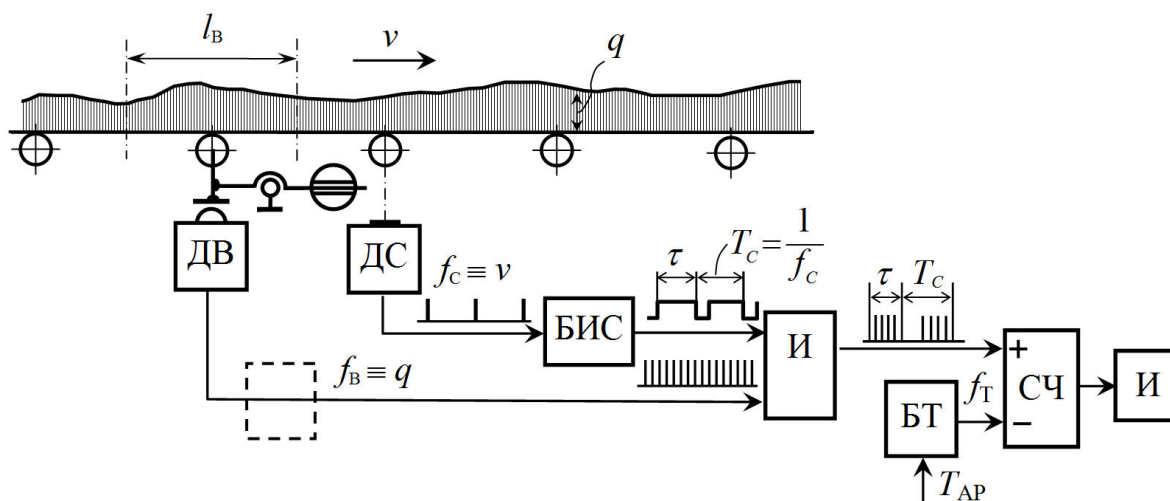


Рисунок 2.9 – Структурная схема интегросуммирующих конвейерных весов

Второй принцип интегросуммирования перспективен только в микропроцессорных весах. Структурная схема весов, в которых реализуется этот принцип, показана на рис. 2.10.

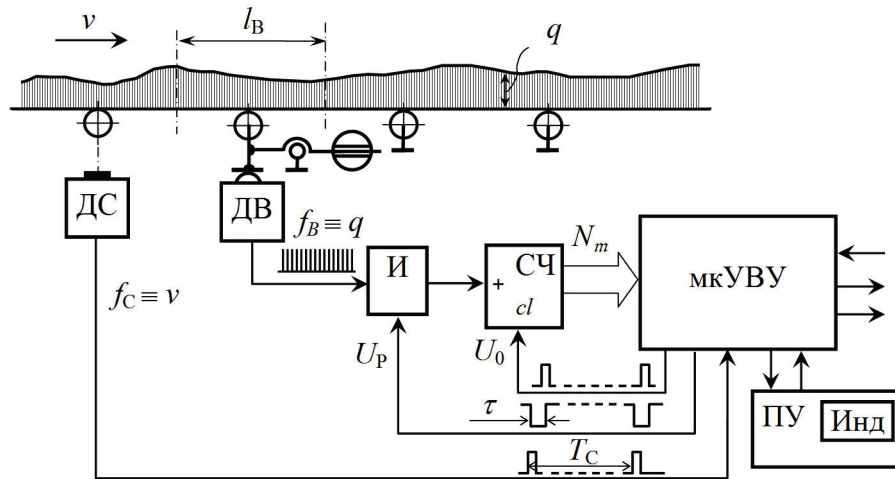


Рисунок 2.10 – Структурная схема микропроцессорных интегроресуммирующих конвейерных весов

Интегрирование частотного сигнала датчика веса ДВ осуществляется в течение всего периода T_C между импульсами датчика скорости ДС.

Интегрирование осуществляется с помощью двоичного счетчика (СЧ), на счетный вход которого через открытую схему совпадения (И) поступают импульсы с частотой $f_B(t) = k_{qf}q(t)$. К концу указанного периода код на выходе счетчика будет равен

$$N_{mi} = k_{qf} \int_{T_{ci}} q(t) dt. \quad (2.34)$$

В момент прихода очередного импульса от датчика скорости мкУВУ на короткое время τ (порядка долей мс) снимает разрешающий потенциал U_p с входа схемы совпадения и читает код N_{mi} , после чего импульсом U_0 устанавливает счетчик СЧ в ноль. Затем схема И открывается для накопления очередной интегральной суммы, а мкУВУ приступает к обработке полученной информации. При этом вычисляется скорость $v_{cp.i} = l_B / T_{ci}$ и масса m_i очередной «порции» груза, –

$$m_i = v_{cp.i} N_{mi} \frac{1}{k_{qf}} = v_{cp.i} \int_{T_{ci}} q(t) dt. \quad (2.35)$$

Периодическим суммированием масс m_i определяется общая масса груза \mathfrak{M} , перемещенного конвейером за время \mathfrak{T} , –

$$\mathfrak{M} = \sum_{(T_c)}^{\mathfrak{T}} (v_{cp.i} \int_{T_{ci}} q(t) dt), \quad i = 1, 2, \dots, \frac{\mathfrak{T}}{T_{c.sp}}. \quad (2.36)$$

ГЛАВА 3

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ВЗВЕШИВАНИИ ГРУЗА НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА

3.1. Классификация погрешностей

Погрешности взвешивания, возникающие при работе электронных конвейерных весов, могут быть разбиты на три группы:

- погрешности, вносимые измерительным преобразователем массы;
- погрешности, вносимые измерительным преобразователем скорости (перемещения);
- погрешности измерительного прибора.

Кроме того, неизбежна погрешность, вызванная неточностью градуировки весов.

Источники, а также причины погрешностей в каждой группе показаны в таблице 3.1.

Все указанные в таблице погрешности рассмотрены в этой работе или в ранее опубликованных работах других авторов.

3.2. Исследование влияния конвейерной ленты на статическую точность преобразования $q_{\Gamma} \rightarrow P_{\text{ВЗ}}$

Электрический сигнал измерительного преобразователя массы должен быть пропорционален погонной массе груза, т.е.

$$V_{\text{В}} = V_{\text{В0}} + k_{qV}q. \quad (3.1)$$

При этом преобразование и передача информации, происходит по цепи: груз \rightarrow лента конвейера \rightarrow ролики ГУ \rightarrow система рычагов \rightarrow силоизмерительный датчик. На всех этапах преобразование должно быть линейным и однозначным.

Очень существенное влияние на передачу силы от груза к роликам оказывает движущаяся лента конвейера, причем влияние ее существенно как в статике (очень медленное движение), так и в динамике. В этом разделе рассматривается точность преобразования погонной массы в силу, действующую на силоизмерительные датчики в статике.

3.2.1. Функция преобразования однороликового ГУ

При обосновании принципа действия конвейерных весов считают, что сила P_N (рис. 2.1), действующая на весоизмерительный ролик, связана с погонной массой груза q_{Γ} линейной зависимостью:

Таблица 3.1

КЛАССИФИКАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ВЕСОВ

Источник погрешностей	Этап преобразования	Обозначение погрешности и ее составляющих	Причина погрешности
Измерительный преобразователь массы (веса)	$m_{IB} \rightarrow P_{P\Sigma}$ или $q_{г.ср} \rightarrow P_{P\Sigma}$	$\delta m_{ГУ}$ δm_{γ} δm_{SO} $\delta m_{ПЛ}$ $\delta m_{длин}$ $\delta m_{НД}$ $\delta m_{УД}$ $\delta m_{БС}$ $\delta m_{коп}$	<p>Нестабильность и нелинейность функции преобразования ГУ</p> <p>Осадка весоизмерительной роликоопоры</p> <p>Изменение натяжения ленты у натяжного барабана</p> <p>Изменение сопротивления вращению роликов на участке L</p> <p>Дополнительная динамическая нагрузка</p> <p>Нелинейность движения груза</p> <p>Удары при прохождении кусков через ролики ГУ</p> <p>Боковой сход ленты</p> <p>Колебания ленты с грузом и ГУ</p> <p>Изменение погонной массы ленты</p>
	$P_{P\Sigma} \rightarrow P_{B\Sigma}$	$\delta m_{П,ГУ}$ δm_{PO} δm_{PC}	<p>Изменение сопротивления вращению роликов ГУ</p> <p>Изменение начальной нагрузки на датчики веса</p> <p>Изменение передаточного отношения рычажной системы</p>
	$P_{B\Sigma} \rightarrow V_B$	$\delta m_{эл}$ $\delta m_{V_{\min}}$ δm_k δm_t	<p>Нелинейность характеристики датчиков веса</p> <p>Нестабильность минимального сигнала датчиков веса</p> <p>Нестабильность коэффициента преобразования датчиков веса</p> <p>Изменение температуры окружающей среды</p>

Таблица 3.1

Продолжение

Источник погрешностей	Этап преобразования	Обозначение погрешности и ее составляющих	Причина погрешности
Измерительный преобразователь скорости (перемещение)	$v_r \rightarrow \omega$	δM_c	Неточность преобразования $v_r \rightarrow \omega$
		δM_{vt}	Разность скоростей груза и ленты
		δM_{vl}	Разность скоростей ленты в местах установки датчиков веса и датчиков скорости
		δM_d	Изменение эффективного диаметра ролика датчика скорости
Вторичный (измерительный) прибор	$\omega \rightarrow V_c$	$\delta M_{\omega V}$	Неточность преобразования скорости вращения в электрический сигнал
		δM_{II}	Неточность обработки информационного сигнала измерительным прибором
		$\delta M_{мет}$ $\delta M_{дис}$ δM_{***}	Неточность принятого метода Дискретность обработки и выдачи сигналов на индикацию Другие специфические погрешности измерительного прибора
Градировка		$\delta M_{град}$	Неточность градуировки
		$\delta M_{\Delta}, \delta M_{ЭВ}$	Неточность определения действительной массы груза
		$\delta M_{п,град}$ $\delta M_{y.o}, \delta M_{ук}$	Дисперсия показаний измерительного прибора Неточность установки нуля и цены импульса

$$P_M = P_{M0} + k_{qP} q_{\Gamma}. \quad (3.2)$$

В действительности же, как начальная составляющая P_{N0} , так и коэффициент пропорциональности k_{qP} зависят от длины весоизмерительного участка $l_B = \zeta_1 l_1 + \zeta_2 l_2$, которая при движении ленты непрерывно изменяется. Это изменение l_B вызвано оседанием роликов ГУ под действием груза, изменением натяжения ленты на весоизмерительном участке, а также колебаниями ленты при ее движении. Найдем более точное выражение для силы P_N .

На рис. 3.1 показан участок ленты, прилегающий к весоизмерительной роликоопоре, которая приподнята на высоту h относительно соседних. Вертикальное смещение водоизмерительной роликоопоры может быть случайным (неточность монтажа), преднамеренным (для уменьшения погрешности) или неизбежным (осадка под действием нагрузки).

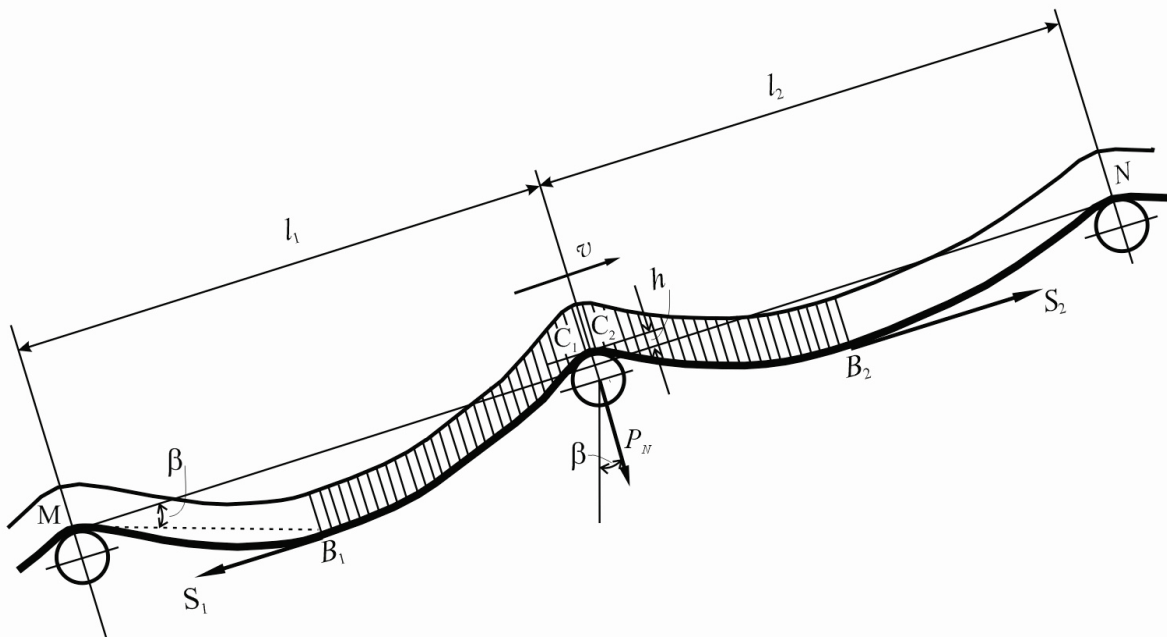


Рисунок 3.1 – Участок ленты у весоизмерительной опоры

Для плоской ленты сила, действующая на ролик, может быть найдена по формуле

$$P_N = gq l_B \cos \beta, \quad (3.3)$$

где $q = q_{\Gamma} + q_{\Gamma}$ – погонная масса ленты с грузом, l_B – длина весоизмерительного участка.

Если допустить, что плоская лента провисает по цепной линии¹, то можно найти:

¹ Неточность этого допущения состоит в том, что лента нагружена неравномерно, а жесткость ее, хотя и невелика, но все же отличается от нуля.

$$\begin{aligned}
l_B = l_{B1.C1} + l_{C2.B2} = \frac{S_1}{gq} \cos\beta & \left[\operatorname{sh} \left(\frac{gq}{2S_1} (l_1 h \operatorname{tg}\beta) + \operatorname{Arsh} \frac{gq(l_1 \operatorname{tg}\beta + h)}{2S_1 \operatorname{sh} \frac{gq}{2S_1} (l_1 - h \operatorname{tg}\beta)} \right) + \right. \\
& + \frac{S_1}{S_2} \operatorname{sh} \left(\frac{gq}{2S_2} (l_2 - h \operatorname{tg}\beta) - \operatorname{Arsh} \frac{gq(l_2 \operatorname{tg}\beta - h)}{2S_2 \operatorname{sh} \frac{gq}{2S_2} (l_2 + h \operatorname{tg}\beta)} \right) + \\
& \left. + \left(\frac{S_2}{S_1} - 1 \right) \operatorname{shArch} \frac{1}{\cos\beta} \right].
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Формула (3.3) ввиду ее громоздкости неудобна для анализа, поэтому для упрощения будем считать, что $l_1=l_2=l$ и $S_1=S_2=S$. При этом для горизонтального конвейера ($\beta=0$) получим:

$$l_B = l \left(\frac{\operatorname{sh}G^*}{G^*} + \frac{1}{G^*} \operatorname{Arsh} \frac{G^* h^*}{\operatorname{sh}G^*} \right), \tag{3.5}$$

где $G^* = gql / 2S$, $h^* = h / l$.

Первое слагаемое в этой формуле учитывает увеличение длины ленты по дуге по сравнению с расстоянием между роlikоопорами по прямой, а второе слагаемое – изменение длины весоизмерительного участка, вызванное вертикальным смещением роlikоопоры.

При этом сила, действующая на роlikоопору

$$P_N = gql_B = gl \left(\frac{\operatorname{sh}G^*}{G^*} + \frac{1}{G^*} \operatorname{Arsh} \frac{G^* h^*}{\operatorname{sh}G^*} \right) q = k_{qP} q, \tag{3.6}$$

где k_{qP} – коэффициент преобразования.

При обычно малых G^* , когда $\operatorname{sh}G^* \approx G^*$

$$P_N = gl \left(1 + \frac{h^*}{G^*} \right) q = gql + \frac{2Sh}{l}. \tag{3.7}$$

Для наклонного конвейера очень хорошие результаты дают формулы

$$l_B \approx l + \frac{2Sh}{gql \cos\beta} \tag{3.8}$$

и

$$P_N = gql \cos\beta + \frac{2hS}{l}. \quad (3.9)$$

Разница в величине l_b при подсчетах по формулам (3.4) и (3.8) не превышает нескольких сотых долей процента.

Для лотковой ленты расчет силы P_N по формуле (3.9) приводит к значительным погрешностям (см. ниже рис. 3.4), что объясняется существенным влиянием поперечной жесткости.

В [305] приводится следующая формула для вертикальной составляющей силы P_N :

$$P = \frac{nqa}{\cos\beta} \pm \frac{2khs \cos\beta}{a}, \quad (3.10)$$

где n – количество весоизмерительных роликов; k – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние жесткости ленты; $a = l \cos\beta$. Эта формула не точна, так как в ней некорректно представлены n и β ; к тому же она не может быть использована для расчетов и анализа влияния жесткости ввиду неопределенности значения коэффициента k .

Для вертикальной силы, действующей на весоизмерительную роликую опору, в [277] получена формула

$$P_N = ql + A \frac{q^3 l^5}{6T^2} + B \frac{q^2 l^2}{3T} \operatorname{tg}\beta + C \frac{h_0}{2l} T, \quad (3.11)$$

где T – компенсирующее натяжение; A , B и C – коэффициенты, являющиеся сложными функциями натяжения ленты и ее жесткости. Второе слагаемое в формуле (3.11) учитывает «погрешность цепной линии», третье слагаемое – «погрешность наклона» и четвертое слагаемое – «погрешность высотного смещения». Далее делается вывод, что для реальных конвейеров A , B и C близки к единице, а второе и третье слагаемое – ничтожно малы. В основном полученные выводы правильны, однако влияние жесткости ленты, податливости опоры, изменения натяжения ленты и др. факторов раскрыты не полностью. Кроме того полученные формулы не дают четкого представления о начальной нагрузке и коэффициенте преобразования ГУ.

С целью выяснения влияния жесткости ленты и других факторов на величину силы P_N , будем рассматривать конвейерную ленту как неразрезную балку, лежащую на многих опорах. Расчетная модель и схема нагружения ленты показаны на рис. 3.2.

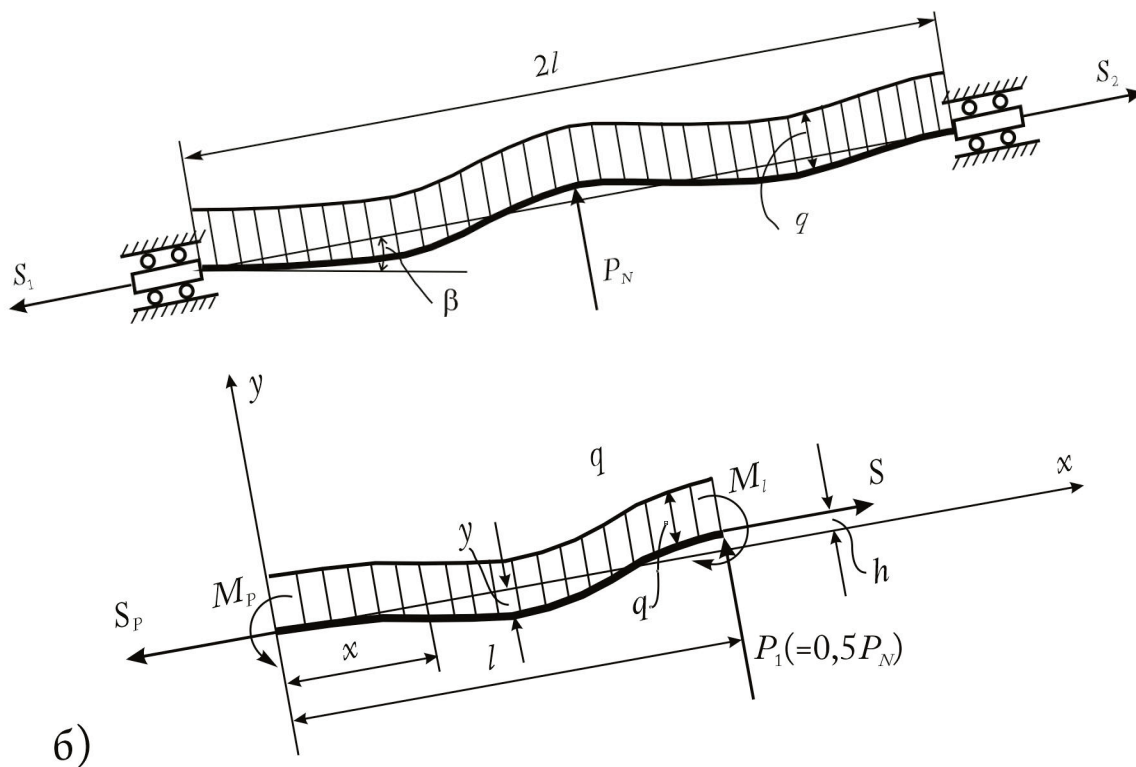


Рисунок 3.2 – Расчетная модель конвейерной ленты как неразрезной балки (а) и схема нагружения (б)

Подставив значение изгибающего момента в сечении x

$$M_x = P_1(l - x) - gq(l - x) \frac{l - x}{2} \cos \beta - (h - y)S - M_l \quad (3.12)$$

в уравнение изогнутой оси балки

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \pm \frac{M_x}{EI}, \quad (3.13)$$

получим дифференциальное уравнение профиля ленты конвейера, –

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} - Sy = -0,5gq \cos(\beta)x^2 + (gql \cos \beta - P_1)x + P_1l - 0,5gql^2 \cos \beta - hS - M_l. \quad (3.14)$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$y = C_1 e^{rx} + C_2 e^{-rx} + \frac{gq \cos \beta}{2S} x^2 + \frac{P_1 - gql \cos \beta}{S} x - \frac{P_1 l}{S} + \frac{gql^2 \cos \beta}{2S} + h + \frac{M_l}{S} + \frac{gqEI \cos \beta}{S^2}, \quad (3.15)$$

где $+r$ и $-r$ – корни характеристического уравнения,

$$r = \pm \sqrt{\frac{S}{EI}}. \quad (3.16)$$

Произвольные постоянные C_1 , и C_2 находятся из условий: при $x=0$, $y = 0$ и $y' = 0$, а величина момента M_l – из условия: при $x = l$ $y' = 0$.

Произведя необходимые выкладки, найдем:

$$y = \frac{P_1 - gql \cos \beta}{S} \left[x + \frac{\text{ch}(r(l-x)) - \text{ch}(rx) - \text{ch}(rl) + 1}{r \text{sh}(rl)} \right] + \frac{gql \cos \beta}{2S} \left[x^2 - \frac{2l(\text{ch}(rx) - 1)}{r \text{sh}(rl)} \right]. \quad (3.17)$$

Учтя, что при $x = l$ $y = h$ и что $P_N = 2P_1$ из (3.17) после преобразований получим:

$$P_N = gql \cos \beta + \frac{2hS}{l \left(1 - 2 \frac{\text{ch}(rl) - 1}{rl \text{sh}(rl)} \right)}. \quad (3.18)$$

Формула (3.18) может быть записана в виде

$$P_N = gql \cos \beta = \frac{2hS}{l} \varphi^{-1}(rl), \quad (3.19)$$

где

$$\varphi(rl) = 1 - 2 \frac{\text{ch}(rl) - 1}{rl \text{ch}(rl)}, \quad (3.20)$$

$$\varphi^{-1}(rl) = 1 / \varphi(rl). \quad (3.21)$$

Если сравнивать (3.19) с (3.9) и (3.3), то можно видеть, что $\varphi^{-1}(rl)$ показывает, во сколько раз увеличивается дополнительная сила, по сравнению с той,

которая была бы, если бы лента была абсолютно гибкой нитью. Зависимость $\varphi^{-1}(rl)$ показана на рис. 3.3.

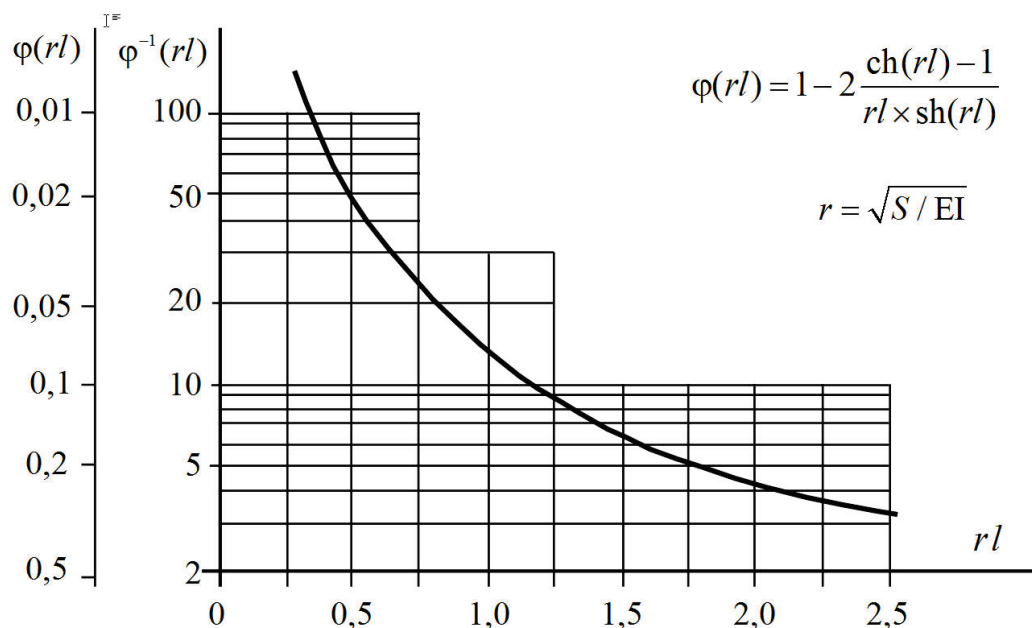


Рисунок 3.3 – Зависимости $\varphi(rl)$ и $\varphi^{-1}(rl)$

Отметим, что вследствие различного развала в пролете между ролик-опорами [222, 284], жесткость EI переменна по длине ленты. Поэтому в (3.16) следует подставлять некоторое эффективное значение жесткости, точный расчет которого чрезвычайно затруднителен, особенно если также учесть, что модуль упругости является сложной функцией напряжения, скорости деформации и ее направления и др. факторов [222]; эффективное значение EI , по-видимому, зависит также от натяжения S .

Правильность формулы (3.18) проверена экспериментально. Считая переменной величину h , найдем, –

$$dN = \frac{2S}{l \left(1 - 2 \frac{\text{ch}(rl) - 1}{rl \text{sh}(rl)} \right)} dh. \quad (3.22)$$

По этой формуле с заменой дифференциалов конечными приращениями может быть построена теоретическая зависимость $\Delta P_N(\Delta h)$.

Для экспериментальной проверки этой зависимости на конвейере 5А коксового цеха №2 Криворожского КХЗ выполнен эксперимент. Данные конвейера: $b_{\text{л}} = 1600\text{мм}$; $Z = 7$; $S = 9000\text{ Н}$; $l = 1,2\text{ м}$; жесткость лотковой ленты на ролик-опоре при $E' = 150 \dots 250\text{ Н/мм}$; $EI = 7200 \dots 12000\text{ Н}\cdot\text{м}^2$. Результаты эксперимента показаны на рис. 3.4.

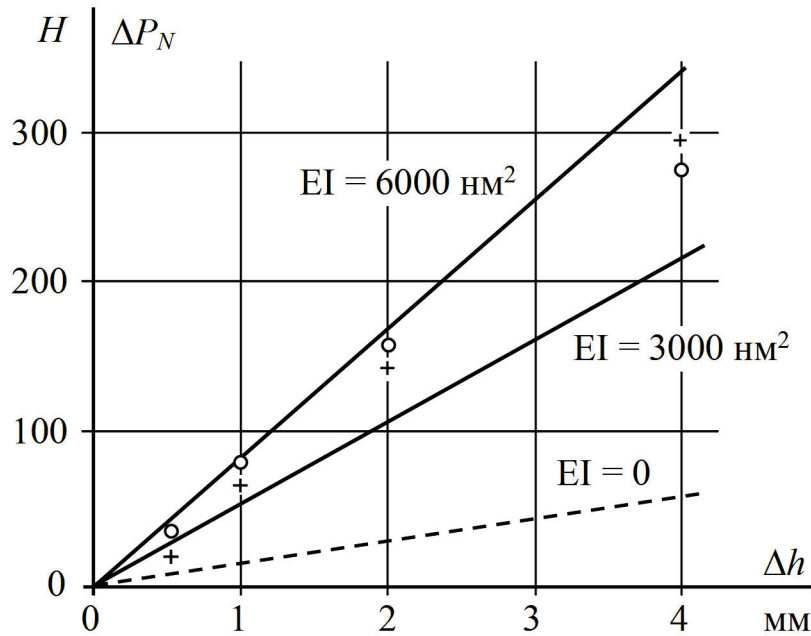


Рисунок 3.4 – Экспериментальные и расчетные значения
 ++ лента без груза; методика В.
 °° лента с грузом; методика С.

На том же рисунке по (3.22) построены расчетные зависимости $\Delta P_N(\Delta h)$ для $EI = 3000 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$, $EI = 6000 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$, а также для $EI = 0$

Жесткость уменьшена примерно вдвое, чтобы учесть увеличенный развал ленты между роlikоопорами. Видно достаточно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных, если при расчете учтена жесткость ленты.

В конвейерных весах смещение весоизмерительной роlikоопоры пропорционально действующей на нее силе, –

$$h = h_0 - xP_N. \quad (3.23)$$

Здесь h_0 – смещение, установленное при монтаже ГУ; xP_N – осадка, вызванная действием силы P_N ; $x = \Delta h / \Delta P_N$ – коэффициент, характеризующий упругость конструкции (датчика веса, опоры). Если жесткость весоизмерительной роlikоопоры того же порядка, что и соседних, в формулу (3.18) следует подставлять $x = x_{в.р} - x_{ж.р.}$, где $x_{в.р}$ и $x_{ж.р.}$ – коэффициенты для весоизмерительной роlikоопоры и соседних с ней (жестких) роlikоопор.

Подставив (3.23) в (3.18) получим:

$$P_N = \frac{gq_l l \cos \beta}{1 + \frac{2xS}{l\varphi(rl)}} \cdot \frac{2h_0 S}{l \left(\varphi(rl) + \frac{2xS}{l} \right)} + \frac{gl \cos \beta}{1 + \frac{2xS}{l\varphi(rl)}} q_r = P_{N0} + k_{qP} q_r. \quad (3.24)$$

Обратим внимание, что формулы (3.18) и (3.24) справедливы только до тех пор, пока длина весоизмерительного участка находится в пределах $0 < l_B < 2l$, т.е. пока

$$0 < P_N < 2gql \cos \beta. \quad (3.25)$$

Равенство (3.24), умноженное на коэффициент передачи рычажной системы $k_{PC.N}$ представляет собой статическую функцию преобразования ГУ.

При движении ленты на ролик, кроме нормальной (P_N), действует тангенциальная сила P_T , в результате чего сила P_B , действующая на датчик веса, изменяется и становится равной

$$P_B = P_N k_{PC.N} \pm P_T k_{PC.T}, \quad (3.26)$$

где $k_{PC.N}$ и $k_{PC.T}$ – коэффициенты передачи рычажной системы для нормальной и тангенциальной сил. Для схемы по рис. 2.1 $k_{PC.N} = a_3/a_2$, $k_{PC.T} = a_4/a_2$.

Тангенциальная сила, как и сила сопротивления движению, вызывается известными причинами, основные из которых – деформация ленты и груза, вдавливание роликов в нижнюю обкладку ленты и сопротивление вращению роликов [159, 222, 226]. Зависимость $P_T(q_r)$ нелинейная и многофакторная. Поскольку, как будет выяснено ниже, влияние силы P_T относительно невелико, можно пренебречь неточностью аппроксимации и считать (рис. 3.5)

$$P_T = P_{T0} + k_W q_r l. \quad (3.27)$$

При этом сила P_B , действующая на ДВ, определится как

$$P_B = P_{N0} k_{PC.N} + k_{qP} q_r k_{PC.N} \pm P_{T0} k_{PC.T} \pm k_W q_r k_{PC.T} = (P_{N0} k_{PC.N} \pm P_{T0} k_{PC.T}) + (k_{qP} k_{PC.N} \pm k_W l k_{PC.T}) q_r = P_{B0} + k_{qP} q_r. \quad (3.28)$$

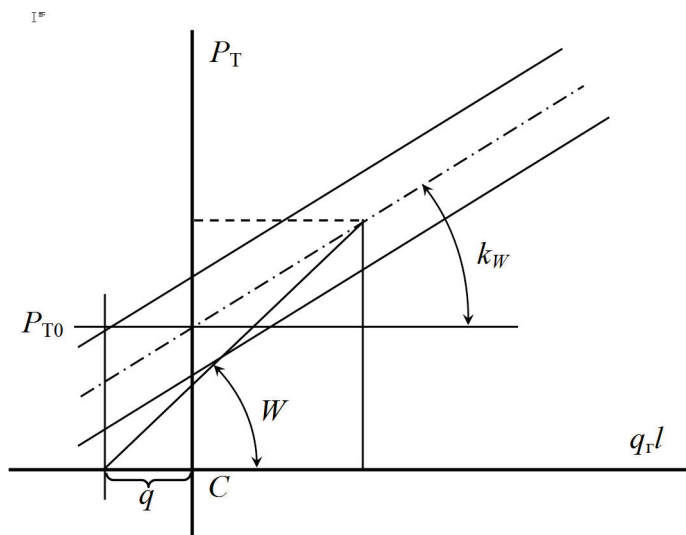


Рисунок 3.5 – Корреляционное поле $P_T(q_r)$

С учетом (3.24)

$$P_B = \left(\frac{gq_{\text{л}} \cos \beta \cdot k_{\text{PC.N}}}{1 + \frac{2\chi S}{l\varphi(rl)}} + \frac{2h_0 S k_{\text{PC.N}}}{l \left(\varphi(rl) + \frac{2\chi S}{l} \right)} \pm P_{T0} k_{\text{PC.T}} \right) +$$

$$+ \left(\frac{gl \cos \beta \cdot k_{\text{PC.N}}}{1 + \frac{2\chi S}{l\varphi(rl)}} \pm k_w l k_{\text{PC.T}} \right) q_r = P_{B0} + k_{qP} q_r, \quad (3.29)$$

где P_{B0} – начальное значение силы P_B ,

$$P_{B0} = \left(\frac{gq_{\text{л}} \cos \beta \cdot k_{\text{PC.N}}}{1 + \frac{2\chi S}{l\varphi(rl)}} + \frac{2h_0 S k_{\text{PC.N}}}{l \left(\varphi(rl) + \frac{2\chi S}{l} \right)} \pm P_{T0} k_{\text{PC.T}} \right); \quad (3.30)$$

k_{qP} - коэффициент преобразования,

$$k_{qP} = \frac{gl \cos \beta \cdot k_{\text{PC.N}}}{1 + \frac{2\chi S}{l\varphi(rl)}} \pm k_w l k_{\text{PC.T}}. \quad (3.31)$$

Входящая в формулу (3.29) величина натяжения ленты S непостоянна и определяется как

$$S = S_0 + (W_L \cos \beta + \sin \beta) q_{\text{cp.L}} gL + W_L q_p gL, \quad (3.32)$$

где S_0 – натяжение ленты у натяжного барабана, создаваемое грузовым натяжным устройством¹; W_L – коэффициент сопротивления движению (средний для участка L); q_p – погонная масса роликов; $q_{\text{cp.L}}$ – среднее значение погонной массы ленты и груза на участке L конвейера от натяжного барабана до весоизмерительного ролика.

Зависимость (3.29) с учетом (3.32) представляет собой кинематическую функцию преобразования ГУ. Очевидно, что эта функция нелинейна и неоднозначна, так как определяется значениями величин $S(S_0, W_L, q_{\text{cp.L}})$, $\varphi(rl)$ (причем r – функция EI и S), P_{T0} , k_w и k_{PC} , которые меняются во времени и зависят от

¹ Использование жесткого натяжного устройства привело бы к недопустимо большой погрешности.

нагрузки; при этом степень искажения функции существенно зависит от h_0 , χ и β .

Выясним степень стабильности и линейности функции преобразования $P_B(q)$.

Заметим, что при $\chi = 0$, $h_0 = 0$ и $k_{PC.T} = 0$

$$P_B = gq_{\text{л}} l \cos \beta \cdot k_{PC.N} + gl \cos \beta \cdot k_{PC.N} q_{\Gamma}. \quad (3.33)$$

Если при этом отсутствует налипание ($q_{\text{л}} = \text{const}$) и не меняется $k_{PC.N}$, то зависимость $P_B(q_{\Gamma})$ линейна и стабильна.

В действительности измерительная роликоопора податлива, но величина коэффициента χ обычно невелика: $\chi = \Delta y_M / \Delta P_N = (0,1 \dots 0,5) 10^{-6}$ м/Н, что соответствует осадке $y_{PM} = 0,2 \dots 1,0$ мм.

При обычных для конвейеров значениях $S = 2000 \dots 40000$ Н, жесткости $EI = 1000 \dots 10000$ Н·м² и длине весоизмерительного участка $l_B = 0,9 \dots 1,1$ м величина $rl = 1 \dots 5$, а $\varphi(rl) = 0,08 \dots 0,5$. Знаменатель в (3.31) становится равным

$$1 + 2xS / (l\varphi(rl)) = 1 + (0,01 \dots 0,04),$$

т.е. увеличивается на несколько процентов. Нестабильность знаменателя, а значит и k_{qP} вызвана непостоянством натяжения $S(S_0, W_L, q_{cp.L})$. Изменение S тем меньше, чем меньше L , т.е. чем ближе к месту загрузки установлены весы, на что обращалось внимание еще в работах [34, 35, 96].

При гибкой ленте ($\varphi(rl) \approx 1$) знаменатель еще меньше отличался бы от единицы, однако в целом влияние жесткости на k_{qP} невелико.

Такой же вывод можно сделать относительно составляющей $P_{B.0}$, вызванной весом ленты (первое слагаемое в (3.29)).

Если h_0 не равно нулю, то появляется составляющая, вызванная превышением измерительной роликоопоры относительно соседних. На рис. 3.6. показана зависимость этой составляющей от натяжения ленты для разных значений EI . Отчетливо видно, что с возрастанием жесткости ленты величина силы становится больше, но стабильность ее при изменении S остается практически той же.

Влияние тангенциальной силы на величину P_{B0} и k_{qP} при неблагоприятных условиях может быть существенным (см. ниже), поэтому необходимо принимать конструктивные меры для стабилизации и уменьшения P_{T0} , k_W и $k_{PC.T}$. Эти рекомендации согласуются с выводами в работе [34].

3.2.2. Функция преобразования многороликового ГУ

Для многороликового ГУ (рис. 3.7) сумма нормальных составляющих сил, действующих на ролики, на основании (3.17) и по аналогии с (3.18), может быть определена как

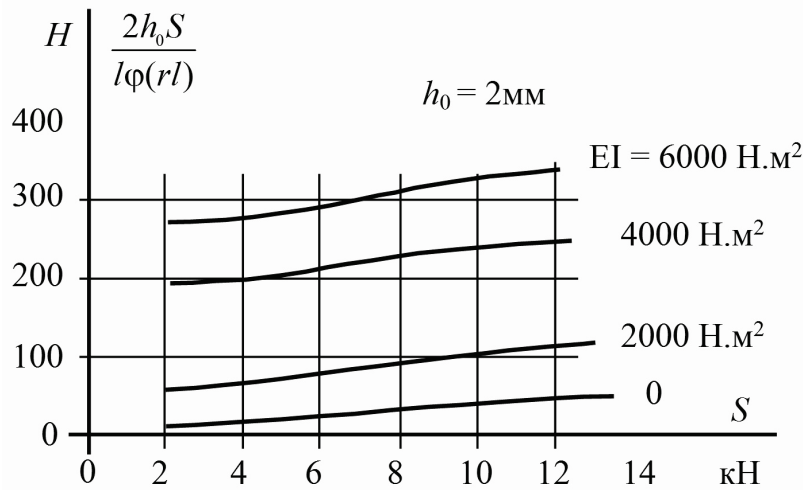


Рисунок 3.6 – Влияние жесткости на нестабильность $P_{B,0}$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_0} P_{Ni} &= P_{N\Sigma} = gq l_s \cos \beta = \frac{h_1 S}{l_1 \varphi(r l_1)} + \frac{h_2 S}{l_1 \varphi(r l_1)} = \\ &= gq l_B \cos \varphi = \frac{(h_1 + h_2) S}{l_1} \varphi^{-1}(r l_1), \end{aligned} \quad (3.34)$$

где $l_B = l_1 + (n_0 - 1)l_0$ – длина весоизмерительного участка; n_0 – количество роликоопор на ГУ; l_0 – расстояние между роликоопорами на ГУ; l_1 – расстояние между крайней роликоопорой ГУ и ближайшей, не принадлежащей ГУ; h_1, h_2 – превышение крайних роликоопор относительно роликоопор, соседних с ГУ.

Остальные обозначения те же, что и для однороликовых ГУ.

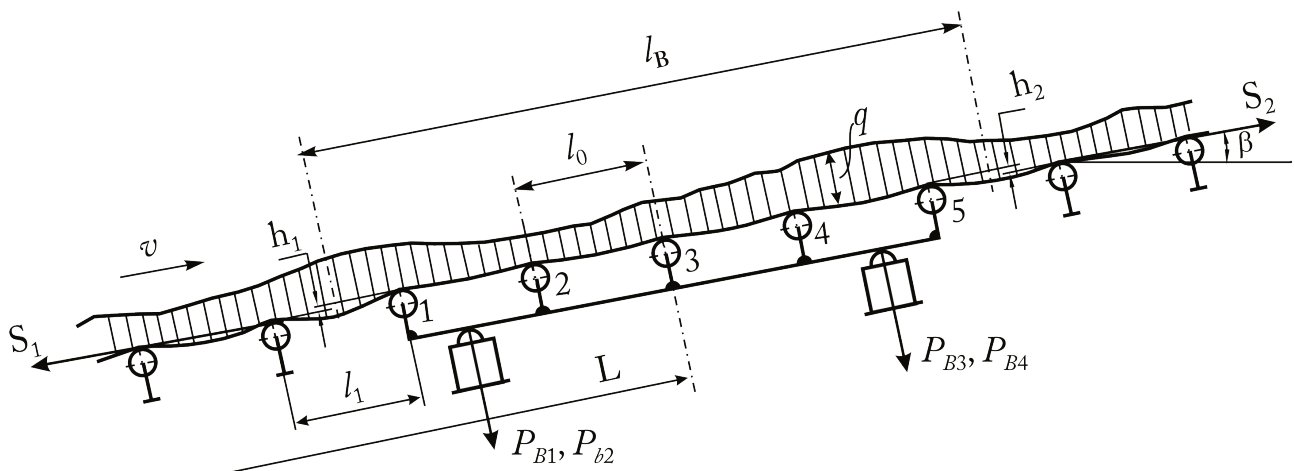


Рисунок 3.7 – Многороликовое грузоприемное устройство

Превышение промежуточных роликов ГУ не влияет на $P_{N\Sigma}$. Изменение высоты какой-либо опоры (кроме крайних) лишь перераспределяет силы, действующие на роликоопоры, но не изменяет суммы этих сил.

Если считать, что осадка платформы пропорциональна действующей на нее силе, т.е.

$$h_1 = h_{10} - xP_{N\Sigma}, \quad (3.35)$$

$$h_2 = h_{20} - xP_{N\Sigma}, \quad (3.36)$$

то после подстановки (3.35) и (3.36) в (3.34) с учетом влияния тангенциальных сил получим

$$P_{N\Sigma} = \frac{gq_{\text{л}}l_{\text{в}} \cos\beta \cdot k_{\text{PC.N}}}{1 + \frac{2xS}{l_1\varphi(rl_1)}} + \frac{(h_{10} + h_{20})Sk_{\text{PC.N}}}{l_1 \left(\varphi(rl_1) + \frac{2xS}{l_1} \right)} + \left[\sum_{i=1}^{n_0} (\pm k_{\text{PC.T.i}} \cdot P_{T0.i}) \right] +$$

$$+ \left[\frac{gl_{\text{в}} \cos\beta \cdot k_{\text{PC.N}}}{1 + \frac{2xS}{l_1\varphi(rl_1)}} + \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n_0} (\pm k_{\text{wi}i} k_{\text{PC.T.i}}) \right] q_{\Gamma} = P_{N0\Sigma} + k_{qP}q_{\Gamma}. \quad (3.37)$$

Эта зависимость с учетом (3.32) есть кинематическая функция преобразования многороликового ГУ.

Формула (3.34) и (3.37) справедлива при

$$gq(n_0 - 1)l_0 \cos\beta \cdot k_{\text{PC.N}} \leq P_{N\Sigma} \leq gq((n_0 - 1)l_0 + 2l_1) \cos\beta \cdot k_{\text{PC.N}}. \quad (3.38)$$

В некоторых конструкциях ГУ, например, по рис. 2.6 сх. 12, 14...21, 25, 26, тангенциальная сила не влияет на величину $P_{N\Sigma}$ и не вносит погрешность измерения.

Составляющая, вызванная превышением крайних роликоопор, такая же, как в однороликовых весах или меньше (т.к. h_{10} и h_{20} могут быть разных знаков), в то время, как k_{qP} больше благодаря увеличению $l_{\text{в}}$. Следовательно, влияние неустойчивости этой составляющей на точность преобразования примерно в n_0 раз меньше.

Неустойчивость составляющей силы $P_{N0\Sigma}$, вызванной весом ленты, в такой же мере влияет на точность преобразования, как и в однороликовых весах.

3.3. Анализ погрешностей грузоприемного устройства

3.3.1. Погрешность $\delta\mathcal{M}_{\text{ГУ}}$ однороликовых весов

В конвейерных весах интегрируется (или суммируется) сигнал пропорциональный приращению $\Delta P_{\text{в}}$ силы $P_{\text{в}}$, чтобы при тарировании и при работе с ненагруженной лентой ($q = q_{\text{л}}$) их показания равнялись нулю.

Если монтаж грузоприемного устройства произвести таким образом, чтобы $k_{PC.T} = 0$, $h_0 = 0$ и использовать датчик, у которого $x = 0$, то для такого идеального случая приращение силы согласно (3.33), будет пропорционально погонной массе груза, –

$$\Delta P_B = q_r g l \cos \beta \cdot k_{PC.N}. \quad (3.39)$$

При этом погрешность от изменения длины весоизмерительного участка отсутствует ($\delta \mathcal{M}_{ГУ} = 0$).

Если же $h_0 \neq 0$ и (или) $x \neq 0$, то возникает погрешность $\delta \mathcal{M}_{ГУ}$, вызванная нелинейной и неоднозначной зависимостью силы ΔP_B от нагрузки q_r .

Как уже указывалось, весы тарируются и градуируются таким образом, что при $q_r = 0$ и при $q_r = q_{r.град}$ погрешность отсутствует. Для любой другой нагрузки $q = q_l + q_r$ возникает погрешность

$$\delta \mathcal{M}_{ГУ} = \frac{\Delta P_B - \Delta P_{BP}}{\Delta P_{BP}}. \quad (3.40)$$

Здесь ΔP_B – действительное приращение нагрузки на датчик веса (см. рис. 3.8) сверх той, при которой производилось тарирование на холостом ходу, –

$$\Delta P_B = P_B - P_{B.ТАР}; \quad (3.41)$$

ΔP_{BP} – расчетное приращение нагрузки (каким было бы ΔP_B , если бы зависимость $P_B(q)$ была линейной), –

$$\Delta P_{BP} = P_{BP} - P_{B.ТАР}. \quad (3.42)$$

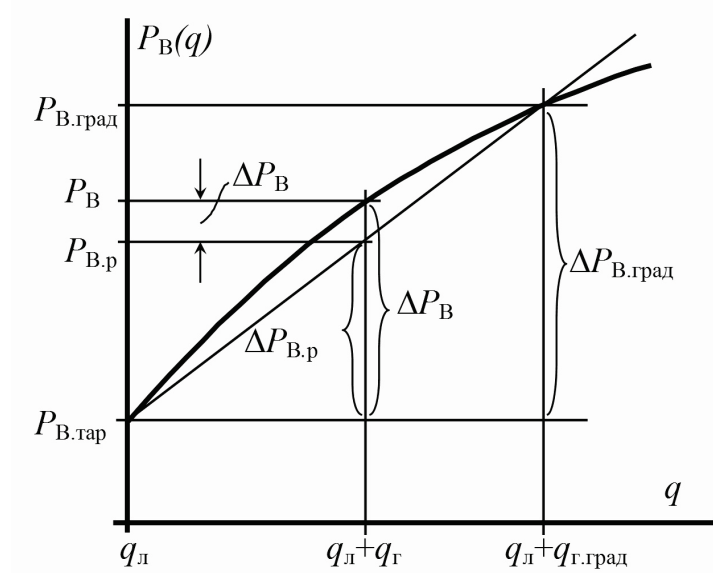


Рисунок 3.8 – К определению погрешности $\delta \mathcal{M}_{ГУ}$.

Подставляя (3.41) и (3,42) в (3.40) с учетом того, что

$$P_{BP} = P_{B.TAP} + \frac{q_{\Gamma}}{q_{\Gamma.град}}(P_{B.ГРАД} - P_{B.TAP}), \quad (3.43)$$

а также выражая погонную массу в относительных единицах, –

$$q_{\Gamma}^* = \frac{q_{\Gamma}}{q_{\Gamma.M}} \quad \text{и} \quad q_{\Gamma.град}^* = \frac{q_{\Gamma.град}}{q_{\Gamma.M}}, \quad (3.44)$$

где $q_{\Gamma.M}$ – максимальная (паспортная) погонная масса груза на конвейере, найдем:

$$\delta \mathfrak{M}_{\Gamma Y} = \frac{q_{\Gamma.град}^*}{q_{\Gamma}^*} \cdot \frac{(P_B - P_{B.TAP})}{(P_{B.ГРАД} - P_{B.TAP})} - 1. \quad (3.45)$$

В эту формулу нужно подставлять:

- значение P_B , вычисленное по (3.29) с учетом (3.20) и (3.16), причем погонная масса вычисляется по формуле

$$q = q_{\Gamma.M}(q_{\Gamma}^* + q_{\Gamma}^*), \quad (3.46)$$

а натяжение ленты,

$$S = S_0 + [(W_L \cos \beta + \sin \beta)(q_{\Gamma}^* + q_{\Gamma}^*) + W_L q_{\Gamma}^*] g q_{\Gamma.M} L; \quad (3.47)$$

- значение $P_{B.град}$ соответствующее погонной массе при градуировке, вычисленное так же, как P_B , но с подстановкой $q_{\Gamma.град}^*$ вместо q_{Γ}^* ;

- аналогично вычисленное $P_{B.TAP}$, но с подстановкой в (3.46) и (3.47) $q_{\Gamma}^* = 0$.

Подстановка в формулу (3.45) не значений, а выражений, привела бы к чрезвычайно громоздкой формуле, неудобной как для расчетов, так и для анализа погрешности.

Строго говоря, по формуле (3,45) вычисляется мгновенное значение погрешности. Среднее же значение зависит от плотности распределения нагрузок за время измерения \mathfrak{T} . Анализ показывает, что среднее значение погрешности мало отличается от погрешности, вычисленной по среднему значению нагрузки, поэтому ниже будем пользоваться соответствующими формулами, подставляя в них $\overline{q_{\Gamma}^*}$ вместо q_{Γ}^* .

Погрешности $\delta\mathcal{M}_{\GammaУ}$ удобно вычислять с помощью компьютера. При этом следует иметь в виду, что рассматриваемая погрешность имеет три составляющие:

1) основная погрешность $\delta\mathcal{M}_x$, вызванная оседанием платформы и неточностью монтажа. Эта погрешность вычисляется при неизменном¹ натяжении ленты у натяжного барабана ($S = S_{0.ТАР}$) и постоянном² сопротивлении вращению роликов ($W_L = W_{L.ТАР}$);

2) дополнительная погрешность $\delta\mathcal{M}_{S_0}$, вызванная изменением натяжения ленты у натяжного барабана; эта погрешность вычисляется как разность между погрешностью $\delta\mathcal{M}_{\GammaУ}$, найденной при новом значении натяжения ленты ($W_L = W_{L.ТАР} + \Delta S_0$), и основной погрешностью $\delta\mathcal{M}_x$;

3) дополнительная погрешность $\delta\mathcal{M}_{W_L}$, вызванная изменением коэффициента сопротивления W_L ; эта погрешность вычисляется как разность между погрешностью $\delta\mathcal{M}_{\GammaУ}$, найденной при новом значении коэффициента сопротивления ($W_L = W_{L.ТАР} - \Delta W_L$), и основной погрешностью $\delta\mathcal{M}_x$.

Для оценки возможных значений погрешности $\delta\mathcal{M}_{\GammaУ}$ на рис. 3.9 и 3.10 по результатам расчета на компьютере построены зависимости $\delta\mathcal{M}_x(q_{\Gamma}^*)$, $\delta\mathcal{M}_{S_0}(q_{\Gamma}^*)$, и $\delta\mathcal{M}_{W_L}(q_{\Gamma}^*)$.

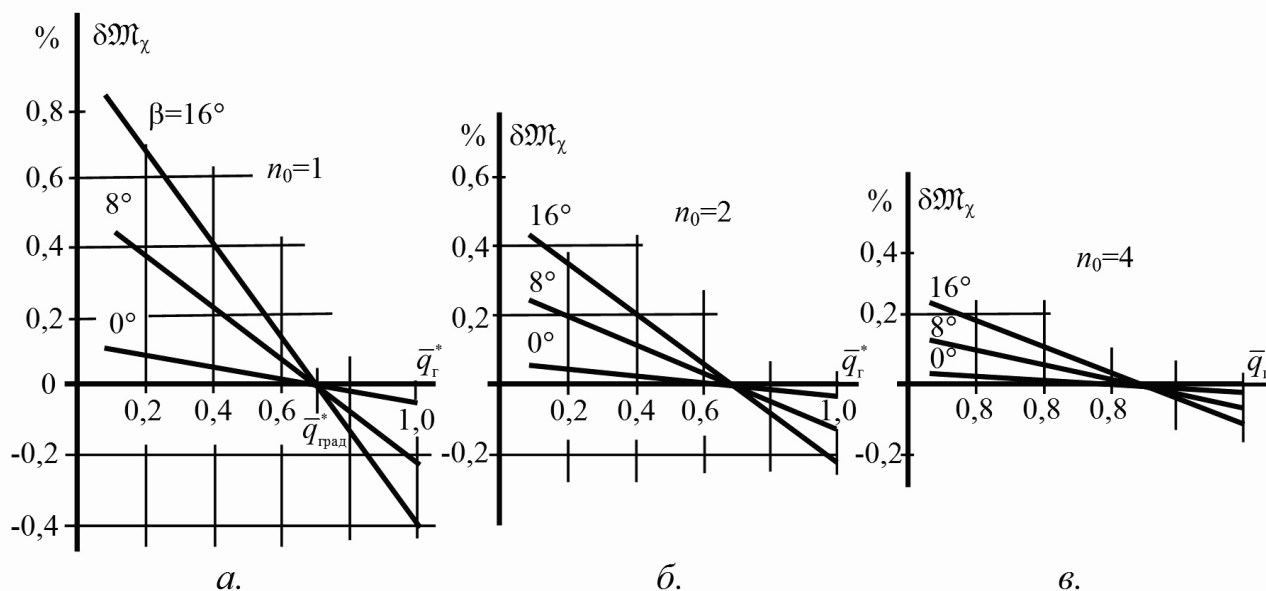


Рисунок 3.9 – Основная погрешность $\delta\mathcal{M}_x(q_{\Gamma}^*)$ при различных углах наклона β и числе роликоопор $\GammaУ$ $n_0 = 1$, $n_0 = 2$ и $n_0 = 4$.

$$L = 20\text{ м}, y_{\text{рм}} = 1\text{ мм}, l = 1\text{ м}, w = 0,04, \bar{q}_{\Gamma.град}^* = 0,7$$

¹ По аналогии с (3.119)

$$\overline{\delta\mathcal{M}_{\GammaУ}} = \frac{1}{q_{\Gamma}^*} \int_0^{\infty} \delta\mathcal{M}_{\GammaУ}(q_{\Gamma}^*) q_{\Gamma}^* \varphi(q_{\Gamma}^*) dq_{\Gamma}^*. \quad (3.48)$$

² То есть при том же, какое было при тарировании весов.

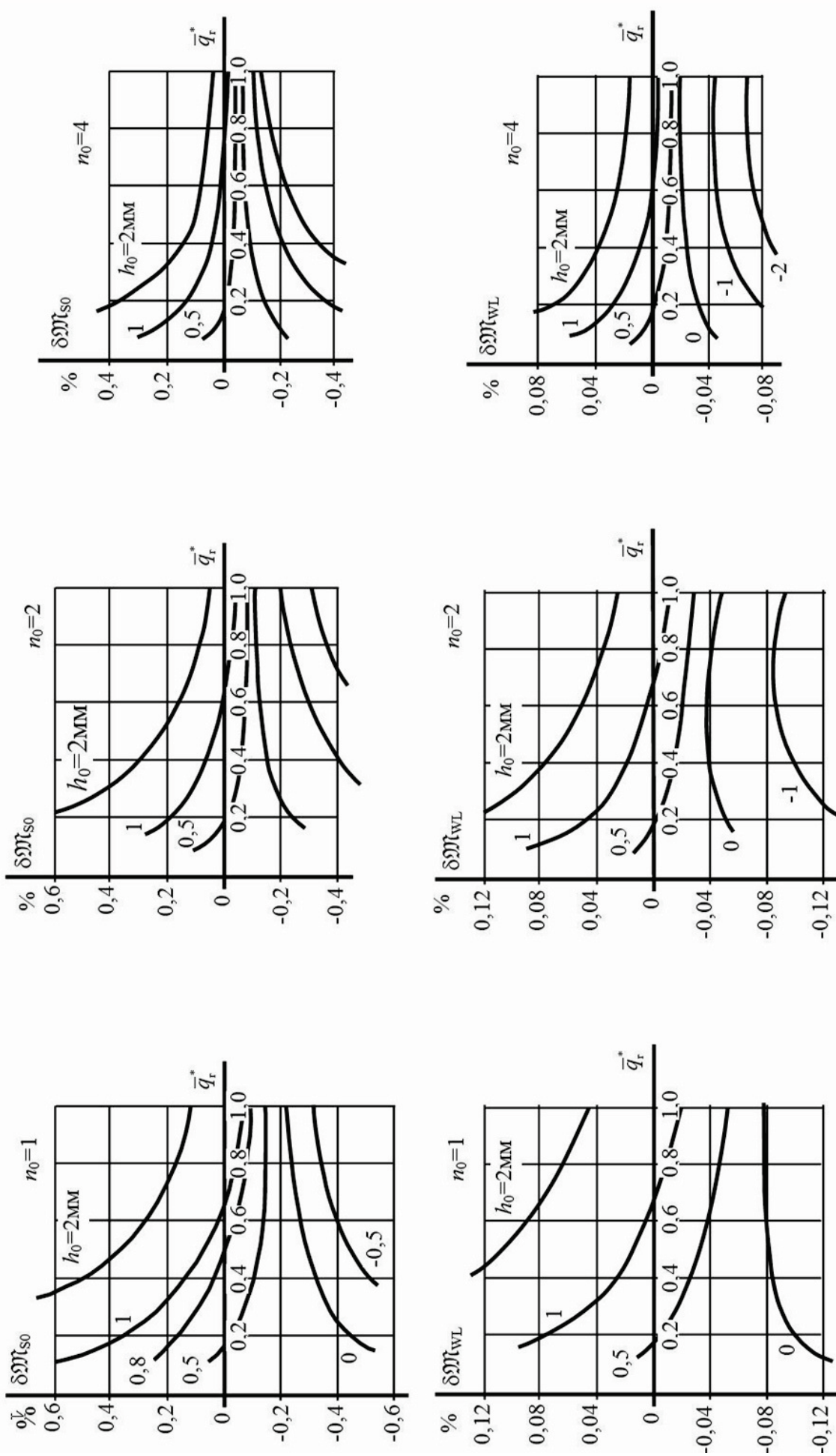


Рисунок 3.10 – Дополнительные погрешности $\delta M_{s0}(\bar{q}_r^*)$ и $\delta M_{WL}(\bar{q}_r^*)$ при различных n_0 и h_0

Расчет выполнен для следующих исходных данных:

$$q_{г.м} = 100 \text{ кг/м}, \quad q_{л}^* = 0,35, \quad q_{п}^* = 0,3, \quad q_{г.град}^* = 0,7,$$

$$S_{0Г} = 8000 \text{ Н}, \quad \Delta S_0^* = \pm 0,1, \quad W_L = 0,04, \quad \Delta W_L = \pm 0,01, \quad L = 20 \text{ м},$$

$$l = 1 \text{ м}, \quad EI = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2, \quad x = 10^{-6} \text{ м/Н}.$$

Принятая в расчете жесткость соответствует лотковой ленте шириной $b = 1,6 \text{ м}$ с числом слоев $z = 7$ и модулем упругости $E = 1,25 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$ ($E' = 250 \text{ даН/см}$ [222]), при угле наклона боковых роликов $\alpha = 20^\circ$.

Следует еще раз отметить, что погрешность $\delta \mathfrak{M}_{ГУ}$ мало зависит от поперечной жесткости ленты. Значения погрешностей $\delta \mathfrak{M}_x(q_\Gamma^*)$, $\delta \mathfrak{M}_{S_0}(q_\Gamma^*)$, и $\delta \mathfrak{M}_{wL}(q_\Gamma^*)$, вычисленные для жесткости $EI = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$, с точностью $\pm(0,01 \dots 0,03)\%$ совпали с теми, которые вычислены для $EI = 5000 \text{ Н} \cdot \text{м}^2$. Это дает основание пользоваться для расчета погрешности $\delta \mathfrak{M}_{ГУ}$ формулой, при выводе которой сделано допущение, что $EI = 0$. Полученная формула имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta \mathfrak{M}_{ГУ} = & 2g x q_{г.м} \frac{L}{l} (W_L \cos \beta + \sin \beta) (\bar{q}_{г.град}^* - \bar{q}_\Gamma^*) + \\ & + \frac{2}{l \bar{q}_\Gamma^*} \left[\frac{h_0}{g q_{г.м} l \cos \beta} - x (\bar{q}_\Gamma^* + q_{л}^*) \right] \times \\ & \times \left[\overline{\Delta S_0} S_{0.град} + g q_{г.м} L \cos \beta \left(\bar{q}_\Gamma^* + q_{л}^* + \frac{q_{п}^*}{\cos \beta} \right) \overline{\Delta W_L} \right]. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Отсюда

$$\delta \mathfrak{M}_x = \frac{2 y_{PM} L}{l^2} (w_L + \text{tg} \beta) (\bar{q}_{г.град}^* - \bar{q}_\Gamma^*); \quad (3.50)$$

$$\delta \mathfrak{M}_{S_0} = \frac{2 \overline{\Delta S_0} S_{0.град}}{g q_{г.м} \bar{q}_\Gamma^* l^2 \cos \beta} \left[h_0 - y_{P.M} (\bar{q}_\Gamma^* + q_{л}^*) \right];^1 \quad (3.51)$$

$$\delta \mathfrak{M}_{wL} = \frac{2 \overline{\Delta W_L} L}{\bar{q}_\Gamma^* l^2} \left(\bar{q}_\Gamma^* + q_{л}^* + \frac{q_{п}^*}{\cos \beta} \right) \left[h_0 - y_{P.M} (\bar{q}_\Gamma^* + q_{л}^*) \right]. \quad (3.52)$$

¹ Формула погрешности, соответствующая (3.51), получена в [305] из (3.10) и имеет вид

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{khS}{nqa^2} 100\%.$$

Она не учитывает жесткость измерительной роликоопоры ($y_{P.M} = 0$) и содержит коэффициент k , что не согласуется с проведенными нами исследованиями.

В этих формулах коэффициент x выражен через $y_{P.M}$ – оседание весоизмерительной роликоопоры под действием максимальной нагрузки на ленте, –

$$x = \frac{y_P}{P_N} = \frac{y_{P.M}}{P_{N.M}} = \frac{y_{P.M}}{q_{г.м} g l \cos \beta}. \quad (3.53)$$

Вычисленные по формулам (3.50)...(3.52) значения погрешностей совпадают с построенными на рис. 3.9а и 3.10а, б. Из рис. 3.9а видно, что составляющие погрешности $\delta \mathcal{M}_{ГУ}$ могут быть значительными, особенно при больших углах наклона β .

Для уменьшения основной погрешности $\delta \mathcal{M}_x$ как это следует из формулы (3.50), необходимо:

- а) использовать датчик веса и проектировать грузоприемное устройство с возможно большей жесткостью;
- б) устанавливать весы возможно ближе к месту загрузки конвейера;
- в) производить градуировку весов при нагрузке, наиболее характерной для данного конвейера.

Ряд других рекомендаций по монтажу ГУ приводится в [5 т.2, 246, 269, 275, 288].

Дисперсия $\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_x]$ основной погрешности $\delta \mathcal{M}_x$ находится из формул (3.50) и (3.53),

$$\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_x] = \left(2 g x q_{г.м} \frac{L}{l} (\bar{q}_{г.град}^* - \bar{q}_г^*) \cos \beta \right)^2 \bar{q}_{г.град}^* \mathcal{D}[w_L]. \quad (3.54)$$

Значение этой дисперсии ничтожно и может не учитываться при расчете погрешности.

Дополнительная погрешность $\delta \mathcal{M}_{S_0}$, как видно из рис. 3.10а, существенно зависит от начального превышения h_0 . При некотором значении h_0 погрешность $\delta \mathcal{M}_{S_0}$ в широком диапазоне нагрузок остается небольшой по величине¹. Например, при $h_0 = 0,8$ мм погрешность $\delta \mathcal{M}_{S_0}$ не выходит за пределы $\pm 0,1\%$ при изменении нагрузки от $\bar{q}_г^* = 0,3$ до $\bar{q}_г^* = 1$. При некотором значении нагрузки погрешность вообще равна нулю независимо от величины ΔS_0 . Задавшись величиной этой нагрузки ($q_{г.р}^*$), можно определить расчетное превышение $h_{0,р}$, которое должно быть установлено при монтаже ГУ. Из формулы (3.51)

$$h_{0,р} = y_{P.M} (q_{г.р}^* + q_{л}^*). \quad (3.55)$$

Рекомендуется принимать $q_{г.р}^* = 0,2...0,4$.

¹ На целесообразность установки начального превышения измерительной роликоопоры впервые указано в работе [117].

Действительное значение h_0 будет отличаться от $h_{0,р}$, оставаясь, однако, в пределах допуска $\pm\Delta h_{0,д}$. Можно определить зону, за пределы которой не выйдет погрешность $\delta\mathcal{M}_{S_0}$, если монтаж ГУ выполнен с заданной точностью.

Наибольшее (по абсолютной величине) значение погрешности вычисляется по формуле¹

$$\delta\mathcal{M}_{S_0, \max} = \frac{2\Delta\bar{S}_0^* S_{0, \text{град}}}{g q_{Г.М} \bar{q}_Г^* l^2 \cos\beta} \left[y_{P.M} (q_{Г.р}^* - \bar{q}_Г^*) \pm \Delta h_{0,д} \right], \quad (3.56)$$

которая получена из (3.51) подстановкой вместо h_0 его расчетного значения (3.55) плюс-минус допуск. В формуле (3.56) знак перед $\Delta h_{0,д}$ должен быть таким же, как знак первого слагаемого в квадратных скобках. На рис. 3.11 по формуле (3.56) построены границы зоны возможных погрешностей при допуске на точность монтажа $\pm 0,5$ мм

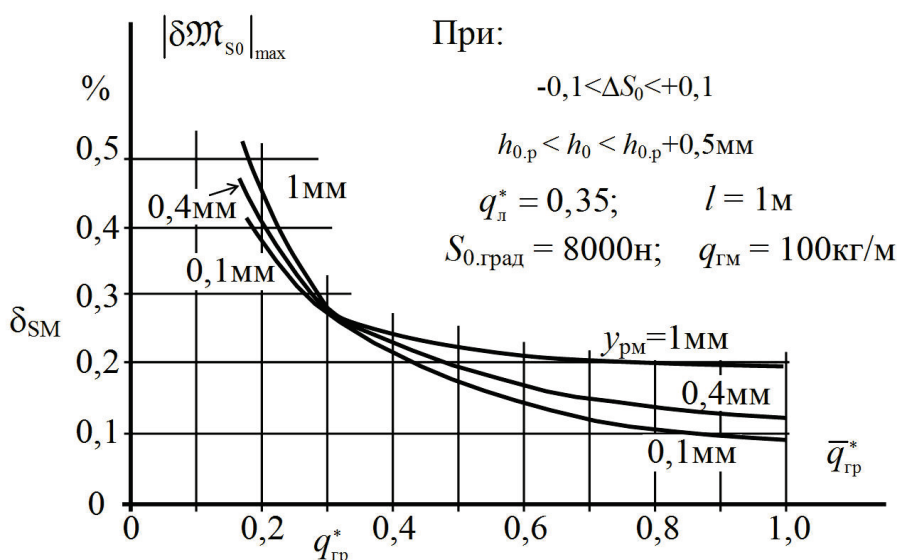


Рисунок 3.11 – Границы зон возможных погрешностей при допуске на точность монтажа $\pm 0,5$ мм

3.3.2. Погрешность $\delta\mathcal{M}_{ГУ}$ многороликовых весов

Метод и последовательность расчета погрешности $\delta\mathcal{M}_{ГУ}$ с помощью ЭВМ те же, что и для однороликовых весов, но при этом силу $P_{B\Sigma}$ нужно вычислять по формуле (3.37), а не по (3.29).

На рис. 3.9б, в и 3.10в, г, д, е по результатам расчета на компьютере построены основная ($\delta\mathcal{M}_x$) и дополнительные ($\delta\mathcal{M}_{S_0}, \delta\mathcal{M}_{wL}$) погрешности для

¹Упрощенный пример расчета возможной погрешности от неточности монтажа измерительной роликопоры приведен также в [246]

двухроликовых и четырехроликовых весов при тех же исходных данных, что и для однороликовых. Отчетливо видно, что как основная, так и дополнительные погрешности весов с многороликовыми ГУ существенно меньше, чем весов однороликовых.

Для вычисления приближенных значений погрешностей можно пользоваться формулами:

$$\delta \mathcal{M}_x = \frac{2y_{\text{р.м}}L}{l_1[l_1 + (n_0 - 1)l_0]}(W_L + \text{tg}\beta)(\bar{q}_{\text{г.град}}^* - \bar{q}_{\text{г}}^*); \quad (3.57)$$

$$\delta \mathcal{M}_{S_0} = \frac{\Delta \bar{S}_0^* S_{0,\text{град}}}{gq_{\text{г.м}} \bar{q}_{\text{г}}^* l_1 [l_1 + (n_0 - 1)l_0] \cos \beta} [(h_{01} + h_{02}) + 2y_{\text{р.м}}(\bar{q}_{\text{г}}^* + q_{\text{л}}^*)]; \quad (3.58)$$

$$\delta \mathcal{M}_{w_L} = \frac{\Delta w_L L}{\bar{q}_{\text{г}}^* l_1 [l_1 + (n_0 - 1)l_0]} (\bar{q}_{\text{г}}^* + l_{\text{л}}^* + \frac{q_{\text{г}}^*}{\cos \beta}) \times \\ \times [(h_{01} + h_{02}) - 2y_{\text{р.м}}(\bar{q}_{\text{г}}^* + \bar{q}_{\text{л}}^*)]. \quad (3.59)$$

При меньшей точности эти формулы имеют то достоинство, что указывают степень влияния каждого фактора на величину погрешности.

В современных электронных весах обычно используются силоизмерительные датчики, осадка которых под действием груза на ленте составляет 0,1...0,3 мм. В этих условиях погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{ГУ}}$ определяется не столько осадкой ГУ, сколько неточностью монтажа. Кроме того, хотя погрешности $\delta \mathcal{M}_{S_0}$ и $\delta \mathcal{M}_{w_L}$ и не являются основными, необходимо учитывать, что абсолютное постоянство натяжения S_0 и коэффициента сопротивления w_L обеспечить практически невозможно. Поэтому необходимо оценить величину возможной погрешности, вызванной неточностью монтажа ГУ и неизбежным изменением при работе конвейера натяжения S_0 и коэффициента сопротивления w_L .

На рис. 3.12, построенном по результатам расчета на компьютере, показаны границы зон возможных погрешностей $\delta \mathcal{M}_{\text{ГУ}}$ при допуске на точность монтажа крайних роlikоопор $\Delta h_{0,\text{д}} = \pm 1 \text{ мм}$ для различного количества роlikоопор и данных конвейера, указанных на стр. 67. Наибольшие значения погрешностей, определяющие границы зоны, мало зависят от угла β , но почти пропорциональны величине $\Delta h_{0,\text{д}}$.

Из рис. 3.12 видно, что в весах класса 1,0 (или не менее точных) можно использовать наиболее простое, однороликовое ГУ (сх. по рис. 2.6 сх. 3, 4, 5 и др.). В некоторых случаях однороликовое ГУ может использоваться в весах класса 0,5¹, однако в этом случае допуск на точность монтажа должен быть не

¹ Примером тому могут быть конвейерные весы французской фирмы Fourrau или весы JSC фирмы Elliott (Англия) [5 т.2].

более, чем $\pm 0,5\text{мм}$; повышенными должны быть также требования к натяжному устройству, к стабильности величины S_0 .

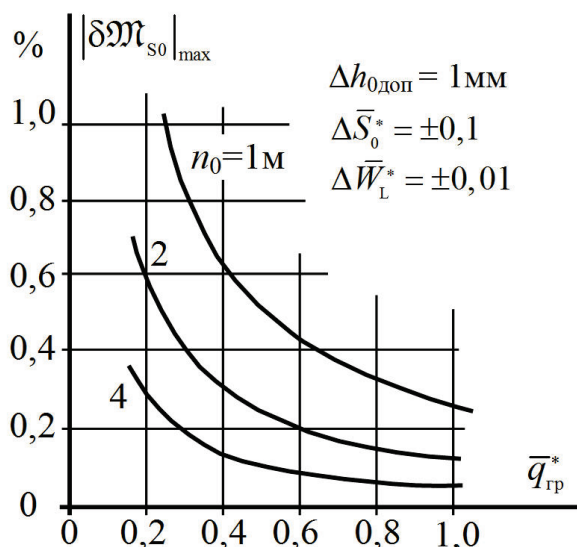


Рисунок 3.12 – Границы зон возможных погрешностей

Более подходящими, однако, для весов класса 0,5 являются двухроликовые ГУ (рис. 2.6 сх. 8...11).

Весы более высокого класса точности должны строиться на основе многороликовых ГУ, для которых погрешность δM_l может быть ограничена величиной 0,1...0,2 % (и меньше) при числе роликов $n_0 \geq 4$ ¹.

3.4. Теоретический анализ сил, вызывающих динамическую погрешность взвешивания

Движение ленты с грузом приводит к появлению дополнительных сил, которые изменяют кинематическую функцию преобразования ГУ, имеющую вид (3.29) и (3.37). Эти силы возникают вследствие непрямолинейного движения провисшей ленты с грузом, из-за бокового схода ленты, при ударах кусков груза о ролики ГУ, а также при колебаниях ленты с грузом и ГУ. Ниже анализируются погрешности, вызванные указанными причинами.

3.4.1. Силы и погрешность, вызванные непрямолинейным движением ленты с грузом

Влияние дополнительных сил, вызванных непрямолинейным движением ленты с грузом, анализировалось в работах [39, 40].

¹ Точность 0,25% обеспечивают, например, весы Inflo Resometric с 4-роликовым ГУ (см. с. 13).

При этом сделаны допущения, что лента между роликами провисает по цепной линии или по дуге окружности [53], а выпуклость над измерительным роликом повторяет его кривизну. Эти допущения привели к выводу, что при $v > 1,25$ м/с необходимо уменьшать расстояние между роликоопорами, иначе погрешность может быть больше 0,5%. Если же учесть реально существующую жесткость ленточного става и, следовательно, меньшее провисание ленты, а также тот факт, что лента вдавливается в ролик не по всей толщине, причем в ряде случаев угол набегания ленты на ролик вообще отсутствует [126], то можно прийти к выводу о существенно меньшей погрешности, вызванной нелинейностью движения.

В результате провисания ленты с грузом она на участке между роликоопорами движется по трассе выпуклостью вниз, а над роликами – выпуклостью вверх (рис. 3.13).

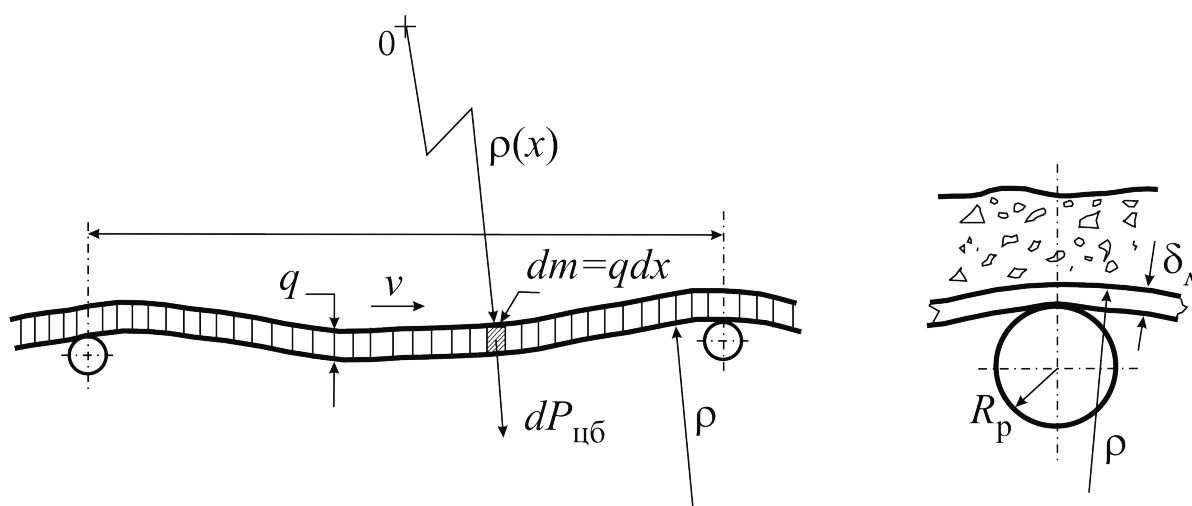


Рисунок 3.13 – Продольная нелинейность ленты с грузом

При криволинейном движении на каждую элементарную массу $dm = qdx$ действует центробежная сила

$$dP_{цб}(x) = \frac{dm \cdot v^2}{\rho(x)}. \quad (3.60)$$

Так как кривизна

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{M(x)}{EI(x)}, \quad (3.61)$$

то

$$dP_{цб}(x) = \frac{q(x)v^2 M(x)}{EI(x)} dx, \quad (3.62)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент в сечении x ; $EI(x)$ – поперечная жесткость в сечении x .

Равнодействующая центробежных сил, действующая на ролик ГУ, –

$$P_{цб} = qv^2 \int_0^l q(x)v^2 \frac{M(x)}{EI(x)} dx, \quad (3.63)$$

а для равномерной нагрузки, после подстановки $M(x)$ по (3.12) определится как

$$P_{цб} = qv^2 \int_0^l \frac{0,5gq(l-x)x + y(x)S - M_l}{EI(x)} dx. \quad (3.64)$$

При этом относительное значение, –

$$\delta P_{цб} = \frac{P_{цб}}{gql} = \frac{v^2}{gl} \int_0^l \frac{0,5gq(l-x)x + y(x)S - M_l}{EI(x)} dx. \quad (3.65)$$

Прогиб $y(x)$ может быть вычислен по (3.17), а изгибающий момент M_l над роликкоопорой – по формуле

$$M_l = \frac{gql^2}{12}, \quad (3.66)$$

которая получается из уравнения трех моментов.

Интегрирование (3.65) с учетом (3.17) может быть выполнено численными методами с помощью компьютера, однако, оценить влияние центробежных сил можно следующим образом. Из (3.60) и (3.61)

$$\frac{dP_{цб}}{dm \cdot g} = \frac{v^2 M(x)}{EI(x)}. \quad (3.67)$$

Эта величина определяет относительную величину центробежной силы. Наибольшее значение она имеет над опорой и определяется как

$$\frac{dP_{цб}}{dmg} = v^2 gl^2 / 12EI. \quad (3.68)$$

При $v = 2,5$ м/с, $q = 150$ кг/м, $l = 1$ м и $EI = 3000$ Н.м², что примерно соответствует конвейеру с лентой шириной 1400...1600мм, $dP_{цб} / dm g \approx 0,025$, т.е. – лента и материал над роликкоопорой становится на 2,5% «легче». В средней части пролета, где кривизна меньше «утяжеление» еще меньше, так что нескомпенсированное (по форм. 3.65) изменение веса не может превышать 0,1...0,2%. Поскольку такое же изменение веса имеет место при градуировке весов, то по-

грешностью от нелинейности движения можно пренебречь. При необходимости погрешность $\delta M_{цб}$ может быть вычислена по формуле

$$\delta M_{цб} = \delta P_{цб} - \delta P_{цб.град}, \quad (3.69)$$

причем $\delta P_{цб}$ и $\delta P_{цб.град}$ вычисляются по (3.65), (3.17) и (3.66).

3.4.2. Погрешность, вызванная ударами кусков груза о ролики ГУ

При перемещении крупного куска, находящегося на ленте в горной массе, возникает удар, когда участок ленты с крупным куском набегаёт на ролик. При ударе возникает нормальная P_N и тангенциальная P_X силы, причем сила P_X в несколько раз меньше, чем P_N [284] и ее влиянием можно пренебречь. Характер изменения силы P_N при движении ленты с куском через несоизмерительную роликсопору показан на рис. 3.14.

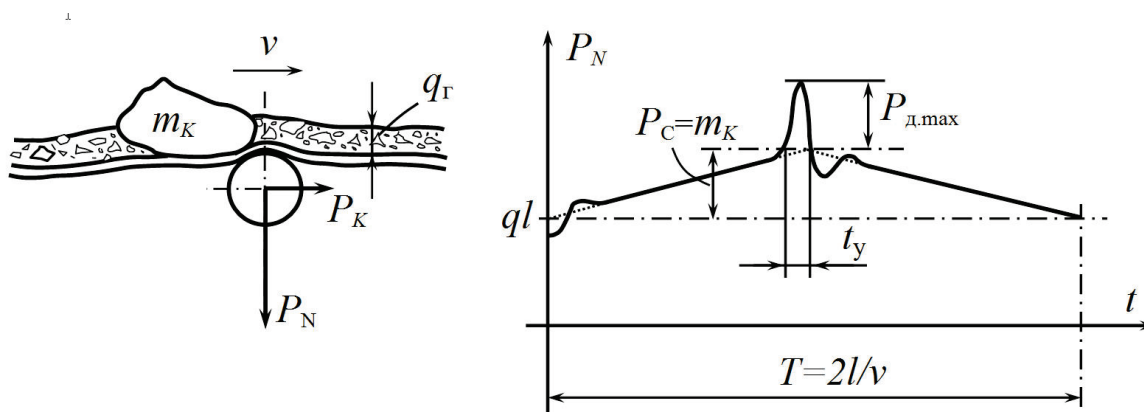


Рисунок 3.14 – Изменение силы P_N при движении ленты с куском через несоизмерительную роликсопору

В момент удара к статической силе, пропорциональной массе куска ($P_C = gm_k$), добавляется динамическая сила $P_d(t)$, достигающая вскоре после удара величины $P_{д.мах}$. Степень динамичности нагрузки характеризуется коэффициентом динамичности, определяемой как

$$K_d = \frac{P_C + P_{д.мах}}{P_C} = 1 + \frac{P_{д.мах}}{P_C}.$$

Коэффициент динамичности является сложной функцией скорости ленты, размера и формы куска [126, 284], гранулометрического состава окружающего груза, толщины слоя этого груза вблизи и под куском, толщины ленты и ее упругих свойств, натяжения ленты [47, 284] и расстояния между роликсопорами, диаметра ролика и наличия футеровки, конструкции роликсопоры [227]. Построить математическую модель, которая учитывала бы все эти факторы, не

представляется возможным. Более надежные показатели динамичности нагрузки дает эксперимент.

На рис. 3.15 показана зависимость K_d от скорости v (по данным [126]). Из рис. 3.15 видно, что при скорости $v = 1,5 \dots 2,5$ м/с $K_d = 1,5 \dots 2$, т.е. динамическая нагрузка составляет 50...100% от статической (для жестких роликоопор).

После прохождения максимума, благодаря упругим свойствам ленты и роликоопоры, должна наблюдаться отрицательная динамическая сила и затухающие динамические колебания¹, однако, в связи с диссипацией энергии удара, амплитуда отрицательной динамической силы существенно меньше положительной.

Кратковременная ударная нагрузка передается на датчики веса (ДВ). Величина дополнительной силы, действующей на ДВ, может быть найдена решением системы уравнений (3.70)...(3.76), записанной в виде, удобном для решения на компьютере и соответствующей модели ГУ-ДВ, показанной на рис. 3.16.

$$P_1 = f(t), \quad (3.70)$$

$$P_2 = \frac{z_1}{v x_{ДВ}} - \frac{z_2}{v x_{ДВ}} + \eta \frac{dz_1}{dt} - \eta \frac{dz_2}{dt}, \quad (3.71)$$

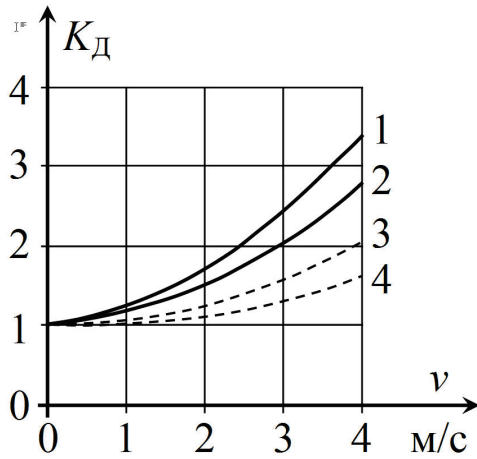
$$P_3 = \frac{z_2}{v x_{ДВ}} - \frac{z_3}{v x_{ДВ}} + \eta \frac{dz_2}{dt} - \eta \frac{dz_3}{dt}, \quad (3.72)$$

$$P_4 = \frac{z_3}{v_0 x_{ДВ}}, \quad (3.73)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z_1}{dt^2} &= \frac{P_1}{m_1} - \frac{P_2}{m_1}, & z_1' &= \int z_1'' dt + 0, \\ & & z_1 &= \int z_1' dt + 0, \end{aligned} \quad (3.74)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z_2}{dt^2} &= \frac{P_2}{m_2} - \frac{P_3}{m_2}, & z_2' &= \int z_2'' dt + 0, \\ & & z_2 &= \int z_2' dt + 0, \end{aligned} \quad (3.75)$$

¹ Колебания, вызванные другими причинами, рассмотрены ниже.



- 1 – одиночный кусок , жесткая роликоопора (РО)
 - 2 – кусок в массе материала, жесткая РО
 - 3 – одиночный кусок, гибкая РО
 - 4 – кусок в массе материала, гибкая РО
- ($P/q_{об} = 2$)

Рисунок 3.15 – Зависимость коэффициента динамичности от скорости

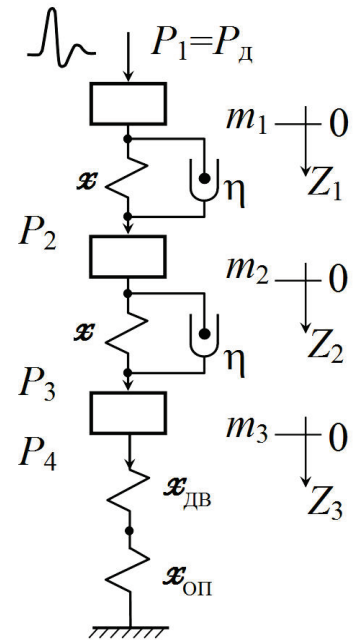


Рисунок 3.16 – Модель ГУ-ДВ

$$\frac{d^2 z_3}{dt^2} = \frac{P_3}{m_3} - \frac{P_4}{m_3}, \quad z_3' = \int z_3'' dt + 0, \quad (3.76)$$

$$z_3 = \int z_3' dt + 0.$$

В этих уравнениях $\nu = x / x_{ДВ}$ – коэффициент, указывающий на соотношение упругости ГУ и ДВ: $\nu_0 = 1 + x_{оп} / x_{ДВ}$ – коэффициент, учитывающий упругость опоры, на которой установлен ДВ. Решение уравнений показало, что при больших жесткостях реальных ГУ и ДВ динамическая сила почти без изменения передается на датчик веса.

При интегрировании сигнала ДВ вместо величины

$$\mathfrak{M} = \int_{\bar{x}} q(t) \nu dt = \frac{\nu}{k_{qP}} \int_{\bar{x}} P_C(t) dt \quad (3.77)$$

на итоговый счетчик будет поступать величина

$$\mathfrak{M}' = \frac{\nu}{k_{qP}} \int [P_C(t) + P_D(t)] dt. \quad (3.78)$$

Запишем интеграл силы P_D в виде (см. рис.3.17)

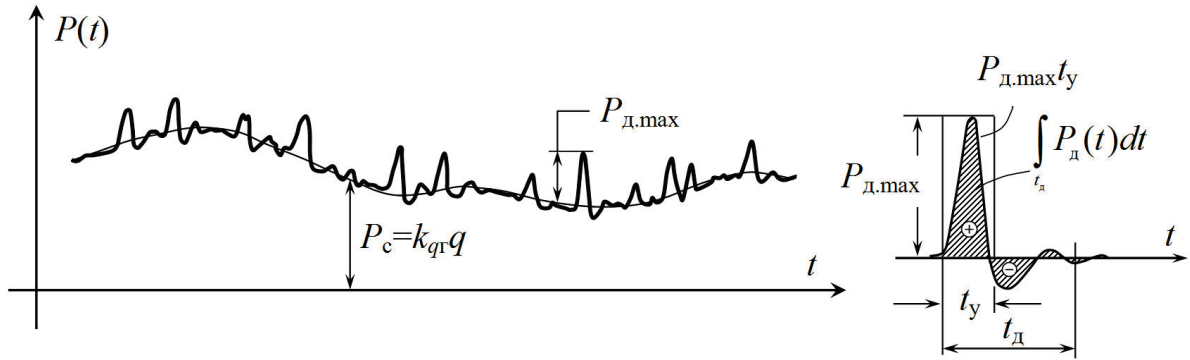


Рисунок 3.17 – Сигнал ДВ, содержащий динамическую (от ударов) составляющую

$$\int_{\mathfrak{T}} P_d(t) dt = \mathfrak{N}_{y,\mathfrak{T}} \chi_1 P_d t_y, \quad (3.79)$$

где $\mathfrak{N}_{y,\mathfrak{T}}$ – количество ударов, приходящихся на весоизмерительный ролик за время взвешивания T ; χ_1 – коэффициент, учитывающий форму импульса $P_d(t)$; для одиночного импульса

$$\chi_1 = \frac{\int_{t_d} P_d(t) dt}{P_{d,\max} t_y}, \quad (3.80)$$

причем интеграл берется за время t_d , в течение которого сигнал отличается от статического.

Увеличение интегральной суммы за счет ударов определится как

$$k_{yy} = 1 + \frac{\int_{\mathfrak{T}} P_d(t) dt}{\int_{\mathfrak{T}} P_c(t) dt} = 1 + \frac{\mathfrak{N}_{y,\mathfrak{T}} \chi_1 P_d t_y}{P_{cp} \mathfrak{T}}. \quad (3.81)$$

Если обозначить $n_y = \mathfrak{N}_{y,\mathfrak{T}} / \mathfrak{T}$ – количество ударов в единицу времени (среднее значение) и учесть (3.70), то

$$k_{yy} = 1 + \frac{t_y \chi_1 (K_d - 1) n_y m_k g}{P_{cp}}. \quad (3.82)$$

Так как $n_y m_k \mathfrak{T}$ равно массе перемещенных кусков \mathfrak{M}_k а $(P_{cp} / g) \mathfrak{T}$ равно массе перемещенного груза \mathfrak{M} , то, обозначив

$$\xi = \frac{\mathfrak{M}_k}{\mathfrak{M}}, \quad (3.83)$$

запишем

$$k_{yy} = 1 + t_y \chi_1 (K_d - 1) \xi . \quad (3.84)$$

Следовательно, относительное увеличение интегральной суммы, вызванное ударами, составит

$$\delta_{д.у} = t \chi_1 (K_d - 1) \xi . \quad (3.85)$$

Точно определить увеличение интегральной суммы невозможно ввиду некоторой неопределенности входящих в формулу (3.85) величин. Если считать $t_y = 0,08 \dots 0,12$ с [126] и $\chi = 0,3 \dots 0,4$, то для жестких роликоопор (K_d – кривая 2 на рис. 3.15) зависимость $\delta_{д.у}$ от скорости v будет иметь вид, показанный на рис. 3.18.

Если градуировку конвейерных весов производить методом перевешивания груза, пропущенного через весы, то погрешность взвешивания определится как

$$\delta \mathcal{M}_{д.у} = \bar{\delta}_{д.у} - \bar{\delta}_{д.у.град} , \quad (3.86)$$

где $\bar{\delta}_{д.у}$ и $\bar{\delta}_{д.у.град}$ – относительное увеличение интегральной суммы (среднее значение), вызванное ударами при работе и при градуировке соответственно.

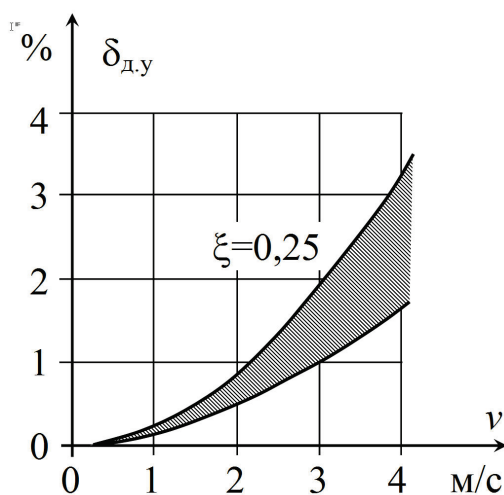


Рисунок 3.18 – Увеличение интегральной суммы при $t_y = 0,08 \dots 0,12$ с и $\chi = 0,3 \dots 0,4$

Если учесть, что $\delta \mathcal{M}_{д.у}$ будет существенно меньше, чем $\delta_{д.у}$, то на основании изложенного можно сделать следующий вывод: в весах класса 1,0 при скорости до 2...2,5 м/с и в весах класса 0,5 при скорости до 1,5...2 м/с нет необходимости принимать специальные меры для уменьшения динамической погреш-

ности, если масса кусков не превышает 25...30% в общей массе транспортируемого материала.

Для уменьшения динамической погрешности, вызванной ударами кусков материала о ролики, можно рекомендовать использование многороликового ГУ с податливыми роликоопорами конструкции ИГТМ АН Украины (кроме крайних) и уменьшенным расстоянием между ними, а также между крайними роликоопорами ГУ и ближайшими к нему роликоопорами за пределами весоизмерительного участка (рис. 2.6 сх. 21). Уменьшение погрешности объясняется значительно меньшей (в 2...2,5 раза) силой удара о податливые роликоопоры, чем о жесткие [47, 222, 227] (рис. 3.15).

Кроме того, как показали экспериментальные исследования [227] крупнокусовый груз, проходя через податливые роликоопоры, ведет себя спокойно и не подпрыгивает даже при скорости 3,5 м/с.

При крупнокусовом грузе и высокоскоростном конвейере следует применять безроликовые ГУ (рис. 2.6 сх. 22...26).

Если в весах реализован принцип суммирования, то существует определенная вероятность изменения сигнала датчиков в момент удара. При этом математическое ожидание результата измерения будет определяться как

$$M[P_{\text{изм}}] = P_{\text{ст.ср}} + M[\chi_2 P_{\text{д.мах}}] \frac{2t_y}{T_{\text{и.у.ср}}}, \quad (3.87)$$

где $P_{\text{ст.ср}}$ – среднее (за время взвешивания) значение статической силы; $T_{\text{и.у.ср}}$ – средний интервал времени между ударами (рис. 3.19); χ_2 – коэффициент, учитывающий форму импульса, –

$$\chi_2 = \frac{P_{\text{д.ср}} 2t_y}{P_{\text{д.мах}}} = \frac{1}{2t_y} \int_{2t_y} P_{\text{д}}(t) dt \cdot P_{\text{д.мах}}. \quad (3.88)$$

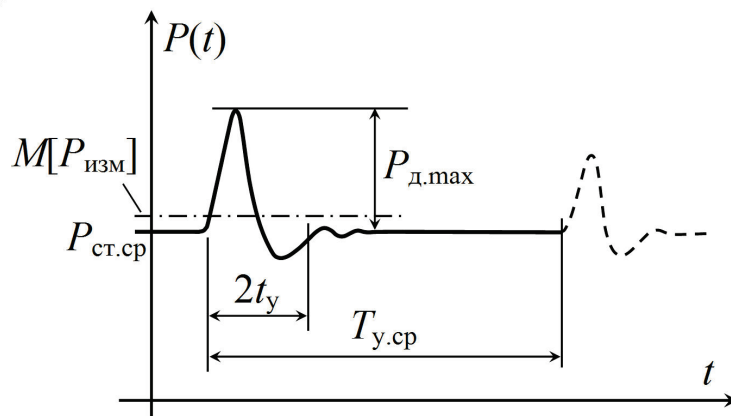


Рисунок 3.19 – К определению $M[P_{\text{изм}}]$

Увеличение суммы результатов измерения, вызванное ударами, –

$$k_{yy} = 1 + \frac{M[\chi_2 P_{д.маx}]}{P_{ст.ср}} \cdot \frac{2t_y}{T_{иу.ср}}. \quad (3.89)$$

Относительное увеличение суммы

$$\delta_{д.у} = \frac{M[\chi_2 P_{д.маx}]}{P_{ст.ср}} \cdot \frac{2t_y}{T_{иу.ср}} = \frac{\bar{\chi}_2 (k_d - 1) m_r g n_y}{P_{ст.ср}} 2t_y = 2t_y \bar{\chi}_2 (k_d - 1) \xi. \quad (3.90)$$

Если учесть, что $\bar{\chi}_2 = 0,5\bar{\chi}_1$, то, сравнивая (3.90) и (3.85) можно видеть, что $\delta_{д.у}$ одинаковы для интегрирующих и суммирующих весов.

Дополнительной мерой уменьшения погрешности (ускорения приближения к среднему) является включение фильтра низкой частоты перед преобразователем аналог-код.

Дисперсия погрешности, вызванной ударами, может быть приближенно вычислена по формуле

$$\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_{д.у}] \approx 0,25(\varphi \delta_{д.у})^2, \quad (3.91)$$

где φ – коэффициент, показывающий, какую часть от $\delta_{д.у}$ составляет погрешность $\delta \mathcal{M}_{д.у}$. Можно считать, что $\varphi = 0,15 \dots 0,3$, если $\xi = 0,1 \dots 0,4$, размеры кусков $d_k = 150 \dots 300$ мм, а градуировка весов производится методом перевешивания. Бóльшие значения φ соответствуют бóльшим ξ и d_k .

3.4.3. Погрешность, вызванная боковым сходом ленты

При движении ленты в поперечном направлении могут возникать погрешности, вызванные двумя группами сил: силами трения ленты о ролики и силами инерции при неравномерном движении материала.

При боковом перемещении возникают силы трения (см. рис. 3.20)

$$P'_{тр} = P'_N k_{тр} \quad \text{и} \quad P''_{тр} = P''_N k_{тр}, \quad (3.92)$$

где $P'_N = P'_Z / \cos \alpha$, $P''_N = P''_Z / \cos \alpha$ – нормальные силы, действующие на левый и правый боковые ролики; $k_{тр}$ – коэффициент трения; направление силы трения совпадает с направлением скорости бокового схода $v_{БС}$.

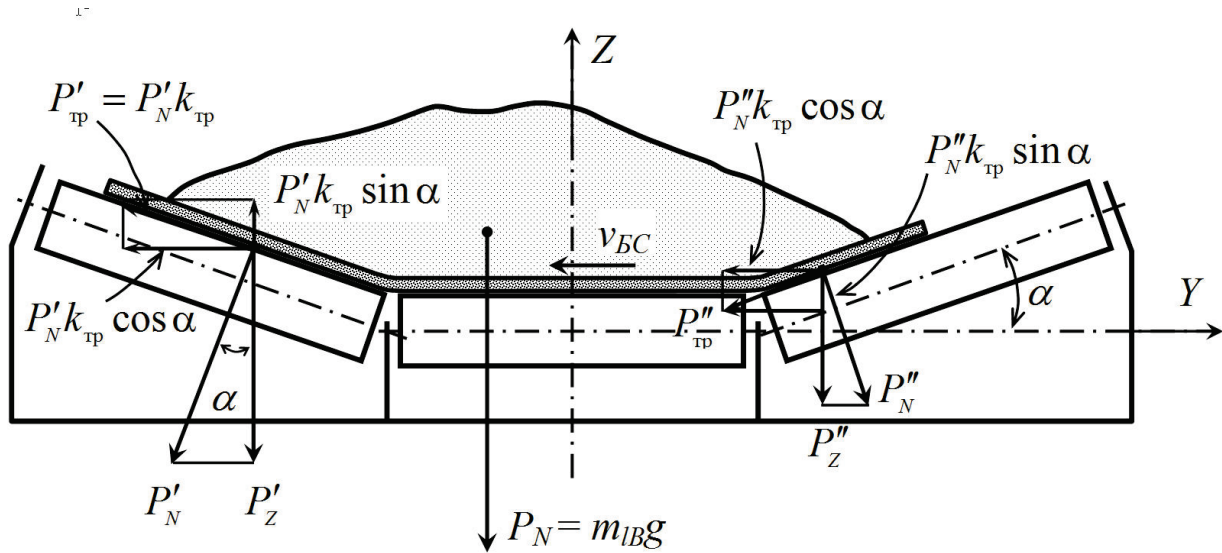


Рисунок 3.20 – Силы трения и их составляющие, действующие на роlikоопоры при боковом сходе ленты

Боковые составляющие этих сил ($P'_N = P'_Z k_{тр} \cos \alpha$ и $P''_N = P''_Z k_{тр} \cos \alpha$) создают только осевую и дополнительные радиальные силы в опорах. Составляющие $P'_N k_{тр} \sin \alpha$ и $P''_N k_{тр} \sin \alpha$ создают момент, уравновешиваемый моментом реакций в опорах, а сила, равная их разности,

$$P_{тр.Z}(t) = (P'_N - P''_N) k_{тр} \sin \alpha = \text{sign}(v_{BC})(\gamma' - \gamma'') m_{лв}(t) g k_{тр} \text{tg} \alpha, \quad (3.93)$$

направлена вдоль оси Z и действует на ДВ, создавая динамическую помеху.

В формуле (3.93) $\gamma' = P'_Z / (m_{лв} g)$ и $\gamma'' = P''_Z / (m_{лв} g)$ коэффициенты, показывающие, какая часть массы $m_{лв}$, находящейся на весоизмерительном участке, приходится на каждый боковой ролик; знак ($\text{sign}(v_{BC})$) определяется направлением v_{BC} .

При работе конвейера значения γ' и γ'' , а также направление скорости v_{BC} непрерывно изменяются, а среднее значение силы $P_{тр.Z}$ величина которой обычно не превышает 1% от P_N , быстро приближается к своему математическому ожиданию, равному нулю, –

$$\bar{P}_{тр.Z} = \frac{1}{T} \int_T \text{sign}(v_{BC})(\gamma'(t) - \gamma''(t)) m_{лв}(t) g k_{тр} \text{tg} \alpha \rightarrow M[P_{тр.Z}] = 0. \quad (3.94)$$

Так как движение ленты и груза в боковом направлении неравномерно, то возникают силы инерции. Горизонтальная составляющая (см. рис. 3.21) определяется как

$$P_{и.бс.г} = \int_V \rho a_{бс}(t) \cos \alpha_a dV + \int_V \rho \frac{v_{бс}^2}{r} \sin \delta dV = P_{и.бс.г}^T + P_{и.бс.г}^N, \quad (3.95)$$

где $a_{\text{БС}}(t) = dv_{\text{БС}}/dt$ – ускорение бокового схода; α_a – угол между осью Y и вектором $\bar{a}_{\text{БС}}$; ρ – плотность материала (груза, ленты); V – объем груза и ленты в пределах весоизмерительного участка; δ – угол между радиусом кривизны r и осью Z .

Первое слагаемое – составляющая, обусловленная тангенциальным ускорением бокового схода, а второе слагаемое – составляющая, вызванная нормальным ускорением при криволинейном движении. Сила $P_{\text{и.бс.г}}$ уравновешивается реакциями опор и не создает сигнала помехи.

Вертикальная составляющая сил инерции

$$P_{\text{и.бс.в}} = P_{\text{и.бс.в}}^T + P_{\text{и.бс.в}}^N = \int_V \rho a_{\text{БС}}(t) \sin \alpha_a dV + \int_V \rho \frac{v_{\text{БС}}^2}{r} \cos \delta dV. \quad (3.96)$$

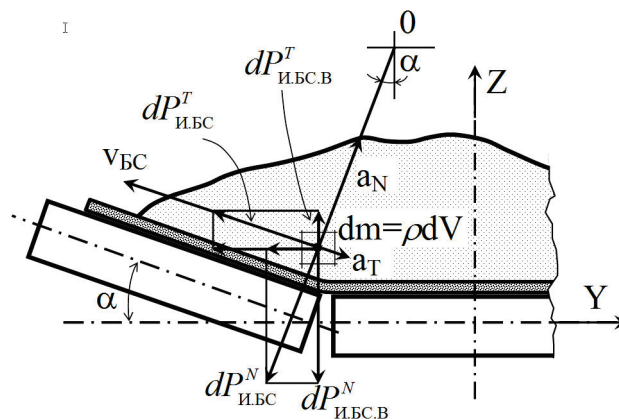


Рисунок 3.21 – Силы инерции и их составляющие, действующие на роlikоопору при боковом сходе

Тангенциальная составляющая ($P_{\text{и.бс.в}}^T$) силы $P_{\text{и.бс.г}}$ относительно невелика, т.к. большая часть массы при боковом сходе движется горизонтально ($\alpha_a = 0$), а силы инерции от масс, движущихся над боковыми роликами, направлены в разные стороны и в значительной мере компенсируют друг друга. Кроме того, во время работы конвейера тангенциальное ускорение, а значит и силы $P_{\text{и.бс.в}}^T$ все время меняют знак, так что среднее значение этих сил быстро стремится к нулю.

Составляющая

$$P_{\text{и.бс.в}}^N = \int_V \rho \frac{v_{\text{БС}}^2}{r} \cos \delta dV, \quad (3.97)$$

соответствующая второму слагаемому, всегда направлена вниз и нагружает ДВ, вызывая погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{БС}}$. Ввиду неопределенности статистических характеристик величин, входящих в (3.97), ни силу $P_{\text{и.бс.в}}^N$, ни, тем более, погрешность

$\delta \mathcal{M}_{\text{BC}}$ точно определить невозможно. Для оценки возможной величины силы $P_{\text{и.б.с.в}}^N$ будем считать, что в криволинейном движении при боковом сходе находится до 10...15% массы груза, находящегося на весоизмерительном участке. Будем также считать, что угол δ находится в пределах $\pm 10...15\%$, а $r = 0,5...1$ м. Для этих условий относительное значение силы $P_{\text{и.б.с.в}}^N$ зависит от скорости бокового схода как показано на рис. 3.22.

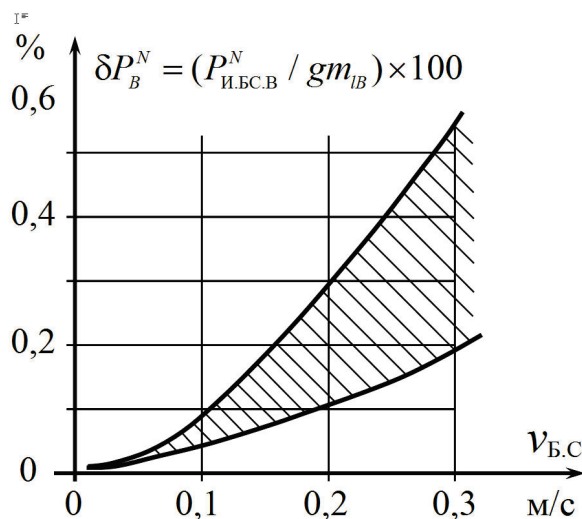


Рисунок 3.22 – Относительное значение вертикальной составляющей силы, вызванное нормальным ускорением

Погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{BC}}$ существенно меньше, чем $\delta P_{\text{в}}^N$ и определяется как

$$\delta \mathcal{M}_{\text{BC}} = \frac{\delta \bar{P}_{\text{в}}^N + \delta \bar{P}_{\text{в.град}}^N}{\bar{q}_{\text{г}}^*}. \quad (3.98)$$

Следовательно, при $v_{\text{BC}} < (0,1...0,2)$ м/с динамическая погрешность взвешивания, вызванная боковым сходом, незначительна. Так как скорость бокового схода пропорциональна скорости ленты вдоль оси X [222] и обычно не превышает $0,1v$, то можно не учитывать эту погрешность при проектировании весов класса 0,5 и менее точных.

3.4.4. Влияние колебаний ленты и ГУ

Провисание ленты между роликоопорами и их эксцентриситет, а еще в большей мере неравномерность нагрузки, боковой сход и удары кусков при прохождении через ролики приводят к колебаниям ленты с грузом и ГУ, что вызывает стохастические изменения длины весоизмерительного участка ($l_{\text{в}}$) и дополнительную динамическую нагрузку на грузоприемное устройство. Амплитуда колебаний, дополнительная нагрузка и вызванная этими факторами динамическая погрешность прогрессивно возрастают с увеличением скорости.

В работах [16, 17, 40, 54] дан качественный и количественный анализ колебаний механической системы «лента – ГУ – силоизмерительные датчики» и их влияние на точность измерения массы. Разработана методика расчета параметров ГУ, обеспечивающих минимизацию влияния на точность измерения динамики транспортируемого материала и колебаний ГУ. В частности, даются рекомендации по выбору расстояния между роликоопорами в зависимости от скорости к производительности конвейера. При малом расчетном расстоянии рекомендуется применять безроликное ГУ. Показано, что при минимизации колебаний вызванная ими погрешность может быть пренебрежимо мала.

3.5. Погрешность от изменения среднего значения погонной массы ленты

Изменение погонной массы ленты, как видно из (3.29) и (3.37), приводит к изменению функции преобразования ГУ и возникновению погрешности δM_{ql} . Изменение погонной массы ленты может возникать в результате налипания на ленту мелких частиц транспортируемого материала. Изменение q_l , вызванное изменением натяжения и температуры, незначительно и может не приниматься во внимание.

Радикальной мерой является взвешивание не только рабочей, но и холостой ветви ленты, что рекомендуется некоторыми авторами [40, 45, 51, 221]. Такие ГУ показаны на рис. 2.6, сх 6,7. Если это не предусмотрено, то возникает погрешность

$$\delta M_{ql} = \frac{\bar{q}_l^* - \bar{q}_{л.гар}^*}{\bar{q}_r^*}. \quad (3.99)$$

3.6. Погрешность от изменения коэффициента сопротивления $w_{гу}$ роликов ГУ¹

Статическая характеристика измерительного преобразователя массы должна определяться уравнением

$$V = V_0 + k_{mV} m_r, \quad (3.100)$$

где V – электрический сигнал на выходе преобразователя; V_0 – его значение при ненагруженной ленте; k_{mV} – коэффициент пропорциональности; m_r – масса груза на весоизмерительном участке.

Необходимым условием получения такой зависимости является линейность датчика веса и ГУ, то есть

¹ Ранее эта погрешность для горизонтального конвейера рассматривалась в работах [33, 34]. Была получена формула, аналогичная (3.109), но с коэффициентом 2, что ошибочно.

$$P_B = P_{B0} + k_{mP} m_r, \quad (3.101)$$

$$V = V_{\min} + k_{PV} P_B, \quad (3.102)$$

где P_B – сила, действующая на ДВ; P_{B0} – ее значение при $m_r = 0$; V_{\min} – значение сигнала ДВ при $P_B = 0$; k_{mP} и k_{PV} – коэффициенты преобразования.

Для однороликового ГУ (см. рис. 2.1) согласно (2.9) (см. также (3.29) и (3.31))

$$P_{B0} = g \left[m_{ry} \frac{a_1}{a_2} + m_P w_{ry} \frac{a_4}{a_2} + \frac{a_3 + w_{ry} a_4}{a_2} q_{л} l_B \cos \beta \right], \quad (3.103)$$

$$k_{mP} = g \frac{a_3 + w_{ry} a_4}{a_2} l_B \cos \beta. \quad (3.104)$$

При изменении величины w_{ry} по сравнению с тем, которое было при градуировке ($w_{ry, \text{град}}$), возникает погрешность $\delta \mathfrak{M}_{w_{ry}}$.

Настройкой нуля весов исключается сигнал, пропорциональный среднему значению начальной силы ($\bar{P}_{B0.T}$), действующей на датчик веса. Если коэффициент сопротивления w_{ry} изменяется, то возникает дополнительная сила ΔP_{B0} , сигнал от которой в приборе не компенсируется, –

$$\Delta \bar{P}_{B0} = \bar{P}_{B0} - P_{B0.T} = g \frac{a_4}{a_2} (m_P + q_{л} l_B \cos \beta) (w_{ry} - w_{ry, \text{град}}). \quad (3.105)$$

Сигнал, пропорциональный этой силе, интегрируется, в результате чего при взвешивании вместо величины (см. 2.11)

$$A = kg \frac{a_3 + w_{ry, \text{град}} a_4}{a_2} l_B \cos \beta \cdot \mathfrak{M} \quad (3.106)$$

будет зарегистрирована величина

$$A' = kg \frac{a_3 + w_{ry} a_4}{a_2} l_B \cos \beta \cdot \mathfrak{M} + k \Delta \bar{P}_{B0} \bar{v} \mathfrak{T}. \quad (3.107)$$

Возникающая погрешность вычисляется по формуле

$$\delta \mathfrak{M}_{w.гy} = \frac{A' - A}{A}. \quad (3.108)$$

После подстановки сюда A (3.106), A' (3.107), замены $\mathfrak{M} = \bar{q}_r v \mathfrak{L}$, $m_p / l_B = q_p$, преобразований и перехода к относительным величинам, получим¹

$$\delta \mathfrak{M}_{w.гy} = \frac{a_4}{a_3} (w_{гy} - w_{гy.град}) \left(1 + \frac{q_{л}^* + \frac{q_p^*}{\cos \beta}}{\bar{q}_r^*} \right). \quad (3.109)$$

Для конвейеров с желобчатой лентой плечо a_4 измеряется не до верхней образующей ролика (как на рис. 2.1), а до равнодействующей сил сопротивления трех роликов роlikоопоры. Эта линия лежит выше нижнего края желоба ленты на величину $(0,15 \dots 0,16)h_{ж}$ где $h_{ж}$ – высота желоба ленты.

Погрешность $\delta \mathfrak{M}_{w.гy}$ может достигать значительной величины. При $\Delta w_{гy} = 0,01$ $\delta \mathfrak{M}_{w.гy} = 0,2 \dots 0,6\%$.

Для уменьшения погрешности $\delta \mathfrak{M}_{w.гy}$ необходимо уменьшать плечо a_4 и увеличивать a_3 , что решается рациональным конструированием ГУ, а также обеспечить тщательное наблюдение и уход за роликами грузоприемного устройства.

В многороликовых ГУ, опирающихся на четыре датчика веса, эта погрешность исключается, так как момент силы $P_{w.гy}$ уравнивается парой сил, нагружающих одни датчики и на столько же разгружающих другие.

Особое внимание должно быть уделено уменьшению погрешности $\delta \mathfrak{M}_{w.гy}$ при использовании безроликовых ГУ (рис. 2.6 сх.22...26), где сила трения $P_{w.гy}$, весьма значительна. Только ГУ по схемам 25 и 26 не вносят погрешности $\delta \mathfrak{M}_{w.гy}$.

3.7. Погрешность от изменения начальной нагрузки на датчик веса

Изменение начальной нагрузки (P_{B0}) на датчик веса может быть вызвано смещением противовеса, попаданием материала на грузоприемное устройство и т.д. Изменение начальной нагрузки приводит к изменению начального значения сигнала (по сравнению с тем, при котором производилась градуировка) на величину

$$\Delta V_0 = k_{PV} \Delta P_{B0}. \quad (3.110)$$

При этом возникает погрешность

$$\delta \mathfrak{M}_{P0} = \delta P_{B0} / \bar{q}_r^*, \quad (3.111)$$

¹ В окончательной формуле записано a_3 вместо $a_3 + w_{гy.град}a_4$, так как $w_{гy.град}a_4 \ll a_3$.

где δP_{B0} – относительное изменение начальной нагрузки на датчик веса, –

$$\delta P_{B0} = \frac{\Delta P_{B0}}{\Delta P_{B.M}} = \frac{\Delta P_{B0}}{q_{гм} l_B}. \quad (3.112)$$

Дисперсия погрешности $\delta \mathfrak{M}_{P0}$ вычисляется по формуле

$$\mathfrak{D}[\delta \mathfrak{M}_{P0}] = \left(\frac{|\delta P_{B0}|_{\max}}{2\bar{q}_r^*} \right)^2, \quad (3.113)$$

где $|\delta P_{B0}|_{\max}$ – наибольшее возможное относительное отклонение, за пределы которого с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ не выйдет отклонение δP_{B0} в течение времени между тарированием весов. Величина $|\delta P_{B0}|_{\max}$ определяется по результатам длительных наблюдений за начальным значением сигнала датчика веса (V_{B0} , ΔV_{B0}) и поэтому включает в себя отклонение минимального сигнала датчика веса δV_{\min} (см. рис. 4.2). Располагая данными о дрейфе начального сигнала ДВ (δV_0 , $|\delta V_0|_{\max}$) можно вычислять погрешность и дисперсию по формулам

$$\delta \mathfrak{M}_{V0} = \frac{\delta V_0}{\bar{q}_r^*}, \quad (3.114)$$

$$\mathfrak{D}[\delta \mathfrak{M}_{V0}] = \left(\frac{|\delta V_0|_{\max}}{2\bar{q}_r^*} \right)^2. \quad (3.115)$$

3.8. Погрешность от изменения передаточного отношения рычажной системы

Если сила, действующая на ролики ГУ, передается на ДВ через систему рычагов, то должно быть обеспечено постоянство передаточного коэффициента рычажной системы $k_{PC.N}$. Следует иметь в виду, что на опорные узлы действуют не только нормальные, но и значительные боковые силы, которые могут вызывать увеличение момента трения в опорах и изменение величины k_{PC} . При этом, как следует из (3.29) или (3.37), возникает погрешность

$$\delta \mathfrak{M}_{PC} = \frac{\delta k_{PC.N}}{\bar{q}_r^*}, \quad (3.116)$$

где $\delta k_{PC.N}$ – относительное приведенное изменение коэффициента $k_{PC.N}$ по сравнению со значением, которое было при градуировке.

3.9. Погрешность, вызванная нелинейностью характеристики датчика веса

Характеристика $V(P)$ используемого в весах силоизмерительного датчика должна быть линейна. Этому требованию удовлетворяют тензорезисторные, а также некоторые частотные датчики (например, ЛХ-146), нелинейность характеристики которых обычно не превышает нескольких сотых долей процента. При использовании принципиально нелинейных вибрационно-частотных датчиков (например, 1890 ПСВ или 1909 ПСВ) их сигнал должен быть преобразован специальным блоком линеаризации.

Остаточная нелинейность приводит к погрешности, которая при равномерной нагрузке может быть вычислена по формуле

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{нл}} = \frac{P_{\text{В.м}}}{P_{\Gamma}} \delta V_{\text{нл}}, \quad (3.117)$$

где $P_{\text{В.м}}$ – максимальная нагрузка датчика веса; P_{Γ} – сила, действующая на ДВ от груза на участке $l_{\text{В}}$; $\delta V_{\text{нл}}$ – относительное отклонение сигнала от того, который был бы при линейной характеристике, –

$$\delta V_{\text{нл}} = \frac{V - V_{\text{л.град}}}{\Delta V_{\text{В.м}}}. \quad (3.118)$$

В этой формуле V – действительный сигнал ДВ, вызванный силой P_{Γ} ; $V_{\text{л.град}}$ – сигнал датчика веса, соответствующий линейной градуировочной характеристике; $\Delta V_{\text{В.м}}$ – девиация сигнала ДВ.

При переменной нагрузке погрешность нелинейности определяется как

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{нл}} = \frac{P_{\text{В.м}}^*}{P_{\Gamma}^*} \int_0^{\infty} \delta V_{\text{нл}}(P_{\Gamma}^*) \varphi(P_{\Gamma}^*) dP_{\Gamma}^*, \quad (3.119)$$

где $P_{\text{В.м}}^* = P_{\text{В.м}} / P_{\text{ГМ}}$ – относительная максимальная нагрузка ДВ; $\bar{P}_{\Gamma}^* = \bar{P}_{\Gamma} / P_{\text{Г.м}}$ – среднее в относительных единицах значение P_{Γ} ; $\varphi(P_{\Gamma}^*)$ – плотность распределения нагрузок за время взвешивания.

При использовании существующих датчиков и методов линеаризации погрешность $\delta \mathfrak{M}_{\text{нл}}$ незначительна [169].

3.10. Погрешность от нестабильности минимального значения сигнала и коэффициента преобразования датчика веса

В результате временного дрейфа минимального сигнала датчика веса V_{\min} изменяется начальный сигнал V_0 и возникает погрешность

$$\delta \mathfrak{M}_{V_{\min}} = \delta V_{\min} / \bar{q}_r^*, \quad (3.120)$$

где $\delta V_{\min} = \Delta V_{\min} / \Delta V_{r.m}$ – относительное отклонение минимального значения сигнала ДВ от того, которое было при тарировании весов; $\Delta V_{r.m}$ – девиация сигнала, вызванная максимальной нагрузкой на ленте конвейера.

Дисперсия $\mathfrak{D}[\delta \mathfrak{M}_{V_{\min}}]$ рассматриваемой погрешности определяется по формуле

$$\mathfrak{D}[\delta \mathfrak{M}_{V_{\min}}] = \left(\frac{|\delta V_{\min}|_{\max}}{2\bar{q}_r^*} \right)^2, \quad (3.121)$$

где $|\delta V_{\min}|_{\max}$ – наибольшее возможное отклонение, за пределы которого с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ не выйдет отклонение δV_{\min} . Величина $|\delta V_{\min}|_{\max}$ определяется по результатам обработки статистических данных, полученных в результате длительного наблюдения за работой партии датчиков веса. Значение $|\delta V_{\min}|_{\max}$ является функцией времени, прошедшего с момента тарирования весов и, конечно, зависит от типа (конструкции) датчика веса. Например, для датчиков ЛХ–146 минимальная частота с вероятностью 0,95 изменится за сутки не более, чем на 0,1%, а через неделю значение $|\delta V_{\min}|_{\max}$ может составить 0,2%.

Изменение коэффициента преобразования (наклона характеристики) датчика веса вызывает погрешность

$$\delta \mathfrak{M}_k = \frac{k_{PV} - k_{PV.град}}{k_{PV.град}} = \delta k_{PV}, \quad (3.122)$$

где $k_{PV.град}$ – коэффициент преобразования, при котором производилась градуировка весов; k_{PV} – новое значение этого коэффициента. Дисперсия погрешности $\delta \mathfrak{M}_k$ вычисляется по формуле

$$\mathfrak{D}[\delta \mathfrak{M}_k] = 0,25 |\delta k_{PV}|_{\max}^2, \quad (3.123)$$

где $|\delta k_{PV}|_{\max}$ – наибольшее (с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$) относительное отклонение коэффициента δk_{PV} , определяемое за интервал времени между градуировками весов.

3.11. Дополнительная погрешность от изменения температуры

При изменении температуры может изменяться как начальное значение сигнала, так и коэффициент преобразования, что приводит к возникновению погрешностей, рассмотренных в разд. 3.10.

Если известен температурный коэффициент изменения начальной частоты $k_{V_0.T}$ и температурный коэффициент изменения девиации сигнала $k_{\Delta V.T}$, то температурная погрешность взвешивания

$$\delta \mathfrak{M}_T = \left(\frac{k_{V_0.T}}{\bar{q}_r^*} + k_{\Delta V.T} \right) \frac{\Delta t}{\Delta V_{B.M}}, \quad (3.124)$$

где $\Delta t = t^\circ - t_{\text{град}}^\circ$ – отклонение температуры от той, при которой производилась градуировка весов,

$\Delta V_{B.M}$ – максимальная девиация сигнала датчика веса.

Если датчик веса чувствителен к изменению влажности или к вибрациям, то соответствующие дополнительные погрешности могут быть найдены по формулам, аналогичным (3.124).

3.12. Погрешности измерительного преобразователя скорости (перемещения)

Для нормальной работы интегрирующих весов необходимо, чтобы датчик скорости вращался со скоростью (ω), пропорциональной скорости V_r движения груза. В действительности эта зависимость сложнее и может быть описана как

$$\omega = \frac{v_l}{r+a} = \frac{v_r - \Delta v_{rl} - \Delta v_{ll}}{r+a}. \quad (3.125)$$

Здесь V_l – скорость ленты (в месте установки датчика скорости); $\Delta v_{rl} = v_r - v_l$ – скорость груза относительно ленты (в месте установки весов); Δv_{ll} – разность скоростей ленты в местах установки датчика веса и датчика скорости; a – расстояние от поверхности ролика до нейтрального слоя ленты [33, 96].

Найдем погрешность, вызванную отсутствием строгой пропорциональности между ω и v_r .

Измерительный прибор весов регистрирует величину

$$A = k \int_{\mathfrak{T}} q_r(t) \omega(t) dt \quad (3.126)$$

или, после подстановки (3.125), –

$$A = k \int_{\mathfrak{Z}} q_r(t) \frac{v_r(t) - \Delta v_{\text{гл}}(t) - \Delta v_{\text{лл}}(t)}{r + a(t)} dt. \quad (3.127)$$

Обозначим случайную функцию времени, стоящую под знаком интеграла, $X(t)$, то есть

$$X(t) = q_r(t) \frac{v_r(t) - \Delta v_{\text{гл}}(t) - \Delta v_{\text{лл}}(t)}{r + a(t)}. \quad (3.128)$$

Тогда

$$A = k \int_{\mathfrak{Z}} X(t) dt = k \mathfrak{Z} \bar{X}. \quad (3.129)$$

Если считать, что переменные, входящие в (3.128), независимы, то можно записать¹

$$X = \bar{q}_r \frac{\bar{v}_r - \Delta \bar{v}_{\text{гл}} - \Delta \bar{v}_{\text{лл}}}{r + \bar{a}}. \quad (3.130)$$

При этом, с учетом того, что $\bar{q}_r \bar{v}_r \mathfrak{Z} = \mathfrak{M}$,

$$A = \frac{k}{r + \bar{a}} \left(1 - \frac{\Delta \bar{v}_{\text{гл}}}{\bar{v}_{\text{гл}}} - \frac{\Delta \bar{v}_{\text{лл}}}{\bar{v}_{\text{лл}}} \right) \mathfrak{M} = C_{\mathfrak{M}} \mathfrak{M}. \quad (3.131)$$

Коэффициент пропорциональности

$$C_{\mathfrak{M}} = \frac{k}{r + \bar{a}} \left(1 - \frac{\Delta \bar{v}_{\text{гл}}}{\bar{v}_{\text{гл}}} - \frac{\Delta \bar{v}_{\text{лл}}}{\bar{v}_{\text{лл}}} \right) \quad (3.132)$$

будет постоянным лишь в том случае, если при градуировке и последующих взвешиваниях будут иметь одинаковые значения \bar{a} и $\bar{a}_{\text{град}}$, $\Delta \bar{v}_{\text{гл}}$ и $\Delta \bar{v}_{\text{гл.град}}$, $\Delta \bar{v}_{\text{лл}}$ и $\Delta \bar{v}_{\text{лл.град}}$. В противном случае возникает погрешность $\delta \mathfrak{M}_C$ определяемая по формуле

¹ Выполняемое преобразование не вполне корректно. Во-первых, при коротком конвейере и равномерной нагрузке должна наблюдаться корреляционная связь между погонной массой q_r и скоростью V_r . И, во-вторых, запись (3.130) справедлива для математических ожиданий, а на средние значения может быть распространена, если они мало отличаются от математических ожиданий, в данном случае – при достаточно длительном взвешивании.

$$\delta \mathfrak{M}_C = \frac{C_{\mathfrak{M}} - C_{\mathfrak{M}.град}}{C_{\mathfrak{M}.град}}. \quad (3.133)$$

Подставив сюда $C_{\mathfrak{M}}$ (3.132), $C_{\mathfrak{M}.град}$ (по той же формуле, но с заменой \bar{a} на $\bar{a}_{град}$, $\Delta \bar{v}_{гг}$ на $\Delta \bar{v}_{гг.град}$, $\Delta \bar{v}_{лл}$ на $\Delta \bar{v}_{лл.град}$), и, выполнив несложные преобразования, получим¹:

$$\begin{aligned} \delta \mathfrak{M}_C = & \left(\frac{r + \bar{a}_{град}}{r + \bar{a}} - 1 \right) + \left(\frac{\Delta \bar{v}_{гг.град}}{\bar{v}_{гг.град}} - \frac{\Delta \bar{v}_{гг}}{\bar{v}_{гг}} \cdot \frac{r + \bar{a}_{град}}{r + \bar{a}} \right) + \\ & + \left(\left(\frac{\Delta \bar{v}_{лл.град}}{\bar{v}_{гг.град}} - \frac{\Delta \bar{v}_{лл}}{\bar{v}_{гг}} \cdot \frac{r + \bar{a}_{град}}{r + \bar{a}} \right) \right). \end{aligned} \quad (3.134)$$

Обозначая

$$\frac{\Delta \bar{v}_{гг}}{\bar{v}_{гг}} = \delta \bar{v}_{гг}, \quad \frac{\Delta \bar{v}_{гг.град}}{\bar{v}_{гг.град}} = \delta \bar{v}_{гг.град}, \quad \frac{\Delta \bar{v}_{лл}}{\bar{v}_{гг}} = \delta \bar{v}_{лл}, \quad \frac{\Delta \bar{v}_{лл.град}}{\bar{v}_{гг.град}} = \delta \bar{v}_{лл.град}, \quad (3.135)$$

а также принимая во внимание, что $\Delta v \ll v_r$ и $a \ll r$, можно записать

$$\delta \mathfrak{M}_C = (\delta \bar{v}_{гг.град} - \delta \bar{v}_{гг}) + (\delta \bar{v}_{лл.град} - \delta \bar{v}_{лл}) + \frac{\bar{a}_{град} - \bar{a}}{r}. \quad (3.136)$$

Из этой формулы видно, что погрешность, вызванная неточностью преобразования $v_r \rightarrow \omega$, имеет три составляющие:

– погрешность, вызванную изменением эффективного диаметра ролика (смещением нейтрального слоя),

$$\delta \mathfrak{M}_d = \frac{\bar{a}_{град} - \bar{a}}{r} = \frac{\Delta \bar{a}}{r}; \quad (3.137)$$

– погрешность, вызванную изменением скорости смещения груза относительно ленты,

$$\delta \mathfrak{M}_{вт} = \delta \bar{v}_{гг.град} - \delta \bar{v}_{гг}; \quad (3.138)$$

– погрешность, вызванную изменением разности скорости ленты в местах установки датчика веса и датчика скорости,

¹ В знаменатель вместо $C_{\mathfrak{M}.град}$ подставлено $\bar{C}_{\mathfrak{M}.град} \approx k(r + \bar{a}_{град})$.

$$\delta \mathcal{M}_{\text{вл}} = \delta \bar{v}_{\text{лл.град}} - \delta \bar{v}_{\text{лл}}. \quad (3.139)$$

Рассмотрим каждую из этих погрешностей отдельно.

1. Погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{вл}}$.

Скорость движения груза относительно ленты зависит от ряда факторов, прежде всего – от угла наклона конвейера, скорости ленты и свойств транспортируемого материала.

По методике, разработанной автором, измерена относительная скорость смещения груза для нескольких конвейеров. В условиях проведенных опытов (насыпной и мелкокусковой груз, $v = 1,5 \dots 2$ м/с) она оказалась равной $0,04 \dots 0,07\%$. При скорости $3 \dots 3,5$ м/с и крупнокусковом грузе, когда наблюдается подпрыгивание кусков на жестких роликах, разность скоростей груза и ленты может составлять $0,5\%$ [227]. Разность в скоростях $\delta v_{\text{лл.и}} - \delta v_{\text{лл.ср}}$ для одного и того же конвейера не превышала $0,02\%$. Поскольку точность эксперимента также равна $\pm 0,02\%$, а также учитывая, что длительность взвешивания намного превышает длительность опыта, в котором определялась величина $\delta v_{\text{лл}}$, можно сделать вывод, что погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{вл}}$ определяемая по формуле (3.138), существенно меньше $0,05\%$.

2. Погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{вл}}$.

Эта погрешность возникает лишь в том случае, если датчик скорости установлен на холостой ветви конвейера. Известно [33], что скорость ленты в разных точках не одинакова. Если в месте установки датчика веса натяжение ленты равно S_B , а в месте установки датчика скорости – S_C , то относительная разность скоростей

$$\delta v_{\text{лл}} = \frac{S_B - S_C}{E \cdot F}, \quad (3.140)$$

где E – модуль упругости, F – площадь поперечного сечения ленты.

Для наклонных конвейеров эта величина может составлять 1% и более. Если средняя производительность конвейера при взвешивании существенно отличается от средней производительности при тарировании, то разница между средними значениями относительных отклонений скоростей, а значит и погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{вл}}$ может достигать нескольких десятых долей процента. Поэтому, для исключения погрешности $\delta \mathcal{M}_{\text{вл}}$ датчик скорости следует устанавливать на рабочей ветви конвейера недалеко от датчика веса.

3. Погрешность $\delta \mathcal{M}_d$.

По методике, разработанной автором, был проведен эксперимент по определению положения нейтрального слоя. По данным эксперимента $a = (0,05 \dots 0,12)\delta$, где δ – толщина ленты. Смещение нейтрального слоя ($\Delta \bar{a}$)

ником не определялось. Поэтому можно лишь предположительно говорить о величине погрешности $\delta\mathcal{M}_d$.

Если допустить, что $\Delta\bar{a}$ может составлять 1...2% от толщины ленты, то при отношении $\delta/d = 1/20$ погрешность

$$\delta\mathcal{M}_d = \frac{(1...2)10^{-2}\delta}{0,5d} = (0,1...0,2)\%.$$

Для уменьшения этой погрешности целесообразно увеличивать диаметр ролика датчика скорости (d) до конструктивно приемлемых размеров. Очевидно, что сопротивление вращению ролика должно быть незначительным, чтобы исключить не только проскальзывание ленты, но и упругое скольжение.

Экспериментальных данных, позволяющих достаточно точно определить дисперсию погрешности $\delta\mathcal{M}_d$, нет, поэтому, до получения таких данных, можно пользоваться следующей методикой. Принимая во внимание природу возникновения погрешности $\delta\mathcal{M}_d$, можно предположить, что закон распределения ее близок к нормальному. При этом дисперсия

$$\mathfrak{D}[\delta\mathcal{M}_d] = 0,25|\delta\mathcal{M}_d|_{\max}^2, \quad (3.141)$$

где $|\delta\mathcal{M}_d|_{\max}^2$ – наибольшее с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ значение погрешности $\delta\mathcal{M}_d$ в течение времени взвешивания.

Все рассмотренные составляющие – погрешности $\delta\mathcal{M}_c$ возникают и в суммирующих весах.

С целью исключения погрешностей $\delta\mathcal{M}_{\text{вл}}$ и $\delta\mathcal{M}_d$ предложено [220] наносить на ленту конвейера метки на расстоянии друг от друга, равном длине весоизмерительного участка. Метки считываются специальным устройством, которое генерирует импульсы, поступающие во вторичный прибор.

Что касается погрешности $\delta\mathcal{M}_{\text{ов}}$, вызванной неточностью преобразования скорости вращения ролика ДС в электрический сигнал, то она возникает лишь в том случае, если измерительный преобразователь скорости вырабатывает аналоговый сигнал. В этом случае погрешность $\delta\mathcal{M}_{\text{ов}}$ целиком определяется погрешностью тахогенератора. Импульсные датчики скорости и перемещения не вносят погрешности $\delta\mathcal{M}_{\text{ов}}$.

3.13. Погрешности вторичного прибора

Основное назначение вторичного прибора – преобразовать поступающие на его входы электрические сигналы от измерительных преобразователей массы и скорости таким образом, чтобы цифровой код на его индикаторе указывал массу перемещенного конвейером груза.

Погрешности вторичного прибора могут быть проанализированы и определены только для конкретных схем, поэтому и рассматриваются в последующих разделах. Здесь лишь отметим, что типичными источниками погрешностей являются неточность аналого-цифрового преобразования, дискретность обработки и представления информации, неточность перемножения сигналов, пропорциональных погонной массе и скорости, неточность интегрирования их произведения и др.

3.14. Погрешность тарирования и градуировки

3.14.1. Градуировка перевешиванием

Погрешность при градуировке методом перевешивания ($\delta M_{\text{град}}$) определяется тремя группами причин:

- неточностью определения действительной массы груза, пропущенного через конвейерные весы при градуировке;
- дисперсией показаний при взвешивании этого груза конвейерными весами;
- неточностью установки «нуля» и цены деления конвейерных весов.

Рассмотрим каждую группу отдельно.

1. Погрешность определения действительной массы груза может быть вызвана следующими причинами:

- неравенством масс груза, прошедшего через весы, и груза, погруженного в вагоны (автомобили) для взвешивания на эталонных весах; часть груза может остаться на конвейере, в бункере и т.п. или наоборот, груз, находившийся на конвейере или в бункере, мог не взвеситься на конвейерных весах, – погрешность $\delta M_{\Delta 1}$;

- изменением массы груза во время доставки его к весам (рассыпание, попадание в вагон атмосферной влаги), – погрешность $\delta M_{\Delta 2}$;

- неточностью взвешивания вагона с грузом на платформенных весах (обычно взвешивание производится на весах класса 0,1 или 0,2, а если взвешивание производится без расцепки вагонов, то может возникать дополнительная погрешность, вызванная влиянием сцепки), – погрешность $\delta M_{\text{эв.г}}$;

- неточностью взвешивания порожних вагонов, – погрешность $\delta M_{\text{эв.г}}$

Необходимо принять меры, исключая возникновение всех указанных погрешностей.

2. Погрешность взвешивания груза при градуировке должна быть учтена в связи с тем, что даже при одной и той же массе груза, прошедшего через весы, показания их могут быть различными, а отклонение от действительного значения определяется дисперсиями $\mathcal{D}[\delta M_{\text{гу}}]$, $\mathcal{D}[\delta M_{\text{дин}}]$, а также дисперсией погрешности вторичного прибора $\mathcal{D}[\delta M_{\text{п}}]$.

3. Погрешность установки, нуля δM_{y_0} и «цены» импульса $\delta M_{\text{уц}}$ вызывается дискретностью перестройки соответствующих блоков вторичного прибора.

Общая погрешность градуировки, как случайная величина, равна сумме составляющих погрешностей, а дисперсия погрешности градуировки –

$$\begin{aligned} \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{град}}] = & \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\Delta 1}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\Delta 2}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{эв.г}}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{эв.т}}] + \\ & + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{гу.град}}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{дин.град}}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{п.град}}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{y0}] + \mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{уц}}]. \end{aligned} \quad (3.142)$$

Дисперсиями остальных погрешностей при градуировке можно пренебречь.

3.14.2. Градуировка калиброванными гирями

Градуировка методом перевешивания требует значительных затрат труда, а на ряде предприятий из-за отсутствия специфических условий и необходимого оборудования вообще не может быть организована. Поэтому естественны попытки произвести градуировку гирями, калиброванными цепями и т.п. Разработаны различные методики [40, 179] и предложены устройства [6, 21, 189, 192], облегчающие этот процесс. При этом, однако, не учитывается то обстоятельство, что при градуировке гирями не создаются те условия, которые при работе нагруженного конвейера приводят к возникновению ряда погрешностей. В связи с этим соответствующие погрешности определяются не по разности их при работе и градуировке, а вносятся полной величиной. К таким погрешностям относятся:

- погрешность, вызванная ударами кусков груза, определяемая не по (3.86), а как

$$\delta\mathcal{M}_{\text{д.у}} = \bar{\delta}_{\text{д.у}}; \quad (3.143)$$

- погрешность, вызванная боковым сходом ленты, определяемая не по (3.98), а как

$$\delta\mathcal{M}_{\text{бс}} = \frac{\delta\bar{P}_{\text{В}}^N}{\bar{q}_{\text{Г}}^*}; \quad (3.144)$$

- погрешность измерительного преобразователя скорости, определяемая не по (3.136), а как

$$\delta\mathcal{M}_{\text{С}} = -(\delta\bar{v}_{\text{гп}} + \bar{\delta}v_{\text{м}} + \bar{a}); \quad (3.145)$$

- погрешность от изменения сопротивления вращению роликов на участке L ($\delta\mathcal{M}_{wL}$) и на грузоприемном устройстве ($\delta\mathcal{M}_{\text{гУ}}$).

Погрешности $\delta\mathcal{M}_{wL}$ и $\delta\mathcal{M}_{\text{гУ}}$ при градуировке весов гирями определяются по тем же формулам (3.52), (3.59) и (3.109), однако, входящие в них значения

$\Delta w = w - w_{\text{град}}$ существенно больше, чем при градуировке перевешиванием. Известно [159, 222, 226,], что сила и коэффициент сопротивления движению ленты имеет несколько составляющих: коэффициент деформирования (шевеления) груза $w_{\text{деф.г}}$, коэффициент деформирования ленты $w_{\text{деф.л}}$, вдавливания роликов в ленту $w_{\text{вд}}$, преодоления развала ленты $w_{\text{раз}}$, коэффициент сопротивления вращению роликов $w_{\text{вр}}$. При градуировке гирями коэффициент $w_{\text{деф.г}}$, доля которого в общем коэффициенте сопротивления составляет 30...40%, равен нулю. Остальные коэффициенты хотя и не равны нулю, но значительно меньше тех значений, которые будут при работе весов.

В целом дополнительная погрешность, вызванная рассмотренными причинами, может составить 0,2...1% и более.

Погрешность может быть еще больше, если линия действия веса гирь при градуировке не совпадает с линией действия веса груза при работе весов.

Если учесть еще приборные погрешности ($\delta M_{\text{п.град}}$, δM_{y0} , $\delta M_{\text{уц}}$), то станет очевидным, что градуировка гирями допустима только в том случае, если паспортная погрешность весов существенно больше 1%.

Для сокращения затрат труда на периодические поверки и градуировки можно рекомендовать следующую методику. Первоначально весы тщательно отградуировать методом перевешивания. Сразу же после градуировки на специальные крюки ГУ подвесить гири, подобранные таким образом, чтобы нагрузка на датчики веса приблизительно соответствовала наиболее характерной для данного конвейера. Заметить время и количество импульсов (точно), зафиксированное весами за один (по возможности точнее) или несколько целых обегов ленты ненагруженного конвейера. При последующих поверках пользоваться теми же гирями и контролировать время, соответствующее ранее замеченному числу импульсов. При необходимости производить градуировку, добиваясь того, чтобы указанное время не выходило за пределы, допустимые для весов данного класса.

3.15. Общая погрешность конвейерных весов

Общая погрешность конвейерных весов равна сумме всех погрешностей, рассмотренных в предыдущих параграфах, т.е.

$$\begin{aligned} \delta M_{\text{в.осн}} = & \delta M_{\text{ж}} + \delta M_{\text{дин}} + \delta M_{y0} + \delta M_{\text{рс}} + \delta M_{\text{нл}} + \delta M_{\text{к}} + \\ & + \delta M_{\text{вр}} + \delta M_{\text{вл}} + \delta M_{\text{д}} + \delta M_{\text{вс}} + \delta M_{\text{п}} + \delta M_{\text{град}}. \end{aligned} \quad (3.146)$$

Основная погрешность взвешивания, как и каждая составляющая, – случайная величина. Ее математическое ожидание равно сумме математических ожиданий основных погрешностей. Из основных погрешностей только две, $\delta M_{\text{ж}}$ и $\delta M_{\text{нл}}$ имеют математические ожидания, отличные от нуля. Поэтому для каждого значения нагрузки (\bar{q}_r^*) математическое ожидание основной погрешности взвешивания

$$M[\delta M_{\text{в.осн}}] = M[\delta M_x] + M[\delta M_{\text{нл}}]. \quad (3.147)$$

Все рассмотренные погрешности попарно независимы, поэтому дисперсия основной погрешности взвешивания

$$\begin{aligned} \delta M_{\text{в.осн}} = & \delta M_x + \delta M_{\text{дин}} + \delta M_{\text{вг}} + \delta M_{\text{вл}} + \delta M_{\text{нл}} + \delta M_{\text{в0}} + \\ & + \delta M_{\text{к}} + \delta M_{\text{рс}} + \delta M_d + \delta M_{\text{вс}} + \delta M_{\text{п}} + \delta M_{\text{град}}, \end{aligned} \quad (3.148)$$

а среднее квадратичное отклонение, –

$$\sigma[\delta M_{\text{в.осн}}] = \sqrt{D[\delta M_{\text{в.осн}}]}. \quad (3.149)$$

При этом основная погрешность взвешивания с вероятностью $P = 0,95$ определится неравенством

$$\delta M_{\text{в.осн}} \leq |M[\delta M_{\text{в.осн}}]| + 2\sigma[\delta M_{\text{в.осн}}]. \quad (3.150)$$

При отклонении условий эксплуатации от нормальных, а также в результате недостаточно тщательного ухода за натяжным устройством, роликами и лентой конвейера, кроме основной, может возникать дополнительная погрешность

$$\delta M_{\text{в.доп}} = \delta M_{S_0} + \delta M_{wL} + \delta M_{\text{вп}} + \delta M_{\text{ql}} + \delta M_t. \quad (3.151)$$

В реальных условиях полностью исключить погрешности δM_{S_0} и δM_{wL} практически невозможно, поэтому целесообразно некоторую часть этих погрешностей, соответствующую допустимым отклонениям \bar{S}_0^* и $\Delta \bar{w}_L$, отнести к категории основных.

В табл. 3.2. приведены значения дисперсий, которые могут принимать все составляющие основной погрешности взвешивания. Меньшие значения дисперсий относятся к весам с многороликовыми ГУ и относительно легкими условиями работы. Эти значения достижимы, если при проектировании весов их монтаже и эксплуатации приняты все меры для минимизации погрешностей.

Из таблицы видно, что паспортная погрешность весов может находиться в пределах от $\pm 0,25\%$ до $\pm 1,5\%$ (меньшие значения для многороликовых весов). Поскольку погрешность взвешивания существенно зависит не только от конструкции, но и от условий работы, гарантируемая точность весов также должна определяться для каждого конкретного их применения.

Таблица 3.2.

Пределы изменения составляющих погрешности взвешивания груза
на ленте конвейера

Обозначение погрешности	Дисперсия погрешности $\mathcal{D}[\delta m] \times 10^{-6}$		Примечания
	при $\bar{q}_\Gamma^* = 0,3$	при $\bar{q}_\Gamma^* = 0,8$	
δm_{s0+wL}	0,2...1	0,05...0,2	$\Delta S_0^* = 0,05$ $\Delta h_{0,доп} = 0,5$ мм $\Delta w_L = 0,05$
$\delta m_{нд}$	0,05...0,2	0,05...0,2	$v < 2,5$ м/с
$\delta m_{уд}$	0...15	0...15	$v = 1...2,5$ м/с
$\delta m_{бс}$	0,05...0,2	0,05...0,2	$v_{бс} < 0,25$ м/с
$\delta m_{кол}$	0...3	0...3	
δm_{ql}	0...(200)	0...(50)	При налипании до 0,01 $q_{ГМ}$
$\delta m_{w,гу}$	0,05...5	0,05...2	
δm_{p0}	0...2	0...0,4	
δm_{PC}	0,2...1	0,05...0,2	
$\delta m_{v.min}$	0,2...10	0,1...2	
δm_k	0,05...0,5	0,05...0,5	
$\delta m_{вг}$	0...0,2	0...0,2	
$\delta m_{вл}$	0...(5)	0...(1)	При установке ДС на холостой ветви
δm_d	0,05...0,5	0,05...0,5	
δm_{vc}	0...(0,2)	0...(0,2)	При использовании тахогенератора
$\delta m_{п}$	0,05...1	0,05...1	
$\delta m_{град}$	0,5...2	0,5...2	
$\sum \mathcal{D}[\delta m_{s0+wL}]$	1,4...18,6	0,23...11,4	При $\delta m_{уд} = 2$; $\delta m_{кол} = 1$ $\delta m_{w,гу} = 2$ и 1 $\delta m_{v.min} = 5$ и 2
$\sigma[\delta m]$	0,12...0,43	0,05...0,34	
$M[\delta m_x]$	0...0,5	0...0,3	
$\delta m_{осн}$	0,25...1,4	0,1...1,0	С вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$

ГЛАВА 4

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВЗВЕШИВАНИЯ ГРУЗА НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА

В данной главе рассматриваются методы и устройства (разработанные автором лично или в соавторстве) для взвешивания насыпных и среднекусковых грузов, транспортируемых стационарными ленточными конвейерами, работающими в условиях углеобогатительных фабрик и РОФ горно-обогатительных комбинатов, на нерудных карьерах, на коксохимических и металлургических заводах, на электростанциях и других предприятиях. Согласно действующим стандартам [184, 185, 193, 203, 212], взвешивание угля, руд черных и цветных металлов, кокса и других материалов должно производиться с погрешностью, не превышающей 1%.

4.1. Выбор метода взвешивания и ГУ для весов средней точности

Обоснование перспективных методов рассмотрено в главе 2. Если руководствоваться принципом достижения заданных условий наиболее простыми средствами, то следует остановить выбор на интегросуммирующих весах с частотными датчиками веса и скорости. При этом отпадает необходимость преобразования напряжения (десятки мВ) в код или частоту; кроме того, в схеме не используется аналоговый датчик скорости.

Для весов класса 1,0 допустимо использование однороликового ГУ, что обосновано теоретически (разд. 3.2, 3.3) и подтверждается экспериментально. Для получения некоторого запаса по точности, целесообразно выбрать двухроликовое ГУ с формулой $(2 \times 1)П (Pч - 2ДС)У$ (рис.2.6 сх.8). Такое ГУ сохраняет простоту однороликового при существенно меньшей погрешности, что объясняется не только увеличением длины весоизмерительного участка, но также взаимной компенсацией некоторых погрешностей двух ГУ (например, вызванных изменением $w_{ГУ}$). Кроме того, наличие двух ГУ позволяет организовать непрерывный контроль точности взвешивания (см. ниже).

4.2. Принцип действия интегросуммирующих конвейерных весов с частотными датчиками

В основу работы конвейерных весов положен метод суммирования интегралов погонной массы, обоснование которого дано в разд. 2.3. Новизна метода защищена авторским свидетельством [75, 76].

Структурная схема конвейерных весов ЭКВД¹ показана на рис. 4.1.

¹ Электронные Конвейерные Весы с Дискретной обработкой информации.

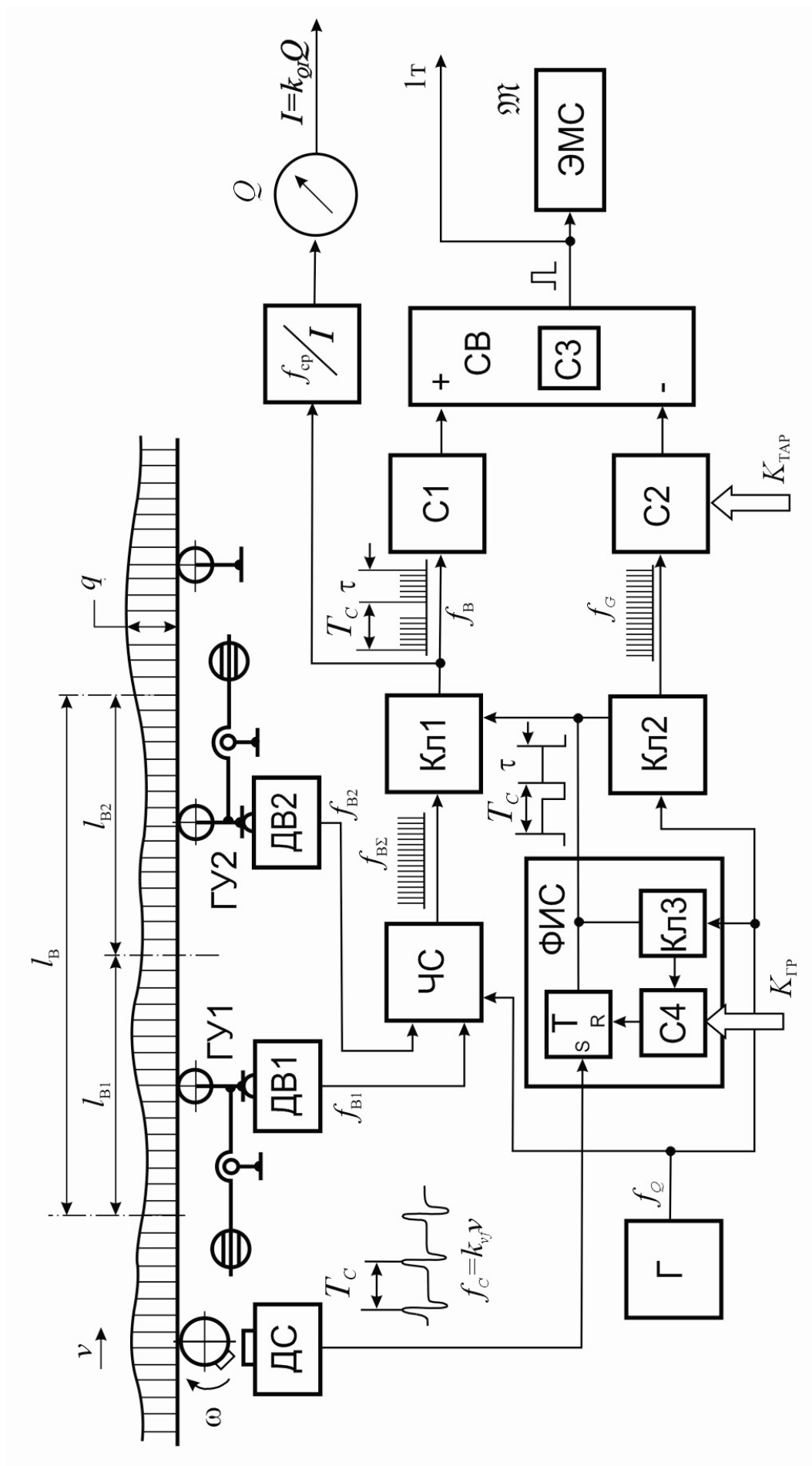


Рисунок 4.1 – Структурная схема конвейерных весов ЭКВД

Весы содержат следующие элементы.

1. Двухроликовое грузоприемное устройство (ГУ), воспринимающее нагрузку от ленты и транспортируемого груза и воздействующую на датчики веса ДВ силой $P_{B\Sigma} = P_{B2} + P_{B2}$, которая зависит от погонной массы ленты $q_{\text{л}}$ и груза $q_{\text{г}}$:

$$P_{B\Sigma} = P_{\text{гв.}\Sigma} + k_{qP}(q_{\text{л}} + q_{\text{г}})^1, \quad (4.1)$$

где $P_{\text{гв.}\Sigma}$ – составляющая, вызванная моментами сил веса ГУ;

k_{qP} – коэффициент пропорциональности.

2. Датчики веса (ДВ1, ДВ2), преобразующие действующие на них силы в напряжение, частота f_{B_i} которого связана с силой линейной зависимостью

$$f_{B,i} = f_{B,\text{min},i} + k_{pf,i}P_{B,i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (4.2)$$

где $f_{B,\text{min},i}$ – минимальная частота датчика веса (см. рис. 4.2);

$k_{pf,i}$ – коэффициент пропорциональности.

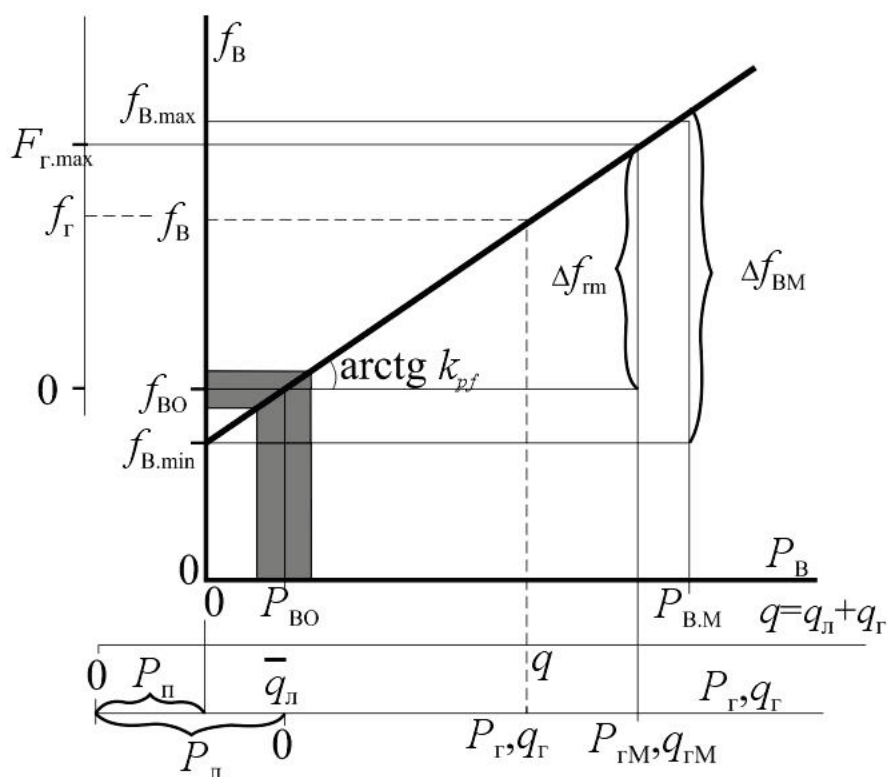


Рисунок 4.2 – Зависимость $f_B(P_B)$

3. Частотный сумматор (ЧС), частота сигнала на выходе которого

$$f_{B\Sigma} = f_{B1} + f_{B2}. \quad (4.3)$$

¹ Эта формула получается из (2.4)

С учетом (4.2)

$$f_{B\Sigma} = f_{B.\min.\Sigma} + k_{Pf} P_{B\Sigma}, \quad (4.4)$$

где

$$f_{B.\min.\Sigma} = f_{B.\min.1} + f_{B.\min.2},$$

$$k_{Pf} = k_{Pf.\text{cp}} = (k_{Pf.1} + k_{Pf.2}) / 2. \quad (4.5)$$

4. Датчик скорости¹, преобразующий скорость вращения ролика (ω) в последовательность импульсов, частота следования которых f_c пропорциональна скорости вращения –

$$f_c = k_{\omega f} \omega, \quad (4.6)$$

где $k_{\omega f}$ – коэффициент пропорциональности.

Так как ролик датчика скорости приводится во вращение лентой транспортера, то частота f_c пропорциональна также скорости v перемещения груза. Действительно, если

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{v}{0,5d}, \quad (4.7)$$

то частота

$$f_c = k_{\omega f} \frac{2v}{d} = k_{vf} v. \quad (4.8)$$

Для датчика скорости индукционного типа

$$k_{\omega f} = \frac{z}{2\pi}, \quad (4.9)$$

где z – число зубцов, укрепленных на ролике.

При этом коэффициент пропорциональности между скоростью и частотой

¹ Возможна модификация весов без датчика скорости

² Формулы (4.7) и (4.8) не совсем точны. Скорость груза несколько отличается от скорости ленты, а эффективный диаметр ролика изменяется с изменением натяжения ленты. Однако погрешность, вызванная этими факторами, невелика. Подробный анализ ее дается в разд. 3.12

$$k_{vf} = \frac{2k_{of}}{d} = \frac{z}{\pi d}. \quad (4.10)$$

5. Формирователь импульсов скорости (ФИС), который преобразует остrokонечные импульсы датчика скорости в калиброванные прямоугольные импульсы длительностью τ . Такое преобразование осуществляется при помощи триггера Т, ключа КлЗ и счетчика С4 с регулируемым коэффициентом пересчета K_4 , на вход которого через КлЗ поступают импульсы с частотой f_G от кварцевого генератора Г.

6. Ключи Кл1 и Кл2. Ключи открыты, пропуская импульсы от датчика веса в течение времени T , и закрыты в течение времени $T_c - \tau$, где $T_c = 1/f_c$ – период следования импульсов датчика скорости.

7. Электронные счетчики-делители С1 и С2 с коэффициентами пересчета K_1 и K_2 соответственно.

8. Счетчик-вычитатель СВ, осуществляющий вычитание импульсов таким образом, что число импульсов, прошедших на его выход, равно разности чисел импульсов, поступивших на его входы, деленное на K_3 .

Счетчик СВ должен обладать памятью для хранения отрицательного числа на случай, если на вход «-» поступит несколько импульсов подряд. Это возможно на холостом ходу, когда через весы проходит участок ленты, погонная масса которого меньше средней.

9. Электромеханический счетчик ЭМС, осуществляющий суммирование и индикацию поступающих импульсов.

Ниже излагается принцип действия работы весов.

При движении ленты, несущей груз, на датчики веса ДВ действует изменяющаяся во времени сила

$$P_{B\Sigma}(t) = P_{г\gamma.\Sigma} + k_{qp}(q_{л}(t) + q_{г}(t)), \quad (4.11)$$

и датчики генерируют импульсы напряжения с частотой, изменение которой пропорционально этой силе. С учетом (4.2) и (4.4)

$$f_{B\Sigma}(t) = f_{B,\min.\Sigma} + k_{pf}P_{г\gamma.\Sigma} + k_{pf}k_{qp}q_{л}(t) + k_{pf}k_{qp}q_{г}(t). \quad (4.12)$$

Приводимый во вращение ролик датчика скорости возбуждает в индукторе этого датчика импульсы напряжения с частотой f_c , пропорциональной скорости v движения груза, –

$$f_c = k_{vf}v(t). \quad (4.13)$$

Остrokонечные импульсы напряжения датчика скорости преобразуются в калиброванные прямоугольные импульсы длительностью τ при помощи блока импульсов (БИС), который работает следующим образом. На один из входов ключа КлЗ подаются импульсы с частотой f_G от генератора Г. Импульс, прихо-

дящий от датчика скорости, устанавливает триггер Т в состояние «1», и с его выхода разрешающий потенциал поступает на второй вход ключа Кл3. Пока триггер Т находится в единичном состоянии, импульсы от генератора Г проходят через ключ на счетчик С4, при переполнении которого триггер Т устанавливается в состояние «0». Ключ Кл3 закрывается до прихода следующего импульса от датчика скорости.

Триггер Т будет оставаться в единичном состоянии в течение времени

$$\tau = \frac{K_4}{f_G}. \quad (4.14)$$

Очевидно, что это время должно быть меньше минимального периода T_c следования импульсов датчика скорости, то есть должно соблюдаться условие

$$\tau < T_{c.\min} \quad \text{или} \quad \tau f_{c.\max} < 1. \quad (4.15)$$

Импульсы длительностью τ с выхода БИС поступают на один из входов ключа Кд1. На второй вход ключа поступают импульсы с частотой $f_{B\Sigma}$ с выхода 4С.

За время T_c i -го цикла взвешивания на выход Кл1 пройдет n_{1i} импульсов –

$$n_{1i} = \int_{\tau} f_B(t) dt. \quad (4.16)$$

Если считать, что среднее значение частоты \bar{f}_{B,T_c} за время T_c мало отличается от среднего значения частоты $\bar{f}_{B,\tau}$ за время τ ², то выражение для n_{1i} можно записать следующим образом:

$$n_{1i} = \frac{\tau}{T_{ci}} \int_{T_{ci}} f_B(t) dt. \quad (4.17)$$

За время \mathcal{T} взвешивания груза на суммирующий вход (Вх+) вычитателя СВ пройдут импульсы в количестве:

$$N^{«+»} = \frac{1}{K_1} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{\tau}{T_{ci}} \int_{T_{ci}} f_B(t) dt, \quad (4.18)$$

где \mathfrak{N} – общее количество циклов взвешивания за время \mathcal{T} .

¹ Число импульсов, проходящих через схему Кл1 может быть только целым и, следовательно, может отличаться от полученного по формуле (4.16). Ниже, в разд. 4.4, анализируется вызванная этим обстоятельством погрешность.

² Погрешность, вызванная этим допущением, анализируется в разд. 4.3.

Подставив в выражение (4.18) значение частоты $f_B(t)$ по формуле (4.12), запишем:

$$\begin{aligned}
 N^{«+»} &= \frac{1}{K_1} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{\tau}{T_{ci}} \left[\int_{T_{c,i}} (f_{B,\min.\Sigma} + k_{Pf} P_{\Gamma\Sigma}) dt + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{T_{c,i}} k_{qP} k_{Pf} q_{\Pi}(t) dt + \int_{T_{c,i}} k_{qP} k_{Pf} q_{\Gamma}(t) dt \right] = \\
 &= \frac{1}{K_1} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \tau (f_{B,\min.\Sigma} + k_{Pf} P_{\Gamma\Sigma}) + \frac{k_{qP} k_{Pf}}{K_1} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{1}{T_{ci}} \int_{T_{c,i}} q_{\Pi}(t) dt + \\
 &\quad + \frac{k_{qP} k_{Pf}}{K_1} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{1}{T_{ci}} \int_{T_{c,i}} q_{\Gamma}(t) dt.
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Первое слагаемое этого равенства после упрощения принимает вид

$$\mathfrak{N} \frac{\tau}{K_1} (f_{B,\min.\Sigma} + k_{Pf} P_{\Gamma\Sigma}). \tag{4.20}$$

Второе слагаемое пропорционально среднему значению погонной массы ленты, так как

$$\frac{1}{\mathfrak{N}} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{1}{T_{ci}} \int_{T_{c,i}} q_{\Pi}(t) dt = \bar{q}_{\Pi}. \tag{4.21}$$

Поэтому второе слагаемое запишем в таком виде:

$$\mathfrak{N} \frac{k_{qP} k_{Pf} \tau}{K_1} \bar{q}_{\Pi}. \tag{4.22}$$

Третье слагаемое пропорционально массе \mathfrak{M} , перемещенного конвейером груза за время измерения \mathfrak{T} . Действительно, подставив, согласно формуле (4.8), $1/T_{ci} = f_c(t) = k_{vf} v(t)$ и внося $v(t)$ под знак интеграла, получим:

$$k_{vf} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \int_{T_{c,i}} q_{\Gamma}(t) v(t) dt = k_{vf} \mathfrak{M}. \tag{4.23}$$

Итак, третье слагаемое упрощается до вида

¹ Такое преобразование может быть произведено на том основании, что в течение времени интегрирования ($T_c < 0,5\text{с}$) скорость v практически постоянна.

$$\frac{k_{qP}k_{Pf}k_{vf}\tau}{K_1}\mathfrak{M}. \quad (4.24)$$

Следовательно, число импульсов, поступающее на вход «+» за время \mathfrak{T} , запишется так:

$$N^{\langle + \rangle} = \mathfrak{N} \frac{\tau}{K_1} (f_{B.\min.\Sigma} + k_{Pf}P_{\text{г}\Sigma}) + \mathfrak{N} \frac{k_{qP}k_{Pf}\tau}{K_1} \bar{q}_\text{л} + \frac{k_{qP}k_{Pf}k_{vf}\tau}{K_1} \mathfrak{M}. \quad (4.25)$$

Обозначая

$$f_{B.\min.\Sigma} + k_{Pf}P_{\text{г}\Sigma} + k_{qP}k_{Pf}\bar{q}_\text{л} = f_{B.0.\Sigma}, \quad (4.26)$$

где $f_{B.0.\Sigma} = f_{B.0.1} + f_{B.0.2}$ – начальная частота датчика веса (см. рис.4.2), соответствующая ненагруженному конвейеру ($q_\text{г} = 0$), запишем:

$$N^{\langle + \rangle} = \mathfrak{N} \frac{\tau}{K_1} f_{B.0.\Sigma} + \frac{k_{qP}k_{Pf}k_{vf}\tau}{K_1} \mathfrak{M}. \quad (4.27)$$

Очевидно, что если на вход «-» вычитателя В поступит за то же время \mathfrak{T} число импульсов $N^{\langle - \rangle}$, равное первому слагаемому равенства (4.27), то на итоговый счетчик (ЭМС) пройдет число импульсов N , пропорциональное массе перемещенного груза \mathfrak{M} .

Требуемое число импульсов поступает на вход «-» от высокостабильного генератора Г через ключ Кл2 и счетчик С2. За время измерения \mathfrak{T} на этот вход поступят импульсы в количестве ¹

$$N^{\langle - \rangle} = \frac{1}{K_2K_3} \sum_{\mathfrak{N}} f_G \tau = \mathfrak{N} \frac{f_G \tau}{K_2}. \quad (4.28)$$

При этом на электромеханический счетчик поступят импульсы, число которых определится как

$$N = \frac{1}{K_3} (N^{\langle + \rangle} - N^{\langle - \rangle}) = \frac{k_{qP}k_{Pf}k_{vf}\tau}{K_1K_3} \mathfrak{M} + \mathfrak{N} \frac{\tau}{K_1K_3} f_{B.0.\Sigma} - \mathfrak{N} \frac{\tau}{K_2K_3} f_G, \quad (4.29)$$

или, после подстановки τ (4.14), –

¹ Здесь не учитывается дискретность поступления импульсов. Влияние дискретности анализируется в разд. 4.4.

$$N = \frac{k_{qP}k_{Pf}k_{vf}}{K_1K_3} \cdot \frac{K_4}{f_G} \mathfrak{M} + \mathfrak{N} \frac{f_{B0.\Sigma}}{K_1K_3} \cdot \frac{K_4}{f_G} - \mathfrak{N} \frac{K_4}{K_2K_3}. \quad (4.30)$$

Чтобы это число импульсов было пропорционально массе перемещенного груза, то есть, чтобы выполнялось равенство

$$N = \frac{k_{qP}k_{Pf}k_{vf}}{f_G} \cdot \frac{K_4}{K_1K_5} \mathfrak{M} = K_{\mathfrak{M}} \mathfrak{M}. \quad (4.31)$$

Необходимо, чтобы остальные слагаемые в (4.30) равнялись нулю, откуда получаем условие, при котором удовлетворяется равенство (4.31), –

$$\frac{f_G}{f_{B0.\Sigma}} \cdot \frac{K_1}{K_2} = 1. \quad (4.32)$$

Из (4.31) и (4.32) видно, что установка нуля при тарировании должна производиться изменением коэффициента K_2 , а установка «цены» импульса при градуировке – изменением коэффициента K_4 .

Вывод. Весы по схеме, изображенной на рис. 4.1, обеспечивают точное взвешивание перемещенного конвейером груза при выполнении перечисленных ниже условий.

1. Приращение силы, действующее на датчик веса, должно быть пропорционально погонной массе груза на ленте конвейера (4.11), иначе, функция преобразования ГУ $P_{B\Sigma}(q_\Gamma)$ должна быть линейна и стабильна, $k_{qP} = \text{const}$ (4.31). Это условие удовлетворяется не в полной мере. На вид функции $P_{B\Sigma}(q_\Gamma)$ оказывает влияние жесткость ленты и ее натяжение, неточность монтажа и другие факторы, рассмотренные в разд. 3.2.

2. Приращение частоты датчика веса должно быть пропорционально действующей на него силе (4.2), иначе, характеристика датчика веса $f_B(P_B)$ должна быть линейна и стабильна, $k_{Pf} = \text{const}$ (4.31). Точность выполнения этого условия определяется параметрами используемого датчика веса.

3. Частота импульсов датчика скорости должна быть пропорциональна скорости перемещения груза (4.8), иначе, характеристика $f_c(v)$ должна быть линейна и стабильна, $k_{vf} = \text{const}$ (4.31). Это условие удовлетворяется также не полностью, и возникающая в связи с этим погрешность анализируется в разд. 3.12.

4. Частота f_G генератора Г должна быть постоянна (4.31).

5. Коэффициенты K_1 и K_2 делителей частоты должны быть такими, чтобы удовлетворять равенство (4.32). Условия четвертое и пятое полностью удовлетворяются без особого труда.

6. Начальная частота $f_{B0.\Sigma}$ датчика веса должна быть постоянна, (4.32). Выполнение этого условия зависит от параметров измерительного преобразова-

теля массы.

При обосновании схемы были приняты следующие допущения:

1. Сила $P_B(t)$, действующая на датчик веса, пропорциональна мгновенному значению погонной массы $q(t)$, (2.28).

2. Среднее значение частоты датчика веса за время T_c не отличается от среднего значения частоты за время τ , (2.35).

3. Дискретность обрабатываемой информации не оказывает влияния на работу весов (2.34, 2.47).

Правомерность первого допущения доказана в разд. 2.2. Погрешности, неучтенные в связи с другими допущениями, анализируются в разд. 4.3. и 4.4.

4.3. Методическая погрешность итегросуммирующих конвейерных весов

Используемый в весах ЭКВД интегратор частотного сигнала безынерционен и не вносит динамической ошибки интегрирования, однако, неравномерность нагрузки на конвейере вносит методическую погрешность вызванную тем, что информация о погонной массе груза вводится в прибор не непрерывно, а периодически, причем в течение времени τ взвешивается часть «порции», а масса всей «порции», прошедшей через весы за время цикла T_c , считается равной

$$m_i = \frac{T_{ci}}{\tau} \int_{\tau} q(t) dt. \quad (4.33)$$

Действительно, вместо принципиально правильного равенства (4.16) было с некоторым допущением записано равенство (4.17), а если подставить в него f_B по формуле (4.12), то после сокращения найдем:

$$\int_{\tau} q_r(t) dt = \frac{\tau}{T_{ci}} \int_{T_{ci}} q_r(t) dt. \quad (4.34)$$

Умножив правую и левую части на v_i , считая $v_i = \text{const}$ в течение времени T_{ci} ¹, и, учтя, что $\int_{T_{ci}} q_r(t) v_i dt = m_i$, получим:

$$m_i = \frac{T_{ci}}{\tau} \int_{\tau} q_r(t) dt = \frac{T_{ci}}{\tau} \int_{\tau} Q(t) dt. \quad (4.35)$$

Эта формула и записана выше под номером (4.33). Таким образом, общая масса M перемещенного конвейером груза считается равной

¹ См. сноску 1 на стр. 112

$$\mathfrak{M} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} m_i = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{T_{ci}}{\tau} \int_{\tau} Q(t) dt, \quad (4.36)$$

где \mathfrak{N} – количество циклов взвешивания за время измерения \mathfrak{T} , тогда как в действительности

$$\mathfrak{M}' = \int_{\mathfrak{T}} Q(t) dt = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \int_{T_{c,i}} Q(t) dt. \quad (4.37)$$

Следовательно, при взвешивании «порции» груза возникает абсолютная погрешность

$$\begin{aligned} \Delta m_i &= m_i - m'_i = \frac{T_{ci}}{\tau} \int_{\tau} Q(t) dt - \int_{T_{c,i}} Q(t) dt = \\ &= \frac{T_{ci}}{\tau} \int_{\tau} Q(t) dt - \int_{\tau} Q(t) dt - \int_{T_{c,i}-\tau} Q(t) dt = \\ &= (T_{ci} - \tau) \frac{1}{\tau} \int_{\tau} Q(t) dt - \int_{T_{c,i}-\tau} Q(t) dt = \\ &= (T_{ci} - \tau) \bar{Q}_{\tau i} - \int_{T_{c,i}-\tau} Q(t) dt. \end{aligned} \quad (4.38)$$

Эта погрешность показана на рис. 4.3. в виде заштрихованной площади. Очевидно, что погрешности Δm_i отдельных взвешиваний будут иметь разную величину, причем знаки их могут быть как положительными, так и отрицательными. Поскольку количество циклов взвешивания велико, естественно ожидать, что суммарная погрешность стремится к нулю.

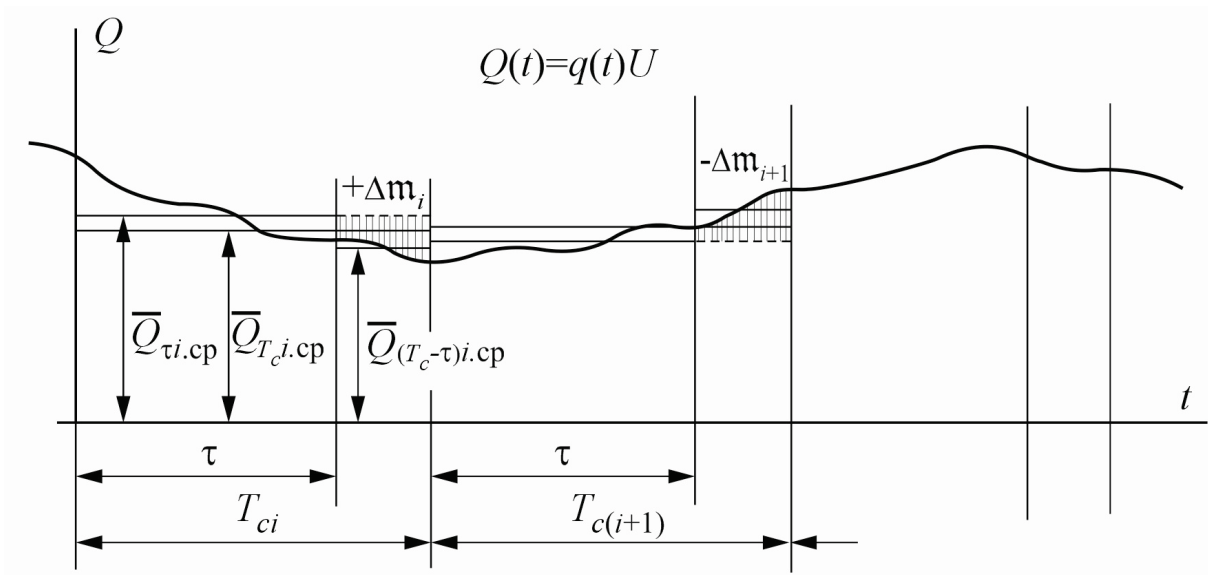


Рисунок 4.3 – Зависимость $Q(t)$ и погрешность единичного взвешивания

Покажем, что это действительно так, и выясним, какое значение может иметь остаточная погрешности к концу времени измерения \mathfrak{T} .

Погонная масса $q_r(t)$ на весовом участке конвейера – случайная функция времени. Изменение производительности Q в течение времени T_c будем считать отдельной реализацией. Случайная функция $Q(t)$ показана на рис. 4.4.

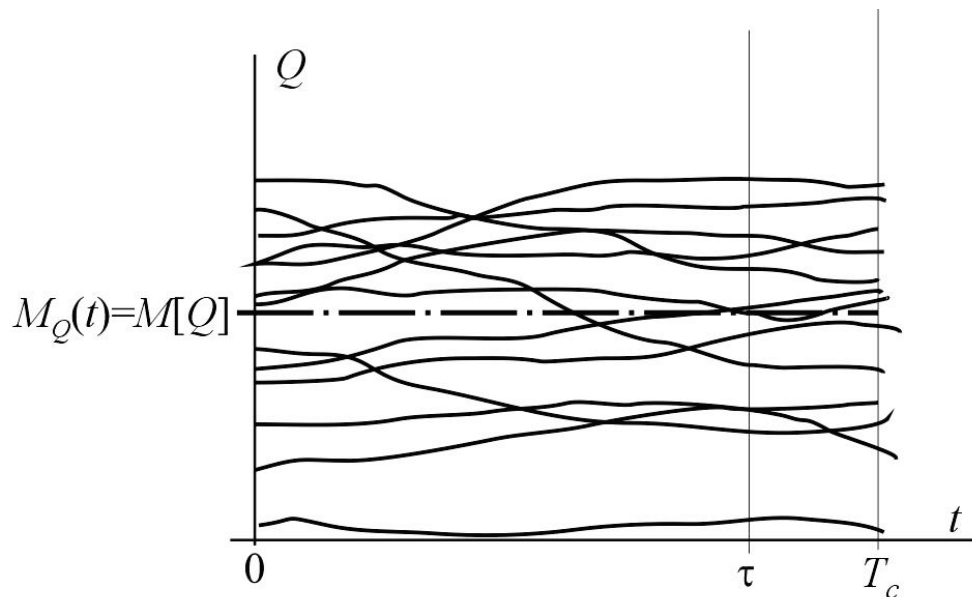


Рисунок 4.4 – Случайная функция $Q(t)$

Очевидно, что математическое ожидание этой случайной функции постоянно и равно статистическому среднему:

$$m_Q(t) = M[Q], \quad (4.39)$$

причем,

$$M[Q] = \bar{Q} = \frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{T}}. \quad (4.40)$$

Будем считать, что корреляционная функция $K_Q(t, t')$ случайной функции $Q(t)$ имеет вид экспоненты (рис. 4.5):

$$K_Q(t, t') = \mathfrak{D}[Q] e^{-\alpha|t-t'|}, \quad (4.41)$$

где $\mathfrak{D}[Q]$ – дисперсия; α – показатель экспоненты.

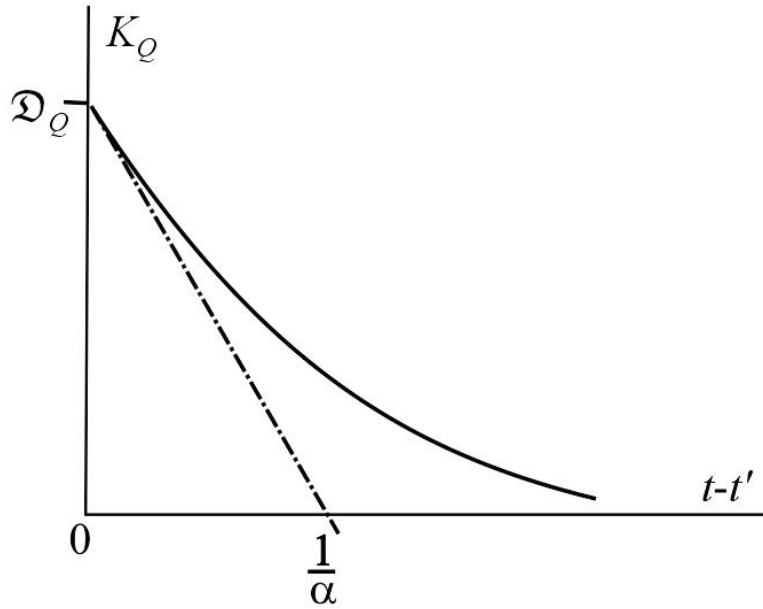


Рисунок 4.5 – Корреляционная функция

Математическое ожидание $m_m(T)$ интеграла случайной функции $Q(t)$ [166] –

$$m_m(T) = \int_0^T m_m(t) dt = \int_0^T M[Q] dt = M[Q]T. \quad (4.42)$$

Случайная функция $m(T) = \int_0^T Q(t) dt$ и ее математическое ожидание $m_m(T)$ показаны на рис. 4.6.

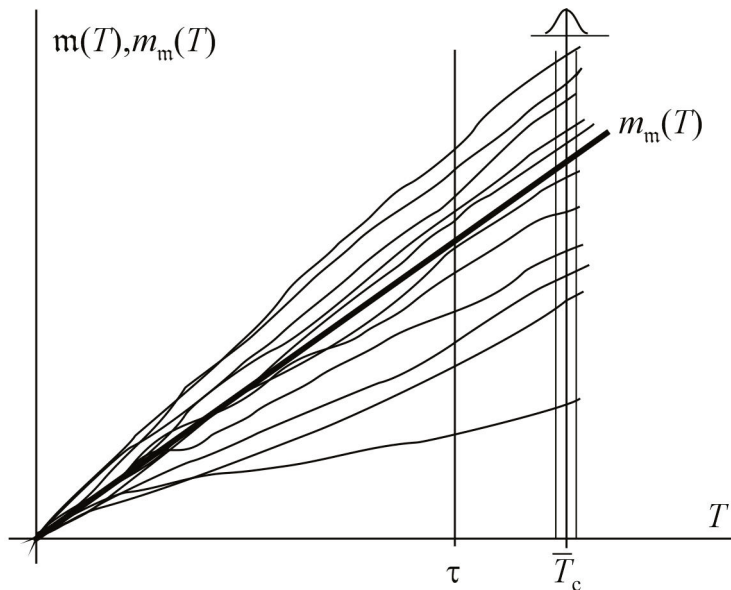


Рисунок 4.6 – Случайная функция $m(t)$ и ее математическое ожидание

При $T = \tau$ математическое ожидание интеграла случайной функции $m(T)$, согласно формуле (4.42), –

$$m_m(\tau) = M[Q]\tau. \quad (4.43)$$

Аналогично для $T = T_{ci}$, –

$$m_m(T_{ci}) = M[Q]T_{ci}. \quad (4.44)$$

Так как при взвешивании интеграл за время τ умножается на отношение T_{ci}/τ (4.33), то математическое ожидание результата измерения

$$m_{и} = m_m(\tau) \frac{T_{ci}}{\tau} = M[Q]\tau \frac{T_{ci}}{\tau} = M[Q]T_{ci}, \quad (4.45)$$

что тождественно с (4.44). Следовательно, при достаточно длительном взвешивании результат измерения в соответствии с (4.36) приближается к точному значению, определяемому формулой (4.37), а относительная погрешность

$$\delta\mathfrak{M}_\tau = \delta\bar{m}_{\mathfrak{M}} = \frac{1}{\mathfrak{N}} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \delta m_i$$

стремится к нулю. То есть математическое ожидание погрешности равно нулю: $M[\delta m] = 0$.

Выясним, насколько быстро уменьшается эта погрешность.

Относительная погрешность единичного взвешивания – случайная величина, являющаяся функцией случайных величин $m(\tau)$ и $m(T_{ci})$:

$$\delta m_i = \frac{\frac{T_{ci}}{\tau} m(\tau) - m(T_{ci})}{m_m(T_{ci})} = \frac{1}{M[Q]\tau} m(\tau) - \frac{1}{M[Q]T_{ci}} m(T_{ci}). \quad (4.46)$$

Дисперсия $\mathfrak{D}[\delta m]$ относительной погрешности δm , [166, ф.3.9.5]

$$\mathfrak{D}[\delta m] = \frac{K_{11}}{M^2[Q]\tau^2} - \frac{K_{12}}{M^2[Q]\tau T_c} - \frac{K_{22}}{M^2[Q]T_c^2}. \quad (4.47)$$

В этой формуле:

$K_{11} = \mathfrak{D}[m(\tau)]$ – дисперсия случайной величины $m(\tau)$; величина ее для рассматриваемого случая (4.41) определяется зависимостью [166, форм. 4.7.10]:

$$\mathfrak{D}[m(\tau)] = \frac{2\mathfrak{D}[Q]}{\alpha^2}(\alpha\tau - 1 + e^{-\alpha\tau}); \quad (4.48)$$

$K_{12} = K_{21} = K_m(\tau, \bar{T}_c)$ – корреляционный момент случайных величин $m(\tau)$ и $m(\bar{T}_c)$; согласно [166, форм.4.7.9]:

$$K_m(\tau, \bar{T}_c) = \frac{\mathfrak{D}[Q]}{\alpha^2} [2\alpha\tau - 1 + e^{-\alpha\tau} + e^{-\alpha\bar{T}_c} - e^{-\alpha(\bar{T}_c - \tau)}]; \quad (4.49)$$

$K_{22} = \mathfrak{D}[m(\bar{T}_c)] = \frac{2\mathfrak{D}[Q]}{\alpha^2}(\alpha\bar{T}_c - 1 + e^{-\alpha\bar{T}_c})$ – дисперсия случайной величины $m(\bar{T}_c)$; аналогично (4.48):

$$\mathfrak{D}[m(\bar{T}_c)] = \frac{2\mathfrak{D}[Q]}{\alpha^2}(\alpha\bar{T}_c - 1 + e^{-\alpha\bar{T}_c}). \quad (4.50)$$

Подставив значения моментов по формулам (4.48), (4.49) и (4.50) в равенство (4.47) и обозначив коэффициент заполнения

$$\frac{\tau}{\bar{T}_c} = \theta, \quad (4.51)$$

после несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} \mathfrak{D}[\delta m] = \sigma^2[\delta m] &= \left(\frac{\sigma[Q]}{M[Q]} \right)^2 \frac{2}{\alpha^2 \tau^2} \times \\ &\times \left[\theta \left(e^{-\alpha \frac{1-\theta}{\theta} \tau} - \theta \right) - (1-\theta) \left(1 + \theta e^{-\alpha \frac{\tau}{\theta}} - e^{-\alpha\tau} - \alpha\tau \right) \right]. \end{aligned} \quad (4.52)$$

На рис. 4.7 показана построенная по формуле (4.52) зависимость $\frac{\sigma[\delta m]}{\sigma[Q]/M[Q]} = f(\theta)$ для различных значений τ при $\alpha = 5\text{с}^{-1}$, что соответствует весьма неравномерной нагрузке.

Из рисунка видно, что с уменьшением коэффициента заполнения резко увеличивается среднее квадратическое отклонение $\sigma[\delta m]$ погрешностей dm_i , поэтому без особой необходимости не следует проектировать весы, у которых $\theta < 0,6 \dots 0,7$. Рациональными следует считать значения $\theta = 0,75 \dots 0,9$.

На рис. 4.8 показана зависимость $\frac{\sigma[\delta m]}{\sigma[Q]/M[Q]} = f(\tau)$ для различных

значений α при коэффициенте заполнения $\theta = 0,8$. Отчетливо видно, что среднее квадратическое отклонение $\sigma[\delta m]$ принимает тем меньшие значения, чем меньше τ и чем более равномерна нагрузка на конвейере (чем меньше значение α).

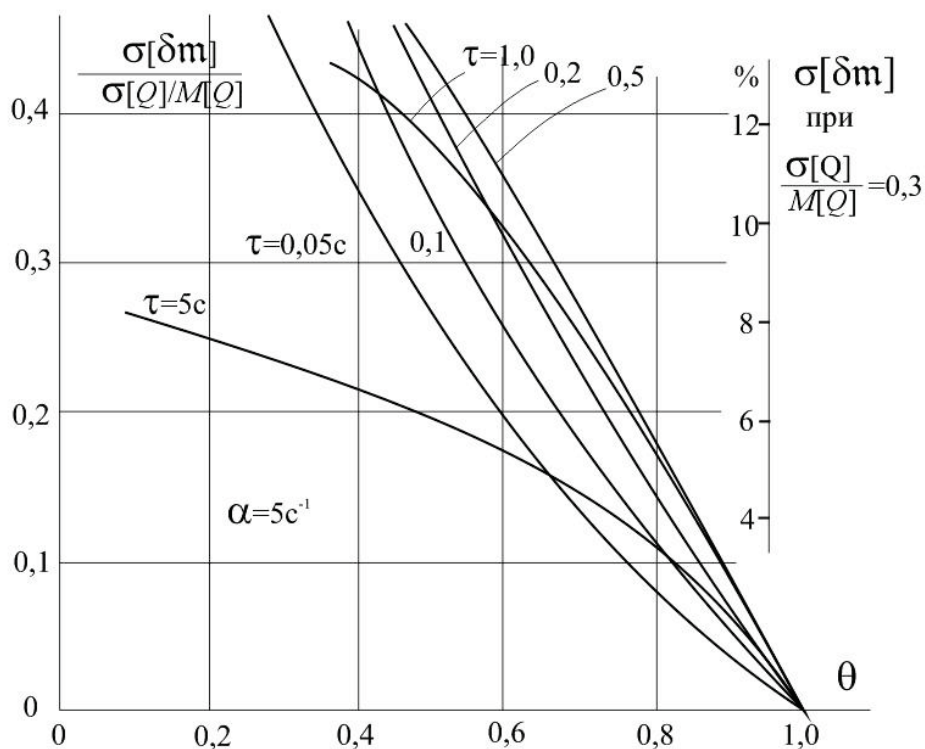


Рисунок 4.7 – Влияние коэффициента заполнения θ на погрешность взвешивания

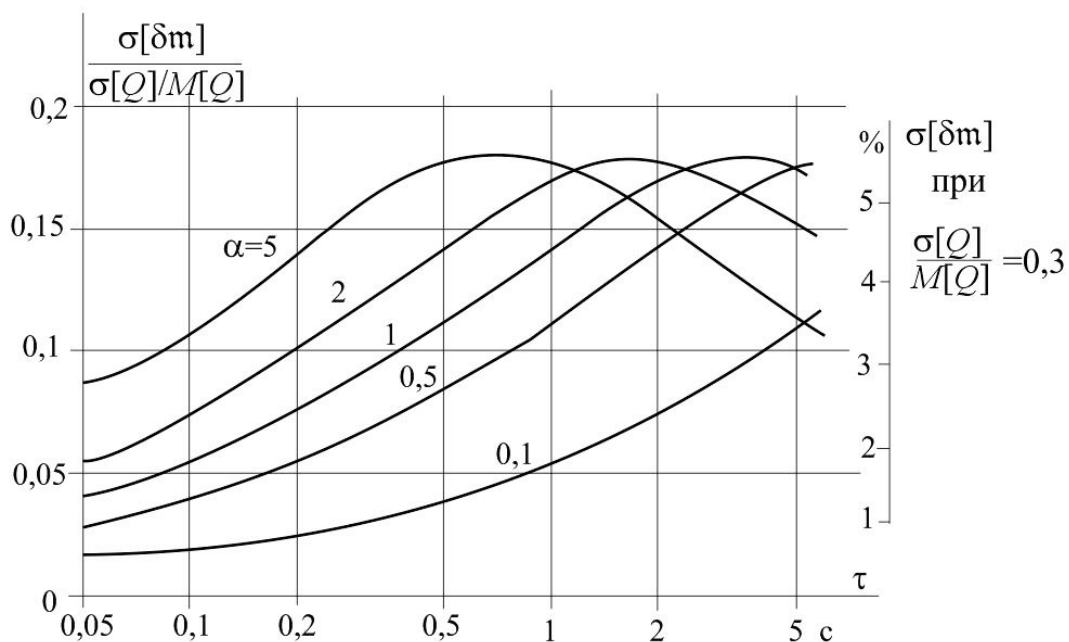


Рисунок 4.8 – Влияние длительность разрешающего импульса (τ) и неравномерности нагрузки (α) на погрешность взвешивания

При $\tau < 0,1\text{с}$ заметной становится погрешность дискретности (см. форм. 4.92), поэтому рациональными следует считать значения $\tau = 0,15 \dots 0,25\text{с}$ ¹.

Определим теперь, какое значение может принять относительная погрешность взвешивания $\delta\mathcal{M}_\tau$ к концу времени \mathcal{T} .

Согласно теореме Чебышева

$$\mathfrak{P}\left\{|\delta\bar{m}_\mathfrak{N} - M[\delta m]|\right\} < \varepsilon \geq 1 - \frac{\mathcal{D}[\delta m]}{\mathfrak{N}\varepsilon^2}. \quad (4.53)$$

Здесь $\delta m_\mathfrak{N}$ – среднее значение погрешности взвешивания после \mathfrak{N} циклов взвешивания, –

$$\delta m_\mathfrak{N} = \frac{1}{\mathfrak{N}} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \sigma m_i; \quad (4.54)$$

$M[\delta m]$ – математическое ожидание погрешности;

ε – значение, которое с вероятностью \mathfrak{P} не будет превзойдено погрешностью $\delta\mathcal{M}_\tau$ после \mathfrak{N} циклов взвешивания.

Количество циклов взвешивания \mathfrak{N} связано с общим временем взвешивания \mathcal{T} зависимостью:

$$\mathfrak{N} = \frac{\mathcal{T}}{T_c} = \frac{\mathcal{T}}{\tau} \bar{\theta}. \quad (4.55)$$

Подставив в формулу (4.53) значение \mathfrak{N} (4.55) и $\mathcal{D}[\delta m]$ (4.52), а также $\delta\bar{m} - M[\delta m] = \delta\mathcal{M}_\tau$ (так как $M[\delta m] = 0$), получим²:

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}\left\{|\delta\mathcal{M}_\tau| < \varepsilon\right\} &\geq 1 - \frac{2}{\left(\frac{\varepsilon}{\sigma[Q]/\bar{Q}}\right)^2 \alpha^2 \tau \mathcal{T}} \times \\ &\times \left[e^{-\alpha \frac{1-\theta}{\theta} \tau} - \theta - \left(\frac{1-\theta}{\theta}\right) \left(1 + \theta e^{-\alpha \frac{\tau}{\theta}} - e^{-\alpha \tau} - \alpha \tau\right) \right]. \end{aligned} \quad (4.56)$$

Откуда

¹ Для датчиков веса с диапазоном частот 100...1000 Гц.

² В окончательной формуле вместо математического ожидания $M[Q]$ записано среднее значение производительности \bar{Q} .

$$|\delta\mathcal{M}_\tau| < \varepsilon \leq \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\sigma[Q]}{\bar{Q}} \sqrt{\frac{2f(\alpha, \theta, \tau)}{(1-\mathfrak{P})\tau\mathfrak{T}}}, \quad (4.57)$$

где

$$f(\alpha, \theta, \tau) = e^{-\alpha \frac{1-\theta}{\theta} \tau} - \theta - \left(\frac{1-\theta}{\theta} \right) \left(1 + \theta e^{-\alpha \frac{\tau}{\theta}} - e^{-\alpha \tau} - \alpha \tau \right). \quad (4.58)$$

Для вычисления погрешности $\delta\mathcal{M}_\tau$ по формуле (4.57) должны быть известны числовые параметры $\sigma[Q]/\bar{Q}$ и α , характеризующие степень неравномерности нагрузки. Статистические значения их могут быть рассчитаны по результатам наблюдения за изменением нагрузки на ленте конвейера. Для ориентировочных расчетов можно пользоваться значениями параметров, которые приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Параметры α и $\sigma[Q]/\bar{Q}$ для различных нагрузок

Характер нагрузки (степень неравномерности)	α 1/с	$\frac{\sigma[Q]}{\bar{Q}}$	$\sigma[\delta\mathcal{M}_\tau]$, % при $\tau = 0.2$ с, $\theta = 0,8$ и $\mathfrak{T} = 10$ мин
Резко неравномерная (чередование глыб, участков с нагрузкой, пропусков)	2...5	0,3...0,4	0,12...0,25
Умеренно неравномерная	0,5...2	0,1...0,3	0,03...0,12
Медленно меняющаяся, почти постоянная	0,1...0,5	0,1...0,2	0,012...0,12

По формуле (4.57) и (4.58) на рис. 4.9 построена номограмма, с помощью которой можно оценить погрешность $\delta\mathcal{M}_\tau$ для различных значений \mathfrak{T} , τ , $\sigma[Q]/\bar{Q}$ и \mathfrak{P} при $\theta = 0,8$ и $\alpha = 5\text{с}^{-1}$. Построенная номограмма позволяет наглядно видеть, что с увеличением времени взвешивания \mathfrak{T} погрешность $\delta\mathcal{M}_\tau$ уменьшается и, например, через 15 минут с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,9$ при $\tau = 0,2\text{с}$ и $\sigma[Q]/\bar{Q} = 0,3$ становится меньше, чем 0,21% ($|\delta\mathcal{M}_\tau| < \varepsilon < \varepsilon' \cdot \sigma[Q]/\bar{Q} = 0,7 \cdot 0,3 = 0,21\%$).

По тем же формулам на рис. 4.10 построена аналогичная номограмма, но в отличие от предыдущей позволяющая оценить погрешность $\delta\mathcal{M}_\tau$ при разных значениях коэффициента заполнения θ и разной степени неравномерности нагрузки α .

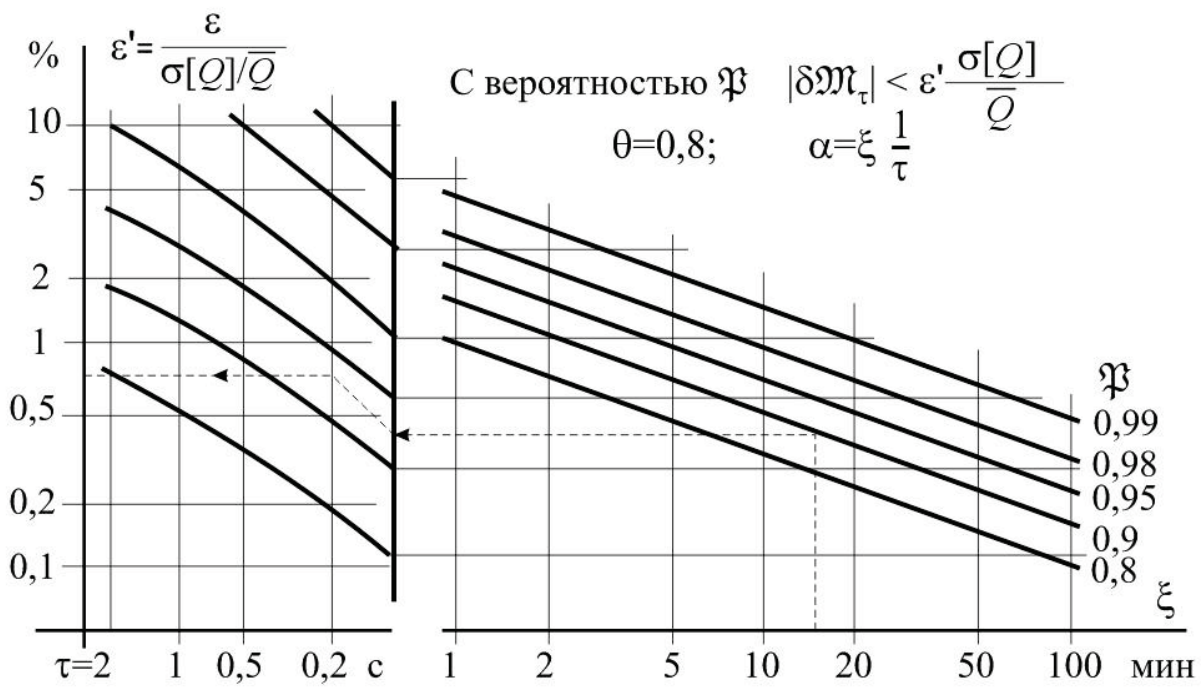


Рисунок 4.9 – Номограмма для определения δm_τ по τ , β и α

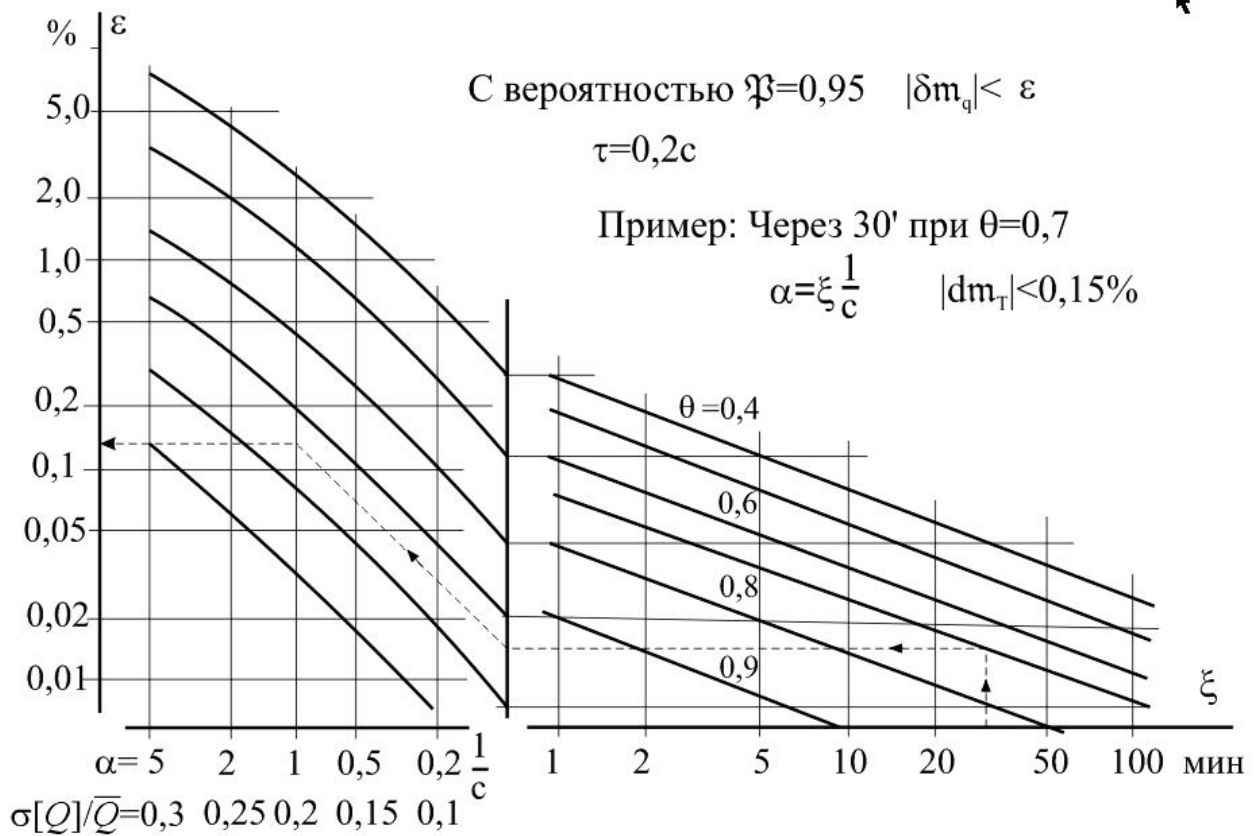


Рисунок 4.10 – Номограмма для определения δm_τ по τ , θ и α

Величина погрешности δM_τ , как уже указывалось выше, существенно зависит от коэффициента заполнения θ . Например, значение погрешности, которое будет достигнуто при $\theta = 0,8$ за 5 минут, при $\theta = 0,6$ будет достигнуто только через полчаса (см. рис. 4.10).

Для вычисления общей погрешности весов понадобится дисперсия $D[\delta M_\tau]$, которую можно найти следующим образом.

Если считать, что погрешность δM_τ следует нормальному закону распределения¹, то с вероятностью 0,954 эта погрешность не превысит двух среднеквадратических отклонений. Подставляя в формулу (4.57) $P = 0,954$ и $\delta > 2\sigma[\delta M_\tau]$, найдем:

$$\sigma[\delta M_\tau] < \frac{3,3}{\alpha} \cdot \frac{\sigma[Q]}{Q} \sqrt{\frac{1}{\tau T} f(\alpha, \theta, \tau)}, \quad (4.59)$$

а дисперсия

$$D[\delta M_\tau] < \frac{11}{\alpha^2} \left(\frac{\sigma[Q]}{Q} \right)^2 \frac{f(\alpha, \theta, \tau)}{\tau T}. \quad (4.60)$$

На рис. 4.11 показан принятый закон распределения погрешностей (сплошная линия), а также граница (пунктирная линия), за пределы которой с вероятностью $P = 0,954$ не выходит погрешность, рассчитанная по формуле (4.57).

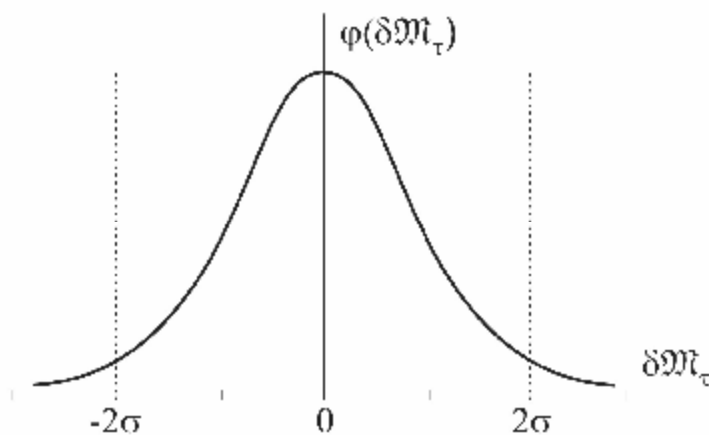


Рисунок 4.11 – Плотность распределения погрешностей δM_τ

Если закон распределения вероятностей $\varphi(\delta M_\tau)$ отличается от нормального, коэффициенты 3,3 и 11 в формулах (4.59) и (4.60) немного изменят свое значение.

¹ Мы вправе сделать такое допущение, принимая во внимание природу возникающей погрешности.

Вывод. Методическая погрешность $\delta\mathcal{M}_\tau$ интегралосуммирующих весов, рассмотренных в разд. 4.2, уменьшается с увеличением времени взвешивания и через 10...15 минут становится меньше, чем 0,2...0,3% даже при очень неравномерной нагрузке, При обычно встречающихся нагрузках с умеренной неравномерностью погрешность не превышает сотых долей процента.

4.4. Погрешность, вызванная дискретностью обрабатываемой информации

При работе конвейерных весов информация о погонной массе и скорости движения груза поступает в прибор от датчиков в дискретной форме – в виде последовательности импульсов; в приборе производится дискретное преобразование поступившей информации и, наконец, регистрация результата взвешивания также производится при помощи дискретного счетчика. Дискретность обрабатываемой информации вызывает появление погрешности от дискретности ($\delta\mathcal{M}_{\text{дис}}$). Проведем анализ этой погрешности.

Длительность τ разрешающего импульса равна времени, в течение которого на выход схемы КлЗ (рис.4.1) от генератора Г пройдет K_4 импульсов. Как видно из рис. 4.12:

$$\tau = \xi_0 T_G + (K_4 - 1)T_G, \quad \text{если } \xi_0 T_G < T_G - t_G + t_{\min} \quad (4.61)$$

и

$$\tau = \xi_0 T_G + K_4 T_G, \quad \text{если } \xi_0 T_G \geq T_G - t_G + t_{\min}. \quad (4.62)$$

Здесь ξ_0 – дробная часть (доля) первого периода напряжения генератора (u_G), попадающая в интервал τ ;

$T_G = 1 / f_G$ – период напряжения u_G генератора Г;

t_G – длительность импульса u_G ;

t_{\min} – минимальная длительность импульса, записывающего (по переднему фронту) единицу в счетчик С2.

Объединяя обе эти формулы в одну, запишем;

$$\tau_{\min} = \left[\xi_0 + K_3 - \text{entier} \left(\xi_0 + \theta_G - \frac{t_{\min}}{T_G} \right) \right] T_G, \quad (4.63)$$

где $\theta_G = t_G / T_G$ – коэффициент заполнения импульса генератора.

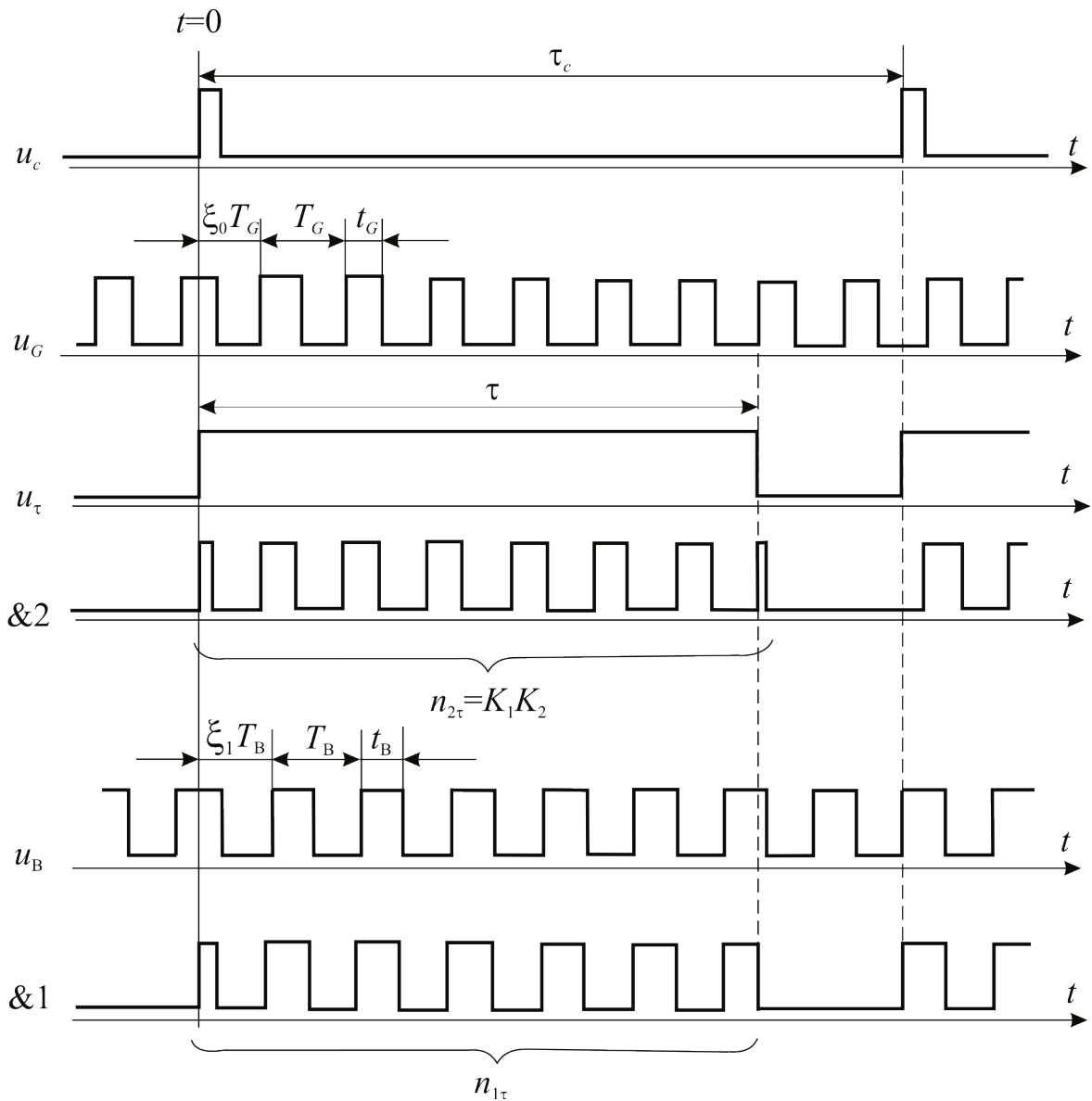


Рисунок 4.12 – Временные диаграммы

Как следует из формулы (4.63), длительность τ разрешающего импульса не постоянна, а равномерно распределена¹ в интервале от

$$\tau_{\min} = \left(K_4 - 1 - \theta_G + \frac{t_{\min}}{T_G} \right) T_G \quad (4.64)$$

до

$$\tau_{\max} = \left(K_4 - \theta_G + \frac{t_{\min}}{T_G} \right) T_G. \quad (4.65)$$

Зависимость $\tau f_G = F(\xi_0)$ показана на рис. 4.13.

¹ Случайная величина ξ_0 равномерно распределена в интервале $0 \dots 1$.

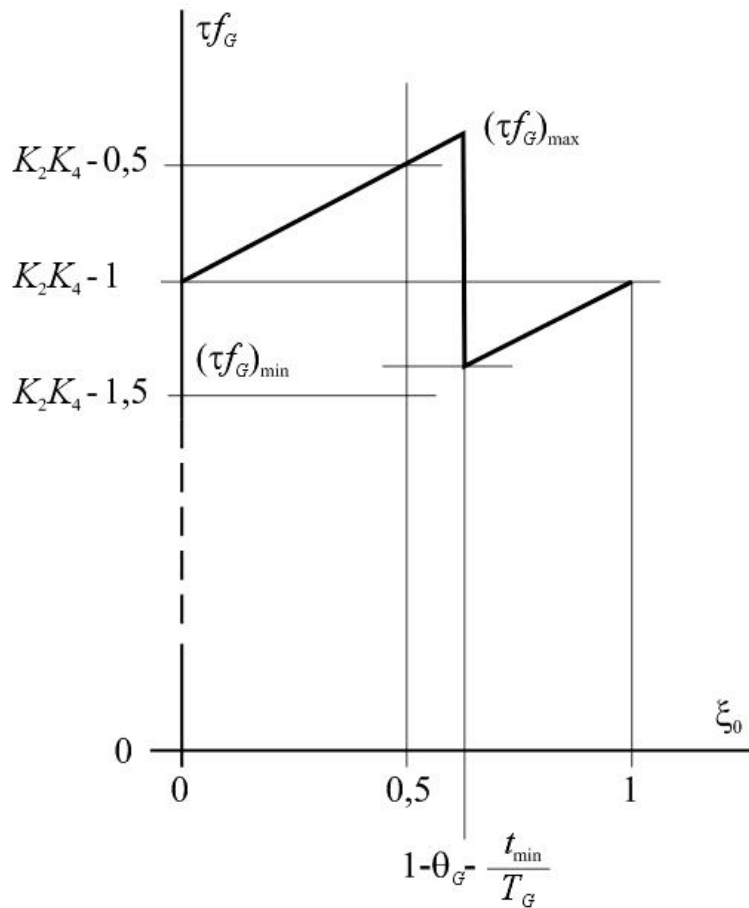


Рисунок 4.13 – Зависимость $\tau f_G = F(\xi_0)$

Математическое ожидание величины τ –

$$M[\tau] = \left(K_4 - 0,5 - \theta_G + \frac{t_{\min}}{T_G} \right) T_G. \quad (4.66)$$

При $\theta_G = 0,5$ (что обычно имеет место) и $\frac{t_{\min}}{T_G} \leq 0,5$

$$M[\tau] \approx \frac{K_4 - 1}{f_G}. \quad (4.67)$$

Число импульсов датчика веса, проходящих за время τ на выход схемы И1, зависит не только от частоты f_B , но и от того, как накладываются передний и задний фронты импульса u_τ на импульсы u_B .

Если передний фронт импульса u_τ попадает на импульс u_B (рис.4.12), то на выходе схемы И1 появится дополнительный импульс, который переключает триггер счетчика С1 (если длительность этого образовавшегося импульса не менее, чем t_{\min}).

Если на импульс u_B попадает задний фронт импульса u_τ , то длительность последнего импульса, попадающего в интервал τ , сокращается, если она окажется меньше, чем t_{\min} , триггер счетчика не переключится, импульс не учтётся.

С учетом сказанного, количество импульсов, прошедших за время τ на выход схемы Кл1

$$n_{1\tau} = \text{entier} \left(\frac{\tau - \xi_1 T_B - t_{\min}}{T_B} \right) + 1 + \text{entier} \left(\xi_1 + \theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B} \right), \quad (4.68)$$

где ξ_1 – дробная часть (доля) первого периода напряжения датчика веса (u_B), попадающая в интервал τ (см. рис. 4.12);

$T_B = 1/f_B$ – период напряжения u_B ;

$\theta_B = t_B/T_B$ – коэффициент заполнения импульсов датчика веса.

После пересчета счетчиком С1 на вход «+» вычитателя поступят импульсы в количестве

$$n_\tau^{\langle\langle + \rangle\rangle} = \frac{n_{1\tau}}{K_1} = \frac{1}{K_1} \left[\text{entier} \left(\frac{\tau - t_{\min}}{T_B} - \xi_1 \right) + \text{entier} \left(\theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1 \right) + 1 \right]. \quad (4.69)$$

За это же время на вход «-» поступят импульсы в количестве

$$n_\tau^{\langle\langle - \rangle\rangle} = \frac{K_4}{K_2}. \quad (4.70)$$

Следовательно, число импульсов, приведенное ко входу итогового (электромагнитного) счетчика, –

$$\begin{aligned} n_\tau &= \frac{n_\tau^{\langle\langle + \rangle\rangle} - n_\tau^{\langle\langle - \rangle\rangle}}{K_3} = \\ &= \frac{1}{K_1 K_3} \left[\text{entier} \left(\frac{\tau - t_{\min}}{T_B} - \xi_1 \right) + \text{entier} \left(\theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1 \right) + 1 \right] - \frac{K_4}{K_2 K_3}. \end{aligned} \quad (4.71)$$

За время взвешивания \mathfrak{T} число импульсов N , поступающих на итоговый счетчик, –

$$N = \sum_{\mathfrak{N}} n_\tau = \mathfrak{N} \bar{n}_\tau, \quad (4.72)$$

где $\mathfrak{N} = \bar{f}_c \mathfrak{T}$ – число циклов взвешивания за время \mathfrak{T} .

Среднее (за время \mathfrak{T}) число импульсов, поступающих на вход ЭМС за

один цикл взвешивания (\bar{n}_τ), из выражения (4.71), –

$$\bar{n}_\tau = \frac{1}{K_1 K_3} \left[(\bar{\tau} - t_{\min}) f_B + \bar{\theta}_B - \frac{t_{\min}}{T_B} \right] - \frac{K_4}{K_2 K_3}. \quad (4.73)$$

Здесь $\bar{f}_B = 1/\bar{T}_B$ – среднее (за время \mathfrak{T}) значение частоты на выходе 4С; $\bar{\tau} = M[\tau]$ – среднее значение величины τ .

Подставляя выражение для \bar{n}_τ в формулу (4.72), а также заменив

$$\bar{f}_B = f_{B0} + k_{gf} \bar{q}_r, \quad \bar{f}_c = k_{vf} \nu \quad (4.74)$$

и, учитывая что

$$\bar{q}_r \bar{\nu} \mathfrak{T} = \mathfrak{M}, \quad (4.75)$$

после несложных преобразований найдем:

$$N = \frac{k_{gf} k_{vf} (\bar{\tau} - 2t_{\min})}{K_1 K_3} \mathfrak{M} + \mathfrak{N} \frac{\bar{\tau} - 2t_{\min}}{K_1 K_3} f_{B0} - \mathfrak{N} \frac{1}{K_3} \left(\frac{K_4}{K_2} - \frac{\bar{\theta}_B}{K_1} \right). \quad (4.76)$$

Приняв во внимание (4.66), запишем окончательно:

$$N = \frac{k_{gf} k_{vf}}{K_1 K_3} \left(\frac{K_4 - 0,5 - \theta_G}{f_G} - t_{\min} \right) \mathfrak{M} + \quad (4.77)$$

$$+ \mathfrak{N} \frac{f_{B0}}{K_1 K_3} \left(\frac{K_4 - 0,5 - \theta_G}{f_G} - t_{\min} \right) - \mathfrak{N} \left(\frac{K_4}{K_2} - \frac{\theta_B}{K_1} \right) \frac{1}{K_3}.$$

Сравнивая полученные формулы (4.76) и (4.77) с ранее выведенными без учета дискретности (4.29) и (4.30), можно сделать следующие выводы.

1. Коэффициент пропорциональности между числом импульсов N и массой \mathfrak{M} незначительно отличается от того, который получен без учета дискретности. Он постоянен, если постоянно время t_{\min} . Если даже допустить, что t_{\min} изменяется в пределах нескольких микросекунд, то по сравнению с τ (0,15...0,25с) это изменение настолько мало, что им можно пренебречь.

2. Столь же незначительно отличаются друг от друга вторые, а также третьи слагаемые.

Приравнявая нулю второе и третье слагаемое в выражении (4.77), получим условие, аналогичное (4.32):

$$\frac{f_G}{f_{B0}} \cdot \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{1 - \frac{K_2 \bar{\theta}_B}{K_1 K_4}}{1 - \frac{0,5 + \theta_G + t_{\min/\bar{T}_B}}{K_4}} = 1. \quad (4.78)$$

Эта формула отличается от (4.32) наличием третьего сомножителя, весьма близкого к единице (обычно 0,97...0,99), поэтому при расчете прибора можно пользоваться формулой (4.32), а условие (4.78) обеспечить при тарировании весов.

При правильном тарировании и градуировке весов математическое ожидание погрешности от дискретности равно нулю, однако, при каждом цикле взвешивания возникает погрешность, которую можно определить следующим образом.

За один цикл взвешивания через весовой участок проходит груз массой

$$m = q_r v T_c \quad (4.79)$$

и, следовательно, на итоговый счётчик должно пройти n_m импульсов, число которых определяется по формуле (4.77), –

$$n_m = \frac{k_{qf} k_{vf}}{K_1 K_3} \left(\frac{K_4 - 0,5 - \theta_G}{f_G} - t_{\min} \right) q_r v T_c. \quad (4.80)$$

Подставляя сюда

$$q_r \frac{f_B - f_{B0}}{k_{qf}} = \frac{f_r}{k_{qf}}, \quad v = \frac{f_c}{k_{vf}}, \quad (4.81)$$

получим:

$$n_m = \frac{f_r}{K_1 K_3} \left(\frac{K_4 - 0,5 - \theta_G}{f_G} - t_{\min} \right). \quad (4.82)$$

Погрешность единичного взвешивания определим по формуле

$$\delta_{д1} = \frac{n_\tau - n_m}{\tilde{n}_m}, \quad (4.83)$$

где

$$\tilde{n}_m \approx n_m \approx \frac{f_r}{f_G} \cdot \frac{K_4}{K_1 K_3}. \quad (4.84)$$

Подставив в формулу (4.83) выражения для n_τ (4.71), n_m (4.80) и \tilde{n}_m (4.84), получим:

$$\delta_{д1} = \frac{f_G}{f_r} \cdot \frac{K_1}{K_4} \left\{ \frac{1}{K_1} \left[\text{entier} \left(\frac{\tau - t_{\min}}{T_B} - \xi_1 \right) + \text{entier} \left(\theta - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1 \right) + 1 \right] - \frac{K_4}{K_2} - \frac{f_r}{K_1} \left(\frac{K_4 - 0,5 - \theta_G}{f_G} - t_{\min} \right) \right\}. \quad (4.85)$$

Если в формулу (4.85) подставить математическое ожидание случайных величин

$$M \left[\text{entier} \left(\frac{\tau - t_{\min}}{T_B} - \xi_1 \right) \right] = (\bar{\tau} - t_{\min}) f_B - 1 \quad (4.86)$$

и

$$M \left[\text{entier} \left(\theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1 \right) \right] = \theta_B - t_{\min} f_B, \quad (4.87)$$

то после преобразований найдём, что математическое ожидание погрешности $M[\delta_{д1}] = 0$.

Среднее значение погрешности $\delta_{д1}$ после \mathfrak{M} циклов взвешивания может быть оценено неравенством Чебышева:

$$\mathfrak{P} \{ |\bar{\delta}_{д1}| < \varepsilon \} \geq 1 - \frac{\mathfrak{D}[\delta_{д1}]}{\mathfrak{N} \varepsilon^2}, \quad (4.88)$$

откуда, с учетом того, что $\mathfrak{N} = \mathfrak{T} / T_c = \mathfrak{T} f_c$:

$$|\bar{\delta}_{д1}| < \varepsilon \leq \frac{\sigma[\delta_{д1}]}{\sqrt{\mathfrak{T} f_c (1 - \mathfrak{P})}}. \quad (4.89)$$

Дисперсию погрешности найдем из формулы (4.85), [166, форм. 3.9.7]:

$$\mathfrak{D}[\delta_{д1}] = \left(\frac{f_G}{f_r K_4} \right)^2 \left\{ \mathfrak{D} \left[\text{entier} \left(\frac{\tau - t_{\min}}{T_B} - \xi_1 \right) \right] + \mathfrak{D} \left[\text{entier} \left(\theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1 \right) \right] \right\}. \quad (4.90)$$

Дисперсия случайной величины $\text{entier}\left(\theta - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1\right)$ определяется по формуле:

$$\mathcal{D}\left[\text{entier}\left(\theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1\right)\right] = \theta_B(1 - \theta_B) - \frac{t_{\min}}{T_B}\left(1 - \theta_B - \frac{t_{\min}}{T_B}\right). \quad (4.91)$$

При $\theta = 0,5$ и $\frac{t_{\min}}{T_B} \ll 0,5$ видно, что $\mathcal{D}\left[\text{entier}\left(\theta - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1\right)\right] \approx 0,25$.

Формулу дисперсии случайной величины $\text{entier}\left(\theta - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1\right)$ получить в общем виде не удалось. Установлено, что эта дисперсия принимает наибольшее значение $\mathcal{D}_{\max} = 0,25$, когда математическое ожидание $M\left[\text{entier}\left(\theta - \frac{t_{\min}}{T_B} + \xi_1\right)\right]$ отличается от целого числа на 0,5.

Если в (4.90) подставить наибольшее возможное значение суммы дисперсий, равное 0,5, то из формулы (4.89), с учетом того, что $\sigma[\delta_{д1}] = \sqrt{\mathcal{D}[\delta_{д1}]}$ и $K_4 / f_G = \tau$ (4.14), получим

$$|\bar{\delta}_{д1}| < \varepsilon \leq \frac{0,5}{f_r \tau \sqrt{\mathfrak{F} f_c (1 - \mathfrak{P})}}. \quad (4.92)$$

Эта погрешность, как правило, незначительна. Например, для весов ЭКЗД-70М при 20%-ной нагрузке $f_r = 160$ Гц, $\tau = 0,2$ с, $f_c = 4$ Гц. Через 30 минут от начала взвешивания¹ погрешность

$$|\delta_{д1}| = \frac{0,5}{160 \cdot 0,2 \sqrt{1800 \cdot 4 \cdot (1 - 0,9)}} = 5,8 \cdot 10^{-4},$$

то есть с вероятностью 0,9 погрешность будет меньше, чем 0,058%. При больших нагрузках погрешность будет еще меньше.

Вторая составляющая погрешности от дискретности ($\delta_{д2}$) вызвана дискретностью отсчетного устройства.

К началу работы весов на счетчиках С1, С2 и С3 могут быть записаны

¹ Согласно проекту стандарта "Технические условия на конвейерные весы общего пользования" минимальная масса взвешиваемого груза, при которой гарантируется паспортная погрешность весов, равна 10% максимальной часовой производительности конвейера. Этому соответствует время взвешивания $\mathfrak{T}_{\min} = 360 / \bar{Q}^*$.

случайные числа, в результате чего на ЭМС может поступить импульс раньше, чем через весоизмерительный участок пройдет масса груза, равная «цене» \mathcal{C} (кг/имп) одного импульса. Возникающая при этом абсолютная погрешность дискретности Δ_d может достигать величины $+1\mathcal{C}$ и распределена в интервале $0 \dots \mathcal{C}$ по закону равномерной плотности (рис. 4.14,а).

После окончания взвешивания в счетчике С1 останется записанной информация, которая никак не отражена в итоговом показании ЭМС. Возникающая при этом абсолютная погрешность Δ_d'' равномерно распределена в интервале $-1 \dots 0$ (рис. 4.14,б).

Для рассматриваемого случая закон распределения суммарной погрешности $\Delta_{d2} = \Delta_d' + \Delta_d''$ имеет вид треугольника, как показано на рис. 4.14,в.

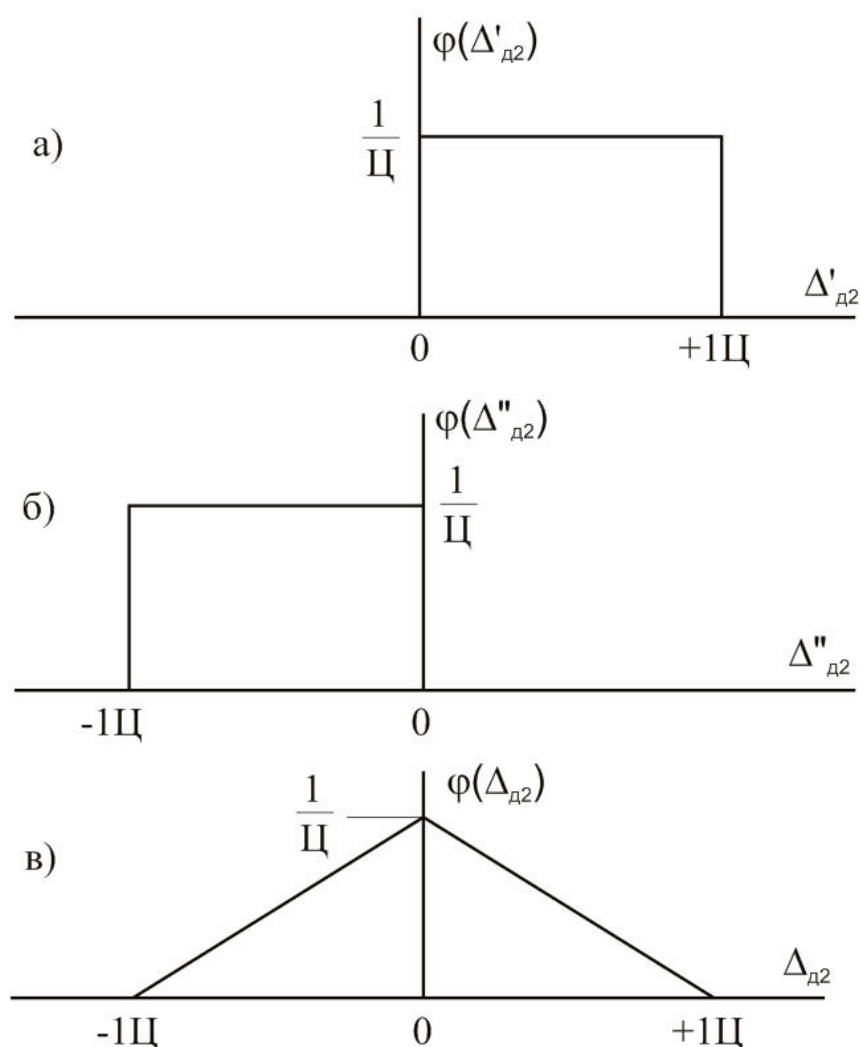


Рисунок 4.14 – Плотность распределения погрешности Δ_{d2}

Относительная погрешность дискретности

$$\delta_{d2} = \Delta_{d2} / \mathfrak{M}, \quad (4.93)$$

где \mathfrak{M} – масса груза, перемещенного конвейером за время \mathcal{T} .

Так как $\mathfrak{M} = \bar{Q}\mathfrak{T} = Q_{\max}\bar{Q}^*\mathfrak{T}$, то

$$\delta_{д2} = \frac{\Delta_{д2}}{Q_{\max}\bar{Q}^*\mathfrak{T}}. \quad (4.94)$$

Плотность распределения вероятности этой погрешности (рис.4.15) имеет тот же вид, что и для абсолютной погрешности, причем ее максимальное значение—

$$|\delta_{д2}|_{\max} = \frac{\mathfrak{C}}{Q_{\max}\bar{Q}^*\mathfrak{T}}. \quad (4.95)$$

Полученная формула позволяет определить «цену» импульса, которая принимается в расчет при проектировании конвейерных весов:

$$\mathfrak{C} = Q_{\max} M[Q^*] \mathfrak{T} |\delta_{д2}|_{\max}, \quad (4.96)$$

где $m[Q^*]$ – математическое ожидание производительности в относительных единицах.

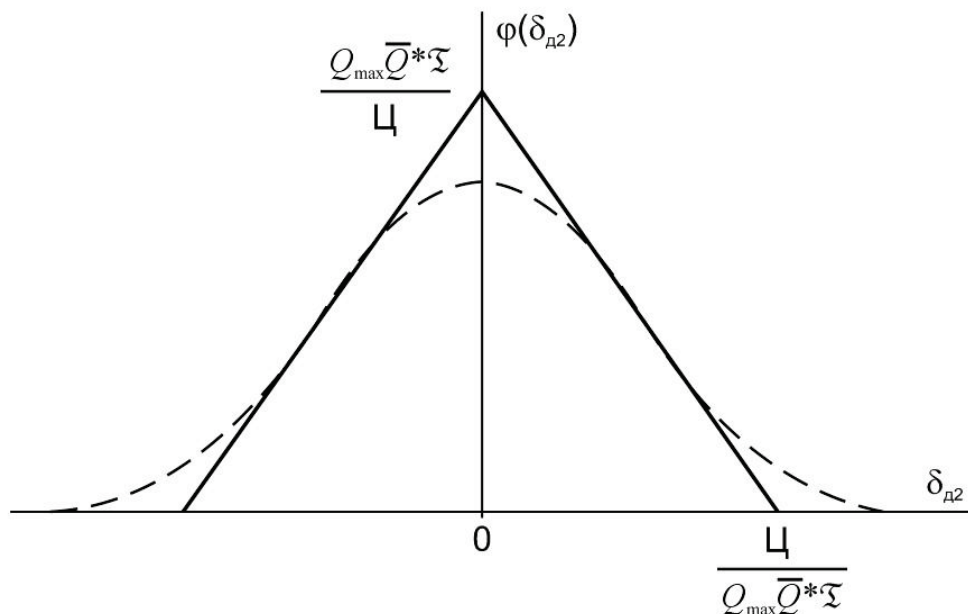


Рисунок 4.15 – Плотность распределения вероятности погрешности $\delta_{д2}$

Если подставить в (4.96) $\mathfrak{T} = 360 / \bar{Q}^*$ ¹ то максимальная «цена» импульса

$$\mathfrak{C}_{\max} = 360 Q_{\max} |\delta_{д2}|_{\max}. \quad (4.97)$$

¹ См. примечание на стр. 134.

В том случае, когда индицируется состояние счетчика СЗ, по формуле (4.97) определяется отношение $(\Pi/K_s)_{\max}$.

Следует отметить, что действительная «цена» каждого отдельного импульса отличается от расчетного (среднего) значения. Это объясняется тем, что интервал времени T_{B_i} между импульсами на выходе вычитателя В содержит целое число периодов T^+ следования импульсов, поступающих на Вх. «+», тогда как массе \mathfrak{M}_c , численно равной «цене» импульса, соответствует, как правило, не кратное T^+ число периодов. Не приводя здесь вывода формул, укажем, что «цена» каждого отдельного импульса может лежать в пределах:

$$\Pi_{\min} = \Pi_p \frac{\text{entier}\left(\frac{1}{q_r^*} + 1\right)}{\frac{1}{q_r^*} + 1}, \quad (4.98)$$

$$\Pi_{\max} = \Pi_p \frac{\text{entier}\left(\frac{1}{q_r^*} + 1\right) + 1}{\frac{1}{q_r^*} + 1}, \quad (4.99)$$

где Π_p – расчетное значение «цены» деления (см. форм. (4.29), (4.31)) –

$$\Pi_p = \frac{1}{K_{\mathfrak{M}}} = \frac{K_1 K_3}{k_{qp} k_{pf} k_{vf} \tau}; \quad (4.100)$$

q_r^* – относительное значение погонной массы груза, среднее в интервале между импульсами.

Неоднозначность «цены» импульса вносит дополнительную погрешность, в результате чего максимальная погрешность дискретности увеличивается, приближаясь (при $q_r^* \rightarrow 1$) к величине

$$|\delta_{d2}|_{\max} = 1,5 \frac{\Pi_p}{Q_{\max} \bar{Q}^* \tau}. \quad (4.101)$$

Вместе с тем видоизменяется плотность распределения вероятностей, как показано на рис. 4.15 пунктиром. Точно определить этот закон не представляется возможным. Допуская некоторую неточность, можно считать его нормальным со средним квадратическим отклонением

$$\sigma[\delta_{д2}] = \frac{0,5\Pi_p}{2K_3 Q_{\max} \bar{Q}^* \tau}. \quad (4.102)$$

Для уменьшения погрешности $\delta_{д2}$ можно индцировать состояние счетчика С5. В этом случае

$$\sigma[\delta_{д2}] = \frac{\Pi_p}{2K_3 \bar{Q}_{\max} \tau}. \quad (4.103)$$

Вывод. В конвейерных весах, работающих на принципе, изложенном в разд. 4.2, погрешность дискретности может быть сведена до величины 0,2...0,1% и меньше.

ГЛАВА 5

МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА С ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИЕЙ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЗВЕШИВАНИЯ ГРУЗА НА ЛЕНТЕ КОНВЕЙЕРА

5.1. Принципы построения и функционирования микропроцессорных конвейерных весов

Применение микропроцессоров (МП) в весоизмерительных устройствах и комплексах открывает широкие возможности для создания нового поколения точных, надежных и удобных в эксплуатации конвейерных весов, но вместе с тем требует нового подхода к синтезу структурных схем и алгоритмов функционирования.

Независимо от принципа действия и типа используемых датчиков веса, укрупненная структурная схема микропроцессорных конвейерных весов по существу одинакова и содержит измерительные преобразователи массы и скорости (перемещения), микроэлектронное управляющее и вычислительное устройство (микро-УВУ), а также панель управления с устройствами индикации и регистрации (рис. 5.1). Микро-УВУ строится на основе микропроцессора и других ИС большой и средней степени интеграции.

При более детальной разработке структурной схемы необходимо учитывать:

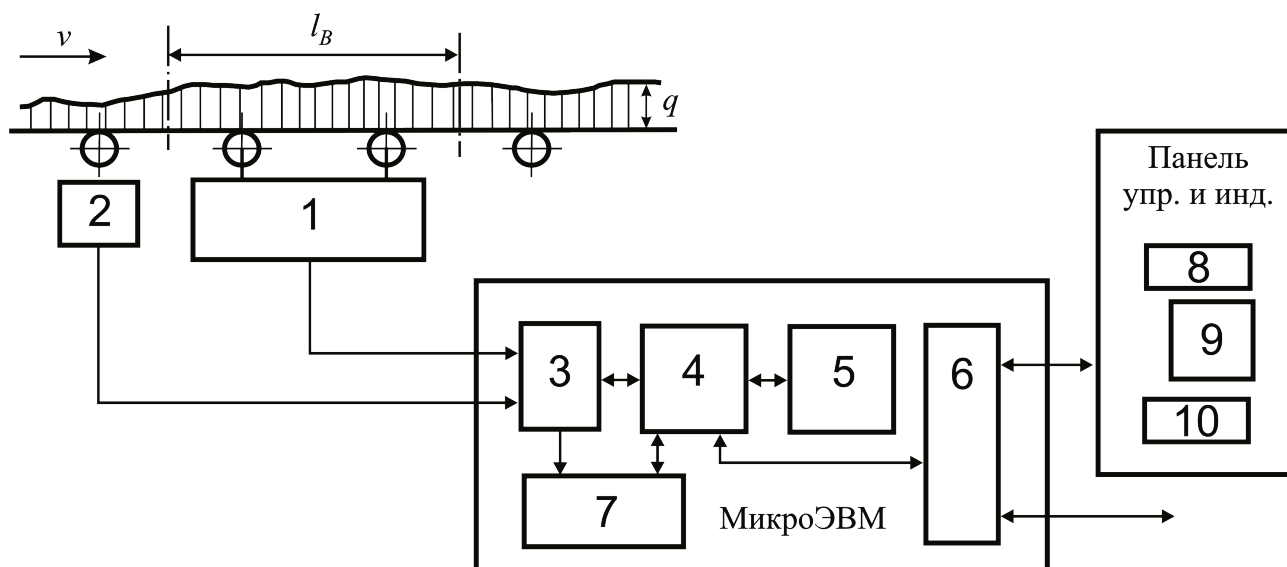
- принцип действия конвейерных весов;
- тип используемых датчиков веса (частотные, тензорезисторные);
- функции, выполняемые, аппаратными средствами;
- тип измерительного цикла;
- набор вспомогательных функций, выполняемых микропроцессорной системой.

В микропроцессорных весах могут быть реализованы все пять принципов, которые рассмотрены в разд. 2.1.

В МП весах измерительные функции могут частично или полностью выполняться аппаратными средствами. Это требует некоторого расширения аппаратной части прибора, но вместе с тем сокращается программная часть, что снижает требования к быстродействию процессора и в конечном итоге может привести к упрощению схемы.

Для микропроцессорных конвейерных весов характерна цикличность измерительного процесса. На рис. 5.2 показаны временные диаграммы основных измерительных циклов.

Измерительный цикл, реализующий принцип суммирования (рис. 5.2а) начинается в момент прихода нечетного импульса от датчика перемещения, и в течение первого полупериода цикла программным способом (подсчетом числа машинных циклов) измеряется время перемещения груза на половину длины весоизмерительного участка:



1 – измерительный преобразователь массы; 2 – измерительный преобразователь скорости (перемещения); 3, 6 – интерфейсы; 4 – процессор; 5 – память (ПЗУ, ППЗУ, ОЗУ); 7 – аппаратная часть схемы; 8, 9 – приборы индикации и регистрации; 10 – органы управления и настройки весов.

Рисунок 5.1 – Укрупненная структурная схема микропроцессорных конвейерных весов

$$N_T = 0,5T_c = 0,5 \cdot l_B / v. \quad (5.1)$$

В момент прихода четного импульса от ДП измеряется сигнал датчика веса. При использовании частотных ДВ, частота измеряется программным способом по периоду (одному или нескольким). Если используются тензорезисторные датчики, то измерение производится аппаратно-программным способом (см. разд. 5.3).

По окончании измерения производится обработка информации по программе, в результате чего вычисляется масса порции груза и добавляется к предыдущим для получения нарастающего итога. При необходимости вычисляется и индицируется погонная масса q , скорость v и производительность Q . Обработка должна закончиться раньше прихода очередного нечетного импульса ДС.

Цикл, реализующий путевое интегрирование¹ и показанный на рис. 5.2б, подобен циклу a , но отличается тем, что отрезок пути Δx должен быть возможно короче. Не имея преимуществ, этот метод тем хуже, что требует большего быстродействия от микропроцессора.

¹ Термин предложен С.А. Самариним, но сам метод использовался еще в механических весах.

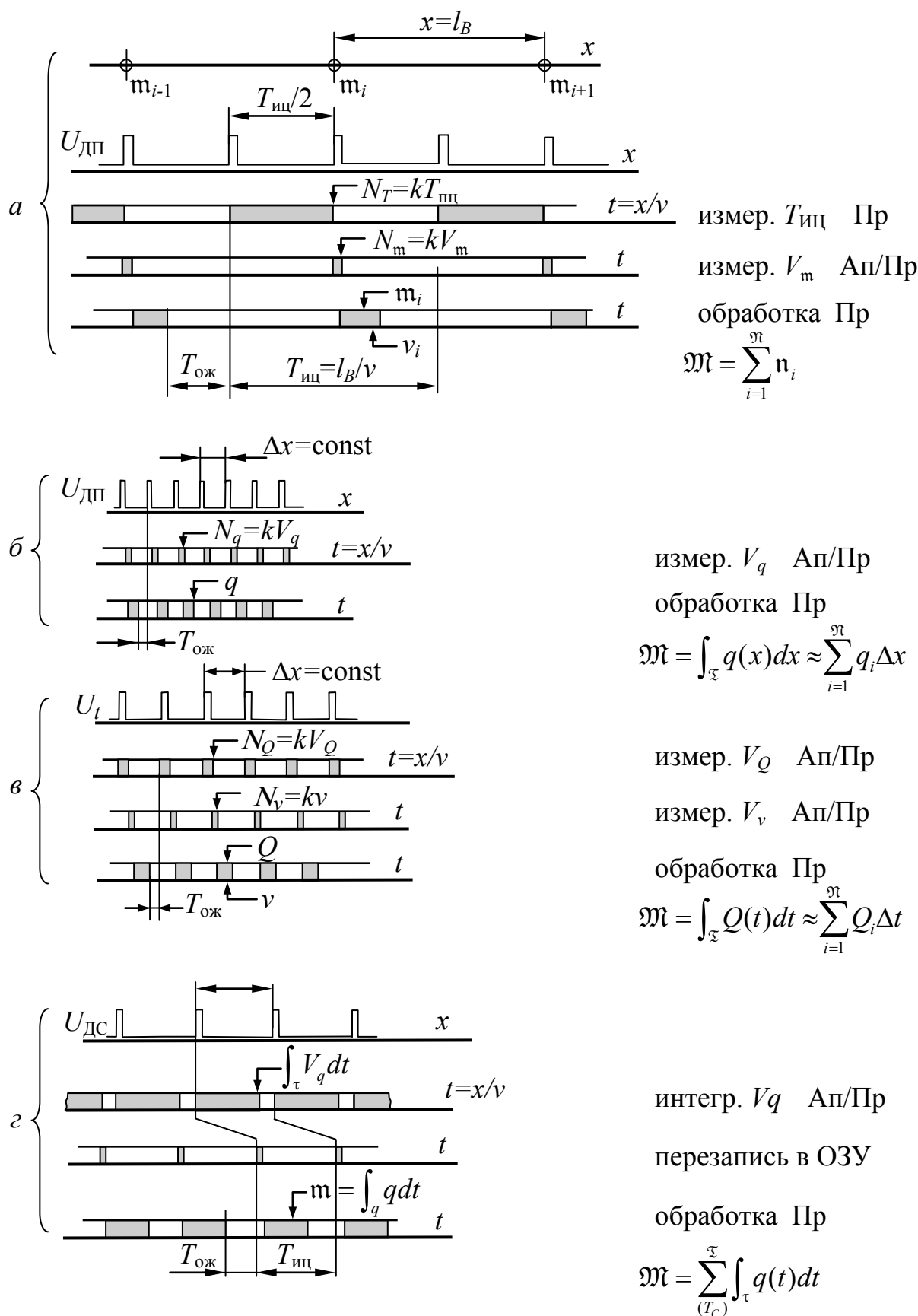


Рисунок 5.2. – Временные диаграммы основных измерительных циклов, в которых реализованы методы суммирования (а), интегрирования (б, в), интегросуммирования (г...з)

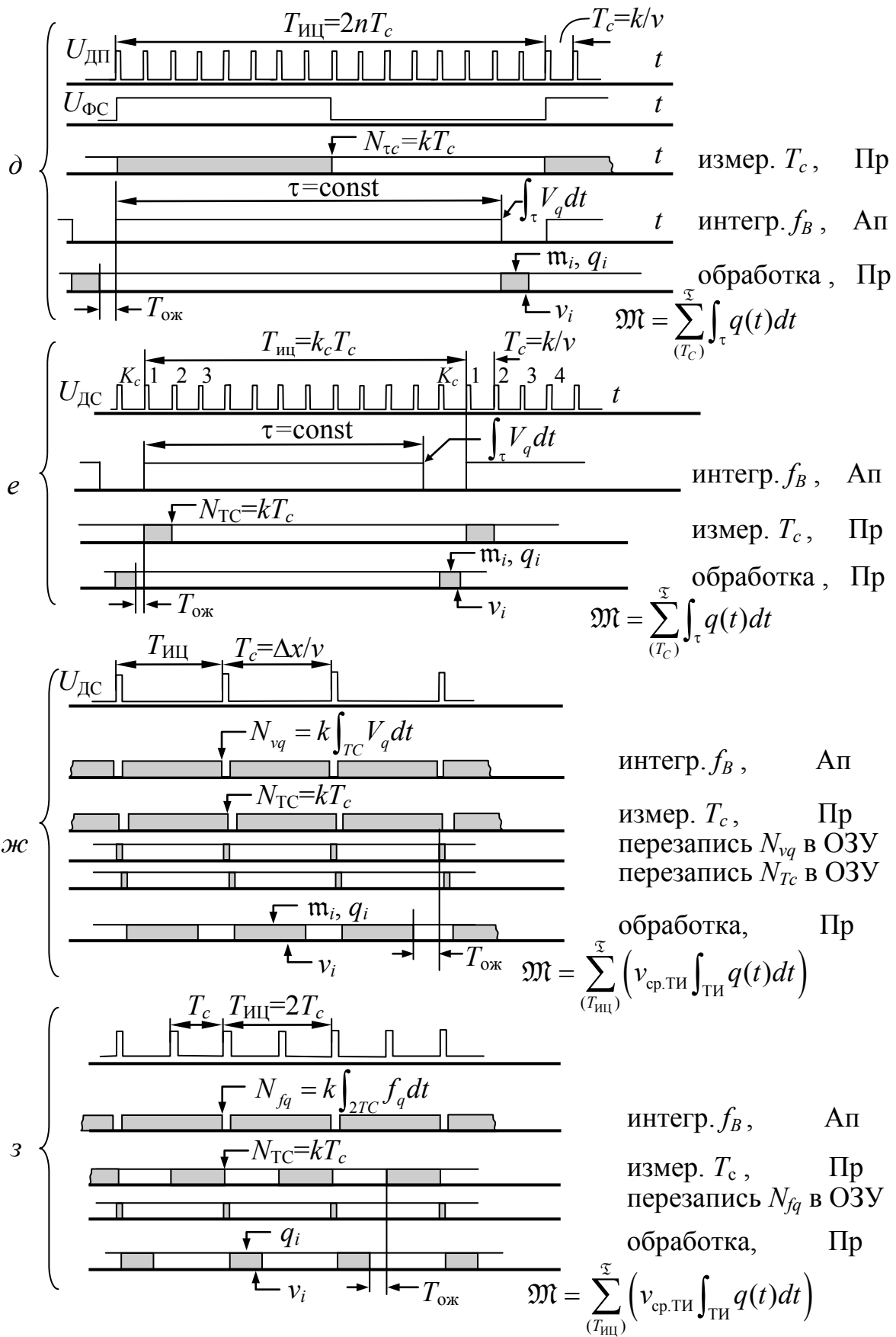


Рисунок 5.2. – Продолжение

Метод интегрирования производительности реализуется циклом по рис. 5.2в. Через небольшие постоянные интервалы времени Δt аппаратно-программным способом измеряется аналоговый сигнал, пропорциональный $Q = qv$ (см. рис. 1.7), и сигнал тахогенератора-датчика скорости, после чего производится обработка по программе для получения m , Q , v и q .

Метод интегротсуммирования в весах с линейными частотными датчиками веса реализуется циклом по рис. 5.2г. Интегрирование аппаратными средствами за постоянное время τ начинается с приходом импульса от ДС. По окончании интегрирования информация записывается в память и обрабатывается. Программный цикл сдвинут относительно аппаратного, так что в течение некоторого времени они накладываются друг на друга.

При интегрировании программными средствами обработка должна производиться в паузах в течение времени $t_{об} < T_{иц} - \tau$. Для увеличения этого времени при достаточно большом $\theta = \tau/T_{иц}$ необходимо увеличить $T_{иц}$ до $k_c T_c$, где $k_c = 8...32$. Такие циклы показаны на рис. 5.2д и 5.2е. Скорость v (для индикации Q) измеряется и вычисляется программными средствами за время T_c или $k_c T_c$.

Метод интегротсуммирования с умножением частичных интегралов на скорость реализуется измерительными циклами по рис. 5.2ж и 5.2з. Последний отличается тем, что скорость измеряется программными средствами. Метод целесообразен при использовании частотных датчиков веса и изменении скорости в широких пределах.

Анализ временных диаграмм измерительных циклов показывает, что наиболее целесообразными являются:

- цикл *a*, реализующий метод суммирования; датчики веса тензорезисторные или вибрационно-частотные; датчик перемещения – импульсный;
- цикл *e* (или *д*), реализующий метод интегротсуммирования; ДВ – частотный линейный; ДС – импульсный;
- цикл *з*, реализующий метод интегротсуммирования; ДВ – частотный линейный; ДС – импульсный.

Структурные схемы и алгоритмы функционирования, реализующие некоторые методы и измерительные циклы, приведены в следующих разделах.

5.2. Структурная схема и алгоритмы управления для микропроцессорных конвейерных весов средней точности

Конвейерные весы средней точности при относительной простоте должны обеспечить:

- точность взвешивания 0,5...1%;
- непрерывный контроль точности;
- автоматическое (полуавтоматическое) тарирование;
- возможность проверки исправности датчиков и вторичного прибора;
- индикацию параметров конвейера и состояния весов;
- выдачу информационных и управляющих сигналов.

Относительно просто реализовать такие весы на частотных датчиках веса, используя первый метод интегросуммирования, согласно (2.4). Если схему и программу строить в соответствии с измерительным циклом по рис. 5.2д или е, то при оптимальном времени цикла $T_c = 0,15...0,25$ с и $\theta = \tau/T_c = 0,75...0,85$ время, остающееся на обработку информации, составит $T_c - \tau = T_c(1 - \theta) = 0,02...0,06$ с. При столь малом времени обработки от микропроцессора требуется высокое быстродействие. Подходящим может быть, например, микропроцессор с длительностью цикла $T_{\mu} = 10^{-7}$ с ($f_{\mu} = 10$ МГц).

Если время на обработку увеличить до 120...150 мс, то можно использовать микропроцессор среднего быстродействия. В этом случае для уменьшения времени взвешивания \mathfrak{T}_{\min} , при котором достигается достаточная точность, необходимо увеличивать коэффициент заполнения θ , т.е. увеличивать τ и T_c .

На рис. 5.3 показаны границы, за пределы которых с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,9$ не выйдет погрешность $\delta\mathfrak{M}_{\tau}$ для различных τ , α и \mathfrak{T} , если $T_c - \tau = 0,15$ с. Зависимости построены по формулам (4.57) и (4.58).

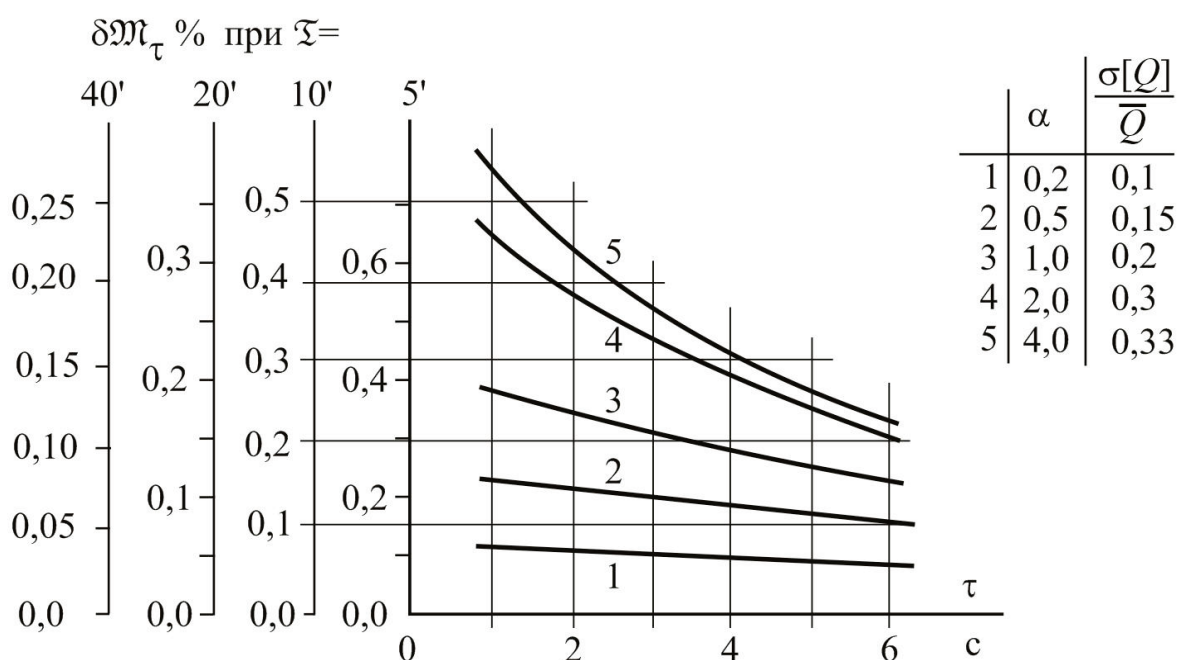


Рисунок 5.3 – Зависимость $|\delta\mathfrak{M}_{\tau}(\tau, \alpha, \mathfrak{T})|_{\max}$ при $T_c - \tau = 0,15$ с, $\mathfrak{P} = 0,9$

Из рис. 5.3 видно, что при $\tau = 4...5$ с погрешность $\delta\mathfrak{M}_{\tau}$ будет меньше 0,25...0,3% уже через 10 минут после начала взвешивания даже при очень неравномерной нагрузке ($\alpha = 2...4$).

Скорость конвейера, однако, не постоянна. С увеличением нагрузки скорость уменьшается и при этом уменьшается θ , так как

$$\theta = \frac{\tau}{T_c} = \frac{\tau}{l_c} v = \frac{\tau v_M}{l_c} \cdot \frac{v}{v_M} = \theta_M \frac{v}{v_M}, \quad (5.2)$$

где l_c – перемещение ленты, соответствующее периоду импульсов ДС; v_m – максимальная скорость; θ_m – максимальный коэффициент заполнения.

Смещение вверх границ возможных погрешностей δM_τ при уменьшении коэффициента заполнения θ для $\tau = 5\text{с}$ показано на рис. 5.4, откуда видно, что при резко переменной нагрузке конвейера ($\alpha = 2...4$) погрешность ограничивается приемлемым значением [$\delta M_\tau < (0,25...0,35\%)$] только при $\mathfrak{T} = 30...40$ мин. Если такое время сходимости недопустимо, то можно перейти к аппаратно-программному интегрированию с измерительным циклом по рис. 5.2г при $T_{\text{иц}} = 0,2...0,25\text{с}$.

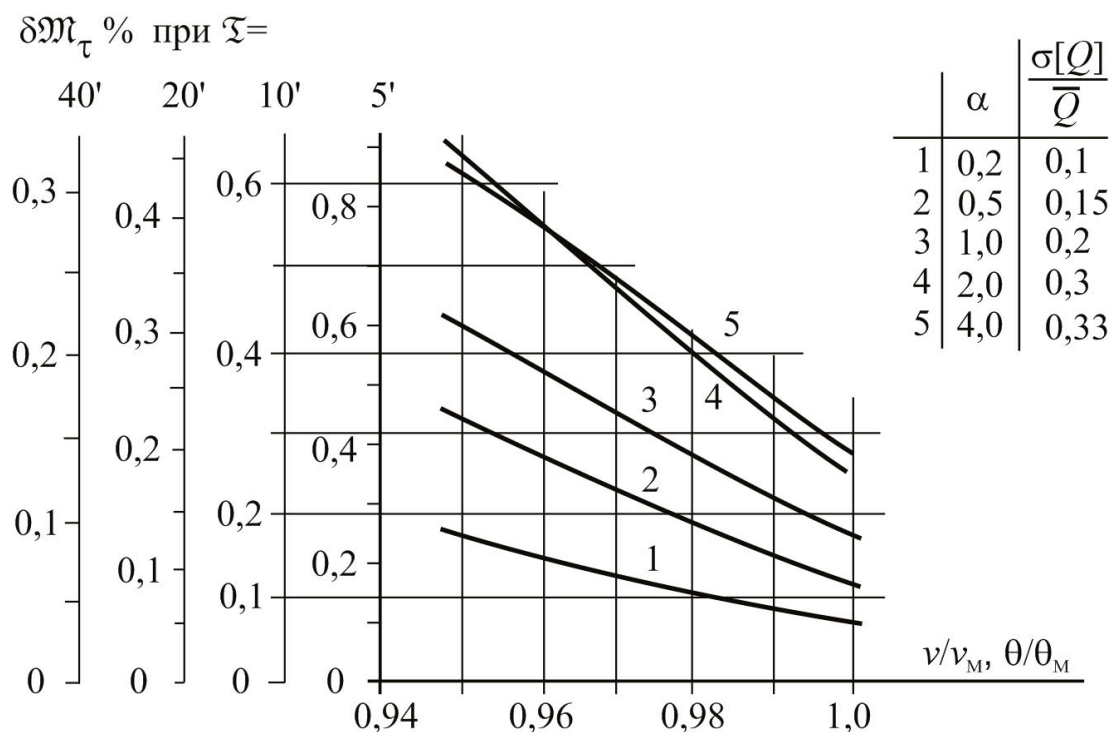


Рисунок 5.4 – Зависимость $|\delta M_\tau(v/v_m, \alpha, \mathfrak{T})|_{\text{max}}$ при $\tau=5\text{с}$, $T_{co}=5,15\text{с}$, $\mathfrak{P}=0,9$

Целесообразнее, однако, реализовать второй метод интегросуммирования (2.5) с измерительным циклом по рис. 5.2з согласно структурной схеме по рис. 2.10. При несколько более сложной программной обработке здесь обеспечивается высокая точность из-за отсутствия методической погрешности δM_τ при любом $T_{\text{иц}}$. Минимальное время измерительного цикла $T_{\text{иц},\text{min}}$ определяется временем обработки информации, а также минимальным кодом $N_{\text{и},\text{min}}$, который должен быть записан в счетчике-интеграторе, т.е.

$$T_{\text{иц}} \geq \frac{N_{\text{и},\text{min}}}{f_{\text{min}}}, \quad (5.3)$$

где f_{\min} – минимальная частота ДВ, соответствующая нагрузке $q_{г.\min}$ при которой должна быть обеспечена минимальная погрешность дискретности (определяемая кодом $N_{и.\min}$). После выбора $T_{иц}$ находится емкость счетчика-интегратора, –

$$C_{си} \geq T_{иц} f_{\max} . \quad (5.4)$$

В процессор для обработки можно считывать не весь код $N_{и}$, а байт старших разрядов; при этом младшие разряды не гасятся и переходят в следующий измерительный цикл.

Структурная схема микропроцессорных конвейерных весов показана на рис. 5.5.

Измерительный преобразователь массы содержит два ГУ и два частотных датчика веса (ДВ1, ДВ2), подключенных через схемы И1 и И2 к счетчикам-интеграторам СИ1 и СИ2, накапливающим за время $T_{с.i}$ (в i -ом цикле) коды

$$N_{B1} = \int_{T_{с.i}} f_{B1}(t) dt \quad \text{и} \quad N_{B2} = \int_{T_{с.i}} f_{B2}(t) dt . \quad (5.5)$$

Эти коды вводятся в микроэлектронное вычислительное устройство (мкУВУ) через периферийный интерфейс ППИ-1. Через этот же интерфейс вводится сигнал датчика скорости (ДС) и выводятся сигналы управления схемами И1, И2, СИ1 и СИ2. МкУВУ строится на основе микропроцессорного набора или однокристалльной микро-ЭВМ. На панель управления и индикации (ПУИ) через ППИ-2 передаются коды и сигналы, которые поступают на соответствующие индикаторы и воспроизводят массу переменного груза, производительность конвейера, показатель точности взвешивания, а при необходимости – и другие параметры. С пульта управления (с ППЗУ) считываются тарифовочные и градуировочные коды (см. ниже), а также сигналы, соответствующие установленному режиму работа весов.

Укрупненная схема алгоритма функционирования весов показана на рис. 5.6.

В режиме «Работа» после записи исходных данных (бл. 2) и прихода очередного (четного) импульса от датчика скорости происходит формирование кода N_{Tc} пропорционального времени T_c (бл. 5).

С приходом следующего (нечетного) импульса происходит перезапись в ОЗУ кодов N_{B1} , N_{B2} и сброс счетчиков-интеграторов (бл. 6). После этого вычисляется масса \mathcal{M} перемещенного груза (нарастающим итогом), производительность Q (бл. 8) и выдача этих данных на индикацию. Обработка заканчивается вычислением параметра ΔN , характеризующего точность взвешивания (бл. 9). Более подробно алгоритм в режиме «Работа» показан на рис. 5.7.

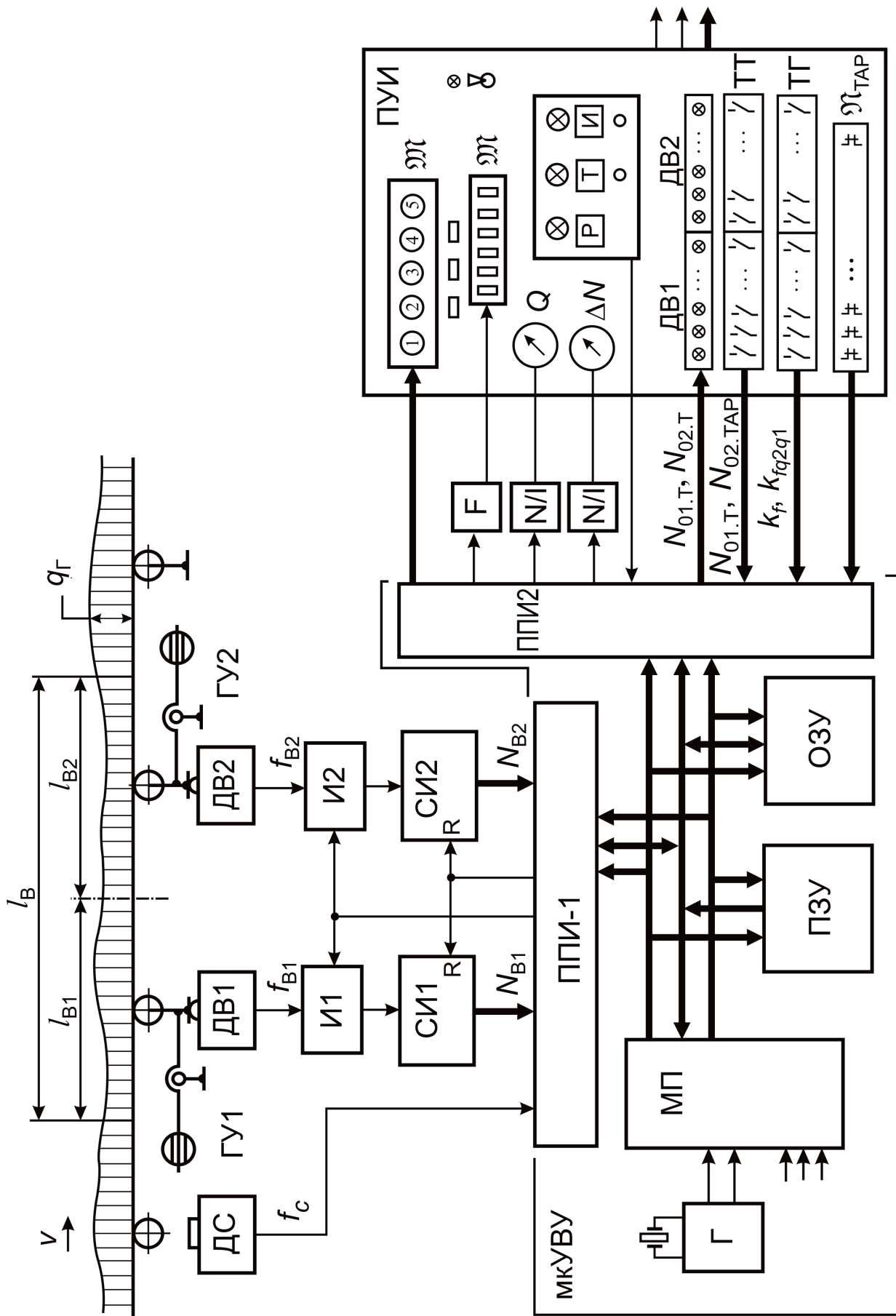


Рисунок 5.5 – Структурная схема микропроцессорных весов с частотными датчиками

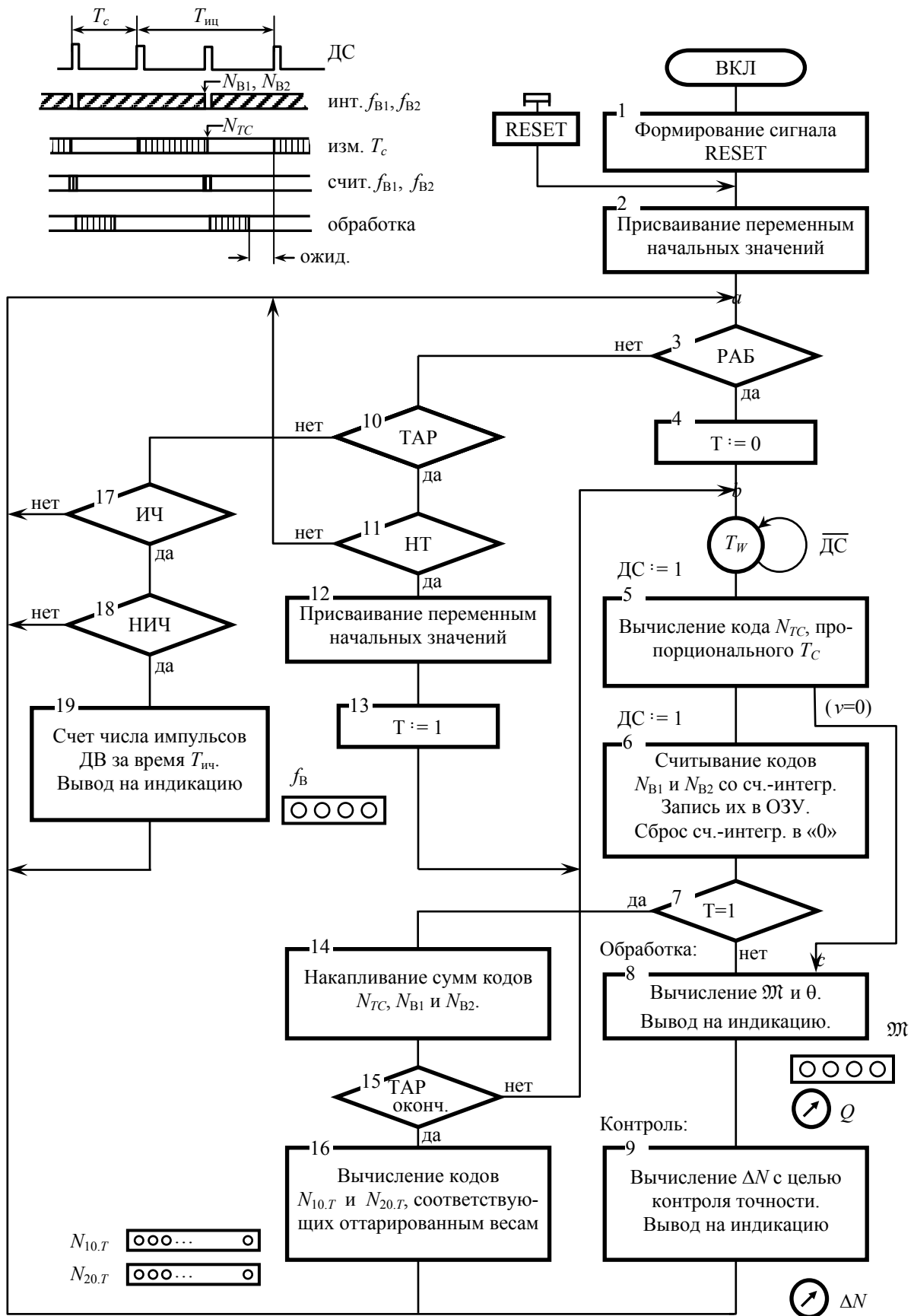


Рисунок 5.6 – Укрупненная схема алгоритма функционирования МП конвейерных весов ЭКВМ-И80

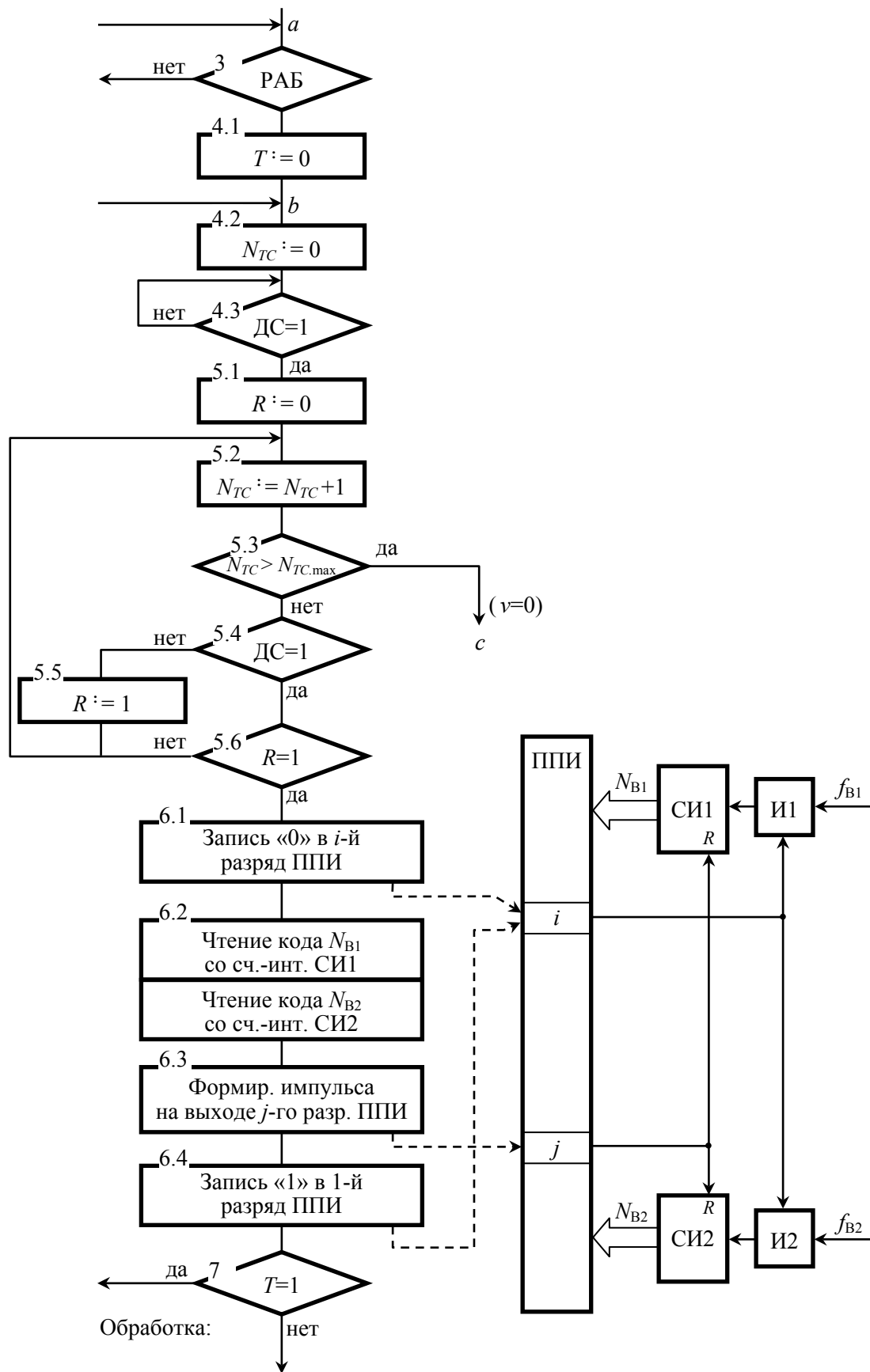


Рисунок 5.7 – Граф-схема алгоритма работы весов ЭКВМ-И80 в режиме «Работа»

Масса груза \mathfrak{M} вычисляется как

$$\mathfrak{M} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (m_{1i} + m_{2i}), \quad (5.6)$$

где

$$m_{1i} = v_i \int_{T_{c,i}} q_{\Gamma}(t) dt, \quad (5.7)$$

$$m_{2i} = v_i \int_{T_{c,i}} q_{\Gamma} \left(t - \frac{l_c}{v} \right) dt. \quad (5.8)$$

Подставляя сюда выражения для $q_{\Gamma}(t)$ и $q_{\Gamma} \left(t - \frac{l_c}{v} \right)$ из

$$f_{B1}(t) = f_{B1,0} + k_{qf,1} q_{\Gamma}(t), \quad (5.9)$$

$$f_{B2}(t) = f_{B2,0} + k_{qf,2} q_{\Gamma} \left(t - \frac{l_c}{v} \right), \quad (5.10)$$

получим:

$$m_{1i} = \frac{v_i}{k_{qf,1}} \int_{T_{c,i}} f_{B1}(t) dt - \frac{v_i}{k_{qf,1}} f_{B1,0} T_{c,i}, \quad (5.11)$$

$$m_{2i} = \frac{v_i}{k_{qf,2}} \int_{T_{c,i}} f_{B2}(t) dt - \frac{v_i}{k_{qf,2}} f_{B2,0} T_{c,i}. \quad (5.12)$$

Интегрирование сигналов с частотами $f_{B1}(t)$ и $f_{B2}(t)$ осуществляется счетчиками-интеграторами СИ1 и СИ2 (рис. 5.5), в результате чего получают коды N_{B1} и N_{B2} . Учитывая также, что $v_i T_{c,i} = l_c$ и, подставляя (5.11) и (5.12) в (5.6), получим, –

$$\mathfrak{M} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[v_i \left(\frac{N_{B1,i}}{k_{qf,1}} + \frac{N_{B2,i}}{k_{qf,2}} \right) - l_c \left(\frac{f_{B1,0}}{k_{qf,1}} + \frac{f_{B2,0}}{k_{qf,2}} \right) \right]. \quad (5.13)$$

Скорость v_i вычисляется как

$$v_i = \frac{l_c}{T_{c,i}} = \frac{l_c}{N_{c,i} t_{ц}}. \quad (5.14)$$

где $t_{ц}$ – время программного цикла (выполнение блоков 5.2...5.6 на рис. 5.7) при подсчете числа этих циклов N_{ci} за время T_{ci} .

Начальные частоты $f_{B1.0}$ и $f_{B2.0}$ определяются при тарировании. По определению

$$f_{B1.0} = \frac{1}{\mathfrak{T}_{\text{тар}}} \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}_{\text{тар}}} \int_{T_{c,i}} f_{B1.0,i}(t) dt. \quad (5.15)$$

Интегрирование (счет числа импульсов) частотного сигнала при тарировании осуществляется счетчиком-интегратором СИ1, а суммирование интегральных сумм в течение времени тарирования $\mathfrak{T}_{\text{тар}}$ выполняется микропроцессором, в результате чего получается код $N_{B1.\Sigma.T}$. Одновременно микропроцессором формируется код $N_{c.\Sigma.T}$ пропорциональный времени тарирования, –

$$\mathfrak{T}_{\text{тар}} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}_{\text{тар}}} T_{ci} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}_{\text{тар}}} N_{Tci} t_{ц} = t_{ц} N_{Tc.\Sigma.T}. \quad (5.16)$$

Подставляя $\mathfrak{T}_{\text{тар}}$ в (5.15), получим

$$f_{B1.0} = \frac{N_{B1.\Sigma.T}}{t_{ц} N_{Tc.\Sigma.T}}. \quad (5.17)$$

Аналогично определяется

$$f_{B2.0} = \frac{N_{B2.\Sigma.T}}{t_{ц} N_{Tc.\Sigma.T}}. \quad (5.18)$$

Подставляя (5.14), (5.17) и (5.18) в (5.13) и учитывая, что $k_{af} = 1/k_{fq}$ получим

$$\mathfrak{M} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{N}} \frac{l_c}{2t_{ц}} \left(\frac{k_{fq.1} N_{B1,i} + k_{fq.2} N_{B2,i}}{N_{Tc,i}} - \frac{k_{fq.1} N_{B1.\Sigma.T} + k_{fq.2} N_{B2.\Sigma.T}}{N_{Tc.\Sigma.T}} \right). \quad (5.19)$$

Код

$$N_{0.\text{тар}} = \frac{k_{fq.1} N_{B1.\Sigma.T} + k_{fq.2} N_{B2.\Sigma.T}}{N_{Tc.\Sigma.T}} \quad (5.20)$$

может быть определен при тарировании и записан в ППЗУ. При этом, однако, затрудняется градуировка, поэтому целесообразнее записывать коды

$$N_{01.\text{таp}} = \frac{N_{\text{B1.}\Sigma.T}}{N_{Tc.\Sigma.T}} \quad \text{и} \quad N_{02.\text{таp}} = \frac{N_{\text{B2.}\Sigma.T}}{N_{Tc.\Sigma.T}}, \quad (5.21)$$

а массу вычислять как

$$\mathfrak{M} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{n}} m_{ri} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{n}} (m_{r1.i} + m_{r2.i}) / 2, \quad (5.22)$$

причем массы груза, перемещаемого в i -ом цикле, –

$$m_{r1.i} = K_0 k_{fq.1} \left(\frac{N_{\text{B1}.i}}{N_{Tc.i}} - N_{01.\text{таp}} \right), \quad (5.23)$$

$$m_{r2.i} = K_0 k_{fq.2} \left(\frac{N_{\text{B2}.i}}{N_{Tc.i}} - N_{02.\text{таp}} \right), \quad (5.24)$$

где

$$K_0 = \frac{l_c}{t_{\text{ц}}}. \quad (5.25)$$

По кодам $N_{01.\text{таp}}$ и $N_{02.\text{таp}}$ можно, при необходимости, определить начальные частоты датчиков веса (см. 5.17 и 5.18), –

$$f_{\text{B1}.0} = N_{01.\text{таp}} / t_{\text{ц}}; \quad f_{\text{B2}.0} = N_{02.\text{таp}} / t_{\text{ц}}. \quad (5.26)$$

Если в весах используется один датчик веса, то вычисления упрощаются, –

$$\mathfrak{M} = \sum_{i=1}^{\mathfrak{n}} K_0 k_{fq} \left(\frac{N_{\text{B}.i}}{N_{Tc.i}} - N_{0.\text{таp}} \right), \quad (5.27)$$

где

$$N_{0.\text{таp}} = \frac{N_{\text{B.}\Sigma.T}}{N_{Tc.\Sigma.T}}. \quad (5.28)$$

Производительность конвейера удобно определять через массу груза, перемещенного в i -ом цикле, –

$$Q = \frac{m_{r,i}}{T_{c,i}} = \frac{m_{r1,i} + m_{r2,i}}{N_{Tc,i} t_{ц}}, \quad (5.29)$$

причем $m_{r1,i}$ и $m_{r2,i}$ вычисляются по (5.23) и (5.24). Деление на $t_{ц}$ не обязательно, если код, пропорциональный производительности

$$N_Q = \frac{m_{ri}}{N_{Tc,i}}, \quad (5.30)$$

преобразуется в ток, который поступает на аналоговый индикатор.

Автоматический непрерывный контроль точности может осуществляться сравнением кодов $m_{r1,i}$ и $m_{r2,i}$. Эти коды должны быть равны, если интегрирование по (5.12) производить с запаздыванием на время l_B / v_i относительно интеграла (5.11). Значительно проще сравнивать интегральные суммы за один и тот же промежуток времени $T_{цк}$, но значительно больший, чем $T_{c,i}$ (например, за время, соответствующее одному оббегу ленты конвейера). В этом случае неточность контроля характеризуется величиной

$$\delta m_{нк} = (q_1^* - q_2^*) \frac{l_B}{L_{цк}} = (q_1^* - q_2^*) \frac{t_B}{T_{цк}}, \quad (5.31)$$

где q_1^* и q_2^* – погонная масса груза на первом ГУ в начале цикла контроля и на втором ГУ в конце этого цикла; $L_{цк}$ – перемещение ленты за время контрольного цикла; t_B – время прохождения груза через весоизмерительный участок l_B .

С целью контроля в ячейках N_{K1} , и N_{K2} накапливаются суммы (см. 5.23 и 5.24)

$$N_{K1} = \sum_{i=1}^{n_{цк}} k_{fq,1} \left(\frac{N_{B1,i}}{N_{Tc,i}} - N_{01.тар} \right), \quad (5.32)$$

$$N_{K2} = \sum_{i=1}^{n_{цк}} k_{fq,2} \left(\frac{N_{B1,i}}{N_{Tc,i}} - N_{02.тар} \right); \quad (5.33)$$

после чего вычисляется их абсолютная или относительная разность, –

$$\Delta N_K = N_{K1} - N_{K2}; \quad \delta N_K = \frac{N_{K1} - N_{K2}}{N_{K1} + N_{K2}}. \quad (5.34)$$

При существенном изменении одного из коэффициентов преобразования ($k_{qf} = k_{qp} \cdot k_{pf}$) или начальной частоты датчика веса (5.26) разность контрольных кодов выходит за допустимые пределы.

Результат вычисления $\Delta N_K (\delta N_K)$ выводится на цифровой или аналоговый индикатор, и по его показаниям судят о точности взвешивания.

Алгоритм вычисления массы и контроля точности показан на рис. 5.7.

Автоматическое тарирование осуществляется на работающем без нагрузки конвейере. Весы переводятся в режим «Тарирование» и нажимается кнопка «Начало тарирования».

5.3. Структурная схема и алгоритм функционирования конвейерных весов повышенной точности

Снижение погрешности до величины 0,2...0,5% может быть обеспечено при увеличении длины весоизмерительного участка и использовании датчиков веса класса 0,05...0,1.

В настоящее время такие весы могут быть построены на одном частотном датчике типа 1909 ПСВ, паспортная погрешность которого составляет 0,04% от НН, а максимальная нагрузка – 5, 10, 20 ... 250 кгс. ГУ таких весов целесообразно выполнить согласно формуле $n\Pi(\Pi\text{-Pч-1ДР})\text{H}$ (рис. 2.6, сх. 17), а электрическую схему – по рис. 2.10, но без счетчика и схемы И. Поскольку датчик 1909 ПСВ нелинейный (нелинейность по хорде 2%) весы должны быть суммирующими, причем масса каждой порции груза вычисляется по измеренному периоду повторения импульсов с учетом реальной характеристики датчика.

Эффективный метод линеаризации и алгоритм вычисления силы, действующей на вибрационно-частотный датчик, разработан в институте НИКИМП [169].

Весы могут быть также построены на тензорезисторных датчиках, например, типа 1909 ДСТ класса 0,1. ГУ в этом случае целесообразно выполнить по формуле $n(\Pi\text{-4ДС})\text{H}$ (рис. 2.6, сх. 15).

Преобразование аналогового сигнала тензодатчиков в код может быть выполнено микропроцессорной системой по специальной программе. С этой целью схема дополняется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП), компаратором (КПР) и измерительным усилителем (У), как показано на рис. 5.8.

Измерение/преобразование сигнала датчиков веса имеет ряд особенностей, так что для получения высокой точности взвешивания необходимо:

- обеспечить высокую точность усиления сигнала от уровня 100...200 мВ до 2...5 В;
- отфильтровать сигнал ДВ, чтобы исключить высокочастотные помехи;
- исключить влияние дрейфа нуля УПТ и уровня срабатывания компаратора на точность измерения силы;
- исключить влияние сопротивления аналоговых ключей;
- исключить влияние помех в линии связи;
- предусмотреть возможность компенсации начального сигнала датчиков веса;
- учесть возможность измерения «отрицательного» веса.

Почти всем этим требованиям удовлетворяет схема, показанная на рис. 5.8.

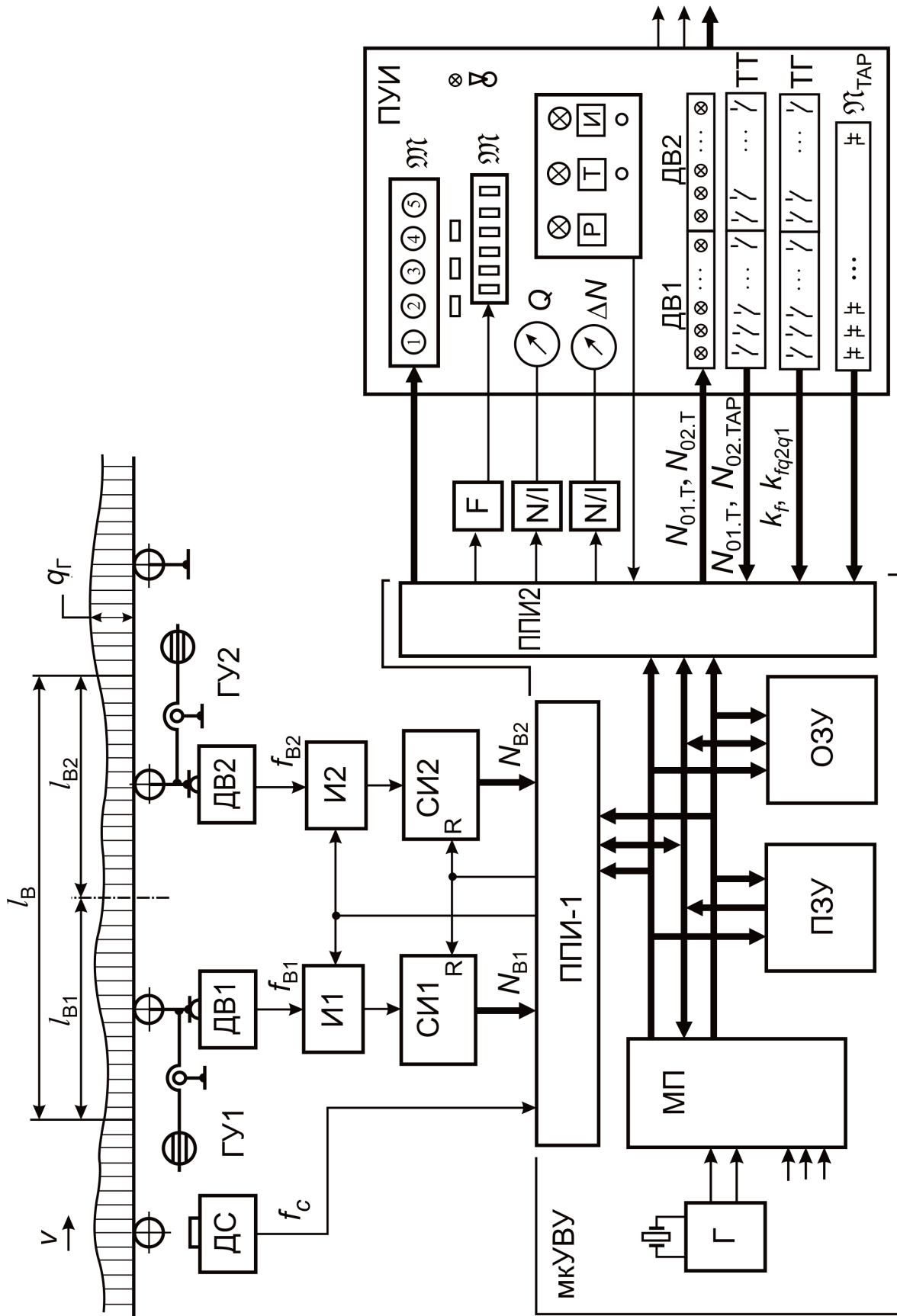


Рисунок 5.8 – Электрическая схема микропроцессорных суммирующих конвейерных весов с тензорезисторными датчиками веса (ЭКВМ-80С)

Не рассматривая пока всего алгоритма работы весов, выясним, как вычисляется масса каждой отдельной порции груза.

С приходом очередного импульса от датчика перемещения (ДП) микро-УВУ вырабатывает код, по которому схема управления (СУ) аналогового ключа (АК) включает ключ K_1 и на вход «+» усилителя U поступает напряжение

$$U^{«+»} = U_{B\Sigma} - U_{K1} = U_{B.min} + k_{PU} G_T \cos\beta + k_{PU} g m \cos\beta - U_{K1}, \quad (5.35)$$

где: $U_{B\Sigma}$ – суммарный сигнал датчиков веса; U_{K1} – падение напряжения на ключе; $U_{B.min}$ – начальное напряжение ненагруженных ДВ; k_{PU} – коэффициент преобразования датчиков веса; G_T – вес «тары» (платформа, роlikоопора, лента); β – угол наклона конвейера; m – масса груза на весоизмерительном участке l_B .

На входе «–» усилителя все время присутствует напряжение U_{KT} , компенсирующее основную часть напряжения тары. При этом напряжение на выходе усилителя

$$U_2 = (U_{B.min} + k_{PU} G_T \cos\beta + k_{PU} g m \cos\beta - U_{K1} - U_{KT} - U_{cm.y}) k_y, \quad (5.36)$$

где $U_{cm.y}$ – напряжение смещения усилителя; k_y – коэффициент усиления.

Это напряжение поступает на вход «+» компаратора, а на его вход «–» – напряжение U_N , пропорциональное коду N_B , –

$$U_N = k_{NU} N_B. \quad (5.37)$$

Напряжение на выходе компаратора будет равно логической единице, если $U_2 - U_{cm.k} > U_N$, где $U_{cm.k}$ напряжение смещения компаратора, т.е.

$$U_3 = 1(U_2 - U_{cm.k} > U_N), \quad \text{или}$$

$$U_3 = 1\left(\left(U_{B.min} + k_{PU} G_T \cos\beta + k_{PU} g m \cos\beta - U_{K1} - U_{KT} - U_{cm.y}\right) k_y - U_{cm.k}\right) > k_{NU} N_B. \quad (5.38)$$

Микро-УВУ обрабатывает такое значение кода N_B , при котором неравенство приближается к равенству (с точностью до единицы младшего разряда). Отсюда следует, что

$$N_B = \frac{k_y (U_{B.min} + k_{PU} G_T \cos\beta)}{k_{NU}} - \frac{k_y (U_{KT} - U_{K1} - U_{cm.y})}{k_{NU}} - \frac{U_{cm.k}}{k_{NU}} + \frac{k_y k_{PU} g \cos\beta}{k_{NU}} m. \quad (5.39)$$

После образования кода N_B микро-УВУ, воздействуя на СУ, отключает ключ K_1 и включает K_2 , после чего переходит к образованию кода N_T так как теперь на вход «+» усилителя подано напряжение U_T , которое точно компенсирует тару. Аналогично предыдущему найдем, что

$$N_T = \frac{k_y U_T}{k_{NU}} - \frac{k_y (U_{KT} - U_{K1} - U_{см.у})}{k_{NU}} - \frac{U_{см.к.}}{k_{NU}}. \quad (5.40)$$

Вычисляемая в микро-УВУ разность кодов определится как

$$N_B - N_T = \frac{k_y (U_{B.min} + k_{PU} G_T \cos \beta)}{k_{NU}} - \frac{k_y U_T}{k_{NU}} + \frac{k_y}{k_{NU}} (U_{K1} - U_{K2}) + \frac{k_y k_{PU} g \cos \beta}{k_{NU}} m. \quad (5.41)$$

Если при тарировании установить

$$U_T = U_{B.min} + k_{PU} G_T \cos \beta \quad (5.42)$$

и учесть, что в интегральных аналоговых ключах с достаточно большой точностью $U_{K1} = U_{K2}$, то разность кодов $N_B - N_T$ определится как

$$N_m = N_B - N_T = \frac{k_y k_{PU} g \cos \beta}{k_{NU}} m = k_{mN} m. \quad (5.43)$$

Таким образом показано, что разность кодов $N_B - N_T$ пропорциональна массе груза m на весоизмерительном участке l_B и не зависит от U_{KT} , а также от дрейфа напряжений смещения усилителя ($U_{см.у}$) и компаратора ($U_{см.к.}$).

Стабильность коэффициента преобразования k_{mN} определяется постоянством коэффициента усиления k_y и отношением k_{PU}/k_{NU} , которые могут пропорционально изменяться с изменением напряжения питания. Стабильность тарирования не нарушается, если датчики веса и делитель для U_T питаются одним и тем же напряжением.

Для уменьшения помех, наводимых в линии связи, могут быть использованы специальные схемы, в которых для передачи сигнала используется пара проводов и пара аналоговых ключей [10]. Фильтрация сигнала ДВ может осуществляться активным фильтром, совмещенным с усилителем $У$ и выполненным на операционном усилителе.

5.4. Методы автоматического контроля и коррекции нуля конвейерных весов

Одним из источников погрешностей КВ является нарушение точности тарирования (смещение нуля НВ), что может быть вызвано дрейфом нуля датчиков веса, изменением начальной нагрузки на датчики (3.37), либо нарушением работы вторичного прибора.

Обычно ноль весов устанавливают периодически в процессе тарирования, а во время работы не контролируют, так что о неточной работе весов, вызванной смещением нуля, становится известно только при очередном тарировании. Целесообразно поэтому предусмотреть возможность автоматического контроля, а еще лучше – автоматической корректировки нуля в процессе работы КВ.

Нам неизвестно, чтобы в каких-либо конвейерных весах осуществлялся автоматический контроль нуля, может быть потому, что такой контроль, а тем более корректировку, целесообразно осуществлять только в весах с программным управлением

Нами разработаны два метода автоматического контроля нуля КВ: детерминированный и статистический.

В основу обоих методов положен следующий факт: большинство конвейеров загружаются таким образом, что на ленте имеются участки, свободные от транспортируемого груза, по крайней мере, при пуске и перед выключением конвейера. При прохождении через весы этих участков и осуществляется контроль нуля.

5.4.1. Детерминированный контроль и автоматическая корректировка нуля конвейерных весов

Этот метод может быть использован в тех случаях, когда погонная масса ленты мало изменяется по длине, не более чем на 0,5% от максимальной погонной массы груза, и, следовательно, на 1,5...2,5% от средней погонной массы ленты. Такие условия могут возникать при небольшой длине конвейерной ленты, порядка десятков метров.

Заметим, что существующий стандарт устанавливает предельное отклонение по толщине ленты (а значит, приблизительно, и по погонной массе) 10,0% [130].

Пусть погонная масса $q_{л}$ изменяется так, что результаты измерения массы оттарированного и работающего вхолостую конвейера располагаются на кривой, показанной на рис. 5.9. На этом же рисунке показаны области, в которых должны находиться результаты измерения массы при холостом ходе конвейера непосредственно после тарирования ($m_{MX.T}$, $m_{MN.T}$), при работе между тарированиями ($m_{MX.P}$, $m_{MN.P}$), а также область, из которой производится корректировка нуля ($m_{MX.K}$, $m_{MN.K}$).

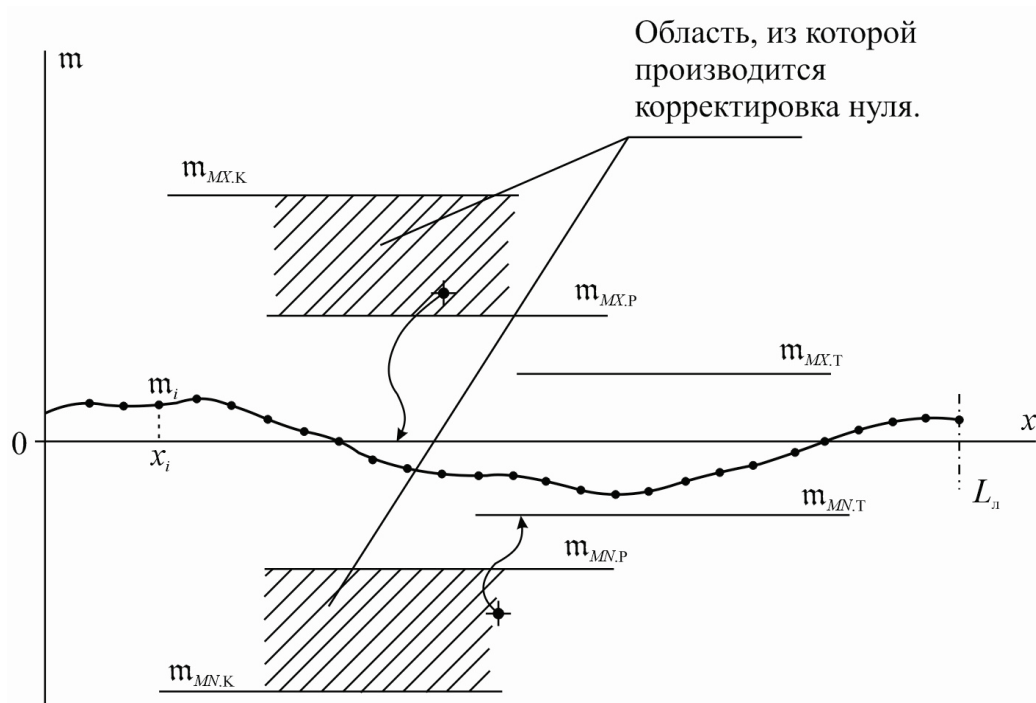


Рисунок 5.9 – Область корректировки нуля конвейерных весов (детерминированный контроль)

Суть метода автоматического контроля состоит в следующем.

При работе конвейера результат каждого взвешивания (m_i) проверяется на принадлежность к узкой области значений прилегающей к нулю весов. При этом,

если $m_i < m_{MN.K}$

то вырабатывается сигнал о недопустимом уходе вниз нуля КВ; коррекция не производится;

если $m_{MN.K} \leq m_i < m_{MN.P}$

то вычисляется корректирующий код

$$N_K = \frac{m_K}{k_{Nm}} = \frac{m_i - m_{MN.T}}{k_{Nm}} = -\frac{|m_i| - |m_{MN.T}|}{k_{Nm}}, \quad (5.44)$$

используемый при последующих вычислениях масс порций груза (см. разд. 5.3);

если $m_{MX.P} < m_i < m_{MX.K}$, причем такой результат многократно, N_R раз, повторяется (напр., $N_R = 16$), и за это время m_i ни разу не бывает меньше, чем $m_{MX.P}$,

то со значительной степенью вероятности делается вывод о смещении нуля вверх и вычисляется корректирующий код

$$N_K = \frac{\sum_{i=1}^{n_R} m_i \in m_{MX.K-P}}{n_R k_{Nm}}; \quad (5.45)$$

если $m_{MN.P} \leq m_i \leq m_{MX.P}$,

то факт попадания в область допустимых значений фиксируется (добавляется единица в отведенную ячейку памяти); значительное количество таких попаданий при отсутствии корректировок свидетельствует о стабильности нуля весов.

5.4.2. Метод статистического контроля и автоматической корректировки нуля КВ

Если метод детерминированного контроля неприменим, то можно воспользоваться методом статистического контроля нуля весов.

Пусть масса ленты такова, что при холостом ходе конвейера результаты измерений располагаются на кривой, показанной на рис. 5.10. При работе конвейера на ленте могут быть незагруженные или незначительно загруженные участки. Если результат измерения окажется меньше максимально контролируемого $m_{MX.K}$, т.е. $m_i < m_{MX.K}$, то этот результат учитывается для контроля нуля КВ.

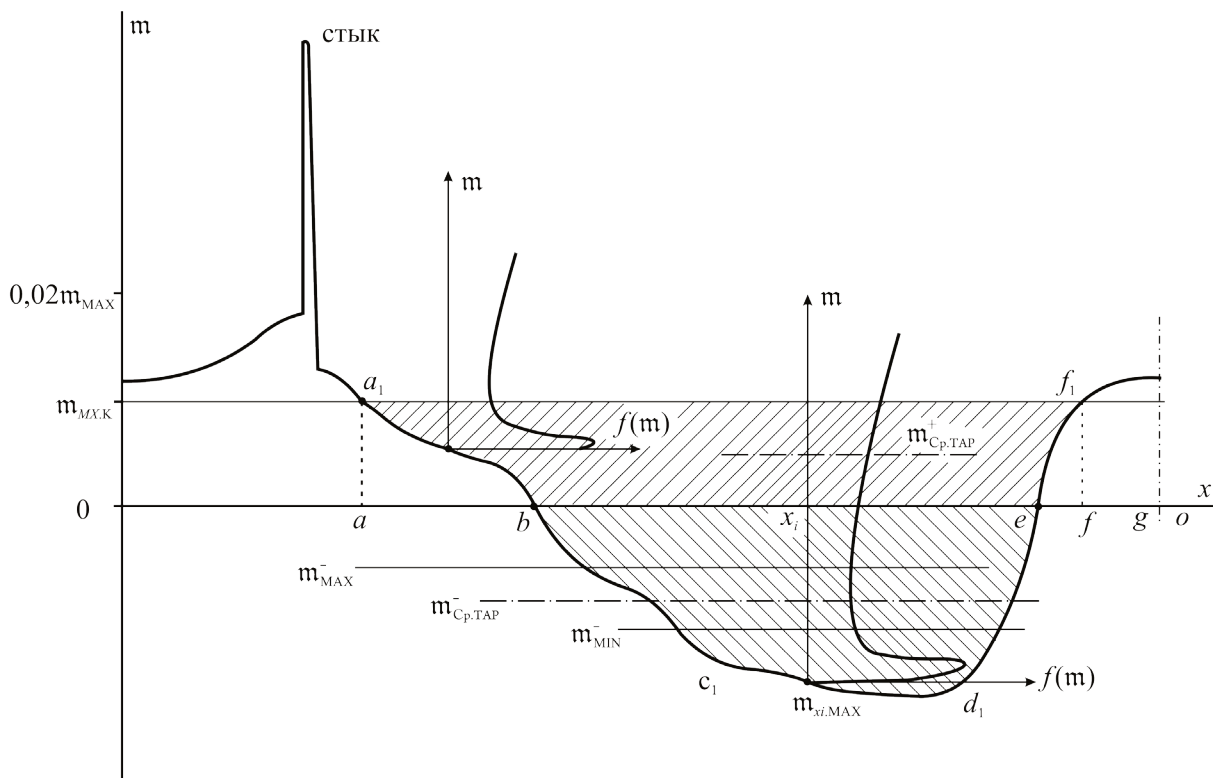


Рисунок 5.10 – Область контроля массы вблизи нуля конвейерных весов (статический контроль)

Будем отдельно суммировать, а затем вычислять среднее значение n результатов измерений, попавших в интервал $m = 0 \dots m_{MX.K}$, –

$$m_{cp}^+ = \frac{1}{n^+} \sum_{i=1}^{n^+} (m_i \in m_{0:MX.K}) \quad (5.46)$$

и имеющих значение $m < 0$, –

$$m_{cp}^- = \frac{1}{n^-} \sum_{i=1}^{n^-} (m_i \in m_{<0}). \quad (5.47)$$

Для каждого конвейера с его способом загрузки существует определенное распределение вероятностей нагрузок и при этом для тарирования весов

$$m_{cp}^+ = m_{cp.тар}^+, \quad m_{cp}^- = m_{cp.тар}^-. \quad (5.48)$$

При работе конвейера будем контролировать равенства (5.48) и по знаку и величине отклонения судить об уходе нуля весов.

При смещении нуля весов вниз значение m_{cp}^- также уменьшается (увеличивается по абсолютной величине) почти пропорционально смещению; при этом m_{cp}^+ может как увеличиться, так и уменьшиться. Если m_{cp}^- становится меньше некоторого допустимого значения m_{min}^- , то следует произвести корректировку весов.

При смещении нуля вверх m_{cp}^- увеличивается (уменьшается по абсолютной величине), и если оно становится больше, чем некоторое допустимое m_{max}^- , то также следует произвести корректировку нуля.

Если область отрицательных значений масс узка, то возможно такое смещение нуля вверх, что даже при ненагруженной ленте результаты измерений ни в одной точке не будут отрицательны. Чтобы и в этом случае можно было корректировать ноль весов, вводится дополнительный контроль в узкой области положительных значений масс ($0 \dots m_{MX.K}$). Если в интервале $0 \dots m_{MX.K}$ зарегистрировано $n_3 = n_{3K}$ точек (например, $n_{3K} = 128$), и за то же время зарегистрировано незначительное количество точек, для которых $m_i < 0$ (например, $n_2 < 8$), то необходимо осуществить корректировку нуля вниз.

Определим точность, с которой может быть выполнена корректировка.

В интервале $b-e$ (рис. 5.10) для каждой точки x ленты может быть найдено математическое ожидание результата измерения масс $M[m_x]$ для $m_x < 0$:

$$M[m_x] = \frac{\int_0^{m_{x,\max}} m \cdot f(m) dm}{\int_0^{m_{x,\max}} f(m) dm} = \alpha_x m_{x,\max}. \quad (5.48)$$

Коэффициент α_x зависят от плотности распределения вероятностей $f(m)$. Для равномерного закона распределения $\alpha_x = 0,5$, а для распределения, показанного на рис. 5.11, немного больше.

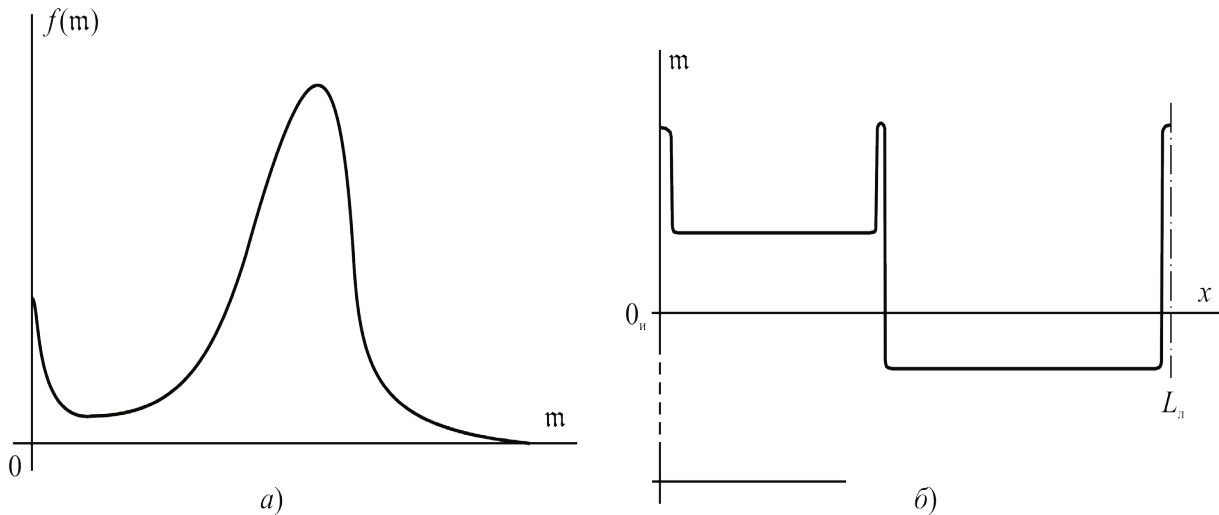


Рисунок 5.11 – а) – плотность распределения вероятностей нагрузок (производительности) конвейера;
б) – распределение массы по длине ленты, состоящей из двух кусков

Математическое ожидание среднего значения массы на участке $b-e$ составит

$$M[m_{cp}^-] = \frac{1}{x_e - x_b} \int_{x_b}^{x_e} M[m_x] dx = \frac{1}{x_e - x_b} \int_{x_b}^{x_e} \alpha_x(x) m_{\max}(x) dx. \quad (5.50)$$

При работе конвейера и $n^- \rightarrow \infty$, $m_{cp}^- \rightarrow M[m_{cp}^-]$.

При конечном числе n^- измерений, имеющих отрицательное значение, вычисленное среднее (5.47) с вероятностью \mathfrak{B} будет отличаться от $M[m_{cp}^-]$ на величину, не большую чем

$$m_{cp}^- - M[m_{cp}^-] < t(\mathfrak{B}, n) \frac{\sigma[m]}{\sqrt{n}}. \quad (5.51)$$

Для ленты из двух кусков и равномерного закона распределения вероятностей нагрузок вблизи нуля (рис. 5.11) среднее квадратическое отклонение $\sigma = m_{x,\max} / \sqrt{3}$. Для этого случая относительная погрешность определения среднего

$$\delta m_{\text{cp}}^- = \frac{m_{\text{cp}}^- - M[m_{\text{cp}}^-]}{m_{x.\text{max}}} < \frac{t(\mathfrak{P}, n)}{\sqrt{3}\sqrt{n}} \quad (5.52)$$

В табл. 5.1 показана зависимость δm_{cp}^- от числа наблюдений n при $\mathfrak{P} = 0,95$.

Таблица 5.1

Зависимость δm_{cp}^- от числа наблюдений n

n	16	32	64	128	256
$t(\mathfrak{P}, n)$	2,13	2,04	2,00	1,98	1,97
$\delta m_{\text{cp}}^- <$	0,307	0,208	0,144	0,101	0,071

Если ограничиться 128-ю измерениями $m_i \in m_{<0}$, то с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ погрешность вычисления $M[m_{\text{cp}}^-]$ не превысит 10%. Для ленты из двух равных кусков, отличающихся по массе на 10% (максимум, допускаемый ГОСТ 20-76),

$$m_{x.\text{max}} = \frac{0,1q_{\text{л}}l_{\text{в}}}{2} = 0,015q_{\text{ГМ}}l_{\text{в}}, \quad (5.53)$$

где принято $q_{\text{л}} = 0,30$. Следовательно, наибольшая погрешность определения $M[m_{\text{cp}}^-]$, отнесенная к максимальной массе груза на весоизмерительном участке, определится величиной

$$\frac{m_{\text{cp}}^- - M[m_{\text{cp}}^-]}{q_{\text{ГМ}}l_{\text{в}}} < \frac{\delta m_{\text{cp}}^- m_{x.\text{max}}}{q_{\text{ГМ}}l_{\text{в}}} = 0,0015 = 0,15\%. \quad (5.54)$$

Следовательно, допустимые значения m_{max}^- и m_{min}^- могут быть установлены на уровне $\pm(0,2...0,25)\%$ относительно $m_{\text{cp.тар}}^-$, а корректирующий код может вводиться ступенями величиной $0,1...0,2\%$, т.е.

$$N_{\text{к}} := N_{\text{к}} \pm \Delta N_{\text{к}}, \quad \Delta N_{\text{к}} = (0,01...0,002) \frac{m_{\text{г. max}}}{k_{N_{\text{м}}}}. \quad (5.55)$$

При использовании датчиков 1909 ДСТ и при 10-разрядном преобразовании $U \rightarrow N$ (разд. 5.3, 5.4), $\Delta N_{\text{к}} = 1$ или 2.

ГЛАВА 6

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ НА ТОЧНОСТЬ ВЗВЕШИВАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

6.1. Обзор методов уменьшения влияния динамической помехи на точность взвешивания

Одной из основных проблем, возникающих при взвешивании движущихся объектов, в частности – автомобилей, является уменьшение влияния динамической помехи на точность взвешивания. Получение высокой точности затруднено тем, что на силоизмерительные датчики кроме силы веса взвешиваемого объекта действует дополнительная сила, вызванная колебаниями платформы и движущегося по ней автосамосвала. Эти колебания могут быть вызваны различными причинами и в частности – неравномерностью движения автосамосвала на платформе или перед ней, неровностями пути, овальностью или эксцентриситетом колес, колебаниями платформы и т.п.

В общем случае, сила, действующая на датчики веса, может быть описана уравнением

$$P_B(t) = G + \sum_{i=1}^N A_i e^{-\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \psi_i) + P_{B0}, \quad (6.1)$$

где $G = g\mathcal{M}$ – вес объекта, A_i – амплитуда переменной составляющей нагрузки для i -й гармоники, α_i – декремент затухания, ω_i – угловая частота, ψ_i – начальная фаза, P_{B0} – сила, действующая на датчики веса при отсутствии на платформе взвешиваемого объекта, i – номер гармоники.

Частота второй и более высоких гармоник, как правило, не кратна частоте первой гармоники, что может быть объяснено различной природой возникновения этих колебаний, в частности – различной частотой колебаний подвесок передних и задних колес автомобиля, одновременно находящихся на грузоприемной платформе. По причине, указанной выше, сигнал датчиков веса, кроме полезной информации о весе объекта, содержит помеху – сумму гармонических составляющих различных частот.

При точной установке нуля весов сигнал, поступающий на обработку, описывается уравнением

$$y(t) = Y_0 + \sum_{i=1}^n Z_i e^{-\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \psi_i), \quad (6.2)$$

где Y_0 – значение сигнала (напряжение, сила тока, частота), пропорциональное массе объекта, –

$$Y_0 = k_{py} G = k_{py} g\mathcal{M}, \quad (6.3)$$

Z_i – значение сигнала, пропорциональное амплитуде переменной составляющей нагрузки для i -й гармоники, –

$$Z_i = k_{py} A_i. \quad (6.4)$$

Особую трудность представляет устранение погрешности от наиболее низкочастотных помех, имеющих частоту 1,3...2,5 Гц для большегрузных автосамосвалов [31, 127] и 3...8 Гц для железнодорожных вагонов [160, 173, 199, 211].

Амплитуда динамической помехи зависит от состояния подъездных путей и поверхности грузоприемной платформы [127], а также от скорости движения автосамосвалов [31, 127]. При обычных условиях и $v = 6...12$ км/ч амплитуда динамической помехи составляет 5...10% от силы веса [31, 127, 199, 211], а иногда и больше [31, 127, 300].

В настоящее время известен ряд методов выделения полезного сигнала. Достаточно полный обзор и детальный анализ этих методов выполнен в работах [3, 173, 195, 199, 211].

Уменьшение влияния периодической помехи на точность взвешивания может быть достигнуто одним из следующих методов: фильтрации, характерных значений сигнала, интегрирования, комбинированной метод.

Метод фильтрации аналогового сигнала¹

Метод фильтрации состоит в том, что аналоговый сигнал пропускается через фильтр нижних частот. В простейшем случае это однозвенный, иногда – многозвенный пассивный RC-фильтр. Для сокращения длительности переходных процессов конденсатор фильтра заряжают до напряжения, примерно равного полезному значению сигнала (фильтр с ненулевыми начальными условиями) [195, 199, 211, 256]. Для типичных условий взвешивания вагонов погрешность взвешивания при использовании таких фильтров составляет ~1% [199].

Более эффективен параметрический RC-фильтр с непрерывно увеличивающимся значением постоянной времени, что позволяет уменьшить погрешность еще примерно в 2...3 раза [195, 199, 256].

Метод характерных значений сигнала

При использовании метода экстремальных точек [199] полезный сигнал определяется как среднее арифметическое наибольшего и наименьшего значений сигнала в промежутке времени, примерно равном одному периоду наиболее низкочастотной помехи. Экстремальные точки могут запоминаться конденсатором или определяться программным способом [210].

Предложен также метод считывания сигнала ДВ в момент перехода динамической помехи через среднее значение, определяемое по моменту прохождения второй производной через ноль [180].

Для затухающей помехи предложен метод усреднения нескольких экстремумов, значения которых умножаются на весовые коэффициенты [7].

¹ Цифровая фильтрация сигнала рассмотрена в разд. 6.5.

Теоретическая эффективность метода характерных значений высока, однако, поскольку помеха содержит гармонические составляющие, действительные значения погрешности взвешивания превышают 1% [199].

Метод интегрирования

Из известных в настоящее время методов ослабления влияния динамической помехи наиболее эффективен метод интегрирования информационного сигнала, умноженного на весовую функцию времени. В соответствии с этим методом над информационным сигналом производят математические операции, находя некоторую величину Y , –

$$Y = \frac{1}{\varphi_0 \mathfrak{T}} \int_{\mathfrak{T}} y(t) \varphi(t) dt, \quad (6.5)$$

где \mathfrak{T} – время, в течение которого производится интегрирование сигнала (время взвешивания); $y(t)$ – информационный сигнал о нагрузке на датчики веса; $\varphi(t)$ – некоторая функция времени (весовая функция); φ_0 – среднее значение весовой функции, –

$$\varphi_0 = \frac{1}{\mathfrak{T}} \int_{\mathfrak{T}} \varphi(t) dt. \quad (6.6)$$

При правильном выборе \mathfrak{T} и $\varphi(t)$ величина Y будет очень близка к Y_0 , по которой определяется вес объекта (6.3).

Обработка сигнала по (6.5) эквивалентна фильтрации [169] и широко используется в радиотехнике [217].

В простейшем случае $\varphi(t) = 1$ и

$$Y = \frac{1}{\mathfrak{T}} \int_{\mathfrak{T}} y(t) dt. \quad (6.7)$$

Если помеха представляет собой незатухающую синусоиду

$$y(t) = Y_0 + Z \sin(\omega t + \psi),$$

то

$$Y = Y_0 + \frac{2Z}{\omega \mathfrak{T}} \sin \frac{\omega \mathfrak{T}}{2} \sin \left(\frac{\omega \mathfrak{T}}{2} + \psi \right). \quad (6.8)$$

Второе слагаемое этого равенства – абсолютная погрешность определения Y_0 . Относительная погрешность

$$\delta Y_0 = \frac{Y - Y_0}{Y_0} = \frac{2Z}{\omega \mathfrak{T} Y_0} \sin \frac{\omega \mathfrak{T}}{2} \sin \left(\frac{\omega \mathfrak{T}}{2} + \psi \right). \quad (6.9)$$

Очевидно, что такой же будет и динамическая погрешность взвешивания ($\delta\mathcal{M}_0$) – одна из составляющих общей погрешности.

Удобно определять относительную погрешность δY , как функцию числа периодов помехи (m), укладывающихся во времени взвешивания \mathfrak{T} , –

$$m = \frac{\mathfrak{T}}{T} = \mathfrak{T}F = \frac{\omega\mathfrak{T}}{2\pi}, \quad (6.10)$$

где T – период динамической помехи; $F = \omega/2\pi$ – частота помехи.

Обозначая, кроме того, относительную амплитуду помехи

$$Z^* = \frac{Z}{Y_0} = \frac{A}{G} = A^*, \quad (6.11)$$

запишем формулу для удельной относительной погрешности в виде

$$\delta Y_0^* = \frac{\delta Y_0}{Z^*} = \frac{\sin \pi m}{\pi m} \sin(\pi m + \psi). \quad (6.12)$$

Эта зависимость графически представлена на рис. 6.1. Погрешность δY^* не выходит за пределы заштрихованной области и принимает те или иные значения в зависимости от начальной фазы ψ . В большинстве случаев столь большие погрешности недопустимы.

Если помеха имеет вид затухающей синусоиды

$$y(t) = Y_0 + Ze^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi),$$

то погрешность

$$\delta Y_0 = \frac{A^*}{(\alpha^2 + \omega^2)\mathfrak{T}} \left\{ \alpha \sin \psi + \omega \cos \psi - e^{-\alpha \mathfrak{T}} [\alpha \sin(\omega \mathfrak{T} + \psi) + \omega \cos(\omega \mathfrak{T} + \psi)] \right\}. \quad (6.13)$$

Погрешность в этом случае несколько меньше, что видно из рис. 6.2.

Для общего случая, когда динамическая помеха содержит ряд гармонических составляющих (6.2), динамическая погрешность определяется как сумма составляющих погрешностей. Поскольку δY_{0i} – случайная величина, являющаяся функцией попарно независимых случайных величин $Z_i, \alpha_i, \omega_i, \psi_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), то максимальное значение погрешности можно найти по формуле

$$\delta Y_{0,\max} = \sqrt{\delta Y_{0.1\max}^2 + \delta Y_{0.2\max}^2 + \dots + \delta Y_{0.n\max}^2}. \quad (6.14)$$

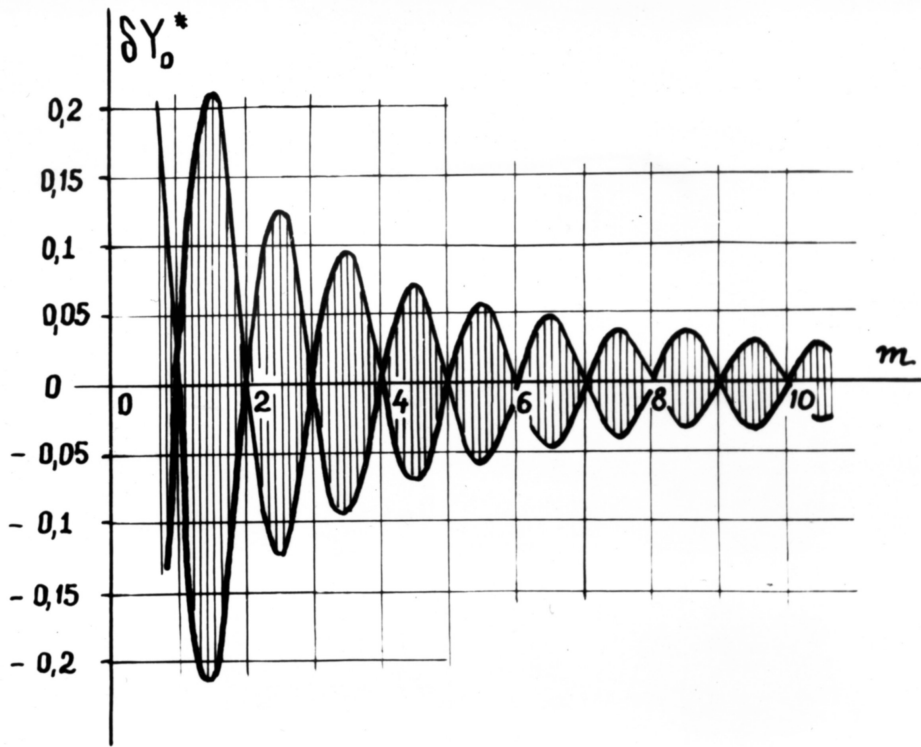
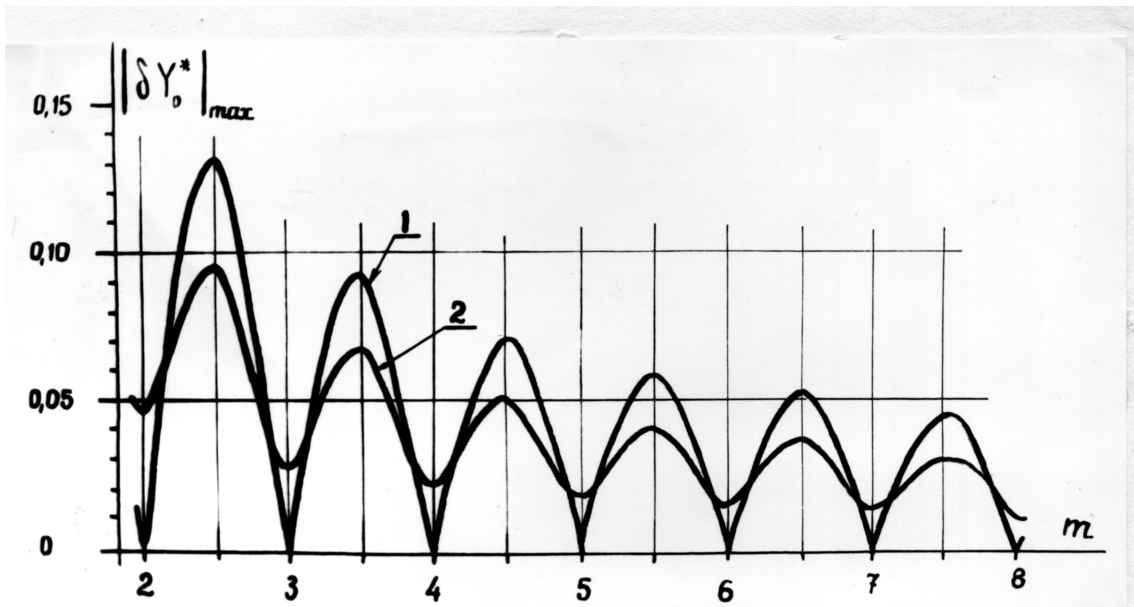


Рисунок 6.1 – Зависимость удельной погрешности δY_0^* от $m = \mathcal{T}F$ для метода интегрирования



- 1 – незатухающая помеха;
- 2 – затухающая помеха с декрементом $\alpha = 0,8 / \mathcal{T}$

Рисунок 6.2 – Зависимость динамической погрешности от числа интегрируемых периодов

Существенного уменьшения погрешности можно достичь, если определенным образом выбрать весовую функцию $\varphi(t)$. В литературе, где впервые (применительно к весам) описан этот метод [274], предложено три функции:

$$\varphi(t) = a - b \cos kt, \quad (6.15)$$

$$\varphi(t) = e^{-k(t-\theta)^2}, \quad (6.16)$$

$$\varphi(t) = \frac{a + b \sin(t - \theta)}{k(t - \theta)}, \quad (6.17)$$

где a, b, k, θ – постоянные коэффициенты. Теоретическая эффективность метода весьма высока (см. ниже).

Дальнейшее развитие этот метод получил в работах института НИКИМП. В [3,173,176] показано, что погрешность δY_0 будет минимальной, если весовая функция имеет вид:

$$\varphi(t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k \frac{2\pi}{\mathfrak{T}} t. \quad (6.18)$$

При этом максимальное значение удельной погрешности

$$\delta Y_0^*(m) = \frac{\sin \pi m}{\pi m} \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \frac{m^2}{m^2 - k^2} \right). \quad (6.19)$$

В большинстве случаев достаточную точность обеспечивает весовая функция с одной первой гармоникой и с коэффициентом $a = -0,8575^1$. В этом случае погрешность $\delta Y_0(m)$ не выходит за пределы, показанные на рис. 6.3.

Умножение информационного сигнала на гладкую весовую функцию, а также интегрирование с высокой точностью их произведения – сложная техническая задача, поэтому во всех выполненных устройствах гладкая функция, заменяется ступенчатой. Эффективность метода при умножении на ступенчатую функцию несколько меньше и зависит от степени приближения ступенчатой функции к непрерывной. Дополнительная погрешность, вызванная ступенчатой аппроксимацией, анализируется в [169,173], где показано, что для достижения теоретической эффективности требуется не менее 16 ступеней. При указанной замене либо интервал интегрирования $0 \dots \mathfrak{T}$, либо диапазон весовых коэффициентов $\varphi_{\min} \dots \varphi_{\max}$ разбивается на равные части, что упрощает электронную аппаратуру.

¹ Такая функция по существу совпадает с функцией Хемминга (см. разд. 6.5).

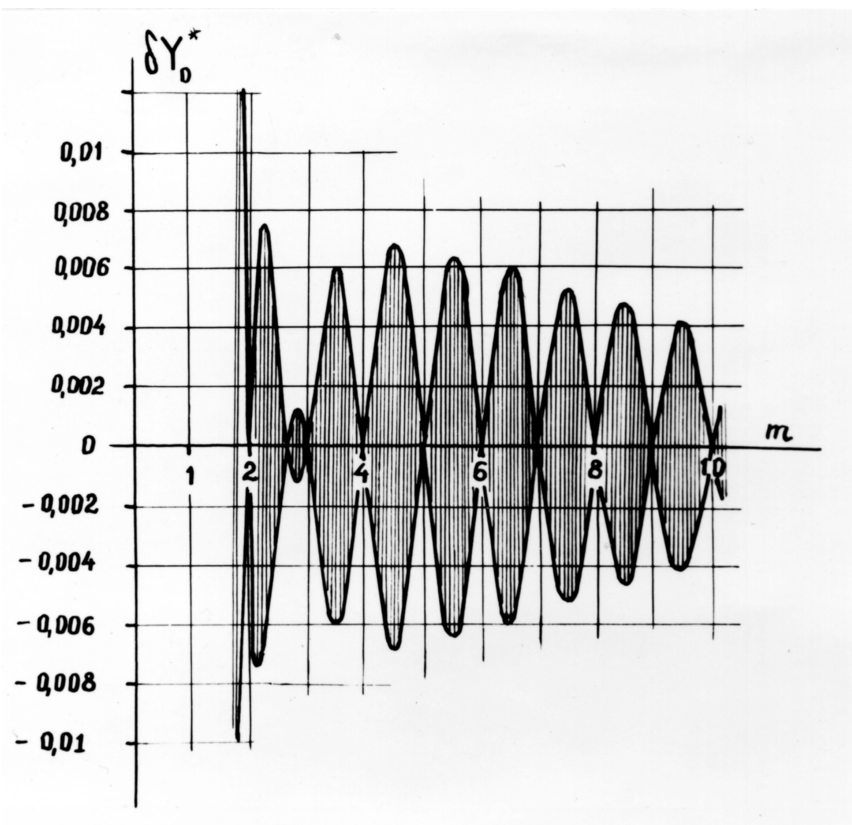


Рисунок 6.3 – Зависимость $\delta Y_0^*(m)$ при интегрировании с умножением

$$\text{на весовую функцию } \varphi(t) = 1 - 0,8575 \cos \frac{2\pi}{\mathcal{T}} t$$

В [274] описаны вагонные весы, в которых диапазон весовых коэффициентов разбит на четыре равных уровня, а время интегрирования \mathcal{T} – на восемь неравных интервалов длительностью τ_i каждый, интегрирование сигнала заменено суммированием кодов, причем в качестве множителя выступает частота суммирования (частота выборки), которая изменяется ступенчато.

В приборах, разработанных в НИКИМПе, ступенчатая аппроксимация осуществляется при равномерном разбиении по t , что наиболее просто в техническом отношении [3,169,173].

Используется два метода построения аппаратуры:

- с изменением длительности интегрирования $\xi\tau_i$ в пределах каждого отрезка времени $\tau = \mathcal{T} / n$ и
- с умножением интегралов, полученных за интервалы τ , на весовые коэффициенты, пропорциональные среднему значению весовой функции на интервале τ .

Оба метода обеспечивают одинаковое ослабление помехи.

В [215] опубликован метод двухканального интегрирования, запатентованный во Франции. Идея этого метода заключается в том, что информационный сигнал интегрируется по двум каналам со сдвигом во времени (рис. 6.4).

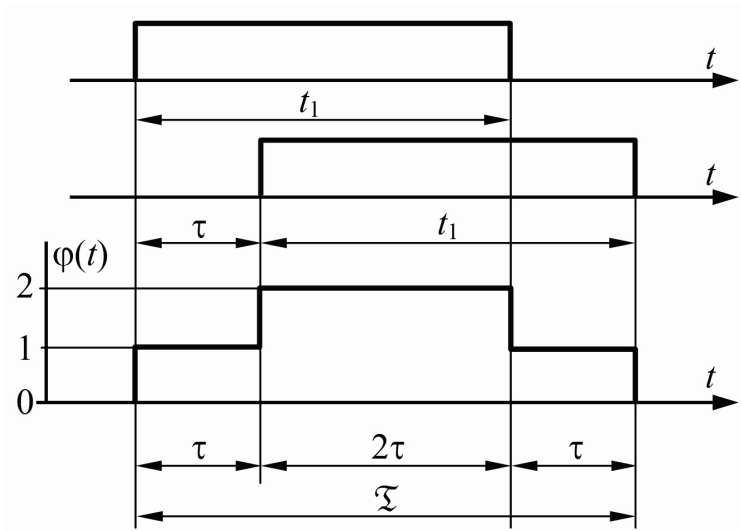


Рисунок 6.4 – Весовая функция при интегрировании по двум каналам

Время интегрирования по каждому каналу t_1 выбирается равным периоду наиболее низкочастотной помехи (F_{\min}), а временной сдвиг τ – равным половине периода помехи той частоты, для которой погрешность максимальна ($1,5F_{\min}$, см. рис. 6.1). То есть

$$t_1 = \frac{1}{F_{\min}}; \quad \tau = \frac{t_1}{3}; \quad \mathfrak{T} = \tau + t_1 = \frac{4}{3}t_1 = \frac{4}{3F_{\min}}. \quad (6.20)$$

Поскольку суммирование одного и того же сигнала по двум каналам эквивалентно умножению его на 2, то этот метод, по существу, является методом интегрирования с умножением на весовую функцию вида (см. рис.6.4)

$$\left. \begin{aligned} \varphi(t) &= 1 && \text{при} && 0 < t < \tau, \\ \varphi(t) &= 2 && \text{при} && \tau \leq t < \mathfrak{T} - \tau, \\ \varphi(t) &= 1 && \text{при} && \mathfrak{T} - \tau \leq t < \mathfrak{T}. \end{aligned} \right\} \quad (6.21)$$

Метод интегрирования по двум каналам используется также в вагонных весах НИКИМПа [19], причем, время сдвига τ изменяется в зависимости от предварительно определенного веса вагона, поскольку считается, что между частотой колебаний вагона (частотой помехи) и массой вагона существует тесная корреляционная связь.

Метод интегрирования по четырем, восьми и шестнадцати каналам (многоинтегральный метод), разработанный в ОПИ [160,198] также эквивалентен методу интегрирования с умножением на весовую функцию (см. рис. 6.5). При 16-и интегралах [198]:

$$|\delta Y_0^*|_{\max} < 0,005, \text{ если } 2,18 < m < 10,9. \quad (6.22)$$

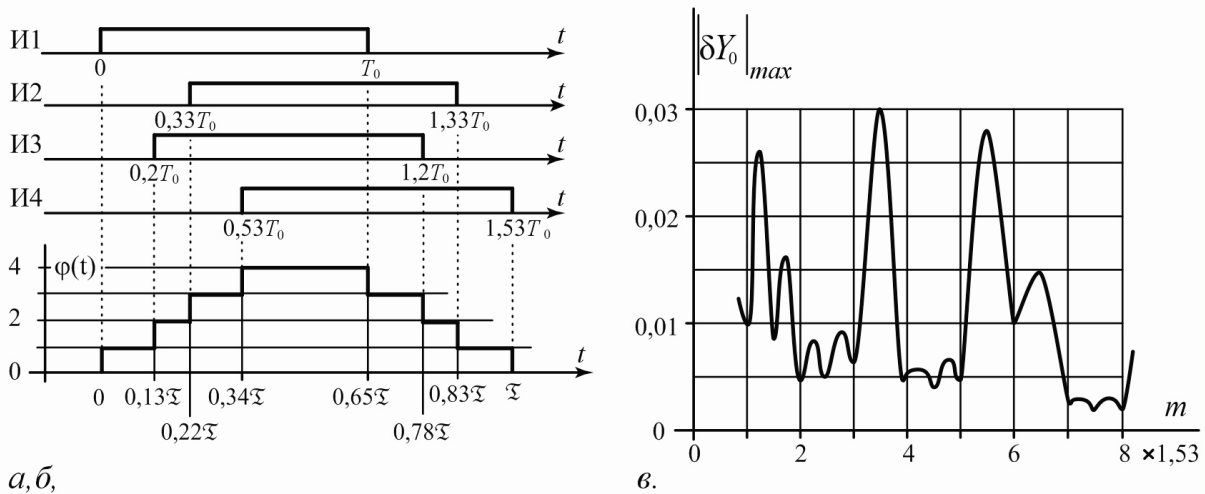


Рисунок 6.5 – Четырехканальный метод ослабления динамической помехи:

- a – сдвиг интеграла во времени;
- b – эквивалентная весовая функция;
- c – максимальное значение погрешности (по [199])

Комбинированные методы

Возможно совместное использование нескольких изложенных выше методов уменьшения динамической помехи. Например, в одном из разработок ОПИ [160] сигнал от тензодатчиков проходит следующие стадии обработки: приближенное определение среднего значения методом характерных значений, фильтрация (RC-фильтр с ненулевыми начальными условиями), интегрирование сигнала, прошедшего через фильтр.

Выводы

В настоящее время разработаны достаточно эффективные методы ослабления динамической помехи. Наиболее эффективным из них является метод интегрирования информационного сигнала, умноженного на весовую функцию времени (6.5), позволяющий ослабить динамическую помеху в 100...200 раз при обработке более двух ее периодов.

Метод характерных значений не обеспечивает высокой точности из-за сложного характера помехи и поэтому неперспективен.

Дальнейшее развитие и совершенствование методов подавления помехи должно обеспечить:

- простоту реализации при точности, достаточной для взвешивания автосамосвалов (поездов) в условиях горных предприятий;
- высокую точность взвешивания в микропроцессорных весах с программным управлением;
- взвешивание с заданной точностью в широком диапазоне скоростей движения автосамосвалов.

Разработанные нами методы изложены в разд. 6.2...6.6.

6.2. Метод фильтрации частотного сигнала

Метод фильтрации аналогового сигнала (напряжения) известен. Он используется, например, в весах для взвешивания железнодорожных вагонов, разработанных в Одесском политехническом институте [199, 214]. Метод фильтрации частотного сигнала, насколько нам известно, рассматривается здесь впервые.

Схема, с помощью которой может быть осуществлена фильтрация частотного сигнала, показана на рис. 6.6.

Схема состоит из реверсивного счетчика РС и преобразователя код-частота (N/f) с коэффициентом преобразования k_{Nf} .

Частотный сигнал $f_1(t)$, несущий информацию о силе, действующей на грузоприемную платформу, подается на вход «+» РС. Изменяющийся код $N(t)$ числа, записанного в реверсивный счетчик, преобразуется в частоту

$$f_2(t) = f_{2H} + k_{Nf}N(t). \quad (6.23)$$

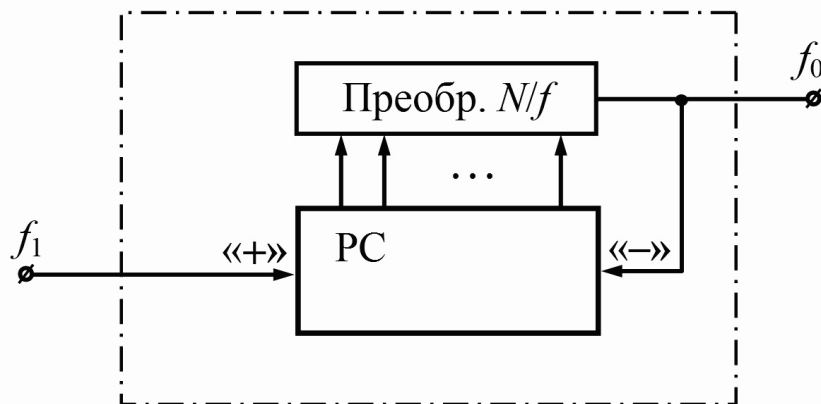


Рисунок 6.6 – Схема звена для фильтрации частотного сигнала

Этот частотный сигнал, являющийся выходным, подается, кроме того, на вход «-» РС, так что содержимое его

$$N(T) = \int (f_1(t) - f_2(t))dt + N_0, \quad (6.24)$$

где N_0 – число, записанное в реверсивном счетчике в момент $t = 0$ (до поступления на вход сигнала с частотой f_1).

Подставляя $N(t)$ из (6.24) в (6.23) и дифференцируя, находим:

$$\frac{1}{k_{Nf}} \cdot \frac{df_2}{dt} + f_2 = f_1, \quad (6.25)$$

при

$$t = 0, \quad f_2 = f_{20} = f_{2H} + k_{Nf} N_0. \quad (6.26)$$

Из равенств (6.25) и (6.26) видно, что устройство, показанное на рис. 6.6, преобразовывает частотный сигнал так же, как однозвенный ненагруженный RC-фильтр преобразовывает аналоговый сигнал. Передаточная функция рассмотренного звена, –

$$W(p) = \frac{f_2(p)}{f_1(p)} = \frac{1}{\tau p + 1}, \quad (6.27)$$

где $\tau = 1/k_{Nf}$ – постоянная времени.

Частота $f_1(t)$ сигнала, поступающего на схему от датчиков веса, зависит от силы P_Γ , действующей на платформу со стороны взвешиваемого объекта:

$$f_1(t) = f_{B0} + k_{Pf} P_\Gamma, \quad (6.28)$$

где f_{B0} – частота датчиков веса при ненагруженной платформе; $P_\Gamma = P_B - P_{B0}$ – дополнительная сила, действующая на датчик веса при въезде на платформу взвешиваемого объекта; k_{Pf} – коэффициент пропорциональности.

Так как $P_\Gamma = G + A \sin(\omega t + \psi)$, то

$$f_1(t) = f_{B0} + k_{Pf} G + k_{Pf} A \sin(\omega t + \psi). \quad (6.29)$$

Подставив (6.29) в (6.25), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{df_2(t)}{dt} + k_{Nf} f_2(t) = k_{Nf} f_{B0} + k_{Nf} k_{Pf} G + k_{Nf} k_{Pf} A \sin(\omega t + \psi). \quad (6.30)$$

Решив это уравнение, и несколько преобразовав решение, найдем зависимость $f_2(t)$:

$$f_2(t) = (f_{B0} + k_{Pf} G) + e^{-k_{Nf} t} \left[(f_{2H} + k_{Nf} N_0) - (f_{B0} + k_{Pf} G) \right] + \frac{k_{Pf} A}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{k_{Nf}} \right)^2}} \left[\sin \left(\omega t + \psi - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{k_{Nf}} \right) - e^{-k_{Nf} t} \sin \left(\psi - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{k_{Nf}} \right) \right]. \quad (6.31)$$

Сравнивая полученное равенство с (6.29), можно видеть, что частотный сигнал $f_2(t)$ в установившемся режиме имеет то же среднее значение, что и сигнал $f_1(t)$, то есть $f_0 + k_{Pf} G$, однако, переменная составляющая при той же частоте ω имеет амплитуду, меньшую в $\sqrt{1 + (\omega/k_{Nf})^2}$ раз.

Чтобы сократить время, в течение которого апериодическая составляющая (второе слагаемое в равенстве (6.31)) уменьшится до приемлемого значения, необходимо записать в реверсивный счетчик такой код N_0 , чтобы возможно точнее удовлетворялось равенство $(f_{2H} + \omega / k_{Nf} N_0) - (f_{B0} + k_{Pf} G) = 0$. Отсюда

$$N_0 = \frac{1}{k_{Nf}} (f_{B0} + k_{Pf} G - f_{2H}). \quad (6.32)$$

Несмотря на то, что метод фильтрации частотного сигнала в несколько раз уменьшает динамическую погрешность, его нельзя считать достаточно эффективным для весоизмерительных устройств. Однако, этот метод универсален (как и метод фильтрации аналогового сигнала) и может найти применение в других случаях.

6.3. Интегрирование с умножением на весовую функцию вида 0,5–1–0,5

В разд. 6.1 была показана эффективность метода интегрирования с умножением на весовую функцию. Вместе с тем реализация этого метода сложна даже в том случае, если непрерывная функция аппроксимируется ступенчатой.

Схема значительно упрощается, если весовая функция построена на двух уровнях: – 0,5 и 1. Это особенно удобно при использовании датчиков веса с частотным сигналом, так как интегрирование (подсчет числа импульсов) и умножение на 0,5 (деление на два с помощью триггера) осуществляется в этом случае просто и точно.

Наиболее просто реализуется схема, если для обработки частотного сигнала применить весовую функцию вида (см. рис. 6.7)

$$\left. \begin{aligned} \varphi(t) &= 0,5 && \text{при} && 0 < t < \tau, \\ \varphi(t) &= 1 && \text{при} && \tau \leq t < \mathfrak{T} - \tau, \\ \varphi(t) &= 0,5 && \text{при} && \mathfrak{T} - \tau \leq t < \mathfrak{T}. \end{aligned} \right\} \quad (6.33)$$

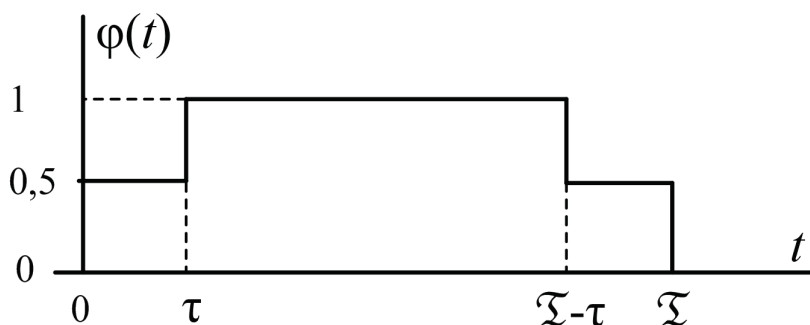


Рисунок 6.7 – Весовая функция вида 0,5–1–0,5

Как будет показано ниже, существенное ослабление динамической помехи этот метод дает в сравнительно узком диапазоне частот, тем не менее, он успешно может быть применен в весах для взвешивания однотипных объектов, например, груженых автосамосвалов в условиях карьеров.

Схема, с помощью которой реализуется указанный метод, показана на рис. 6.8 [82, 84]. Взвешивание начинается, когда автосамосвал полностью въедет на платформу, и от путевого датчика ДП на формирователь импульсов управления ФИУ поступит сигнал. При этом в момент t_1 ФИУ вырабатывает импульс «У0», по которому итоговый счетчик РС устанавливается в ноль и подтверждается нулевое состояние триггера Т1.

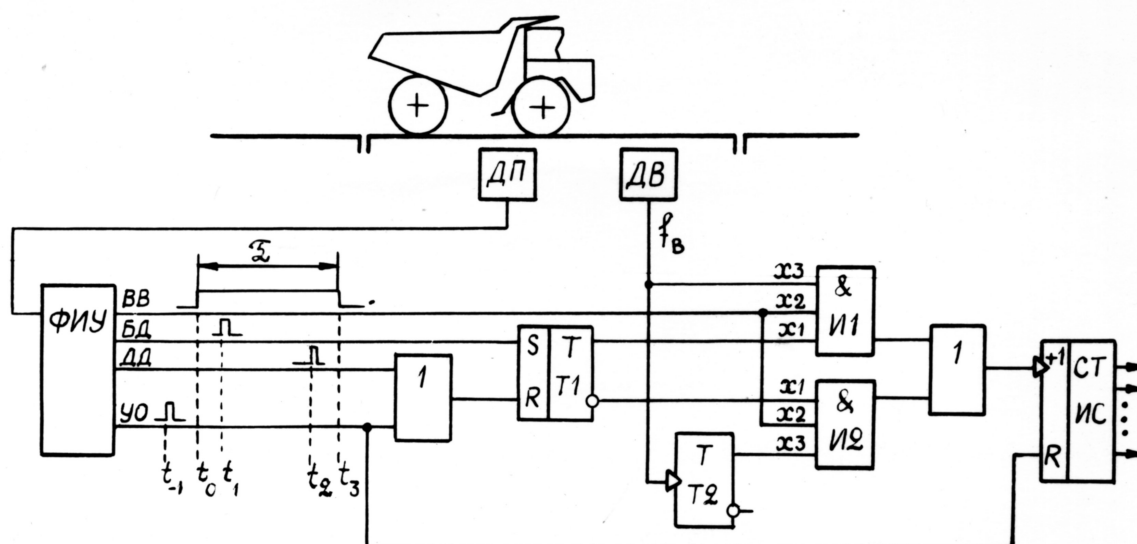


Рисунок 6.8 – Функциональная схема весов, реализующая умножение весового сигнала на весовую функцию вида $0,5-1-0,5$

В момент t_0 вырабатывается импульс «взвешивание» («ВВ»), который подается на входы x_2 схем совпадения И1 и И2. Так как схема И2 открыта также по входу x_1 , то через нее на итоговый счетчик ИС проходит от датчика веса ДВ сигнал с частотой $f_B/2$. Деление на 2 частоты f_B датчика веса осуществляется триггером Т2.

В момент t_1 ФИУ вырабатывает импульс «Без деления» («БД»), который переводит триггер Т1 в состояние «1», в результате чего схема И2 закрывается, а И1 открывается. Теперь импульсы с частотой f_B проходят на ИС без деления.

В момент t_2 импульсом «Деление на два» («ДД») триггер Т1 снова становится в ноль и частота f_B делится на два до окончания взвешивания.

В момент t_3 снимается разрешающий импульс «ВВ», схемы И1 и И2 закрываются, взвешивание прекращается.

Определим эффективность этого метода. От датчика веса на измерительный прибор поступают импульсы с частотой

$$f_B(t) = f_{B0} + k_{pf}G + k_{pf}A \sin(\omega t + \psi), \quad (6.34)$$

где f_{B0} – частота датчика при ненагруженной платформе; $G, A, \omega, k_{Pf}, \psi$ – см. (6.1).

Число импульсов, поступающих на итоговый счетчик за время взвешивания \mathfrak{T} , –

$$\begin{aligned}
 N &= \int_{\mathfrak{T}} f_B(t) \varphi(t) dt = \\
 &= \int_{t_0}^{t_1} 0,5 [f_{B0} + k_{Pf} G + k_{Pf} A \sin(\omega t + \psi)] dt + \\
 &+ \int_{t_1}^{t_2} [f_{B0} + k_{Pf} G + k_{Pf} A \sin(\omega t + \psi)] dt + \\
 &+ \int_{t_2}^{t_3} 0,5 [f_{B0} + k_{Pf} G + k_{Pf} A \sin(\omega t + \psi)] dt.
 \end{aligned} \tag{6.35}$$

После интегрирования и преобразования, а также учтя, что $t_1 - t_0 = \tau_1$, $t_3 - t_2 = \tau_2$ и $t_2 - t_1 = \mathfrak{T} - \tau_1 - \tau_2$, получим:

$$\begin{aligned}
 N &= g k_{Pf} \left(\mathfrak{T} - \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \right) \mathfrak{M} + f_{B0} \left(\mathfrak{T} - \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \right) + \\
 &+ \frac{k_{Pf} A}{2\omega} \left\{ \cos \psi [1 - \cos \omega \mathfrak{T} + \cos \omega \tau_1 - \cos \omega (\mathfrak{T} - \tau_2)] + \right. \\
 &\left. + \sin \psi [\sin \omega \mathfrak{T} - \sin \omega \tau_1 + \sin \omega (\mathfrak{T} - \tau_2)] \right\}.
 \end{aligned} \tag{6.36}$$

Первое слагаемое –

$$N_{\mathfrak{M}} = g k_{Pf} \left(\mathfrak{T} - \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \right) \mathfrak{M} \tag{6.37}$$

пропорционально массе взвешиваемого объекта.

Второе слагаемое –

$$N_{f_{B0}} = f_{B0} \left(\mathfrak{T} - \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} \right) \tag{6.38}$$

– число, постоянное при всех измерениях; вычитается из содержимого счетчика одним из известных методов.

Третье слагаемое – $N_{\Delta \mathfrak{M}}$ – абсолютная погрешность взвешивания, вызванная наличием динамической помехи.

Относительную погрешность найдем, разделив абсолютную погрешность на истинную массу (выраженную числом импульсов), –

$$\begin{aligned} \delta\mathfrak{M}_0 &= \frac{N_{\Delta\mathfrak{M}}}{N_{\mathfrak{M}}} = \frac{A/G}{2\mathfrak{T} - \tau_1 - \tau_2} \cdot \frac{1}{\omega} \times \\ &\times \left\{ \cos \psi \left[1 - \cos \omega \mathfrak{T} + \cos \omega \tau_1 - \cos \omega (\mathfrak{T} - \tau_2) \right] + \right. \\ &\left. + \sin \psi \left[\sin \omega \mathfrak{T} - \sin \omega \tau_1 + \sin \omega (\mathfrak{T} - \tau_2) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (6.39)$$

Если $\tau_1 = \tau_2 = \tau$, то

$$\delta\mathfrak{M}_0 = \frac{2A^*}{(\mathfrak{T} - \tau)} \cdot \sin \omega \frac{\mathfrak{T} - \tau}{2} \cdot \cos \omega \frac{\tau}{2} \cdot \sin \left(\omega \frac{\mathfrak{T}}{2} + \psi \right). \quad (6.40)$$

В этой формуле A^* – амплитуда динамической помехи, выраженная в относительных единицах (6.11). Формула погрешности получит более общий вид, если в относительных величинах выразить также \mathfrak{T} , τ , и ω .

Обозначим относительную частоту Ω через базовую¹ ω_0 , –

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0}. \quad (6.41)$$

Время взвешивания \mathfrak{T} , а также время деления τ , выразим числом периодов, соответствующих базовой частоте, –

$$\mathfrak{T}^* = \frac{\mathfrak{T}}{T_0} = \mathfrak{T} \frac{\omega_0}{2\pi}; \quad \tau_0 = \frac{\tau}{T_0} = \tau \frac{\omega_0}{2\pi}, \quad (6.42)$$

где $T_0 = 1/F_0 = 2\pi/\omega_0$ – период динамической помехи, соответствующий базовой частоте.

С этими обозначениями формула погрешности примет вид:

$$\delta\mathfrak{M}_0 = \frac{A^*}{(\mathfrak{T}^* - \tau^*)\pi\Omega} \cdot \sin(\mathfrak{T}^* - \tau^*)\pi\Omega \cdot \cos \tau^*\pi\Omega \cdot \sin(\mathfrak{T}^*\pi\Omega + \psi). \quad (6.43)$$

Если интегрирование производится без деления, то есть, если $\tau^* = 0$, то погрешность

$$\delta\mathfrak{M}_0 = \frac{A^*}{\mathfrak{T}^*\pi\Omega} \cdot \sin \mathfrak{T}^*\pi\Omega \cdot \sin(\mathfrak{T}^*\pi\Omega + \psi). \quad (6.44)$$

¹ В качестве базовой удобно выбрать наиболее вероятную частоту колебаний взвешиваемого объекта.

Сравнивая формулы (6.43) и (6.44), можно видеть, что при интегрировании с делением погрешность $\delta\mathcal{M}_0$ меньше, особенно при частотах Ω , близких к той, при которой $\cos^* \pi\Omega = 0$. Выбирая $\tau^* = 0,5$, найдем, что погрешность будет минимизирована при $\Omega = 1$, а также при $\Omega = 3, 5, 7$ и т.д.

Продолжительность интегрирования \mathcal{T}^* целесообразно выбирать в пределах $3 \dots 3,5$. С уменьшением \mathcal{T}^* сужается диапазон частот, при которых мала погрешность $\delta\mathcal{M}_0$. Большие значения \mathcal{T}^* нежелательны из-за необходимости существенно уменьшать скорость движения взвешиваемого объекта.

На рис. 6.9 показаны зависимости удельной относительной погрешности $\delta\mathcal{M}_0 / A^*$ от частоты динамической помехи, построенные для $\tau^* = 0,5$ и $\mathcal{T}^* = 3$. Погрешность не выходит за пределы, ограниченные заштрихованной областью, причем максимальные значения она принимает, если начальная фаза такова, что $\sin(\mathcal{T}^* \pi\Omega + \psi) = 1$.

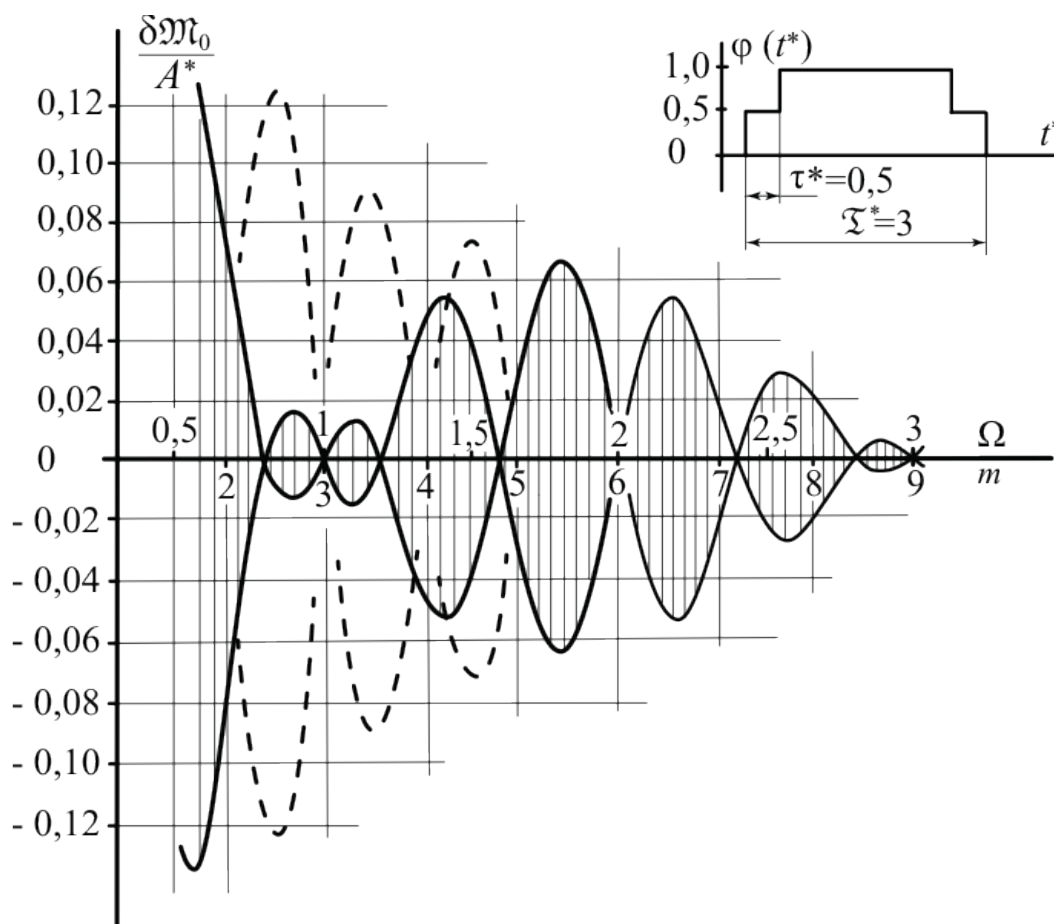


Рисунок 6.9 – Зависимость удельной погрешности $\delta\mathcal{M}_0 / A_1^*$ от относительной частоты Ω и числа периодов m динамической помехи для $\mathcal{T}^* = 3,0$ (а); $\mathcal{T}^* = 3,5$ (б); $\mathcal{T}^* = 4,0$ (в)

Если принять базовую частоту $F_0 = 1,8$ Гц, то при $\mathfrak{T}^* = 3$ время взвешивания $\mathfrak{T} = \mathfrak{T}^* / F_0 = 1,67$ с, а $\tau = \tau^* / F_0 = 0,275$ с. При этих параметрах и диапазоне частот помехи $F = 1,3 \dots 2,3$ Гц ($\Omega = 0,72 \dots 1,28$) динамическая погрешность не превысит величины $0,03A^*$ (см. рис. 6.9a), для типичного значения $A^* = 0,1$ погрешность $\delta\mathfrak{M}_0 < 0,3$. При интегрировании без деления на 2 погрешность могла бы превышать 1,2%. Если принять $\mathfrak{T}^* = 3,2$, то полоса частот, в которой $\delta\mathfrak{M}_0 < 0,04A^*$, расширится до 1,15...3,2 Гц.

При анализе погрешности было сделано допущение, что динамическая помеха имеет вид незатухающей синусоиды. Если учесть затухание, то есть считать, что

$$P = G + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi), \quad (6.45)$$

то, выполнив интегрирование и преобразования, а также перейдя к относительным единицам, получим

$$\begin{aligned} \delta\mathfrak{M}_0 = & \frac{A^*}{4\pi \left[\left(\frac{\alpha^*}{2\pi} \right)^2 + \Omega^2 \right] (\mathfrak{T}^* - \tau^*)} \times \\ & \times \left\{ e^{-\alpha^* \tau^*} \left[\frac{\alpha^*}{2\pi} \sin(2\pi \tau^* \Omega + \psi) + \Omega \cos(2\pi \tau^* \Omega + \psi) \right] - \right. \\ & - e^{-\alpha^* (\mathfrak{T}^* - \tau^*)} \left[\frac{\alpha^*}{2\pi} \sin(2\pi (\mathfrak{T}^* - \tau^*) \Omega + \psi) + \Omega \cos(2\pi (\mathfrak{T}^* - \tau^*) \Omega + \psi) \right] - \\ & - e^{-\alpha^* \mathfrak{T}^*} \left[\frac{\alpha^*}{2\pi} \sin(2\pi \mathfrak{T}^* \Omega + \psi) + \Omega \cos(2\pi \mathfrak{T}^* \Omega + \psi) \right] + \\ & \left. + \frac{\alpha^*}{2\pi} \sin \psi + \Omega \cos \psi \right\}. \end{aligned} \quad (6.46)$$

Здесь α^* – декремент затухания в относительных единицах, –

$$\alpha = \frac{1}{\theta} = \frac{1}{\theta^* T_0} = \alpha^* F_0 = \alpha^* \frac{\omega_0}{2\pi}, \quad (6.47)$$

где θ – постоянная времени (с); θ^* – постоянная времени в относительных единицах, равная числу периодов T_0 , в течение которых амплитуда A уменьшается в e раз.

Для сравнения погрешностей, вызванных незатухающей и затухающей помехой, произведены вычисления на ЭВМ, а результат показан на рис. 6.10.

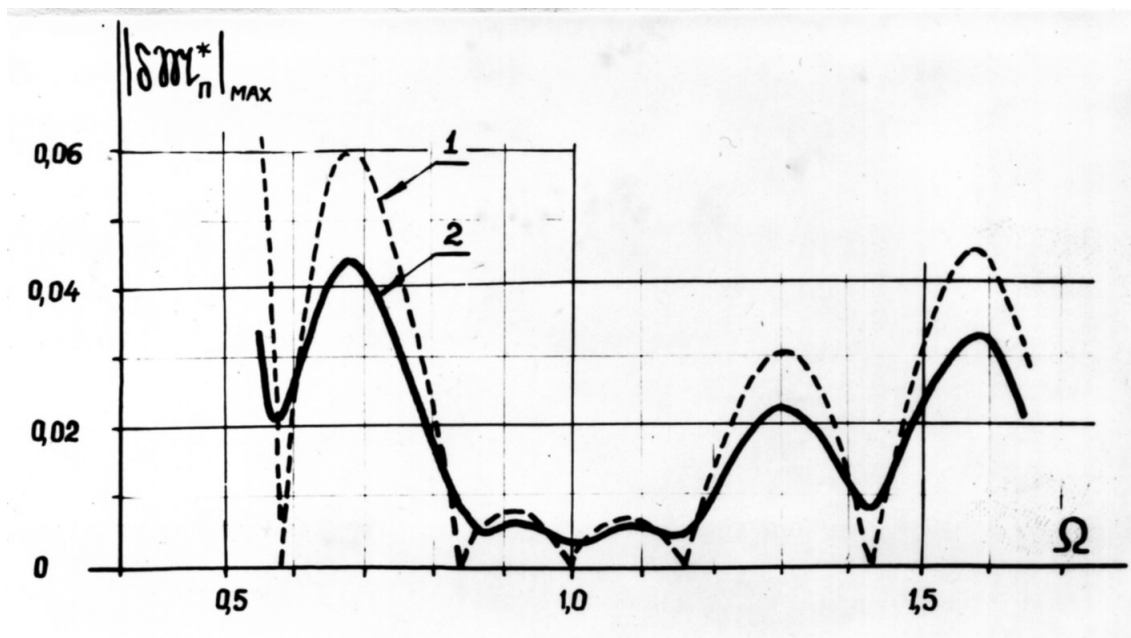


Рисунок 6.10 – Зависимость удельной погрешности δm_0^* от частоты Ω при $\mathcal{T}^* = 4$ и $\tau^* = 0,5$:
 1 – для незатухающей помехи;
 2 – для затухающей помехи при $\alpha = 0,2$

Как видно из рисунка, погрешность при затухающей помехе несколько меньше, чем при незатухающей.

Вывод

Метод интегрирования с умножением на весовую функцию вида $0,5-1-0,5$ достаточно эффективен, если диапазон наиболее низкочастотной составляющей динамической помехи неширок ($F_{\max} / F_{\min} < 2$), то есть при взвешивании однотипных автомобилей (например, автосамосвалов БЕЛАЗ). Принимая во внимание простоту схемных решений, можно считать этот метод приемлемым для автомобильных весов, используемых в АСУ промышленным транспортом карьеров.

6.4. Весовая функция $0,5-1-0,5$ с дополнительными интервалами деления по периоду интегрирования

Диапазон частот, в котором погрешность существенно уменьшена по сравнению с простым интегрированием, может быть расширен, если деление на 2 производить не только в начале и в конце периода интегрирования, но также в течение других отрезков времени, расположенных симметрично относительно середины периода интегрирования.

Пусть дополнительное деление осуществляется в течение времени τ_2 и начинается спустя время $t_2 - 0,5\tau_2$ после начала интегрирования (рис. 6.11).

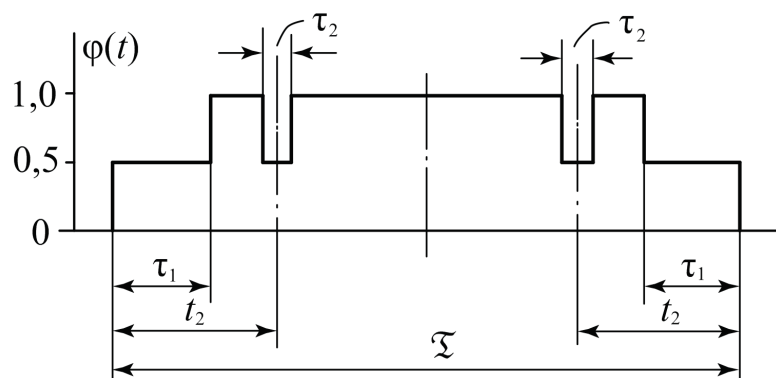


Рисунок 6.11 – Весовая функция вида 0,5–1–0,5 с дополнительным делением на 2

Число импульсов N , которое поступит за время интегрирования \mathcal{T} на итоговый счетчик ИС (рис. 6.8), определится следующим равенством:

$$\begin{aligned}
 N = \int_{\mathcal{T}} f_{\text{ис}}(t) dt &= \int_0^{\tau_1} 0,5 f_B(t) dt + \int_{\tau_1}^{t_2 - 0,5\tau_2} f_B(t) dt + \\
 &+ \int_{t_2 - \tau_2}^{t_2 + 0,5\tau_2} 0,5 f_B(t) dt + \int_{t_2 + 0,5\tau_2}^{\mathcal{T} - t_2 - 0,5\tau_2} f_B(t) dt + \int_{\mathcal{T} - t_2 - 0,5\tau_2}^{\mathcal{T} - t_2 + 0,5\tau_2} 0,5 f_B(t) dt + \\
 &+ \int_{\mathcal{T} - \tau_1}^{\mathcal{T}} f_B(t) dt + \int_{\mathcal{T} - t_2 + 0,5\tau_2}^{\mathcal{T}} 0,5 f_B(t) dt.
 \end{aligned} \tag{6.48}$$

Подставляя сюда $f_B(t)$ по (6.28) и выполняя ряд преобразований, найдем

$$\begin{aligned}
 N &= k_{pf} G(\mathcal{T} - \tau_1 - \tau_2) + f_0(\mathcal{T} - \tau_1 - \tau_2) + \\
 &+ \frac{k_{pf} A}{2\omega} \left\{ \cos \psi \left[1 + \cos \omega \tau_1 - \cos \omega(t_2 - 0,5\tau_2) + \right. \right. \\
 &\quad + \cos \omega(t_2 + 0,5\tau_2) - \cos \omega(\mathcal{T} - t_2 - 0,5\tau_2) + \\
 &\quad + \cos \omega(\mathcal{T} - t_2 + 0,5\tau_2) - \cos \omega(\mathcal{T} - t_1) - \cos \omega \mathcal{T} \left. \right] + \\
 &\quad + \sin \psi \left[-\sin \omega \tau_1 + \sin \omega(t_2 - 0,5\tau_2) - \right. \\
 &\quad - \sin \omega(t_2 + 0,5\tau_2) + \sin \omega(\mathcal{T} - t_2 - 0,5\tau_2) - \\
 &\quad \left. - \sin \omega(\mathcal{T} - t_2 + 0,5\tau_2) + \sin \omega(\mathcal{T} - \tau_1) + \sin \omega \mathcal{T} \right] \left. \right\}.
 \end{aligned} \tag{6.49}$$

Третье слагаемое в этой формуле – абсолютная погрешность измерения. Относительную погрешность измерения $\delta \mathcal{M}_0$ найдем, разделив абсолютную погрешность на $k_{pf} G(\mathcal{T} - \tau_1 - \tau_2)$.

Переходя к относительным единицам, произведем замену:

$$\omega = \Omega \omega_0, \quad \mathcal{T} = \mathcal{T}^* T_0, \quad \tau = \tau^* T_0, \quad t_2 = t_2^* T_0. \tag{6.50}$$

После подстановки этих значений в (6.49) и выполнения необходимых преобразований получим:

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{M}_0^* &= \frac{\delta \mathcal{M}_0}{A^*} = \frac{1}{\pi \Omega (\mathcal{T}^* - \tau_1^* - \tau_2^*)} \times \\ &\times \left[\sin(\mathcal{T}^* - \tau_1^*) \pi \Omega \cdot \cos \tau_1^* \pi \Omega - \cos(\mathcal{T}^* - 2\tau_2^*) \pi \Omega \cdot \sin \tau_2^* \pi \Omega \right] \times \\ &\times \sin(\mathcal{T}^* \pi \Omega + \psi). \end{aligned} \quad (6.51)$$

Сомножитель, заключенный в квадратные скобки, отличается от соответствующего сомножителя формулы (6.43) наличием второго слагаемого. Величину t_2^* и τ_2^* можно выбрать таким образом, чтобы функция $\cos(\mathcal{T}^* - 2\tau_2^*) \pi \Omega \cdot \sin \tau_2^* \pi \Omega$ находилась приблизительно в противофазе с функцией $\sin(\mathcal{T}^* - \tau_1^*) \pi \Omega \cdot \cos \tau_1^* \pi \Omega$ в диапазоне частот Ω , где нужно уменьшить погрешность¹.

На рис. 6.12 показана область возможных погрешностей при умножении сигнала на весовую функцию по рис. 6.10, при $\mathcal{T}^* = 4$, $\tau_1^* = 0,5$, $t_2^* = 0,715$, и $\tau_2^* = 0,09$. Из рисунка видно, что при $A^* = 0,1$ погрешность $\delta \mathcal{M}_0$ не превышает $\pm 0,3\%$ в диапазоне частот $\Omega = 0,7 \dots 2,0$. Этот диапазон значительно шире, чем показанный на рис. 6.9г.

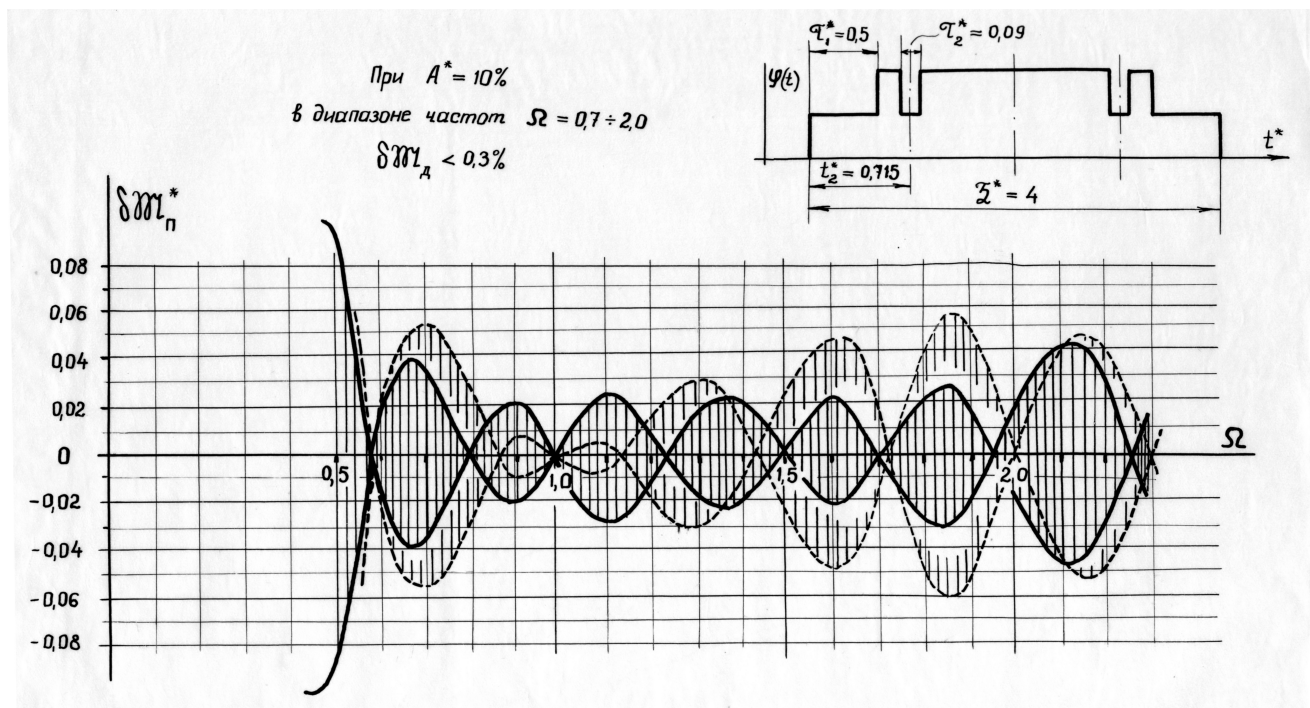


Рисунок 6.12 – Динамическая погрешность при интегрировании с умножением сигнала на весовую функцию по рис. 6.11

¹ При $\mathcal{T}^* = 4$ это диапазон $\Omega = 1,5 \dots 2$ (см. рис. 6.11в).

Формула (6.51) может быть распространена на любое число дополнительных делений и для этого случая принимает вид

$$\delta \mathcal{M}_0^* = \frac{\delta \mathcal{M}_0}{A^*} = \frac{1}{\pi \Omega \left(\mathcal{T}^* - \sum_{i=1}^n \tau_i^* \right)} \times$$

$$\times \left[\sin(\mathcal{T}^* - \tau_1^*) \pi \Omega \cdot \cos \tau_1^* \pi \Omega - \sum_{i=2}^n \cos(\mathcal{T}^* - 2t_i^*) \pi \Omega \cdot \sin \tau_i^* \pi \Omega \right] \times \quad (6.52)$$

$$\times \sin(\mathcal{T}^* \pi \Omega + \psi).$$

Формула (6.52) остается справедливой и в том случае, когда производится дополнительное перекрытие канала интегрирования в течение некоторого времени τ_i в интервале τ_1 .

В некоторых случаях оптимальным оказывается отрицательное время t_3 . Это означает, что информация о нагрузке на датчики веса должна быть получена вне расчетного времени интегрирования \mathcal{T}_p . Именно такой вариант был получен при оптимизации весовой функции на ЭВМ. На рис. 6.13 показана весовая функция и зона возможных погрешностей, построенная по (6.52). Как видно, удельная погрешность $\delta \mathcal{M}_0^*$ по абсолютной величине не превышает 0,0075 в диапазоне относительных частот помехи $\Omega = 0,78 \dots 2,3$. При $\mathcal{T} = 1,16$ с это соответствует диапазону частот $F = 3,0 \dots 8,6$ Гц [98].

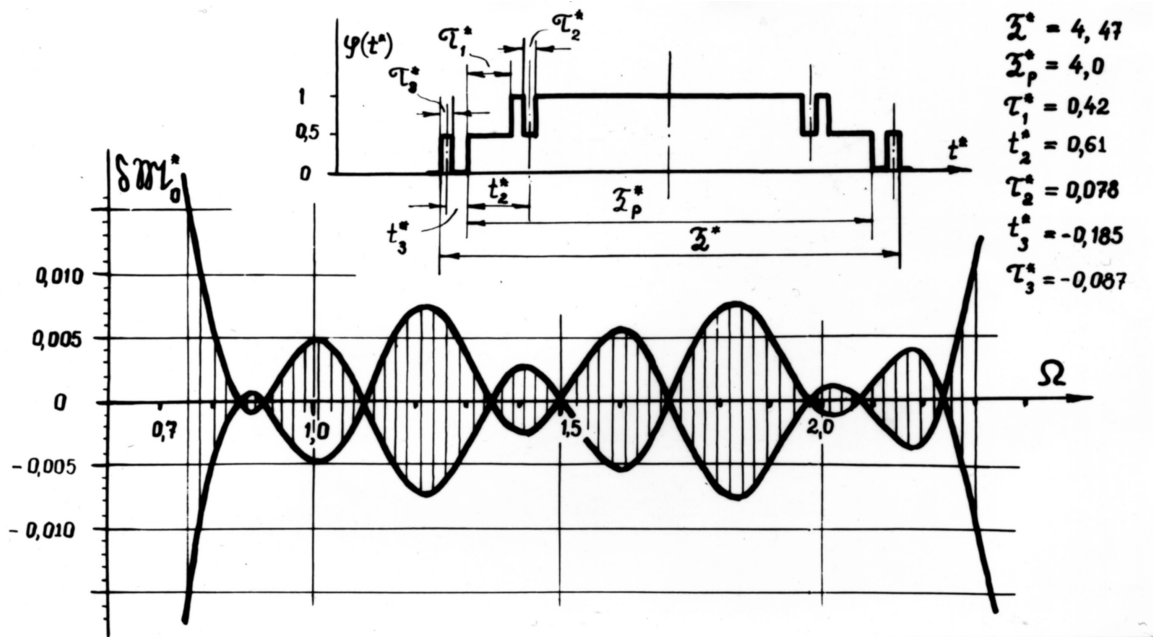


Рисунок 6.13 – Динамическая погрешность при интегрировании с умножением сигнала на весовую функцию, показанную сверху

6.5. Интегрирование с умножением на весовую функцию вида 1-0-1

Несколько меньшую точность, достаточную, однако, в ряде случаев при использовании весоизмерительных устройств для целей оперативного управления и учета на горных предприятиях обеспечивает метод интегрирования с умножением на весовую функцию вида 1-0-1. При таком методе интегрирование частотного сигнала силоизмерительных датчиков осуществляется в течение двух интервалов времени постоянной длительности t_n , причем начало накопления второй интегральной суммы сдвинуто относительно начала первого интегрирования на время τ , равное половине периода, соответствующего наиболее вероятной частоте динамической помехи (основной гармонике). Этот метод близок к двухканальному интегрированию (см. рис. 6.4) с той разницей, что время интегрирования здесь меньше времени сдвига интегралов ($t_n < \tau$). Сокращение t_n позволяет существенно уменьшить время измерения ($\mathcal{T} = \tau + t_n$), а значит увеличить допустимую скорость движения автосамосвала через весы.

Аппаратура для взвешивания автосамосвалов на нерудных карьерах, в которой реализован метод интегрирования с умножением на функцию вида 1-0-1, разработана под руководством автора и внедрена на карьерах п.о. Запорожнерудпром. Детальный анализ метода и подробные сведения об автомобильных весах ВЭА.100-74 и ВЭА.100-77 изложены в [127].

6.6. Использование цифровых фильтров для обработки сигналов силоизмерительных датчиков

Создание и освоение серийного производства микропроцессоров открывает новые возможности для разработки электронной весоизмерительной аппаратуры, позволяет перейти к программному управлению процессом взвешивания и использовать для выделения постоянной составляющей сигнала силоизмерительных датчиков современную теорию цифровой обработки сигналов, в частности – цифровые фильтры.

Как известно [152, 218] цифровой фильтр определяется выражением

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k) + \sum_{k=1}^{\infty} d(k)y(n-k), \quad (6.53)$$

причем $t = nt_{\text{дис}}$; $t_{\text{дис}} = 1/f_{\text{дис}}$ – интервал дискретизации.

Для нерекурсивного фильтра это выражение упрощается до вида

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)x(n-k), \quad (6.54)$$

где $h(k)$ – импульсная характеристика фильтра.

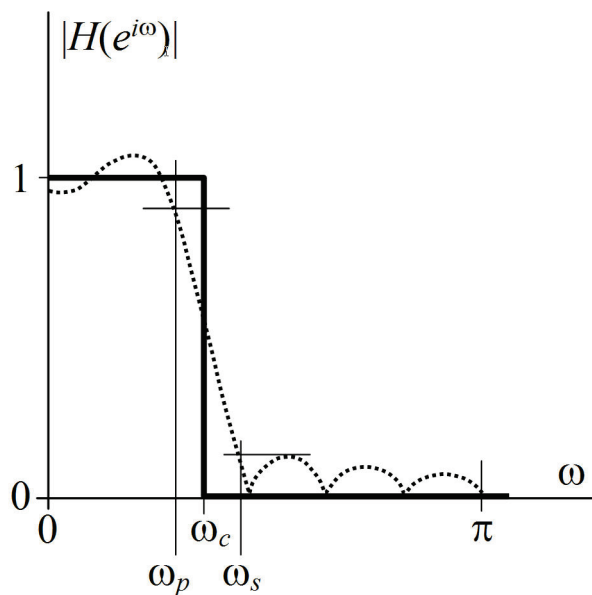
В частотной области это уравнение принимает вид

$$Y(e^{i\omega}) = H(e^{i\omega})X(e^{i\omega}), \quad (6.55)$$

где $X(e^{i\omega}), Y(e^{i\omega}), H(e^{i\omega})$ – преобразования Фурье входного $x(n)$, выходного $y(n)$ сигнала (последовательности) и импульсной характеристики $h(n)$.

Может быть два основных подхода к фильтрации входного сигнала с целью нахождения постоянной составляющей:

1) задавшись амплитудно-частотной характеристикой $H(e^{i\omega})$ цифрового фильтра нижних частот (рис. 6.14) и найдя преобразование Фурье $X(e^{i\omega})$ входной последовательности $x(n)$, вычислить спектр выходного сигнала $Y(e^{i\omega})$ по (6.55), после чего обратным преобразованием Фурье найти значение $y(0)$, соответствующее $X(e^{i0})$;



$\omega = 2\pi F/f_{\text{дис}}$ – цифровая частота; F – аналоговая частота;
 $f_{\text{дис}}$ – частота дискретизации; ω_c – частота среза;
 $\omega_s - \omega_p$ – переходная полоса;

Рисунок 6.14 – Амплитудная характеристика фильтра

2) по заданной в частотной области характеристике фильтра $H(e^{i\omega})$ обратным преобразованием Фурье найти импульсную характеристику $h(k)$, после чего по (6.61) найти $y(n) = y(0)$.

Чтобы фильтр был физически реализуем, характеристика $h(k)$ усекается, принимая значения

$$h(k) = \begin{cases} h_d(k), & 0 \leq k \leq N-1, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (6.56)$$

где $h_d(k)$ – последовательность отсчетов импульсной характеристики, соответствующей идеальной характеристике $H_d(e^{i\omega})$, Обычно такое усечение интерпретируют как перемножение требуемой импульсной характеристики и прямоугольного окна $w(k)$, причем

$$w(k) = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq N-1, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (6.57)$$

Известно, что усечение импульсной характеристики (ряда Фурье) приводит к явлению Гиббса [154, 167, 218], в результате чего на частотной характеристике фильтра появляются нежелательные выбросы (пунктир на рис. 6.14). Для уменьшения амплитуды первого (и других) выброса коэффициенты ряда Фурье умножают на σ -факторы Ланцоша [218] или вместо прямоугольного применяют окна с менее резким усечением: Бартлета, Ганна, Хемминга, Блекмана и др. [152, 167, 218, 219]. Таким образом, вместо (6.54) используют цифровые фильтры вида

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)h(n-k)w(n-k). \quad (6.58)$$

Для выделения постоянной составляющей достаточно вычислить одно значение последовательности $y(n)$ проще всего $y(0)$. Учтя, что $h(-k) = h(k)$, $w(-k) = w(k)$ и вводя множитель, восстанавливающий среднее значение $y(0) = y_0$, запишем

$$y_0 = y(0) = \frac{1}{w_0} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)h(k)w(k), \quad (6.59)$$

где

$$w_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w(k). \quad (6.60)$$

Импульсная характеристика $h(k)$ определяется частотой среза ω_c .

К цифровому фильтру автомобильных весов предъявляются следующие требования:

- частота среза F_c (и соответствующая ей цифровая частота ω_c) должна быть ниже минимальной частоты F_{\min} в спектре сигнала СИД;
- для удовлетворительного подавления помехи амплитуда пика боковых лепестков (в полосе подавления) должна быть не больше, чем -40 Дб ;
- для увеличения допустимой скорости движения автомобиля через весы число периодов динамической помехи $m = \mathcal{M}F_{\min}$, приходящиеся на интервал измерения \mathcal{T} , при котором обеспечивается необходимое подавление помехи, должно быть возможно меньшим.

Последнее требование вытекает из того, что время взвешивания \mathfrak{T} , путь взвешивания L_B , скорость v и число периодов m , связаны зависимостью

$$\mathfrak{T} = \frac{L_B}{v} = \frac{m}{F}, \quad (6.61)$$

откуда видно, что чем меньше m (при $F = F_{\min}$), тем меньше может быть \mathfrak{T} и, следовательно, меньше L_B (короче платформа) или больше допустимая скорость v_{\max} .

Определим наименьшее значение m , при котором удовлетворяются первые два требования. Так как

$$\mathfrak{T} = (N-1)t_{\text{дис}} \quad \text{и} \quad F_c = \frac{\omega_c}{2\pi t_{\text{дис}}} \leq F_{\min}, \quad (6.62)$$

где $t_{\text{дис}} = 1/f_{\text{дис}}$ – время дискретизации, то

$$m_{\min} = \mathfrak{T}F_{\min} \geq \frac{\omega_c(N-1)}{2\pi}. \quad (6.63)$$

Поскольку частота среза реального фильтра (ω_s) не может быть меньше ширины переходной полосы $\omega_s - \omega_p$ (рис. 6.14), то

$$m_{\min} \geq \frac{(\omega_s - \omega_p)(N-1)}{2\pi}. \quad (6.64)$$

Неравенство (6.71) станет равенством, когда $\omega_p = 0$. При этом частота среза ω_s будет минимальна и равна половине ширины главного лепестка в преобразовании Фурье-окна, если ω_c фильтра равна нулю.

Если ширину главного лепестка выразить в бинах [219] (1 бин соответствует ширине $2\pi/N$), то минимальное число обрабатываемых периодов помехи, при котором обеспечивается подавление A дБ, определится как

$$m_{\min} = \frac{S_A^{\circ}}{2} \left(1 - \frac{1}{N}\right), \quad (6.65)$$

где S_A° – ширина главного лепестка в бинах на уровне A дБ.

Зная теперь, что оптимальным является цифровой фильтр с частотной характеристикой вида

$$H(e^{i\omega}) = \begin{cases} 1 & \text{при } \omega = 0, \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (6.66)$$

найдем выражение для вычисления y_0 .

Выполнив обратное дискретное преобразование Фурье для этой частотной характеристики, –

$$h(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} H(n) e^{i \frac{2\pi}{N} kn}; \quad \omega = \frac{2\pi n}{N t_{\text{диск}}}, \quad (6.67)$$

найдем, что импульсная характеристика фильтра имеет вид.

$$h(k) = \begin{cases} 1/N & \text{при } \omega \leq k \leq N-1, \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (6.68)$$

Подставляя это $h(k)$ в (6.59), получим:

$$y_0 = \frac{1}{N w_0} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) w(k). \quad (6.69)$$

Это выражение эквивалентно приведенному выше (в 6.5) для линейного фильтра. Теория цифровых фильтров, однако, позволяет выбрать такое окно $w(k)$, которое обеспечит заданное подавление A динамической помехи при минимальном времени взвешивания

Если цифровой фильтр строить на основе (6.55), то придем к тем же результатам. Действительно, преобразование Фурье исходной последовательности должно быть выполнено как

$$X(k) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-i \frac{2\pi}{N} nk}. \quad (6.70)$$

Для более точной аппроксимации суммы бесконечного ряда и, следовательно, уменьшения просачивания спектральных компонент применим сужающиеся окна и преобразование запишем в виде:

$$X_w(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) w(k) e^{-i \frac{2\pi}{N} nk}. \quad (6.71)$$

Затем, выполняя (6.55), найдем

$$Y(n) = H(n) X_w(n), \quad (6.72)$$

и учитывая (6.66), получим, –

$$Y(n) = Y(0) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)w(k). \quad (6.73)$$

Применяя к (6.73) обратное преобразование Фурье, –

$$y(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} Y(n) e^{+i\frac{2\pi}{N}nm} \quad (6.74)$$

для $n = 0$ и $m = 0$ получим:

$$y(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)w(k), \quad (6.75)$$

что после деления на W_0 (для восстановления масштаба) приводит к (6.69).

Выше показано, что для получения возможно меньшего значения m_{\min} необходимо выбрать такое окно $w(k)$, для которого амплитуда ДПФ имеет возможно меньшую ширину главного лепестка на заданном уровне (6.72).

Наиболее узкий лепесток у прямоугольного окна. Его ширина составляет 2 бина, однако, амплитуда пика бокового лепестка равна всего -13 Дб, что не обеспечивает необходимого подавления помех.

В [219] приведены параметры 44-х окон, которые используются при гармоническом анализе методом ДПФ. Лишь некоторые из них могут быть использованы в цифровых фильтрах автомобильных весов. Их основные параметры приведены в таблице 6.1¹.

Из подходящих окон наиболее узкий лепесток имеет ДПФ окна Хемминга, для которого

$$w(k) = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi}{N}k\right); \quad k = 0,1,2,\dots,N-1. \quad (6.76)$$

При максимальном уровне боковых лепестков -43 дБ ширина главного лепестка составляет 3,8 бин, что позволяет эффективно обрабатывать сигнал с $m \geq 1,9$. Окно (для $N = 51$) и его преобразование показаны на рис. 6.15.

Минимальную ширину главного лепестка при заданном уровне боковых лепестков имеет окно Дольфа-Чебышева, для которого значения эквидистантных отсчетов преобразования Фурье определяются как [219]

$$W(n) = (-1)^n \frac{\cos\left\{N \arccos\left[\beta \cos\left(\pi \frac{n}{N}\right)\right]\right\}}{\operatorname{ch}\left(N \operatorname{ch}^{-1}(\beta)\right)}; \quad 0 \leq |n| \leq N-1, \quad (6.77)$$

¹ Ширина главного лепестка определена по приведенным в [219] рисункам.

Таблица 6.1.

Основные параметры дискретных окон

Окно	Макс. уровень боковых лепестков дБ	Скорость спада боковых лепестков дБ/окт.	Ширина главного лепестка, бин, на уровне			
			-40 дБ	-43 дБ	-46 дБ	-50дБ
Прямоугольное	-13	-6	-	-	-	-
Хемминга	-43	-6	3,7	3,8	-	-
Дольфа-Чебышева $\alpha = 2,5$	-50	0	3,8	4,0	4,3	4,5
$\alpha = 3,0$	-60	0	4,4	4,5	4,5	4,6
Кайзера-Бесселя $\beta = 2$	-46	-6	4,1	4,2	4,3	-
Барсилона-Темеша $\alpha = 3,0$	-53	-6	4,5	4,6	4,7	5,0
Блэкмана точное	-51	-6	4,6	4,7	4,8	4,8
Блэкмана	-58	-18	5,1	5,2	5,3	5,3
Блэкмана-Хэрриса 3-членное	-67	-6	5,1	5,2	5,3	5,3

где

$$\beta = \operatorname{ch} \left[\frac{1}{N} \operatorname{ch}^{-1} (10^\alpha) \right], \quad (6.78)$$

$$\arccos(x) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1} \left[x / \sqrt{1-x^2} \right], & |x| \leq 1; \\ \ln \left[x + \sqrt{x^2 - 1} \right], & |x| > 1. \end{cases} \quad (6.79)$$

Для получения временных отсчетов окна $w(k)$ применяется обратное преобразование Фурье и нормирование относительно максимальной амплитуды. Параметр α равен логарифму отношения максимума главного лепестка к уровню боковых лепестков. При $\alpha = 2,5$ может быть обеспечено подавление помехи на уровне - 46 дБ при ширине главного лепестка, обеспечивающей $m_{\min} = 2,1$. В литературе отмечается, что уровень боковых лепестков этого окна существенно зависит от точности вычисления коэффициентов.

Еще одним подходящим окном является окно Кайзера-Бесселя, коэффициенты которого определяются как [167, 218]

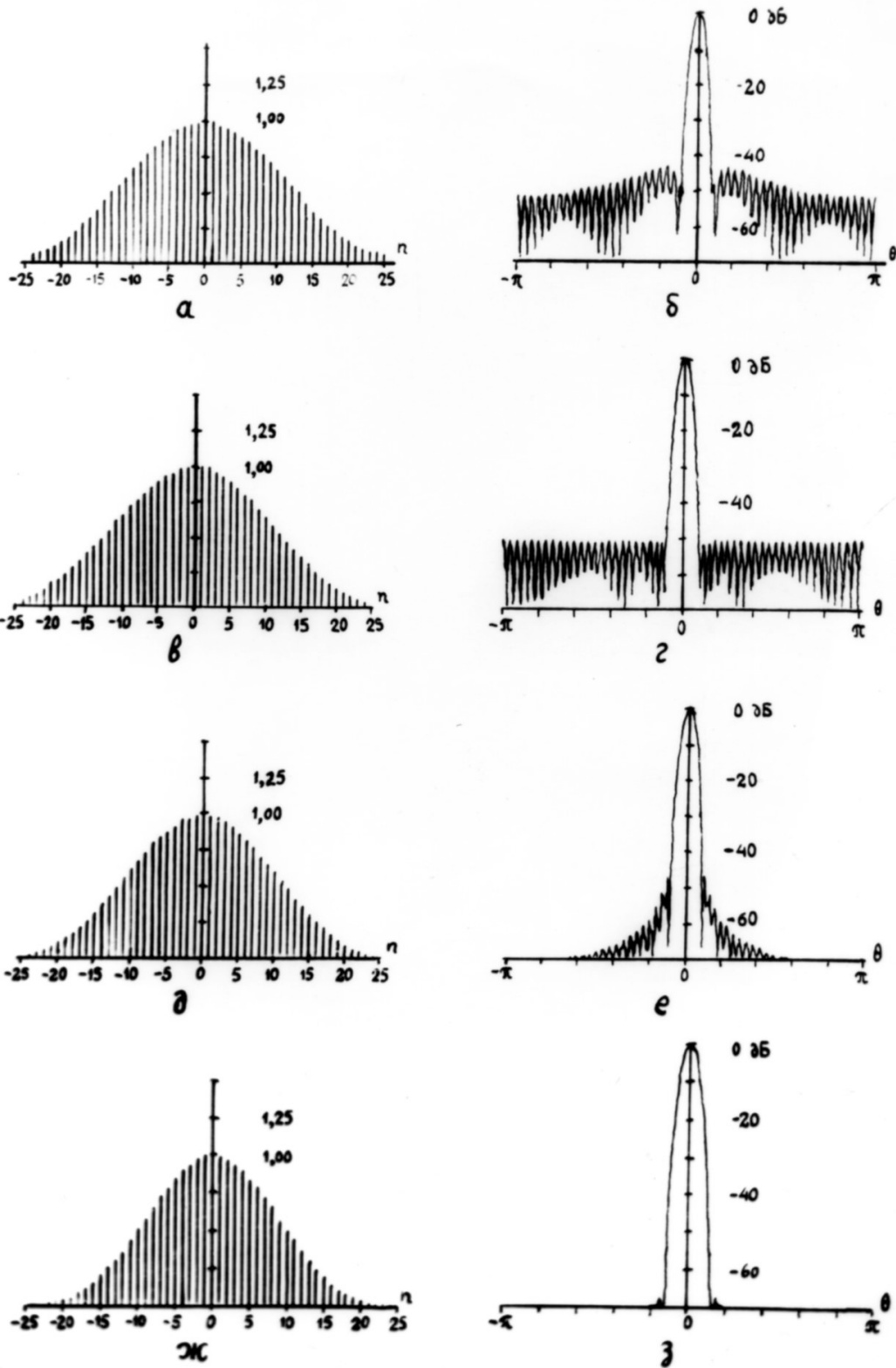


Рисунок 6.15 – Окна и логарифмы амплитуды их преобразования Фурье:
 а,б – Хемминга; в,г – Дольфа-Чебышева при $\alpha = 2,5$;
 д,е – Кайзера-Бесселя при $\beta = 2,0$;
 ж,з –трехчленное (-67 дБ) Блэкмана-Харриса (по [219])

$$w(k) = \frac{I_0 \left[\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2k}{N-1} \right)^2} \right]}{I_0[\beta]}, \quad -\frac{N-1}{2} \leq k \leq +\frac{N-1}{2}, \quad (6.80)$$

где

$$I_0[x] = 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{(x/2)^m}{m!} \right]^2. \quad (6.81)$$

Ширина переходной полосы для этого окна [218]

$$\Delta\omega = \omega_s - \omega_p = 2\pi \frac{\mathfrak{D}}{N}, \quad (6.82)$$

причем \mathfrak{D} – фактор (по Кайзеру):

$$\mathfrak{D} = \begin{cases} \frac{A-7,95}{14,36} & \text{при } A > 21 \text{ дБ,} \\ 0,9222 & \text{при } A \leq 21 \text{ дБ.} \end{cases} \quad (6.83)$$

Подставляя \mathfrak{D} для $A > 21$ дБ в (6.82), а затем $\Delta\omega$ в (6.64), получим:

$$m_{\min} = \frac{A-7,95}{14,36} \left(1 - \frac{1}{N} \right). \quad (6.84)$$

Принятому затуханию A соответствуют значения β , которые могут быть найдены по таблицам или по эмпирической формуле Кайзера [218], –

$$\beta = \begin{cases} 0,1102 \cdot (A-8,7) & \text{при } A > 50; \\ 0,5842 \cdot (A-21)^{0,4} + 0,07886 \cdot (A-21) & \text{при } 21 \leq A \leq 50; \\ 0 & \text{при } A < 21. \end{cases} \quad (6.85)$$

При необходимости получить очень большое подавление помехи можно использовать окно Блэкмана или Блэкмана-Хэрриса [219], но при этом ширина окна должна быть увеличена настолько, чтобы обеспечить обработку 2,3...2,7 периода динамической помехи.

На основании изложенного можно рекомендовать следующую методику и последовательность расчета параметров цифрового фильтра.

1. Выбрать окно (например, по табл. 6.1), обеспечивающее заданную степень подавления динамической помехи (A дБ) при минимальной ширине главного лепестка.

2. По ширине главного лепестка на заданном уровне полосы пропускания (S_A^{σ} , бин) вычислит m_{\min} (6.65, 6.84); количество отсчетов N на интервале наблюдения \mathfrak{T} уточняется на последующих этапах.

3. По известной наименьшей частоте динамической помехи (F_{\min} Гц) определить время взвешивания, –

$$\mathfrak{T} = m_{\min} / F_{\min} . \quad (6.86)$$

4. По наибольшей существенной частоте в спектре помехи (F_{\max} Гц) определить и принять частоту дискретизации, –

$$f_{\text{дис}} \geq 2F_{\max} . \quad (6.87)$$

5. Определить количество отсчетов в окне наблюдения, –

$$N = \mathfrak{T} f_{\text{дис}} . \quad (6.88)$$

6. По формуле для выбранного дискретного окна вычислить коэффициенты $w(k)$.

7. По заданной максимальной скорости движения автомобиля через весы (v_{\max} , м/с) определить минимальный путь взвешивания, –

$$L_{\text{в}} \geq v_{\max} \mathfrak{T} . \quad (6.89)$$

На основании полученных данных разрабатывается алгоритм и программа, реализующая цифровой фильтр.

ГЛАВА 7

ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АСУ АВТОМОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТОМ ГОКОВ

7.1. Выбор и обоснование метода взвешивания. Структурная схема автомобильных весов

Весомоизмерительный комплекс, предназначенный для АСУ промышленным транспортом ГОКов, должен удовлетворять следующим основным требованиям.

1. Взвешивание автомобилей должно производиться в движении по возможности без ограничения скорости (при $v = 20...25$ км/ч) или при таком ее ограничении, которое не вызывает заметного снижения производительности транспорта. Для карьеров с напряженным грузопотоком допустимо ограничение скорости до 12...15 км/ч, и может быть рассчитано по методике, изложенной в [31].

2. На максимальной скорости точность взвешивания каждого автосамосвала должна быть достаточной для целей оперативного управления, по сложившемуся мнению – 1,5...2,5 %, однако должна быть предусмотрена возможность взвешивания с более высокой точностью, 1,0...0,5 % и точнее, при движении автосамосвала с пониженной скоростью (7...8 км/ч).

3. В состав комплекса должно входить устройство опознавания взвешиваемого автосамосвала.

4. Информация о весе, номере автосамосвала и времени следования через весоконтрольный пункт должна регистрироваться (печать, запись на магнитный, оптический носитель и т.п.) с целью последующей обработки, а также выводиться на индикаторное устройство для оператора и на цифровое табло для водителя.

5. Полученная комплексом информация должна быть преобразована к виду, удобному для передачи и ввода ее в управляющую ЭВМ.

6. Весомоизмерительный комплекс должен обладать высокой надежностью и иметь в своем составе систему контроля исправности всех основных устройств, обеспечивающую сигнализацию о неисправности, а при необходимости и автоматическое включение резервных блоков.

Наиболее полно эти требования могут быть удовлетворены в весомоизмерительном комплексе, работающем под управлением микро-ЭВМ. В главе 6 была показана эффективность обработки информации в микропроцессорных автомобильных весах, обеспечивающая точность взвешивания 0,1 % при скорости до 11 км/ч и 2% при скорости до 25 км/ч.

В разд. 6.1 было показано, что наиболее эффективным методом уменьшения влияния динамической помехи на точность взвешивания является метод интегрирования с умножением на весовую функцию. Наиболее просто реализуется интегрирование частотного сигнала, который может быть получен либо непосредственно от частотных датчиков, либо от тензодатчиков с последующим преобразованием аналогового сигнала в частоту.

Взвешивание автосамосвала можно производить либо целиком, либо по-осно (в один или в два приема). Во втором случае платформа получается короче и легче, нагрузка на датчики немного меньше, чем при взвешивании автомашин целиком, вместе с тем, уменьшение длины платформы, а значит и пути взвешивания, приводит к уменьшению допустимой скорости или времени взвешивания. Так как интегрирование с умножением на весовую функцию эффективно при $m \geq 2$ (см. разд. 6), то при частоте динамической помехи автосамосвалов БЕЛАЗ $F \geq 1,3$ Гц [41] время взвешивания должно быть не менее, чем $\tau_{\min} = m_{\min} / F_{\min} = 1,54$ с. При поосном взвешивании автосамосвалов БЕЛАЗ путь взвешивания ограничен величиной $S_{B.\max} = 2,3$ м [26], поэтому скорость движения через весы не должна быть больше, чем $v_{\max} = S_{B.\max} / \tau_{\min} = 1,5$ м/с = 5,4 км/ч. Такое ограничение скорости в большинстве случаев недопустимо.

Учитывая отмеченные недостатки поосного взвешивания, следует отдать предпочтение взвешиванию автосамосвалов в один прием¹.

Количество датчиков веса может быть равно четырем, двум или одному. В первом случае платформа устанавливается непосредственно на датчики веса без использования рычажной системы. Это наиболее простой и рациональный вариант, которому следует отдать предпочтение, несмотря на некоторое усложнение электронной схемы (частотные сигналы датчиков веса должны быть просуммированы, а коэффициенты преобразования – выровнены).

Для уменьшения динамической погрешности, как уже указано, наиболее целесообразно применять метод интегрирования с умножением на весовую функцию. В качестве весовой функции должна быть выбрана такая функция, которая, обеспечивает заданную точность при наиболее простом схемном решении.

В соответствии с ГОСТ 12409-66 весы должны обеспечить точность $\pm 1\%$. Для оперативного управления может быть допущена несколько большая погрешность, но средняя за смену для каждого автосамосвала, а тем более для забоя и карьера не должна превышать указанной выше величины. Учитывая, что динамическая погрешность наиболее существенна среди всех других погрешностей, можно допустить $\delta M_0 = 0,3...0,4\%$. Принимая во внимание, что в условиях карьера взвешиваются однотипные груженные машины, и частота собственных колебаний машин лежит в сравнительно узких пределах², можно ограничиться весовой функцией вида $0,5-1-0,5$, которая обеспечивает уменьшение динамической погрешности до величины $\pm 0,2\%$ при $F_{1\max}/F_{1\min} = 1,7$ и $A^* < 0,1$ (см. разд. 6.3 и рис. 6.9).

Все датчики веса, в том числе и частотные, обладают некоторой нестабильностью параметров. Наиболее нестабильна начальная частота, поэтому в схеме должно быть предусмотрено автоматическое тарирование (установка нуля весов) перед каждым взвешиванием.

¹ В тех случаях, однако, когда допустима погрешность 2...3 % или ограничение скорости на уровне 5 км/ч, а весоизмерительный пункт должен периодически переноситься, целесообразнее может оказаться поосное взвешивание на малогабаритной платформе.

² Для автосамосвалов БЕЛАЗ-540 и БЕЛАЗ-548 $F = 1,3...2,3$ Гц [30, 31, 127].

И, наконец, взвешивание должно быть произведено даже в том случае, если скорость автосамосвала, движущегося по весовой платформе, существенно превышает допустимую. В этом случае может быть допущена несколько большая погрешность взвешивания (например, 1,5...2 %, а факт превышения скорости зарегистрирован).

С учетом сказанного, в состав электронных весов должны входить следующие блоки и узлы: грузоприемная платформа (ГП); частотные датчики веса (ДВ1, ДВ2, ДВ3, ДВ4); путевые датчики ДПО и ДП1 – для определения момента начала тарирования и начала взвешивания, ДП2 – для определения скорости автосамосвала; блок выравнивания коэффициентов преобразования и суммирования частотных сигналов (БВК–ЧС); блок функциональной обработки частотного сигнала (ФОС); блок итогового счетчика (БИС) с регистром веса (В); блок автоматической установки весов в ноль (БУН); блок формирования управляющих импульсов (ФИУ); блок индикации и регистрации; блок питания.

На рис. 7.1 показана структурная схема электронного блока автомобильных весов АВЧ.120-71М, разработанных для взвешивания автосамосвалов БЕЛАЗ на карьере Ингулецкого ГОКа. Кроме названных блоков схема содержит предварительный формирователь и делитель (ПФД), который служит для формирования крутых фронтов и деления на $K_{\text{ПД}}$ частоты импульсов датчиков веса, формирователь импульсов запуска (ФИЗ), блок ускорения взвешивания (УсВ) и кварцевый генератор (ГК).

Реализация блоков может быть осуществлена как аппаратным, так и программным методом для микропроцессорных весов.

7.2. Структурная схема и алгоритм обработки информации в микропроцессорных автомобильных весах

Процесс взвешивания целесообразно разделить на два этапа (две фазы):

- этап накопления информации о силе, действующей на силоизмерительные датчики при движении автомобиля по грузовой платформе;
- этап обработки записанной в ОЗУ информации для нахождения силы веса, пропорциональной массе взвешиваемого автомобиля.

- Схема алгоритма функционирования весоизмерительного комплекса, работающего под управлением мкУВУ, показана на рис. 7.2. На том же рисунке показана структурная схема комплекса.

- Грузоприемная платформа (ГП) устанавливается на четырех датчиках веса с тензорезисторными преобразователями (ДВ1...ДВ4). Сигналы датчиков суммируются, фильтруются с целью подавления высокочастотных составляющих и преобразуются в код аппаратно-программным способом, как описано в разд. 5.

- При движении автосамосвала и наезде его на педаль путевого датчика ПО (ПОН) производится преобразование сигнала ДВ в код K_0 , который записывается в оперативную память мкУВУ. Таким образом, осуществляется тарирование весов.

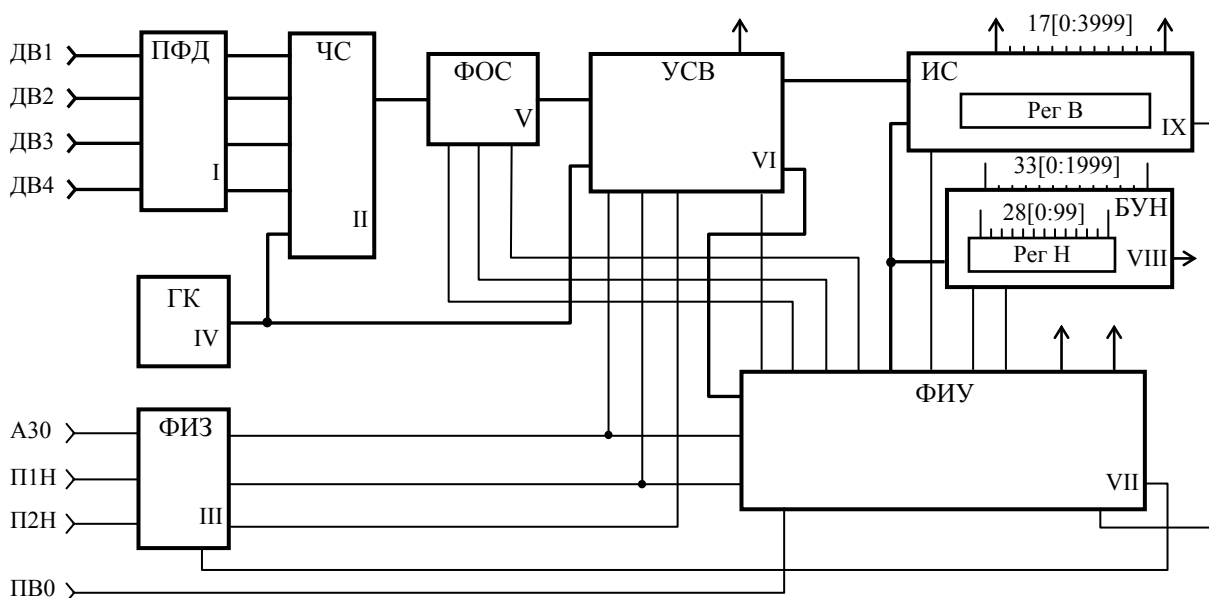


Рисунок 7.1 – Структурная схема электронного блока автомобильных весов АВ4.120-71М

Затем, с помощью специального устройства производится опознавание автомобиля (см., например, разд. 7.8) и в ОЗУ записывается его номер.

При дальнейшем движении, когда автосамосвал полностью въезжает на ГП, по сигналу путевого датчика П1 (П1Н) запускается специальная подпрограмма (блоки 7...9), и с частотой дискретизации $f_{\text{дис}}$ (7.94) сигнал ДВ преобразуется в последовательность кодов K_i , которые записываются в ОЗУ. Преобразование и запись кодов, т.е. формирование массива K_i , $i = 0 \dots \mathfrak{M}_m$ прекращается по истечении времени взвешивания $\mathfrak{T} = \mathfrak{M}_m / f_{\text{дис}}$. Если автосамосвал движется со скоростью, превышающей v_{max} , то преобразование и запись кодов прекращается раньше – при наезде на педаль П2, установленную в конце ГП (бл. 9)

При нормальном взвешивании, когда массив K_i полностью сформирован, производится обработка записанной информации с помощью цифрового фильтра и определение с высокой точностью кода пропорциональной постоянной составляющей силы P , действующей на ДВ (бл. 10). Если же массив K_i сформирован не полностью, то производится приближенное определение постоянной составляющей (см. ниже).

Затем, в бл. 12 вычисляется масса автосамосвала брутто $\mathfrak{M}_{\text{бр}}$ (из K_p вычитается код K_0 , полученный при тарировании) и масса нетто, причем масса тары \mathfrak{M}_T определяется по номеру опознанного автосамосвала (при необходимости – с поправкой на расход горючего).

Результат взвешивания, а также номер автосамосвала и другая необходимая информация выдаются на индикацию и регистрацию (бл. 13).

Алгоритм обработки неполного массива K_i должен обеспечить по возможности близкое к точному значение кода K_p . Простое интегрирование и определение среднего значения может обеспечить подавление динамической помехи при $m \approx 1,5$ всего в 5 раз (рис. 6.1)

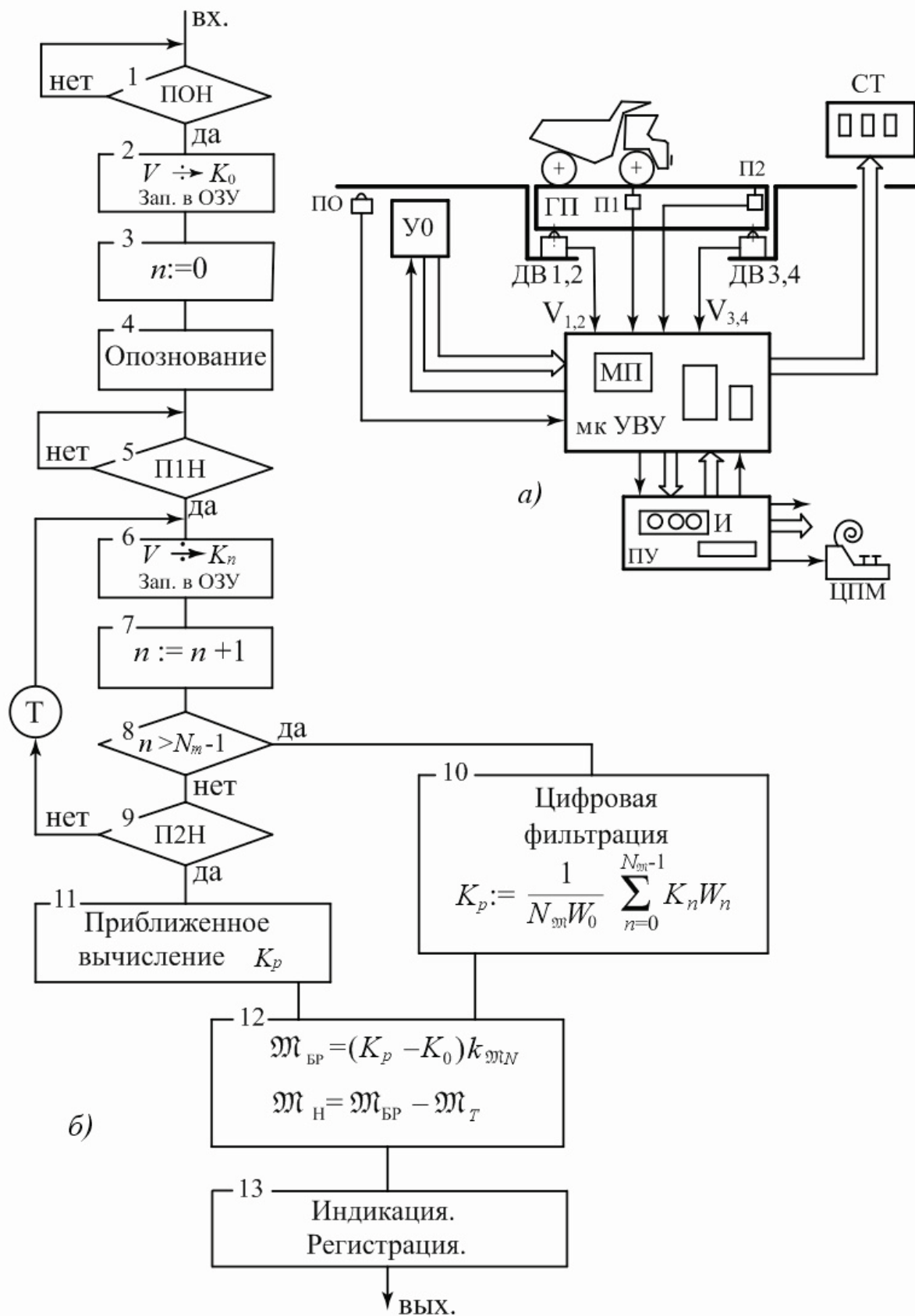


Рисунок 7.2 – Схема алгоритма функционирования весоизмерительного комплекса, работающего под управлением мкУВУ

Более целесообразно определить период динамической помехи, после чего вычислить среднее значение, интегрируя записанную в ОЗУ дискретную функцию в течение целого числа периодов помехи. Если в интервал измерения попадает больше трех, но меньше четырех полупериодов, то можно вычислить два интеграла, каждый в течение одного периода, но со сдвигом начала интегрирования на полпериода.

Период помехи может быть определен, например, методом дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Несколько проще, но менее точно, период может быть определен по точкам пересечения кривой $P(t)$, записанной в ОЗУ в виде дискретного массива K_i , с линией $P_{cp} = \text{const}(K_{cp})$.

Рассмотрим еще один способ увеличения точности взвешивания при $1 < m < 2$. Если бы каким-либо образом удалось точно определить, а затем полностью исключить первую гармонику, то погрешность определения веса была бы незначительной, так как во времени измерения \mathcal{T} укладывалось бы не менее двух периодов второй (и более высоких) гармоники динамической помехи.

В неопубликованном докладе Н.П. Похило «Вопросы тензометрического взвешивания» (научно-техническое совещание в Одессе, 1961 г.) а затем в [13, 202] предложено выделять сигнал динамической помехи, например, с помощью трансформатора, а затем вычитать его из сигнала датчиков. Практически не реализуемый с помощью аналоговой техники, этот метод, несколько модифицированный, может быть реализован в микропроцессорных весах.

Частоту, амплитуду и фазу первой гармоники можно определить либо методом ДПФ, либо (менее точно) по формулам [186]:

$$a_1 = \frac{2}{N_3 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_3} (K_i - K_{cp}) \cos \frac{2\pi i}{N_3 - N_1}; \quad (7.1)$$

$$b_1 = \frac{2}{N_3 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_3} (K_i - K_{cp}) \sin \frac{2\pi i}{N_3 - N_1}; \quad (7.2)$$

$$A = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; \quad \psi = \text{Arctg} \frac{a_1}{b_1}; \quad (7.3)$$

$$F = \frac{f_{\text{дис}}}{N_3 - N_1}. \quad (7.4)$$

Эффективность метода определим, сравнивая значение интеграла основной гармоники, –

$$\delta s = \int_0^{2\pi m} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) d\omega t = 2 \sin \pi m \cdot \sin(\pi m + \varphi_1) \quad (7.5)$$

со значением интеграла

$$\delta s' = \int_0^{2\pi m} [\sin(\omega_1 t + \varphi_1) - \sin(\omega_1' t + \varphi_1')] d\omega t, \quad (7.6)$$

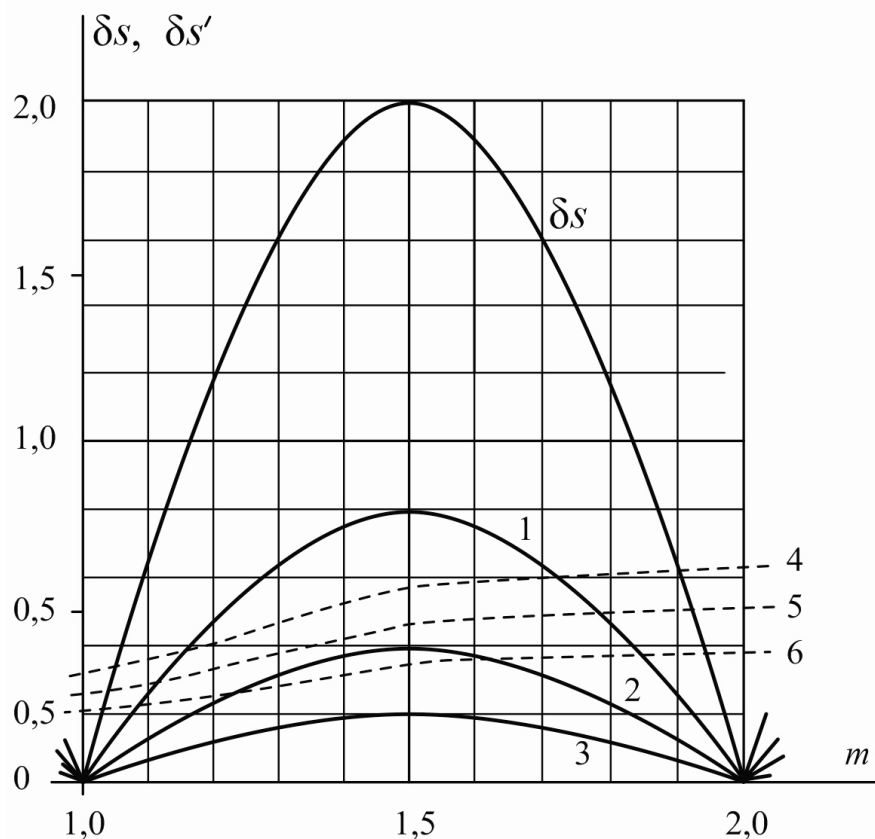
где $\omega_1' = 2\pi F_1'$ – частота основной гармоники, найденная обработкой сигнала силоизмерительных датчиков; φ_1' – начальная фаза этого сигнала. Обозначая

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_1'; \quad \delta\omega = \Delta\omega / \omega_1; \quad \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_1'; \quad (7.7)$$

и считая $\Delta\omega \ll \omega_1$, $\Delta\varphi \ll \varphi_1$, найдем

$$\begin{aligned} \delta s' &= \int_0^{2\pi m} [\sin(\Delta\omega t + \Delta\varphi) \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1)] d\omega t = \\ &= \Delta\varphi \cdot 2 \sin \pi m \cdot \cos(\pi m + \varphi_1) + \\ &+ \delta\omega [2\pi m \cdot \sin(2\pi m + \varphi_1) + \cos 2\pi m - 1]. \end{aligned} \quad (7.8)$$

Зависимость $|\delta s'(m)|$ для различных значений $\Delta\varphi$ при $\delta\omega = 0$ и для различных $\delta\omega$ при $\Delta\varphi = 0$ показана на рис. 7.3.



1, 2, 3 – зависимость $\delta s'(m)$
при $\Delta\varphi = 0,4, 0,2$ и $0,1$, если $\delta\omega = 0$;
4, 5, 6 – зависимость $\delta s'(m)$
при $\delta\omega = 0,05, 0,04$ и $0,03$, если $\Delta\varphi = 0$

Рисунок 7.3 – Максимальные значения δs и $\delta s'$

Метод можно считать эффективным, если точность определения $\Delta\varphi$ и $\delta\omega$ (при $\delta A = 0$) такова, что $|\delta s'|_{\max}$ хотя бы в 2...3 раза меньше, чем $|\delta s|_{\max} = 2$. Можно также говорить о статистической эффективности, требуя существенного уменьшения среднего квадратического отклонения погрешности.

Чтобы метод был эффективен, необходимо определять фазу φ_1 с точностью $\pm 0,2...0,3$ рад, частоту ω_1 – с точностью $\pm 4...6$ % и амплитуду A_1 – с точностью $\pm 5...7$ %.

Математическое моделирование на ЭВМ, при котором формировался случайный сигнал с параметрами, характерными для автомобильных весов, а затем методом дискретного преобразования Фурье (БПФ) определялись значения A' , F' и φ' , показало, что при $1 < m < 2$ среднее квадратическое отклонение составило:

$$\sigma[\Delta\varphi'] = 16 \text{ рад}; \quad \sigma[\delta F_1'] = 3,9\%; \quad \sigma[\delta A_1'] = 4,8\%.$$

Эти результаты показывают, что эффективность метода не бесспорна.

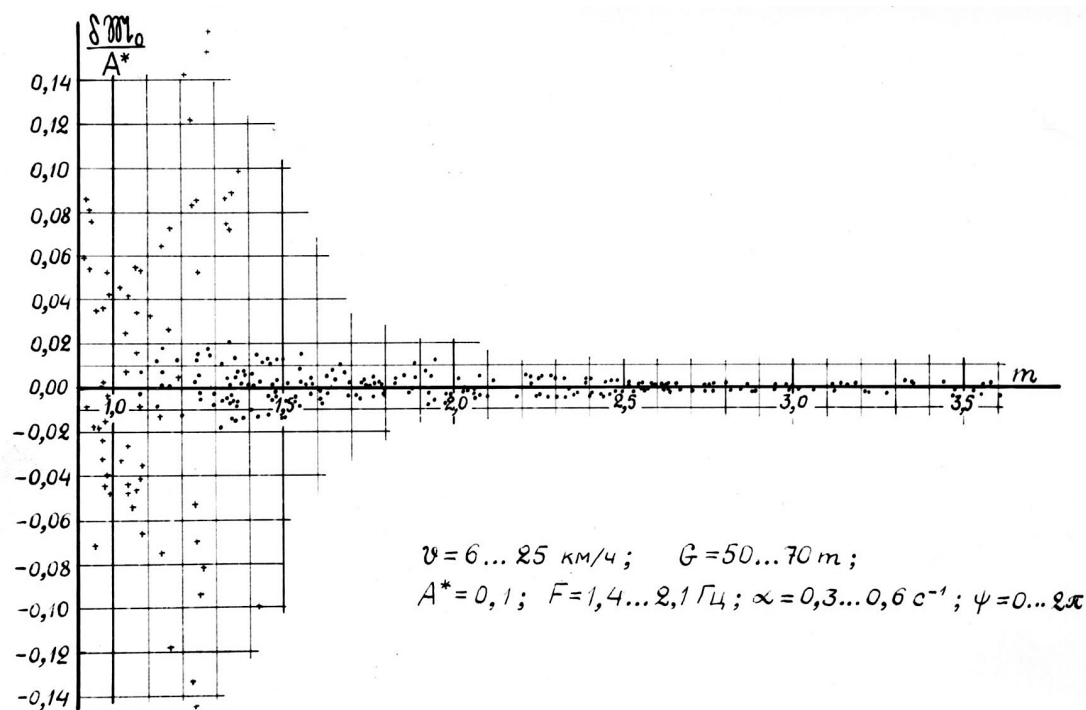
Для проверки эффективности алгоритма по рис.7.2 было проведено имитационное моделирование работы весов [105].

Результаты моделирования представлены на рис. 7.4.

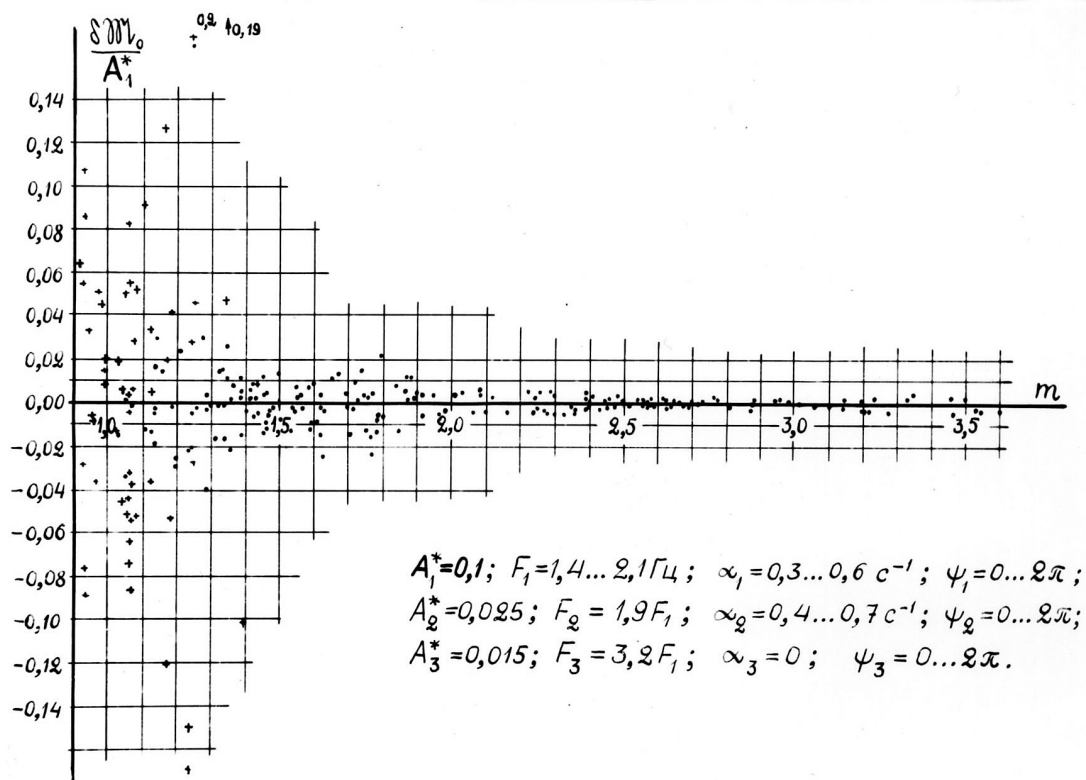
На рис. 7.4а показана зависимость удельной относительной погрешности $\delta M_0 / A^*$ от числа периодов m , укладывающихся во времени взвешивания \mathcal{T} . Помеха гармоническая затухающая. Число «взвешиваний» – 297. Из рисунка видно, что при $m \geq 2$ удельная относительная погрешность не превышает 0,007 (–43 дБ), что согласуется с теорией (см. гл. 6 и рис. 6.3). При $m = 1,5...2,0$ удельная относительная погрешность меньше, чем 0,015 (в 49 случаях из 54 – меньше чем 0,01). При $m = 0,8... 1,5$ удельная погрешность может достигать величины 0,17. Следует отметить, что большие значения погрешностей получаются только в трех случаях, когда линия $P_{\text{ср}}$ пересекает кривую $P(t)$ в одной или двух точках (погрешности, вычисленные по данным, когда $j = 1$ или $j = 2$, отмечены крестиками). При $j \geq 3$ удельная относительная погрешность не превышает величины 0,02.

Как уже отмечалось, динамическая помеха, кроме основной, обычно содержит гармоники, не кратные первой. Это затрудняет нахождение массы взвешиваемого автосамосвала. На рис. 7.4б показана зависимость $\delta M_0 / A^* = f(m)$. Сравнивая рисунки 7.4а и 7.4б, можно видеть, что в диапазоне $m = 1,7...1,9$ при наличии гармонических составляющих динамической помехи погрешность несколько больше, чем при гармонической помехе, и может превышать величину 0,02 примерно в 5...10 случаях из 100.

а.



б.



а – помеха гармоническая затухающая;

б – помеха непериодическая

(параметры указаны на рисунке)

Рисунок 7.4 – Зависимость удельной относительной погрешности взвешивания ($\delta M_0 / A^*$) от числа периодов помехи (m), укладывающихся во времени взвешивания \mathcal{T} :

Существенным достоинством микропроцессорных автовесов является возможность производить взвешивание в широком диапазоне скоростей движения. На рис. 7.5, построенном по результатам моделирования, показана зависимость погрешности взвешивания (относительной при $A_1^* = 0,1$ и удельной) от скорости движения через весы при пути взвешивания $L_B = 4\text{ м}$.

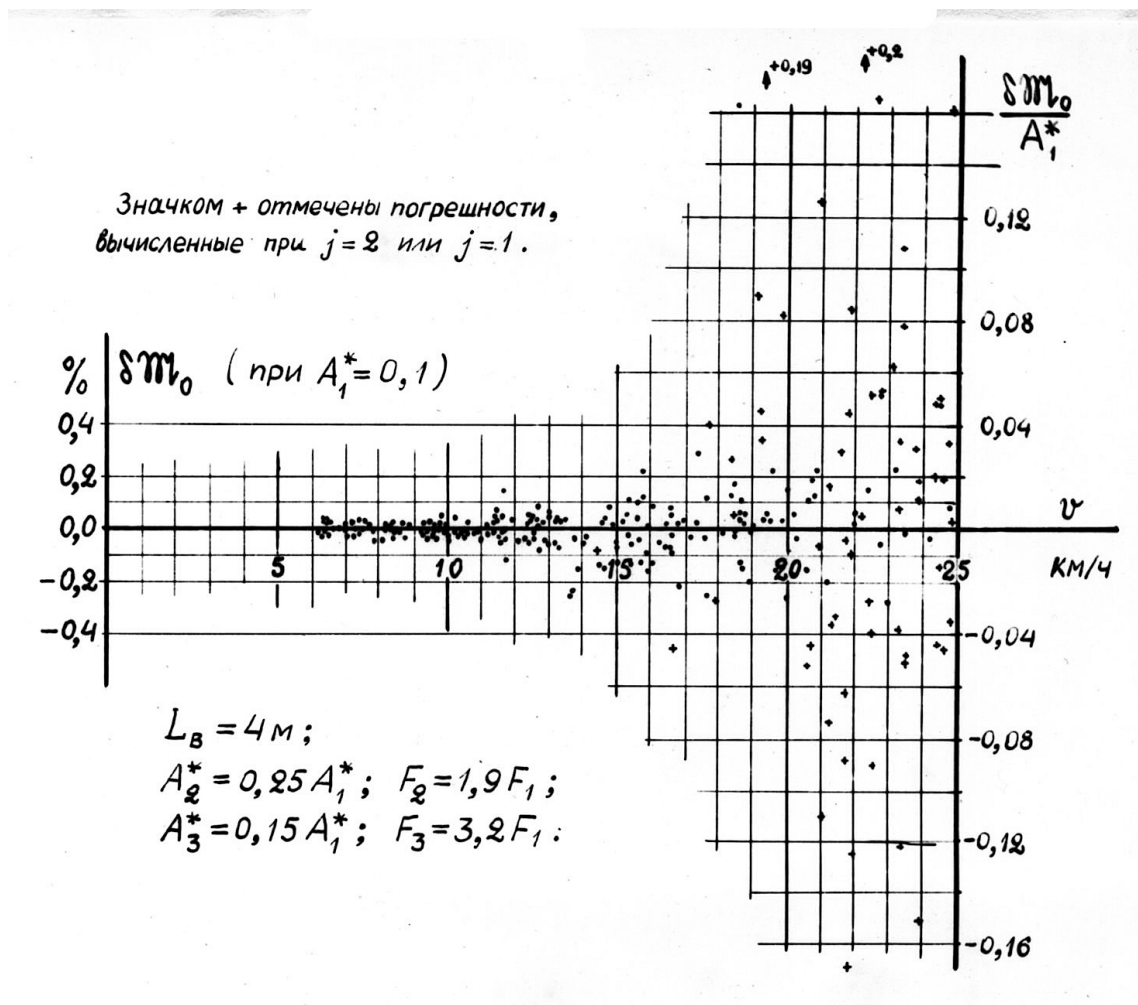


Рисунок 7.5 – Зависимость относительной погрешности взвешивания (при $A_1^* = 0,1$) от скорости движения автосамосвала через весы

Из рисунка видно, что при скорости $v \leq 11\text{ км/ч}$ относительная погрешность δm_0 не выходит за пределы $\pm 0,08\%$, при $v < 16\text{ км/ч}$ погрешность меньше чем $0,25\%$ и лишь при $v = 18...25\text{ км/ч}$ она может достигать $1,5...2\%$. Таким образом, если весы используются для целей оперативного управления, то скорость автомашин практически не ограничивается. При необходимости же произвести взвешивание с высокой точностью ($\pm 0,1\%$ при наличии соответствующих датчиков веса) необходимо ограничить скорость движения через весы на уровне 10 км/ч .

7.8. Весоизмерительный комплекс КВАРЦИТ

На основе разработанного устройства для взвешивания автосамосвалов (устройство защищено а.с. № 479006 [79], а.с. № 521474 [68], а.с. №731304 [69] и описана в работах [26, 31, 41]) и системы радиоопознавания (система защищена а.с. №410439 [92], описана и исследована в работах [87, 88, 90, 141, 142, 143]) спроектирован, разработан и испытан в производственных условиях (Ингулецкий ГОК, г. Кривой Рог) информационный комплекс КВАРЦИТ¹ предназначенный для АСУ промышленным транспортом на карьерах. В состав разработанного комплекса входят автомобильные весы АВЧ.120-71М (подсистема «Автовесы»), аппаратура опознавания (подсистема «Радиокод») и аппаратура для регистрации результатов взвешивания и опознавания (подсистема «Регистрация»). Кроме того, предусмотрен автоматический контроль правильности функционирования (подсистема «Контроль»). Структурная схема системы КВАРЦИТ представлена на рис. 7.6.

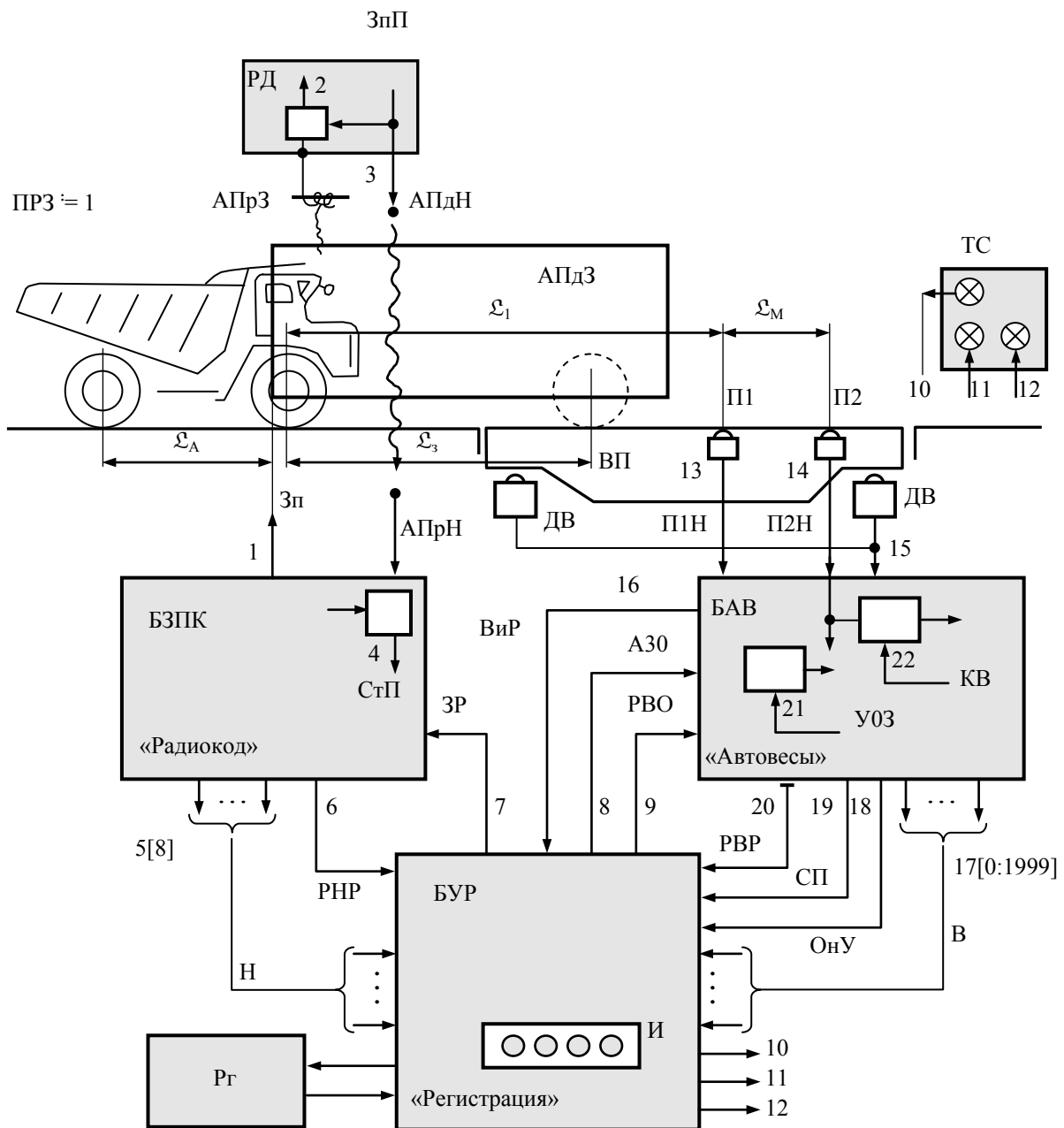
7.9. Электронные вагонные весы

Метод взвешивания и ряд схемных решений, разработанные применительно к автомобильным весам, использованы также при проектировании электронных вагонных весов, которые изготовлены совместно с Южным ГОКом (Кривой Рог). В весах ЭВВ.2×100-73 реализовано потележечное взвешивание думпкаров ВС-80 и 2ВС-105. Грузоприемная платформа длиной 6м установлена на четырех частотных датчиках ДВГ-50. Для уменьшения влияния динамической помехи использован метод интегрирования частотного сигнала, умноженного на весовую функцию вида 0,5-1-0,5. Точность взвешивания каждого вагона ±1% при скорости до 5...7 км/ч.

Вагонные весы ЭВВ.2×100-75 сданы в промышленную эксплуатацию на карьере Южного ГОКа.

Детальный анализ работы вагонных весов и описание конструкции можно найти в работе [204].

¹ КВАРЦИТ – Комплекс Весоизмерительной Аппаратуры с Радиоопознаванием и Цифровой Информацией о работе Транспорта.



БЗПК - блок запроса и приема подсистемы «Радиокод»; АПдЗ - антенна передатчика сигнала запроса; АПрН - антенна приемника кода номера; РД - радиодатчик номера автосамосвала; АПрЗ - антенна приемника запроса; АПдН - антенна передатчика номера; ВП - весовая платформа; ДВ - датчик веса; П₁, П₂ - педали; БАВ - блок обработки сигналов подсистемы «Автovesы», БУР - электронный блок управления и регистрации; И - индикатор; Рг - регистратор; ТС - табло сигнализации.

Рисунок 7.6 – Структурная схема системы КВАРЦИТ

ГЛАВА 8

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ВЕСОВ

8.1. Классификация погрешностей

Источниками погрешностей, возникающих при взвешивании автомобилей, могут быть: движущийся объект (автосамосвал), грузоприемная платформа, датчики веса, измерительный прибор. Кроме того, погрешность возникает в результате неточной градуировки весов. Классификация погрешностей приведена в таблице 8.1.

При анализе точности взвешивания автосамосвала в условиях карьера, следует учитывать: точность единичного взвешивания; точность определения веса груза, перевезенного одним автосамосвалом за смену; точность определения веса груза, перевезенного всеми автосамосвалами из карьера в течение смены.

8.2. Погрешность, вызванная динамической помехой

В разд. 6.3 получена зависимость погрешности δM_0 от частоты динамической помехи Ω и начальной фазы ψ (6.55) для метода интегрирования с умножением на весовую функции вида 0,5–1–0,5. Частота Ω , начальная фаза ψ , а также относительная амплитуда динамической помехи A^* – случайные величины, поэтому погрешность δM_0 также является случайной величиной.

Плотность распределения вероятностей этой погрешности, $\varphi(\delta M_0)$ можно найти, если известны плотности распределения вероятностей $\varphi(\Omega)$, $\varphi(\psi)$ и $\varphi(A^*)$ для парка автосамосвалов, работающих на карьере. Наиболее просто плотность распределения $\varphi(\delta M_0)$ можно найти, воспользовавшись методом Монте-Карло. Автором составлена программа для нахождения $\varphi(\delta M_0^*)$, если начальные фазы ψ равномерно распределены в интервале $0 \dots 2\pi$, а закон распределения частот (произвольный) задан точками в плоскости $\Omega - \varphi(\Omega)$.

На рис. 8.1 показана гистограмма относительных частот погрешности $\varphi(\delta M_0^*)$, построенная по результатам расчета на ЭВМ. По вертикальной оси отложена относительная частота $n_i / (N \cdot \Delta_\delta)$, где n_i – сумма частот вариантов, попавших в i -й интервал длиной $\Delta_\delta = 0,005$. Объем «выборки» $N = 10000$. Гистограмма соответствует плотности распределения частот $\varphi(F)$, полученной экспериментально на Ингулецком ГОКе [31], для автосамосвалов БЕЛА3-540 и БЕЛА3-548. Частоты распределены по нормальному закону, $M[F] = 1,8$ Гц, $\sigma[F] = 0,3$ Гц. Параметры весовой функции: $\mathfrak{T}^* = 3$, ($\mathfrak{T} = 1,67$ с), $\tau^* = 0,5$.

Для показанного на рис. 8.1 распределения в 95% случаев удельная погрешность взвешивания не выходит за пределы $\pm 0,015\%$, что при относительной амплитуде помехи $A^* = 0,1$ составляет $\pm 0,15\%$.

Таблица 8.1

Классификация погрешностей автомобильных весов

Источник погрешности	Обозначение погрешности	Причина погрешности	Основная или дополнительная
Движущийся объект	δM_0	Возникновение дополнительной силы, вызванной колебаниями автосамосвала и платформы.	Основная
Грузоприемная платформа	$\delta M_{пл}$	Неточность передачи нагрузки на датчики веса.	Основная
Датчики веса	$\delta M_{кп}$	Различные коэффициенты преобразования датчиков веса	Основная
	$\delta M_{нп}$	Нелинейность характеристик датчиков веса	Основная
	δM_{f_0}	Нестабильность начальной частоты	Основная
	$\delta M_{кс}$	Нестабильность коэффициента преобразования	Основная
	δM_t	Изменение температуры окружающей среды	Дополнительная
	$\delta M_{вл}$	Изменение влажности	Дополнительная
Прибор	δM_d	Дискретность обработки информации	Основная
Градуировка	$\delta M_{Гр.А.м}$	Неточность определения действительной массы	Основная
	$\delta M_{Гр.п}$	Дисперсия показаний при градуировке	Основная
	$\delta M_{\Delta K}$	Неточность установки коэффициента преобразования	Основная

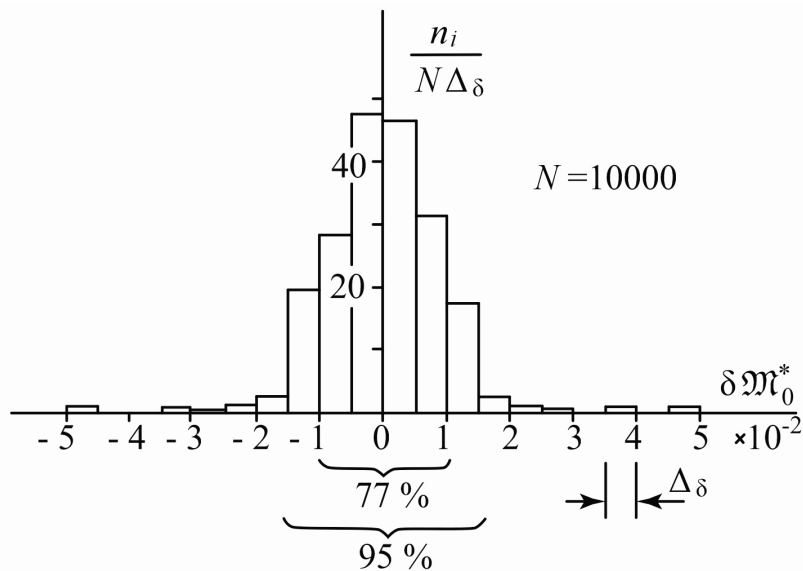


Рисунок 8.1 – Гистограмма относительных частот погрешности $\delta \mathcal{M}_0^*$, построенная по результатам моделирования на ЭВМ

«Статистическое» среднее значение погрешности равно нулю, а среднее квадратическое отклонение $\sigma[\delta \mathcal{M}_0^*] = 0,93 \cdot 10^{-2}$.

Исследование динамической погрешности в режиме ускоренного взвешивания выполнено в работе [31].

8.3. Погрешность от различия коэффициентов преобразования датчиков веса

Из материалов, изложенных в разд. 8.2, следует, что коэффициенты преобразования датчиков веса должны быть одинаковы, либо выровнены специальным блоком. Подобрать четыре датчика веса с одинаковыми коэффициентами k_{pf} затруднительно. Даже в том случае, если в схеме весов предусмотрен блок выравнивания, добиться точного удовлетворения равенств (8.1) невозможно, поскольку изменение кода ТП производится дискретно с шагом Δm_i . Следовательно, неизбежен некоторый разброс коэффициентов $k_{pf,i}$ или $m_i \cdot k_{pf,i}$ и, как следствие, – возникновение погрешности $\delta \mathcal{M}_{ки}$. Ниже анализируется эта погрешность, и указываются способы ее уменьшения.

Сила веса G автосамосвала, находящегося на грузоприемной платформе, воспринимается четырьмя датчиками веса. При этом

$$P_{Г1} + P_{Г2} + P_{Г3} + P_{Г4} = G, \quad (8.1)$$

где $P_{Гi}$ – реакция i -й опоры. Найти точные значения сил $P_{Гi}$ по заданному весу G практически невозможно, так как платформа на четырех датчиках – статически неопределимая система, а точка приложения силы G перемещается.

Решение задачи упростится, если принять во внимание следующие особенности конструкции грузоприемной платформы: 1) жесткость платформы не-

велика по сравнению с жесткостью опор; 2) конструкция платформы такова, что нагрузка от левой пары колес в основном воспринимается левой продольной балкой и передается на датчики веса №1 и №3, а нагрузка от правой пары колес воспринимается правой балкой и передается на датчики №2 и №4. Для этого случая реакция опор без большой погрешности могут быть определены следующим образом: силу веса G раскладываем на две составляющие G' и G'' , точки приложения которых располагаем на осях продольных балок, а затем находим реакции опор от каждой из сил, считая, что сила G' уравнивается только реакциями $P_{\Gamma 1}$ и $P_{\Gamma 3}$, а сила G'' – реакциями $P_{\Gamma 2}$ и $P_{\Gamma 4}$. Для принятой схемы расчета

$$P_{\Gamma 1} = \left(\frac{1}{4} - \frac{x}{2L} + \frac{y}{2l} - \frac{xy}{lL} \right) G, \quad (8.2)$$

$$P_{\Gamma 2} = \left(\frac{1}{4} - \frac{x}{2L} - \frac{y}{2l} + \frac{xy}{lL} \right) G, \quad (8.3)$$

$$P_{\Gamma 3} = \left(\frac{1}{4} + \frac{x}{2L} + \frac{y}{2l} + \frac{xy}{lL} \right) G, \quad (8.4)$$

$$P_{\Gamma 4} = \left(\frac{1}{4} + \frac{x}{2L} - \frac{y}{2l} - \frac{xy}{lL} \right) G. \quad (8.5)$$

В этих формулах: $P_{\Gamma i}$ – приращение силы, действующей на датчик веса; $G = \mathfrak{M}g$ – равнодействующая сил веса взвешиваемого автосамосвала; L и l – расстояния между опорами по продольной и поперечной осям платформы; x и y – координаты точки пересечения линии действия силы с опорной плоскостью.

Так как приращение частоты f_{Γ} датчика веса пропорционально приращению силы P_{Γ} , т.е. $f_{\Gamma i} = k_{Pf.i} P_{\Gamma i}$, то приращение суммарной частоты (после ЧС на рис. 7.1), –

$$f_{\Gamma \Sigma} = \sum_{i=1}^4 f_{\Gamma i} = \sum_{i=1}^4 k_{Pf.i} P_{\Gamma i}. \quad (8.6)$$

Подставляя сюда $P_{\Gamma i}$ по формулам (8.2...8.5), найдем

$$f_{\Gamma \Sigma} = k_{Pf.cп} + \frac{x}{2L} \Delta k_1 + \frac{y}{2l} \Delta k_2 + \frac{xy}{lL} \Delta k_3, \quad (8.7)$$

где

$$k_{Pf.cп} = \frac{1}{4} (k_{Pf.1} + k_{Pf.2} + k_{Pf.3} + k_{Pf.4}), \quad (8.8)$$

$$\Delta k_1 = (k_{Pf.3} + k_{Pf.4}) - (k_{Pf.1} + k_{Pf.2}), \quad (8.9)$$

$$\Delta k_2 = (k_{Pf.1} + k_{Pf.3}) - (k_{Pf.2} + k_{Pf.4}), \quad (8.10)$$

$$\Delta k_3 = (k_{Pf.2} + k_{Pf.3}) - (k_{Pf.1} + k_{Pf.4}). \quad (8.11)$$

При движении автосамосвала по платформе меняются координаты x и y центра тяжести и, следовательно, частота $f_{\Gamma\Sigma}$. Будем считать, что в пределах пути взвешивания S_B автосамосвал движется прямолинейно и равномерно, т.е. координаты центра тяжести изменяются во времени по закону

$$x(t) = x_0 + vt \cos \alpha, \quad (8.12)$$

$$y(t) = y_0 + vt \sin \alpha, \quad (8.13)$$

где x_0 и y_0 – координаты центра тяжести в момент начала взвешивания, α – угол между продольной осью платформы и направлением движения, v – скорость движения автосамосвала. Подставив $x(t)$ и $y(t)$ в формулу (8.7), после несложных преобразований получим:

$$\begin{aligned} f_{\Gamma\Sigma} = & \left\{ k_{Pf.ср} + \frac{\Delta k_1}{2L} x_0 + \frac{\Delta k_2}{2l} y_0 + \frac{\Delta k_3}{Ll} x_0 y_0 + \right. \\ & + \left[\frac{\Delta k_1}{2L} \cos \alpha + \frac{\Delta k_2}{2l} \sin \alpha + \frac{\Delta k_3}{Ll} (x_0 \sin \alpha + y_0 \cos \alpha) \right] vt + \\ & \left. + \frac{\Delta k_3}{Ll} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot v^2 t^2 \right\} G. \end{aligned} \quad (8.14)$$

Количество импульсов $N_{\Gamma\Sigma}$ на выходе частотного сумматора за время взвешивания \mathfrak{T} , –

$$N_{\Gamma\Sigma} = \int_{\mathfrak{T}} f_{\Gamma\Sigma} dt. \quad (8.15)$$

Подставив сюда $f_{\Gamma\Sigma}$ (8.14), а также учтя, что $v\mathfrak{T} = S_B$, найдем

$$\begin{aligned}
N_{\Gamma\Sigma} = & \left\{ k_{Pf.c\text{p}} + \frac{\Delta k_1}{2L} x_0 + \frac{\Delta k_2}{2l} y_0 + \frac{\Delta k_3}{Ll} x_0 y_0 + \right. \\
& + \frac{S_B}{2} \left[\frac{\Delta k_1}{2L} \cos \alpha + \frac{\Delta k_2}{2l} \sin \alpha + \frac{\Delta k_3}{Ll} (x_0 \sin \alpha + y_0 \cos \alpha) \right] + \\
& \left. + \frac{S_B^2}{3} \left(\frac{\Delta k_3}{Ll} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) \right\} \mathfrak{T} G = k_{\Sigma} G.
\end{aligned} \tag{8.16}$$

При градуировке весов

$$\begin{aligned}
x_0 = x_{0.\text{град}}, \quad y_0 = y_{0.\text{град}}, \quad \alpha = \alpha_{\text{град}}, \quad v = v_{\text{град}}, \\
S_B = S_{B.\text{град}}, \quad G = \mathfrak{M}_{\text{град}} g = G_{\text{град}}, \quad N_{\Gamma\Sigma} = N_{\Gamma\Sigma.\text{град}}.
\end{aligned} \tag{8.17}$$

Градуировкой будет определено значение коэффициента пропорциональности $k_{\Sigma.\text{град}}$, который в период между градуировками будет использоваться для нахождения веса автосамосвала. При этом ошибка взвешивания, вызванная неидентичностью датчиков веса, –

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{ки}} = \frac{G_B - G}{G} = \frac{\frac{N_{\Gamma\Sigma}}{k_{\Sigma.\text{град}}} - \frac{N_{\Gamma\Sigma}}{k_{\Sigma}}}{\frac{N_{\Gamma\Sigma}}{k_{\Sigma}}} \approx \frac{k_{\Sigma} - k_{\Sigma.\text{град}}}{\tilde{k}_{\Sigma.\text{град}}}. \tag{8.18}$$

В этой формуле G_B – вес автосамосвала, найденный по показаниям весов (по коэффициенту $k_{\Sigma.\text{град}}$); G – действительный вес, который можно было бы найти по действительному значению коэффициента k_{Σ} (с учетом разброса коэффициентов k_{Pfi}); $\tilde{k}_{\Sigma.\text{град}}$ – приближенное значение коэффициента $k_{\Sigma.\text{град}}$. Из (8.16), считая $\Delta k_i \ll k_{Pf.c\text{p}}$ получим:

$$\tilde{k}_{\Sigma.\text{град}} = k_{Pf.c\text{p}} \mathfrak{T}. \tag{8.19}$$

Подставим в (8.18) выражение для коэффициентов k_{Σ} (см. форм. 8.16), $k_{\Sigma.\text{град}}$ (то же, но с учетом 8.17) и $\tilde{k}_{\Sigma.\text{град}}$ (8.19); введем обозначения для относительных значений коэффициентов k_{Pfi} и Δk_i :

$$\Delta k_1^* = \Delta k_1 / k_{Pf.c\text{p}} = (k_{Pf.3}^* + k_{Pf.4}^*) - (k_{Pf.1}^* + k_{Pf.2}^*), \tag{8.20}$$

$$\Delta k_2^* = \Delta k_2 / k_{Pf.c\text{p}} = (k_{Pf.1}^* + k_{Pf.3}^*) - (k_{Pf.2}^* + k_{Pf.4}^*), \tag{8.21}$$

$$\Delta k_3^* = \Delta k_3 / k_{Pf.c\text{p}} = (k_{Pf.2}^* + k_{Pf.3}^*) - (k_{Pf.1}^* + k_{Pf.4}^*). \tag{8.22}$$

Учтем, что $y_k = y_0 + S_B \sin \alpha$ и $\cos \alpha \approx 1$. После несложных преобразований получим формулу погрешности в виде

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{M}_{\text{ки}} = & \frac{\Delta k_1^*}{2L} \left(x_0 + \frac{S_B}{2} - x_{0.\text{град}} - \frac{S_{B.\text{град}}}{2} \right) + \frac{\Delta k_2^*}{4l} (y_0 + y_k - y_{0.\text{град}} - y_{k.\text{град}}) + \\ & + \frac{\Delta k_3^*}{2Ll} \left[x_0 (y_0 + y_k) - x_{0.\text{град}} (y_{0.\text{град}} + y_{k.\text{град}}) + \right. \\ & \left. + \frac{S_B}{3} (y_0 + 2y_k) + \frac{S_{B.\text{град}}}{3} (y_{0.\text{град}} + 2y_{k.\text{град}}) \right]. \end{aligned} \quad (8.23)$$

По формуле (8.23) можно вычислить наибольшую погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{ки.max}}$, которая может возникнуть при взвешивании.

Величина и знак коэффициентов Δk_1^* , Δk_2^* и Δk_3^* определяются по формулам (8.20...8.22), причем $k_{Pf.i}^*$ ($i = 1, 2, 3, 4$) – коэффициент преобразования силы P в частоту f датчика веса, установленного под i -й опорой. Изменяя расстановку датчиков веса, можно менять значения коэффициентов Δk_r^* ($r = 1, 2, 3$). Если датчикам веса присвоить номера I, II, III и IV и обозначить коэффициент преобразования j -го датчика $k_{Pf.j}^*$ ($j = \text{I, II, III и IV}$), то значения коэффициентов Δk_r^* можно определить по таблице 8.2. Очевидно, следует принять такую расстановку датчиков веса, при которой погрешность $\delta \mathcal{M}_{\text{ки}}$ будет наименьшей.

В автомобильных весах АВЧ.120-71М величины, входящие в формулу (8.23), могут принимать такие значения: $x_0 = -2,5 \dots -2,8$ м, $S_B = 3,0 \dots 4,3$ м, (при $v = 5,6 \dots 8$ км/ч), $y_0 = -0,25 \dots +0,25$ м, $y_k = -0,3 \dots +0,3$ м. Расстояния между датчиками веса $L = 9,2$ м, $l = 5,2$ м.

Как следует из (8.23), величина погрешности будет зависеть от того, какие значения примут случайные величины x_0 , S_B , y_0 , y_k и какими были эти значения при градуировке.

Очевидно, что расстановка датчиков должна быть такой, чтобы коэффициент Δk_3 имел наибольшее значение, а Δk_1 – наименьшее, поскольку отклонение от градуировочных координат в направлении движения $(x_0 - x_{0.\text{град}}, S_B - S_{B.\text{град}})$ обычно преобладает над остальными составляющими.

Действительные значения погрешностей будут всегда меньше найденной величины, так как максимальные значения слагаемых не могут иметь одинаковые знаки. Кроме того, вероятность взвешивания с максимальной погрешностью ничтожно мала, так как для этого необходимо, чтобы четыре случайные величины приняли определенно-предельные значения.

Плотность распределения $\varphi(\delta \mathcal{M}_{\text{ки}})$ погрешности наиболее просто может быть найдена методом статистического моделирования на ЭВМ. На рис. 8.2а показана гистограмма относительных частот, построенная по результатам расчета, выполненного на ЭВМ.

Таблица 8.2.

Значение и знак коэффициента Δk_r^* ($r = 1, 2, 3$)
в зависимости от расстановки датчиков веса

№ опоры (рис.8.3)	№ варианта расстановки датчиков веса																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	№.№ датчиков веса																							
1	I	II	III	IV	IV	II	IV	IV	II	III	I	I	IV	II	I	I	IV	I	III	III	II	I	IV	II
2	II	I	IV	III	I	II	IV	III	IV	I	III	III	II	IV	I	III	I	IV	II	III	III	I	IV	II
3	III	IV	I	II	III	IV	I	I	III	I	II	IV	III	I	IV	II	III	II	IV	I	III	II	I	IV
4	IV	III	II	I	IV	III	I	II	I	III	IV	II	I	III	IV	II	II	III	I	IV	IV	III	IV	I
Коэффициент	Значение и знак коэффициента Δk_r^*																							
Δk_1^*	a	a	-a	-a	a	a	-a	-a	b	b	-b	-b	b	b	-b	-b	c	c	-c	-c	c	c	-c	-c
Δk_2^*	b	-b	b	-b	c	-c	c	-c	c	-c	c	-c	a	-a	a	-a	a	-a	a	-a	b	-b	b	-b
Δk_3^*	c	-c	-c	c	b	-b	-b	b	a	-a	-a	-a	c	-c	-c	c	b	-b	-b	b	a	-a	-a	a

$$a = (k_{pf,III}^* + k_{pf,IV}^*) - (k_{pf,I}^* + k_{pf,II}^*);$$

$$b = (k_{pf,I}^* + k_{pf,III}^*) - (k_{pf,II}^* + k_{pf,IV}^*);$$

$$c = (k_{pf,II}^* + k_{pf,III}^*) - (k_{pf,I}^* + k_{pf,IV}^*);$$

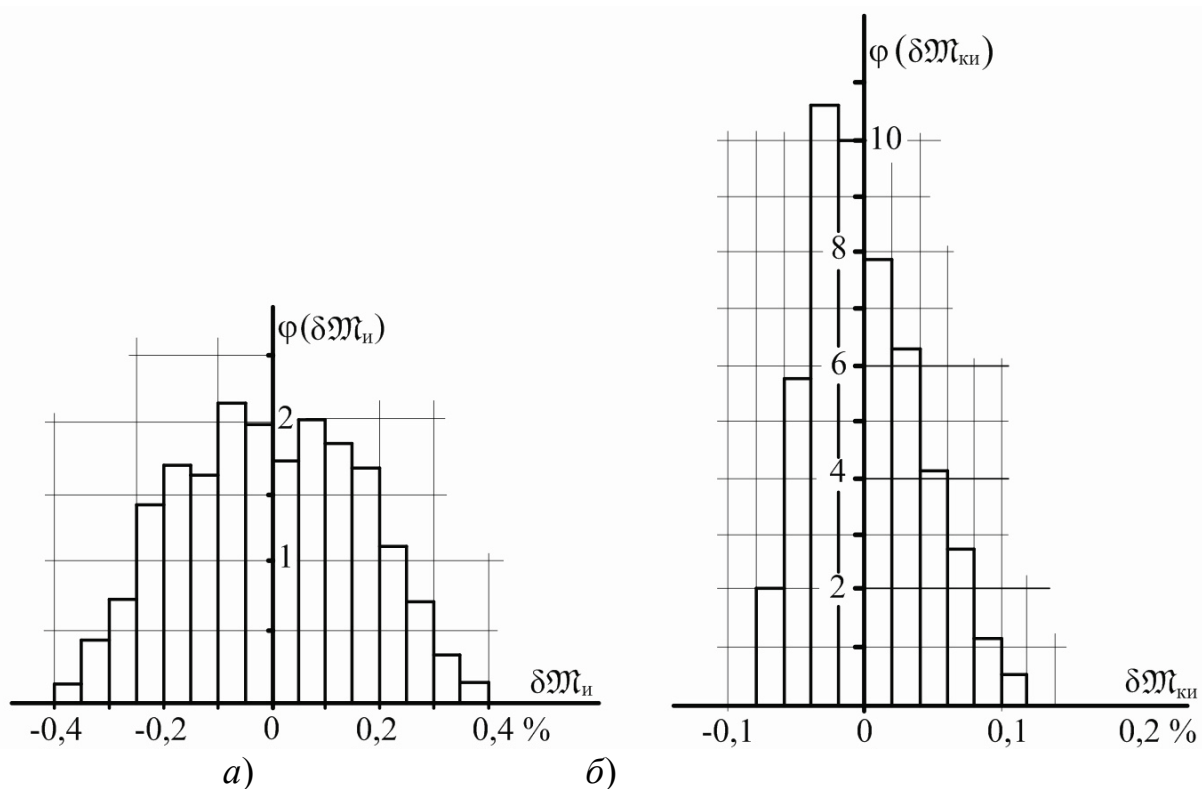


Рисунок 8.2 – Гистограмма относительных частот погрешности:
 а – при расстановке датчиков согласно варианту 21 (табл. 8.2);
 б – при расстановке датчиков согласно варианту 1

На рис. 8.2б показана гистограмма относительных частот той же погрешности для расстановки датчиков согласно варианту 1 таблицы 8.2. Погрешность в этом случае в четыре раза меньше.

Приведенный пример показывает, что при правильной расстановке датчиков погрешность $\delta M_{ки}$ в 20...50 раз меньше, чем наибольшее отклонение коэффициентов k_{pfi} от среднего значения.

Используя изложенную здесь методику, можно также определить допустимый разброс коэффициентов k_{pf} датчиков веса или шаг дискретности Δm блока выравнивания.

8.4. Погрешность, вызванная нелинейностью характеристик датчиков веса

Для взвешивания в динамике должны использоваться датчики веса с линейной характеристикой. Нелинейность тензорезисторных датчиков – 0,05...0,03%, компенсированных частотных – 0,15...0,05%. Для нелинейных вибрационно-частотных датчиков разработаны эффективные методы линеаризации [169]. Достаточно просто осуществляется линеаризация и в микропроцессорных весах. В любом случае, однако, существует остаточная нелинейность, поэтому оценка ее влияния на точность взвешивания не безынтересна.

Сначала рассмотрим погрешность нелинейности при передаче нагрузки на один датчик веса. Пусть зависимость $f_B(P_B)$ изображается кривой ab (рис. 8.3а). Соединим точки a и b , соответствующие нагрузкам $P_B = 0$ и $P_B = P_{B,\max}$, прямой линией и будем характеризовать нелинейность датчика зависимостью $\delta f_{B,\text{нл}}(P_B)$, где (см. рис. 8.3а)

$$\delta f_{B,\text{нл}} = \frac{\Delta f_{B,\text{нл}}}{\Delta f_{B,\text{м}}} = \frac{f_B - f_{B,\text{л}}}{f_{B,\text{max}} - f_{B,\text{min}}}, \quad (8.24)$$

причем

$$f_{B,\text{л}} = f_{B,\text{min}} + k_{Pf,\text{л}} P_B. \quad (8.25)$$

Зависимость $\delta f_{B,\text{нл}}(P_B)$ показана на рис. 8.3б.

При отсутствии взвешиваемого объекта на датчик действует сила P_{B0} а соответствующая ей частота f_{B0} компенсируется в измерительном приборе, так что при взвешивании интегрируется сигнал (f_Γ), соответствующий приращению частоты, –

$$f_\Gamma = f_B - f_{B0}. \quad (8.26)$$

Пусть градуировка весов производится по известной массе $\mathfrak{M}_{\text{град}}$. При этом на датчик веса действует сила

$$P_{B,\text{град}} = P_{B0} + kg\mathfrak{M}_{\text{град}}, \quad (8.27)$$

а приращение частоты ($f_{\Gamma,\text{град}}$) определяется силой

$$P_{\Gamma,\text{град}} = P_{B,\text{град}} - P_{B0} = kg\mathfrak{M}_{\text{град}}, \quad (8.28)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Проведем через точки c и d , соответствующие нагрузкам $P_B = P_{B0}$, ($P_\Gamma = 0$) и $P_B = P_{B,\text{град}}$ ($P_\Gamma = P_{\Gamma,\text{град}}$), прямую линию и будем характеризовать степень нелинейности весоизмерительной системы зависимостью $\delta f_{\Gamma,\text{нл}}(P_\Gamma)$:

$$\delta f_{\Gamma,\text{нл}} = \frac{\Delta f_{\Gamma,\text{нл}}}{\Delta f_{\Gamma,\text{м}}} = \frac{f_\Gamma - f_{\Gamma,\text{л}}}{f_{\Gamma,\text{м}}}, \quad (8.29)$$

где $f_{\Gamma,\text{л}} = k_{Pf,\text{град}} P_\Gamma$, а $f_{\Gamma,\text{м}}$ – девиация частоты, вызванная максимальной нагрузкой на весовую платформу. Зависимость $\delta f_{\Gamma,\text{нл}}(P_\Gamma)$ показана на рис. 8.3в.

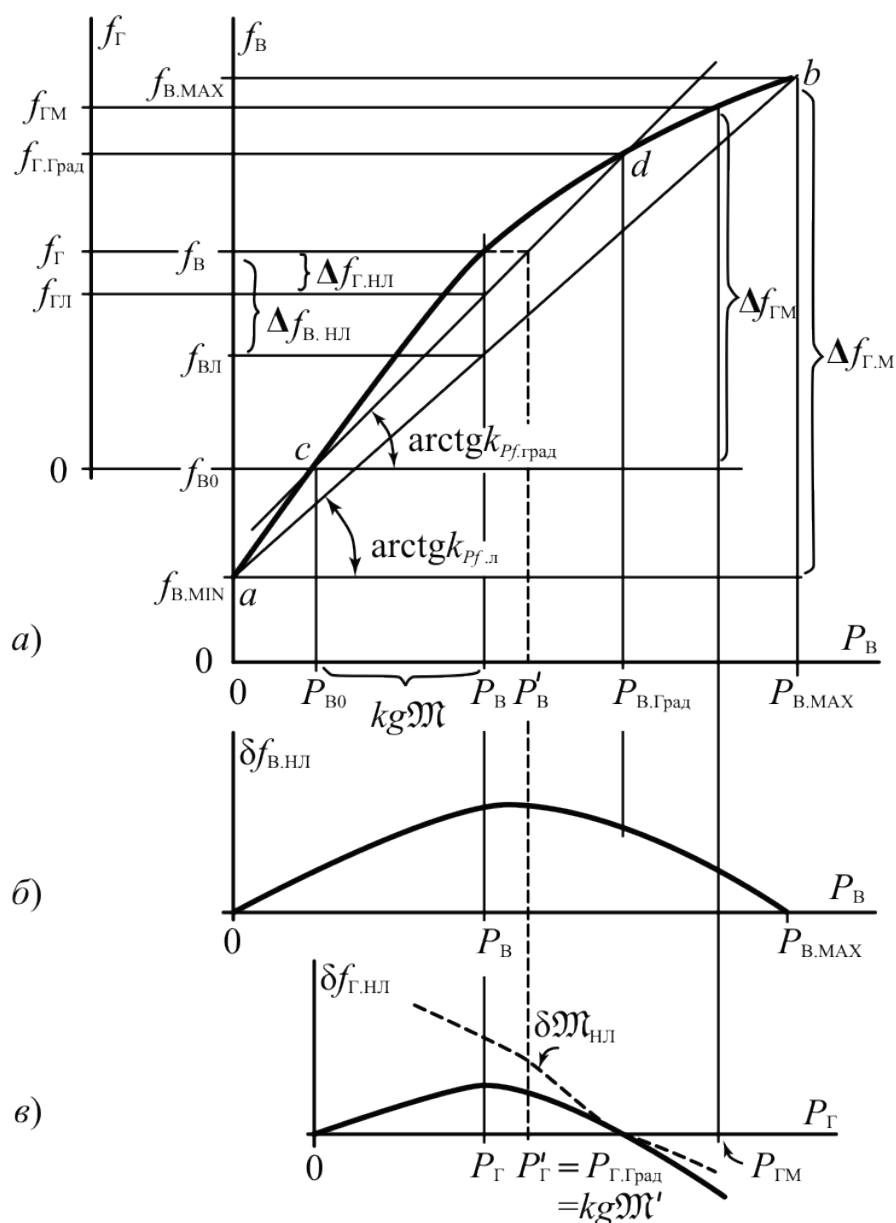


Рисунок 8.3 – Нелинейная зависимость $f_B(P_B)$ и характеристики нелинейности

При взвешивании груза массой \mathcal{M} на датчик веса действует сила

$$P_B = P_{B0} + kg\mathcal{M}^1 \quad (8.30)$$

и прибором интегрируется частота f_Γ . При этом масса взвешенного объекта будет определена, как

$$\mathcal{M}' = \frac{f_\Gamma}{k_{pf,град} kg} \quad (8.31)$$

Действительная же масса должна быть найдена по частоте $f_{\Gamma,л}$, –

¹ Влияние динамической помехи невелико; при изменении нагрузки в пределах + (5...10)% характеристику датчика веса можно считать практически линейной.

$$\mathfrak{M} = \frac{f_{\text{г.л}}}{k_{P_f, \text{град}} \text{kg}} = \frac{f_{\Gamma} - \Delta f_{\text{г.нл}}}{k_{P_f, \text{град}} \text{kg}}. \quad (8.32)$$

Следовательно, погрешность взвешивания

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{нл}} = \frac{\mathfrak{M}' - \mathfrak{M}}{\mathfrak{M}} = \frac{\Delta f_{\text{г.нл}}}{f_{\Gamma} - \Delta f_{\text{г.нл}}} \approx \frac{\Delta f_{\text{г.нл}}}{f_{\Gamma}}. \quad (8.33)$$

Разделив числитель и знаменатель (8.33) на $\Delta f_{\text{г.м}}$, приняв, во внимание (8.29) и учтя, что $f_{\text{г.л}}/\Delta f_{\text{г.м}} \approx P_{\Gamma}/P_{\text{г.м}} = P_{\Gamma}^*$, получим

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{нл}} = \Delta f_{\text{г.нл}} / P_{\Gamma}^*. \quad (8.34)$$

Очевидно также, что относительная приведенная погрешность

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{нл.прив}} = \delta f_{\text{г.нл}}. \quad (8.35)$$

Из (8.34) следует, что погрешность нелинейности полностью определяется зависимостью $\delta f_{\text{г.нл}}(P_{\Gamma})$, так что при необходимости в результат измерения может быть внесена поправка. На практике это вызывало бы неудобства и поэтому не может быть рекомендовано.

Погрешность $\delta \mathfrak{M}_{\text{нл}}$ можно уменьшить, если градуировку произвести таким образом, чтобы относительная нелинейность $\delta f_{\text{г.нл}}$ в диапазоне возможных нагрузок имела бы минимальное значение (рис.8.4). При этом, однако, затрудняется автоматическое тарирование.

Если платформа установлена на четырех датчиках, то задача однозначно не решается, так как частота на выходе сумматора зависит от расположения автосамосвала на платформе. В этом случае решение можно получить, используя метод статистического моделирования. Случайный путь взвешивания S_B (см. разд. 8.3) разбивается на n равных отрезков длиной Δx и для каждой i -ой точки внутри этого отрезка по случайной массе определяется нагрузка $P_{B,ji}$ на каждый j -ый датчик веса (8.5...8.8). По значению сил $P_{B,ji}$ и характеристикам датчиков веса определяется частота $f_{B,ji}$ каждого из них, а затем суммарная, –

$$f_{\Sigma i} = \sum_{j=1}^4 f_{B,ji}, \quad (8.36)$$

после чего вычисляется интеграл

$$N = \int_{\mathfrak{z}} f_{\Sigma}(t) dt \approx \frac{\Delta x}{v} \sum_{i=1}^{n-1} f_{\Sigma i}. \quad (8.37)$$

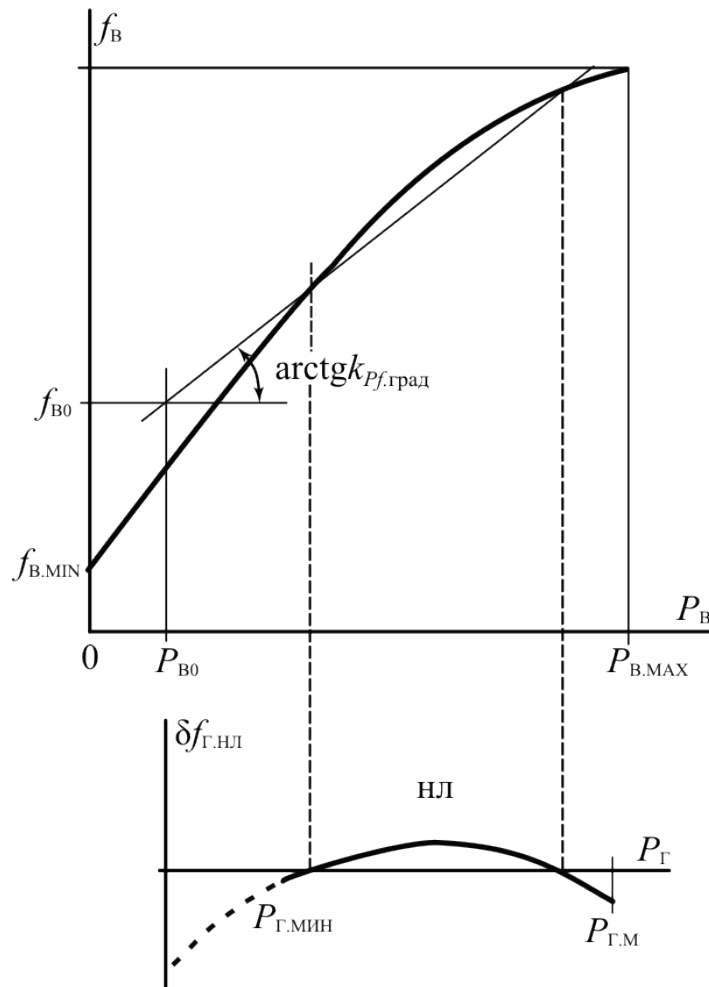


Рисунок 8.4 – Градуировка на максимальную нелинейность

Масса «взвешенного» груза определяется как

$$\mathfrak{M}_m = k_T(N - N_T), \quad (8.38)$$

причем код N_T определяется по сумме начальных частот, а коэффициент k_T – моделированием градуировки.

По совокупности погрешностей $\delta \mathfrak{M}_{нл} = (\mathfrak{M}_m - \mathfrak{M}) / \mathfrak{M}$ можно определить статистические параметры и в частности – среднее квадратическое отклонение.

Изложенный метод требует большого объема вычислений и поэтому использование его в инженерных расчетах затруднительно. Для оценки погрешности нелинейности можно пользоваться формулой

$$\delta \mathfrak{M}_{нл} \approx \delta f_{Г,нл,ср} \mathfrak{M}^*, \quad (8.39)$$

где $\delta f_{Г,нл,ср}$ – среднее значение относительной нелинейности (8.32) для четырех датчиков; \mathfrak{M}^* – масса взвешиваемого автосамосвала в относительных единицах.

8.5. Погрешность от нестабильности параметров датчиков веса

Если в схеме отсутствует блок автоматического тарирования, то уход начальной частоты датчиков веса вызывает погрешность

$$\delta \mathfrak{M}_{f_0} = \delta f_{B0} / \mathfrak{M}^* . \quad (8.40)$$

Здесь δf_{B0} – относительное отклонение начальной частоты датчиков веса по сравнению с градуировочным значением, –

$$\delta f_{B0} = (f_{\Sigma 0} - f_{\Sigma 0.\text{град}}) / \Delta f_{\Sigma \text{Г.М}} , \quad (8.41)$$

причем суммарное значение начальной частоты ($f_{\Sigma 0}, f_{\Sigma 0.\text{град}}$) и суммарная девиация частоты ($\Delta f_{\Sigma \text{Г.М}}$) под действием максимального груза \mathfrak{M}_m определяется по формуле

$$f_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 f_i . \quad (8.42)$$

При автоматической установке весов в ноль перед каждым взвешиванием погрешность $\delta \mathfrak{M}_{f_0}$ отсутствует.

Изменение коэффициентов преобразования $k_{Pf.i}$ датчиков веса вызывает погрешность $\delta \mathfrak{M}_{\text{кс}}$.

Для весов с одним датчиком веса (аналогично 3.122)

$$\delta \mathfrak{M}_{\text{кс}} = \frac{k_{Pf} - k_{Pf.\text{град}}}{k_{Pf.\text{град}}} = \delta k_{Pf} . \quad (8.43)$$

Если грузоприемная платформа установлена на четырех датчиках, то для вычисления погрешности $\delta \mathfrak{M}_{\text{кс}}$ нужно воспользоваться методом, изложенным в разд. 8.3. При этом в формулу (8.16) подставляются не только градуировочные значения $x_{0.\text{град}}, y_{0.\text{град}}, S_{B.\text{град}}, \alpha_{\text{град}}, v_{\text{град}}$ и $G_{\text{град}}$, но также $\Delta k_{1.\text{град}}, \Delta k_{2.\text{град}}$ и $\Delta k_{3.\text{град}}$, поскольку в связи с временной нестабильностью характеристик эти коэффициенты в процессе эксплуатации изменяют свои значения

Если известно, что в течение некоторого времени (например, месяца, квартала и т.п.) с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ коэффициент преобразования изменится на величину, не большую чем $\delta k_{Pf.\text{max}}$, то можно считать, что среднее квадратическое отклонение

$$\sigma[\delta k_{Pf}] < 0,5 \delta k_{Pf.\max}^1,$$

откуда дисперсия погрешности

$$\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_{\text{кc}}] < 0,065 (\delta k_{Pf.\max})^2.$$

Для весов, установленных на ИнГОКе, коэффициент k_{Pf} изменяется в течение месяца на величину, не большую чем $\Delta k_{Pf.\max} = 0,005$ (0,5%). Следовательно, дисперсия

$$\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_{\text{кc}}] < 0,065 \cdot 0,005^2 = 1,62 \cdot 10^{-6},$$

а среднее квадратическое отклонение погрешности

$$\sigma[\delta \mathcal{M}_{\text{кc}}] < \sqrt{\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_{\text{кc}}]} = 0,127 \cdot 10^{-2} \approx 0,13 \%.$$

Для оценки погрешности достаточную точность дает формула

$$\mathcal{D}[\delta \mathcal{M}_{\text{кc}}] \approx \frac{\mathcal{D}[\delta k_{Pf}]}{N_{\text{дв}}}, \quad (8.44)$$

где $N_{\text{дв}}$ – количество датчиков веса, воспринимающих нагрузку.

8.6. Погрешность дискретности

Сравнительно просто анализируется погрешность дискретности автомобильных весов с одним датчиком веса и простым интегрированием. В этом случае можно воспользоваться формулой (4.68) и определить число импульсов, проходящих на итоговый счетчик, как

$$N = \text{entier} \left(\frac{\mathcal{T} - \xi_1 T_B - t_{\min}}{T_B} \right) + 1 + \text{entier} \left(\xi_1 + \theta_B + \frac{t_{\min}}{T_B} \right). \quad (8.45)$$

Отсюда математическое ожидание числа импульсов

$$M[N] = f_B (\mathcal{T} - 2t_{\min}) + 1 + \theta, \quad (8.46)$$

что при $t_{\min} \ll \mathcal{T}$ и $\theta = 0,5$ дает $M[N] = f_B \mathcal{T} + 1,5$, а дисперсия

¹ Даже для равномерного распределения $\sigma[\delta] = \delta / \sqrt{3}$. В действительности закон распределения вероятностей ближе к нормальному, чем и оправдывается знак неравенства.

$$\mathfrak{D}[N] = \mathfrak{D}\left[\text{entier}\left(\frac{\mathfrak{T} - t_{\min}}{T_B} - \xi_1\right)\right] + \mathfrak{D}\left[\text{entier}\left(\theta_B - \frac{t_{\min}}{T_b} - \xi_1\right)\right] \leq 0,5.^1 \quad (8.47)$$

При этом среднее квадратическое отклонение

$$\sigma[N] = \sqrt{\mathfrak{D}[N]} \leq \sqrt{0,5} \approx 0,7, \quad (8.48)$$

после чего нетрудно найти возможную погрешность.

Если весовая платформа установлена на четырех датчиках, то воспользоваться этим методом нельзя, так как временные интервалы T_{42} между соседними импульсами на выходе частотного сумматора не одинаковы².

Анализируя погрешность дискретности весов с четырьмя датчиками и интегрированием с умножением на весовую функцию вида $0,5-1-0,5$, будем рассуждать следующим образом. Влияние дискретности может проявляться в начале и в конце периода интегрирования \mathfrak{T} , а также при переключении весовой функции из $0,5$ в 1 и из 1 в $0,5$. Дискретность и неравномерность поступления импульсов в течение остальной части периода интегрирования не влияет на результат измерения. Поэтому, разделив период интегрирования на 4 части (рис. 8.5), будем рассматривать влияние дискретности поочередно вблизи каждого из указанных моментов времени.

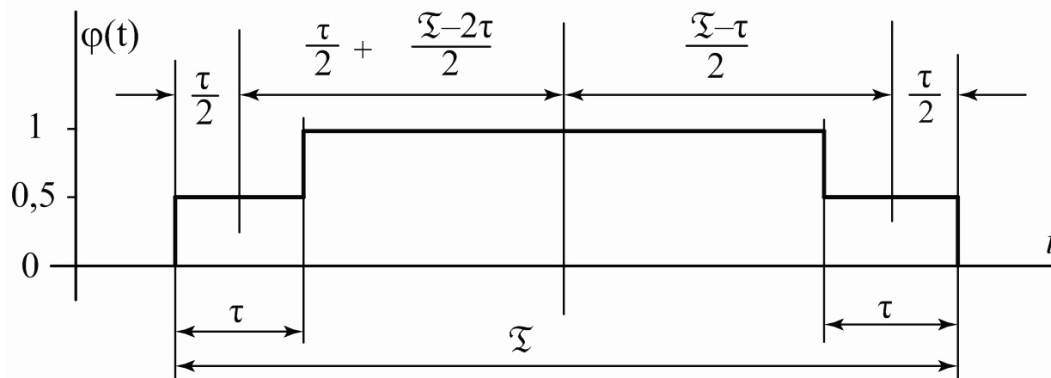


Рисунок 8.5 – Деление периода интегрирования на четыре части

На рис. 8.6 показаны временные диаграммы напряжений U_{42} (после частотного сумматора), $U_{42.T}$ (после триггера Т в блоке ФОС, осуществляющего деление частоты на 2) и U_{43} (на выходе блока ФОС) вблизи начала периода интегрирования.

¹ См. форм (4.90) и далее.

² Частота f_{42}/T_{42} рассматривалась ранее как непрерывная величина, что, конечно, не соответствует действительности.

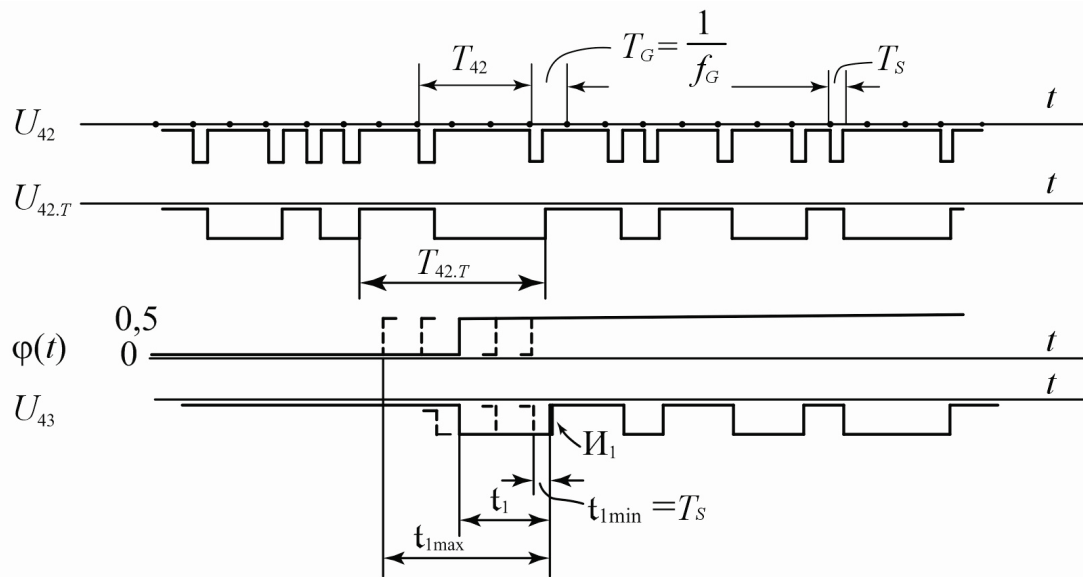


Рисунок 8.6 – Временные диаграммы напряжений вблизи момента переключения весовой функции из 0 в 0,5

Независимо от того, в какой из моментов периода $T_{42.T}$ поступит импульс «Взвешивание» ($\varphi(t) := 0,5$), на выход блока ФОС пройдет импульс, срез¹ которого обозначен И1, и все другие импульсы, попадающие в интервал $\tau/2$. Все импульсы, кроме первого (И1), будем считать равномерно и непрерывно распределенными в интервале $0,5\tau - 0,5\bar{T}_{42.T} - t_1$, (см. рис. 8.7), где t_1 – время от начала импульса «Взвешивание» до момента образования фронта первого импульса (И1), а $\bar{T}_{42.T}$ – среднее за время интегрирования значение периода $T_{42.T}$. Таким образом, число импульсов, проходящих на выход блока ФОС за время $0,5\tau -$

$$N_1 = 1 + (0,5\tau - 0,5\bar{T}_{42.T} - t_1)\bar{f}_{42.T}, \quad (8.49)$$

или, с учетом того, что $\bar{f}_{42.T} = \bar{f}_{42} / 2$

$$N_1 = 0,5 + 0,5\bar{f}_{42}(0,5\tau - t_1). \quad (8.50)$$

Здесь $\bar{f}_{42} = \sum_{i=1}^4 f_{41.i}$ – среднее значение частоты на выходе ЧС; $f_{41.i}$ – частота i -го датчика веса (см. рис. 7.1).

Время t_1 – случайная величина, которая может принять значения от $t_{1.min} = T_S$, где T_S – длительность импульса на выходе частотного сумматора (см. разд. 8.2), до

¹ По срезу переключаются триггеры в блоках УсВ и ИС.

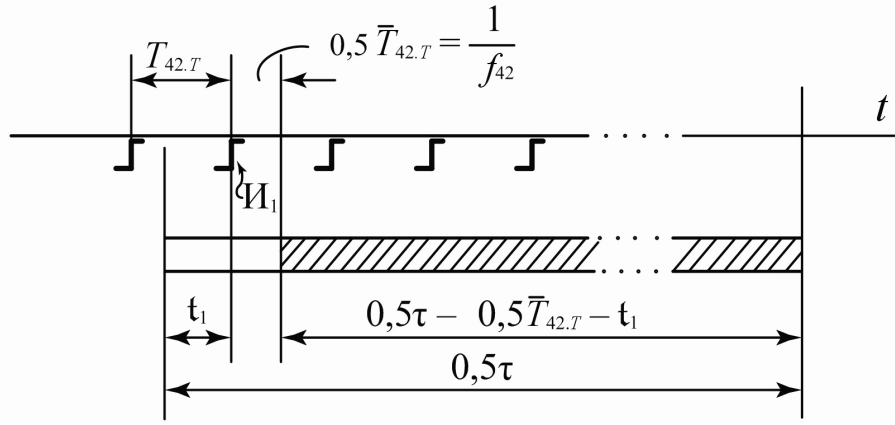


Рисунок 8.7 – Временной интервал (заштрихован), в котором импульсы считаются равномерно распределенными

$$t_{1.\max} = T_{42.T} - T_G + T_S. \quad (8.51)$$

Период следования $T_{42.T}$, в свою очередь, также случайная величина, равная сумме двух соседних периодов T_{42} . Распределение вероятностей дискретной случайной величины T_{42} зависит от соотношения частот \bar{f}_{42} / f_G , где f_G – частота генератора, осуществляющего опрос триггеров памяти ЧС.

Вероятность \mathfrak{P}_i того, что длительность периода $T_{42} = iT_G$, где $T_G = 1/f_G$, может быть вычислена по следующим формулам:

$$\mathfrak{P}_1 = \{T_{42} = T_G\} = \frac{\bar{f}_{42}}{f_G}; \quad (8.52)$$

$$\mathfrak{P}_2 = \{T_{42} = 2T_G\} = \mathfrak{P}_1(1 - \mathfrak{P}_1); \quad (8.53)$$

$$\mathfrak{P}_3 = \{T_{42} = 3T_G\} = \mathfrak{P}_1(1 - (\mathfrak{P}_1 + \mathfrak{P}_2)); \quad (8.54)$$

$$\mathfrak{P}_4 = \{T_{42} = 4T_G\} = \mathfrak{P}_1^*(1 - (\mathfrak{P}_1 + \mathfrak{P}_2 + \mathfrak{P}_3)), \quad (8.55)$$

где

$$\mathfrak{P}_1^* = 2 - f_G / \bar{f}_{42} \text{ при } 1 \leq f_G / \bar{f}_{42} \leq 2,$$

$$\mathfrak{P}_1^* = 0 \text{ при } f_G / \bar{f}_{42} > 2, \quad \mathfrak{P}_1^* = 1 \text{ при } f_G / \bar{f}_{42} < 1;$$

$$\mathfrak{P}_5 = \{T_{42} = 5T_G\} = \mathfrak{P}_{1.\Pi} \left(1 - \sum_{i=1}^4 \mathfrak{P}_i \right), \quad (8.56)$$

где $\mathfrak{P}_{1.П} = 2\mathfrak{P}_1$ при $\mathfrak{P}_1 \leq 0,5$ и $\mathfrak{P}_{1.П} = 1$ при $\mathfrak{P}_1 > 0,5$;

$$\mathfrak{P}_6 = \{T_{42} = 6T_G\} = \mathfrak{P}_{1.П} \left(1 - \sum_{i=1}^5 \mathfrak{P}_i \right); \quad (8.57)$$

$$\mathfrak{P}_7 = \{T_{42} = 7T_G\} = \mathfrak{P}_{1.П} \left(1 - \sum_{i=1}^6 \mathfrak{P}_i \right); \quad (8.58)$$

$$\mathfrak{P}_8 = \{T_{42} = 8T_G\} = \mathfrak{P}_{1.П}^* \left(1 - \sum_{i=1}^7 \mathfrak{P}_i \right), \quad (8.59)$$

где $\mathfrak{P}_{1.П}^* = 2 - f_G / (2\bar{f}_{42})$ при $1 \leq f_G / (2\bar{f}_{42}) \leq 2$,

$\mathfrak{P}_{1.П}^* = 0$ при $f_G / \bar{f}_{42} > 2$, $\mathfrak{P}_{1.П}^* = 1$ при $f_G / (2\bar{f}_{42}) < 1$

и т.д.

Формулы (8.52...8.59) получены в результате логического анализа работы частотного сумматора. Правильность этих формул проверена методом моделирования работы частотного сумматора на ЭВМ.

Распределение длительности периода $T_{42.Т}$ находится по формуле

$$\mathfrak{P}\{T_{42.Т} = kT_G\} = \sum_{i=1}^{k-1} \mathfrak{P}\{T_{42.Т}^П = iT_G\} \mathfrak{P}\{T_{42.Т}^И = (k-i)T_G\}, \quad (8.60)$$

где $T_{42.Т}^И$ и $T_{42.Т}^П$ – длительности импульса и паузы в периоде $T_{42.Т}$. Очевидно, что они равны длительности периода T_{42} . Величина k в формуле (8.60) принимает значение 2, 3, 4 и т.д. до такого значения $k = n$, при котором вероятность $\mathfrak{P} = 0$.

Зная распределение величины $T_{42.Т}$ можно найти распределение вероятностей дискретной случайной величины

$$\mathfrak{P}\{t_1 = mT_G + T_S\} = \sum_{i=m+1}^n \frac{1}{i} \mathfrak{P}\{T_{42.Т} = iT_G\}, \quad (8.61)$$

причем $m = 0, 1, 2, \dots, n - 1$.

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины t_1 вычисляются по известным формулам.

Определим теперь вторую составляющую рассматриваемой погрешности, вызванную переключением весовой функции из 0,5 в 1.

На рис. 8.8 показаны временные диаграммы напряжений U_{42} , $U_{42.Т}$, а также напряжения U_{43} для двух возможных случаев: когда весовая функция переключается во время паузы напряжения $U_{42.Т}$ и когда переключение приходится на импульс.

Из рисунка видно, что в течение времени, соответствующего периоду

напряжения $U_{42.T}$ на итоговый счетчик поступит или один импульс (I_2), или два (I_2 и I_3). Так как вероятности переключения весовой функции во время пауз и импульса одинаковы, то математическое ожидание числа импульсов за время $T_{42.T} = t_2 + t_3$ равно 1,5 и, следовательно, число импульсов, поступающих на итоговый счетчик за вторую часть периода измерения, –

$$N_2 = 1,5 + (0,5\tau - t_2)\bar{f}_{42.T} + (0,5\tau - \tau - t_3)\bar{f}_{42}. \quad (8.62)$$

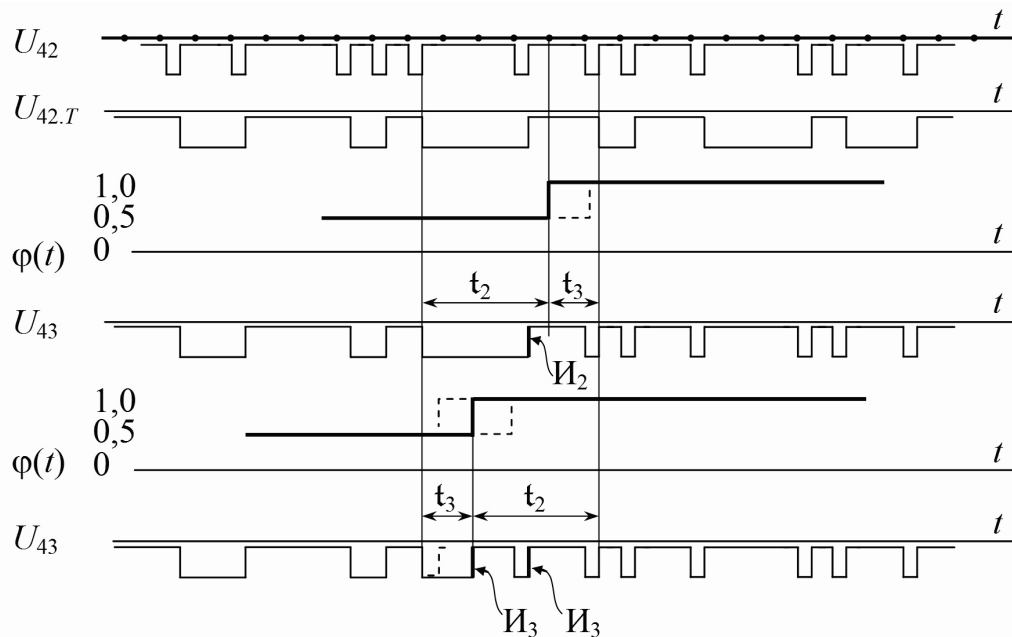


Рисунок 8.8 – Временные диаграммы напряжения вблизи момента переключения весовой функции из 0,5 в 1

После преобразований, с учетом того, что $\bar{f}_{42.T} = f_{42} / 2$ и $t_2 + t_3 = 2T_{42} = 2 / f_{42}$, получим:

$$N_2 = \frac{\bar{f}_{42}}{2} \left(\tau - \frac{3}{2}\tau - t_3 \right) + \frac{1}{2}. \quad (8.63)$$

Случайная величина t_3 имеет такое же распределение вероятностей, как и t_1

Рассуждая аналогично, найдем, что для третьей части периода интегрирования

$$N_3 = \frac{\bar{f}_{42}}{2} \left(\tau - \frac{3}{2}\tau - t_3 \right), \quad (8.64)$$

а для четвертой части (как и для первой), –

$$N_4 = \frac{\bar{f}_{42}}{2} \left(\frac{1}{2} \tau - t_1 \right) + \frac{1}{2}. \quad (8.65)$$

Так как общее число импульсов, проходящих на выход блока ФОС, $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$, то математическое ожидание и дисперсия вычисляются по формулам:

$$M[N] = \sum_{i=1}^4 M[N_i] = \bar{f}_{42} (\mathfrak{T} - \tau) - 2\bar{f}_{42} M[t_1] + 1,5; \quad (8.66)$$

$$\mathfrak{D}[N] = \sum_{i=1}^4 \mathfrak{D}[N_i] = \bar{f}_{42}^2 \mathfrak{D}[t_1]. \quad (8.67)$$

В разработанных весах «цена» одного импульса равна 100 кг, можно показать, что с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95 \dots 0,98$ погрешность дискретности не превысит 75...110 кг. Так как частота 5320 Гц, для которой вычислена эта погрешность, соответствует нагрузке на платформу $P \approx 70$ т, то максимальная погрешность дискретности не выйдет за пределы $\pm(0,1 \dots 0,15)\%$, что для весов класса 1,0 допустимо.

Погрешность дискретности в режиме ускоренного взвешивания исследована в работе [31].

8.7. Погрешность градуировки

Погрешность градуировки может быть вызвана следующими причинами: 1) неточностью определения действительной массы автосамосвала, с помощью которого производится градуировка весов; 2) дисперсией показаний весов при градуировке; 3) неточностью установки коэффициента преобразования (из-за дискретности регулировки этого коэффициента). Рассмотрим каждую из составляющих погрешности градуировки.

1. Автосамосвал, с помощью которого производится градуировка, может быть предварительно взвешен на рычажных весах класса 0,1 или 0,2. Если эти весы находятся на значительном удалении от тарируемых, необходимо обеспечить неизменность массы груза, находящегося в кузове (просыпание, попадание атмосферной влаги) и учесть расход горючего на перегон автосамосвала.

В разработанных весах силоизмерительные датчики построены на базе образцовых динамометров ДОСМ-100 класса 0,2, поэтому определение истинного веса автосамосвала может быть произведено с их помощью. Выполнив взвешивание в статике m раз, можно вычислить среднее значение $\mathfrak{M}_{\text{гр.А.}m}$ и дисперсию $\mathfrak{D}[\mathfrak{M}_{\text{гр.А.}}]$. После этого по формуле

$$\mathcal{D}[\mathfrak{M}_{\text{гр.А.м}}] = \frac{\mathcal{D}[\mathfrak{M}_{\text{гр.А}}]}{\mathfrak{M}_{\text{гр.А.м}}^2 \cdot m} \quad (8.68)$$

можно найти дисперсию среднего значения, то есть дисперсию погрешности определения истинной массы «градуировочного» автосамосвала.

Так как градуировочная характеристика динамометров даже при $\mathcal{D}[\mathfrak{M}_{\text{гр.А}}] = 0$ допускает погрешность $\pm 2\%$, то к дисперсии $\mathfrak{M}_{\text{гр.А.м}}$, вычисленной по результатам измерения, нужно добавить дисперсию $\mathcal{D}_{\text{гр.дин}}$, которая учитывала бы неточность градуировочной характеристики динамометров. Эта дисперсия может быть вычислена следующим образом:

$$\mathcal{D}_{\text{гр.дин}} = \frac{1}{4} \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-2}}{3} \right)^2 = 0,17 \cdot 10^{-6}, \quad (8.69)$$

где 4 – количество динамометров, воспринимающих нагрузку от взвешиваемого автосамосвала; 0,2 – наибольшая погрешность, %.

2. При многократном взвешивании в движении автосамосвала используемого для градуировки весов, результаты измерения будут различными из-за погрешностей $\delta\mathfrak{M}_0$, $\delta\mathfrak{M}_{\text{пл}}$, $\delta\mathfrak{M}_{\text{ки}}$ и $\delta\mathfrak{M}_d$. Дисперсия при единичном измерении массы, –

$$\mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{\text{гр.1}}] = \mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{0.\text{гр}}] + \mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{\text{пл.гр}}] + \mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{\text{ки.гр}}] + \mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{d.\text{гр}}], \quad (8.70)$$

причем дисперсия погрешности дискретности

$$\mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{d.\text{гр}}] = \mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{d.\text{т.гр}}] + \mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{d.\text{в.гр}}], \quad (8.71)$$

где $\mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{d.\text{т.гр}}]$ – дисперсия, вызванная дискретностью при установке весов в ноль; $\mathcal{D}[\delta\mathfrak{M}_{d.\text{в.гр}}]$ – то же, но при взвешивании «градуировочного» автосамосвала.

В качестве показания весов, используемых для градуировки, должно быть принято среднее значение при n взвешиваниях, –

$$\mathfrak{M}_{\text{гр.н}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathfrak{M}_{\text{гр.и}}. \quad (8.72)$$

При этом дисперсия среднего значения при n взвешиваниях, –

$$\mathfrak{D}[\delta m_{гр. n}] = \frac{\mathfrak{D}[\delta m_{гр. 1}]}{n}. \quad (8.73)$$

Количество взвешиваний при градуировке должно быть 8...10.

3. По результатам взвешивания в движении «градуировочного» автосамосвала должно быть (при необходимости) изменено значение коэффициента K_m (8.20). В разработанных весах это достигается изменением времени интегрирования \mathfrak{T} . Поскольку это время изменяется дискретно с шагом $\Delta \mathfrak{T}$, то неизбежна погрешность, вызванная неточностью установки K_m . Максимальное значение этой погрешности – полшага дискретности:

$$\delta m_{\Delta K, \max} = \frac{0,5 \Delta K_m}{K_m}. \quad (8.74)$$

Так как погрешность $\delta m_{\Delta K}$ равномерно распределена в интервале $\pm \delta m_{\Delta K, \max}$, то дисперсия ее

$$\mathfrak{D}[\Delta m_{\Delta K}] = \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta \mathfrak{T}}{\mathfrak{T}} \right)^2. \quad (8.75)$$

Общая дисперсия погрешности градуировки

$$\mathfrak{D}[\delta m_{гр}] = \mathfrak{D}[\delta m_{гр. A. m}] + \mathfrak{D}_{гр. дин} + \mathfrak{D}[\delta m_{гр. n}] + \mathfrak{D}[\delta m_{\Delta K}]. \quad (8.76)$$

8.8. Общая погрешность автомобильных весов

Основная погрешность взвешивания равна сумме составляющих:

$$\begin{aligned} \delta m_{в. очн} = & \delta m_0 + \delta m_{пл} + \delta m_{к. и} + \delta m_{пл} + \\ & + \delta m_{f0} + \delta m_{к. с} + \delta m_{д} + \delta m_{гр}. \end{aligned} \quad (8.77)$$

Математическое ожидание основной погрешности равно математическому ожиданию погрешности нелинейности (для остальных погрешностей $M = 0$), а дисперсия, –

$$\begin{aligned} \mathfrak{D}[\delta m_{в. очн}] = & \mathfrak{D}[\delta m_0] + \mathfrak{D}[\delta m_{пл}] + \mathfrak{D}[\delta m_{к. и}] + \mathfrak{D}[\delta m_{f0}] + \\ & + \mathfrak{D}[\delta m_{к. с}] + \mathfrak{D}[\delta m_{д}] + \mathfrak{D}[\delta m_{гр}]. \end{aligned} \quad (8.78)$$

При этом основная погрешность взвешивания с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ не выйдет за пределы

$$\delta\mathcal{M}_{\text{В.ОСН.max}} = M[\delta\mathcal{M}_{\text{В.ОСН}}] + \left| 2\sqrt{\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{В.ОСН}}]} \right|. \quad (8.79)$$

Составляющие дисперсии основной погрешности могут быть определены следующие образом.

Дисперсия $\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_0]$, зависящая от метода подавления и закона распределения вероятностей частот и амплитуд динамической помехи, может быть определена статистическим моделированием с помощью ЭВМ. Как указывалось в разд. 8.2, можно считать

$$\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_0] = (\delta\mathcal{M}_{0.\text{max}} / 3)^2. \quad (8.80)$$

Дисперсия $\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{пл}}]$, зависящая от конструкции платформы, определяется экспериментально.

Дисперсия $\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{к.и}}]$ зависит от разброса значений коэффициентов $k_{\text{pf.i}}$ датчиков веса и принятой их расстановки (см. разд. 8.3). Можно считать, что

$$\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{\text{к.и}}] = (\delta\mathcal{M}_{\text{к.и.max}} / 3)^2, \quad (8.81)$$

где $\delta\mathcal{M}_{\text{к.и.max}}$ – наибольшее значение погрешности от неидентичности датчиков веса (8.24...8.28). Более точное значение дисперсии может быть найдено методом статистического моделирования.

Дисперсия $\mathcal{D}[\delta\mathcal{M}_{f_0}]$ может быть определена по той же методике, что и для конвейерных весов (разд. 3.10 ф. 3.121). При автоматическом тарировании погрешность $\delta\mathcal{M}_{f_0}$ отсутствует.

Дисперсия $\mathcal{D}(\delta\mathcal{M}_{\text{к.с}})$ определяется по наибольшему возможному отклонению ($\delta k_{\text{pf.max}}$), за пределы которого с вероятностью $\mathfrak{P} = 0,95$ не выйдет отклонение коэффициента преобразования в течение определенного времени. Методика определения дисперсии этой погрешности изложена в разд. 8.5.

Дисперсия погрешности дискретности вычисляется по формуле

$$\mathcal{D}[\mathcal{M}_{\text{д}}] = \left(\frac{C}{\mathcal{M}} \right)^2 (\mathcal{D}[\Delta N_{\text{ис.т}}] + \mathcal{D}[\Delta N_{\text{ис.в}}]). \quad (8.82)$$

Дисперсия $\mathcal{D}(\delta\mathcal{M}_{\text{гр}})$ находится по методике, изложенной в разд. 8.7.

Результаты расчета основной погрешности для автомобильных весов, разработанных для АСУ ГОКов (АВЧ.120-71М), сведены в таблицу 8.3. Из таблицы видно, что погрешность единичного взвешивания движущихся автосамосвалов не выйдет за пределы (0,5...0,8)% (с надежностью $\mathfrak{P} = 0,95...0,99$), что удовлетворяет требованиям ГОСТ на точность взвешивания руд, углей и т.п.

Таблица 8.3.

Расчётное значение общей погрешности автомобильных весов для ГОКов

Обозначение погрешности	Дисперсия погрешности ($\times 10^{-6}$) в условиях		Пояснения
	работы	испытаний	
Градуировка	$n = 5$	$n = 10$	$\mathfrak{M}_{\text{тар}} = 70 \text{ т}$
$\delta\mathfrak{M}_{\text{гр.д}}$	0,44	0,20	Весы кл. 0,2 или образцовые динамометры
$\delta\mathfrak{M}_{0.\text{гр}}$	0,17	0,10	$A^* = 0,1; \sigma = 0,93 \cdot 10^{-2}$; рис. 8.2
$\delta\mathfrak{M}_{\text{пл.гр}}$	0,32	0,22	$\delta\mathfrak{M}_{\text{пл.мах}} = 0,25 \%$
$\delta\mathfrak{M}_{\text{ки.гр}}$	0,25	0,20	
$\delta\mathfrak{M}_{\text{дт.гр}}$	0,13	–	$\mathfrak{D}[\Delta N_{\text{ис.т}}] = 0,31$; разд. 8.7
$\delta\mathfrak{M}_{\text{дв.гр}}$	0,06	0,04	$\mathfrak{D}[\Delta N_{\text{ис.в}}] = 0,136$; "
$\delta\mathfrak{M}_{\text{дк}}$	1,30	1,30	Шаг дискретности 0,4%
Всего	2,67	2,06	
Взвешивание			
$\delta\mathfrak{M}_0$	0,86	0,86	Разд.6.2: $A^* = 0,1; \sigma = 0,93 \cdot 10^{-2}$
$\delta\mathfrak{M}_{\text{пл}}$	0,69	0,50	
$\delta\mathfrak{M}_{\text{ки}}$	0,25	0,25	(8.98); $\delta\mathfrak{M}_{\text{ки.мах}} = 0,12\%$; рис.6.5,6
$\delta\mathfrak{M}_{f0}$	–	–	(Автоматическое) тарирование перед взвешиванием
$\delta\mathfrak{M}_{\text{дт}}$	0,86	–	(8.99); $\mathfrak{M} = 60 \text{ т}$
$\delta\mathfrak{M}_{\text{дв}}$	0,38	0,38	" "
$\delta\mathfrak{M}_{\text{кв}}$	1,62	0,20	$\delta k_{Pf.\text{мах}} = 0,5\%$ в мес.; рис. 8.5
Всего	7,33	4,25	
Среднее квадратическое отклонение, %	0,27	0,21	С вероятностью 0,95...0,99 $\delta\mathfrak{M}_{\text{в.очн.ср}} = (0,54...0,81) \%$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная система управления, контроля и учета выемочно-транспортных работ на карьерах "АСУ-КАРАТ" / Проспект выставки АСУ-технология-74. – М., 1974.
2. Автоматические весы для взвешивания транспортных средств на ходу. / Экспресс-инф.: сер. Испытательные приборы и стенды. – 1969. – № 6.
3. Автоматическое электронное весоизмерительное устройство для взвешивания на промышленных предприятиях подвижного состава в движении при скорости 10-15 км/ч с документальной регистрацией результатов взвешивания: Отчет / НИКИМП; Тема №46–70, № ГР 70047842. – М., 1970.
4. Александров В.А. Состояние и тенденции развития средств весоизмерительной и весодозировочной техники для АСУ ТП / В.А. Александров, Л.Н.Старостина // Измерение, контроль, автоматизация: н.-техн. реф. сборник. – М., 1979. – Вып.5 (21). – С. 32–35.
5. Анализ технического уровня зарубежного технологического весового оборудования. Том I, II, III: Отчет / ОКБ СИМ; Шифр 3834; № ГР 73041285. – Одесса, 1974.
6. Андреев А.В. Транспортные машины и автоматизированные комплексы открытых разработок / А.В. Андреев, В.А. Дьяков, Е.Е. Шешко. – М.: Недра, 1975. – 464 с.
7. Астанин И.И. Способ подавления динамической помехи при взвешивании движущихся объектов / И.И. Астанин, З.Д. Лернер, В.А. Талаленко // Горный журнал. – 1976. – № 6. – С. 128–131. – (Известия вузов).
8. А.с. № 669211 СССР. Устройство для поверки конвейерных весов / М.М. Бакман, А.С.Тимофеев, Э.М. Шванке; опубл. 1979, Б.И. № 23.
9. Баранов В.П. Линеаризация характеристик частотных датчиков при многоопорном взвешивании движущихся объектов / В.П. Баранов, А.П. Ракаев, Ю.С. Сучков // Исследование и создание новых средств весодозирующей, испытательной и силоизмерительной техники. Труды НИКИМПа. – М., 1977. – С. 40.
10. Бахтияров Г.Д. Аналого-цифровые преобразователи / А.С. Бахтияров, В.В. Малинин, В.П. Школин. – М.: Советское радио, 1980. – 280 с.
11. Белоусов А.С. Система измерения производительности горнообогатительного комплекса / А.С. Белоусов, В.И. Гудима, В.Г. Задорожный и др. // Автоматизация процессов взвешивания и дозирования в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте: УП Всесоюзного н.-техн. совещания: тезисы докладов. – Одесса, 1971. – С. 25–26.
12. Бромберг Э.М. Автокорректирующиеся тензометрические весоизмерительные системы / Э.М. Бромберг // Измерительная техника. – 1971. – № 5. – С. 20–21.
13. А.с. № 292075 СССР. Способ взвешивания движущегося транспорта / Э.М. Бромберг; опубл. 1971, Б.И. № 4.
14. А.с. № 250485 СССР. Способ взвешивания грузов / Э.М. Бромберг, Ю.П. Членов; опубл. 1969, Б.И. № 26.

15. Буртковский И.И. Электронно-тензометрические весы для взвешивания большегрузных автосамосвалов в движении / И.И. Буртковский, Н.П. Похило, И.А. Пищурников // Измерительная техника. – 1970. – № 8. – С. 49–51.
16. Бырька В.Ф. Исследование динамики автоматических конвейерных весов / В.Ф. Бырька, В.К. Донис, Ю.А. Туртанов // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности. Труды КНИУИ. – Караганда, 1962. – Вып. II. – С. 192–200.
17. Бырька В.Ф. Оптимальные соотношения конструктивных параметров грузоприемных устройств конвейерных весов / В.Ф. Бырька, С.О. Титкова, Ю.В. Гудовский // Горный журнал. – 1975. – № 8. – С. 81–84. – (Известия вузов).
18. Валов А.Н. Определение постоянной составляющей сигнала при наличии паразитных вибраций / А.Н. Валов, Ю.С. Плискин // Вибрационно-частотные преобразователи. – М., 1970. – Ч. 2.
19. А.с. № 329402 СССР. Устройство для взвешивания / А.Н. Валов, А.П. Ракаев, Ю.С. Плискин, В.В. Сухомлин; опубл. 1972, Б.И. № 7.
20. Вакман Д.Е. Цифровая аппаратура повышенной точности для быстродействующих весов / Д.Е. Вакман // Разработка и использование испытательных машин, весодозировочной и силоизмерительной техники. – М., 1979. – С. 116–126.
21. А.с. № 708164 СССР. Устройство для калибровки конвейерных весов / Л.А. Верещагин, Р.А. Бахтеев, Р.П. Печковский и др.; опубл. 1980, Б.И. № I.
22. А.с. № 711368 СССР. Электрические конвейерные весы / Л.А. Верещагин, Р.П. Печковский; опубл. 1980, Б.И. № 3.
23. Верещагин Л.А. Разработка и исследование бесконтактных интегрирующих устройств и систем автоматического контроля производительности и выработки конвейерного транспорта и мощных роторных экскаваторов: дис. ... к.т.н. / Л.А. Верещагин. – Киев, 1966.
24. Верещагин Л.А. Множительно-интегрирующие устройства для электрических транспортерных весов / Л.А. Верещагин, Н.М. Рудный // Электрофизические приборы для автоматизации технологических процессов. – Киев, 1969. – С. 18–29.
25. Пат. 6326602 Япония. Весовое устройство, встроенное в автомашину; опубл. 3.06.74.
26. Весы автомобильные стационарные автоматические для взвешивания в движении: отчет / НИКИМП; Тема № 456; Инв. № Б253919. – М., 1973. – 129 с.
27. Пат. 382867 Швеция. Весы, встроенные в автомашину; опубл. 16.02.76.
28. Весы конвейерные тензометрические. Инструкция по эксплуатации I ТКВ1.ИЭ...VI ТКВ1.ИЭ. – Воркута, 1976.
29. Весы ленточные конвейерные ВН-6ТВ, ВН-7ТВ, ВН-8ТВ с вибрационно-частотными датчиками / Приборы и системы управления. – 1972. – № 10. – С. 32.
30. Вишня В.Б. Анализ динамической помехи при взвешивании движущихся объектов / В.Б. Вишня // Горный журнал. – 1976. – № 10. – С. 121–125. – (Известия вузов).

31. Вишня В.Б. Исследование и разработка устройства для автоматического взвешивания карьерного автотранспорта горно-обогатительных комбинатов: дис. ... к.т.н. / В.Б. Вишня – Днепропетровск, 1976.
32. Выбрать оборудование и разработать аппаратуру, обеспечивающую взвешивание и учет руды, направляемой на ДСФ железнодорожным, автомобильным и конвейерным транспортом в автоматическом режиме: отчет / НИИКМА; Тема № 2-1-19-221-73; Инв. № Б289836. Губкин. – 1974. – 91 с.
33. Высочин Е.М. Влияние упругих свойств ленты на работу конвейерных весов / Е.М. Высочин // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1957. – Вып. 2. – С. 142–152.
34. Высочин Е.М. Исследование работы конвейерных весов: дис. ... к.т.н. / Е.М. Высочин. – Днепропетровск, 1960.
35. Высочин Е.М. Некоторые вопросы теории автоматических конвейерных весов / Е.М. Высочин // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1960. – Вып. 4. – С. 176–190.
36. Гафанович М.Д. Датчики с непрерывными частотными сигналами для автоматизированных систем на базе КТС ЛИУС / М.Д. Гафанович, К.М. Диденко, Левин и др. // Приборы и системы управления. – 1972. – № 9. – С. 12–14.
37. Гераскевич С.С. Устройство для определения производительности роторных экскаваторов / С.С. Гераскевич, В.И. Гудима, Н.И. Беляков // Тезисы докладов на VI научно-техническом совещании по автоматизации процессов взвешивания и дозирования в различных отраслях народного хозяйства. – Одесса, 1969. – С. 109.
38. Гоулд Б. Цифровая обработка сигналов / Б. Гоулд, Ч. Рэйдер. – М.: Сов. радио, 1973. – 368 с.
39. Гудовский Ю.В. Влияние динамики транспортируемого материала на точность автоматических конвейерных весов / Ю.В. Гудовский // Механизация и автоматизация производственных процессов горно-добывающей промышленности: труды Караг. ПИ. – Караганда, 1975. – Вып. IV. – С. 188–190.
40. Гудовский Ю.В. Исследование и установление основных параметров первичных измерительных преобразователей устройств измерения грузопотоков ленточных конвейеров в горнодобывающей промышленности: автореф. дис. ... к.т.н. / Ю.В. Гудовский. – Караганда, 1975.
41. Датчик для определения веса автомобиля в эксплуатационных условиях / Электроника. – 1976. – № 5. – С. 15.
42. Датчик усилий ЛХ-146. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ЛХ2.782.009.Т0. – Пенза, 1972.
43. Дашевский Е.А. Проектирование электронных тензометрических весов с аналоговыми измерительными системами / Е.А. Дашевский // Приборы и системы управления. – 1968. – № 2. – С. 25–27.
44. Дашевский Е.А. Электронно-тензометрические весовые дозатора автоматических систем шихтоподачи для металлургического производства: автореф. дис. ... к.т.н. / Е.А. Дашевский. – Одесса, 1969.
45. А.с. № 352146 СССР. Конвейерные весы / В.К. Джапаридзе, М.В. Гегешидзе, Н.К. Рухадзе и др.; опубл. 1972, Б.И. № 28.

46. Диденко К.И. Комплекс технических средств для локальных информационно-управляющих систем. Системные принципы. Состояние разработки и производства / К.И. Диденко, И.С. Шандрин, Ю.В. Розен // Приборы и системы управления. – 1972. – № 9. – С. 1–7.

47. Дмитриев В.Г. Исследования динамических нагрузок в роlikоопорах загрузочных и линейных секций ленточных конвейеров при транспортировании крупных кусков / В.Г. Дмитриев, В.И. Галкин // Горный журнал. – 1975. – № I. – С. 108–112. – (Известия вузов).

48. Дмитриевский Н.В. Новые приборы и схемы автоматизации камнедробильных заводов / Н.В. Дмитриевский // Механизация строительства. – 1960. – № 7.

49. Донис В.К. Промышленные испытания электронных конвейерных весов / В.К. Донис, А.В. Бочаров, Ю.В. Гудовский // Механизация и автоматизация производственных процессов в горнодобывающей промышленности / под ред. д-ра техн. наук В.Ф. Бырки. – Караганда, 1973. – С. 25–30.

50. Донис В.К. Выбор места установки автоматических весов на ленточных конвейерах / В.К. Донис, Ю.К. Брошель, Ю.А. Туртанов // Автоматизация процессов взвешивания и дозирования: материалы н.т. совещания. – М., 1969. – С. 35–37.

51. Донис В.К. Минимизация погрешности первичных преобразователей конвейерных весов / В.К. Донис, Ю.В. Гудовский, А.В. Бочаров // Измерительная техника. – 1977. – № 8. – С. 40–42.

52. Донис В.К. Выбор схем построения и параметров грузоприемных устройств конвейерных весов с учетом динамики транспортируемого материала / В.К. Донис, Ю.В. Гудовский // Автоматизация процессов взвешивания и дозирования в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте: УП Всесоюзного н.-техн. совещания: тезисы докладов. – Одесса, 1971. – С. 94–95.

53. Донис В.К. Исследование грузоприемных устройств автоматических конвейерных весов / В.К. Донис, О.В. Гудовский // Горные машины и автоматика: реф. сб. ЦНИЭИуголь. – 1972. – №5 (146). – С. 25–27.

54. Донис В.К. Статистические характеристики выходных сигналов тензорезисторных датчиков веса устройств непрерывного взвешивания и дозирования / В.К. Донис, Ю.В. Гудовский, Е.И. Камелина // Механизация и автоматизация производственных процессов в горнодобывающей промышленности. – Караганда, 1973. – С. 19–24.

55. Донис В.К. О рациональной конструкции грузоприемных устройств конвейерных весов / В.К. Донис // Горный журнал. – 1973. – № 5. – С. 97–100. – (Известия вузов).

56. Донис В.К. Исследование влияния помех на работу устройств контроля грузопотока конвейеров / В.К. Донис // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности: труды КНИУИ. – Караганда, 1965. – Вып. 20.

57. Донис В.К. Исследование и установление способов измерения грузопотоков шахтных и карьерных конвейеров: автореф. дис. ... к.т.н. / В.К. Донис. – 1965.

58. Донис В.К. Электротензометрические весы ЭТВ-2 для ленточных конвейеров во взрыво- и искробезопасном исполнении / В.К.Донис, Ю.А. Туртанов, Ю.К. Брошель. – Удостоверение о регистрации № 42867, 1964.
59. Донис В.К. Промышленные испытания опытного образца автоматических конвейерных весов / В.К.Донис, Ю.А. Туртанов // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности: труды КНИУИ. – Караганда, 1962. – Вып. II. – С. 200–204.
60. Донис В.К. Электротензометрические конвейерные весы / В.К.Донис // Вопросы механизации и автоматизации в горной промышленности: труды КНИУИ. – Караганда, 1961. – Вып. 8. – С. 318–324.
61. Друкованный М.Ф. Дробление горных пород взрывом на железорудных карьерах Кривбасса / М.Ф. Друкованный, А.В. Бурлака, Э.И. Ефремов и др. – Киев: УкрНИИТИ, 1968. – 84 с.
62. Донис В.К. Статистические характеристики выходных сигналов тензорезисторных датчиков веса устройств непрерывного взвешивания и дозирования / В.К.Донис и др. // Механизация и автоматизация производственных процессов в горнодобывающей промышленности. – Караганда, 1973. С. 19–24.
63. Жуковицкий В.И. Автоматическое компенсирование электротензометрических весов / В.И. Жуковицкий // Измерительная техника. – 1959. – № 10. – С. 16–18.
64. А.с. № 124660 СССР. Весы периодического взвешивания / В.И. Жуковицкий; опубл. 1959, Б.И. № 23.
65. Жуковицкий В.И. Автомобильные весы с частотными датчиками / В.И. Жуковицкий, В.Б. Вишня, С.И. Войцех, Г.Е. Васецкий // Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах Украинской ССР. – Киев, 1975. – Вып. 9. – С. 56–57.
66. Жуковицкий В.И. Исследование погрешности дискретности при измерении массы движущихся объектов частотными датчиками / В.И. Жуковицкий, В.Б. Вишня // Горный журнал. – 1978. – № II. – С. 125–130. – (Известия вузов).
67. А.с. № 515949 СССР. Устройство для взвешивания движущихся объектов, например, автомобилей / В.И. Жуковицкий, В.Б. Вишня; опубл. 1976, Б.И. № 20.
68. А.с. № 521474 СССР. Устройство для взвешивания движущихся объектов / В.И. Жуковицкий, В.Б. Вишня; опубл. 1976, Б.И. № 26.
69. А.с. № 731304 СССР. Устройство для взвешивания движущихся объектов / В.И. Жуковицкий, В.Б. Вишня; опубл. 1980, Б.И. № 16.
70. Жуковицкий В.И. Электронные конвейерные весы ЭКВД-76 / В.И. Жуковицкий, В.Б. Вишня // Промышленный транспорт. – 1979. – № 7. – С. 10.
71. Жуковицкий В.И. Влияние осадки измерительной роликкоопоры на точность конвейерных весов / В.И. Жуковицкий // Горный журнал. – 1978. – № 4. – С. 77–80. – (Известия вузов).
72. Жуковицкий В.И. Датчики веса для электронных конвейерных весов / В.И. Жуковицкий // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1960. – Вып. 4. – С. 191–199.

73. А.с. № 684319 СССР. Двухплатформенные конвейерные весы / В.И. Жуковицкий; опубл. 1979, Б.И. № 33.
74. Жуковицкий В.И. О возможности применения частотных датчиков для измерения веса груза на ленточном конвейере / В.И. Жуковицкий, Г.Я. Ильштейн // Электрификация и автоматизация горных и металлургических предприятий. – Днепропетровск, 1971. – № 2. – С. 79–81.
75. А.с. № 411312 СССР. Электронные конвейерные весы / В.И. Жуковицкий, Г.Я. Ильштейн; опубл. 1974, Б.И. № 1.
76. А.с. № 210411 СССР. Электронные конвейерные весы с дискретным выходом / В.И. Жуковицкий, Г.Я. Ильштейн; опубл. 1968, Б.И. № 6.
77. Жуковицкий В.И. Электронные конвейерные весы с дискретным выходом типа ЭКВД-70М / В.И. Жуковицкий, Г.Я. Ильштейн // Информационный листок № 63 – Запорожье: ЗЦНТИ, 1974. – Серия 6. – 4 с.
78. Жуковицкий В.И. Электронные конвейерные весы с частотными преобразователями массы / В.И. Жуковицкий, Г.Я. Ильштейн // Измерительная техника. – 1970. – № 8. – с. 47–49.
79. А.с. № 479006 СССР. Устройство для автоматического взвешивания транспортных средств на ходу / В.И. Жуковицкий, Ю.М. Карбовский, И.Л. Стромцов; опубл. 1975, Б.И. № 28.
80. Жуковицкий В.И. Электронные конвейерные весы с интегрирующим приводом переменного тока и дискретным выходом / В.И. Жуковицкий, Н.Ф. Корниенко, Г.Я. Ильштейн // Автоматизация процессов взвешивания и дозирования: материалы н.-техн. Совещания. – М., 1969. – С. 39–40.
81. Жуковицкий В.И. Микропроцессорные автомобильные весы / В.И. Жуковицкий, Г.В. Кузнецов // Промышленный транспорт. – 1981. – № 5. – С. 15.
82. Жуковицкий В.И. Информационная весоизмерительная система для АСУ горнорудного предприятия / В.И. Жуковицкий, В.С. Латышев, И.Л. Стромцов. – Киев, 1972. – 26 с. (Препринт / ин-т кибернетики АН УССР, № 72–63).
83. Жуковицкий В.И. Электронная система с частотными датчиками для автоматического взвешивания карьерных транспортных средств / В.И. Жуковицкий, В.С. Латышев, И.Л. Стромцов, Ю.М. Карбовский // Горная автоматика и электромеханика. – Харьков. – 1974. – № 25. – С. 22–25.
84. А.с. № 356478 СССР. Устройство для взвешивания движущихся объектов / В.И. Жуковицкий, В.С. Латышев; опубл. 1972, Б.И. № 32.
85. Магнитоэлектрический компенсатор для автоматической измерительной схемы конвейерных весов: известия Днепропетровского горного института / В.И. Жуковицкий. – 1959. – Т. XXXVIII. – с. 173–188.
86. Жуковицкий В.И. Электронная весоизмерительная система для АСУ горно-обогатительного комбината / В.И. Жуковицкий, А.С. Малюга // Промышленный транспорт. – 1978. – № 5 – С. 18–19.
87. Жуковицкий В.И. Аппаратура для автоматического радиопознания автосамосвалов: реферативная информация о законченных н.-иссл. работах

в вузах Укр. ССР за 1970-71 гг. / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий. – Киев, 1973. – Вып. 7. – С. 56–57. – (Угольная и горнорудная промышленность).

88. Жуковицкий В.И. Аппаратура для оперативного учета и контроля работы карьерных автомобилей / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий, В.Б. Вишня и др. // Промышленный транспорт. – 1974. – № 6. – С. 11–12.

89. Жуковицкий В.И. Комплекс аппаратуры для взвешивания и опознавания автосамосвалов: реферативная информация о н.-иссл. работах в вузах УССР / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий, В.Б. Вишня. – Киев, 1978. – Вып. 12. – С. 20–21.

90. Жуковицкий В.И. Система опознавания автосамосвалов "Радиокод" / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий, В.Н. Журавлев и др. // Горный журнал. – 1974. – № I. – С. 48–49.

91. Жуковицкий В.И. Система радиопознавания автосамосвалов для автоматизированного управления карьерным транспортом / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий // Техническая информация. – Тбилиси, 1977. – № 5. – 6 с. – (Автоматизированные системы управления и вычислительная техника).

92. А.с. № 410439 СССР. Устройство для записи информации принимаемой с движущихся объектов / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий; опубл. 1974, Б.И. № I.

93. А.с. № 410445 СССР. Устройство для управления карьерным автотранспортом / В.И. Жуковицкий, В.Н. Новицкий; опубл. 1974, Б.И. № I.

94. Жуковицкий В.И. О погрешности конвейерных весов без датчика скорости / В.И. Жуковицкий // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1963. – Вып. 7. – С. 86–94.

95. А.с. № 301554 СССР. Устройство автоматического контроля веса / В.И. Жуковицкий, И.А. Попко, А.И. Штефен; опубл. 1971, Б.И. № 14.

96. Жуковицкий В.И. Разработка и исследование схем электронных автоматических конвейерных весов: дис. ... к.т.н. / В.И. Жуковицкий. – Днепропетровск, 1961. – 225 с.

97. Жуковицкий В.И. Измерение сигнала при наличии аддитивной помехи / В.И. Жуковицкий, И.Л. Стромцов // Радиотехника. – 1975. – № 12. – С. 95–96.

98. Жуковицкий В.И. Уменьшение динамической погрешности взвешивания движущихся объектов / В.И. Жуковицкий // Горный журнал. – Свердловск, 1975. – № 2. – С. 136–139. – (Известия вузов).

99. Жуковицкий В.И. Электрические конвейерные весы / В.И. Жуковицкий // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1959. – Вып. 3. – С. 108–128.

100. Жуковицкий В.И. Электронные конвейерные весы с измерителем-сумматором / В.И. Жуковицкий // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1961. – Вып. 5. – С. 21–41.

101. Жуковицкий В.И. Электронные конвейерные весы с интегрирующим приводом / В.И. Жуковицкий // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1962. – Вып. 6. – С. 49–56.

102. Жуковский М.В. К вопросу построения тензометрического измерительного устройства для взвешивания сыпучих материалов на ленточных

транспортерах / М.В. Жуковский, В.В. Скалевой // Кибернетика и автоматическое управление. – Киев, 1974. – С. 72–76.

103. Измерение массы вагонов и автомобилей в движении / Экспресс-информация. Промышленный транспорт. – 1979. – № 28. – С. 6–9.

104. Ильин К.П. Способы определения веса грузов / К.П. Ильин, Ф.А. Пладис и др. // ВНИИЖТ: труды. – 1961. – Вып. 215.

105. Исследование и разработка технических средств АСУ горных предприятий: отчет / ДГИ; рук. В.И. Жуковицкий. Тема № 323; № ГР 76061855. – Днепропетровск, 1977.

106. Казеев И.М. Опыт разработки, внедрение и эксплуатация подсистемы АСУ автотранспортом / И.М. Казеев, Г.Н. Маматов, В.Н. Михейкин, В.А. Черненко // Материалы к III Всесоюзной научно-технической конференции по карьерному транспорту. – Свердловск, 1973. – С. 166–171.

107. Калашников Ю.Т. Автоматические транспортные весы / Ю.Т. Калашников, Л.А. Верещагин, В.С. Яценко // Угольное и горнорудное машиностроение, НИИИнформтяжмаш. – М., 1965. – Вып. I.

108. Карпин Е.Б. Вопросы теории проектирования конвейерных весов / Е.Б. Карпин // Бюллетень технической информации НИИВеспрома. – М., 1955. – № 2.

109. Карпин Е.Б. Некоторые вопросы теории и проектирования конвейерных весов / Е.Б. Карпин // Измерительная техника. – 1956. – № I.

110. Карпин Е.Б. Средства автоматизации для измерения и дозирования массы / Е.Б. Карпин. – М.: Машиностроение, 1971.

111. Каталог технических средств АСУ в угольной промышленности стран-членов СЭВ / 3 – открытая добыча. – ВУЭПЭ-ПРАГА-ИНТЕРАСУ-уголь, 1977. – 82 с.

112. Кемень Т. Изготовление весов, базирующихся на современном уровне развития техники / Т.Кемень // доклад на н.-техн. конференции ИМЕКО "Техника промышленного взвешивания", Одесса, 1977: тезисы. – М., 1977. – С. 281.

113. Конвейерные весы / Р.Ж. Метрология и изм. Техника. – 1975. – № II. – реф. 11.32.259.

114. Кемень Т. Тензометрические чувствительные элементы электронных весов / Т. Кемень // "Mezes es automat". – 1979. – 27. – № 10. – С. 376–380.

115. Конвейерные весы / Р.Ж. Метрология и изм. техника. – 1980. – № 2. – реф. 2.32.374.

116. Конвейерные весы со струнным вибропреобразователем / Р.Ж. Метрология и измерительная техника. – 1980. – № 10. – реф.10.32.474.

117. Ильштейн Г.Я. Разработка и исследование схемы электронных конвейерных весов с дискретным выходом: дис. ... к.т.н. / Г.Я. Ильштейн – Днепропетровск, 1968.

118. Ильштейн Г.Я. Частотный датчик веса для электронных конвейерных весов / Г.Я. Ильштейн // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1970. – Вып. II. – С. 156–158.

119. Инструкция по эксплуатации конвейерных весов фирмы Schenck. – 1970. – (по данным 5, т. 3).
120. Пат. 3842922 США. Контрольные автомобильные весы; опубл. 22.10.74. – (см. Изобретения за рубежом. 1974, №21, с. 38).
121. Кравченко Я.С. Устройство учета производительности конвейеров, работающих с переменным углом наклона / Я.С. Кравченко, М.Б. Беренбойм, Т.С. Кравчук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1967. – № 2. – с. 109-114.
122. Кравченко Я.С. Анализ погрешности интегрирования весоизмерительного устройства / Я.С. Кравченко, М.Б. Беренбойм, Т.С. Русанова // Автоматизация процессов взвешивания и дозирования: материалы н.-техн. совещания. – М., 1969. – С. 37–39.
123. Кравченко Я.С. Устройства учета количества материала, транспортируемого ленточными конвейерами: обзор / ЦНИИЭуголь / Я.С. Кравченко, М.Б. Беренбойм, Т.С. Русанова – М.: Недра, 1968. – 41 с.
124. Кузнецов Б.А. О влиянии приведенной массы на работу конвейерных весов непрерывного действия / Б.А. Кузнецов, Е.М. Высочин // Вопросы рудничного транспорта. – М., Углетехиздат, 1957. – Вып. 2. – С. 153–158.
125. Кузнецов Б.А. К теории работы автоматических конвейерных весов / Б.А. Кузнецов // Вопросы рудничного транспорта. – М., 1954. – Вып. I. – С. 42–53.
126. Кузнецов Б.А. Взаимодействие груза с роликами линейной части конвейера / Б.А. Кузнецов, В.К. Смирнов, А.В. Коваль, В.Ф. Монастырский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1973. – № 4 (82). – С. 54–57.
127. Кузнецов Г.В. Автоматизированная подсистема управления технологическим процессом транспортирования горной массы карьерным автотранспортом и средства ее реализации: дис. ... к.т.н. / Г.В. Кузнецов. – Днепропетровск, 1979.
128. Куртынин И.С. Весодозирующая, силоизмерительная и испытательная техника / И.С. Куртынин, Ю.М. Сергиенко // Приборы и системы управления. – 1976. – № 2. – С. 30–34.
129. Лаберски С.Е. Микропроцессорная система взвешивания сыпучих материалов / С.Е. Лаберски // Электроника. – 1976. – № 8. – С. 102–104.
130. ГОСТ 20-76. Ленты конвейерные резиноканевые. Технические условия.
131. Малов В.В. Электронные ленточные весы как датчик для ИВМ / В.В. Малов // Энергетик. – 1975. – № 7. – С. 31–32.
132. Мальков А.П. Автоматические весы для ленточных транспортеров марки ЛТ / А.П. Мальков // Бюллетень технической информации НИИВеспрома. М., 1954. – I.
133. Мальцев В.К. Автоматические конвейерные весы с вибрационно-частотными датчиками / В.К. Мальцев, А.П. Мальков, В.В. Кульков, Ю.С. Плискин // Тезисы докладов на VI н.-техн. совещании по автоматизации процессов взвешивания и дозирования в различных отраслях народного хозяйства. – Одесса, 1969. – С. 25.

134. Марюта А.Н. Автоматизированные системы управления на ГОКах Кривбасса / А.Н. Марюта, В.А. Нападайло, В.И. Жуковицкий // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1974 – № 5 – С. 60–65.

135. Михайлов А.И. Применение вибрационно-частотных датчиков в автоматизированных системах взвешивания и дозирования / А.И. Михайлов, Д.Д. Доржиев, В.М. Карпов // *Тезисы докладов на VI н.-техн. совещании по автоматизации процессов взвешивания и дозирования в различных отраслях народного хозяйства*. – Одесса, 1969. С. 99–101.

136. Морзовски А. Сокращение программы аналого-цифрового преобразования при помощи аналогового вывода / А. Морзовски // *Электроника*. – 1977. – 50. – № 13. – С. 50–54.

137. Невмержицкий Н.И. Весодозирующая, силоизмерительная и испытательная техника - народному хозяйству / Н.И. Невмержицкий, Ю.М. Сергиенко // *Приборы и системы управления*. – 1981. – № 2. – С. 37–41.

138. Недорогой измерительный усилитель / *Электроника*. – 1976. – № 9. – С. 86.

139. Непрерывные тотализаторы на ленточных конвейерах: Проспект фирмы Fourtau. – Франция, 1972. – (По данным 5, т.3).

140. Новая технология взвешивания и обработки показаний весов / Р.Ж. Метрология и изм. техника. – 1981. – № I. – Реф. 1.32.406.

141. Новицкий В.Н. Зондирующий прием в системах радиопознания автосамосвалов / В.Н. Новицкий, В.И. Жуковицкий // *Горная электромеханика и автоматика*. – Харьков, 1977. – Вып. 31. – С. 85–89.

142. Новицкий В.Н. Электронная система опознавания движущихся автосамосвалов / В.Н. Новицкий, В.И. Жуковицкий // *Горная электромеханика и автоматика*. – Харьков, 1975. – Вып. 26. – С. 98–106.

143. Новицкий В.Н. Исследование методов и разработка технических средств опознавания движущихся автосамосвалов для АСУ карьерами горнодобывающей промышленности: дис. ... к.т.н. / В.Н. Новицкий. – Днепропетровск, 1975.

144. Новицкий П.В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П.В. Новицкий, В.Г. Кнорринг, В.С. Гутников. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.

145. Новицкий П.В. Проблема создания частотных датчиков для всех электрических и неэлектрических величин / П.В. Новицкий // *Измерительная техника*. – 1961. – № 4. – С. 16–21.

146. Новожилов М.Г. Исследование и разработка основных вопросов оперативного планирования и управления горнотранспортными работами на карьерах Кривбасса с помощью ЭЦВМ / М.Г. Новожилов, В.И. Жуковицкий, В.А. Нападайло и др. // *Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах Укр. ССР*. – Киев, 1971. – Вып. 5. – С. 7–8.

147. Новожилов М.Г. Исследование и разработка основных вопросов оперативного управления и планирования горнотранспортными работами на карьерах Кривбасса при помощи ЭВМ ЭЦВМ / М.Г. Новожилов, В.И. Жуковицкий, В.А. Нападайло и др. // *Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах Укр. ССР*. – Киев, 1970. – Вып. 4. – С. 13.

148. Новожилов М.Г. Исследование основных вопросов создания автоматизированной системы управления и планирования горного производства на карьерах ГОКов Кривбасса / М.Г. Новожилов, В.И. Жуковицкий, В.Г. Селянин и др. // Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР за 1965-66 гг. – Киев, 1968. – Вып. I. – С. 35–36. – (Горнорудная промышленность).
149. Новожилов М.Г. Оперативное управление и планирование горно-транспортных работ на карьерах Кривбасса с помощью ЭЦВМ / М.Г. Новожилов, В.И. Жуковицкий, В.А. Нападайло и др. // Организация и управление горными предприятиями: тезисы / МГИ. – М., 1968. – С. 80.
150. Новые электронные вагонные весы за рубежом / Черметинформация. – М., 1969. – № 5. – (Серия 16).
151. Образцовые переносные динамометры система Н.Г. Токаря. Техническое описание. – Горьковский политехн. ин-т, 1970.
152. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
153. Папп К. Микропроцессор - основа промышленной весовой системы / К. Папп // Доклад на н.-техн. конференции ИМЕКО "Техника промышленного взвешивания", Одесса, 1977: тезисы. – М., 1977. – С. 38.
154. Пелед А. Цифровая обработка сигналов / А. Пелед, Б. Лиу. – Киев: Вища школа, 1979. – 264 с.
155. А.с. № 670815 СССР. Весы / В.И. Песок, С.С. Сафонов, Н.А. Шматков, А.А. Мишкин; опубл. 1979, Б.И. № 24.
156. Песок В.И. Анализ весоизмерительной системы конвейерных весов непрерывного действия / В.И. Песок, Н.А. Шматков // Измерительная техника. – 1971. – № 11. – С. 27–28.
157. А.с. № 723386 СССР. Измеритель погонной нагрузки конвейера / Р.П. Печковский, Р.А. Бахтеев, Л.А.Верещагин, П.С. Кузнецов; опубл. 1980, Б.И. № II.
158. Племяшов А.С. Управление производством на горно-обогатительном комбинате / А.С. Племяшов, Э.А. Каграманян и др. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
159. Поляков Н.С. О сопротивлении движению ленты по роликам / Н.С. Поляков, В.К. Смирнов, И.А. Шпакунов // Горнорудные машины и автоматика. – М.: Недра, 1967. – Вып. 3. – С.188–199.
160. Похило Н.П. Измерительный прибор электронно-тензометрических весов для взвешивания железнодорожных вагонов на ходу / Н.П. Похило, Г.А. Трофименко // Автоматизация процессов взвешивания и дозирования: материалы н.-техн. совещания. – М., 1967. – С. 37–43.
161. Преобразователь напряжения в частоту преобразует также частоту в напряжение / Электроника. – 1976. – № 8 – С. 117.
162. Преобразователь напряжения в частоту с разрешающей способностью II бит / Электроника. – 1976. – № 18. – С. 90.
163. Прецизионный преобразователь напряжение-частота / Электроника. – 1976. – № 12. – С. 96.

164. Преобразователь напряжение-частота с линейность 0,025% / Электроника. – 1976. – № 23. – С. 92.
165. Преобразователь частотный ПГ.VI-2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Ш2.787.000 Т0. – Киев, 1971.
166. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей / В.С. Пугачев. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
167. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: МИР, 1978. – 848 с.
168. Развитие весовых дозирующих систем с использованием микропроцессоров / Р.Ж. Метрология и изм. техника. – 1980. – № 3. – Реф. 3.32.352.
169. Разработка высокоточных способов обработки сигналов в сило- и весоизмерительных устройствах: заключительный отчет / НИКИМП; тема 1642; – М., 1980.
170. Разработка и внедрение комплекса весоизмерительных устройств для автоматического взвешивания на ходу движущихся объектов: отчет / ДГИ; тема № 336-А; № ГР 74033473. – Днепропетровск, 1973.
171. Разработка, монтаж и наладка устройства для дистанционной передачи информации о работе весоизмерительной системы с весами ЭКВД в коксовом цехе ЗКХЗ: отчет / ДГИ; тема № 784-а; № ГР 78023283. – Днепропетровск, 1980.
172. Разработка электронной системы для ввода в ЭЦВМ информации о работе ленточных конвейеров: отчет / ДГИ; тема № 796-В. – Днепропетровск, 1966.
173. Ракаев А.П. Измерение постоянной составляющей механической величины частотными преобразователями: автореф. дис. ... к.т.н. / А.П. Ракаев. – М., 1973.
174. Ракаев А.П. Измерение сигнала частотных датчиков при взвешивании движущихся объектов / А.П. Ракаев, Ю.С. Плискин, В.В. Сухомлин // Приборы и системы управления. – 1976. – № 3. – С. 25–26.
175. Ракаев А.П. Методы реализации интегрирования с весовой функцией в весоизмерительных системах / А.П. Ракаев, Ю.С. Плискин, В.В. Сухомлин // Доклад на н.-техн. конференции ИМЕКО "Техника промышленного взвешивания", Одесса, 1977: тезисы. – М., 1977. – С. 41.
176. Ракаев А.П. Способ определения постоянной составляющей сигнала / А.П. Ракаев, Д.В. Ромм, Е.И. Перельман, Ю.С. Плискин // Измерительная техника. – 1970. – №6. – С. 32–33.
177. Ракаев А.П. Интегральные измерения при наличии помех / А.П. Ракаев, Д.В. Ромм, Ю.С. Плискин // Приборы и системы управления. – 1972. – № 10 – С. 37–38.
178. Растущее значение весовых устройств / Р.Ж. Метрология и измерительная техника. – 1980. – № 2. – Реф. 2.32.365.
179. Руднев Л.А. Электронно-тензометрические весы / Л.А. Руднев, В.С. Кучер // Цветная металлургия: научно-технический бюллетень. – № 6. – С. 60–62.

180. А.с. № 685927 СССР. Устройство для взвешивания транспортных средств / Н.П. Романов, Н.А. Кубышкин; опубл. 1979, Б.И. № 34.
181. А.с. № 158431 СССР. Электрические транспортерные весы / Н.М. Рудный, Л.А. Верещагин; опубл. 1963, Б.И. № 21.
182. А.с. № 154096 СССР. Электромеханическое множительно-интегрирующее устройство / Н.М. Рудный, Л.А. Верещагин; опубл. 1963, Б.И. № 8.
183. Рудный Н.М. Устройство для контроля производительности роторного экскаватора ЭРГ-1600 40/10 31 по весу горной массы / Н.М. Рудный, В.С. Яценко // Электрофизические приборы для автоматизации технологических процессов. – Киев, 1969. – С. 12–18.
184. ГОСТ 12166-66. Руды цветных металлов. Норма точности взвешивания.
185. ГОСТ 12409-66. Руды железные. Норма точности взвешивания.
186. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л.З. Румшицкий. – М., Наука, 1971. – 192 с.
187. Румшицкий Л.З. Элементы теории вероятности / Л.З. Румшицкий. – М., Наука, 1966. – 156 с.
188. А.с. № 611120 СССР. Электронные конвейерные весы / С.А. Самарин; опубл. 1978, Б.И. № 22.
189. А.с. № 684325 СССР. Устройство для поверки конвейерных весов и дозаторов / С.С. Сафонов, И.М. Рафалович, Б.И. Абрамов; опубл. 1979, Б.И. № 33.
190. Сергиенко Ю.М. Современный уровень и тенденции развития весоизмерительной и дозировочной техники в десятой пятилетке / Ю.М. Сергиенко, О.Н. Крюков // Приборы и системы управления. – 1977. – № 10. – С. 40–42.
191. Сергиенко Ю.М. Основные особенности и проблемы взвешивания транспортных средств в движении / Ю.М. Сергиенко, Г.Ф. Маликов, В.А. Чухно // Измерения, контроль, автоматизация: н.-техн. сборник. – М., 1979. – Вып. 2 (18). – С. 21–25.
192. А.с. № 720316 СССР. Конвейерные весы / Р.И. Сигуа, Р.Е. Гугушвили, В.К. Джапаридзе и др; опубл. 1980 Б.И. № 9.
193. ГОСТ 11810-66. Силикат-глыба. Норма точности взвешивания.
194. Синельников-Мурылев Г.А. Современное состояние и тенденции развития механических и электрических (нетензорезисторных) силоизмерителей в СССР и за рубежом. Обзорная информация / Г.А. Синельников-Мурылев, А.И. Михайлов // ЦНИИТЭИ приборостроения, ТС-7: Машины и приборы для измерения механических величин. – М, 1976. – 56 с.
195. Скалевой В.В. К вопросу повышения точности тензометрического взвешивания движущихся объектов: автореф. дис. ... к.т.н. / В.В. Скалевой. – Одесса, 1966.
196. Скалевой В.В. О повышении эффективности интегрального метода при взвешивании быстро движущихся объектов / В.В. Скалевой, Г.М. Скалевая // Приборы и системы управления. – 1970. – № 9. – С. 32–34.
197. А.с. № 236052 СССР. Способ взвешивания движущихся объектов / В.В. Скалевой, Г.М. Скалевая; опубл. 1969, Б.И. № 6.

198. А.с. № 605115 СССР. Способ взвешивания быстродвижущихся объектов / В.В. Скалевой, А.В. Скалевая; опубл. 1978, Б.И. № 16.
199. Создание комплекса унифицированных приборов и устройств Государственной системы приборов (ГСП) для автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами. (Приборы для автоматизации взвешивания движущихся объектов): отчет / ОПИ; тема № 71; № ГР 68045501. – Одесса, 1970.
200. Соколовский В.М. Тензометрические конвейерные весы ТКВ-I / В.М. Соколовский // Обогащение и брикетирование угля: реф. н.-техн. сб. – ЦНИЭИуголь, 1972. – № I. – С. 28–31.
201. Сороколетов Н.И. Устройство автоматического взвешивания сыпучего материала на конвейере / Н.И. Сороколетов, М.С. Шелепов // Автоматика и техническая кибернетика на шахтах и рудниках / под ред. д-ра техн. наук Л.А. Шойхета. – Киев: Техника, 1974. – С. 78–81.
202. А.с. № 618649 СССР. Устройство для взвешивания движущихся объектов / М.И. Столбун и др.; опубл. 1978, Б.И. № 29.
203. ГОСТ 11830-66. Строительные материалы. Норма точности взвешивания.
204. Стромцов И. Л. Исследование и разработка устройства для взвешивания железнодорожных составов в условиях горно-обогатительного комбината: дис. ... к.т.н. / И.Л. Стромцов – Днепропетровск, 1975.
205. Сумматрон - электронные транспортерные весы. Каталог фирмы Metripord, Венгрия. (По данным 5, т. 3).
206. Тански Т.Р. Программа эффективного аналого-цифрового преобразования / Т.Р. Тански // Электроника. – 1978. – Т. 51. – № 14. – С. 63–65.
207. Техника взвешивания / Приборы и системы управления. – 1981. – № 5. – С. 45–46.
208. Технические условия на электронно-гидравлические конвейерные весы ЭГВ / Институт горной механики и технической кибернетики им. М.М. Федорова. – Донецк, 1969.
209. Технический проект электротензометрических конвейерных весов / НИКИМП. – М., 1960.
210. Способ взвешивания движущихся объектов / Н.М. Товстоног, А.С. Малюга; Положительное реш. по заявке № 2624506 от 29.12.78.
211. Трофименко Г.А. Разработка и исследование методов и аппаратуры с аналоговой обработкой сигнала для измерения массы движущихся объектов: автореф. дис. ... к.т.н. / Г.А. Трофименко. – Одесса, 1972.
212. ГОСТ 11762-66. Угли бурые, каменные, антрациты, горючие сланцы, торф и брикет. Норма точности взвешивания.
213. Ускорить разработку и внедрение автоматизированных систем управления / Промышленный транспорт. – 1974. – № 6. – С. 2–4.
214. Устройство весовое автоматическое для взвешивания объектов в движении: отчет / ОПИ; № ГР 69042488. – Одесса, 1970.

215. Пат. 1297256 Франция. Устройство для измерения величины, на которую накладываются колебания. (см. Экспресс-инф. сер. Испытательные приборы и стенды. 1963, № 34).

216. Франко Р. Т. Контроль и учет производительности роторных экскаваторов / Р.Т. Франко, В.В. Федоровский, В.В. Яснопольский // Автоматизация производственных процессов на открытых горных разработках. – Киев: Техніка, 1972. – С. 119–130.

217. Харкевич А.А. Борьба с помехами / А.А. Харкевич. – М.: Наука, 1965. – 276 с.

218. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры / Р.В. Хемминг. – М.: Советское радио, 1980. – 224 с.

219. Херрис Д.Ф. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье / Д.Ф. Херрис // Ин-т инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (ТИИЭР): труды. – 1978. – Т. 66. – № I. – С. 60–96.

220. А.с. № 670821 СССР. Конвейерные весы / Д.Г. Чачхиани и др; опубл. 1979, Б.И. № 24.

221. Автоматическое взвешивание топлива на ленточных транспортерах: отчет / Восточный филиал теплотехнического института им. Ф.Э. Дзержинского; рук. Н.К. Чертков. – Челябинск, 1958.

222. Шахмейстер Л.Г. Теория и расчет ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1978. – 392 с.

223. Шахт Г.И. Использование микропроцессоров в сложных взвешивающих системах / Г.И. Шахт // Доклад на н.-тенх. конференции ИМЕКО "Техника промышленного взвешивания", Одесса, 1977: тезисы. – М., 1977. – С. 46.

224. Автоматизированная система управления производством на Ингулецком горно-обогатительном комбинате / Горный журнал. – 1972. – № I. – С. 24–27.

225. Шматков Н.А. Электронно-гидравлические конвейерные весы ЭГВ / Н.А. Шматков, В.И. Песок, А.А. Ивонин, Ю.Н. Кусайко // Уголь Украины. – 1973. – № 3. – С. 37–38.

226. Шпакунов И.А. О сопротивлении вращению роликов ленточных конвейеров / И.А. Шпакунов, В.Я. Пошивайло // Вопросы рудничного транспорта. – М.: Недра, 1967. – Вып. 10. – С. 62–68.

227. Шпакунов И.А. Экспериментальные исследования линейных секций ленточных конвейеров, транспортирующих крупнокусковой материал / И.А. Шпакунов, В.К. Смирнов, А.В. Коваль и др. // Динамика и прочность горных машин. – Киев: Наукова думка, 1973. – Вып. I. – С. 24–33.

228. Щедровицкий С.С. Состояние и перспективы развития весов и весовых дозаторов за рубежом / С.С. Щедровицкий // Метрология и измерительная техника. – М., ВИНТИ, 1975. – Том. 3. – С. 7–61. – (Итоги науки и техники).

229. Электромеханические конвейерные весы фирмы Siemens. Проспект фирмы МР2/1, 1968. (По данным 5, т. 3).

230. Электромеханические ленточные весы: Каталог фирмы VEB Grosswaagen (ГДР). 1968, (По данным 5, т.3).

231. Пат. 4158396 США. Электронные весы; опубл. 19.06.79, Изобретения в СССР и за рубежом. – 1980 – Вып. 99. – № 2. – С. 117.

232. Электронная машина для взвешивания движущихся материалов: Проспект Австралийской национальной выставки. Москва, Сокольники, 20-28 июля 1976 г.
233. Электронные весы и вычислительные машины для производства / Р.Ж. Метрология и измерительная техника. – 1973. – № 3. – Реф. 3.32.300.
240. Accurate weighind out at Swiden Quarry / Mine and Quarry. – 1975. – 4, № 7. – P. 9.
241. Australian belt weighind system / Mining Magazine. – 1975. – V. 132, № 3. – P. 229.
242. Automatic proportioning system blends coal from two sources / Automation. – 1958, December. – 5. – P. 46–49.
243. Bauer G. Weigh belt scales - nuclear approach / G. Bauer. – Can.: Mining J, 1975. – 96, № 6. – P. 25, 27.
244. Baldwin electronic SR-4 System controls chemical process to $\pm 1/4\%$ accuracy / Instrument and Automation. – 1956, June. – 29. – P. 1077.
245. Cameron J.F. Nucleonic conveyor weighind / J.F. Cameron // Phys. Bull. – 1973, Okt. – 24. – P. 605–606.
246. Chapman D.J. Conveyor weihing - a review of methods/ D.J. Chapman // The Quarry Managers Journal. – 1972. – V. 56, № 5. – P. 159–166.
247. Пат. 124374-3 Англ. A mass measuring system / J.L. Chrismann; опубл. 25.08.71.
248. Colign H. Belt Scale Design Considerations / H. Colign // Trans. of Mining Eng. AIME. – 1972. – 252, № 4. – P. 425–432,
249. Continuous Electrical weighing device for conveyor belts / The South African Minig and Engineering Journal. – 1956, February. – 67. – P. 93.
250. Conveyor scales / Rock Products. – 1972. – V. 75, № 8. – P. 108.
251. Electromechanische Föraeruandwaage / Archiv für techniches Meseen. – 1969. – 402, № 7. – P. 94-95.
252. Electronic belt weigher / Mine and Quarry Engng. – 1961. – 27, № 12.
265. Kelly J. Development puts the pressure on weight transducers / J. Kelly // Processing. – 1979. – V. 25, № 9. – P. 98–99.
266. Kemény T. Elektronikus mérlegek a szamitogepes termelésiranytas szol-gataban / T. Kemény // Mérés és Automatika. – 1974. – 22, № 9.
267. Kennedy V.C. Electronic Weighing / V.C. Kennedy // Instruments and Automation. – 1955, February.
268. Пат. 1557207 Великобр. Improvements in and relating to weighing machines / A.T. Kirkman, G.R. Smith; опубл. 5.12.79.
269. Kurylchek A.L. Conveyor belt scale and weigh feeder maintenance / A.L. Kurylchek // Pit and Quarry. – 1972. – V. 65, № 4. – P. 95–98.
270. Knrylchek A.L. Conveyor weighing 1908-1967 / A.L. Kurylchek // Canadian Mining J. – 1967. – 88, № 5. – P. 66–67.
271. Lindgren J. New Applications of Force and Mass Sensors / J. Lindgren // Microtechic. – 1974. – V. 28, № 4. – P. 231–232.
272. Load-measuring equipment / Quarry Management and Prod. – 1975. – V. 2, № 1. – P. 23.

273. Lochwood F. Digital arithmetic adds up to accurate belt weighers / F. Lochwood // *Process Eng.* – 1976, December. – P. 56–57.
274. Пат. 1123211 Великобр. An Improved Method and Apparatus for Dynamic Waighing; опубл. 14.08.68. [См. также Экспр.-инф., сер. Испыт. Приборы и стенды. 1969, № 6].
275. Macbeath D.G. Recommended Weightometer practice / D.G. Macbeath // *Can. Mining J.* – 1975. – 96, № 6. – P. 27.
276. McCullough. Problems of continuons-Weighing / McCullough // *Automation Progress.* – 1957. – 2, № 3. – 116.
277. Michelin F. Las erreurs de pasee sur bande en pesage continu / F. Michelin // *Rev. Ind. minerale.* – 1968. – 50, № 8. – P. 601–628.
278. Mintrop H. Waagen für die Industrie auf der Deutschen Industrie Messe / H. Mintrop, W. Trapp // *Werkstatt und Betrieb.* – 1957. – 90, № 7.
279. New Belt Weighers / *Mining Equipm. News.* – 1967. – V. 19, № 8. – P. 9.
280. New belt weighing system introduced / *Mining Eng.* – 1975. – V. 134, № 172. – P. 379.
281. New trends in weighing / *Automation.* – 1979. – 14, № 11. – P. 11–14.
282. New Weighing Sistem Uses Frequency-Analog Principle / *Microtecnic.* – 1974. – V. 28, № 4. – P. 232.
283. Nuclear belt scale improves coal weighing / *Coal Age.* – 1969. – V. 74, № 11. – P. 85.
284. Oehmen H. Stoßkraftmessungen an förderbandtragrollen und Untersuchungen der Durchhangsform von Fördergurten / H. Oehmen, R. Alles // *Braunkohle.* – 1972. – 24, № 12. – S. 417–425.
285. Off-Highway Track Weighing / *Mining J.* – 1971. – V. 277, № 7110. – P. 480.
286. Pfister E. Neue Präzisions – Förderbandwaage / E. Pfister, K. Schwab // *Fördern und Heben.* – 1957. – 7, № 1. – 27.
287. Ponts bascules electroniques et ordinateur pour l'exploitation d'une carrière / *Equipment mécanique carrières et materiaux.* – 1975. – V. 54, 141. – P. 49–52.
288. Robinson R. Weighing against the clock / R. Robinson // *Mechanical Handling.* – 1975. – V. 62, № 3. – P. 42–43.
289. Scheuremann E.A. Von der Hebel bis zur Kreiselwaage: Tendenzen in der Wägetechnik / E.A. Scheuremann // *Lebensmitteltechnik.* – 1976. – 8, № 10. – S. 612, 614.
290. Пат. 2365524 ФРГ. Selbststätige elektrische Nullstell - und Empfindlichkeits justierverrichtung für integrierende electromechanische Förderbandwagen / A. Schwaier, G. Gödelmann; опубл. 1976.
291. Simpl, maintenance - free Baldwin SR-4 System proportions 5 ingredients to $\pm 1/10\%$ repeatability / *Instrument and Automation.* – 1956. – 29, № 12.
292. Snead N. Weighind trusks-a better and faster system / *Pit and Quarry.* – 1973. – V. 65, № 8. – P. 72–84.
293. Пат. 60641 ЦНР. Устройство для взвешивания сыпучих материалов на ленточном конвейере / К. Стоинский, М. Баргиель; заявл. 9.12.67. (см. Р.Ж. Метрология, 1971, № 7).

294. Svenek Lastindikator enligt ny princip / Verkstäderna. – 1976. – 72, № 4. – P. 53–54.
295. The story of Fairbanks - Morse Electronic Scale in seven volumes / Scale J. – 1957, April, September.
296. Tranweigh system gets Board of Trade approval / Process Control and Automat. – 1961. – 8, № 3.
297. Waagen / Drant – Fachzeitschrift. – 1975. – V. 26, № 7. – P. 346–348.
298. Пат. 3603417 США. Weighing apparatus for wheeled vehicles / H.J. Wachholz; опубли. 7.08.71.
299. Weighing and Processing / Instrument and Automation. – 1957. – № 4.
300. Weighing Non-Stop Coal Trains Automatically / Electrical Review. – 1969, October. – V. 185. – P. 571.
301. Weighing of Iron-ore Trains in Motion / Steel Times. – 1967, May. – V. 194. – P. 559–560.
302. Weighing systems: a material handling tool for the '80' S / Mater. Handl. Eng. – 1979. – 34, № 9. – P. 62–67.
303. Wider approval for coal wagon system / International Mining equipment. – 1965. – V. 16, № 7. – P. 24.
304. Пат. 3754126 США. Integrating conveyor scale / R.B. Williams; опубли. 21.08.73.
305. Zantke H. Maßnahmen zur Verringerung und Kontrolle des Meßfehlers electromechanischer Bandwaagen / H. Zantke // Mes. / Steuern-Regeln. – 1971. – 14. – № 1. Automatisierungspraxis. – 8, № 1. – S. 16–19.

Наукове видання

Жуковицький Володимир Іванович

**ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЧНИХ
ВАГОВИМІРЮВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ У ГІРНИЧОРУДНІЙ
ПРОМИСЛОВОСТІ**

Монографія
(Російською мовою)

Під редакцією І.В. Жуковицького

Підп. до друку 04.03.2014. Формат 30×42/4
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 14,2.
Обл.-вид. арк. 14,2. Тираж 50 пр. Зам. № .

Підготовлено до друку та видруковано
в Державному вищому навчальному закладі
«Національний гірничий університет».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.