

Министерство образования Российской Федерации

Ульяновский государственный технический университет

**В. И. Смирнов**

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
И КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ**

Ульяновск 2001

УДК 681.518  
ББК 32.965  
С50

УДК 681.518  
**Смирнов В. И.**

Методы и средства функциональной диагностики и контроля технологических процессов на основе электромагнитных датчиков / Ульяновский государственный технический университет. -Ульяновск: УлГТУ, 2001,-190 с.

Монография посвящена проблемам разработки автоматизированных средств функциональной диагностики и контроля технологических параметров и процессов на основе датчиков электромагнитного типа. Рассмотрены два подхода к проектированию приборов: на основе платы расширения для персонального компьютера и на основе программируемых микроконтроллеров. Приводятся описания конструкций приборов и их программного обеспечения.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников, занимающихся разработкой автоматизированных средств измерений.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Л. И. Волгин,  
директор ОАО «Электроприбор»,  
доктор технических наук Г. В. Медведев

Научный редактор доктор технических наук, профессор В. А. Мишин

Одобрено редакционно-издательским советом Ульяновского  
государственного технического университета

ISBN 5-89146-246-X

© В. И. Смирнов, 2001  
© Оформление. УлГТУ, 2001

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Оценка технического состояния технологического и энергетического оборудования, транспортных средств и коммуникаций представляет собой важную задачу, решение которой позволяет обнаружить на ранней стадии зарождающиеся дефекты и, тем самым, предотвратить аварийные ситуации, способные привести к серьезным негативным последствиям. Вместо существовавшей ранее системы планово-предупредительных работ, включающей в себя периодический контроль и профилактику, более целесообразным с технической и экономической точек зрения становится обслуживание оборудования по его фактическому состоянию. Это означает, что ремонтные работы производятся только тогда, когда в этом возникает реальная необходимость.

Для организации такого обслуживания требуются методы и средства диагностирования, позволяющие оценить состояние объекта контроля на текущий момент и спрогнозировать его состояние на ближайшее будущее. В зависимости от особенностей взаимодействия средств диагностирования и объекта различают тестовое и функциональное диагностирование. В первом случае при оценке состояния на объект подаются тестовые воздействия, а сам он находится, как правило, в нерабочем состоянии. Во втором случае, то есть при функциональном диагностировании, объект всегда находится в рабочем состоянии, а поиск дефектов осуществляется на основе измерений и анализа так называемых диагностических параметров, количество которых может быть достаточно большим, а требования к быстрдействию и точности измерений очень жесткими. Следует также учесть серьезную математическую обработку исходной диагностической информации, включающую в себя вычисление спектральных характеристик и корреляционных функций, цифровую фильтрацию, статистику и т.д. Реализовать все эти операции без помощи компьютера или, по крайней мере, программируемого микроконтроллера практически невозможно.

Функциональная диагностика и контроль технологических процессов включают в себя измерение широкого спектра самых разных физических величин (вибраций, электрических токов и напряжений, электромагнитных полей, акустических волн, температуры и т.д.). Часто все эти величины требуется измерять одновременно, что можно осуществить, например, с помощью многоканальных измерительно-вычислительных комплексов (ИВК). Упростить конструкцию таких комплексов и снизить, тем самым, их стоимость позволяет использование однотипных датчиков, способных преобразовывать в электрический сигнал большинство из перечисленных выше величин. Электромагнитные датчики (ЭМД) как раз обладают такими широкими функциональными возможностями. С их помощью можно измерять практически любую механическую величину и большинство электромагнитных величин. При всех своих достоинствах датчики этого типа обладают одним серьезным недостатком, а именно, их быстродействие для решения многих задач недостаточно велико. Повысив быстродействие, можно было бы использовать их в качестве источников диагностической информации в соответствующих контрольно-измерительных приборах и системах.

В первой главе изложен новый способ преобразования параметров ЭМД, основанный на возбуждении в датчиках переходных процессов и измерении их длительности. Представлены расчеты характеристик переходного процесса в LC-контуре и обосновывается целесообразность включения в цепь датчика нелинейного элемента. Вторая и третья главы посвящены вопросам технической реализации способа. В них рассмотрены конструктивные особенности датчиков и микропроцессорных устройств, осуществляющих преобразование параметров датчиков в цифровой код. В следующих главах представлены результаты разработок конкретных автоматизированных измерительных приборов, предназначенных для решения задач функциональной диагностики и контроля технологических параметров и процессов.

Автор выражает искреннюю признательность всем студентам и аспирантам, принимавшим участие в работе, особенно Абакумову В. И., Жаркову В. В. и Ильину М. Г.

Глава первая  
**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ДАТЧИКАХ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ  
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ**

**1.1 Классификация существующих способов преобразования  
параметров электромагнитных датчиков**

Преобразование параметров электромагнитных датчиков (ЭМД) в выходной сигнал, в качестве которого для цифровых измерительных устройств выступает код, требует обычно серии промежуточных преобразований информативного параметра в одну из электрических величин (напряжение, ток, заряд, фаза, частота, период). Поэтому любая измерительная цепь включает в себя несколько элементарных преобразователей, часть из которых или вся цепь целиком охвачены обратной связью. В зависимости от отсутствия или наличия в измерительной цепи обратной связи все способы преобразования параметров ЭМД, точно так же, как датчиков других типов, делятся на две группы: прямого преобразования и уравнивающего преобразования.

**Прямые способы преобразования**

Все прямые способы преобразования по виду промежуточной величины принято делить на две подгруппы [60]. К первой относятся способы, в которых промежуточной величиной является напряжение или ток. Для реализации такого преобразования обычно используют делители напряжения (рис. 1.1 а), неравновесные мостовые цепи (рис. 1.1 б), а также цепи с резонансным контуром в качестве нагрузки (рис. 1.1 в).

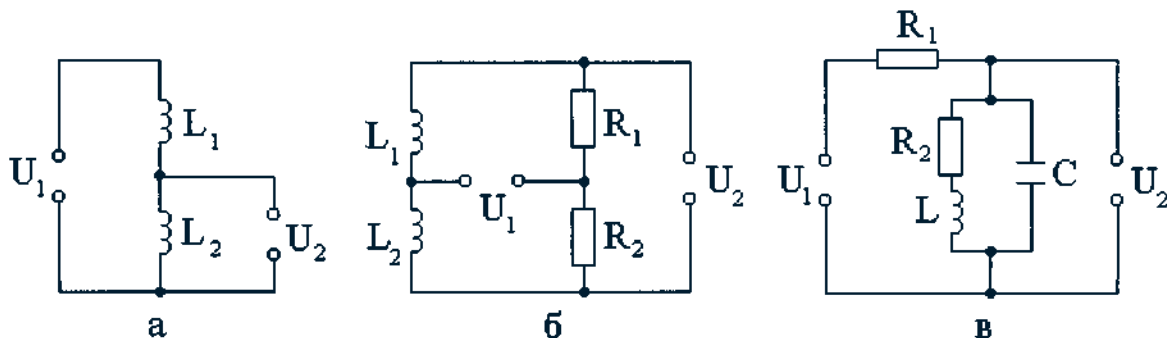


Рис. 1.1. Схемы, реализующие прямой способ преобразования параметров ЭМД  
(подгруппа 1)

Измерительные устройства, в которых используются данные способы преобразования, отличаются простотой конструкции, большой мощностью выходного сигнала, относительно высоким быстродействием, но уступают по точности измерений устройствам с другими схемами первичного преобразователя. Повысить быстродействие подобных устройств можно, увеличив частоту напряжения, но лишь до определенного предела, поскольку при достижении некоторой частоты, зависящей от материала магнитопровода, из-за поверхностного эффекта происходит резкое возрастание магнитного сопротивления и магнитных потерь в магнитопроводе. Возрастание же магнитного сопротивления, в свою очередь, приводит к уменьшению относительного изменения полного магнитного сопротивления, обусловленного воздействием измеряемой величины. Поэтому при использовании магнитопроводов из сплошного материала не рекомендуется выбирать частоту выше 100-200 Гц, а при использовании листового материала - до 1-10 кГц [3, 57]. К тому же увеличение частоты приводит к возрастанию влияния проводов, соединяющих датчики с измерительным прибором. Поскольку принято считать, что отношение частоты питающего напряжения к максимальной частоте измеряемого процесса должно быть не менее 10 [67], то спектральный диапазон измеряемых электромагнитными датчиками процессов в большинстве случаев ограничен величиной 1 кГц.

Ко второй подгруппе относятся способы, в которых промежуточной величиной является фаза, частота или период сигнала, а также длительность временного интервала. Способы, относящиеся к этой подгруппе, отличаются большим разнообразием [60, 66, 69], при этом чаще всего используют зависимость резонансной частоты колебаний  $jLC$ -контур или постоянной времени  $T^L$ -цепи от параметров датчиков. Примеры схем, реализующие данную подгруппу способов, представлены на рис. 1.2.

Принцип действия устройства, изображенного на рис. 1.2а, основан на измерении интервала времени, за который амплитуда затухающих колебаний в  $LC$ -контуре достигнет определенного уровня, и последующего преобразования этого интервала в код [69]. В момент замыкания ключа  $K_1$  в  $LC$ -контуре возникают затухающие колебания напряжения на обкладках конденсатора с начальной амплитудой  $U_0$ . Одновременно с этим

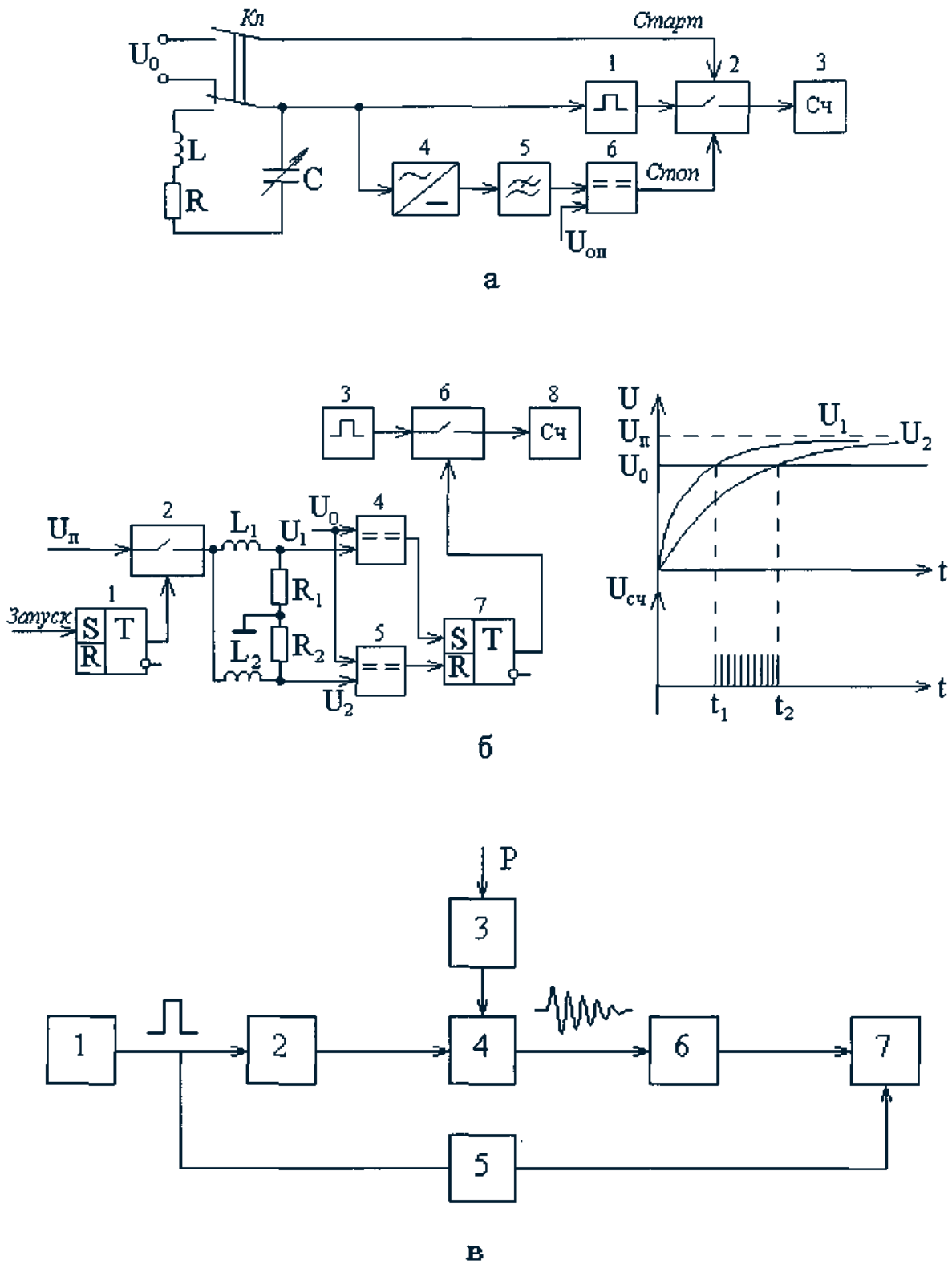


Рис. 1.2. Схемы, реализующие способ прямого преобразования параметров ЭМД (подгруппа 2)

формируется сигнал *Start*, разрешающий прохождение счетных импульсов с выхода формирователя 1 на вход счетчика 3. С помощью выпрямителя 4 и фильтра низких частот 5 выделяется огибающая затухающих колебаний, поступающая на один из входов компаратора 6. На втором входе поддерживается постоянное опорное напряжение  $U_{on}$ . В момент времени, когда напряжения на входах компаратора станут равными, сформируется сигнал *Stop*, запрещающий прохождение счетных импульсов через переключатель напряжения 2 на вход счетчика 3. Таким образом по окончании измерения содержимое счетчика будет пропорционально добротности катушки индуктивности.

Схема, изображенная на рис. 1.26, реализует способ преобразования параметров на основе измерений постоянной времени *RL-цепи* [117]. Схема работает следующим образом. Триггер 1, открывая переключатель 2, подает напряжение питания на дифференциальный датчик  $R_1L_1 - R_2L_2$ -Напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , снимаемые с плеч датчика, поступают на компараторы 4 и 5, что позволяет определить моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , когда указанные напряжения достигнут значения  $U_0$ . Триггер 7 формирует временной интервал  $\Delta t = t_1 - t_2$ , заполняемый поступающими с генератора 3 счетными импульсами. В итоге по завершении одного измерения содержимое счетчика 8 будет пропорционально разности  $L_1$  и  $L_2$ .

Схема на рис.1.2в предназначена для измерения частоты свободных колебаний электромеханической системы на основе струнного датчика 4, жестко связанного одним концом с мембраной 3, на которую воздействует внешнее давление  $P$  [66]. Генератор импульсов 1 с помощью электромагнитного преобразователя 2 возбуждает колебания струнного датчика, которые регистрируются приемником 6 и передаются на частотомер 7. Частота этих колебаний зависит от натяжения струны, изменяющегося под воздействием измеряемого внешнего давления. Линия задержки 5 необходима для исключения влияния переходных процессов, которые могут длиться несколько десятков периодов колебаний.

Использование во всех рассмотренных выше устройствах время-импульсного преобразования, отличительной особенностью которого является принцип заполнения временного интервала счетными импульсами, обладает очевидным недостатком, а именно, расширение



динамического диапазона измерений приводит к пропорциональному увеличению длительности однократного измерения. Более предпочтительным с точки зрения быстродействия является преобразование с помощью интегратора временного интервала в напряжение и далее - в цифровой код.

### Способы уравнивающего преобразования

Способы уравнивающего преобразования (преобразования со сравнением) разделяются на две подгруппы: с регулируемой и нерегулируемой опорной величиной [60]. Для способов первой подгруппы характерной особенностью является косвенное (опосредованное) сравнение преобразуемого параметра и опорной величины, причем последняя изменяется до наступления определенного состояния измерительной цепи, например, равновесия моста. Подробный анализ работы различных измерительных уравнивающих мостов представлен в [59, 69]. Их отличительной особенностью является высокая точность измерений (для  $L$  и  $C$  - до 0,1%) и высокая помехоустойчивость. Однако невысокое быстродействие ограничивает их использование в широком круге задач.

Вторая группа способов, использующих нерегулируемую опорную величину, в свою очередь подразделяется на способы следящего и развертывающего преобразования. Суть способа следящего преобразования поясняет структурная схема на рис. 1.3 [60]. На частотно-зависимую цепь ЧЗЦ, в состав которой входит преобразуемый элемент ( $L, C$  или  $R$ ), подается переменное напряжение от генератора  $\Gamma$ , управляемого устройством настройки УН. Устройство настройки УН изменяет частоту генератора до наступления определенного состояния

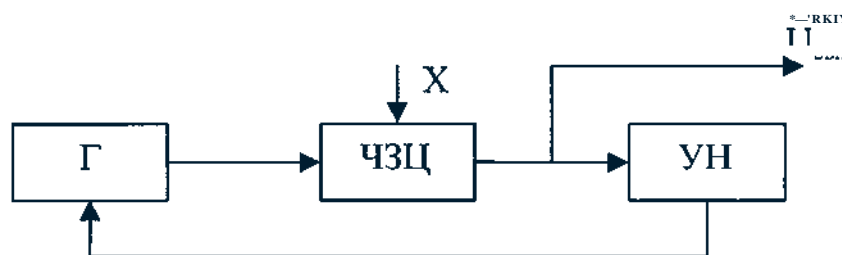


Рис. 1.3. Структурная схема следящего преобразователя

процесса на выходе ЧЗЦ, например, наступления резонанса в LC-контуре. В результате устанавливается однозначное соответствие между измеряемым параметром и частотой генератора. Измерительным устройствам, использующим данный способ, наряду с высокой точностью измерений присущи низкое быстродействие и сложность схемы преобразователя.

Принцип действия измерительных устройств, использующих способ развертывающего преобразования, основан на формировании некоторой развертывающей функции, зависящей от преобразуемого параметра ( $L, C$  или  $R$ ), и регистрации моментов времени, в которые она достигает определенного, заранее заданного значения [66]. При этом соответствующий интервал времени оказывается функционально связанным с преобразуемым параметром. Один из возможных примеров, реализующих данный способ, представлен на рис. 1.4 [53].

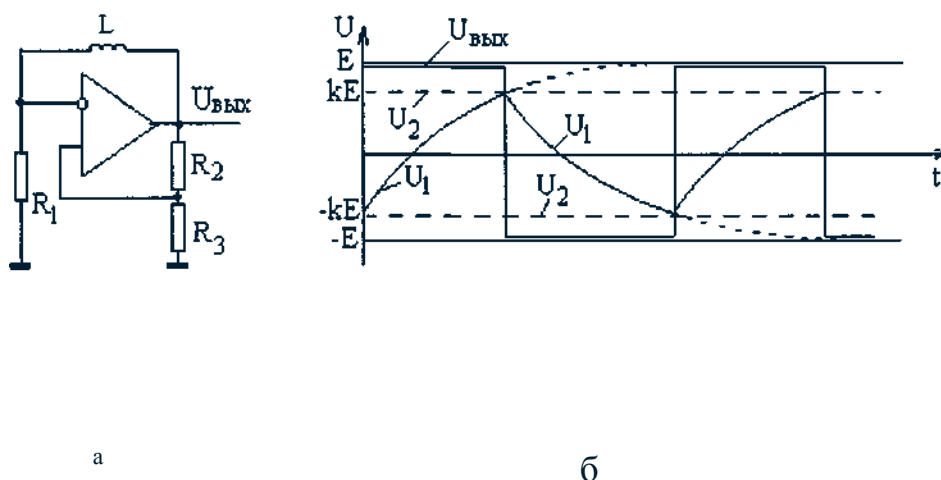


Рис. 1.4. Принципиальная схема развертывающего преобразователя (а) и поясняющие его работу эпюры напряжения (б)

Основным элементом измерительной цепи является операционный усилитель с большим коэффициентом усиления, который выполняет функцию компаратора. Напряжение на его выходе  $U_{\text{вых}}$  зависит от соотношения напряжений на инвертирующем и неинвертирующем входах. Напряжение  $U_2$  на неинвертирующем входе усилителя снимается с делителя, выполненного на резисторах  $R_2$  и  $R_3$ , и его значение равно  $U_2 = kE$ , где  $E$  - напряжение насыщения, а  $k = R_3 / (R_2 + R_3)$ . Напряжение  $U_1$  на инвертирующем входе является входным напряжением пассивной интегрирующей цепочки, образованной катушкой индуктивности  $L$  и резистора  $R_1$ . Напряжение  $U_1$  изменяется по экспоненте с постоянной времени  $L/R_1$ , стремясь к значению напряжения насыщения  $E$ . В момент

времени, когда  $U_1=U_2$ , напряжение на выходе усилителя меняет знак и далее процесс циклически повторяется с периодом, пропорциональным постоянной времени  $L/R_1$ . Подробный анализ различных вариантов схем следящего преобразования представлен в [60]. Устройства, реализующие данный способ преобразования, отличаются точностью измерений, относительно высокое быстродействие, линейность функции преобразования, простота последующего преобразования выходного сигнала в цифровой код.

## 1.2. Анализ переходных процессов в LC-колебательном контуре

Анализ существующих способов преобразования позволяет сделать вывод, что наиболее предпочтительными с точки зрения быстродействия являются прямые способы, а также некоторые разновидности способа развертывающего преобразования. Тем не менее даже использование этих способов не позволяет реализовать быстродействие большинства индуктивных датчиков, существенно превышающее 1000 измерений в секунду [3, 57, 66, 129], что явно недостаточно для современных многоканальных ИВК. Дополнительную сложность вызывает необходимость коммутации измерительных каналов, приводящая к переходным процессам и, тем самым, не позволяющая существенно повысить быстродействие датчиков. В связи с этим представляет интерес использовать для преобразования параметров непосредственно сам переходный процесс, возбуждаемый в индуктивных датчиках кратковременными электрическими импульсами. Оценку возможностей этого способа с точки зрения быстродействия и чувствительности можно осуществить на примере параллельного LC-контра , в котором возбуждаются быстрозатухающие электромагнитные колебания. При этом требуется соблюсти условие, а именно, длительность однократного измерения должна быть на уровне нескольких десятков микросекунд. Это, с одной стороны, соответствует возможностям современных микроконтроллеров, а с другой стороны, необходимо для решения ряда задач, например, вибродиагностике автомобильных двигателей, где требуемая частота дискретизации аналогового сигнала превышает 10 кГц. Что касается чувствительности, то первичный

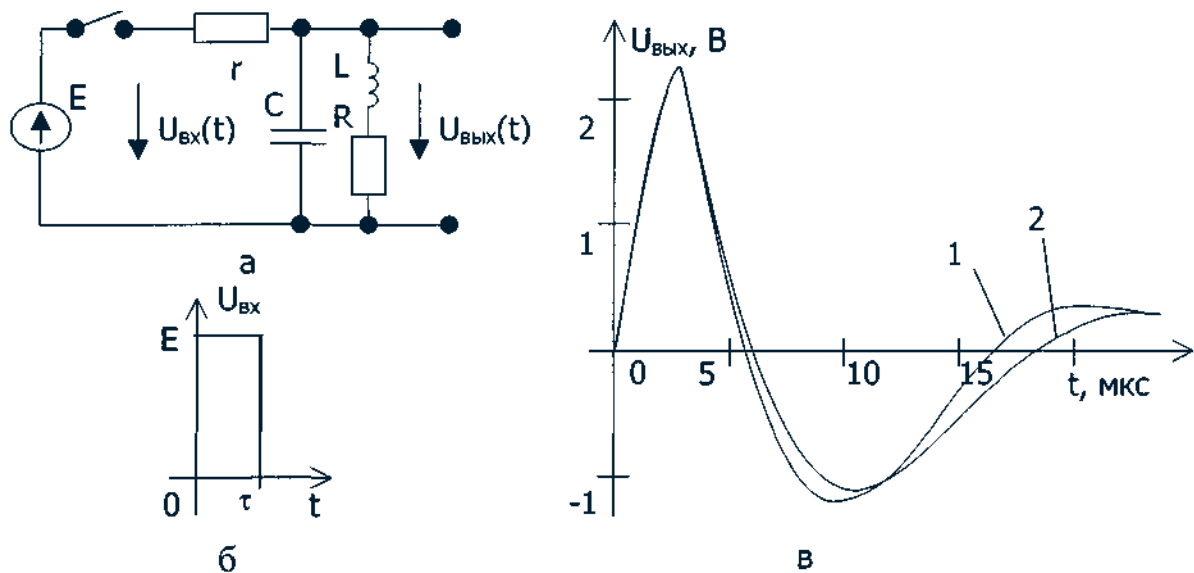


Рис. 1.5. Схема замещения (а), форма импульса возбуждения (б) и переходного процесса (в) в ZС-колебательном контуре

преобразователь должен обеспечить возможность регистрации изменений параметров индуктивных датчиков на уровне сотых долей процента.

Схема колебательного контура и форма возбуждающего переходный процесс электрического импульса длительности  $t$  и амплитуды  $E$  представлены соответственно на рис.1.5а и 1.5б. Расчет формы выходного сигнала  $U_{вых}(f)$  осуществлялся на основе операторного метода. Изображение возбуждающего переходный процесс напряжения  $U_{ex}(p)$ , полученное с помощью преобразования Лапласа, имеет вид:

$$U_{ex}(p) = \int_0^{\infty} U_{ex}(t) e^{-pt} dt = \frac{E}{p} (1 - e^{-p\tau}). \quad (1.1)$$

Изображение выходного сигнала  $U_{вых}(p)$  для представленной на рис. 1.5а схемы будет определяться выражением:

$$U_{вых}(p) = U_{ex}(p) \frac{\frac{(R + pL)1/pC}{1/pC + R + pL}}{r + \frac{(R + pL)1/pC}{1/pC + R + pL}}.$$

После несложных преобразований это выражение для  $U_{вых}(p)$  можно привести к виду:

$$U_{\text{вых}}(p) = U_{\text{вх}}(p) \frac{\frac{R}{rLC} + \frac{p}{rC}}{p^2 + p\left(\frac{R}{L} + \frac{1}{rC}\right) + \frac{1}{LC}\left(1 + \frac{R}{r}\right)}. \quad (1.2)$$

Обозначив  $\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ ;  $2\beta = \frac{R}{L} + \frac{1}{rC}$  и  $\omega^2 = \omega_0^2\left(1 + \frac{R}{r}\right) - \beta^2$ , с учетом (1.1)

выражение (1.2) примет вид:

$$U_{\text{вых}}(p) = \frac{E(1 - e^{-p\tau})\omega_0^2 \frac{R}{r}}{p[(p + \beta)^2 + \omega^2]} + \frac{\frac{E}{rC}(1 - e^{-p\tau})}{(p + \beta)^2 + \omega^2}.$$

Перейдя к оригиналу выходного сигнала  $U_{\text{вых}}(t)$ , получим окончательно

при  $t \leq \tau$ :

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{ER}{R+r} \left( 1 - e^{-\beta t} \frac{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}{\omega} \cos(\omega t - \varphi) \right) + \frac{E}{\omega r C} e^{-\beta t} \sin \omega t,$$

при  $t > \tau$ :

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{E}{R+r} \left( e^{-\beta(t-\tau)} \frac{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}{\omega} \cos(\omega(t-\tau) - \varphi) - e^{-\beta t} \frac{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}{\omega} \cos(\omega t - \varphi) \right) + \frac{E}{\omega r C} \left( e^{-\beta t} \sin \omega t - e^{-\beta(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) \right),$$

$$\text{где } \varphi = \arccos\left(\frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \beta^2}}\right).$$

Графики переходных процессов  $U_{\text{вых}}(t)$ , рассчитанные по полученным формулам для двух значений индуктивности представлены на рис.1.5в. В расчетах использовались следующие значения параметров электрической схемы:  $E=5$  В,  $\tau=3$  мкс,  $r=15$  Ом,  $R=0,1$  Ом,  $C=0,3$  мкФ,  $L_1=40$  мкГн (график 1),  $L_2=50$  мкГн (график 2).

Принцип действия преобразователя, использующего зависимость длительности переходного процесса от параметров индуктивных датчиков, состоит в следующем. С помощью компаратора определяется момент времени, когда  $U_{вых}(t)$  переходит через ноль, то есть длительность переходного процесса  $T$ . Аналогичным образом определяется длительность переходного процесса  $T_{он}$  в опорном плече, где параметры датчика фиксированы. Далее выделяется разность  $\Delta T = T - T_{он}$ , которая затем с помощью интегратора преобразуется в напряжение.

Чувствительность преобразователя в этом случае определяется величиной  $\gamma_1 = \Delta T / (\Delta L / L)$  и скоростью нарастания выходного напряжения в момент его перехода через ноль, то есть величиной  $y_2 = dU_{вых}(t)/dt$  в точке  $t = T$ . Эти величины взаимосвязаны — увеличение одной из них, обусловленное изменением параметров схемы (главным образом  $C$  и  $L$ ), приводит к уменьшению другой. При оптимальном выборе параметров схемы, определяемом критерием максимальной чувствительности преобразователя, значения  $\gamma_1 \approx 0,1$  мкс/%, а  $\gamma_2 \approx 50$  мВ/мкс. Таким образом, для того, чтобы преобразователь мог зарегистрировать изменения параметров индуктивных датчиков на уровне 0,01%, необходимо, чтобы переключение логического состояния выхода компаратора происходило при изменении напряжения на одном из его входов около 0,05 мВ, что для современных компараторов выходит за пределы их возможностей [47].

### **1.3. Переходные процессы в LD-контуре как основа способа преобразования параметров электромагнитных датчиков**

Повысить чувствительность и одновременно сохранить высокое быстродействие можно как за счет увеличения  $\gamma_1 = \Delta T / (\Delta L / L)$ , так и за счет увеличения скорости нарастания выходного напряжения  $y_2 = dU_{вых}(t)/dt$  в точке  $t = T$ . Величина  $y_1$  зависит от индуктивности датчика и его конструктивных особенностей, причем изменение индуктивности датчика возможно лишь в относительно узком диапазоне, что не позволяет как-то существенно увеличить  $y_1$ . Что касается величины  $y_2$ , то увеличить ее позволяет замена конденсатора в LC-колебательном контуре на нелинейный элемент, а именно диод с большим временем восстановления обратного сопротивления [94].

Для понимания роли диода в измерительном преобразователе и процессов, происходящих в нем, рассмотрим простейшую цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора и диода (рис 1.6а), на которую воздействует скачкообразно изменяющееся напряжение (рис 1.6б), переключающее диод из прямого направления в обратное [71]. Для определенности будем считать, что основу диода составляет резко несимметричный  $p^+$ - $n$ -переход. Если напряжение  $E$  существенно превышает падение напряжения на открытом диоде, составляющем для кремниевых диодов величину  $0,6...0,8$  В, то прямой ток через диод равен  $I_1 \approx E_1/R$ . В момент переключения напряжения на диоде с прямого на обратное из-за наличия инжектированных через  $p^+$ - $n$ -переход дырок в базе диода сопротивление его практически не меняется, оставаясь таким же, как и в открытом состоянии. Обратный ток при этом ограничен внешним сопротивлением  $R$  и составляет величину  $I_2 \approx E_2/R$ . С этого же момента времени начинается процесс рассасывания дырок в базе диода, сопровождающийся их рекомбинацией и возвратом в  $p^+$ -область диода.

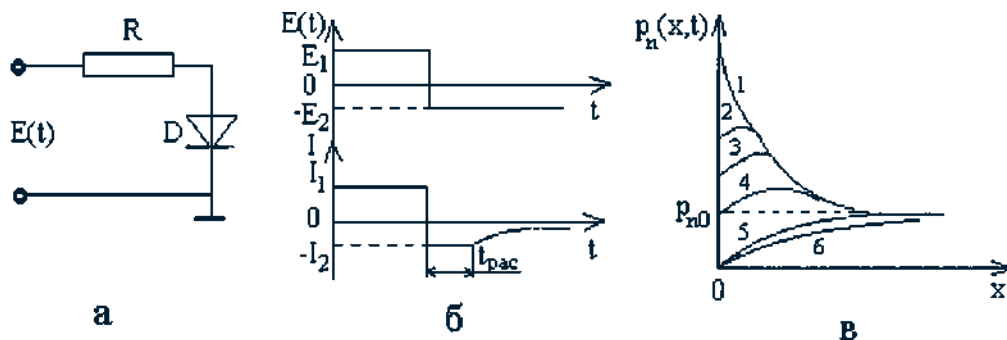


Рис. 1.6. Принципиальная схема (а), временные зависимости напряжения и тока диода (б), профили распределения дырок в базе диода в различные моменты времени

Профиль распределения дырок в базе диода для разных моментов времени представлен на рис. 1.6в. Непосредственно перед моментом переключения распределение дырок (кривая 1) соответствовало протеканию тока  $I_1$ , который определяется градиентом концентрации  $dp_n/dx$  в точке  $x=0$ . В момент переключения ток меняет свое направление и величину, соответственно на кривой 2 изменяется знак у величины  $dp_n/dx$  при  $x=0$ . С течением времени концентрация дырок вблизи  $p^+$ - $n$ -перехода уменьшается, но пока выполняется условие  $p_n > p_{n0}$  (кривые 3 и 4),



сопротивление  $p^+$ - $n$ -перехода мало и ток через переход  $I_2$  практически не изменяется. С некоторого момента времени концентрация  $p_n$  в базе диода становится меньше равновесной концентрации  $p_{n0}$  (кривые 5 и 6), сопротивление  $p^+$ - $n$ -перехода резко возрастает и ток через него начинает уменьшаться, стремясь к значению тока насыщения. Таким образом, весь переходный процесс делится на два этапа: этап рассасывания, в течение которого  $p_n > p_{n0}$ , и этап восстановления обратного сопротивления, в течение которого обратный ток спадает до величины, равной току насыщения. Время рассасывания  $t_{pac}$  прямо пропорционально времени жизни дырок в базе диода  $m_p$  и зависит от соотношения прямого  $I_1$  и обратного  $I_2$  токов через него. С ростом силы тока  $I_1$  увеличивается концентрация инжектированных через  $p^+$ - $n$ -переход дырок, что приводит к увеличению времени рассасывания  $t_{pac}$ . С ростом  $I_2$  увеличивается скорость изменения концентрации дырок в базе диода, что уменьшает  $t_{pac}$ .

Взаимосвязь между временем рассасывания и протекающими через диод токами  $I_1$  и  $I_2$  можно найти из решения нестационарного уравнения непрерывности. При низком уровне инжекции неосновных носителей для резко несимметричного  $p^+$ - $n$ -перехода с полубесконечной базой его решение сводится к трансцендентному уравнению [111]:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_{pac}}{\tau_p}} = \frac{I_1}{I_1 + I_2},$$

где  $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$  - функция ошибок (error function)

Зависимость времени рассасывания неосновных носителей от тока инжекции  $I_1$  и обратного тока рассасывания  $I_2$  позволяет использовать измерение длительности переходного процесса в качестве основы способа преобразования параметров ЭМД. С этой целью параллельно диоду подключается катушка индуктивности, параметры которой могут изменяться под воздействием измеряемой физической величины. Схема замещения такого LD-контура, а также формы импульса возбуждения и переходного процесса, возникающего в нем, представлены на рис. 1.7. Параметры элементов схемы примерно совпадают с параметрами схемы, изображенной на рис. 1.5а.



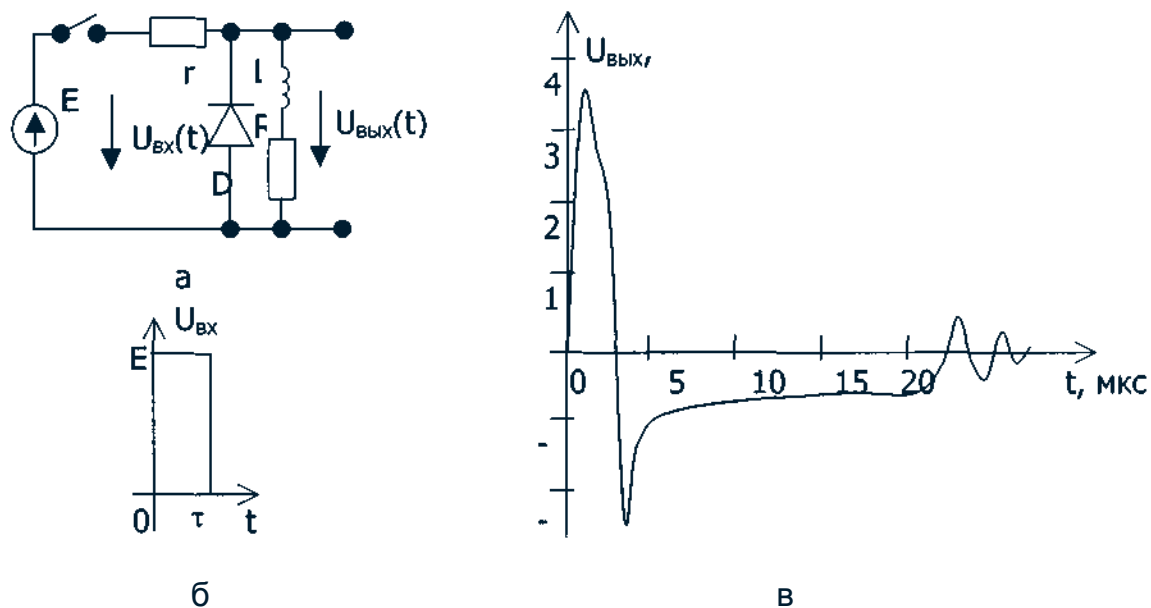


Рис. 1.7. Схема замещения (а), форма импульса возбуждения (б) и переходного процесса (в) в *LD-контуре*

Электрический импульс (рис. 1.7б) длительностью несколько микросекунд возбуждает в *LD-контуре* быстрозатухающие электромагнитные колебания, что приводит к кратковременным включениям диода вначале в обратном направлении, затем в прямом и снова в обратном. Вторая фаза процесса, когда диод включается в прямом направлении, сопровождается инъекцией неосновных носителей в базу диода. Переход диода в третью стадию (включение в обратном направлении) по времени происходит с задержкой, длительность которой зависит от величины инжестируемого через *p-n*-переход заряда. Величина заряда зависит от тока инъекции, который в свою очередь, зависит от параметров катушки индуктивности. Таким образом, между длительностью переходного процесса в *LD-контуре* и параметрами катушки индуктивности имеется однозначное соответствие.

Основные параметры элементов *LD-контурa*, влияющие на длительность переходного процесса следующие. Время жизни неосновных носителей в базе диода, измеренное по изложенной в [5] методике, имеет величину порядка 10 мкс. Значения индуктивности катушки находятся в диапазоне 20... 100 мкГн. Длительность импульса возбуждения примерно 3 мкс, амплитуда импульса 5 В. В результате длительность переходного процесса получается на уровне 15...25 мкс. При этом скорость нарастания выходного напряжения с *LD-контурa* в момент времени, когда оно

становится равным нулю, т. е.  $i_2 = dU_{\text{вх}}(t)/dt$  в точке  $t=T$ , примерно равна 600 мВ/мкс, что более, чем на порядок превышает аналогичную величину для колебательного LC-контура. Величина  $\omega = 2\pi f$  в том и другом случае примерно одинакова. Это позволяет сделать вывод о том, что включение в состав первичного преобразователя нелинейного элемента (диода с большим временем восстановления обратного сопротивления) вместо конденсатора позволяет повысить чувствительность примерно на порядок при одинаковом времени однократного измерения.

Несколько улучшить форму выходного напряжения с LC-контура позволяет включение параллельно диоду и катушке индуктивности активного сопротивления  $R$ . На рис. 1.8 представлены схема замещения, формы импульса возбуждения и выходного напряжения с LDR-контура. При соответствующем подборе сопротивления  $R$  можно добиться полного исчезновения осцилляции выходного напряжения, возникающих в конце переходного процесса. Это облегчает детектирование длительности переходного процесса, но в то же время примерно на 20% уменьшает чувствительности первичного преобразователя.

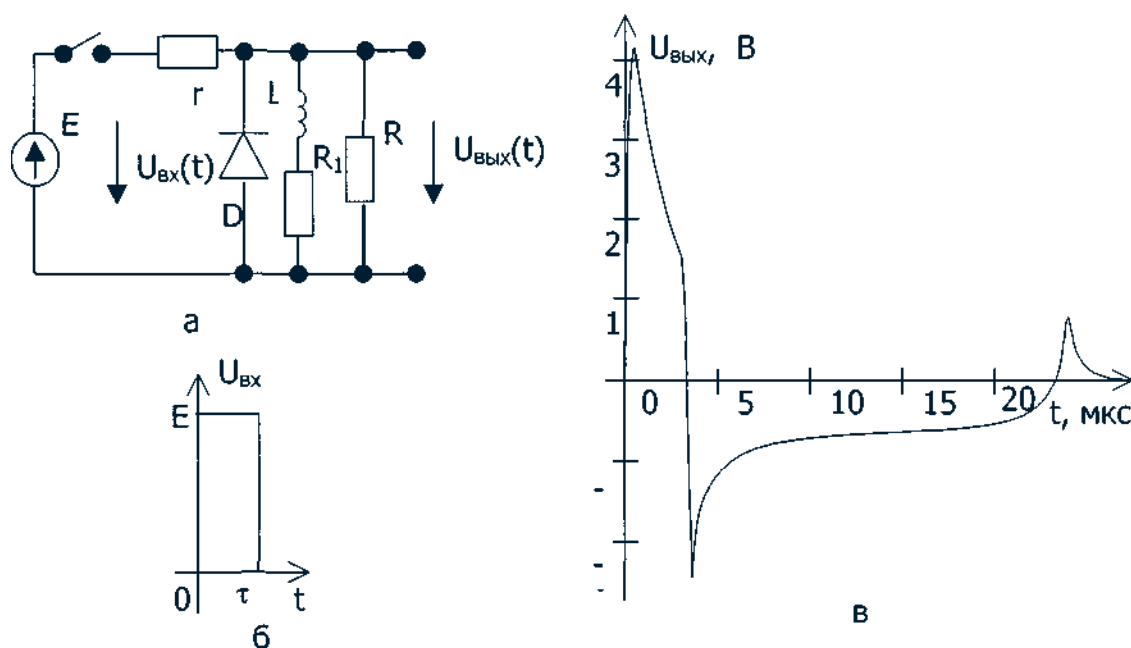


Рис. 1.8. Схема замещения (а), форма импульса возбуждения (б) и переходного процесса (в) в LDR-контуре

## 1.4. Техническая реализация способа преобразования, основанного на измерении длительности переходного процесса в 1,-) контуре

### Анализ структурной схемы измерительного устройства

Структурная схема измерительного устройства и поясняющие его работу временные диаграммы напряжений приведены соответственно на рис. 1.9 и 1.10. Схема управления в зависимости от конструктивного варианта представляет собой либо программируемый микроконтроллер, либо интерфейсный блок платы расширения, обеспечивающий взаимодействие измерительного устройства с центральным процессором компьютера.

Устройство функционирует следующим образом [82]. Схема управления формирует трехразрядный код номера измерительного канала, изменяющийся по определенному алгоритму. После этого управляющий сигнал запускает блок формирования импульсов (БФИ), представляющий собой сдвоенный ждущий мультивибратор и вырабатывающий пару импульсов *Запуск* и *Строб*. В некоторых конструктивных вариантах на основе программируемых микроконтроллеров БФИ отсутствует, импульсы *Запуск* и *Строб* вырабатываются самим микроконтроллером. В вариантах

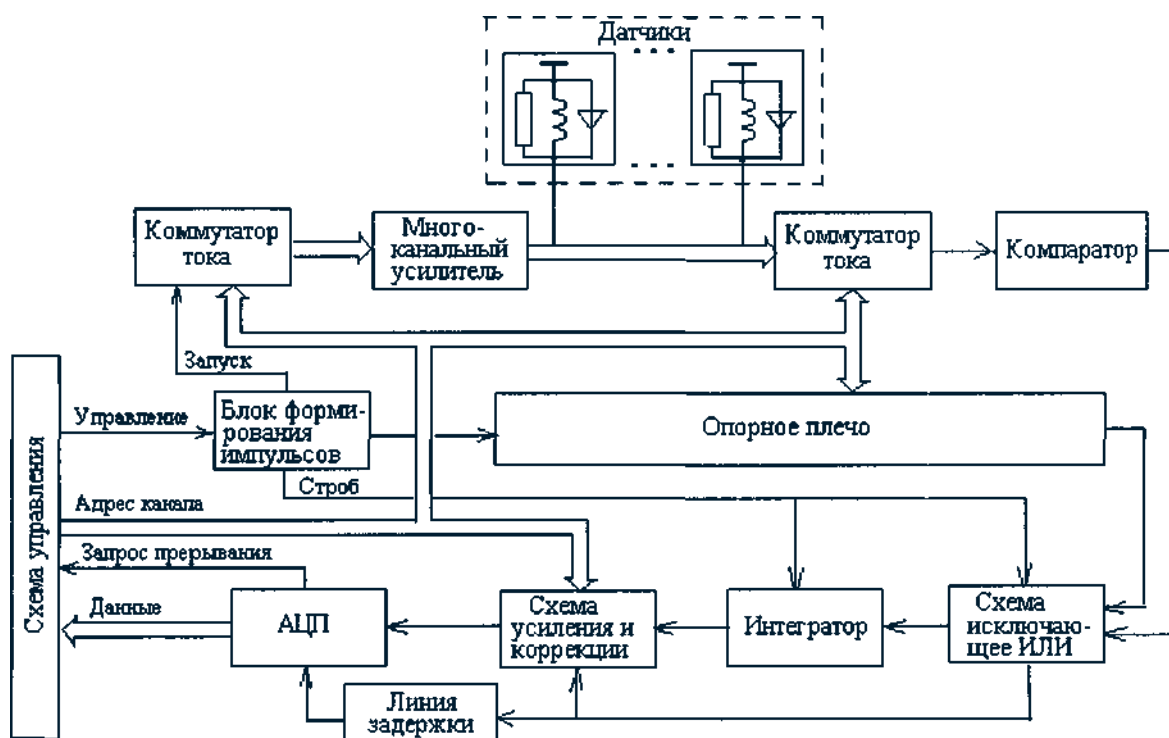


Рис. 1.9. Структурная схема измерительного устройства

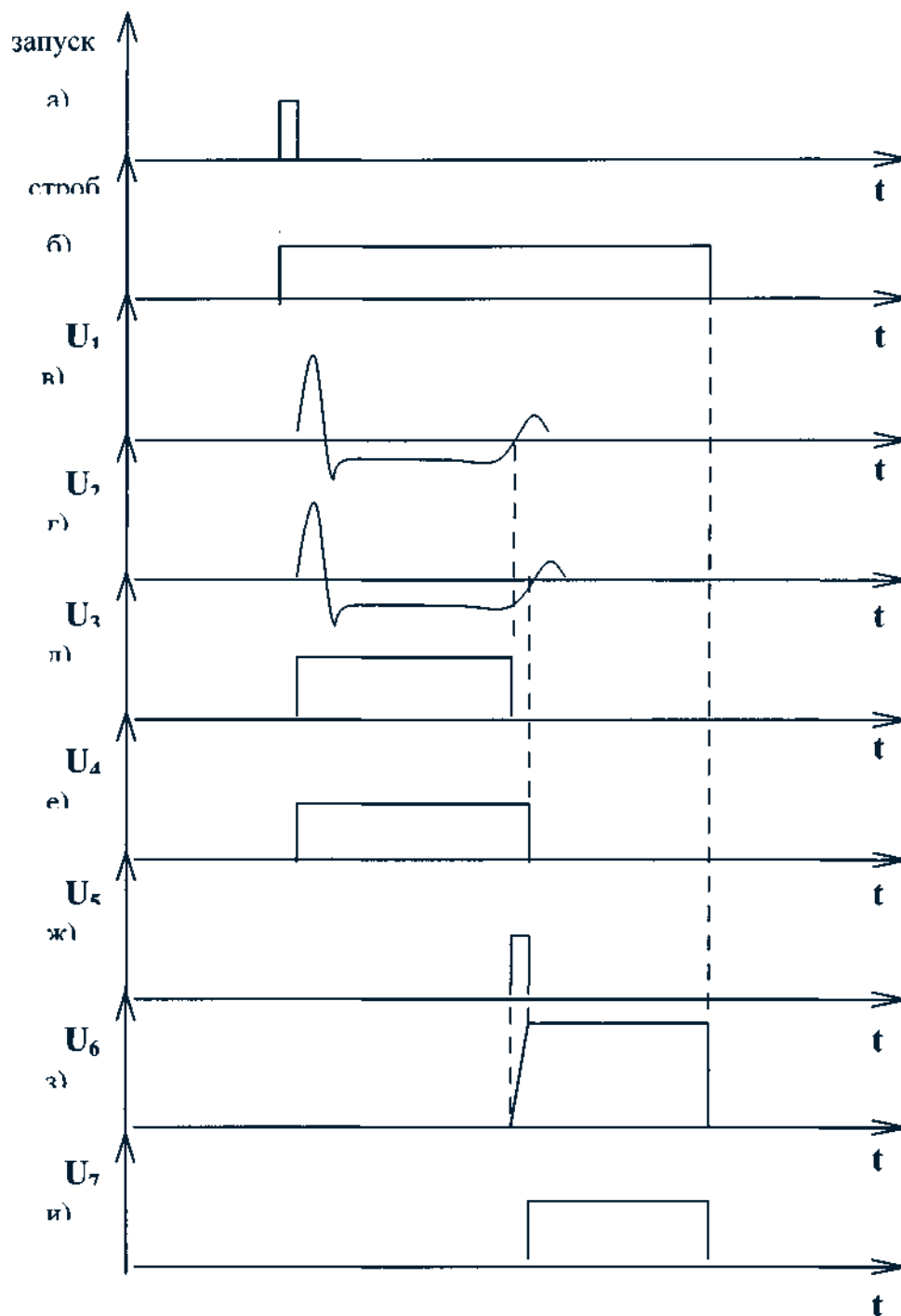


Рис. 1.10. Временные диаграммы напряжений, поясняющие работу измерительного устройства

на основе платы расширения работу БФИ инициируют либо импульсы, поступающие на плату от центрального процессора компьютера, либо от встроенного кварцевого генератора 32 кГц с программируемым делителем на 2, 4, 8 и 16. Импульс *Запуск* длительностью несколько микросекунд (рис.1.10а), пройдя через коммутатор тока и многоканальный усилитель,

возбуждает переходный процесс (рис. 1.1 Юв) в измерительном плече датчика с номером, предварительно установленным на шине адреса канала. Аналогичный процесс возбуждается также и в опорном плече датчика, которое включает в себя те же элементы, что и измерительное плечо, то есть коммутаторы тока, многоканальный усилитель, компаратор.

Импульс *Строб* (рис. 1.1 Об) определяет общую продолжительность однократного измерения. В конструктивных вариантах на основе платы расширения его длительность жестко фиксирована и определяется длительностью переходного процесса в датчиках, временем преобразования АЦП, частотой опроса датчиков, а также временем реакции центрального процессора на запросы прерывания, которые обычно составляют величину несколько десятков микросекунд. С учетом того, что длительность переходного процесса не превышает 15-20 мкс, а время преобразования у используемого нами АЦП 1113 ПВ1 равно 30 мкс, минимальная продолжительность однократного измерения и, соответственно, длительность импульса *Строб*, составляет величину порядка 50 мкс. Если БФИ управляется импульсами от кварцевого генератора, имеющего частоту 32 кГц, то максимальная частота опроса датчиков равна 16 кГц. В конструктивных вариантах на основе программируемого микроконтроллера частота опроса датчиков и длительность импульса *Строб* могут программно изменяться. Это позволяет организовать измерительный процесс без временных пауз, то есть такой алгоритм работы контроллера, когда окончание операции преобразования АЦП практически совпадает по времени с началом нового измерения.

Напряжение, снимаемое с измерительного плеча датчика, поступает на один из входов сравнения компаратора (второй вход сравнения подключен к общей шине). Компаратор преобразует длительность переходного процесса в ТТЛ-импульс (рис. 1.1 Од). Аналогичное преобразование осуществляет компаратор опорного плеча (рис. 1.1 Ое). Длительность этих импульсов (или одного из них) меняется под воздействием измеряемой физической величины, влияющей на параметры датчика. Схема «исключающее ИЛИ» выделяет разность длительностей ТТЛ-импульсов измерительного и опорного плеч, определяя тем самым

импульс рассогласования (рис.Л.Юж), длительность которого однозначно связана с измеряемой физической величиной. Кроме этого схема «исключающее ИЛИ» вырабатывает импульс сопровождения (рис.Л.Юи), управляющий работой мультиплексора в схеме усиления и коррекции, а также осуществляющий запуск АЦП.

Интегратор преобразует длительность импульса рассогласования в напряжение (рис.Л.ЛЮз), которое усиливается схемой усиления и коррекции и поступает на вход АЦП. Схема усиления и коррекции выполняет двойную роль. Во-первых, она усиливает изменения сигнала относительно некоторого уровня, что расширяет динамический диапазон измерений и дает возможность измерять малые изменения параметров датчиков (на уровне сотых долей процента). Во-вторых, она позволяет исключить влияние на работу устройства негативных факторов, таких как температурный дрейф параметров радиоэлементов платы, изменения напряжения питания и т.д.

Начало аналого-цифрового преобразования инициирует импульс сопровождения, причем преобразование начинается с некоторой временной задержкой относительно момента поступления сигнала на вход АЦП. Это необходимо, чтобы исключить погрешности, которые могут возникнуть на фронте преобразуемого импульса из-за несогласованности выхода схемы усилителя и входа АЦП. Завершение операции аналого-цифрового преобразования сопровождается формированием сигнала *Запрос прерывания*, поступающего на системную магистраль компьютера или на вход внешнего прерывания программируемого микроконтроллера.

### **Технические решения, направленные на повышение точности измерений**

Наряду с быстродействием и чувствительностью важной характеристикой является точность измерений, которую способно обеспечить измерительное устройство, использующее данную схему преобразования параметров ЭМД. На точность измерений могут влиять климатические условия (температура и влажность), электромагнитные поля в зоне нахождения датчиков, нестабильность источника питания, температурный дрейф параметров радиоэлементов платы измерительного устройства и т.д. С тем, чтобы исключить влияние всех этих факторов на

результаты измерений, было решено использовать дифференциальную схему включения датчиков. При этом следует отметить, что как измерительное, так и опорное плечо включает в себя не только параллельно соединенные катушку индуктивности и диод, но также и часть измерительной цепи, состоящую из двух коммутаторов тока, многоканального усилителя и компаратора. Технологический разброс параметров элементов, образующих измерительное и опорное плечи, может оказать существенное влияние на результаты измерений. Чтобы свести это влияние к минимуму, в устройстве использовались такие интегральные микросхемы, в которых каждый из элементов измерительного и опорного плеча был бы сформирован на одном кристалле. Это относится к двухканальному компаратору (597СА3), двухканальному коммутатору тока (590КН3), многоканальному усилителю (транзисторные сборки 1НТ251), диодному мосту (КЦ407). Следствием этого стало то, что любые изменения напряжения питания или температуры какой-либо микросхемы одинаковым образом влияют как на измерительное, так и на опорное плечи, что в конечном итоге практически не сказывается на результате измерений.

Другое техническое решение, направленное на повышение точности измерений, это включение в состав устройства схемы усиления и коррекции (СУК), в которой для стабилизации выходного напряжения используется местная отрицательная обратная связь. Принцип действия СУК поясняет рис. 1.11, на котором изображены фрагмент схемы устройства и поясняющие работу СУК временные диаграммы напряжений, причем для простоты на рисунке показаны четыре канала вместо восьми.

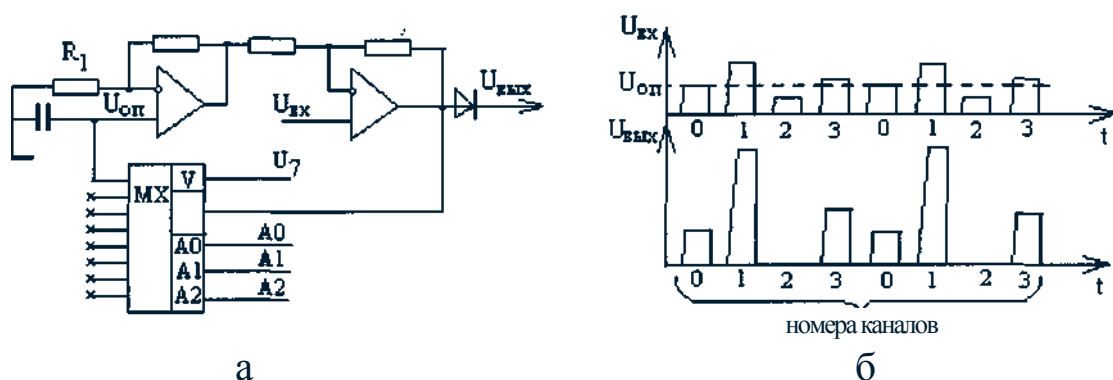


Рис. 1.11. Схема усиления и коррекции (а) и поясняющие ее работу временные диаграммы входного и выходного напряжений (б)

R-2 R-3 R\*



Стабилизация выходного напряжения организована следующим образом. Один из восьми измерительных каналов, а именно нулевой, используется в качестве опорного. К этому каналу подключен датчик-имитатор, состоящий из пары дросселей с фиксированными параметрами. Из последовательности выходных импульсов (рис. 1.11б) с помощью демультимплексора 590КН6 выделяется выходной импульс нулевого канала, причем выделение этого импульса происходит при выполнении двух условий. Во-первых, код номера канала должен быть равен нулю, во-вторых, на вход «Разрешение» должен поступить импульс логического сопровождения (сигнал  $U_7$  на рис. 1.11б). С помощью конденсатора на одном из входов дифференциального усилителя из выходных импульсов нулевого канала формируется опорное напряжение (рис. 1.11 а). На другой вход усилителя поступает сигнал с выхода интегратора (рис. 1.11 в). В результате на выходе усилителя будет формироваться сигнал, пропорциональный разности ( $U_{ВХ}-U_{он}$ ). Если по какой-то причине часть измерительной цепи, состоящая из интегратора и схемы «исключающее ИЛИ», изменит свои параметры, например, за счет температурного дрейфа параметров элементов, то это отразится на всех каналах, включая и нулевой, а следовательно, и на величине опорного напряжения. Дифференциальный усилитель «отследит» эти изменения и скорректирует соответствующим образом выходной сигнал. Если например, воздействие дестабилизирующих факторов приводит к увеличению  $U_{ВХ}$ , то примерно на такую же величину увеличивается и опорное напряжение. Выходной же сигнал, пропорциональный их разности, практически не изменится.

Второй вариант реализации схемы коррекции, используемый в микропроцессорных измерительных устройствах, организован программным способом. Опорное напряжение в этом случае фиксировано и не зависит от результатов измерений нулевого канала. Учет влияния дестабилизирующих факторов осуществляется вычитанием из всех результатов измерений данных, полученных от нулевого канала. Этот способ коррекции предпочтительнее и позволяет получить более лучший результат, но его реализация требует обязательного наличия в измерительном устройстве микроконтроллера.



Глава вторая  
**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ И  
ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**2.1. Классификация электромагнитных датчиков по  
принципу действия**

Электромагнитные датчики получили широкое распространение в различных областях науки и техники. По своим функциональным возможностям они не уступают резисторным датчикам и значительно превосходят датчики других типов, например, емкостные, пьезоэлектрические, гальваномагнитные и т.д. С их помощью можно измерять практически любую механическую величину, в том числе линейное и угловое перемещение, скорость, ускорение; давление, силу, момент силы; расход жидкости и газа; толщину электропроводящих и диэлектрических покрытий. Кроме механических величин ЭМД позволяют измерять постоянные и переменные магнитные поля, электрические токи, электропроводность жидких и твердых тел, основные характеристики ферромагнетиков. На их основе реализованы магнитный и вихретоковый дефектоскопы, предназначенные для обнаружения структурных дефектов твердотельных объектов, а также разнообразные металле детекторы.

По принципу действия датчики делятся на две группы. Первую группу составляют параметрические ЭМД, реализующие две основные разновидности функций преобразования:

$$L = w^2 \frac{\operatorname{Re} Z_m}{Z_m^2} \quad \text{и} \quad M = w_1 w_2 \frac{\operatorname{Re} Z_m}{Z_m^2},$$

где  $L$  - индуктивность обмотки одноконтурного измерительного преобразователя (датчика), имеющего  $w$  витков;  $M$  - взаимная индуктивность обмоток двухконтурного преобразователя, имеющего  $w_1$  и  $w_2$  витков соответственно;  $\operatorname{Re} Z_m$  - действительная часть магнитного сопротивления  $Z_m$ :

$$Z_m = \oint \frac{dl}{\mu S},$$

где интегрирование ведется по замкнутому контуру магнитной цепи, имеющей площадь поперечного сечения  $S$  и магнитную проницаемость  $\mu$ .

Принято выделять в этой группе индуктивные, трансформаторные, вихретоковые и магнитоупругие датчики.

Вторую группу составляют датчики генераторного типа, в основу работы которых положен закон электромагнитной индукции:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} .$$

Выходной величиной таких датчиков является ЭДС индукции, а входной - скорость изменения магнитного потока, сцепленного с  $w$  витками измерительной катушки. Изменение выходного сигнала осуществляется обычно за счет перемещения катушки в магнитном поле или постоянного магнита относительно неподвижной катушки, а также за счет изменения магнитного сопротивления измерительного преобразователя. К этой группе относятся индукционные и магнитомодуляционные датчики.

### Индуктивные датчики

Принцип действия индуктивных датчиков основан на преобразовании изменений магнитного сопротивления, вызванных воздействием измеряемой величины, в электрический сигнал. Обычно изменение магнитного сопротивления цепи датчика обусловлено изменением геометрических размеров воздушных зазоров магнитопровода. На рис. 2.1 приведены типичные конструкции индуктивных датчиков.

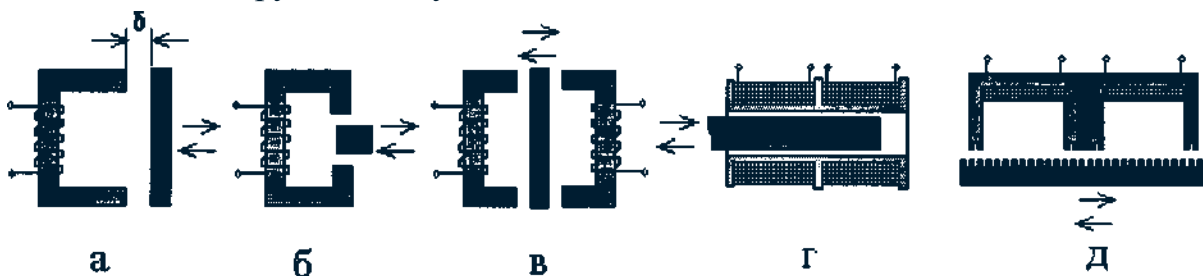


Рис. 2.1. Примеры конструкций индуктивных датчиков

Датчик, изображенный на рис. 2.1а, представляет собой дроссель с изменяющимся воздушным зазором  $\delta$ . В случае небольшого зазора индуктивность  $L$  датчика можно оценить по формуле:

$$L = \frac{\omega^2}{Z_{mM} + Z_{m0}} = \frac{\omega^2}{\frac{l_M}{\mu\mu_0 S_M} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}} , \quad (2.1)$$

где  $Z_{mM}$  и  $Z_{m0}$  – магнитные сопротивления сердечника и воздушного зазора;  $\omega$  - число витков обмотки;  $l_M$  – средняя длина магнитной силовой линии в ярме и якоре;  $S_M$  и  $S_0$  – средние площади сечений сердечника и воздушного зазора;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость материала сердечника. В случае, когда  $Z_{mM} \ll Z_{m0}$  формула (2.1) примет вид:

$$L = \frac{\omega^2 S_0 \mu_0}{2\delta}.$$

Тогда чувствительность датчика к перемещению  $\gamma$ , определяемую отношением изменения  $\Delta L$  к вызвавшему это изменение  $\Delta \delta$ , равна:

$$\gamma = \frac{\omega^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2}.$$

Таким образом, чувствительность обратно пропорциональна квадрату величины воздушного зазора. Поэтому индуктивные датчики особенно чувствительны при малых зазорах и способны регистрировать изменения зазоров около 0,1... 0,5 мкм. При увеличении зазора зависимость  $L=f(\delta)$  становится нелинейной. Поэтому для измерения перемещений величиной несколько миллиметров используют датчики с регулируемой площадью (рис.2. 16), которые имеют более линейную функцию преобразования по сравнению с предыдущей конструкцией. Повысить линейность функции преобразования и точность измерений можно, используя дифференциальную схему включения датчиков (рис.2. 1 в).

При измерении относительно больших перемещений (порядка нескольких десятков миллиметров) довольно широкое распространение получили индуктивные датчики соленоидального типа с разомкнутой магнитной цепью (рис.2.1г). В этих датчиках изменение индуктивности обмоток вызывает перемещение в катушке ферромагнитного сердечника, причем увеличение индуктивности одной из них сопровождается уменьшением индуктивности другой, что обеспечивает линейность функции преобразования в широком диапазоне перемещений.

Датчик, изображенный на рис. 2.1д, предназначен для точного измерения больших перемещений [73]. На поверхности магнитопровода и якоря выфрезерованы пазы, в результате чего воздушный зазор приобретает зубчатый характер. При перемещении якоря относительно магнитопровода выходной сигнал будет иметь периодический характер,

причем период сигнала однозначно связан с шагом зубцов. Измерив количество периодов выходного сигнала, можно получить грубую оценку перемещения в единицах шага зубцов. Для более точной оценки необходимо учесть поправку, определяемую согласно градуировке по значению величины выходного сигнала. Получаемая при этом погрешность примерно одинакова для всего измеряемого диапазона перемещений.

К достоинствам индуктивных датчиков следует отнести большую выходную мощность сигнала, достаточную во многих случаях для измерения параметров без усилительных устройств, высокую чувствительность, сравнительную простоту конструкций. Недостатком является трудность регулировки нуля, то есть компенсации выходного напряжения при отсутствии внешнего воздействия. Кроме того, для уменьшения помех они, как правило, нуждаются в тщательной экранировке, что увеличивает их габариты и массу. Невысока и точность измерений, особенно это относится к устройствам, не использующим дифференциальную схему включения, или какие-то другие схемы, компенсирующие негативное влияние внешних факторов.

### Трансформаторные датчики

Принцип действия трансформаторных датчиков основан на изменении коэффициента взаимной индукции  $M$  между возбуждающей и измерительной обмотками, вызванном изменением магнитного сопротивления  $Z_m$  магнитной цепи. Простейший вариант конструкции трансформаторного датчика представлен на рис.2.2а. Переменный ток  $i$ , протекающий по обмотке возбуждения  $w_1$  создает магнитный поток  $\Phi$ :

$$\Phi = I w_1 / Z_m,$$

пронизывающий витки измерительной катушки, что приводит к возникновению в ней ЭДС индукции, амплитудное значение  $e$  которой равно:

$$e = \omega w_2 \Phi = \omega I w_1 w_2 / Z_m = \omega I M.$$

Изменение расстояния  $\delta$  между датчиком и ферромагнитным объектом или якорем, жестко связанным с объектом, приводит к изменению магнитного сопротивления  $Z_m$  и, как следствие, к изменению амплитуды выходного напряжения. Для того, чтобы ток обмотки возбуждения не менялся при

изменении  $Z_m$ , к источнику последовательно с обмоткой возбуждения подключается большое сопротивление, то есть реализуется режим источника тока.

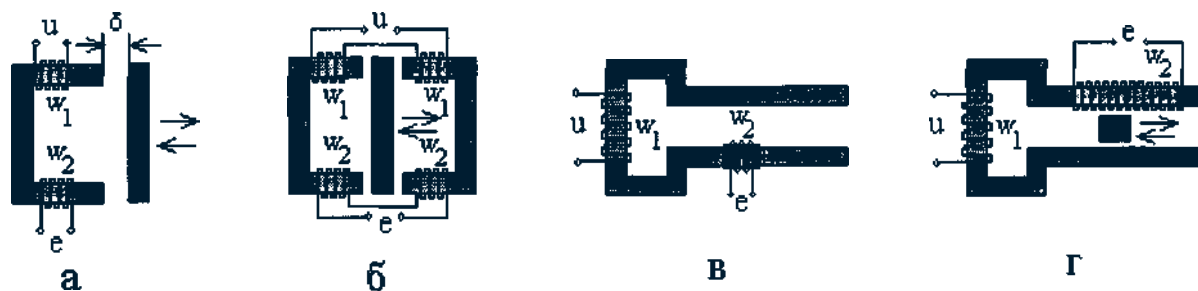


Рис. 2.2. Примеры конструкций трансформаторных датчиков

Трансформаторный датчик с одной измерительной обмоткой обладает невысокой точностью и нелинейной зависимостью  $e=I^{\wedge}$ . Поэтому, как правило, используется дифференциальная схема включения (рис.2.2б), в которой имеется одна обмотка возбуждения  $w_1$  и две измерительные обмотки  $w_2$ , включенные встречно. При нейтральном (симметричном) положении якоря относительно измерительных обмоток напряжение на выходе равно нулю. Смещение якоря относительно нейтрального положения приводит к появлению выходного напряжения, причем его фаза при переходе через нейтральное положение должна меняться на  $180^\circ$ . Реально выходное напряжение в нейтральном положении не достигает нуля по двум причинам [3]. Первая причина обусловлена влиянием высших гармоник, возникающих вследствие нелинейности кривой намагничивания магнитопровода, вторая - наличием емкостной связи между первичной и вторичной обмотками.

К трансформаторному типу относятся так называемые датчики с распределенными параметрами [53, 55, 57, 73], которые предназначены для измерений относительно больших линейных перемещений (до одного метра и выше). Конструктивно эти датчики выполнены таким образом, чтобы получить достаточно длинные участки с заданным распределением магнитных или электрических параметров. Датчик с распределенными магнитными параметрами (рис.2.2в) состоит из магнитопровода с рабочей частью в виде двух параллельных полос, обмотки возбуждения  $w_1$  и подвижной измерительной обмотки  $w_2$ . При перемещении измерительной

обмотки меняется индуцированная в ней ЭДС, причем зависимость ЭДС от перемещения практически линейна, если магнитное сопротивление рабочих участков магнитопровода значительно меньше магнитного сопротивления воздушного зазора.

Датчик с распределенными электрическими параметрами (рис.2.2г) имеет распределенную на рабочем участке магнитопровода измерительную обмотку. Подвижный магнитный сердечник, перемещающийся параллельно оси измерительной обмотки, шунтирует магнитный поток, вызывая тем самым изменение индуцированной в ней ЭДС. Зависимость между амплитудой выходного напряжения и перемещением магнитного шунта линейна в широком диапазоне перемещений.

### **Вихретоковые датчики**

Принцип действия вихретоковых датчиков основан на изменении их параметров, вызванном взаимодействием поля вихревых токов, возбужденных этим датчиком в электропроводящем объекте, с полем самого датчика. Влияние поля вихревых токов, возникающем в близкорасположенном объекте, проявляется в изменении активного и реактивного сопротивлений датчика: активное сопротивление увеличивается за счет роста потерь в электропроводящем объекте, а реактивное сопротивление уменьшается из-за ослабления магнитного потока, пронизывающего витки датчика. Величина изменений активного и реактивного сопротивлений, кроме расстояний между датчиком и объектом, зависит от многих факторов, главным образом, от частоты питающего датчик напряжения, электропроводности объекта и его толщины, пока последняя не превысит существенно глубину проникновения электромагнитного поля в материал объекта [57] Глубина проникновения, в свою очередь, зависит от частоты  $\omega$  электромагнитного поля и свойств материала. Ее можно оценить по формуле:

$$z_{0,05} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}},$$

где  $Z_{0>05}$  - глубина, на которой интенсивность волны составляет 5% от интенсивности волны на границе раздела;  $\mu$  и  $\sigma$  - относительная магнитная проницаемость и удельная электропроводность материала.

На рис.2.3 представлены примеры некоторых типичных конструкций вихретоковых датчиков, а именно накладная (рис.2.3а), экранная (рис.2.3б) и щелевая (рис.2.3в) [57]. В основном вихретоковые датчики используются для определения толщины электропроводящих покрытий или толщины диэлектрических слоев на металлической основе, для обнаружения поверхностных и приповерхностных дефектов (микротрещин, включений второй фазы) и оценки их пространственного положения и размеров, для бесконтактного измерения удельного сопротивления электролитических жидкостей.

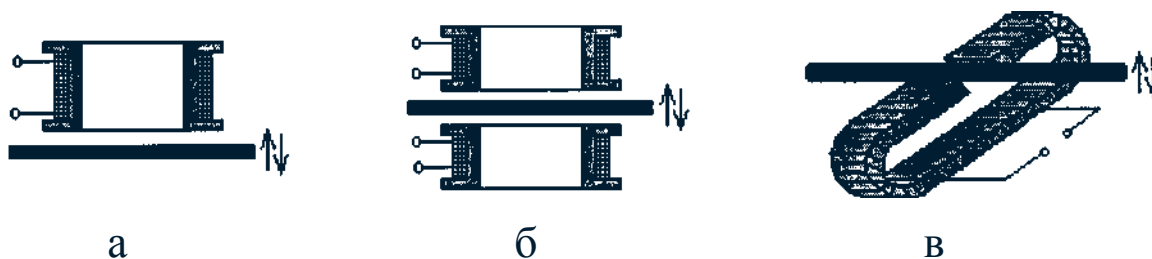


Рис. 2.3. Примеры конструкций вихретоковых датчиков

В целом чувствительность вихретокового датчика к перемещению объектов примерно в 5...20 раз ниже, чем у такого же по габаритам индуктивного датчика, изображенного на рис.2.1г [57]. Кроме того, вихретоковые датчики имеют большие погрешности, обусловленные в основном температурным изменением электропроводности объектов контроля.

### Магнитоупругие датчики

Принцип действия магнитоупругих датчиков основан на магнитоупругом эффекте, проявляющемся в изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под воздействием механических напряжений. Относительная чувствительность магнитоупругого материала характеризуется отношением относительного изменения магнитной проницаемости  $\Delta\mu/\mu$  к соответствующему механическому напряжению  $\sigma$ :

$$\nu_{\mu} = \frac{\Delta\mu}{\mu\sigma}$$



Для различных магнитоупругих материалов воздействие механического напряжения 1 МПа вызывает относительные изменения магнитной проницаемости на уровне 0,5...3 %. Этого вполне достаточно, чтобы использовать магнитоупругие датчики для измерения сил, давлений и крутящих моментов. При этом отличительной особенностью таких датчиков является их высокая надежность, поскольку они не имеют подвижных частей, перемещающихся под воздействием измеряемой величины.

При довольно большом разнообразии конструктивных форм, вызванных различными условиями практического применения, магнитоупругие датчики по принципу действия можно разбить на две группы: датчики дроссельного типа (рис.2.4а) и датчики трансформаторного типа (рис.2.4б, в, г). В датчиках дроссельного типа воздействие механического напряжения приводит к изменению магнитной проницаемости материала магнитопровода и, как следствие, к изменению индуктивности датчика и его магнитного сопротивления. Датчики этого типа достаточно просты в конструктивном отношении, они обладают удовлетворительной линейностью функции преобразования в рабочем диапазоне, погрешность измерений составляет для разных конструкций величину порядка 2...5 %.

В магнитоупругих датчиках трансформаторного типа в качестве величины, являющейся функцией приложенной силы, используется взаимная индуктивность. Поэтому датчики этого типа являются по существу измерительными трансформаторами с переменным коэффициентом трансформации. Амплитудное значение ЭДС во вторичной обмотке зависит от величины приложенного к магнитопроводу механического напряжения (рис.2.4б).

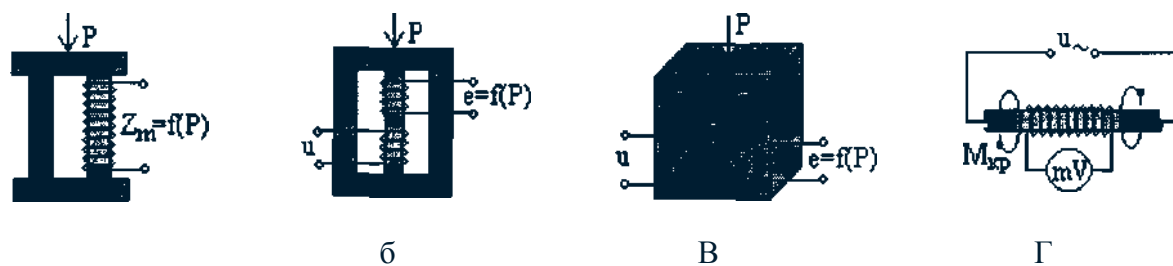


Рис. 2.4. Примеры конструкций магнитоупругих датчиков



Более сложная конструкция магнитоупругого датчика трансформаторного типа представлена на рис.2.4в. В средней части магнитопровода, набранного из пластин электротехнической стали, имеется четыре отверстия для размещения первичной и вторичной обмоток. Поскольку плоскости витков обеих обмоток взаимно перпендикулярны, а материал магнитопровода в отсутствие внешнего воздействия является изотропным, то ЭДС во вторичной обмотке равна нулю. В нагруженном состоянии вследствие появления анизотропии магнитных свойств материала магнитное поле обмотки возбуждения деформируется и появляется составляющая магнитного потока, сцепляющаяся с витками измерительной обмотки. В результате в ней наводится ЭДС, пропорциональная приложенному механическому напряжению.

Датчик, представленный на рис.2.4г, предназначен для измерения крутящего момента  $M_{кр}$  [57]. Его принцип действия основан на том, что при воздействии крутящего момента на ферромагнитный стержень, вдоль которого протекает переменный ток, кроме кругового магнитного потока, возникает продольный магнитный поток, наводящий в намотанной на стержень обмотке ЭДС, пропорциональную крутящему моменту.

К недостаткам магнитоупругих датчиков следует отнести негативное влияние магнитного гистерезиса, что при статической нагрузке дает дополнительную погрешность около 4%, а при динамической нагрузке - около 1% [112]. Относительно велика дополнительная погрешность, обусловленная изменением температуры - примерно 1,5...2% на каждые 10°. Для многих магнитоупругих материалов проявляется эффект старения, приводящий к временному изменению его магнитной проницаемости, что в итоге также увеличивает погрешность измерений.

### Индукционные датчики

Принцип действия индукционных датчиков основан на явлении электромагнитной индукции. Согласно закону Фарадея ЭДС индукции в катушке индуктивности определяется выражением:

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}$$

где  $\Phi$  - магнитный поток, пронизывающий витки катушки;  $w$  - число витков катушки.

В отличие от рассмотренных ранее параметрических датчиков индукционные датчики относятся к генераторному типу датчиков, так как под воздействием входной величины они способны генерировать электрическую энергию. Всех их можно разделить на две подгруппы [73]. Первую составляют датчики, в которых изменение магнитного потока, пронизывающего витки катушки, осуществляется либо перемещением последней в постоянном поле магнита (рис.2.5а,б), либо перемещением магнита относительно неподвижной катушки (рис.2.5в). В датчиках второй группы постоянный магнит и катушка неподвижны, а ЭДС индуцируется посредством изменения магнитного потока из-за колебаний магнитного сопротивления цепи, создаваемых чаще всего изменением воздушного зазора в этой цепи (рис.2.5г).

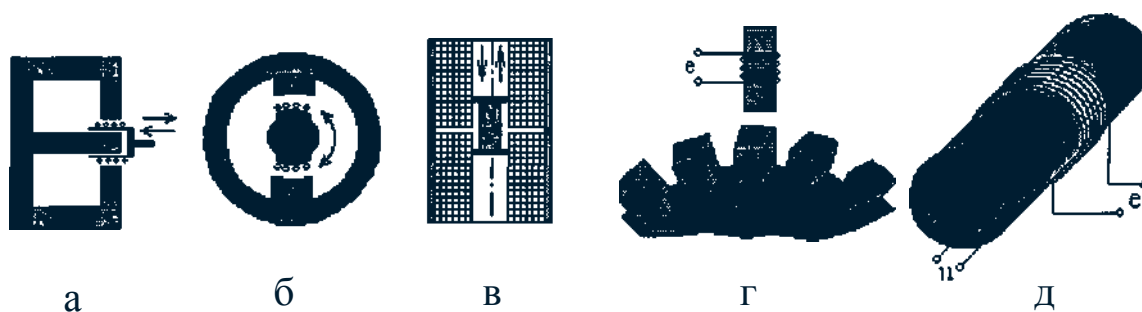


Рис. 2.5. Примеры конструкций индукционных датчиков

Индукционные датчики используются главным образом для измерения линейных перемещений и скоростей, в частности, параметров вибраций, а также угловых перемещений и частоты вращения, постоянных и переменных магнитных полей, расхода электропроводящих жидкостей и других величин [1, 57, 112]. Измерение параметров вибраций часто осуществляют с помощью датчика, изображенного на рис. 2.5а.. Поскольку выходной сигнал датчика пропорционален скорости перемещения катушки относительно полюсов магнита, то для нахождения виброперемещений или виброускорений используют дифференцирующий или интегрирующий усилитель. Обычно с помощью индукционного датчика можно измерять вибрации, максимальная частота которых не превышает 500 Гц [112].

Измерение частоты вращения осуществляют тахогенераторами, изображенными на рис.2.5б и рис.2.5г. В первом случае значение ЭДС  $e$  на выходе тахогенератора, содержащего  $w$  витков площадью сечения  $S$ , будет равно  $e = a > BwS \sin \omega t$ , где  $B$  - индукция поля между полюсами магнита. Во втором случае частота переменного сигнала в обмотках тахогенератора будет пропорциональна произведению измеряемой частоты вращения и количеству зубцов на валу.

Для измерения индукции переменного магнитного поля используют датчики с неподвижными обмотками, в которых наводится ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока. Измерение индукции постоянного магнитного поля часто осуществляют с помощью датчиков с принудительным изменением магнитного потока. Это можно осуществить выключением источника поля, удалением датчика из магнитного поля или поворотом датчика на  $90^\circ$ . Все это приводит к возникновению на выходе датчика импульса тока, который можно измерить, например, с помощью интегратора.

Измерение параметров постоянного магнитного поля осуществляют также с помощью датчиков с вращающимися или вибрирующими чувствительными элементами, создающими переменный поток, пронизывающий витки измерительной катушки. К недостаткам таких устройств следует отнести высокий уровень шума коллектора и наводками электродвигателя в цепи питания. Свободным от этих недостатков является датчик магнитного поля, изображенный на рис.2.5д [57]. Основу его составляет тонкостенный цилиндрический вибратор из сегнетокерамики  $PbZrCb$  с металлизированными внутренней и внешней поверхностями. Внутренний электрод имеет продольный разрез, а внешний представляет собой короткозамкнутый виток, на котором находится вторичная многовитковая обмотка. Датчик помещается в измеряемое магнитное поле, направленное параллельно оси цилиндра. Переменное напряжение вследствие явления электрострикции возбуждает радиальные вибрации датчика, сопровождающиеся периодическим изменением его диаметра. Это приводит к изменению магнитного потока, пронизывающего витки измерительной катушки, в результате чего в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная индукции магнитного поля.

## Магнитомодуляционные датчики

Магнитомодуляционные датчики работают на принципе модуляции магнитной проницаемости сердечника датчика [57, 122]. Модуляция осуществляется периодическим перемагничиванием ферромагнитного сердечника до насыщения магнитным полем, представляющим собой векторную сумму намагничивающего поля  $H_{\sim}$ , изменяющемуся по гармоническому закону с частотой  $\omega$ , и измеряемого поля  $H_{\text{внеш}}$ . Обычно Магнитомодуляционные датчики используют для измерений слабых магнитных полей и вклад второй составляющей поля  $H_{\text{внеш}}$  в процесс намагничивания сердечника значительно меньше первой составляющей  $H_{\sim}$ . На рис.2.6а показаны временные зависимости намагничивающего поля  $I-L$  и вызываемые этим полем изменения магнитной проницаемости  $\mu$  в интервалы времени, когда выполняется условие  $H_{\sim} > H_{\text{нас}}$ , сердечник намагничен до насыщения, магнитная проницаемость его практически постоянна и примерно равна единице. Если же выполняется условие  $H_{\sim} < H_{\text{нас}}$ , то магнитная проницаемость изменяется в диапазоне от единицы до максимального значения. Зависимость  $\mu(f)$ , приведенная на рис.2.6а, носит периодический характер с частотой повторения в 2 раза превышающей частоту намагничивающего поля. Это приводит к тому, что в измерительной обмотке, намотанной на сердечник, будет наводиться ЭДС индукции  $e_i$ , изображенная на рис.2.6а.

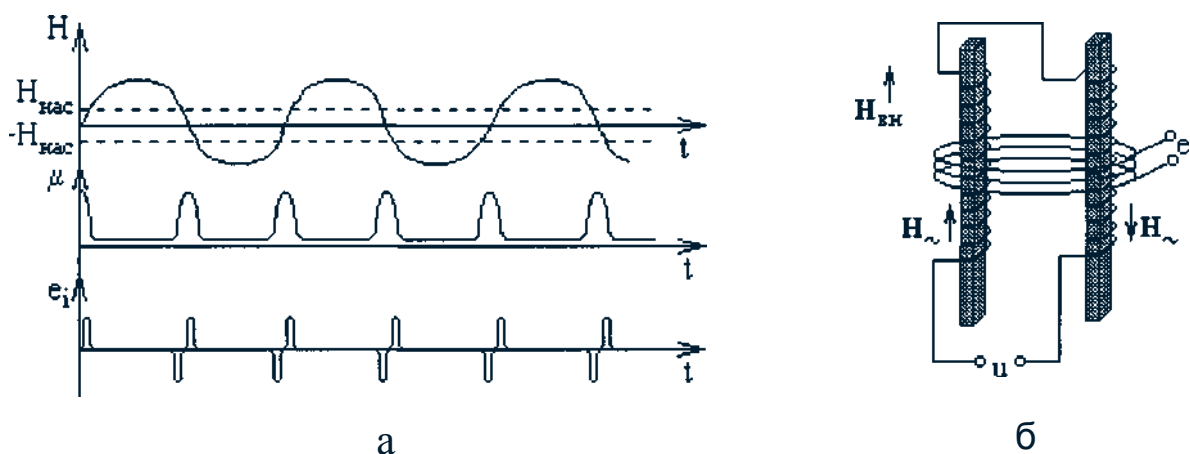


Рис. 2.6. Временные диаграммы, поясняющие работу магнитомодуляционных датчиков (а), и пример конструкции дифференциального феррозондового преобразователя (б)

В дифференциальном датчике (рис.2.66) намагничиваются два сердечника, причем намагничивающие поля  $H\sim$  в них сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ , поскольку обмотки возбуждения включены последовательно, но встречно. В измерительной обмотке, охватывающей оба сердечника, в отсутствие внешнего магнитного поля ЭДС индукции равна нулю. Если датчик помещен во внешнее поле  $H_{\text{внеш}}$ , то намагничивание каждого из сердечников происходит по разному и в результате в измерительной обмотке возникает ЭДС индукции, пропорциональная внешнему магнитному полю.

В качестве информативного параметра обычно используют вторую гармонику выходной ЭДС. Для выделения сигнала второй гармоники используют селективные усилители. С целью расширения диапазона измерений и улучшения метрологических характеристик в измерительных устройствах используют цепь обратной связи, сигнал с которой подается на обмотку датчика, создавая тем самым дополнительное поле, компенсирующее измеряемое [57]. Это позволяет достичь нижнего предела измерений на уровне  $0,05...0,1$  нТл. Верхний предел измерений ограничен нарушением линейности функции преобразования и как правило не превышает  $500$  мкТл. Возможности измерений переменных магнитных полей также не велики и ограничены диапазоном  $0... 100$  Гц.

## **2.2. Анализ требований, предъявляемых к датчикам и измерительным устройствам, предназначенным для решения задач функциональной диагностики**

Среди методов функциональной диагностики наибольшее распространение получили методы, основанные на измерении параметров вибраций, фазных токов и напряжений электромеханических объектов, а также тепловых полей и акустических шумов, излучаемых отдельными частями контролируемого объекта [НО]. Очень перспективным может считаться метод, использующий в качестве диагностических параметров электромагнитные поля рассеяния, излучаемые такими объектами, как электродвигатели, генераторы, трансформаторы, катушки зажигания автомобильных двигателей [92]. Оценка состояния объекта контроля на предмет обнаружения в нем скрытых дефектов предполагает математическую обработку полученной информации, включающую в себя

вычисление спектров, корреляционных функций, кепстров и так далее, с последующим сравнением полученных характеристик с аналогичными характеристиками от объекта, условно принятого за эталон. В качестве эталонных обычно используют характеристики, полученные от объекта на ранней стадии его эксплуатации. Специфика задач диагностики выдвигает к датчикам и измерительным устройствам, в состав которых они входят, ряд требований, среди которых можно выделить следующие.

\* Измерения параметров вибраций (виброперемещений, виброскоростей и виброускорений) обычно производятся в условиях одностороннего доступа к объекту. Поэтому многие из конструктивных вариантов дифференциальных индуктивных датчиков с изменяющимся магнитным сопротивлением, в которых объект располагается между измерительной и опорной катушками индуктивности, не могут быть использованы.

\* Измерение вибраций объектов роторного типа предпочтительнее измерять бесконтактным способом. Это не только упрощает процедуру измерений, но и повышает достоверность получаемой информации, так как при контактном методе датчик обычно крепится не к источнику вибрации-ротору двигателя или генератора, а к корпусу. Как следствие, это может привести к тому, что на результаты измерений будут влиять частотные характеристики передаточных путей, по которым распространяются вибрации, а также качество контакта датчика к объекту.

\* Диапазон измеряемых виброперемещений достаточно велик - от единиц микрометра до нескольких миллиметров, а материал объекта может быть как ферромагнитным, так и неферромагнитным. Поэтому чувствительные элементы индуктивных датчиков в большинстве случаев необходимо строить на основе разомкнутых магнитных цепей, что позволяет измерять более широкий диапазон перемещений, но с потерей линейности функции преобразования. Последнее обстоятельство не является принципиально важным, поскольку управление процессом измерений и обработку исходной информации осуществляет микропроцессор, что дает возможность линеаризовать функцию преобразования. Что касается измерения вибраций объектов из



неферромагнитного материала, то в этом случае целесообразно использовать датчики вихретокового типа.

Ф Учитывая сложную пространственную конфигурацию электромагнитных полей рассеяния, для измерения их характеристик должны использоваться датчики, обладающие высокой чувствительностью, быстродействием, имеющие малые геометрические размеры и способные тем самым обеспечить высокую локальность измерений. Это ограничивает использование полупроводниковых преобразователей и датчиков Холла, обладающих невысокой чувствительностью к магнитному полю [122]. Феррозондовые преобразователи, обладая высокой чувствительностью, имеют невысокое быстродействие [57]. У индукционных преобразователей высокая чувствительность достигается за счет увеличения площади и количества витков чувствительного элемента, что не позволяет обеспечить высокую локальность измерений. Свободным от перечисленных выше недостатков является датчик магнито-индуктивного типа [83], описанный ниже.

ФКак правило, функциональная диагностика осуществляется в реальных производственных условиях, а значит имеет важное значение восприимчивость датчиков к электромагнитным помехам. Поэтому все разработанные конструкции датчиков имеют низкий импеданс, что, с одной стороны, снижает влияние электрических наводок, с другой стороны, позволяет отказаться от металлических экранов и снизить тем самым массу и габариты датчиков. При этом следует отметить, что средства функциональной диагностики часто являются встроенными средствами контроля [НО], а это предполагает стационарное крепление датчиков вблизи объекта. Поэтому важное значение имеет стоимость датчиков, их простота конструкции и надежность, а также нечувствительность к воздействию внешних дестабилизирующих факторов, таких как температура, влажность, пыль, грязь.

4 Спектральный диапазон вибраций, акустического шума и электромагнитных полей рассеяния, который используется для анализа и оценки состояния объекта, может превышать 10 кГц. Большинство датчиков электромагнитного типа обладает максимальным быстродействием на уровне 1 кГц [129]. Рассмотренный в главе 1 способ

преобразования, основанный на возбуждении в датчиках переходных процессов и измерении их длительностей, позволяет снизить время однократного измерения до величины 50 мкс [94]. Это дает возможность измерять спектральный диапазон диагностических параметров до 10 кГц.

+Для точной идентификации дефекта часто бывает необходимы комплексные измерения одновременно нескольких физических величин. Так например, изменения в спектре фазного тока у электродвигателя могут быть вызваны как дефектами подшипникового узла, так и межвитковыми замыканиями или нелинейными искажениями сетевого напряжения. Измеряя одновременно фазные токи, фазные напряжения и вибрации можно более надежно оценить состояние объекта контроля и идентифицировать дефект. Все это можно осуществить, реализовав многоканальный режим работы, при котором поочередно с высокой частотой опрашиваются несколько датчиков, отличающихся друг от друга принципом действия и функциональным назначением.

\* Функциональная диагностика требует серьезной математической обработки исходной информации, включающей в себя вычисление спектров, корреляционных функций, кепстров, а также осуществление цифровой фильтрации и статистических оценок. Все это делает необходимым автоматизировать процесс сбора информации и передачи ее в компьютер для последующей обработки. В то же время использование компьютера непосредственно вблизи объекта контроля в ряде случаев бывает по каким-либо причинам невозможно. Поэтому важное значение приобретает длина проводов, соединяющих датчики с измерительным устройством. Низкий импеданс используемых датчиков позволяет использовать соединительные кабели относительно большой длины (свыше 100 метров). Альтернативным вариантом может служить разделение всей процедуры функциональной диагностики на два этапа. Первый этап - измерение диагностических параметров с помощью микропроцессорных устройств и запись результатов измерений в энергонезависимую память для длительного хранения. Второй этап - передача данных по мере необходимости в компьютер для их последующей обработки и анализа.



## 2.3. Конструктивные особенности датчиков, основанных на преобразовании параметров в длительность переходных процессов

### Индуктивные датчики

Датчики этого типа предназначены для измерения линейных перемещений, а также других физических величин, функционально с ними связанными. К последним относятся линейная скорость, ускорение, частота вращения, сила, давление, момент силы и другие. Основные конструктивные варианты датчиков представлены на рис.2.7. Датчик, изображенный на рис 2.7а, изготовлен на основе пары дросселей ДПМ 0,1/50 мкГн, включенных в измерительное и опорное плечи первичного преобразователя. Параметры дросселей изменяются при приближении к ним металлических объектов, причем при приближении ферромагнитных объектов индуктивность дросселей возрастает, а при приближении неферромагнитных объектов - уменьшается. Магнитная цепь, в которую включен чувствительный элемент, является не замкнутой, что дает возможность измерять перемещения в относительно широком диапазоне. Зависимость выходного сигнала от расстояния между объектом и датчиком, рассчитанная на основе сплайн - интерполяции, представлена на рис.2.12.

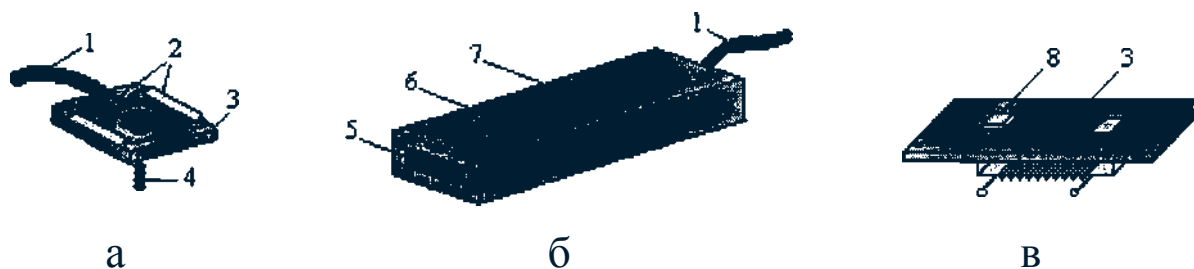


Рис. 2.7. Конструктивные варианты индуктивных датчиков:  
1-провод, 2-дроссели, 3-плата, 4-крепежный винт, 5-окно, 6-кнопка запуска,  
7-корпус датчика, 8-магнитопровод с катушкой индуктивности.

Датчик, представленный на рис.2.7б, изготовлен также на основе дросселей ДПМ 0,1/50 мкГн, но с целью расширения измеряемого диапазона перемещений чувствительные элементы изготовлены из двух пар дросселей, соединенных параллельно. Для удобства датчики выполнены в пластмассовом корпусе, который при проведении измерений располагается в руке оператора. Обычно такие датчики используются для

оперативного измерения параметров вибраций, а также для измерения частоты вращения и величины радиальных биений объектов роторного типа [93]. Старт измерениям дает нажатие кнопки запуска. Окно в корпусе датчика изготовлено для того, чтобы максимально приблизить чувствительный элемент к объекту измерения.

В отличие от рассмотренных выше датчиков, в изображенном на рис.2.7в датчике магнитная цепь чувствительного элемента является замкнутой. Датчик предназначен для измерения малых перемещений ферромагнитных объектов. Его принцип действия основан на изменении магнитного сопротивления цепи чувствительного элемента, вызванного перемещением объекта или ферромагнитной пластины, жестко связанной с объектом, относительно магнитопровода с намотанными на него катушками индуктивности. Одно из применений датчика - измерение веса в автоматизированном измерителе влажности [88].

### **Магнито-индуктивные датчики**

Магнито-индуктивные датчики предназначены для измерений постоянных и переменных магнитных полей, а также для измерений электрических токов, осуществляемых бесконтактным способом. Их принцип действия основан на зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от внешнего магнитного поля, вид которой представлен на рис.2.8а. Чувствительный элемент датчика, представляет собой пару катушек индуктивности с сердечниками из материала, обладающего прямоугольной петлей гистерезиса. Одна катушка включена в измерительное плечо первичного преобразователя, другая - в опорное плечо. С помощью подмагничивающего поля, созданного магнитом, рабочая точка выводится на крутой участок зависимости  $j\mu(H)$ , причем направления подмагничивающего поля в сердечниках измерительного и опорного плеч взаимно противоположные. Воздействие внешнего измеряемого поля  $H_m$  изменяет магнитную проницаемость материала сердечников, что вызывает соответствующие изменения индуктивности катушек. Поскольку в одном из плеч датчика внешнее поле складывается с подмагничивающим полем, а в другом вычитается, то изменения индуктивности катушек измерительного и опорного плеч имеют разные

знаки. Измерительная цепь преобразует эти небольшие по величине изменения индуктивности в соответствующие изменения длительностей переходных процессов, возбуждаемых в датчике, которые далее преобразуются в выходное напряжение, пропорциональное внешнему полю.



Рис. 2.8. Конструктивные варианты магнито-индуктивных датчиков: 1-магнитопровод с катушкой индуктивности, 2-постоянный магнит, 3-плата, 4-проводник с током

По принципу действия наиболее близким аналогом магнито-индуктивных датчиков являются магнитомодуляционные датчики, в которых на магнитопровод воздействуют совместно переменное подмагничивающее поле и постоянное или слабо переменное внешнее измеряемое поле. Но в отличие от магнитомодуляционных датчиков материал магнитопровода не намагничивается до насыщения и, кроме того, выходным сигналом является не средневывпрямленное значение второй гармоники [122], а изменения выходного напряжения, обусловленные модуляцией магнитной проницаемости внешним магнитным полем. При этом рабочая точка и диапазон измеряемых магнитных полей выбираются таким образом, что все изменения магнитной проницаемости происходят на линейном участке зависимости  $fj(H)$ . Экспериментально это подтверждается тем, что при смене направления внешнего магнитного поля на противоположное выходной сигнал измерительного устройства изменяется приблизительно одинаково относительно нулевой отметки.

Чувствительность датчиков к магнитному полю примерно равна  $5 \cdot 10^4 \text{ В/Тл}$ . Диапазон измеряемых полей составляет величину от десятых долей микротесла до нескольких сотен микротесла, что вполне достаточно для измерений полей рассеяния электрических машин, включая и маломощные электродвигатели и трансформаторы. Кроме этого, датчики нашли применение в устройствах управления курсором на экране

монитора [87], являющихся по существу электронными компасами. Более подробно принцип действия и конструктивные особенности манипуляторов описаны в главе 6.

На рис.2.8б показан фрагмент датчика, а именно катушка индуктивности 1 с сердечником, на который воздействует поле постоянного магнита 2. Катушка индуктивности вместе с сердечником изготовлены на основе магнитной головки дисковогода, которая осуществляет считывание информации с дискет. Постоянный магнит и сердечник образуют одну из половин магнитной цепи, вторую половину образуют аналогичные элементы опорного плеча.

Датчик, представленный на рис.2.8в, реализован на основе магнитопровода из трансформаторной стали, имеющего U-образную форму. Цепь включает в себя постоянный магнит, с помощью которого осуществляется подмагничивание магнитопровода. Подмагничивающее поле  $H$  направлено таким образом, что внешнее измеряемое поле  $H_m$  в одном из плеч датчика параллельно полю  $H$ , а в другом плече -антипараллельно. Воздействие внешнего поля на датчик приводит к изменению индуктивности катушек измерительного и опорного плеч, причем как и у датчика, описанного выше, эти изменения имеют противоположные знаки, а по абсолютной величине пропорциональны измеряемому магнитному полю  $H_m$ .

Датчик, изображенный на рис.2.8д, предназначен для измерения постоянных и переменных электрических токов. Он выполнен в виде кольца из трансформаторной стали, на которое намотаны две катушки, включаемые в измерительное и опорное плечи первичного преобразователя. Каждая из половинок кольца подмагничена постоянным полем  $H$ , направленным как показано на рис.2.8д. Электрический ток, протекающий по расположенному внутри кольца проводнику, создает вокруг себя магнитное поле, изменяющее магнитную проницаемость трансформаторной стали. Эти изменения, имеющие противоположные знаки, вызывают соответствующие изменения индуктивности катушек датчика, которые преобразуются измерительной цепью в выходное напряжение, пропорциональное магнитному полю  $H_m$ , следовательно, и измеряемому электрическому току.

## Вихретоковые датчики

Конструктивную основу вихретокового датчика, изображенного на рис.2.9а, составляет диэлектрический каркас 1 цилиндрической формы с намотанными на него катушками индуктивности 2, включаемые в измерительное и опорное плечи первичного преобразователя. Датчик используется для измерения перемещений электропроводящих объектов в случаях, когда применение индуктивных датчиков перемещений с разомкнутой магнитной цепью по каким-либо причинам затруднено. Если, например, объект обладает ферромагнитными и электропроводящими свойствами и влияние их на параметры датчика проявляется примерно в равной степени, то в результате взаимной компенсации этих воздействий чувствительность индуктивного датчика к перемещениям такого объекта будет очень низкой. В таких случаях реальной альтернативой индуктивным датчикам перемещений могут служить вихретоковые датчики. Кроме того, в некоторых случаях требуется измерять перемещения металлических объектов в широком диапазоне. С помощью индуктивных датчиков, изображенных на рис.2.7, такие задачи решить не удастся. В то же время у вихретоковых датчиков за счет увеличения диаметра катушки можно легко расширить измеряемый диапазон перемещений.

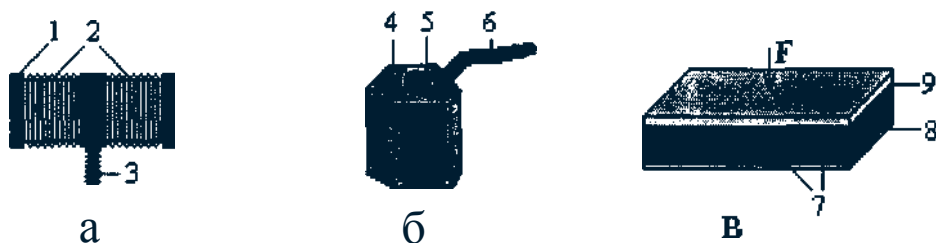


Рис. 2.9. Конструктивные варианты вихретоковых датчиков: 1-каркас датчика, 2-катушки индуктивности, 3-крепежный винт, 4-корпус датчика, 5-кнопка запуска, 6-провод, 7-витки плоской катушки индуктивности, 8-упругая прокладка, 9-металлическая пленка на диэлектрической пластине

Датчик, изображенный на рис.2.9б, предназначен для измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической поверхности или толщины металлических фольг. Конструктивную основу его составляют пара катушек индуктивности на диэлектрическом каркасе, которые для

удобства работы размещены в корпусе 4. Зависимость величины выходного сигнала от толщины медной фольги, рассчитанная с помощью сплайн-интерполяции, представлена на рис.2.12.

Конструктивную основу датчика, изображенного на рис.2.9в, составляет плоская катушка индуктивности 7, включаемая в измерительное плечо первичного преобразователя. В опорное плечо включен дроссель, имеющий ту же индуктивность, что и катушка. Выше катушки находится прокладка 8 из упругого материала (использовались различные сорта резины), а над ней пластина 9 из фольгированного текстолита. Под действием силы  $F$  пластина перемещается относительно плоской катушки, что вызывает изменения ее индуктивности. Датчик предназначен в основном для измерений силы или импульса силы в задачах, где требуется определить не только усредненное значение силы, но и ее распределение в различные моменты времени.

### **Индукционно-индуктивные датчики**

Принцип действия индукционно - индуктивных датчиков состоит в следующем. На магнитопровод, образующий замкнутую (рис.2.10а) или разомкнутую (рис.2.10б) магнитную цепь, намотаны две катушки индуктивности, включаемые в измерительное и опорное плечи первичного преобразователя. В катушках под воздействием кратковременного импульса тока возбуждаются переходные процессы, подробно описанные в главе 1. Напряжение, снимаемое с катушки индуктивности измерительного плеча (рис.1 ЛОв), поступает на один из входов сравнения компаратора, в то время как другой вход подключен к общей шине. Это дает возможность преобразовать длительность переходного процесса, зависящую от параметров катушки индуктивности, в длительность ТТЛ-импульса (рис. 1.1 Од), формируемого на выходе компаратора. Аналогичное преобразование осуществляется и для опорного плеча, далее из двух ТТЛ-импульсов схема «исключающее ИЛИ» выделяется импульс рассогласования (рис. 1.1 Ож), длительность которого затем преобразуется в выходное напряжение (рис.1. Юз) измерительного устройства.

В отсутствие внешнего воздействия, которым является электромагнитное поле, создаваемое протекающим по проводнику

переменным током, выходное напряжение будет иметь некоторое постоянное значение. При протекании по проводнику переменного тока созданный им переменный магнитный поток пронизывает витки измерительной и опорной катушек, что вызывает в них образование ЭДС индукции, которая складывается с напряжением, возбуждаемом в катушках импульсами тока. При этом витки обеих катушек намотаны таким образом, чтобы возникающие в них ЭДС индукции находились в противофазе. В таком случае сложение ЭДС индукции с напряжением переходного процесса в одном из плеч увеличивает длительность ТТЛ-импульса с выхода компаратора, в другом плече - уменьшает. Это, в свою очередь, приводит к изменениям выходного напряжения измерительного устройства, пропорциональным возникающей в катушках ЭДС индукции.

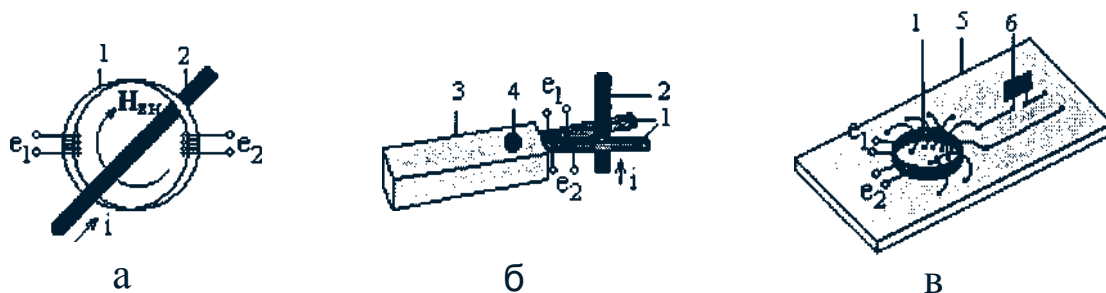


Рис. 2.10. Конструктивные варианты индукционно-индуктивных датчиков:  
 1-магнитопровод с катушками индуктивности, 2-проводник с током, 3-корпус датчика, 4-кнопка запуска измерений, 5-плата, 6-конденсатор

Таким образом, в отличие от обычных индукционных датчиков, в которых возникающая в них ЭДС индукции используется как выходная величина, в индукционно - индуктивных датчиках ЭДС индукции выполняет роль модулирующего фактора, влияющего на операцию преобразования длительности переходного процесса в длительность ТТЛ-импульса на выходе компаратора. При этом сохраняются все достоинства способа преобразования параметров ЭМД, основанного на возбуждении переходных процессов в датчиках и измерении их длительности. В первую очередь это касается высокого быстродействия и чувствительности. Кроме этого, нет необходимости делать чувствительный элемент из большого числа витков (с целью увеличить потокосцепление), поскольку требуемые значения индуктивности составляют несколько десятков микрогенри.



На рис.2.10а показана упрощенная конструкция датчика, представляющего собой замкнутый магнитопровод 1 в виде кольца из трансформаторной стали с намотанными на него измерительной и опорной катушками. Датчик предназначен в основном для решения задач функциональной диагностики электрических машин, основанной на спектральном анализе фазных токов. Простота конструкции и низкая стоимость датчика предполагает его стационарное крепление на цепях питания или нагрузки контролируемого объекта.

Датчик, изображенный на рис.2.10б, имеет незамкнутую магнитную цепь, представляющую собой V-образный магнитопровод 1 из трансформаторной стали с парой катушек индуктивности. Проводник с током 2 располагается симметрично относительно катушек. При протекании по проводнику переменного тока в катушках наводится ЭДС индукции, что приводит к модуляции выходного напряжения измерительного устройства. Датчик предназначен для оперативного измерения фазных токов, используемых для оценки функционального состояния электрических машин. Для удобства работы часть магнитопровода (обычно включаемая в себя и катушки индуктивности) размещается в корпусе 3 с кнопкой запуска измерений 4.

Измерение фазных токов и использование их в качестве исходной диагностической информации при оценке функционального состояния объекта контроля в ряде случаев может привести к неоднозначности оценок. Например, при анализе спектра фазных токов одним из часто используемых параметров является отношение амплитуд третьей и первой гармоник [9]. Но эта величина зависит как от внутренних дефектов объекта, в частности, межвитковых замыканий, обрыва стержней короткозамкнутого ротора, радиальных биений вала [109], так и от внешних факторов, а именно, от несинусоидальности фазных напряжений, питающих электродвигатели или вырабатываемых генераторами, что проявляется в наличии у напряжения гармоник с кратными частотами.

Одновременное измерение фазных токов и фазных напряжений может устранить эту неоднозначность оценок. Датчик, предназначенный для измерения электрического напряжения, представлен на рис. 2.10в. Его



принцип действия такой же, что и у датчика, изображенного на рис.2.10а. Переменный электрический ток, действующее значение которого определяется напряжением и емкостью конденсатора б, протекает через плоскость, ограниченную магнитопроводом с парой катушек индуктивности 1. Это приводит к возникновению ЭДС индукции в измерительной и опорной катушках и, как следствие, к соответствующему изменению выходного напряжения измерительного устройства.

### **Обработка сигналов от индукционно-индуктивных датчиков**

Индукционно-индуктивные датчики имеют одну особенность, отличающую их от других датчиков. Поскольку в основу их принципа действия, как и у датчиков индукционного типа, положено явление электромагнитной индукции, то выходной сигнал пропорционален скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки катушки:

$$e = -\omega \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \frac{d(BS)}{dt} ,$$

где  $CD$  - число витков,  $S$  - площадь витка.

Для определения магнитной индукции  $B$  или силы тока, создающего магнитное поле, выходной сигнал необходимо проинтегрировать. Поэтому измерительные приборы, основанные на индукционном методе, обычно содержат интеграторы тока или ЭДС. В качестве интеграторов могут быть использованы баллистический гальванометр (при интегрировании тока) или магнитоэлектрические и электронные веберметры с операционными усилителями, применяемыми для интегрирования ЭДС [57, 104].

Индукционно-индуктивные датчики входят в состав микропроцессорных измерительных устройств или устройств, реализованных на основе платы расширения для персонального компьютера [99]. Это обстоятельство делает возможным и целесообразным использовать численные методы интегрирования сигналов от датчиков вместо аппаратных методов, поскольку, как отмечено в [109], метрологические характеристики интеграторов оказывают решающее влияние на точность измерений характеристик магнитного поля.

В основу метода обработки сигналов положено одно из свойств Фурье-преобразования [7], согласно которому, если  $G(v)$  есть трансформанта первой производной  $f'(t)$  некоторой функции  $f(t)$ , то  $G(v) = -i2\pi v F(v)$ , где  $F(v)$  есть трансформанта самой функции. Таким образом, осуществив Фурье-преобразование выходного сигнала (пропорционального первой производной магнитного потока по времени) и разделив трансформанты на  $-i2\pi v$ , можно с помощью обратного Фурье-преобразования восстановить сигнал, пропорциональный потоку.

Практическая реализация этого способа включает в себя следующие операции. Вначале формируется выборка из результатов измерений  $U[n]$ , полученных индукционно-индуктивными датчиками через строго фиксированные промежутки времени  $T$ . Объем выборки обычно составляет  $N=1024$  отсчета. Вычисляется среднее арифметическое и вычитается их всех результатов измерений:

$$u[n] = U[n] - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U[n].$$

Далее используются прямое и обратное преобразования Фурье, связывающие  $N$  — точечную временную последовательность  $u[n]$ , и соответствующую ей  $N$ - точечную частотную последовательность  $u[k]$ :

$$u[k] = \sum_{n=0}^{N-1} u[n] \cdot \exp\left(-\frac{i2\pi kn}{N}\right), \quad (2.2 \text{ а})$$

$$u[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u[k] \cdot \exp\left(\frac{i2\pi kn}{N}\right). \quad (2.26)$$

Конкретное значение частоты  $i$ , соответствующее каждому из членов последовательности  $u[k]$  определяется выражением  $\nu = k/NT$ , а значение времени  $t$  для членов последовательности  $u[n]$  - выражением  $t = nT$ . Полученные согласно выражению (2.2а) амплитуды гармоник делятся на  $2\pi A$  ( $A=1...LM$ ), а к фазам гармоник добавляется величина  $\pi/2$ . Последней операцией является обратное Фурье-преобразование (2.26) и восстановление тем самым сигнала индукционно-индуктивного датчика, пропорционального измеряемому магнитному потоку или физической величине, связанной с магнитным потоком.

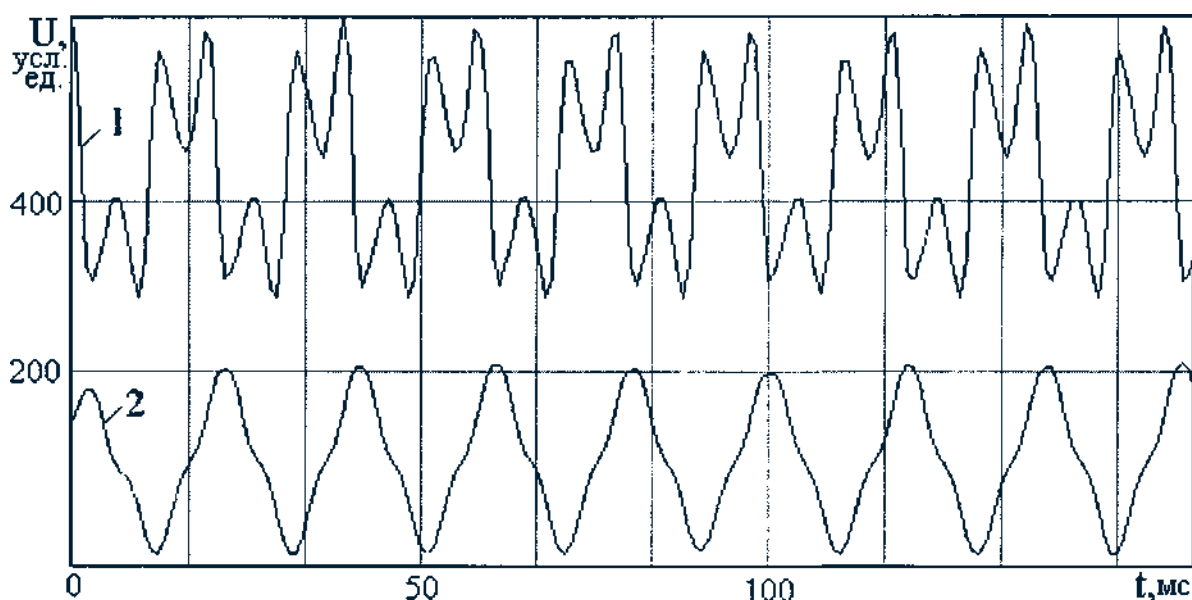


Рис. 2.11. Исходный сигнал индукционно-индуктивного датчика (1) и сигнал, полученный в результате операции интегрирования (2)

Пример такого расчета представлен на рис.2.11, где исходный сигнал 1 получен с помощью датчика при измерении им электромагнитного поля рассеяния трансформатора. Обработанный по изложенной выше методике сигнал представлен графиком 2. По оси ординат откладываются условные единицы, которым в соответствии с градуировочными зависимостями могут быть сопоставлены измеряемые физические величины. Анализ сигналов, полученных после численного интегрирования, и сравнение их с результатами, полученными на основе измерений тока другими методами, позволяет сделать вывод о корректности рассмотренного способа обработки сигналов индукционно-индуктивных датчиков.

#### **2.4. Формирование градуировочных зависимостей с использованием сплайн-интерполяции**

Для электромагнитных датчиков, имеющих разомкнутую магнитную цепь, линейный характер зависимости между воздействующей на датчик величиной и соответствующим изменением его параметров выполняется только в очень ограниченном диапазоне измеряемых величин или не выполняется совсем. Поэтому для микропроцессорных измерительных устройств, в состав которых входят такие датчики, необходимо формировать градуировочные зависимости (характеристики), устанавливающие связь между измеряемой величиной и цифровым

значением выходного напряжения. Такая связь устанавливается на основе измерений ограниченного числа узловых точек и соответствующей математической обработки полученных табличных данных.

При представлении табличных данных функциональными или графическими зависимостями используют два основных подхода [119]. При одном из них требуется, чтобы аппроксимирующая кривая (возможно, кусочно-гладкая) проходила через все точки, заданные таблицей. Это удается сделать с помощью методов интерполяции, причем чаще всего используют интерполяционные многочлены, представляемые в формах Лагранжа или Ньютона [7]. При другом подходе данные аппроксимируют простой функцией, применимой во всем диапазоне табличных данных, но необязательно проходящей через все точки. Такой подход называют подгонкой кривой, которую стремятся провести так, чтобы ее отклонения от табличных данных были минимальными. Обычно стремятся свести к минимуму сумму квадратов разностей между значениями функции, определяемыми выбранной кривой и таблицей. Такой метод подгонки называют методом наименьших квадратов. Тот и другой подход имеют свои достоинства и недостатки.

Что касается метода наименьших квадратов, то здесь наибольшая сложность возникает при выборе подходящих аппроксимирующих функций. Этот выбор должен осуществляться с учетом специфики табличных данных, под которой понимается их периодичность, степенной, экспоненциальный или логарифмический характер, свойства симметрии, наличие асимптотики. Если табличные данные соответствуют какой-то закономерности и хорошо описываются, например, линейной или параболической зависимостью, то данный метод дает хорошие результаты, в противном случае могут возникнуть серьезные расхождения между табличными данными и данными, полученными на основе аппроксимирующей кривой.

При использовании интерполяции на больших отрезках, то есть с относительно большим количеством узловых точек, ее результаты часто получаются неудовлетворительными. С одной стороны, при больших расстояниях между узловыми точками снижается точность интерполяции, а с другой стороны, с увеличением количества узловых точек из-за

влияния многочленов высоких порядков возникают осцилляции интерполяционной кривой, поскольку только таким образом кривую можно заставить пройти через заданные точки. Разумеется, это никак не соответствует реальной зависимости, вытекающей из табличных значений узловых точек. Отчасти выходом из положения может служить кусочная интерполяция более низкого порядка, то есть в этом случае интерполяция осуществляется по небольшому количеству узловых точек отрезка, а затем многочлены объединяют в общую интерполяционную функцию. Однако при этом в точках стыковки обычно терпит разрыв первая производная, что также приводит к ошибкам интерполяции.

В значительной степени свободным от перечисленных выше недостатков является сплайн-интерполяция, которая относительно недавно стала использоваться в вычислительной математике [119]. Свое название (в переводе с английского "spline" - упругая линейка) данный метод получил потому, что форма расчетной интерполяционной кривой совпадает с профилем упругой линейки, которую необходимо определенным образом согнуть, чтобы она проходила через узловые точки. Под сплайном понимают совокупность сопряженных интерполяционных полиномов, описывающих кусочно-гладкую кривую, проходящую через узловые точки  $(x_i, y_i)$ , причем в местах сопряжения первая и вторая производная непрерывны. Обычно ограничиваются полиномом третьей степени, то есть кубическим сплайном.

По сравнению с другими интерполяционными методами сплайн-интерполяция обладает рядом важных преимуществ [50]. Во-первых, это хорошая сходимость. В отличие от интерполяционных полиномов Лагранжа последовательность кубических сплайнов на равномерной сетке узлов всегда сходится к интерполируемой непрерывной функции. Во-вторых, малая чувствительность к погрешности исходных данных. Небольшие изменения значений функции в одной или нескольких соседних точках интерполяции не сказывается сколько-нибудь существенно на поведении интерполяционного сплайна на некотором удалении от этих точек. Как следствие выше сказанного — более высокая точность интерполяции.

Суть метода кубической сплайн-интерполяции заключается в следующем. Пусть имеется  $(n+1)$  узловых точек  $(x_i, y_i)$ , разбивающих некоторый отрезок  $[a, b]$  на  $m$  интервалов. Для каждого

интервала требуется рассчитать функции:

$$S_i(x) = k_{i1} + k_{i2}x + k_{i3}x^2 + k_{i4}x^3 \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (2.3)$$

причем ни сами функции, ни их первая и вторая производные не должны претерпевать разрыва в местах сопряжения, что приводит к дополнительным условиям, имеющим вид:

$$\begin{aligned} S_i(x_i) &= S_{i+1}(x_i) = y_i & (i = 1, 2, \dots, m) \\ S'_i(x_i) &= S'_{i+1}(x_i) & (i = 1, 2, \dots, m-1) \\ S''_i(x_i) &= S''_{i+1}(x_i) & (i = 1, 2, \dots, m-1). \end{aligned}$$

Получается  $4m$  неизвестных и  $(4m-2)$  уравнения. Для того, чтобы система имела решение, требуется еще два уравнения, в качестве которых используют дополнительные условия, налагаемые на функцию и ее производные на границах отрезка  $[a, B]$ . Чаще всего используют так называемый нормальный случай [7], согласно которому вторые производные кубического сплайна на границах интерполяционного отрезка  $[a, B]$  равны нулю.

Решение системы из  $4m$  уравнений упрощается, если представить сплайны в виде:

$$S_i(x) = ty_i + \bar{t}y_{i-1} + x_i \left[ (k_{i-1} - d_i)\bar{t}^2 - (k_i - d_i)t^2\bar{t} \right], \quad (2.4)$$

где 
$$t = \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, \quad \bar{t} = 1 - t, \quad d_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \quad (i = 1, 2, \dots, m).$$

Несложно показать, что при таком выборе сплайнов их сшивание в точках сопряжения обеспечивается автоматически, то есть  $S_i(x_i) = S_{i+1}(x_i)$ . Каждое из уравнений (2.4), начиная со второго, содержит только один неизвестный коэффициент. Это дает возможность свести задачу нахождения интерполяционных функций (2.3) к решению системы линейных уравнений с неизвестными коэффициентами  $k_i$ . В матричной форме система уравнений имеет вид [119]:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \Delta x_2 & 2(\Delta x_1 + \Delta x_2) & \Delta x_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \Delta x_m & 2(\Delta x_{m-1} + \Delta x_m) & \Delta x_{m-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0 \\ k_1 \\ \dots \\ k_{m-1} \\ k_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_1 \Delta x_2 + d_2 \Delta x_1 \\ \dots \\ d_{m-1} \Delta x_m + d_m \Delta x_{m-1} \\ d_m \end{bmatrix}$$

где  $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ .

Найденные в результате решения этой системы коэффициенты  $k$ , подставляются в систему уравнений (2.4), что позволяет рассчитать массив точек, определяющих кривую, проходящую через узловые точки.

Наибольшее распространение метод сплайн-интерполяции получил в задачах определения градуировочных зависимостей (характеристик) измерительных устройств, устанавливающих однозначное соответствие между измеряемой физической величиной и выходным сигналом измерительного устройства, представленным цифровым кодом с выхода АЦП. Примеры расчета таких зависимостей представлены на рис.2.12, где по оси абсцисс отложен код с выхода АЦП, а по оси ординат - измеряемая физическая величина, например, толщина или перемещение. Даже при существенно нелинейной зависимости и относительно большом количестве узловых точек градуировочная кривая получается гладкой, без каких-либо осцилляций (рис.2.12в,г).

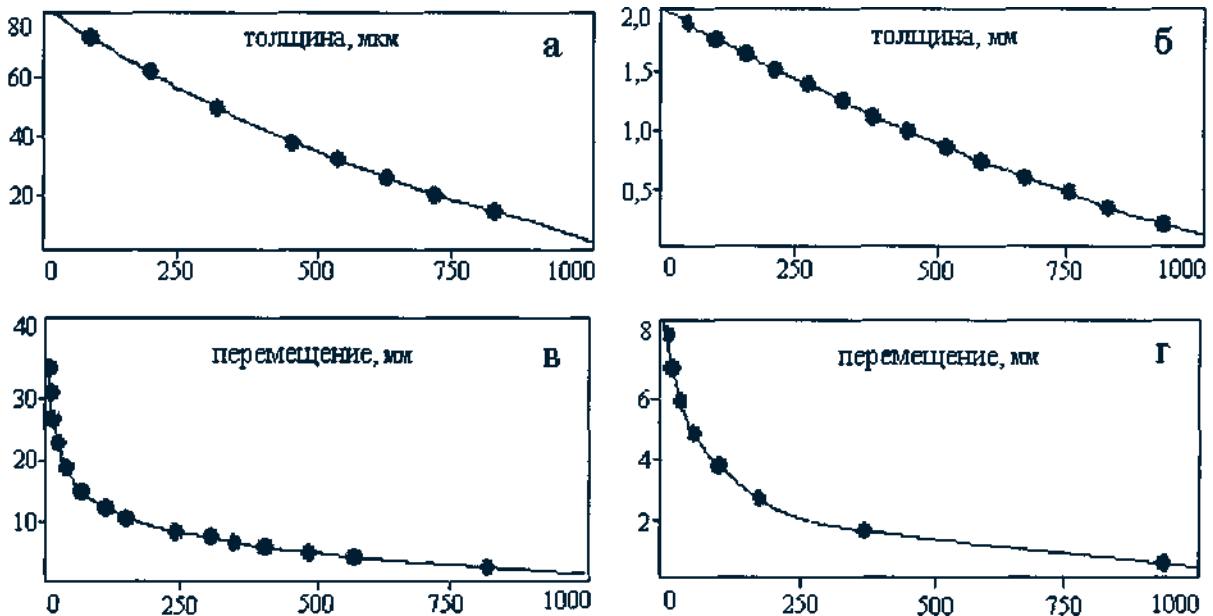


Рис. 2.12. Примеры градуировочных зависимостей, рассчитанных с помощью сплайн-интерполяции (по оси абсцисс - код с выхода АЦП)



Операция градуировки осуществляется с помощью специальной программы, которая на основе ограниченного количества измерений физической величины с известными значениями формирует одномерный массив  $X[i]$ , где индекс массива  $i$  представляет собой код с выхода АЦП. Этот массив, хранящийся в ПЗУ микропроцессорного устройства или в оперативной памяти персонального компьютера, позволяет максимально быстро, без каких-либо дополнительных расчетов осуществлять преобразование выходного сигнала в измеряемую физическую величину.

## **2.5. Математическая модель измерительного устройства и оценка инструментальной составляющей погрешности**

Оценка инструментальной составляющей погрешности базируется на анализе математической модели измерительного устройства (измерительной цепи), которая, в свою очередь, строится на основе его структурной схемы [79]. Структурная схема состоит из совокупности элементарных блоков, каждый из которых соответствует конкретному измерительному преобразователю. Зная функцию преобразования каждого из преобразователей, можно определить функцию преобразования измерительного устройства в целом, которая связывает между собой входной и выходной сигналы и которая является основной характеристикой математической модели устройства. На ее основе можно рассчитать любые метрологические характеристики устройства, в том числе и инструментальную погрешность.

Структурная схема устройства, предназначенного для преобразования измеряемой физической величины (ФВ) в код, представлена на рис.2.13. Каждому из структурных блоков, изображенных на рисунке, соответствует конкретный измерительный преобразователь. Блок «ФВ—» $Z_j$ », где  $l=0$  и  $1$ , выполняет преобразование измеряемой физической величины в индуктивность измерительной или опорной катушек датчика. Блок « $Z_j$ —» $T_j$ » преобразует индуктивность катушки в длительность возбуждаемого в ней переходного процесса. Блок « $T_j$ - $T_{ii}$ —» $\Gamma$ » выполняет операцию «исключающее ИЛИ», выделяя тем самым импульс рассогласования, длительность которого  $m$ . Блок « $m$ —» $U$ » выполняет преобразование длительности импульса рассогласования в напряжение, а



блок «C/1—»t/2» - усиление сигнала  $\mathcal{E}/i$  относительно опорного напряжения. И, наконец, блок «t/2—»код» соответствует аналого-цифровому преобразователю. Через  $\Delta U$  на рис.2.13 обозначены влияющие факторы, которые, воздействуя на каждый из преобразователей, вносят искажения в выходной сигнал измерительного устройства, создавая тем самым инструментальную погрешность. К ним в первую очередь относятся температура, напряжение питания, электромагнитные помехи, температурный дрейф параметров электронных компонентов и их технологический разброс, а также ряд других менее значимых факторов.

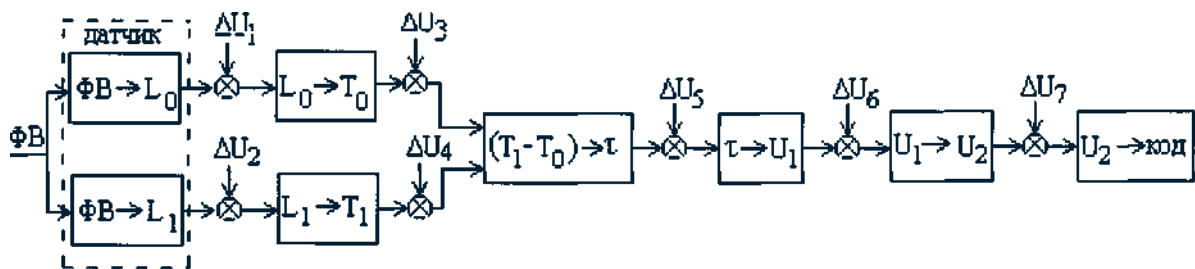


Рис. 2.13. Структурная схема измерительного устройства

В предположении, что все влияющие факторы  $\Delta t/j$  равны нулю, функция преобразования, связывающее выходной сигнал с входным, имеет вид [79]:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \frac{dU_1}{dU_{\text{вх}}} \frac{dU_2}{dU_1} \frac{dU_3}{dU_2} \dots \frac{dU_n}{dU_{n-1}} = U_{\text{вх}} \prod_{i=1}^n K_i = U_{\text{вх}} K, \quad (2.5)$$

где  $K$  – коэффициент преобразования измерительного устройства.

При наличии внешних дестабилизирующих факторов и температурном дрейфе параметров электронных компонентов возникнут погрешности коэффициентов преобразования  $\Delta K_i$ , что в итоге приведет к погрешности выходного сигнала, которая с учетом (2.5) рассчитывается по формуле:

$$\Delta U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (K_2 K_3 \dots K_n \Delta K_1 + K_1 K_3 \dots K_n \Delta K_2 + \dots + K_1 K_2 \dots K_{n-1} \Delta K_n).$$

Относительная погрешность при этом определится согласно выражению:

$$\delta U_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta K_i}{K_i} = \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad (2.6)$$

где  $\delta_i$  - относительная погрешность коэффициента преобразования  $i$ -ого блока. При практическом применении формулы (2.6) следует учитывать степени корреляции погрешностей  $\delta_i$  между собой, поскольку некоторые

влияющие на погрешность дестабилизирующие факторы воздействуют одинаковым образом на различные структурные блоки.

Рассмотрим вопрос о функции преобразования каждого из структурных блоков измерительного устройства с тем, чтобы определить функцию преобразования устройства в целом и оценить на ее основе инструментальную составляющую систематической погрешности. Преобразование измеряемой физической величины в индуктивность осуществляется с помощью соответствующих электромагнитных датчиков. Большинство из них имеют разомкнутые магнитные цепи, что не дает возможности теоретически рассчитать основные параметры датчиков и их изменения под воздействием измеряемой величины. Исключение составляет датчик, изображенный на рис.2.7в, для которого можно рассчитать зависимость его индуктивности  $L$  от расстояния до объекта формуле:

$$L = \frac{\omega^2}{Z_{mM} + Z_{m0}} = \frac{\omega^2}{\frac{l_M}{\mu\mu_0 S_M} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}}.$$

Для других конструктивных вариантов электромагнитных датчиков рассчитать аналитически функцию преобразования не представляется возможным, поэтому представим ее в общем виде  $f_i(x)$ , где через  $x$  обозначена одна из измеряемых физических величин, в том числе перемещение, толщина, магнитная индукция, электрический ток и т.д.

Принципиальная схема следующего структурного блока, осуществляющего преобразование « $Z_j \rightarrow \gamma$ », представлена на рис.2.14. Расчет его функции преобразования требует установления зависимости длительности возбуждаемого в чувствительном элементе переходного процесса от параметров катушки индуктивности. Теоретически рассчитать эту зависимость, как это сделано в главе 1 для LC-колебательного контура, по ряду причин крайне сложно. Во-первых, датчик содержит в своем составе диод с большим временем восстановления обратного сопротивления. Это приводит к тому, что в схему замещения, для которой необходимо рассчитать отклик на кратковременный электрический импульс, надо включать нелинейные сопротивление и емкость, причем оба

эти элемента нельзя считать безинерционными, поскольку их параметры зависят не только от приложенного к ним напряжения, но и от времени. Во-вторых, форма возбуждающего переходный процесс напряжения носит несинусоидальный характер, а представляет собой кратковременный прямоугольный импульс. Использовать разложение его в базисе ортогональных функций, то есть воспользоваться, например, преобразованиями Фурье или Лапласа, нельзя в силу нелинейности системы.

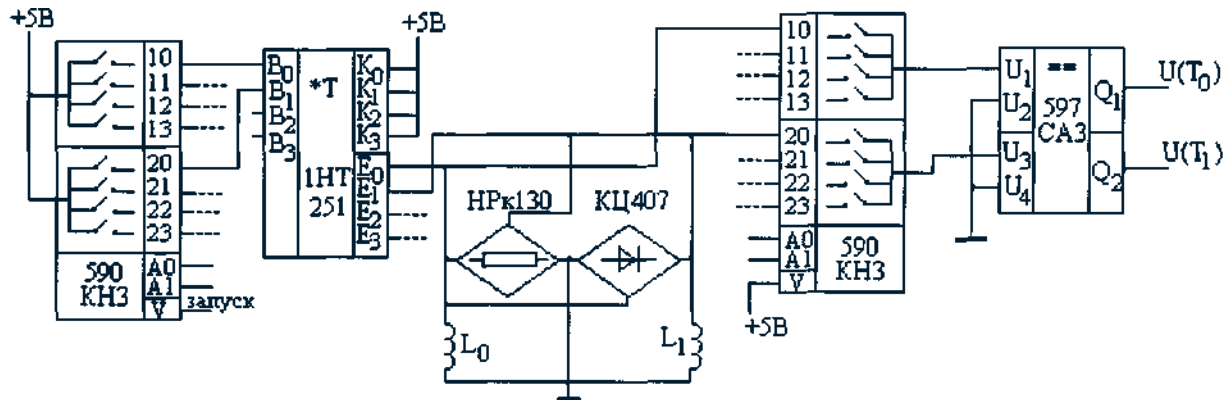


Рис. 2.14. Принципиальная схема измерительного преобразователя  
«индуктивность — длительность переходного процесса»

Как известно [26], время восстановления обратного восстановления зависит от величины инжектированного через *p-n-переход* заряда. Для переключения диода из прямосмещенного в обратносмещенное состояние требуется, чтобы этот избыточный заряд рассосался. Это происходит за счет процессов рекомбинации и обратного перехода неосновных носителей из базы в эмиттер. Поэтому можно считать, что длительность переходного процесса, возбуждаемого в чувствительном элементе датчика, должна зависеть от времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода (например дырок в *n*-области базы) и величины протекающего через */>-*переход в прямом направлении тока  $I_{np}$ . Таким образом, в общем виде функция преобразования этого структурного блока будет иметь вид  $f_2(\tau_p, I_{np})$ .

Время жизни  $T_p$  зависит от параметров полупроводника и его температуры, а ток через */>-*л-переход  $I_{np}$  - от амплитуды и формы возбуждающего переходный процесс импульса, а также от параметров элементов схемы, в том числе и от индуктивности измерительной катушки.

Сопротивление резисторов из набора НРк130 и параметры диодов из выпрямительного моста КЦ407 зависят от температуры и таким образом могут являться источниками инструментальных погрешностей измерительного преобразователя. Напряжение питания влияет на величину базового тока транзисторов из сборки 1НТ251, а следовательно, и на величину возбуждающего переходный процесс импульса тока и таким образом также является источником инструментальной погрешности.

Вместе с тем влияние этих дестабилизирующих факторов на результирующую инструментальную погрешность всего измерительного устройства относительно невелико. Причина этого в том, что преобразование индуктивности в длительность переходного процесса, осуществляемое изображенным на рис.2.14 измерительным преобразователем, производится по дифференциальной схеме, включающей в себя измерительное и опорное плечи. При этом параметры всех элементов, за исключением катушек индуктивности, полностью идентичны, поскольку все микросхемы и наборы дискретных компонентов или двухканальные, или многоканальные. Поэтому влияние таких дестабилизирующих факторов, как температура, напряжение питания, технологический разброс параметров элементов, сказывается одинаковым образом и на измерительное плечо, и на опорное. После вычитания длительностей переходных процессов и выделения импульса рассогласования, погрешности измерительного и опорного плеч взаимно компенсируют друг друга.

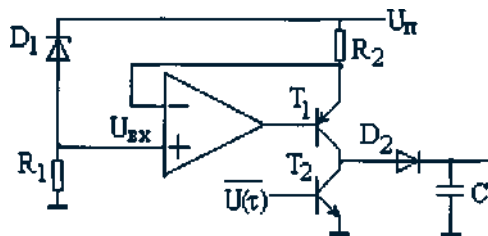
Таким образом, более существенное влияние на инструментальную составляющую погрешности измерительного устройства оказывают три последних из изображенных на рис.2.13 структурных блока. Схема преобразования «длительность импульса рассогласования —> напряжение» представлена на рис.2.15. Она включает в себя генератор тока, сформированный на операционном усилителе и транзисторе  $T_1$ , а также конденсатор, заряжаемый током этого генератора. Время зарядки конденсатора определяется длительностью импульса рассогласования  $U(T)$ , управляющего включением/выключением транзистора  $T_2$ . Разрядом конденсатора в конце каждого однократного измерения управляет сигнал *Строб* (рис. 1.1 Об), осуществляющий включение/выключение транзистора

(на схеме не показан), работающего в ключевом режиме и подключенного параллельно конденсатору.

В схеме на рис.2.15 обратная связь операционного усилителя создает на резисторе  $R_2$  падение напряжения  $U_n - U_{вх}$ , которое, в свою очередь, задает эмиттерный ток в транзисторе  $T_1$ , примерно равный току коллекторному:

$$I_k \approx I_3 = \frac{U_n - U_{вх}}{R_2} = \frac{U_{см}}{R_2}, \quad (2.7)$$

где  $U_{см}$  - напряжение стабилизации со стабилитрона  $D_1$ . Такая схема включения транзистора в цепь обратной связи позволяет подавить влияние температуры на величину эмиттерного тока [115]. Погрешность возникает лишь от того, что операционный усилитель стабилизирует эмиттерный ток, а зарядку конденсатора осуществляет ток коллекторный, поэтому



некоторое влияние могут оказывать изменения тока, поступающего в базу транзистора с выхода операционного усилителя. Это влияние невелико и в принципе может быть исключено полностью заменой биполярного транзистора  $T_1$  на полевой.

Рис.2.15. Принципиальная схема преобразователя « $r \rightarrow U$ »

Напряжение  $U$  на конденсаторе  $C$

при зарядке его током  $I_k$  в течении времени  $\tau$  с учетом (2.7) будет равно:

$$U_1 = I_k \frac{\tau}{C} = \frac{U_{см} \tau}{R_2 C}. \quad (2.8)$$

Это и есть функция преобразования изображенного на рис.2.13 блока « $r \rightarrow t/i$ ». Следующий измерительный преобразователь, показанный на структурной схеме устройства блоком « $U_i \rightarrow tU_i$ », представляет собой усилитель, изображенный на рис.1.11, который осуществляет усиление сигнала  $U$  относительно опорного напряжения  $U_{оп}$ . Как показано в [12], при выполнении условий  $R_2 = R_1$  и  $R_4 = R_3$  напряжение с выхода усилителя определяется выражением:

$$U_2 = \left( \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) (U_1 - U_{оп}) \quad (2.9)$$

Последний преобразователь, изображенный на структурной схеме устройства, осуществляет преобразование аналогового сигнала  $t/2$  в код, для чего используется 10-разрядный АЦП последовательного приближения 1113ГТВ1. Его функция преобразования согласно [15] равна:

$$Y = q \text{Int} \left[ \frac{U}{q} + 0,5 \text{sign} U \right], \quad (2.10)$$

где  $q$  - степень квантования;  $\text{Int}[A]$  - функция «целая часть  $A$ »,  $\text{sign} A$  - функция «знак числа  $A$ »:  $\text{sign} A = 1$  при  $A > 0$  и  $\text{sign} A = -1$  при  $A < 0$ .

Оценим теперь инструментальные составляющие погрешностей каждого из измерительных преобразователей по отдельности, а затем устройства в целом, используя для этого формулу (2.6). Как уже отмечалось выше, основной вклад в инструментальную погрешность дают три последних структурных блока, осуществляющих преобразование длительности импульса рассогласования  $t$  в напряжение  $U$  с последующим усилением (напряжение  $b$ ) и преобразованием усиленного напряжения в цифровой код. Для первого из этих блоков « $t \rightarrow U$ » функция преобразования согласно (2.8) имеет вид:

$$U_1 = \frac{U_{cm}(T, U_c)}{R_1(T)C(T)} t \quad (2.11)$$

где в скобках отмечены влияющие на погрешность величины, а именно  $T$  - температура и  $U_c$  - сетевое напряжение 220 В;  $K$  - коэффициент пропорциональности между входной величиной  $t$  и выходной величиной  $U$ . Влияние на погрешность технологического разброса параметров элементов (стабилитрона, резистора и конденсатора) не учитываем, поскольку градуировка датчиков, входящих в состав прибора осуществляется индивидуально для каждого прибора, что вполне оправдано при его мелкосерийном производстве.

Таким образом, колебания сетевого напряжения влияют только на напряжение со стабилитрона, а колебания температуры влияют на все переменные, определяющие функцию преобразования (2.11). Изменения сетевого напряжения и температуры происходят независимо друг от друга, поэтому вызываемые ими погрешности полностью некоррелируемы и

должны складываться геометрически [57]. На основании формулы (2.6) и с учетом (2.11) можно получить:

$$\begin{aligned} \delta U_1 = \frac{\Delta U_1}{U_1} = \frac{\Delta K_1}{K_1} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial K_1}{\partial U_c} \Delta U_c\right)^2 + \left(\frac{\partial K_1}{\partial T} \Delta T\right)^2}}{K_1} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{U_{cm}} \frac{\partial U_{cm}}{\partial U_c} \Delta U_c\right)^2 + \left(\frac{1}{K_1} \frac{\partial K_1}{\partial T} \Delta T\right)^2}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

При оценке коэффициента влияния  $\partial U_{cm}/\partial U_c$  следует учесть, что стабилитрон  $D_1$  в схеме, изображенной на рис.2.14, подключен к уже стабилизированному напряжению от блока питания  $U_n$ . Поэтому в выражении (2.12) целесообразно произвести замену:

$$\frac{\partial U_{cm}}{\partial U_c} \Delta U_c = \left(\frac{\partial U_{cm}}{\partial U_n} \frac{\partial U_n}{\partial U_c}\right) \frac{\partial U_c}{\partial U_n} \Delta U_n = \frac{\partial U_{cm}}{\partial U_n} \Delta U_n. \quad (2.13)$$

В зависимости от конструктивного исполнения измерительное устройство питается либо от блока питания персонального компьютера, либо от автономного блока с коэффициентом стабилизации  $k > 20$ . Если принять коэффициент стабилизации  $k=20$  и максимальные колебания сетевого напряжения  $\Delta U = \pm 10\%$ , а также считать, что погрешности выходного напряжения распределены по треугольному закону, как это сделано в [57], то среднее квадратичное отклонение (СКО) для  $U_n = 12$  В составит величину:

$$\sigma_n = \frac{0,1 \cdot 12 \text{ В}}{20 \cdot \sqrt{6}} = 0,024 \text{ В}.$$

В качестве величины  $\Delta U_n$  примем утроенное СКО, что составит 0.07 В. Для определения коэффициента влияния  $\partial U_{cm}/\partial U_n$  воспользуемся соотношением [115]:

$$\frac{\partial U_{cm}}{\partial U_n} = \frac{R_{cm}}{R_1 + R_{cm}},$$



где  $R_{cm}$  - динамическое сопротивление стабилизатора,  $R_I$  - сопротивление токозадающего резистора в схеме на рис.2.15. При  $R_{cm}=46$  Ом и  $R_I=750$  Ом коэффициент влияния равен 5,8%. Подставив это значение, а также  $\Delta U_n$  и  $U_{cm}=5,6$  В в формулу (2.13) и учитывая (2.13), получим значение составляющей погрешности, обусловленной колебаниями сетевого напряжения:

$$\frac{1}{U_{cm}} \frac{\partial U_{cm}}{\partial U_n} \Delta U_n = \frac{5,8\% \cdot 0,07B}{5,6B} = 0,07\% .$$

Произведем оценку второй составляющей погрешности в формуле (2.12), которая обусловлена влиянием колебаний температуры на параметры элементов (стабилизатора, резистора и конденсатора). Поскольку все эти элементы располагаются в одном корпусе и, следовательно, имеют примерно одинаковую температуру, то их температурные погрешности жестко коррелированы и должны складываться алгебраически с учетом знака. На основании этого, а также с учетом выражения (2.11), получим:

$$\frac{1}{K_1} \frac{\partial K_1}{\partial T} \Delta T = \left( \frac{1}{U_{cm}} \frac{\partial U_{cm}}{\partial T} - \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} - \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} \right) \Delta T . \quad (2.14)$$

Первое слагаемое представляет собой температурный коэффициент напряжения стабилизации, который для используемого нами стабилизатора равен  $-0,008\%/^{\circ}C$ . Второе и третье слагаемые являются температурными коэффициентами сопротивления и емкости. Их значения для используемых в устройстве элементов равны соответственно  $TKO,01\%/^{\circ}C$  и  $TKE=-0,0075\%/^{\circ}C$ . Учтем, что измерительное устройство эксплуатируется в производственных помещениях, где допустимы колебания температуры  $\pm 15^{\circ}C$ , и примем равномерный закон ее распределения. Тогда СКО будет равно  $8,7^{\circ}C$ , а величина  $\Delta T$ , принимаемая равной ее утроенному значению, составит  $26^{\circ}C$ . Подставив все эти значения в (2.14), получим для температурной составляющей погрешности абсолютное значение  $0,26\%$ . Результирующая погрешность  $\Delta K/K$ , рассчитанная по формуле (2.12), будет равна  $0,27\%$ . Эта погрешность

измерительного преобразователя « $\tau \rightarrow U_1$ » является мультипликативной (погрешность чувствительности), поскольку она пропорциональна входной величине  $\tau$ .

Оценку  $\delta U_2$  проведем аналогично тому, как это сделано для предыдущего структурного блока. Функция преобразования для структурного блока « $U_1 \rightarrow U_2$ » имеет вид:

$$U_2 = \left( \frac{R_4}{R_3} + 1 \right) (U_1 - U_{on}) \approx \frac{R_4}{R_3} U_1 - \frac{R_4}{R_3} U_{on} = K_2 U_1 - b, \quad (2.15)$$

где  $K_2 = \frac{R_4(T)}{R_3(T)}$ ,  $b = \frac{R_4(T)}{R_3(T)} U_{on}(T, U_c)$ .

В формуле (2.15) в скобках отмечены влияющие на погрешность параметры, а также учтено, что отношение  $R_4/R_3$  примерно на порядок больше 1. Погрешность  $\delta K_2 = \Delta K_2 / K_2$  является мультипликативной (погрешность чувствительности), а погрешность  $\delta b = \Delta b / b$  – аддитивной (погрешность нуля). Сложение этих составляющих погрешности проведем аналогично тому, как это сделано в [57], то есть сложим по отдельности мультипликативные и аддитивные погрешности всех структурных блоков, а затем найдем их сумму, причем, учитывая некоррелированность этих погрешностей сложение будем осуществлять геометрически.

Для аддитивной погрешности  $\delta b$  расчет осуществляется по формуле:

$$\delta b = \frac{\Delta b}{b} = \sqrt{\frac{1}{b^2} \left( \frac{\partial b}{\partial U_c} \Delta U_c \right)^2 + \frac{1}{b^2} \left( \frac{\partial b}{\partial T} \Delta T \right)^2} = \quad (2.16)$$

$$\sqrt{\left( \frac{1}{U_{on}} \frac{\partial U_{on}}{\partial U_c} \Delta U_c \right)^2 + \left[ \left( \frac{1}{R_4} \frac{\partial R_4}{\partial T} - \frac{1}{R_3} \frac{\partial R_3}{\partial T} + \frac{1}{U_{on}} \frac{\partial U_{on}}{\partial T} \right) \Delta T \right]^2}.$$

С учетом того, что ТКС для резисторов  $R_3$  и  $R_4$  одинаков, погрешность  $\delta b$ , обусловленная колебаниями сетевого напряжения  $\pm 10\%$  и колебаниями температуры  $\pm 15^\circ\text{C}$ , будет равна:

$$\delta b = \sqrt{(0,07)^2 + (0,008 \cdot 26)^2} = 0,22\% .$$

Мультипликативная погрешность  $3K_2$ , определяемая разностью ТКС резисторов  $R_4$  и  $R_3$ , имеет пренебрежимо малое значение по сравнению с мультипликативной погрешностью предыдущего структурного блока. Таким образом, результирующая мультипликативная погрешность структурных блоков « $m \rightarrow U$ » и « $f/i \rightarrow t/2$ » будет равна 0,27%, а аддитивная погрешность 0,22%. С учетом обеих составляющих инструментальная погрешность всего измерительного устройства будет равна:

$$Ш_{\text{всх}} = \sqrt{(0,27)^2 + (0,22)^2} = 0,35\% .$$

Погрешность последнего структурного блока « $f/2 \rightarrow \text{код}$ » определяется погрешностью квантования аналого-цифрового преобразователя и согласно [15] относится к методической погрешности, среднее квадратичное отклонение (СКО) которой можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_q = \frac{q}{\sqrt{12}} ,$$

где  $q$  - степень квантования.

Для используемого нами 10-разрядного АЦП степень квантования составляет  $1/1024$  номинального напряжения  $U_H$ . Если принять величину абсолютной погрешности  $\Delta$  утроенному значению  $\sigma_q$ , то относительная погрешность квантования будет равна 0,09%.

Значения инструментальной погрешности, полученные на основе анализа структурной схемы измерительного устройства, могут быть значительно снижены при использовании процедуры коррекции измерений. В этом случае один из измерительных каналов (нулевой) используется для служебных целей. К нему подключаются датчики-имитаторы, обладающие фиксированными параметрами. Результаты измерений, полученные от нулевого канала, вычитаются из результатов от других каналов. Поскольку влияние колебаний температуры и сетевого напряжения на все измерительные каналы примерно одинаково, то такая операция позволяет уменьшить влияние этих дестабилизирующих факторов.

## **2.6. Оценка методической погрешности вихретокового датчика, обусловленной конечными размерами объекта измерений**

Датчики, входящие в состав измерительных устройств, отличаются широким разнообразием как по конструкции и принципу действия, так и по измеряемым физическим величинам. Поэтому источники методических погрешностей и способы их снижения в каждом конкретном случае свои. При измерении перемещений или толщины диэлектрических слоев на металлическом основании методическая погрешность может быть обусловлена отличием геометрических размеров и формы объекта измерений и эталонного объекта, на основании измерений которого рассчитывалась градуировочная зависимость. При измерении толщины металлических пленок на результаты измерений влияет температура, поскольку от нее зависит электропроводность пленок. При бесконтактном измерении электрических токов на результаты измерений влияют форма и размеры проводников, их положение и ориентация относительно датчика, а также внешнее магнитное поле, создаваемое токами в соседних близко расположенных проводниках. При измерении электромагнитных полей рассеяния с помощью соответствующих датчиков на результаты влияет ориентация датчика относительно магнитного поля Земли.

Некоторые из рассмотренных выше методических погрешностей могут быть снижены или устранены совсем с помощью процедуры коррекции в программе «Мультиметр». Например, влияние температуры на результаты измерений толщины металлизации можно снизить, проведя при данной температуре контрольные измерения калиброванных образцов и введя соответствующую поправку, учитывающую отклонение температуры от нормальной.

В других случаях снизить методическую погрешность можно, проводя операцию градуировки после установки датчиков в местах их стационарного крепления. Это целесообразно делать, например, при измерении фазных токов электрических машин с помощью индукционно-индуктивных датчиков, изображенных на рис.2.10а. Это же относится и к измерениям перемещений объектов сложной формы, например, радиальных биений вала. Задача в этом случае упрощается высокой оперативностью процедуры градуировки и наличием широкого набора

сервисных функций, что позволяет на основе нескольких измерений узловых точек с помощью сплайн-интерполяции рассчитать градуировочную зависимость.

Иногда влияние методической погрешности не имеет существенного значения из-за специфики решаемой задачи. Например, при измерении электромагнитных полей рассеяния электрических машин с целью последующей оценки их функционального состояния основной задачей является определение отношений амплитуд гармоник высших порядков к амплитуде основной гармоники. Прежде, чем производить Фурье-преобразование, из исходного сигнала вычитается его среднее арифметическое значение, поэтому влияние постоянной составляющей магнитного поля Земли на результаты измерений амплитуд гармоник не существенно.

Одним из наиболее важных среди перечисленных выше факторов, искажающих результаты измерений и практически не поддающихся коррекции, является влияние формы и размеров объекта при измерении, например, толщины металлизации вихретоковыми датчиками. Градуировка датчиков в этом случае, как правило, проводится на образцах достаточно больших размеров, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Реальные же объекты могут иметь размеры, не намного превышающие диаметр катушки вихретокового датчика. Поэтому важно знать величину погрешности, вносимой конечными размерами объекта измерений и его минимальные размеры, при которых погрешность измерений не превышает наперед заданную величину.

Оценку методической погрешности, обусловленной конечными размерами объекта измерений, представляющего собой однородную по толщине электропроводящую плоскость, можно осуществить по формуле:

$$\delta_m = \frac{M_\infty - M_R}{M_\infty} = \frac{\Psi_\infty - \Psi_R}{\Psi_\infty}, \quad (2.17)$$

где  $M_\infty$  и  $M_R$  - коэффициенты взаимной индукции системы «катушка индуктивности - плоскость», а  $\Psi_\infty$  и  $\Psi_R$  потокоцепления через поверхность проводящей плоскости соответственно при бесконечно большой плоскости и плоскости конечных размеров в виде круга радиуса  $R$ . Для расчета потокоцепления представим плоскость в виде

совокупности элементарных витков радиуса  $r$ , имеющих площадь сечения  $dS$ . Согласно [64] величина потокосцепления  $\Psi$  через проводящую плоскость в этом случае определяется выражением:

$$\Psi_R = \frac{1}{S} \int B_x \pi r^2 dS, \quad (2.18)$$

где  $B_x$  – осевая составляющая магнитного поля, созданного током катушки; интегрирование ведется по всей площади сечения  $S$  проводящей плоскости. Поскольку  $dS = h \cdot dr$  и  $S = h \cdot R$  ( $h$  – толщина плоскости), то выражение (2.18) примет вид:

$$\Psi_R = \frac{1}{R} \int_0^R B_x \pi r^2 dr. \quad (2.19)$$

Конфигурация магнитного поля и расположение проводящей плоскости относительно катушки показаны на рис.2.16. Осевая составляющая поля  $B_x(r, x)$  может быть найдена из выражения [64]:

$$B_x(r, x) = \sum_{n=1}^N B_{nx}(r, x) = \frac{\mu_0 i}{4\pi r_1} \sum_{n=1}^N \int_0^\pi \frac{(1 - R \cos \varphi)}{(X^2 + R^2 + 1 - 2R \cos \varphi)^{3/2}} d\varphi, \quad (2.20)$$

где  $i$  – сила тока, текущего по виткам катушки;  $R = r/r_1$  и  $X = x/r_1$  – координаты точки наблюдения в относительных единицах;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\varphi$  – переменная интегрирования, определяющая пространственное расположение элемента тока, суммирование ведется по всем  $N$  виткам катушки.

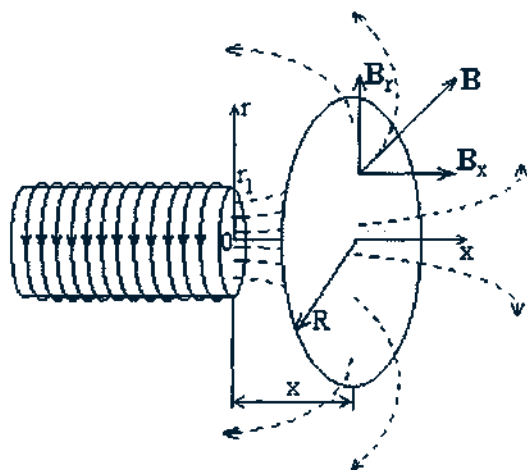


Рис. 2.16. Конфигурация магнитного поля, созданного током катушки вихретокового датчика

На рис.2.17 представлены результаты расчета пространственного распределения осевой составляющей магнитного поля  $B_x(x, r)$  созданного протекающим по виткам катушки электрическим током. Расчет производился по формуле (2.20), сила тока принималась равной 1 А, радиус однослойной катушки  $r_1 = 10$  мм, количество витков  $N = 50$ , диаметр провода равен 0,2 мм.

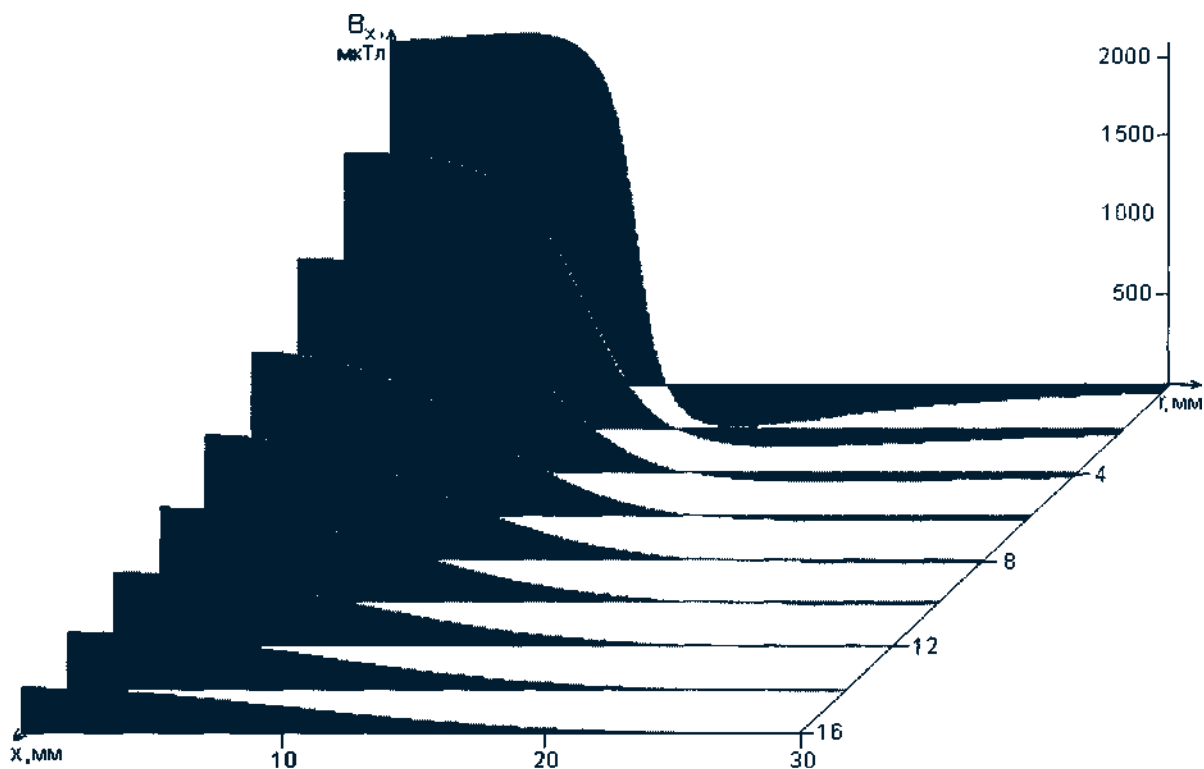


Рис. 2.17. Пространственное распределение осевой составляющей магнитного поля  $B_x$ , созданного током катушки вихретокового датчика

Используя полученные данные о пространственном распределении осевой составляющей магнитного поля  $B_x$ , можно по формуле (2.19) рассчитать потокосцепление через любую плоскость, имеющую форму круга и расположенную перпендикулярно оси катушки на расстоянии  $x$  от нее, а затем на основании (2.17) оценить методическую погрешность измерений, обусловленную влиянием размеров объекта. Анализ результатов расчета, позволяет сделать вывод, что для объектов, расположенных вблизи датчика, влияние размеров более существенно, чем для удаленных объектов. Вместе с тем, для любых расстояний между объектом измерений и вихретоковым датчиком при выполнении условия  $R > 4ri$  относительная погрешность составляет величину менее одной десятой доли процента, что значительно ниже инструментальной погрешности измерительного устройства. Это дает основание считать такие размеры объекта «бесконечно» большими, и, тем самым, пренебречь вкладом методической погрешности в результирующую погрешность измерений.



Глава третья  
**БАЗОВЫЕ ВАРИАНТЫ КОНСТРУКЦИЙ  
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

**3.1. Анализ архитектуры современных программируемых микроконтроллеров и их функциональных возможностей**

Круг решаемых задач, связанных с диагностикой и контролем технологических процессов, чрезвычайно широк, поэтому и требования к соответствующим микропроцессорным измерительным средствам также отличаются большим разнообразием. В некоторых случаях требуется высокая скорость не только на этапе измерений, но и на этапе обработки и анализа полученной информации. Это в первую очередь относится к задачам контроля и предотвращения аварийных ситуаций, а также в задачах обеспечения оптимальных режимов работы контролируемых объектов, где в зависимости от результатов измерений требуется оперативно вырабатывать соответствующие управляющие сигналы.

В других случаях высокая скорость необходима лишь на этапе измерений. Это в основном типично для задач функциональной диагностики, где поиск дефектов в объектах контроля производится на ранней стадии их развития, в условиях далеких от аварийных, когда продолжительность анализа диагностической информации не очень важна. Есть задачи, в которых высокое быстродействие не требуется и на этапе измерений, но необходима серьезная математическая обработка полученных результатов.

Все эти факторы необходимо учитывать при выборе конкретного типа программируемого логического микроконтроллера (ПЛК), составляющего основу микропроцессорного измерительного устройства. Наряду с быстродействием важными показателями являются энергопотребление микроконтроллера и его функциональные возможности, определяемые системой команд и объемом памяти программ, а также наличием интегрированных на кристалле периферийных устройств, в частности, последовательных и параллельных портов, таймеров/счетчиков, АЦП, программно управляемых генераторов импульсов и т.д.

Рассмотрим особенности архитектуры наиболее распространенных ПЛК. В настоящее время, несмотря на появление 16- и 32-разрядных микроконтроллеров и микропроцессоров, доминирующие позиции занимают 8-разрядные микроконтроллеры, среди которых особую роль играют ПЛК семейства 8051, разработанные фирмой Intel в 1980 г. на базе технологии NMOS. Широкий набор периферийных устройств, возможность гибкого выбора внешней или внутренней памяти и приемлемая цена обеспечили этому микроконтроллеру успех на рынке и сделали его безусловным лидером по количеству разновидностей и количеству компаний, выпускающих его модификации. В результате на сегодняшний день существует более 200 модификаций ПЛК семейства 8051, выпускаемых почти двадцатью компаниями, среди которых в первую очередь следует отметить Intel, Siemens, Philips и Atmel. Каждый год появляются все новые варианты представителей этого семейства. Основными направлениями развития являются: увеличение быстродействия за счет повышения тактовой частоты и модернизации архитектуры, снижение напряжения питания и энергопотребления, увеличение объема ОЗУ и FLASH-памяти на кристалле, введение в состав периферии микроконтроллера новых устройств типа системы управления приводами [37].

Основную роль, обеспечившей такую популярность ПЛК, сыграла его очень удачная архитектура, изображенная на рис.3.1 [106]. Ее основу составляет внутренняя двунаправленная шина, которая связывает между собой все основные узлы контроллера: резидентную память программ (РПП) и память данных (РПД), арифметико-логическое устройство (АЛУ), блок регистров специальных функций, устройство управления и порты ввода/вывода. С целью повышения быстродействия резидентная память имеет Гарвардскую архитектуру, согласно которой память программ и память данных физически и логически разделены, имеют различные механизмы адресации и работают под управлением различных сигналов. Это позволяет осуществлять выборку очередной команды и данных параллельно, для чего используются соответствующие счетчик команд (СК) и регистр адреса (РА).

Регистр-указатель данных (РУД) позволяет реализовать косвенную адресацию к внешней памяти объемом 64 Кбайта, для чего используются ряд внешних сигналов: разрешение внешней памяти программ (РВП1), строб адреса внешней памяти (САВП), отключение резидентной памяти программ (ОРГТП). Регистр-указатель стека (РУС) дает возможность организовать ветвление программы (условные переходы, процедуры, функции). В качестве условий используется содержимое разрядов в регистре «слово состояния программы» (ССП), которое обновляется после каждого выполнения арифметической или логической операции, происходящей с участием регистра-аккумулятора А и регистра-расширителя В.

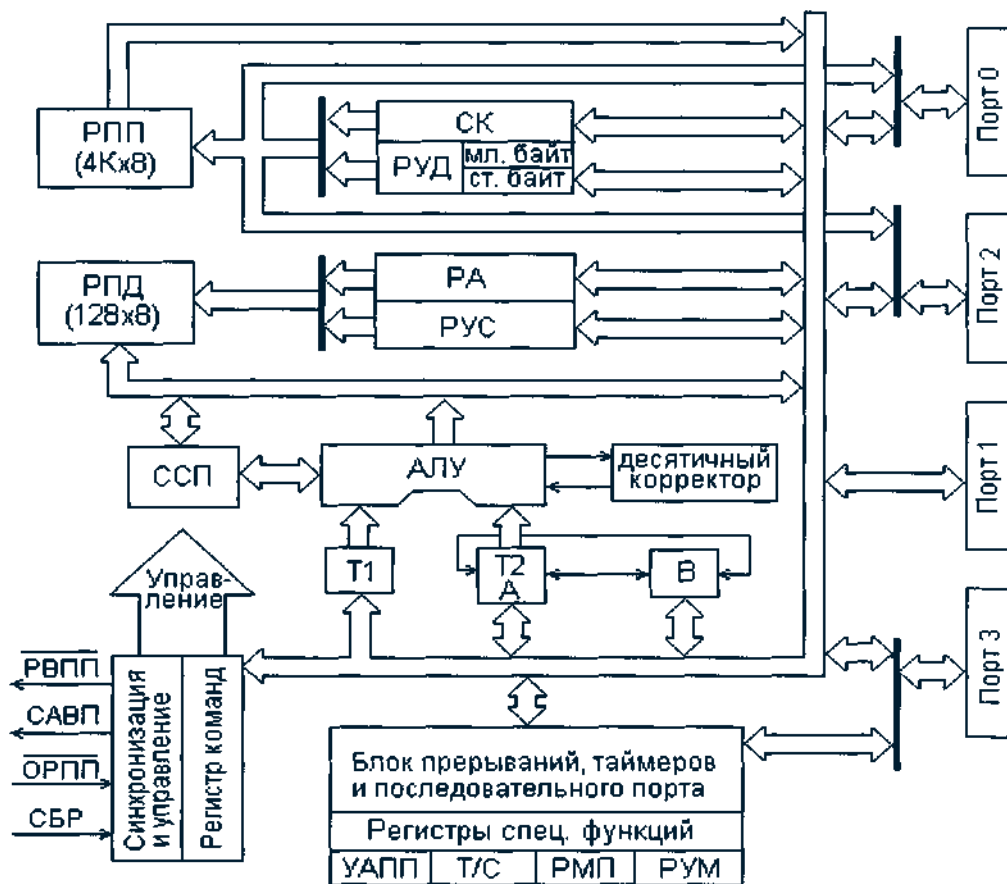


Рис. 3.1. Архитектура программируемого микроконтроллера 8051

Важную роль играют программно доступные регистры специальных функций, часть из которых изображена на рис.3.1. Они позволяют управлять работой универсального асинхронного передатчика (УАПП), двумя таймерами/счетчиками. С помощью регистра управления

мощностью (PUM) реализуется режим холостого хода или режим пониженного энергопотребления, а регистр масок прерываний (РМП) вместе с регистром приоритетов обеспечивает гибкость в организации системы прерываний, которая включает в себя два внешних прерывания и по два прерывания от таймера/счетчика и универсального асинхронного приемопередатчика.

Возможности базовой конструкции микроконтроллера 8051 в плане быстродействия определяются организацией выполнения команд и частотой синхронизации, максимальное значение которой составляет 12 МГц. Большинство из команд выполняется за 1-2 машинных цикла, то есть за 1-2 мкс при максимальной частоте синхронизации. Каждое измерение в зависимости от сложности его реализации требует выполнения нескольких десятков команд, что по времени занимает несколько десятков микросекунд. Поэтому максимальная частота опроса датчиков не превышает 30-50 кГц. В ряде случаев, как например, при измерении коротких электрических импульсов в катушке зажигания автомобильного двигателя или при вибродиагностике, основанной на многоканальном спектральном анализе вибраций, такая частота опроса датчиков может оказаться недостаточной.

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование ПЛК AT89c51 фирмы Atmel, которые при той же стоимости, что и у базового варианта имеют более высокую частоту синхронизации, равную 24 МГц, а у некоторых модификаций даже 33 МГц. К тому же все ПЛК фирмы Atmel имеют Flash-память, что выгодно отличает их от аналогов. Некоторые из модификаций имеют пониженное напряжение питания, что также может оказаться важным фактором при проектировании измерительных устройств в портативном варианте. Однако все модификации, так же как и подавляющее большинство модификаций фирмы Intel, не имеют встроенных АЦП. Во многих случаях, где требуется высокое быстродействие и приемлемая стоимость, это обстоятельство может быть очень важным. Недорогие аналого-цифровые преобразователи, использующие метод последовательного приближения, не отличаются высоким быстродействием, например у широко используемого отечественного АЦП 1113ПВ1 время преобразования составляет 30 мкс.

Современные импортные 8- и 10-разрядные АЦП имеют показатели существенно лучше, но их стоимость обычно в несколько раз превышает стоимость самих микроконтроллеров.

С учетом этих обстоятельств целесообразно использовать ПЛК фирмы Philips, которая является лидером по количеству модификаций семейства 8051 - их у нее более 100, причем некоторые из них имеют встроенные 10-разрядные АЦП с хорошими характеристиками по быстродействию. У некоторых из них максимальная частота синхронизации достигает 33 МГц, многие имеют специализированную периферию для телевизионной, видео и аудио техники. В последние несколько лет фирмой Philips была освоена Flash-технология и значительно снижена потребляемая мощность, что является очень весомым фактором в вопросе выбора нужного микроконтроллера.

Серьезной альтернативой им могут быть ПЛК фирмы Siemens, которые на сегодняшний день являются самыми сложными из 8-разрядных ПЛК семейства 8051. В них в целом сохранена общая архитектура базового конструктивного варианта, но изменено ядро, что позволило повысить тактовые частоты ( у некоторых модификаций до 40 МГц), в несколько раз увеличить объем резидентной памяти данных, расширить набор периферийных устройств (АЦП, ШИМ-генератор, аппаратный блок умножения и деления), увеличить количество портов ввода/вывода.

Последнее обстоятельство очень важно по следующей причине. Взаимодействие ПЛК, имеющего стандартную архитектуру, с внешними устройствами осуществляется посредством четырех параллельных портов, причем при наличии внешней памяти программ нулевой и второй порты полностью задействованы для ввода адреса ячейки памяти и команды, записанной в ней. Третий порт, как правило, используется для выполнения специальных функций, а именно для ввода запроса внешних прерываний, обмена данными с внешними устройствами через последовательный порт или записью/чтением данных во внешнюю память. Таким образом, полностью свободным часто оказывается лишь один параллельный порт. При необходимости обмениваться данными и управляющими сигналами с большим количеством внешних по отношению к ПЛК устройств наличие одного свободного порта может оказаться недостаточным.

### **3.2. Автономное микропроцессорное устройство для контроля технологических параметров и процессов**

Устройство представляет собой конструктивную основу приборов, предназначенных для измерения технологических параметров, которые, как правило, слабо изменяются со временем или не изменяются совсем. В первую очередь, это геометрические размеры объектов, толщина диэлектрических покрытий на металлическом основании или толщина металлических фольг, постоянные электрические токи и другие. В то же время на его основе можно создавать приборы, требования к быстродействию которых достаточно высоки, например, приборы для контроля радиальных биений валов или для бесконтактных измерений частоты вращения объектов роторного типа на основе спектрального анализа биений объекта [93].

Структурная схема устройства представлена на рис.3.2. Конструктивно оно состоит из двух основных блоков: преобразователя параметров датчиков и контроллера, выполненного на базе однокристального ПЛК 80с31 фирмы Intel. Контроллер осуществляет последовательный или параллельный опрос датчиков, подключенных к устройству; предварительную обработку результатов измерений и их передачу посредством последовательного интерфейса RS-232 в персональный компьютер. Одновременно с этим через один из параллельных портов результаты измерений передаются на индикаторное устройство.

Во внешнем ПЗУ контроллера, объем которого 64 Кбайта, наряду с управляющей программой хранится градуировочный файл, что позволяет выводить результаты измерений как в условных единицах, так и в единицах измеряемой физической величины. Контроллер содержит два параллельных порта, выполненных на микросхемах универсального параллельного программируемого интерфейса KP580BB55A. Через одну из них осуществляется обмен информацией между контроллером и пультом управления, другая является резервной и при необходимости может быть использована для передачи сигналов управления внешним исполнительным устройствам, если того требует специфика решаемой задачи.

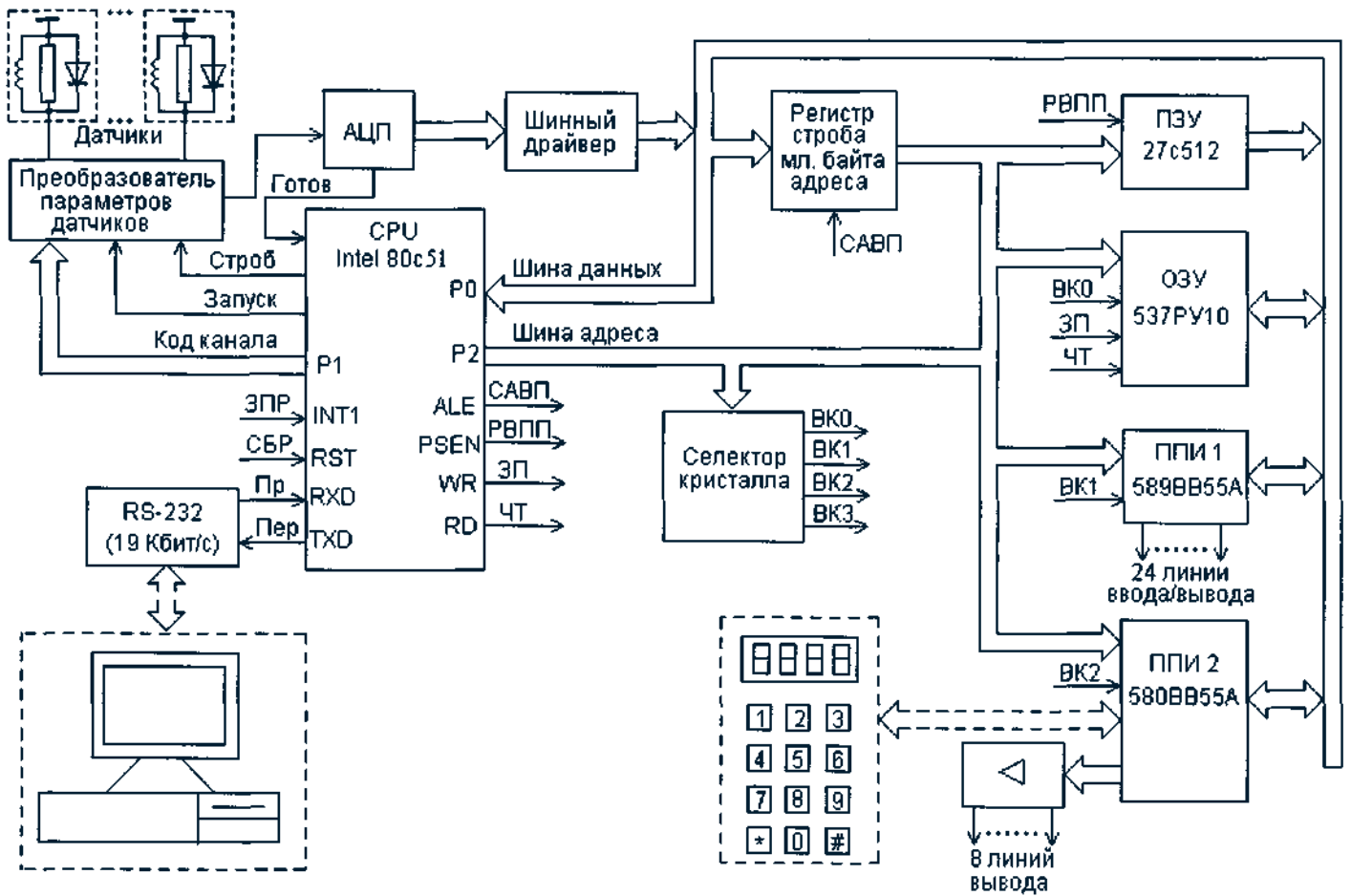


Рис. 3.2. Структурная схема автономного микропроцессорного устройства



Доступ к внешней памяти программ осуществляется при помощи управляющего сигнала РВ1И1, который выполняет функцию стробирования сигнала чтения. Поскольку объем ПЗУ составляет 64 Кбайта должен использоваться 16-разрядный адрес, который формируется на выводах нулевого и второго портов. При этом в режиме временного мультиплексирования через нулевой порт выводится не только младший байт адреса, но и осуществляется ввод данных, записанных по этому адресу в ПЗУ. Сигнал САВП используется для записи младшего байта адреса во внешний регистр. Доступ к внешней памяти данных обеспечивается управляющими сигналами чтения ЧТ и записи ЗП. Детально все связи между структурными блоками контроллера изображены на его принципиальной схеме (рис.3.3).

Селектор кристалла, представляющий собой дешифратор адреса периферийных устройств, осуществляет временное мультиплексирование потоков данных между контроллером с одной стороны и шинным драйвером, оперативной памятью и параллельными портами с другой стороны. Обмен данными между микроконтроллером и персональным компьютером осуществляется в соответствии со стандартом RS-232. При этом гальваническую развязку линий приемника ПР и передатчика ПЕР осуществляют оптронные транзисторные пары АОТ110А. С помощью управляющих сигналов «сброс» (СБР) можно перезапустить контроллер в случае его зависания, а с помощью сигнала «запрос прерывания» (ЗПР) инициировать процесс измерения от кнопки управления, находящейся непосредственно на корпусе датчика.

Работа контроллера организована следующим образом. В соответствии с управляющей программой, записанной во внешнем ПЗУ, вначале устанавливается код номера измерительного канала, а затем вырабатывается управляющий импульс «запуск», возбуждающий переходные процессы в датчиках, и сигнал «строб», определяющий продолжительность однократного измерения. По завершении однократного измерения, заканчивающегося преобразованием аналогового сигнала на входе АЦП в код, по сигналу «готов», поступающему на вход внешнего прерывания, микроконтроллер прерывает текущее выполнение программы и переходит на выполнение процедуры обработки прерывания.

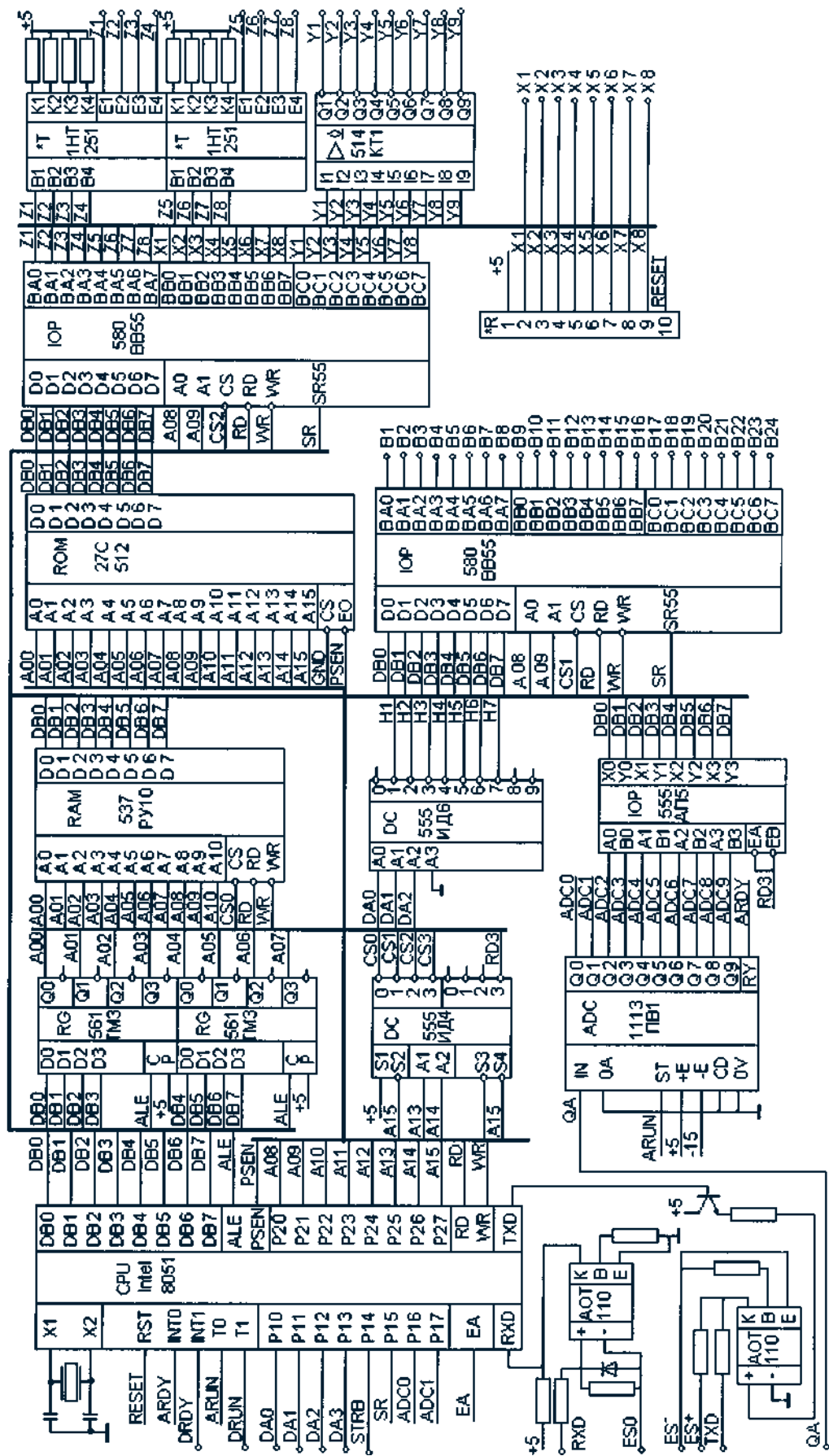


Рис. 3.3. Принципиальная схема контроллера

Это включает в себя считывание цифрового кода с выхода АЦП и его обработку, пересылку результата на индикаторное устройство, а также в буферный регистр универсального асинхронного приемопередатчика и далее в персональный компьютер, если на данный момент он соединен с измерительным устройством.

После этого либо изменяется код номера канала и вырабатываются управляющие импульсы «запуск» и «строб», либо формирование управляющих импульсов осуществляется при том же номере канала. Все определяется выбранным режимом работы. Управляющая программа позволяет организовать работу устройства в двух режимах. Первый режим используется для решения задач, не требующих высокого быстродействия. В этом случае опрос датчиков осуществляется циклически друг за другом, каждый результат измерений сразу же пересылается в буферный регистр универсального асинхронного приемопередатчика ПЛК и через параллельный порт на индикаторное устройство. Второй режим применяется при измерения характеристик быстропротекающих процессов или при решении задач, требующих применения Фурье-преобразования, например, при вибродиагностике объектов контроля. В этом случае результаты измерений каждого их датчиков накапливаются в буферном ОЗУ и лишь по мере его заполнения пересылаются в компьютер. Буферное ОЗУ, выполненное на микросхеме КР537РУ10, имеет объем 2 Кбайта. Это позволяет накапливать в нем до 1024 результатов измерений, что вполне достаточно для спектрального анализа данных, полученных по одному из измерительных каналов.

Обычно приборы, имеющие в качестве конструктивной основы данное устройство, функционируют совместно с персональным компьютером, осуществляющим математическую обработку полученной измерительной информации. Вместе с этим, возможность использования записанной в ПЗУ градуировки, а также имеющиеся в наличии аппаратные средства, в том числе пульт управления с индикаторным устройством и порты ввода/вывода с усилителями тока в выходных цепях, позволяют использовать это устройство автономно. В основном такой режим работы применяется при измерениях, не требующих серьезной математической обработки, например, при измерении геометрических размеров объектов.

### **3.3. Микропроцессорное устройство для сбора и хранения диагностических параметров**

Функциональная диагностика требует, как правило, серьезной математической обработки исходной информации и развитой системы периферийных устройств, в частности, монитора, энергонезависимой памяти, клавиатуры и манипулятора. Поэтому персональный или портативный компьютеры являются неотъемлемой составной частью диагностических комплексов. Вместе с тем, в реальных производственных условиях размещение компьютера в месте проведения измерений может быть по тем или иным причинам затруднено. В таких случаях решением проблемы может быть использование микропроцессорных измерительных устройств, которые способны выполнять три функции: обеспечивать измерение диагностических параметров в полном объеме, хранить результаты измерений достаточно длительное время при отключенном источнике питающего напряжения и, наконец, передавать по мере необходимости результаты измерений в компьютер.

При этом необходимо учесть ряд требований, предъявляемым к подобным устройствам. Во-первых, объем сохраняемой информации может быть довольно большим. Так например, для спектрального анализа обычно приходится формировать выборки из нескольких тысяч отсчетов, при этом информация может поступать одновременно от нескольких датчиков. Использование внешних запоминающих устройств типа «винчестер» приводит к значительному повышению энергопотребления, усложнению конструкции и удорожанию самого измерительного прибора, а использование более дешевой, имеющей невысокую потребляемую мощность Flash-памяти не позволяет обеспечить высокую скорость записи результатов измерений. Поэтому было решено использовать статическую память, которая отличается малым временем записи и чтения данных, низким энергопотреблением, но является энергозависимой. С тем, чтобы обеспечить длительное хранение данных используется литиевая батарея напряжением 3 В, способная поддерживать режим хранения данных при отключении прибора от сетевого напряжения.

Во-вторых, необходимо предусмотреть возможность применения устройств в условиях, когда отсутствует сетевое напряжение, то есть

возможность питания их от аккумуляторной батареи. Поэтому, в целях снижения потребляемой мощности было решено отказаться от использования блока цифровой индикации и пульта управления. Необходимую информацию о состоянии устройства, а именно, в каком из рабочих режимов он находится и не происходит ли сбоев в работе, можно получить от двухцветного светодиода. Задание режимов работы производится с компьютера или используется так называемый режим «по умолчанию».

Структурная схема устройства представлена на рис.3.4. Ее основу составляет программируемый микроконтроллер AT89c51 фирмы Atmel. Выбор этого типа микроконтроллеров обусловлен высокой частотой синхронизации (до 24 МГц), наличием резидентной Flash-памяти программ, а также широким выбором в рамках этого семейства конструктивно и программно совместимых типов, включая и микроконтроллеры с пониженным напряжением питания. Кроме этого, существенным фактором в пользу этого контроллера является его низкая стоимость.

В качестве памяти для длительного хранения результатов используется микросхема статического ОЗУ КМ682000 фирмы Samsung Electronics. Ток, потребляемый микросхемой в режиме хранения, не превышает 0,5 мкА, что позволяет поддерживать режим хранения с помощью резервного маломощного элемента питания. Объем памяти составляет величину 128 Кбайт. Так как все микроконтроллеры семейства 80c51 способны адресовать лишь 64 Кбайт внешней памяти, то ОЗУ подключено по схеме со страничной адресацией (дополнительные адресные разряды формируется программным способом). Такое построение блока ОЗУ позволяет значительно увеличить объем подключаемой памяти вплоть до 512 Кбайт. При этом весь объем памяти разбивается произвольным образом на банки, в каждом из которых хранятся выборки из результатов измерений, полученные от одного или нескольких датчиков одновременно.

Взаимодействие с компьютером осуществляется посредством последовательного интерфейса RS-232. Его организация такая же, что и у рассмотренного выше автономного измерительного устройства, но

скорость передачи данных увеличена в три раза и составляет 57600 бит/с. Это позволяет переслать весь объем информации из ОЗУ в компьютер за 23 секунды.

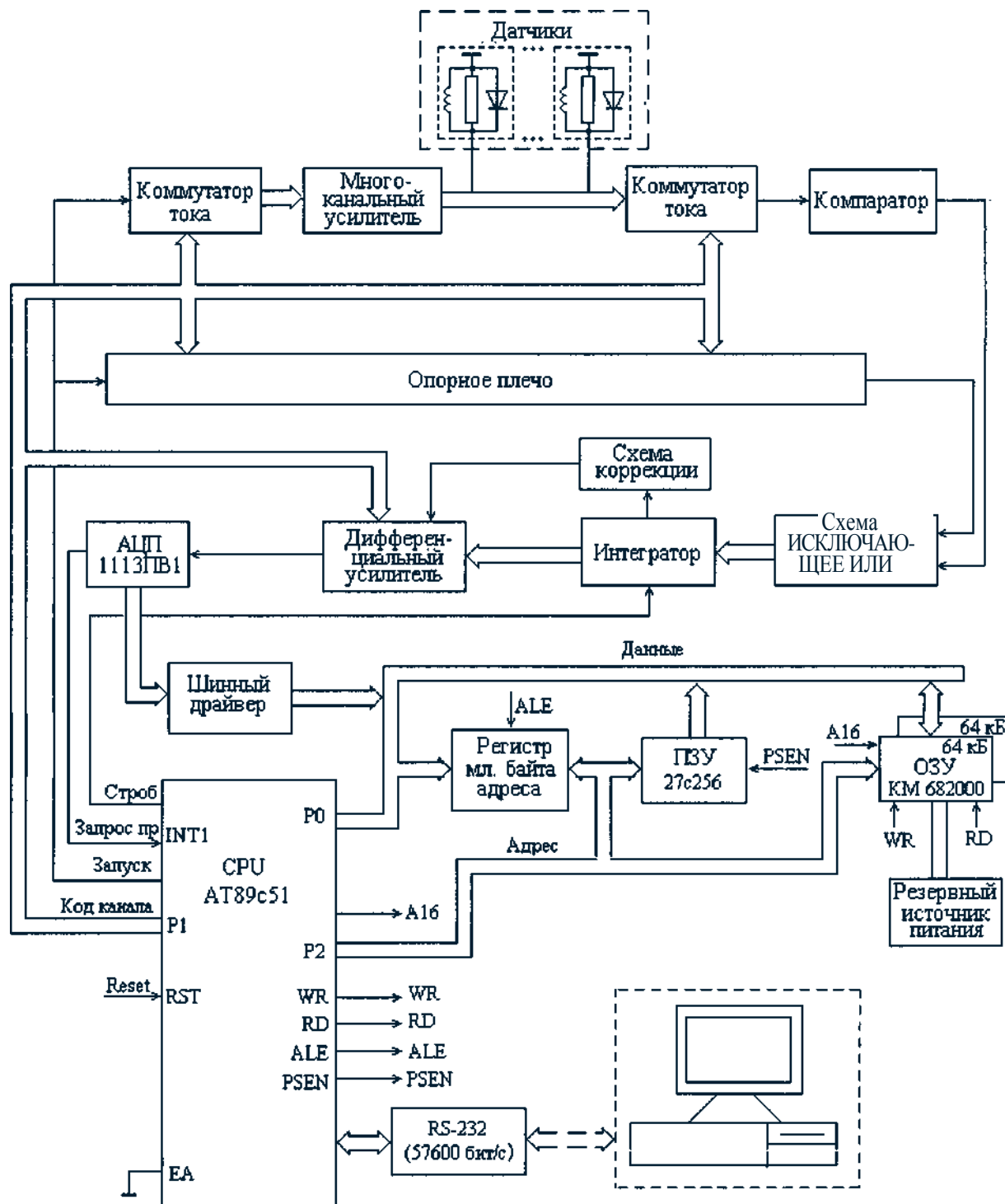


Рис. 3.4. Структурная схема портативного измерительного устройства для сбора и хранения диагностических параметров



Управляющая программа, разработанная на макроассемблере и записанная во внешней памяти прибора, позволяет организовать взаимодействие основных его узлов: микроконтроллера, преобразователя параметров датчиков, оперативной памяти, аналого-цифрового преобразователя, а также блока последовательного интерфейса. В зависимости от решаемых прибором задач возможны три режима работы, а именно:

- «*ПЕРЕДАЧА*» — инициирование процесса измерения, то есть установка номера измерительного канала и возбуждение переходных процессов в датчиках, ожидание завершения процесса однократного измерения, считывание результата измерения с выхода АЦП, формирование пакета данных из двух байт для передачи в компьютер, передача данных через последовательный порт в компьютер без сохранения результата измерения в памяти прибора. В этом режиме подразумевается, что прибор должен быть обязательно подключен к компьютеру.

- «*НАКОПЛЕНИЕ*» - измерение и накопление данных в ОЗУ прибора. Этот режим работы отличается от предыдущего тем, что после измерения данные сохраняются в памяти для длительного хранения, а передача их в персональный компьютер может производиться только по завершении измерений при соответствующем запросе с компьютера. Такой режим не предполагает обязательного подключения прибора к компьютеру в процессе измерений, то есть он может работать полностью автономно в соответствии с настройками, установленными при последнем сеансе работы с компьютером.

- «*ОБМЕН*» - установка рабочих параметров прибора и передача данных из ОЗУ в компьютер. Этот режим предназначен для конфигурирования и получения информации о состоянии прибора (установленный режим работы, частота опроса датчиков, количество подключенных измерительных каналов, объем и количество банков памяти для измерений), а также ввода/вывода данных посредством последовательного интерфейса.



### 3.4. Многофункциональное измерительное устройство

Устройство представляет собой конструктивную основу измерительных приборов, предназначенных как для технической диагностики, так и для контроля технологических параметров и процессов. В нем продолжена общая линия на снижение энергопотребления и, вместе с этим, расширены функциональные возможности приборов в плане количества измеряемых физических величин. Снижение энергопотребления произведено за счет уменьшения количества измерительных каналов (с восьми до четырех) и изменения элементной базы, позволившее снизить напряжение питания с  $\pm 12$  В до  $\pm 5$  В.

Расширить функциональные возможности удалось в результате использования микроконтроллера SAB 80c517 производства фирмы Siemens, имеющего восемь параллельных портов ввода/вывода. Данный микроконтроллер содержит встроенный 10-разрядный АЦП с двенадцатью мультиплексируемыми входами. Последнее обстоятельство позволило, во-первых, отказаться от внешнего АЦП и нескольких обслуживающих его микросхем, тем самым удалось снизить напряжение питания и понизить энергопотребление прибора. Во-вторых, появилась возможность осуществлять измерения сигналов с резисторных датчиков, а также напряжений, вырабатываемых датчиками генераторного типа.

Наличие большого числа параллельных портов ввода/вывода позволило легко реализовать вывод данных на жидкокристаллическое индикаторное устройство, причем никаких вспомогательных микросхем для этого не требуется - коды символов и сигналы управления поступают на индикатор непосредственно от микроконтроллера. В случаях, не требующих формирования массивов данных для последующего спектрального анализа или осциллографии, наличие двухстрочного восьмисимвольного индикатора, как правило, бывает достаточно.

Структурная схема устройства представлена на рис.3.5. Его основу составляет программируемый контроллер SAB 80c517, обеспечивающий установку номера измерительного канала для преобразователя параметров датчиков и выработку сигналов *Запуск* и *Строб*, инициирующих начало процесса однократного измерения, который заканчивается формированием

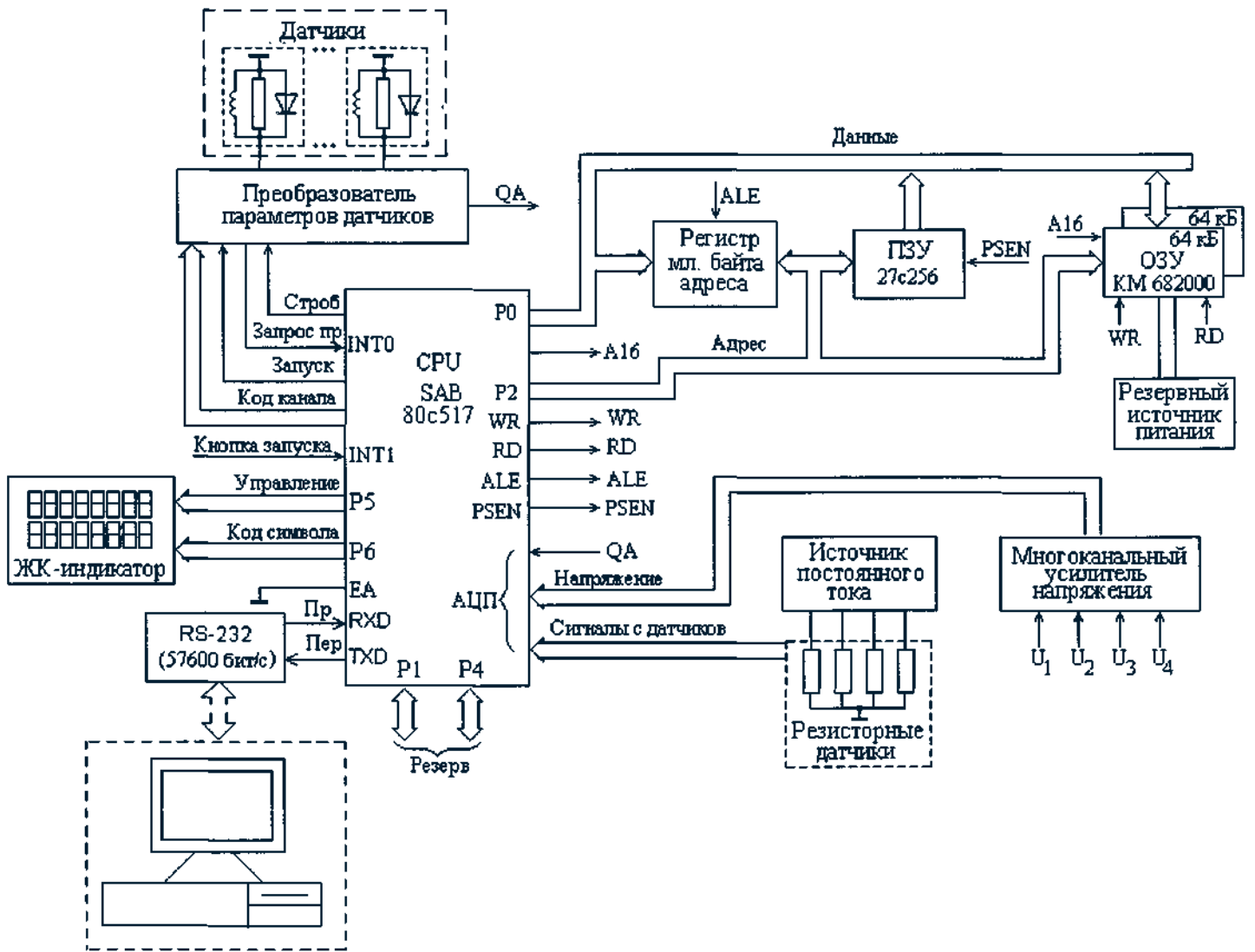


Рис. 3.5. Структурная схема многофункционального измерительного устройства

аналогового сигнала *QA*, пропорционального измеряемой величине, и логического сигнала *Запрос прерывания*, который, обладая максимальным приоритетом, вызывает безусловное прекращение всех текущих операций и переход на процедуру обслуживания данного прерывания. Эта процедура включает в себя выполнение команд управления АЦП и запись цифрового кода результата измерений во внешнюю оперативную память.

В качестве внешней оперативной памяти используется микросхема статического ОЗУ КМ682000, объем памяти которой составляет 128 Кбайт. Вся память разделена на две страницы по 64 Кбайта каждая. Обращение к конкретной странице задается сигналом *A\6*. С целью облегчения процедуры записи/чтения памяти при формировании массивов данных для спектральных или осциллографических измерений, страницы разделены на банки по 8 Кбайт каждый. Такая организация оперативной памяти позволяет осуществлять произвольное чтение любого банка и при необходимости производить модификацию его содержимого. Режим хранения данных в ОЗУ поддерживается маломощным аварийным источником питания на 3 В. Взаимодействие микроконтроллера с внешним ПЗУ организовано обычным для этого семейства контроллеров способом. Старший байт адреса формируется на выводах порта P2, а через порт P0 в режиме временного мультиплексирования вначале выводится и записывается во внешний регистр младший байт адреса, а затем вводится содержимое ПЗУ, записанное по указанному адресу.

Устройство может работать либо автономно с выводом результатов измерений на жидкокристаллический двухстрочный индикатор, либо совместно с персональным или портативным компьютером. В последнем случае обмен информацией производится посредством последовательного интерфейса RS-232 со скоростью 57600 бит/с. Главное назначение устройства и приборов, созданных на его основе, заключается в осуществлении измерения различных физических величин с помощью электромагнитных датчиков. Вместе с этим имеется возможность проводить измерения с помощью резисторных датчиков, для чего в устройство включен источник постоянного тока. Кроме этого возможно непосредственное измерение электрического напряжения, поступающее на вход АЦП либо с делителя, либо с выхода многоканального усилителя.

## Глава четвертая

# **ВИРТУАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ КАК СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ**

### **4.1. Особенности построения современных виртуальных приборов, их основные технические характеристики и возможности**

Под виртуальным прибором, то есть прибором, проявляющимся при определенных условиях, в широком смысле понимают совокупность программно-аппаратных средств, включающих в себя наряду с компьютером плату интерфейса IEEE-488 (приборный интерфейс GPIB-General Purpose Interface Bus) и внешний по отношению к компьютеру измерительный прибор [56]. Программное обеспечение формирует на экране монитора панель управления, обычно схожую с лицевой панелью реального прибора. Управление прибором (переключение режимов работы, диапазонов измерения и т.д.) осуществляется посредством клавиатуры или мыши, при этом результаты измерений «не теряются», как в обычном приборе, а могут быть сохранены в памяти компьютера.

Впервые такой подход в построении автоматизированных измерительных устройств был использован Hewlett-Packard и National Instruments, которые в начале 80-х годов освоили выпуск GPIB для IBM - совместимых персональных компьютеров и рабочих станций [4]. Включение компьютера в измерительную систему позволило, с одной стороны, значительно улучшить основные метрологические характеристики измерительного прибора за счет использования численных методов обработки сигналов. С другой стороны, благодаря наличию развитого периферийного оборудования компьютеров, расширились функциональные возможности приборов по представлению результатов измерения, их анализу, хранению и документированию. Однако это создало и определенную избыточность в конструкции самих приборов, так как часть их функций дублировалась компьютером. К тому же приборы должны были быть оснащены соответствующим приборным интерфейсом IEEE-488, что сказывалось на их цене.

Поэтому был сделан естественный шаг, заключающийся в том, чтобы всю электронную часть измерительного прибора сконструировать на одной печатной плате, размещаемой внутри компьютера, разработать для нее программное обеспечение по сбору данных, их обработке, представлению результатов на экране монитора и хранению в энергонезависимой памяти. Такие платы, называемые платами сбора данных или платами ввода/вывода, активно начали производиться различными фирмами в середине 90-х годов [75]. На их основе стали разрабатываться виртуальные приборы нового поколения, в их числе осциллографы и самописцы, спектроанализаторы и логические анализаторы, мультиметры и широкодиапазонные радиоприемники, частотомеры и генераторы сигналов специальной формы.

В функциональном отношении такие приборы ничем не уступают обычным измерительным приборам с микропроцессором и каналом связи с компьютером, а по стоимости в несколько раз ниже [76]. При этом, благодаря совершенствованию компьютеров и программного обеспечения к ним, а также элементной базы плат сбора данных, характеристики виртуальных приборов непрерывно улучшались. В первую очередь это касается повышения скорости обмена данными и перехода с ISA-шины на PCI-шину, повышения разрядности и быстродействия АЦП, увеличения каналов ввода/вывода.

Одно из основных направлений использования виртуальных приборов это контроль технологических параметров и процессов, что включает в себя слежение за динамикой контролируемых или исследуемых процессов в реальном времени и выработку при необходимости корректирующих воздействий для их изменения и нормализации. Под этим понимается выполнение следующих основных задач [51]:

- экспресс-анализ сигналов в реальном времени;
- включение/выключение процедуры регистрации сигналов и варьирование ее длительности в ответ на внешние события;
- подача тестируемых сигналов на вход проверяемых устройств;
- включение/выключение внешних устройств по временным или ситуационным условиям;

- мониторинг состояния контролируемого объекта с выдачей предупредительных сигналов при его отказах, аварийных ситуациях или отклонениях от штатных режимов работы.

Необходимо отметить одно важное обстоятельство. Реализация перечисленных выше задач предполагает измерение физических величин, многие из которых имеют неэлектрическую природу (перемещение, давление, температура, влажность и т. д.). Большинство же виртуальных приборов спроектировано на ввод только электрических сигналов. Это приводит к необходимости в разработке специальных преобразователей или измерительных устройств, которые должны соответствовать требованиям и возможностям плат сбора данных. Нецелесообразно, например, использовать дорогостоящую плату с 16-разрядным АЦП, если измерительное устройство обеспечивает точность измерений хуже 1%. Также нет смысла сопрягать датчики, быстродействие которых менее 1 кГц, с платой, способной обеспечить частоту дискретизации аналогового сигнала свыше 500 МГц. При этом далеко не всегда адаптация виртуального прибора к решению конкретной измерительной задачи реализуется простыми средствами. Например, согласование параметров входной цепи платы сбора данных и выходного каскада внешнего измерительного устройства обычно предполагает решение следующих задач [8]. Во-первых, необходимо привести уровень сигнала источника к динамическому диапазону АЦП и согласовать их сопротивления. Во-вторых, необходимо обеспечить минимальный уровень наводок. В-третьих, по возможности избавиться от паразитных составляющих сигнала и многое другое. К тому же следует учесть, что зачастую потребителями плат сбора данных являются специалисты разной квалификации, разного уровня подготовки. Все это серьезно ограничивает внедрение виртуальных приборов в производство.

Выход видится во включении в виртуальный прибор первичного преобразователя и разработке соответствующего программного обеспечения, в максимальной степени адаптированного к решению типовых задач, присущих данному преобразователю [81]. Тогда задача пользователя будет заключаться лишь в подключении датчиков к виртуальному прибору, размещению их в зоне контроля и инициализации

соответствующей прикладной программы. Разумеется, это в определенной степени сужает круг задач, решаемых данным прибором, ограничивая его возможностями датчиков и библиотекой прикладных программ, но зато делает прибор более законченным в функциональном отношении.

#### **4.2. Специализированная сенсорная плата расширения для персонального компьютера**

Плата расширения представляет собой конструктивную основу виртуальных приборов, предназначенных для контроля технологических параметров и процессов, а также для решения задач функциональной диагностики. В ней условно можно выделить два блока: преобразователь параметров электромагнитных датчиков и интерфейсный модуль. Первый блок реализует схему преобразования, подробно описанную в главе 2, а именно «измеряемая величина → индуктивность датчика → длительность переходного процесса → длительность импульса рассогласования → напряжение → цифровой код». Интерфейсный модуль обеспечивает взаимодействие центрального процессора компьютера с преобразователем параметров датчиков, что включает в себя формирование управляющих сигналов, необходимых для записи информации во входные регистры и чтения цифрового кода с выхода АЦП при поступлении соответствующего запроса прерывания.

Структурная схема платы расширения представлена на рис.4.1, а электрическая принципиальная схема интерфейсного модуля на рис.4.2. Работа платы организована следующим образом. Обмен информацией между центральным процессором и платой произойдет только в том случае, если на адресных разрядах системной магистрали будет установлен адрес, на который «настроен» селектор адреса платы, реализованный на микросхемах 555JE1 555JA2. Это означает, что если значение адреса в коде команды будет равно 300h, то на выходе микросхемы 555JA2 будет установлен логический сигнал низкого уровня. Это, в свою очередь, позволит управляющему сигналу IOW осуществить запись старшего байта данных с системной магистрали во входной регистр 555IP22 (режим работы), а сигналу IOR - чтение содержимого двух выходных регистров 555IP22, соединенных с системной магистралью посредством



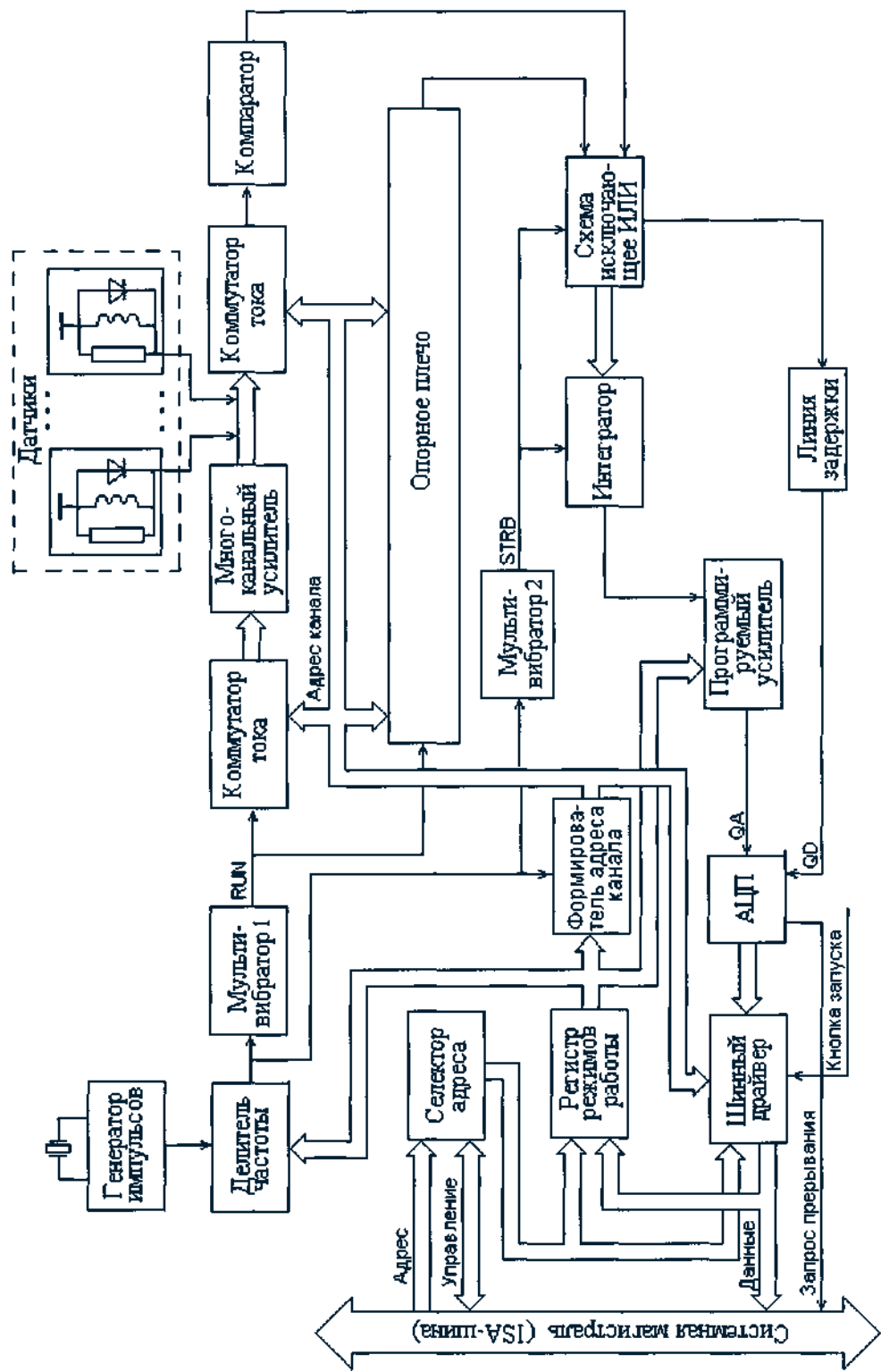


Рис. 4.1. Структурная схема платы расширения

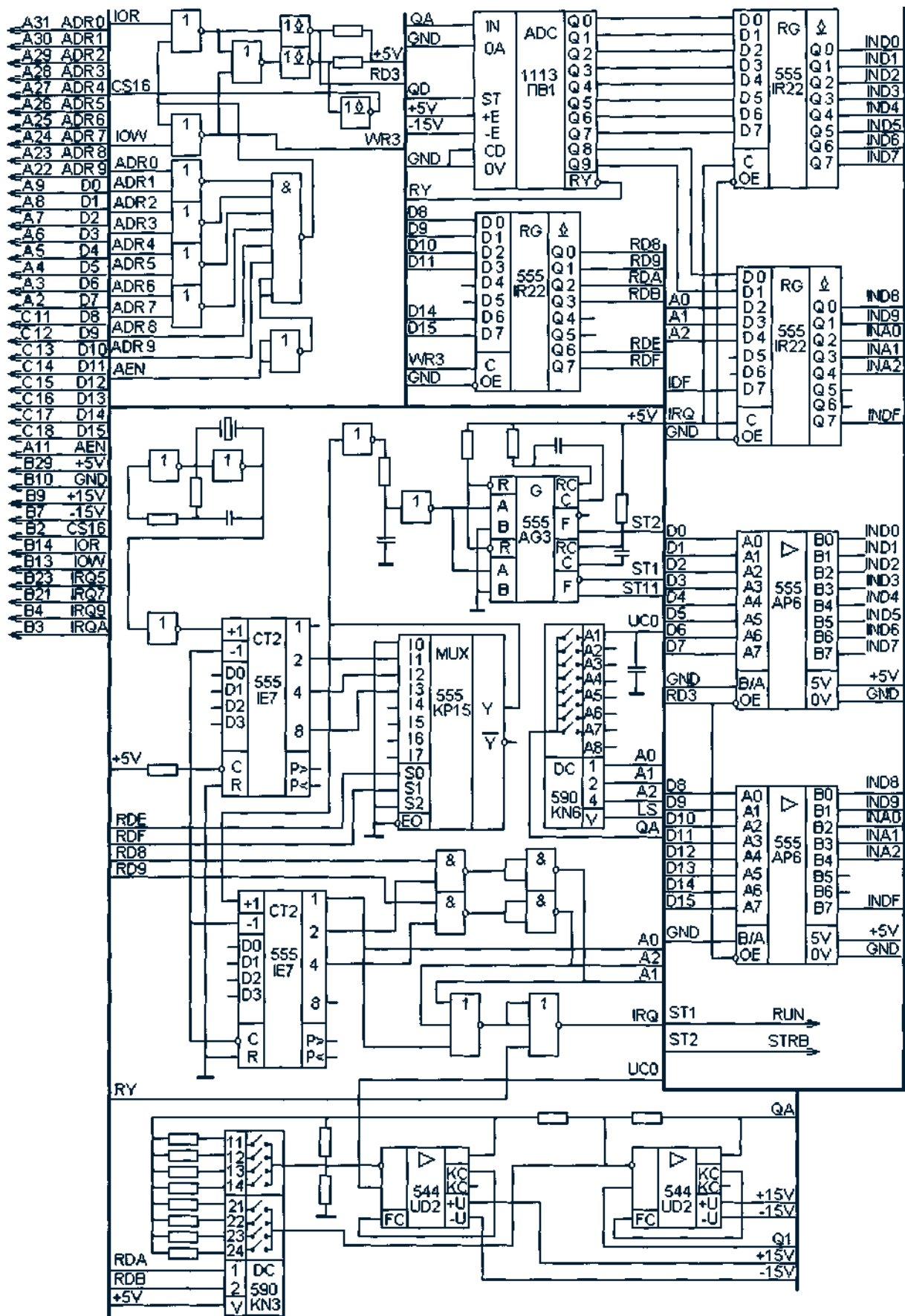


Рис. 4.2. Принципиальная схема интерфейсного модуля платы расширения

двунаправленного шинного драйвера 555АП6. При этом в целях обеспечения максимального быстродействия при операции чтения шинные драйверы настроены на передачу лишь в одном направлении, а именно из платы расширения в системную магистраль компьютера.

Общую синхронизацию осуществляет кварцевый генератор частотой 32 кГц. Как отмечалось выше, время однократного измерения, основанного на возбуждении переходного процесса в датчике и измерения его длительности, составляет величину порядка 50 мкс, причем это время включает в себя и время преобразования АЦП 1113ПВ1. Поэтому необходимо осуществить операцию деления частоты синхронизации на некоторое целое число. Ее выполняют счетчик 555ИЕ7 и мультиплексор 555КП15. Коэффициенты деления, задаваемые программно доступным регистром режимов работы, в зависимости от решаемых задач принимают значения 2, 4 и 8. Частота опроса датчиков при этом получается равной 16, 8 и 4 кГц. Возможность программного изменения частоты опроса датчиков позволяет подбирать оптимальные соотношения между быстродействием и продолжительностью процесса измерения. Дальнейшее уменьшение частоты опроса и увеличение времени сбора измерительной информации, например при определении параметров медленно меняющихся процессов, можно обеспечить программным способом. Регистр режимов работы, кроме установки частоты опроса датчиков, позволяет также задавать количество задействованных измерительных каналов и коэффициент усиления выходного усилителя. Формат данных, записываемых в регистр режимов работы, показан в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Формат данных, записанных в регистр режимов работы

Номер бита					
8	9	10	И	14	15
Количество каналов		Коэффициент усиления		Частота опроса	

С помощью двухканального ждущего мультивибратора 555АГЗ формируются импульс запуска (сигнал RUN), инициирующий переходный процесс в датчике, и стробирующий импульс (сигнал STRB), определяющий длительность однократного измерения. В результате работы преобразователя параметров датчиков на входе программируемого усилителя появляется аналоговый сигнал, пропорциональный измеряемой

физической величине, который усиливается относительно некоторого уровня, задаваемого либо соответствующим стабилизатором, либо получаемого на основе измерений опорного канала, к которому подключены датчики-имитаторы. Программируемый усилитель выполнен на основе двух операционных усилителей 544УД2. С помощью переключателя напряжения 590КНЗ и регистра режимов работы (биты 10 и 11) можно программно изменять сопротивления цепей обратной связи усилителя, изменяя тем самым его коэффициент усиления выходного каскада преобразователя параметров.

Как уже отмечалось, кроме изменения частоты опроса датчиков и коэффициента усиления, с помощью регистра режимов работы можно также программно изменять количество задействованных измерительных каналов, что позволяет за счет отключения части каналов повысить частоту опроса датчиков в оставшихся каналах. Практически это осуществляется записью в старшие разряды адреса А2 и А1 соответствующего кода и реализуется на основе счетчика 555ИЕ7 и нескольких элементов комбинационной логики, управляемых содержимым регистра режимов работы (биты 8 и 9)

Работа АЦП организована обычным для данного типа преобразователей образом. Управляющий импульс (сигнал  $QD$ ), инициирующий начало процесса преобразования, сдвинут во времени относительно момента поступления аналогового сигнала на вход АЦП. Такая задержка необходима для того, чтобы исключить влияние на результат преобразования переходных процессов, возникающих на фронтах сигнала  $QA$ . По запросу прерывания, формируемому АЦП по окончании преобразования аналогового сигнала в цифровой код, центральный процессор считывает два байта данных, формат которых представлен в таблице 4.2. При этом десять бит представляют собой код с выхода АЦП, а три бита - код адреса измерительного канала. Еще один бит представляет собой флаг, сигнализирующий о факте нажатия кнопки запуска измерений, находящейся на корпусе датчика. Опрос этого флага позволяет сразу после нажатия кнопки запуска начать процесс формирования массивов данных для спектрального анализа или выполнять иные задачи.

Таблица 4.2. Формат данных, фиксируемых в выходных регистрах платы

Номер бита															
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Данные с АЦП										Номер канала			-	-	с о аз

Внешний вид платы расширения представлен на рис.4.3 Ее конструкция соответствует стандартам, предъявляемым для аналогичных плат расширения, ориентированных на работу с ISA-шиной. Все датчики подключаются непосредственно к выходному разъему платы, расположенному на задней стенке компьютера, никаких дополнительных согласующих устройств или источников питания не требуется.

Обмен данными между платой и центральным процессором персонального компьютера осуществляется под управлением соответствующего драйвера платы. Драйвер обрабатывает запросы прерывания, что включает в себя чтение цифрового кода с выхода АЦП и формирование буферов по 256 значений на каждый канал. После заполнения буферов выставляются соответствующие флаги, после чего возможно считывание новой порции данных прикладной программой. Такой режим формирования массивов данных позволяет реализовать максимально возможное для данной конструкции платы быстродействие.

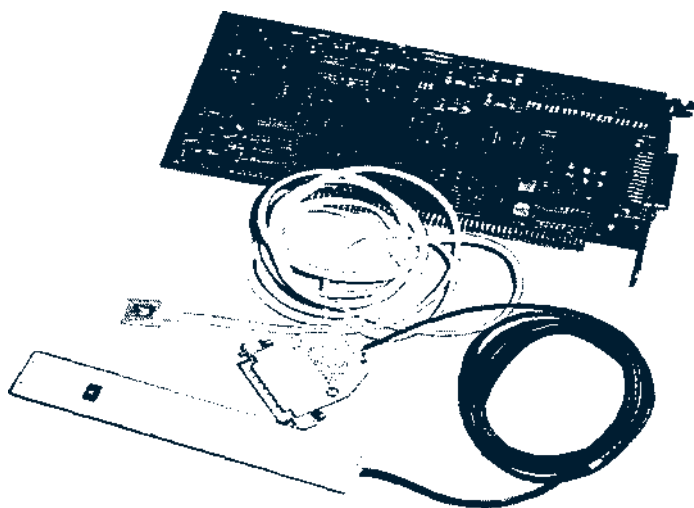


Рис. 4.3. Внешний вид платы расширения

Одновременно с заполнением буферов происходит вычисление средних значений по различным выборкам, объем которых составляет 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 и 2048 значений, формируемых из последних считанных с выхода АЦП результатов измерений. При этом всегда операция усреднения заканчивается установкой соответствующего флага, опрос которого позволяет оперативно считывать усредненные значения и тем самым накапливать массивы данных из результатов измерений с постоянным временным шагом. Какое из усредненных значений выбрать в том или ином случае, определяется спецификой конкретной задачи, и обычно сводится к компромиссному решению между требуемыми быстродействием и общей продолжительностью проведения процедуры измерений.

### **4.3. Многоканальный цифровой осциллограф**

Многоканальный цифровой осциллограф предназначен для измерения и анализа быстро изменяющихся во времени процессов. В отличие от существующих виртуальных многоканальных осциллографов, в которых входной величиной является электрическое напряжение или ток, данный осциллограф позволяет непосредственно измерять как характеристики электрических процессов (напряжение, ток, индукция магнитного поля), так и характеристики механических процессов (перемещения, вибрации, ударные воздействия, линейные и угловые скорости и т.д.). Круг задач, решаемых данным виртуальным осциллографом, может быть очень широк. В качестве конкретных примеров его использования можно привести задачи, в которых требуется измерять параметры радиальных биений вращающихся объектов (турбины, роторы электродвигателей) и вариации их угловых скоростей, характеристики колебаний объектов, возникающих в результате кратковременных ударных воздействий, характеристики низкочастотных полей рассеяния электрических машин, создаваемых протекающими по статорным обмоткам токами, параметры переходных процессов в цепях питания электрических двигателей, возникающие при их включении или выключении; электрические сигналы в цепях зажигания автомобильных двигателей.

Управление работой осциллографа, включающее в себя установку режимов измерений, временного шага опроса датчиков, формата графически представляемых данных, режимов просмотра и анализа фрагментов осциллограмм, параметров ждущего режима и т.д., осуществляется посредством меню и «горячих» клавиш. Вид основного меню программы «Многоканальный осциллограф» представлен на рис.4.4. В качестве примера в верхнем окне изображена осциллограмма затухающих колебаний упругой пластины, подвергнутой кратковременному ударному воздействию. В нижнем окне изображена осциллограмма, представляющая собой реакцию массивного основания на серию кратковременных ударов. В обоих случаях измерения осуществлялись индуктивными датчиками перемещений, изображенными на рис. 2.7а.

В каждом из окон могут быть изображены по одной осциллограмме, полученной по одному из выбранных измерительных каналов. Осциллограммы выводятся либо непосредственно в процессе измерения (режим параллельного вывода графиков), либо после проведения измерений и запоминании результатов в памяти компьютера. Последний режим рекомендуется использовать в задачах, требующих максимально высокой частоты опроса датчиков, то есть когда время, затрачиваемое на построение графиков, может оказать существенное влияние на результаты измерений. Запись результатов в память компьютера (и их последующее чтение) можно осуществить как от каждого из каналов по отдельности, так и от всех каналов целиком.

Режим просмотра графиков включает в себя операцию перемещения курсора в обоих окнах с синхронным выводом в информационные окна измеряемой величины и соответствующего момента времени. Представление результатов в информационных окнах осуществляется как в условных единицах (цифровой код с выхода АЦП), так и в единицах измеряемой физической величины. В последнем случае в файле конфигурации необходимо указать имя соответствующего градуировочного файла. Кроме текущего значения измеряемой величины в информационные окна выводятся ее первая производная (скорость), а также максимальное значение величины на всем временном отрезке.



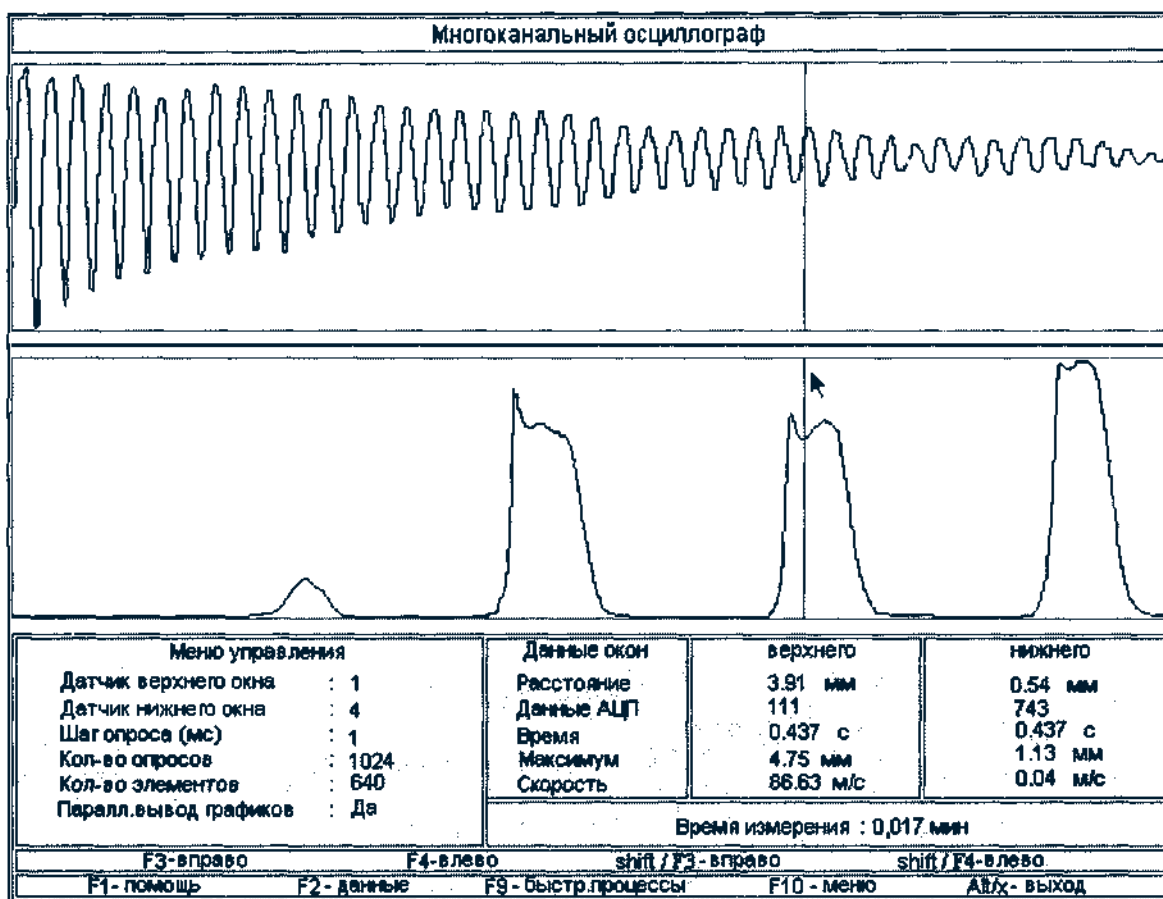


Рис. 4.4. Вид экрана монитора в программе «Многоканальный осциллограф»

При анализе осциллограмм периодических процессов часто возникает необходимость в сравнении отдельных фрагментов, измеренных в различные моменты времени одним и тем же датчиком. Аналогичная задача может также стоять при одновременном использовании нескольких датчиков, например, измеряющих один и тот же процесс, но находящихся в различных пространственных точках. В этих случаях может быть полезна операция перемещения верхнего и нижнего окна относительно друг друга и возможность изменения масштабирующего коэффициента.

В некоторых задачах, например, при измерении ударных воздействий или переходных электромагнитных процессов, возникающих при включении/выключении напряжения питания, важно вовремя начать процедуру измерений. Для решения подобных задач используется ждущий режим, при котором запуск процедуры измерений и формирования массивов данных происходит, как только текущие результаты измерений

от соответствующих датчиков выйдут за заранее установленные пороговые значения. С целью исключения ложных срабатываний, вызванных случайными отклонениями результатов измерений от среднего значения, предусмотрена операция проверки, требующая подтверждения выхода за пороговые значения. Установка верхнего и нижнего порогов может быть осуществлена либо с помощью соответствующей процедуры, либо автоматически.

Рассмотренный алгоритм запуска процедуры измерений, основанный на факте выхода результатов измерений за пороговые значения, обладает одним недостатком. От момента начала исследуемого процесса, вызывающего изменение показаний соответствующих датчиков, до запуска процедуры измерений проходит некоторое время, что может привести к потере информации о начальном этапе исследуемого процесса. С тем, чтобы по возможности исключить это, предусмотрено временное сохранения последних измеренных результатов, количество которых может составлять до 256 отсчетов по каждому измерительному каналу. Это дает возможность добавить к сформированным массивам данных информацию о предистории исследуемого процесса.

#### **4.4. Мультиметр**

Многоканальный мультиметр предназначен в основном для измерения физических величин, слабо изменяющихся со временем или не изменяющихся совсем. Такими величинами, в частности, являются толщина диэлектрических слоев на металлическом основании, толщина металлических фольг, расстояние между датчиком и металлическим объектом, геометрические размеры объекта, величина постоянного электрического тока и т.д. Кроме этого, мультиметр используется при определении погрешностей датчиков, а также при проведении операции их градуировки. Эта операция, осуществляемая на основе кубической сплайн-интерполяции, включает в себя предварительные контрольные измерения узловых точек на эталонных образцах. При этом требования к точности измерений как при оценке погрешности датчиков, так и при их градуировке достаточно высоки.

Управление работой прибора осуществляется посредством «горячих» клавиш. Их основное назначение указано в нижней строке основного меню программы, изображенного на рис.4.5. Все рабочее поле разбито на три окна. В верхнее левое окно выводятся графические образы цифрового кода, снимаемого с выхода АЦП прибора. Графические образы представляют собой горизонтальные линии, длина которых пропорциональна значению цифрового кода. Слева от линий указываются номера измерительных каналов, а справа выводятся значения соответствующих цифровых кодов. При этом на экран могут выводиться как результаты каждого отдельного измерения, так и результаты, полученные в результате операции усреднения серии измерений, для чего используются соответствующие «горячие» клавиши. В качестве выборки для определения среднего значения используются последние 2<sup>n</sup> измерений, где n=2...И.

Наряду с вычислением среднего арифметического, в пределах каждой выборки определяются максимальное и минимальное значения результатов измерений, а также их разность. Эта информация, выводимая в правое верхнее окно, позволяет осуществить дополнительный контроль

Усреднение 64 точки		145 125 740 497 909 809 250			
				140.. 148	: · 8
				121 ,; 130	; ! 9
				735 744	9
				492 , , 502	t ю
				905 . . 913	J t 8
				804 , , 813	! ' 9
				246 , . 254	4 / 8
«					
Номер величина	Измеряемая измерений	Погрешность измерений	Поправка градуировки	Файл	1 канала)
1	Расстояние	63.56мм	0.151MM	0.00	лтлт
2	Расстояние	60.70мм	0.172MM	-3.26	Н2гтп
3	Расстояние	0.45мм	0.002MM	-0.11	Н3S1.TXT
4	Расстояние	0.28 мм	0.001MM	0.00	Н4ШП
Е	Толщина	0.14мм	0.003MM	0.01	Н5В1К1ТКТ
6	Перемещение	7.65мм	0.021MM	-0.22	НБА1ШП
7				0.00	-незаланог
FI Help fInyKey Пауза Enter Попр CtrW					

Рис. 4.5. Вид экрана монитора в программе «Мультиметр»

функционирования платы сбора данных. Если, например, реакция компьютера на запросы прерывания недостаточно высокая, то это может привести к ошибкам чтения цифрового кода с выхода АЦП и, как следствие, к резкому увеличению величины разброса результатов измерений. Таким образом, есть возможность обнаружить и предотвратить эту ситуацию.

В нижнее окно выводится информация о типе измеряемой физической величины и ее численное значение, полученное на основе соответствующего градуировочного файла, имя которого также выводится в это окно. Кроме этого в окне по желанию оператора могут быть представлены результаты работы процедур «Погрешность» и «Поправка». Вызов процедуры «Погрешность» приводит к формированию массива из случайно выбранных результатов измерений за определенный промежуток времени. Объем массива для статистической обработки составляет 30 отсчетов. На его основе вычисляется среднее арифметическое значение и среднее квадратичное отклонение измеряемой величины, утроенное значение которого принимается в качестве случайной погрешности измерений.

После вызова процедуры «Поправка» от оператора требуется провести контрольное измерение физической величины для образца, условно принятого за эталон, и ввести значение измеряемой величины с клавиатуры в компьютер. Разность между этим значением и результатом измерения позволяет рассчитать поправку, которая запоминается в специальном файле и учитывается в дальнейшем во всех измерениях, проводимых данным датчиком.

#### **4.5. Многоканальный детектор-счетчик металлических объектов**

Многоканальный счетчик-детектор предназначен для обнаружения и счета металлических включений в потоке сыпучих сред или технологических жидкостей. В качестве детекторов используются вихретоковые датчики, изготовленные в виде катушек индуктивности, намотанных на диэлектрические каркасы цилиндрической формы. Пролет металлического объекта внутри каркаса вызывает кратковременное изменение параметров датчика, подключенного к одному из

измерительных каналов, что, в свою очередь, сопровождается соответствующим изменением выходного сигнала. Если это изменение превышает программно установленное пороговое значение, то происходит инкрементирование содержимого счетчика. При этом ферромагнитные и неферромагнитные объекты по разному влияют на индуктивность катушек (а значит, и на знак изменения выходного напряжения): первые увеличивают их индуктивность, а вторые уменьшают. Это обстоятельство дает возможность не только обнаружить факт нахождения объекта в зоне контроля, но и определить, к какой конкретно категории объектов он относится.

Вид основного меню программы «Металлосчетчик» показан на рис.4.6. В нижней части экрана расположены информационные окна, в которых указывается количество обнаруженных на данный момент времени объектов (ферромагнитных и неферромагнитных по отдельности). Для удобства работы с прибором, в частности, при проведении операции настройки прибора, а также для контроля его функционирования в информационные окна выводятся текущие значения выходного сигнала и ранее установленные рабочие параметры прибора по каждому из измерительных каналов.

В середине экрана расположено окно, куда выводится график зависимости количества обнаруженных за определенный интервал металлических частиц от времени. Предусмотрена возможность осуществить вывод в это окно результатов измерений по любому из каналов как ферромагнитных, так и неферромагнитных объектов. С помощью курсора и соответствующих «горячих» клавиш можно детально просмотреть отдельные участки графиков с изменением масштаба по оси времени.

В верхней части экрана расположены кнопки-указатели функциональных клавиш, позволяющие выбрать тот или иной пункт меню. Кнопка F1 вызывает оперативную помощь, что включает в себя получение информации о работе прибора и о назначении всех функциональных клавиш. Кнопка F2 позволяет изменить характер представляемой в графическом окне информации, то есть выводить результаты измерений обнаруженных ферромагнитных и неферромагнитных частиц, или же

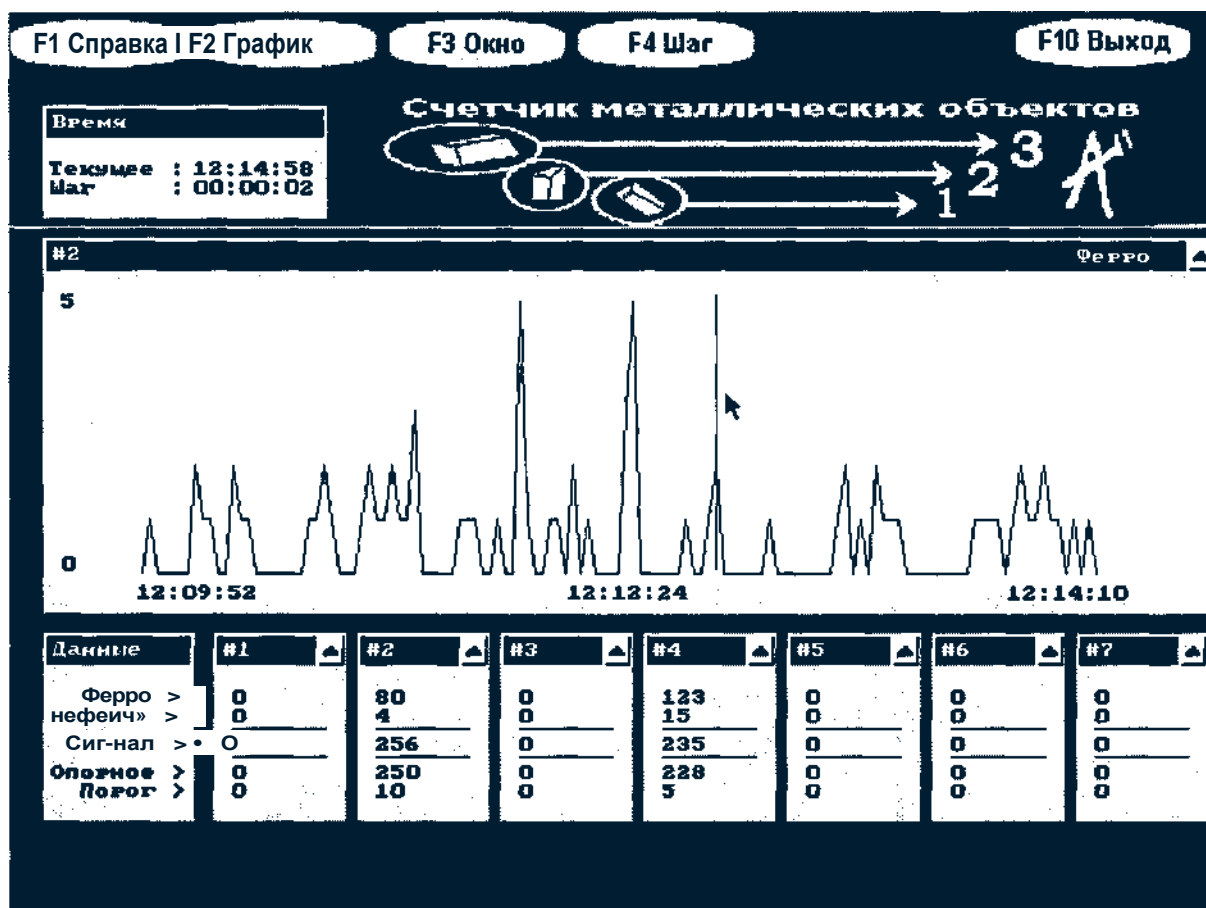


Рис. 4.6. Вид экрана монитора в программе «Металлосчетчик»

выводить в окно только сигнал с выхода АЦП, дающий информацию о потоке того и другого типа частиц. Кнопка F3 осуществляет выход в режим настроек прибора, что позволяет изменять опорное и пороговые значения, производить очистку счетчика, запускать и останавливать процесс измерений. Кроме этого, можно изменять и стандартные настройки прибора, а именно, частоту опроса датчиков, количество задействованных каналов, коэффициент усиления выходного каскада преобразователя параметров датчиков. Кнопка F4 позволяет изменять временной интервал, в течение которого осуществляется накопление и счет обнаруженных металлических объектов. Количество обнаруженных за заданный временной интервал объектов представляется на графике одной точкой. Кнопка F10 останавливает работу прибора и производит выход из программы.

## 4.6. Спектроанализатор

Спектроанализатор предназначен для измерений спектральных характеристик механических и электромагнитных процессов, обладающих определенной временной периодичностью. К таким процессам, в частности, можно отнести вибрации электромеханических объектов, обусловленные вращением или возвратно-поступательным движением подвижных частей объекта; затухающие колебания механических систем, вызванные кратковременным силовым воздействием; низкочастотные электромагнитные поля рассеяния трансформаторов, создаваемые протекающими по их обмоткам электрическими токами, а также множество других процессов.

Измерения спектральных характеристик во многих случаях позволяют за счет соответствующей цифровой обработки повысить точность измерений, а также получить дополнительную информацию об объекте измерения и о измеряемой физической величине. Так например, используемое для питания электродвигателей переменное напряжение промышленной частоты не является чисто синусоидальным, а представляет собой совокупность гармоник с кратными частотами. Влияние этих гармоник проявляется в снижении КПД двигателя, увеличении времени разгона и торможения при его включении и выключении, а также возникновении дополнительных вибраций. Другим важным примером, иллюстрирующим необходимость измерений спектральных характеристик, является вибродиагностика, принцип действия которой основан на сравнительном анализе спектров вибраций испытуемого объекта и объекта, условно принятого за эталон. Кроме перечисленных выше задач Спектроанализатор способен решать задачи, присущие обычному многоканальному осциллографу, то есть выводить измеренные временные зависимости в графические окна и обрабатывать их с помощью соответствующих процедур и функций.

Вид главного меню программы «Спектроанализатор» представлен на рис.4.7, где в качестве примера показаны результаты измерений радиальных биений ротора двигателя постоянного тока. Основные результаты выводятся в два графических окна: в верхнее временные



зависимости, в нижнее - спектральные. Имеется набор сервисных функций, позволяющих детально просмотреть отдельные фрагменты графиков, выбрать тип выводимой в графические окна информации и форму ее графического представления, изменить масштаб по обеим осям. Вызов сервисных функций осуществляется либо с клавиатуры посредством «горячих» клавиш, либо выбором соответствующих пунктов меню с помощью мыши.

Перемещения курсора по графикам, осуществляемые независимо друг от друга, сопровождаются выводом справа и снизу от графиков соответствующей информации о координатах графиков, то есть измеряемой физической величине и соответствующем моменте времени. Значение измеряемой величины может выводиться в условных единицах (код с выхода АЦП), в относительных единицах или в абсолютных единицах измеряемой величины, полученной на основе градуировочного файла. Возможно построение графиков в полулогарифмическом масштабе.

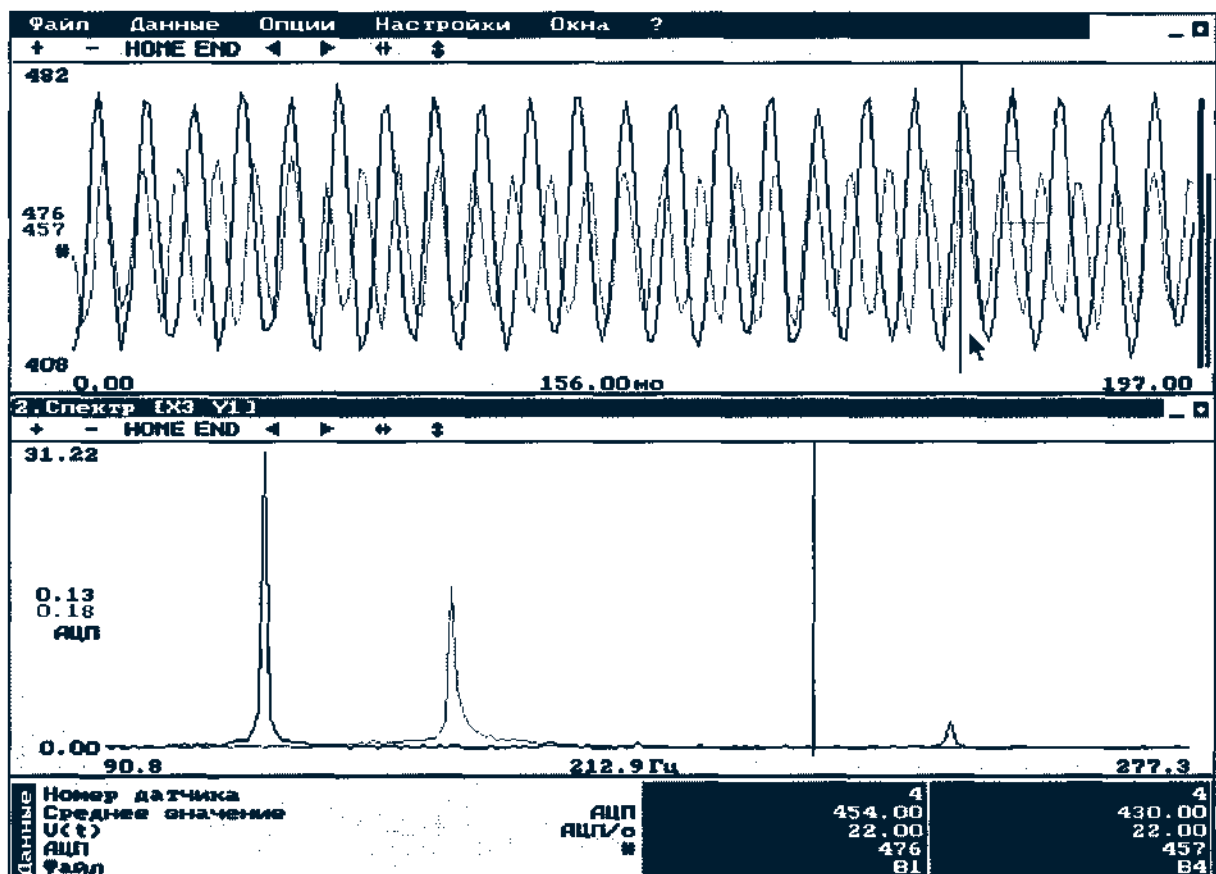


Рис. 4.7. Вид основного меню программы «Спектроанализатор»

В нижней части экрана монитора располагается информационное окно. Вид выводимой в него информации зависит от того, какое из графических окон на данный момент активно. Если активным является верхнее окно, куда выводятся временные зависимости, то в нижнем окне появится информация, показанная на рис.4.7. Если активным является нижнее окно, то наряду с номером датчика выводятся значения частоты и амплитуды основной гармоники, а также максимальные значения первой и второй производных измеряемой величины. В верхней строке экрана представлены пункты меню, выбор которых приводит к появлению пунктов меню нижнего уровня, дающих возможность активизировать процедуры и функции, управляющие работой виртуального спектроанализатора. Назначение этих пунктов следующее.

- *Файл.* Вызывается процедура открытия ранее записанного в библиотеку файла данных или процедура записи в библиотечный файл данных, представленных в данный момент в графическом окне. Имеется пункт, выбор которого приводит к выходу из программы с соблюдением необходимых мер, предотвращающих потерю несохраненных данных. Фрагмент экрана монитора при выборе пунктов меню *Файл* и *Запись* данных, показан на рис.4.8. Здесь же приведен фрагмент экрана при выборе другого пункта меню - *Опции*.

- *Опции.* Этот пункт меню позволяет изменять тип выводимой в графические окна информации (осциллограммы или спектры); проверять, какие из датчиков подключены к плате; изменять режим представления измеренных данных на экране монитора, то есть выводить ли данные в

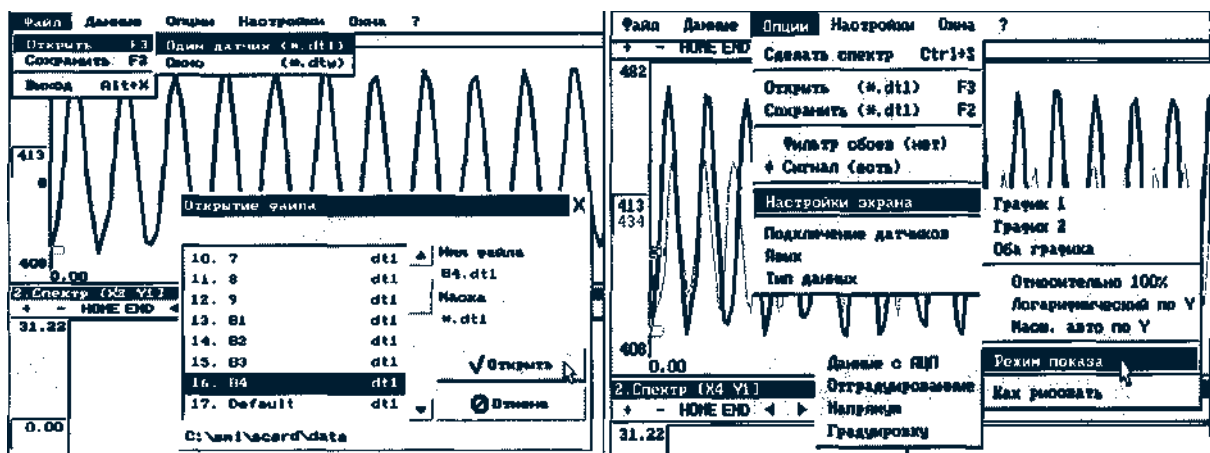


Рис. 4.8. Фрагменты экрана монитора при выборе пунктов меню *Файл* и *Опции*

относительных единицах или полупологарифмическом масштабе, использовать ручное масштабирование или автоматическое, представлять результаты в виде графиков или гистограмм, давать ли поясняющие надписи на русском языке или английском, а также ряд других сервисных функций, облегчающих пользователю обработку и анализ информации.

•*Настройки.* Выбор этого пункта меню позволяет осуществить установку режимов работы виртуального спектроанализатора и контроль функционирования платы. Установка режимов предполагает задание частоты опроса датчиков, количество рабочих каналов, коэффициент усиления выходного усилителя, объем выборки, по которой производится усреднение результатов измерений, а также выбор одного из двух режимов запуска процесса измерений. В обычном режиме запуск производится выбором соответствующего пункта меню мышью, нажатием «горячей» клавиши или кнопки запуска на корпусе датчика. В ждущем режиме процесс измерений и формирование массивов данных начинается при выходе результатов измерений из заранее установленного диапазона или, наоборот, при входе в определенный диапазон. Это дает возможность реализовать различные варианты реакции прибора на внешние воздействия. Параметры пороговых значений для ждущего режима, а также вариант запуска (вход в диапазон или выход из него) задаются для каждого из измерительных каналов индивидуально. С целью исключения несанкционированного доступа к виртуальному спектроанализатору и изменения его настроек предусмотрена возможность установки пароля и его оперативная смена. Фрагменты экрана монитора при выборе пунктов меню *Настройки* и *Данные* представлены на рис.4.9.

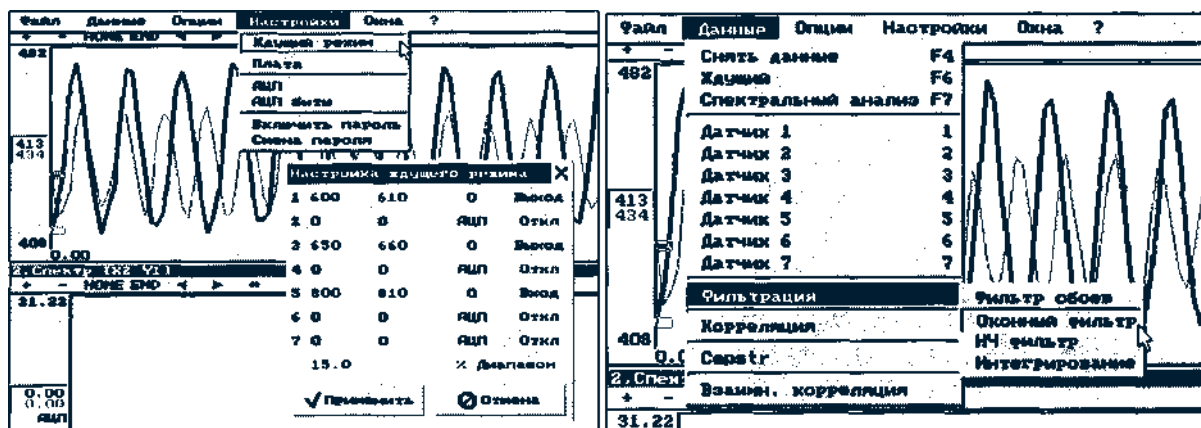


Рис.4.9. Фрагменты экрана монитора при выборе пунктов меню *Настройки* и *Данные*

•*Данные.* Этот пункт меню позволяет выбрать один из возможных режимов запуска измерений (обычный или ждущий), произвести статистическую обработку спектров, полученных на основе измерений нескольких последовательных выборок, вывести в графическое окно результаты измерений от любого из датчиков, а также осуществить необходимую математическую обработку полученной измерительной информации. Математическая обработка включает в себя вычисление автокорреляционной функции сигнала датчика, функции взаимной корреляции сигналов от двух датчиков, кепстров, а также некоторые методы цифровой фильтрации.

Одним из методов цифровой фильтрации является обработка сигнала с помощью оконных функций (так называемая процедура взвешивания-weighting), представляющая собой операцию умножения дискретно-временной последовательности отсчетов  $x[n]$  на оконную функцию  $wfnj$  с последующим преобразованием Фурье. Обработка дискретно-временных сигналов с помощью оконных функций имеет следующее обоснование. Как известно [61], сам факт формирования последовательности  $x[n]$  ограниченной длины из TV отсчетов неявно предполагает умножение бесконечной дискретно-временной последовательности на так называемое «прямоугольное окно»  $rectfnj$ :

$$rect[n] = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq n \leq N - 1 \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Если, например, последовательность  $x[n]$  отражает бесконечно протяженный во времени гармонический сигнал, то влияние прямоугольного окна на спектр этого сигнала проявляется в уширении спектральных пиков и появлении боковых лепестков. Боковые лепестки могут исказить амплитуды соседних спектральных пиков и даже подавить их совсем, что может препятствовать обнаружению в спектре слабых гармоник, если таковые имеются в измеренном сигнале.

Более оптимальны по сравнению с прямоугольным окном другие оконные функции, применение которых позволяет снизить уровень боковых лепестков. Однако это дается ценой уширения главных лепестков в спектре, что, естественно, приводит к ухудшению разрешения.

Следовательно должен выбираться какой-то компромисс между шириной главных лепестков и уровнем подавляемых боковых лепестков. Существует довольно большое количество различных оконных функций, отличающиеся между собой величиной уширения главных лепестков, максимальным уровнем боковых лепестков и скоростью спада амплитуды боковых лепестков [41]. В разработанном нами спектроанализаторе используется следующий набор оконных функций:

функция Ханна :

$$\omega[n] = 0,5 + 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right),$$

функция Блэкмана :

$$\omega[n] = 0,42 + 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right),$$

функция Хэмминга :

$$\omega[n] = 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right),$$

функция Гаусса :

$$\omega[n] = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(2\alpha \frac{n}{N-1}\right)^2\right), \text{ где } \alpha - \text{ параметр,}$$

функция Ланцоша :

$$\omega[n] = \left(\frac{\sin \frac{2\pi n}{N-1}}{\frac{2\pi n}{N-1}}\right)^L, \text{ где } L - \text{ целое число.}$$

Вид оконных функций приведен для целочисленных аргументов, изменяющихся в диапазоне от  $-(N-1)/2$  до  $(N-1)/2$ , а индексы дискретно-временных последовательностей, которые подвергаются процедуре взвешивания, изменяются в диапазоне от 0 до  $(N-1)$ . Поэтому до операции умножения последовательности на весовую функцию они приводятся к одному диапазону.

Конкретный выбор того или иного окна определяется спецификой решаемой задачи. Например, если в спектре анализируемого сигнала

достаточно сильные компоненты расположены как вблизи, так и на отдалении от слабых компонент, то следует выбирать окна с одинаковым уровнем боковых лепестков около главного лепестка [51]. Если же имеется одна сильная компонента, удаленная от слабой компоненты сигнала, то следует выбирать окно с быстро спадающим уровнем боковых лепестков, причем их уровень в непосредственной близости к главному лепестку не имеет большого значения. В том случае, когда нужно обеспечить высокое разрешение между очень близкими компонентами и удаленные компоненты отсутствуют, требуется окно с очень узким главным лепестком и минимальной амплитудой близлежащих боковых лепестков. Если же спектр сигнала достаточно гладок, то можно вообще не применять окна.

В качестве примера на рис.4.10 приведены результаты обработки дискретно-временной последовательности с помощью оконной функции Ханна. Исходная последовательность, сформированная на основе измерений вибраций, представлена в верхнем графическом окне серым цветом (в окне для лучшего восприятия показана лишь часть последовательности). Черным цветом показана модифицированная последовательность, полученная в результате умножения исходной последовательности на оконную функцию Ханна. В нижнем графическом окне показаны результаты Фурье-преобразования исходной и модифицированной последовательности, при этом на вставке приведен фрагмент спектра с увеличенным масштабом по оси частот. Видно, что боковые лепестки вблизи основания спектрального максимума подавлены, но сам максимум стал более широким.

При выборе пунктов меню *Фильтрация* и *НЧ фильтр* происходит вызов процедуры, осуществляющей низкочастотную фильтрацию временного сигнала. Суть этой операции заключается в Фурье-преобразовании исходного сигнала, умножении спектра на функцию фильтра, подавляющую высокочастотные составляющие Фурье-образов, и, наконец, обратном восстановлении сигнала. В качестве фильтрующей функции используется функция Ланцоша для частотной области. Результатом этой операции является уменьшение шумов, присутствующих в исходном сигнале, что может быть полезно при анализе слабых сигналов

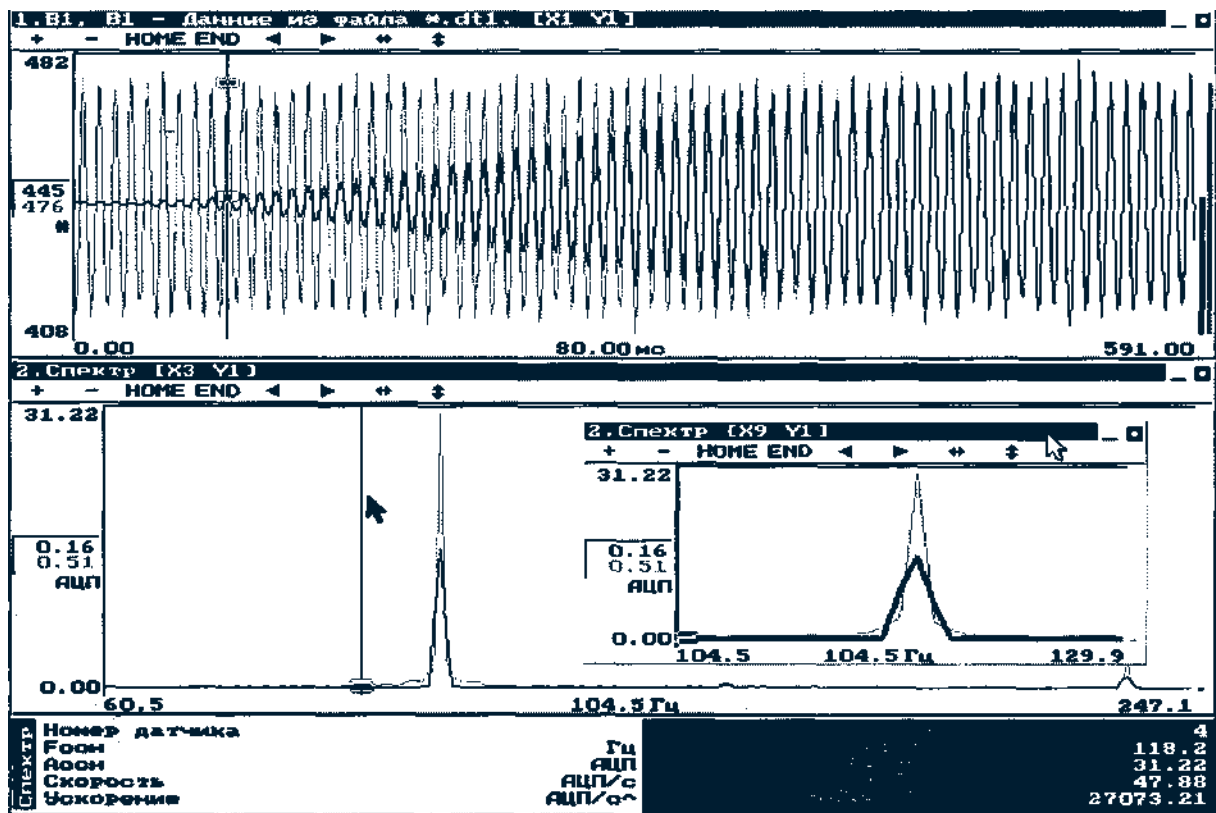


Рис. 4.10. Результат обработки сигнала оконной функцией Ханна

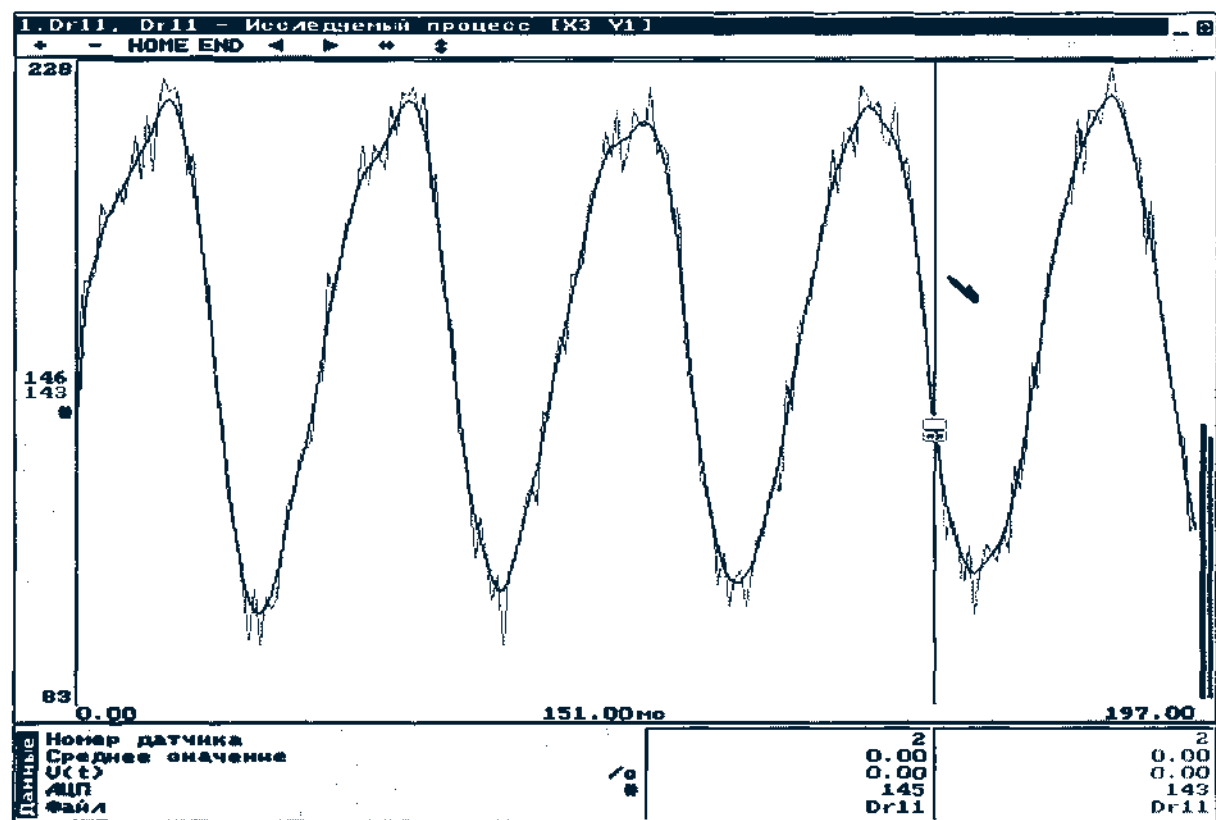


Рис. 4.11. Результат низкочастотной фильтрации сигнала



или сигналов, на которые накладываются серьезные помехи. Для примера на рис.4.11 представлен результат низкочастотной фильтрации некоторого периодического сигнала (на рисунке показан серым цветом). Как видно из рисунка, в результате фильтрации шумы в обработанном сигнале, показанным черным цветом, практически исчезли.

Фильтр сбоев предназначен для предотвращения сбоев в работе специализированной платы расширения, обусловленных недостаточно высоким быстродействием компьютера. В результате недостаточно высокой реакции компьютера на запросы прерывания могут возникать ошибки чтения цифрового кода с выхода АЦП платы. Опыт эксплуатации платы показал, что такая ситуация возможна при работе с процессором 80386SX при установке частоты опроса датчиков 8 и 16 кГц. При включении фильтра сбоев происходит отслеживание резких одиночных выбросов и их сглаживание. Это позволяет использовать плату даже в относительно медленных компьютерах без каких-либо серьезных искажений результатов измерений.

Пункт меню *Интегрирование* предназначен для вызова процедуры, обеспечивающей обработку сигналов от датчиков индукционно-индуктивного типа, сигнал которых пропорционален не измеряемой величине, а ее первой производной. Суть операции интегрирования, подробно описанная в главе 2, заключается в Фурье-преобразовании дискретно-временной последовательности результатов измерений, делении Фурье-образов на множитель, пропорциональный номеру гармоник, изменению фазы гармоник на  $\pi/2$  и, наконец, обратном преобразовании Фурье. Пример использования данной операции приведен на рис.2.11.

Пункты меню *Корреляция*, *Взаим. корреляция* и *Cepstr* позволяют осуществить вызов процедур вычисления автокорреляционной функции, функции взаимной корреляции и кепстра. Функция взаимной корреляции  $r_{xy}(m)$  выражает степень корреляции (меру статистической связи) между двумя сигналами  $x(t)$  и  $y(t)$  в зависимости от их взаимного смещения (параметра задержки)  $m$  во временной области. Для стационарных сигналов она по определению равна [51]:

$$r_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)y(t - \tau)dt.$$

В случае, если сигнал представлен дискретно-временной последовательностью, несмещенная оценка функции взаимной корреляции  $r_{xy}[m]$  согласно [61] равна:

$$r_{xy}[m] = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x[n]y[n+m] .$$

Вычисление функций взаимной корреляции сигналов и определение на основе этого причинно-следственной связи между ними активно используется в многоканальной измерительной аппаратуре. При этом обычно главный интерес сосредоточен не на самих сигналах и их параметрах, а скорее на свойствах и характеристиках физических систем, являющихся причиной различия и связи анализируемых сигналов.

Автокорреляционная функция  $r_{xx}[m]$  является частным случаем функции взаимной корреляции и вычисляется на основе одной дискретно-временной последовательности:

$$r_{xx}[m] = \frac{1}{N-m} \sum_{n=0}^{N-m-1} x[n]x[n+m] .$$

Автокорреляционная функция находит широкое применение в задачах обнаружения слабых периодических сигналов, замаскированных широкополосным шумом, или обнаружения в сигналах так называемого «эха», то есть повторяющегося с уменьшенной амплитудой и временной задержкой главного сигнала.

Кепстр  $C_{xx}[n]$  сигнала определяется с помощью обратного Фурье-преобразования логарифма спектральной плотности мощности, то есть:

$$C_{xx}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \log P_{xx}[k] \cdot \exp\left(\frac{j2\pi kn}{N}\right) ,$$

где спектральная плотность мощности  $P_{xx}[k]$  определяется выражением:

$$P_{xx}[k] = \sum_{m=0}^{N-1} r_{xx}[m] \cdot \exp\left(-\frac{j2\pi km}{N}\right) .$$

Области применения кепстров включают в себя задачи диагностирования (например, определение времени задержки эха), устранение эха, разложение претерпевших свертку сигналов, определение характеристик отражающих поверхностей, анализ речи с обнаружением звонкой речи и определением высоты ее тонов, технической диагностики и так далее [51].

Таким образом, виртуальный спектроанализатор обладает широким спектром возможностей по обработке полученной от датчиков измерительной информации и ее анализу. Это позволяет использовать его не только в задачах контроля технологических процессов, но также и в задачах функциональной диагностики, основанной на спектральном анализе диагностических параметров.

#### **4.7. Анализатор нестационарных процессов**

Рассмотренный ранее спектроанализатор предназначен в основном для измерений и анализа установившихся процессов, что позволяет ограничиваться выборками, сформированными в течение относительно небольшого промежутка времени, причем начальный момент времени формирования выборок совершенно произволен. С учетом того, что спектральные характеристики определяются на основе быстрого Фурье-преобразования, количество элементов в дискретно-временной последовательности должно быть кратно 2". Поэтому, как показал опыт работы со спектроанализатором, вполне достаточным является объем выборки в 1024 отсчета по всем измерительным каналам. Если, например, частота опроса датчиков равна 8кГц и задействованы все измерительные каналы, то продолжительность одного измерения в таком случае составляет около одной секунды.

В задачах, где требуется измерять характеристики неустановившихся процессов, это время может оказаться значительно меньше времени установления стационарного состояния. Среди таких задач можно в первую очередь выделить измерение параметров вибраций при разгоне и торможении (выбеге) двигателей, измерение фазных токов при включении и выключении напряжения питания в электродвигателях и трансформаторах, измерение характеристик затухающих колебаний механических систем, а также человеческой речи и так далее. Так например, измеряя амплитуду вибраций двигателя при его разгоне или торможении, можно обнаружить наличие резонансных частот механической системы, состоящей из двигателя и основания, на котором этот двигатель закреплен. Изменяя процесс затухающих колебаний в некоторых объектах, возбужденных кратковременным ударом, можно

определить наличие в них дефектов типа трещин [46]. Общая продолжительность таких неустановившихся процессов может быть достаточно большой, а увеличение продолжительности измерений за счет уменьшения частоты опроса датчиков при тех же объемах выборок может привести к недостаточной полноте информации о протекании процесса.

Виртуальный анализатор нестационарных процессов предназначен в основном для измерений именно таких процессов, где требуется и большое время измерений, и высокая частота опроса датчиков. При этом в ряде задач его целесообразно использовать для измерения спектральных характеристик и стационарных процессов, поскольку в этом случае есть возможность вычислить, вывести на экран монитора и сравнить между собой спектры нескольких последовательных выборок, что в конечном итоге позволяет повысить точность анализа. В качестве примера на рис.4.12 представлены результаты такого расчета, где измеряемой величиной является электромагнитное поле рассеяния, создаваемое блоком развертки монитора.

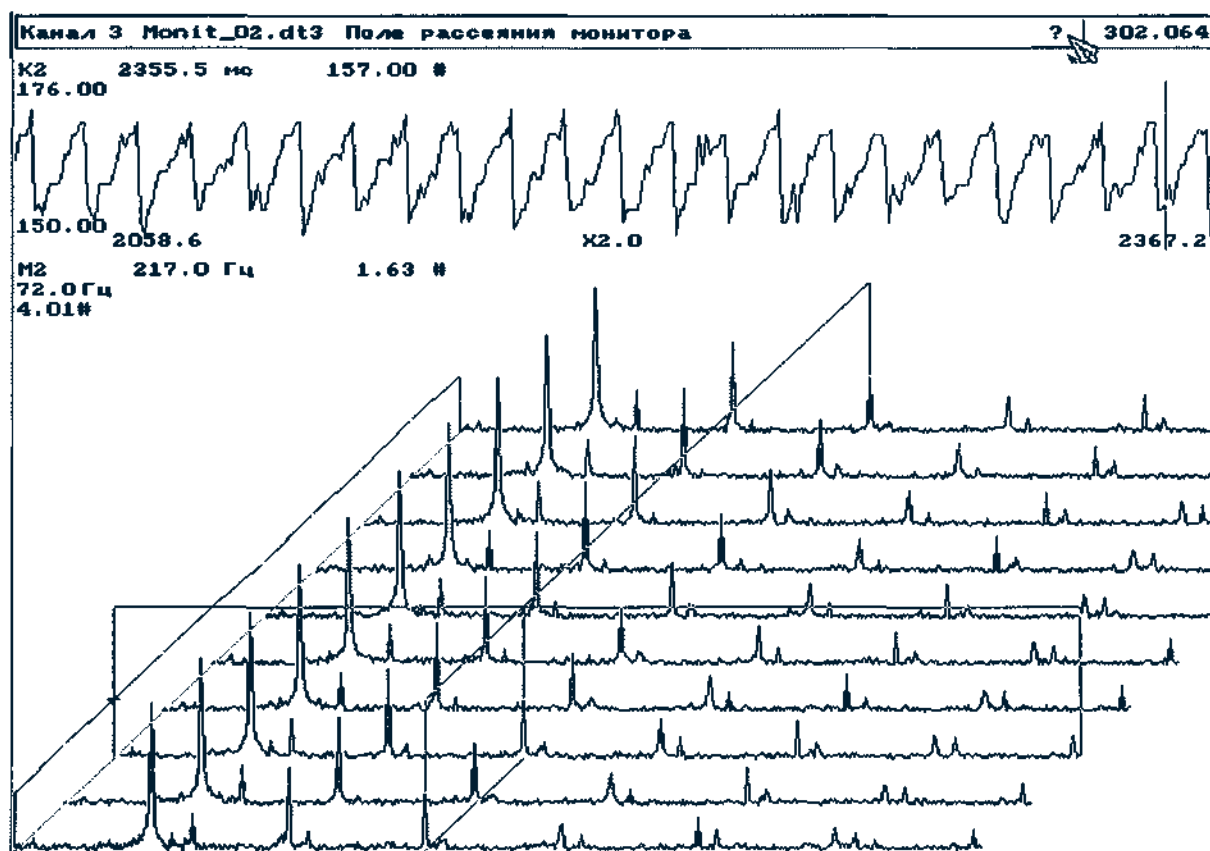


Рис.4.12. Осциллограмма поля рассеяния монитора и его спектры, измеренные в различные моменты времени

Основной метод обработки и анализа нестационарных процессов основан на применении весовых функций, способствующих выделению квазистационарных или соответствующих определенным изолированным событиям временных участков (временных окон или кадров). В качестве весовой функции хорошо зарекомендовала себя функция Ханна. Путем перемещения весовой функции выделяются соприкасающиеся или частично перекрывающиеся дискретно-временные последовательности, в результате Фурье-преобразования которых получается информация об изменениях соответствующего спектра во времени.

Информация в виртуальном анализаторе выводится в два графических окна. В верхнее окно выводится осциллограмма измеренного процесса, полученная по одному из каналов. При этом количество элементов в дискретно-временной последовательности равно 10240. Вся последовательность разбивается на ряд временных окон и для каждого из них вычисляется спектр, выводимый в нижнее графическое окно. Имеется набор сервисных функций, облегчающих анализ графической информации. В частности, есть возможность с помощью курсора просмотреть как осциллограмму, так и все спектры, изменить масштаб по оси абсцисс и переместить графики вдоль этой оси. Слева от графика на плоскость выводится проекция амплитуд гармоник, что позволяет сравнивать спектры между собой. Вся информация, представленная в окнах может быть записана в библиотечный файл и считана из него. Есть возможность получения оперативной помощи (информация о назначении функциональных клавиш и работе прибора), в любой момент можно войти в процедуру настройки платы и изменить рабочие параметры.



Рис.4.13. Осциллограмма тока двигателя при его включении и выключении

В задачах, где измеряемая физическая величина не обладает временной периодичностью, интерес обычно представляет лишь осциллограмма процесса. Пример такого процесса представлен на рис.4.13, где изображена осциллограмма тока двигателя при его включении и выключении, измеренная бесконтактным способом. При этом первый по времени импульс тока, показанный на рисунке, соответствует включению двигателя из полностью заторможенного состояния, остальные два импульса тока - из состояния, когда ротор двигателя совершал вращательное движение по инерции.

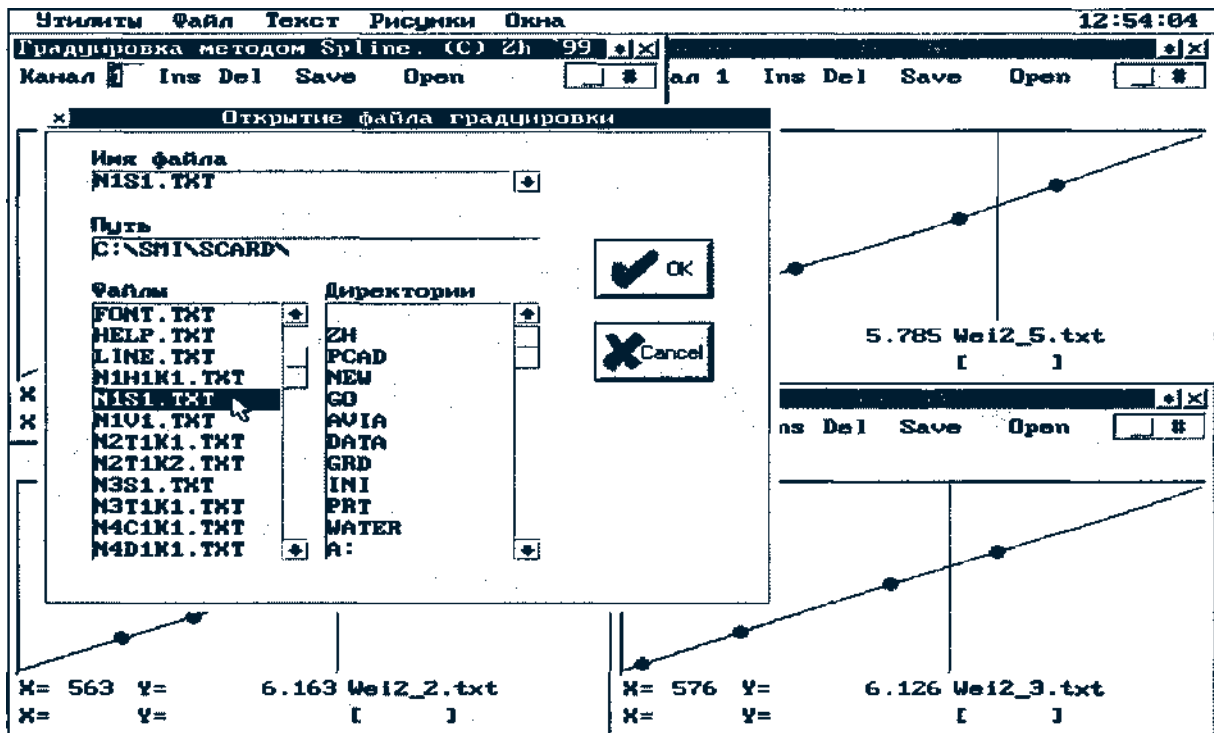


Рис. 4.14. Вид основного меню в программе «Градуировка»

Кроме прикладных программ, управляющих работой конкретных виртуальных приборов, программное обеспечение включает в себя сервисные программы, являющиеся общими для всей совокупности виртуальных приборов. К ним относятся оболочка, позволяющая переключаться с одной программы на другую, а также программы градуировки, получения оперативной помощи, проверки функционирования платы, установки настроек. В качестве примера на рис.4.14 приведен вид основного меню программы, предназначенной для градуировки датчиков на основе сплайн-интерполяции.



Глава пятая  
**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
МАШИН И АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**5.1. Анализ современных методов и средств функциональной  
диагностики электрических машин и автомобильных двигателей**

**Основные понятия и принципы организации  
функциональной диагностики**

Определение технического состояния объектов контроля, в качестве которых выступают транспортные средства, электрические машины, энергетическое оборудование, электронные приборы, коммуникации, строительные сооружения и многое другое, представляет собой важную задачу современного производства, поскольку это напрямую связано с предотвращением аварийных ситуаций, способных не только нанести серьезный экономический ущерб, но и привести к человеческим жертвам. С учетом изменившейся экономической ситуации, приведшей к резкому сокращению финансирования ремонтно-профилактических работ, необходимо по-новому подходить к техническому обслуживанию технологического оборудования и вспомогательных объектов. Если существовавшая ранее система планово-предупредительных работ предусматривала периодическое проведение технического обслуживания и ремонтов через определенные, заранее установленные сроки, то сейчас более рациональным и экономически оправданным является обслуживание по фактическому состоянию. Для организации такого обслуживания необходимы методы и средства, позволяющие оценить состояние объекта на данный момент, проследить изменение состояния за последнее время и спрогнозировать его на ближайшее будущее. Обладая такой информацией, можно производить профилактический ремонт оборудования лишь тогда, когда износ узлов и деталей достигает значений, при которых дальнейшая работа может привести к отказам или неправильному функционированию.

Все перечисленные выше задачи решаются средствами диагностирования, которые вместе с объектом образуют систему диагностирования. В зависимости от особенностей взаимодействия средств диагностирования и объекта, различают системы тестового и



функционального диагностирования [ПО]. В системах тестового диагностирования на объект подаются специально организуемые тестовые воздействия от средств диагностирования, состав и последовательность подачи которых определяют, исходя из специфики задачи, продолжительности операции диагностирования и требуемой достоверности получаемых результатов. Тестовое диагностирование проводят как в нерабочем состоянии объекта, так и во время его работы. В системах функционального диагностирования объект всегда находится в рабочем состоянии; подача тестовых воздействий, как правило, исключается; на объект поступают только рабочие воздействия, предусмотренные его алгоритмом функционирования. Тестовое диагностирование применяется в основном для проверки исправности технического состояния объекта, а также поиска дефектов, нарушающих исправное состояние. Функциональная диагностика применяется для проверки правильности функционирования объекта и поиска дефектов, нарушающих правильность его функционирования.

Обычно объект диагностирования представляет собой сложную систему взаимодействующих элементов (деталей и узлов). Их влияние на возможный выход объекта из нормального режима функционирования различно, а количество элементов может быть довольно большим. Поэтому при осуществлении функциональной диагностики на первом этапе важно выделить те элементы, которые оказывают наибольшее влияние на правильность функционирования объекта. Для определения набора подлежащих диагностированию элементов объектов, выпускаемых серийно и проработавших определенное время, используют результаты анализа количества и причин отказов в процессе эксплуатации объекта (автомобиля, электродвигателя, трансформатора и т.д.). Если диагностируется уникальное оборудование, то выявление элементов, ограничивающих ресурс работы, осуществляют с помощью натурных испытаний объекта или на основе анализа его математической модели.

Определив набор диагностируемых элементов, необходимо выбрать так называемые диагностические параметры, значения которых однозначно связаны с техническим состоянием одного или группы элементов объекта. Эти диагностические параметры характеризуются

номинальными значениями и полем допусков, зависимостью номинальных значений от внешней среды (например, токов утечки изоляции от степени ее увлажнения), закономерностями изменения в зависимости от времени эксплуатации, требуемой точностью измерений и т.д. Связь диагностических параметров с техническим состоянием объекта контроля или его структурными элементами, а также зависимость параметров от указанных выше факторов, как и при установлении набора диагностируемых элементов находится на основе анализа причин отказа оборудования при его эксплуатации, а для уникального оборудования - на основе специальных испытаний или анализа его математической модели.

По информативности параметры условно делятся на две группы: обобщенные и локальные. Обобщенный параметр несет в себе большое количество информации и характеризует состояние нескольких элементов, а локальный - только одного элемента. При определении набора диагностических параметров предпочтение отдается параметрам, имеющим прямую функциональную связь с техническим состоянием диагностируемого элемента, обладающим большой информативностью, доступностью и надежностью средств измерений данного параметра, а также наименьшими трудоемкостью и стоимостью измерений.

После определения диагностических параметров следующим этапом является выбор и разработка методов и средств диагностики. Учитывая широкий спектр объектов диагностирования и, соответственно, широкий спектр диагностируемых параметров, насчитывающий около 200 наименований, методы диагностики используют практически все известные методы измерений физических величин[36, 74]. Например, применительно к технологическому и энергетическому оборудованию методы диагностики включают в себя вибродиагностику и спектральный анализ акустического шума; спектральный анализ электрических токов и напряжений, питающих объект; измерение малых токов утечки изоляции; измерение тепловых полей объекта; ультразвуковую и магнитную дефектоскопию; химический анализ технологических жидкостей (трансформаторных масел, горюче - смазочных веществ) и отработавших газов; измерение механических напряжений элементов конструкции с помощью рентгеноструктурного анализа и многое другое. Не все эти

методы равнозначны и одинаково широко используются. К наиболее значимым, по мнению [43], следует отнести вибродиагностику, контроль тепловых полей с помощью тепловизоров, спектральный анализ электрических токов, химический анализ технологических жидкостей и отработавших газов.

По информативности и достоверности особое место среди них занимает вибродиагностика. Из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяются те, которые прямо или косвенно связаны с техническим состоянием объекта. При этом выбор параметров зависит не только от диагностируемого объекта, но и от типа вибраций, амплитудного и частотного диапазона измеряемых гармоник. Основные параметры вибрационных процессов представлены в таблице 5.1 [110].

Выбор конкретной методики вибродиагностики зависит от структурного, функционального и вибрационного состояния объекта. Если, например, диагностируются элементы конструкции объекта, то в основном используют возбуждение в них затухающих колебаний и анализ изменений собственных частот, декремента затухания или добротности колебаний испытуемого элемента. Если диагностируются корпуса электрических машин, двигателей внутреннего сгорания и т.д., то анализ основан на сравнении измеренных спектров вибраций с эталонными, измеренными у нормально функционирующих объектов. Часто используют спектральный анализ акустического шума и превышение им некоторого порогового значения, а также анализ корреляционных функций. В случае объектов роторного типа, имеющих подшипниковые узлы или зубчатые передачи, анализируют появление в спектре вибраций комбинационных частот, определяемых количеством зубьев в шестернях, размерами и количеством тел качения в подшипниках и т.д. [121]. Используют также анализ кепстров и спектральной плотности мощности.

По способу измерений средства вибродиагностики можно разделить на две группы. К первой группе, использующей контактный способ измерений, в первую очередь следует отнести пьезоэлектрические, емкостные и индуктивные преобразователи, имеющие жесткую механическую связь с объектом. Ко второй группе датчиков, в которых реализован бесконтактный способ преобразования, относятся оптические,

Таблица 5.1. Основные параметры различных вибрационных процессов

Основные измеряемые параметры	Математическое описание	Обозначения
<b>Моногармоническая вибрация</b>		
Виброперемещение Виброскорость Виброускорение Резкость	$X(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi)$ $v(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi)$ $a(t) = -A_0 \sin(\omega t + \varphi)$ $u = da(t)/dt$	$V_0 = \omega X_0$ $A_0 = \omega^2 X_0$ <p><math>\omega</math> и <math>\varphi</math> - циклическая частота и фаза колебаний</p>
<b>Полигармоническая вибрация</b>		
Размах колебаний	$x(t) = \frac{X_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos(n\omega t + \varphi_n)$	$X_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} ,$ $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt ,$ $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt ,$ $\varphi_n = \arctg(b_n / a_n) .$
<b>Широкополосная случайная вибрация</b>		
Дисперсия Среднеквадратичное отклонение Спектральная плотность мощности	$D_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - m_x(t))^2 dt$ $\sigma_x = \sqrt{D_x}$ $S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} r(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau$	$m_x(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt -$ <p>–математическое ожидание</p> <p><math>r(\tau)</math>-автокорреляционная функция</p>
<b>Акустическая вибрация (акустический шум)</b>		
Среднеквадратичное значение звукового давления Уровень акустической мощности	$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$ $УМЗ = 10 \lg \frac{W}{W_0} = 20 \lg \frac{\bar{p}}{p_0}$	<p><math>W_0</math> и <math>p_0</math> - акустическая мощность и звуковое давление, принимаемые за опорные (<math>W_0 = 10^{-12}</math> Вт)</p>

акустические и радиоволновые измерители линейных перемещении, а также индуктивные, вихретоковые и емкостные датчики, не контактирующие с поверхностью объекта. Из первой группы преобразователей наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи. Они обладают хорошими метрологическими характеристиками, широким частотным диапазоном измерений, простотой конструкции и сравнительно низкой стоимостью. Основными недостатками пьезоэлектрических преобразователей являются

высокое выходное сопротивление, низкая помехозащищенность, зависимость результатов измерений от качества контактов, невозможность градуировки датчиков в статическом режиме. Более привлекательны для измерений вибраций бесконтактные датчики индуктивного типа, но их главный недостаток в сравнении с пьезоэлектрическими - невысокое быстродействие.

### **Функциональная диагностика электрических машин**

Под электрической машиной понимают электромеханический преобразователь, который может превращать механическую энергию в электрическую и наоборот. Те электрические машины, в которых происходит преобразование механической энергии в электрическую, называются электрическими генераторами, а машины, в которых совершается обратное преобразование, называются электрическими двигателями. К электрическим машинам относят и трансформаторы, хотя в них не происходит преобразования одного вида энергии в другой. Однако физические процессы, происходящие в трансформаторах, имеют много общего с процессами в электродвигателях и генераторах, что и позволяет относить их к электрическим машинам.

Основными параметрами, измеряемыми при диагностировании электрических машин, являются [110]:

-электрические параметры, включающие в себя отклонения токов и напряжений от номинальных значений (по амплитуде, частоте, фазе), появление высоких гармоник в спектре токов и напряжений;

-вибрационные параметры корпуса электрической машины и ее движущихся узлов;

-параметры тепловых процессов, сопровождающих электромагнитные процессы при нарушениях нормальных режимов и старении конструкционных материалов, в частности, температуры в пазах статора, стержнях ротора, щеточно-контактного аппарата, охлаждающих жидкостей;

-параметры химических процессов, происходящих в охлаждающих и смазочных средах.

Каждый из измеряемых параметров может быть связан с одним или несколькими диагностируемыми элементами (узлами) объекта. В качестве примера в таблице 5.2 приведены данные так называемой диагностической матрицы, связывающей диагностируемые узлы с диагностическими параметрами [109]. Объектом диагностирования в данном случае является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Наличие связи отмечено цифрой 1 на пересечении соответствующих строки и столбца. Из таблицы видно, что информативность различных параметров разная. Так вибрации и акустический шум двигателя связаны с техническим состоянием сразу нескольких узлов, что позволяет отнести эти параметры к обобщенным, а биения выступающего конца вала характеризуют техническое состояние лишь самого вала двигателя и, тем самым, могут считаться локальным параметром.

Таблица 5.2. Диагностическая матрица асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Диагностируемые параметры	Диагностируемые узлы электродвигателя							
	Изоляция обмотки относительно корпуса	Межфазная изоляция	Межвитковая изоляция	Обмотка статора	Короткозамкнутая обмотка ротора	Подшипники	Вал	Активная сталь статора
Вибрация электродвигателя			1	1	1	1	1	1
Акустический шум			1	1	1	1	1	1
Токи, потребляемые из сети			1	1	1			
Момент сопротивления при вращении вала						1	1	
Токи утечки	1	1						
Уровень электрической прочности изоляции	1	1	1					
Радиальные перемещения вала						1		
Биения выступающего конца вала							1	

Наличие в диагностической матрице обобщенных параметров позволяет сделать вывод о том, что между главными функциональными узлами электрической машины (обмотки и сердечника статора, воздушного зазора, ротора, подшипниковых узлов) существуют не только тесные электромагнитные и механические связи, но имеется взаимозависимость между техническими состояниями этих узлов. Это означает, что при возникновении физического повреждения (непосредственной неисправности) в каком-либо одном узле, в других диагностически связанных узлах появляются условные неисправности. Они проявляются как результат изменения вибрационных, акустических и электромагнитных процессов функционирования связанных узлов.

Например, при повреждении подшипников или центровки валов электродвигателя и приводимого им механизма, момент сопротивления, воздействующий на вал двигателя, периодически изменяется с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Периодическое изменение момента сопротивления вызывает появление в токе статора электродвигателя гармонических составляющих с частотами, пропорциональными частоте вращения вала. Выделение этих составляющих и контроль их уровня позволяет обнаружить дефекты в механической части электрической машины.

Расчеты, проведенные в [9], позволили установить связь между фазным током асинхронного двигателя  $i_1$  и моментом сопротивления. В предположении, что при малой величине скольжения  $s$  связь между вращающим моментом электродвигателя и скольжением линейна, а индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора много меньше их активных сопротивлений получено:

$$i_1 = I_{0m} \sin(\omega_1 t - \psi) + \frac{U_{1m} s_0}{R_2} \sin(\omega_1 t - \varphi) + \frac{U_{1m} s_a}{2R_2} [\cos(\beta t - \varphi) - \cos(\gamma t - \varphi)], \quad (5.1)$$

где  $I_{0m}$  и  $\psi$  - амплитуда и фаза тока намагничивания;  $U_{1m}$  и  $\omega_1$  - амплитуда и частота питающего напряжения;  $R_2$  - активное сопротивление обмотки ротора;  $s_0$  и  $s_a$  - постоянная составляющая скольжения и амплитуда периодически изменяющейся составляющей скольжения соответственно. Величина  $p$  определяется соотношением индуктивных и активных



сопротивлений ротора и статора, а величины  $J3$  и  $y$  равны соответственно разности и сумме частот питающего напряжения  $a > \backslash$  и вращения ротора  $a > i$ , то есть  $\$=o)\backslash-a > i$  и  $y=w\backslash+a > 2..$

Как видно из выражения (5.1), в спектре фазного тока статора наряду с гармониками сетевого напряжения должны появиться гармоники с комбинированными частотами. Амплитуда этих гармоник зависит не только от сетевого напряжения и параметров самой электрической машины, но и от амплитуды переменной составляющей скольжения, которая, в свою очередь, определяется амплитудой колебаний момента сопротивления вращению вала и инерционностью вращающихся элементов. Это дает возможность определения механических дефектов электрической машины на основе измерений фазных токов и их последующего спектрального анализа.

Другим важным признаком, характеризующим техническое состояние отдельных узлов электрической машины, является третья гармоника в спектрах фазных токов и напряжений. На основе ее анализа можно оценивать техническое состояние обмоток статора на предмет обнаружения в них межвитковых и межфазных замыканий [18], а также выявлять эксцентриситет и обрывы стержней в асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором [19]. Выбор в качестве диагностического признака именно третьей гармоники не случаен. Известно, что магнитодвижущая сила (МДС) обмотки каждой фазы статора представляет собой сумму неподвижных в пространстве и пульсирующих во времени гармоник:

$$P\phi = \sum_{v=1,3,5,\dots} \wedge P_{\phi v} \sin \omega t \cos va$$

$v=1,3,5,\dots$

Результирующая МДС для каждой гармоники в отдельности может быть найдена сложением данных гармоник всех трех фаз. При этом для третьей (и кратных ей) гармоники в отличие от первой и ряда высших гармоник, сумма МДС всех трех фаз равна нулю, поскольку эти гармоники имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты относительно друг друга на одинаковый угол  $2\pi/3$ . Однако при наличии межвитковых и межфазных замыканий симметрия нарушается, в МДС появляется третья гармоника, вращающаяся в воздушном зазоре в направлении основной гармоники и индуцирующая в фазных обмотках статора соответствующие

составляющие тока. С помощью натуральных экспериментов было показано, что влияние межвитковых замыканий приводит к уменьшению третьей гармоники в поврежденной обмотке и увеличению - в неповрежденных. Для других гармоник изменения на уровне статистического разброса. При возникновении межфазных замыканий в них также наблюдается заметное уменьшение третьей гармоники при одновременном ее увеличении в неповрежденной фазной обмотке.

Влияние эксцентриситета исследовалось на натуральных образцах, в которых обеспечивалась возможность плавного смещения ротора в расточке статора, а для исследования влияния обрывов ротора производилось сверление стержней в пазах [19]. Эксперименты показали, что при наличии эксцентриситета искажаются синусоидальность и симметричность фазных напряжений и токов, появляются дополнительные гармоники, а также растет их амплитуда относительно основной гармоники. Влияние обрывов стержней проявляется в возникновении сильных пульсаций всех гармоник. При этом амплитуда третьей гармоники увеличивается в 3,5 раза больше, чем амплитуда основной гармоники.

Таким образом, измерения электрических параметров (фазных токов и напряжений) позволяют определить техническое состояние механических узлов электрической машины. Существует и обратная возможность — по измеренным механическим характеристикам (вибрациям и акустическому шуму) произвести диагностирование электрических узлов машины (наличие межфазных и межвитковых замыканий, обрывы стержней ротора, асимметрия фазных напряжений). Известно [118, 125], что источниками акустического шума и вибраций работающей электрической машине являются электромагнитные силы, действующие на ротор в радиальном направлении и передающиеся корпусу машины; пульсации вращающего момента, способные возбуждать вибрации статора и акустический шум; магнитострикционные силы в магнитной системе машины; технологические погрешности, обусловленные асимметрией конструкции и приводящие к несбалансированности электромагнитных и механических сил, действующих на ротор; вибрации в подшипниках и вентиляторе.

По мнению [11] наиболее значимыми является первый из перечисленных выше источников. В асинхронной машине существует целый ряд гармонических полей, которые перемещаются относительно друг друга. Как показывает анализ [118], силы радиального притяжения ротора, пропорциональные квадрату суммы магнитных индукций от этих полей, под одной частью окружности ротора будут больше, чем под другой. Вследствие этого возникает радиальное притяжение ротора, направление которого изменяется вместе с вращением ротора. Из-за возникновения неуравновешенных радиальных сил ротор и статор будут испытывать вибрацию, являющуюся одной из причин шума работающей машины.

С тем, чтобы исключить влияние этого фактора на вибрацию электрической машины, в работе [124] измерения вибраций электродвигателя постоянного тока осуществляли после отключения его от источника питания, то есть при выбеге двигателя. При этом формирование выборки из результатов измерений осуществляли не через фиксированные промежутки времени, а после каждого поворота ротора двигателя на фиксированный угол, что позволило получить более качественные спектральные зависимости с точки зрения использования их для диагностирования двигателя.

Авторы работы [77] для оценки качества прессовки обмоток и магнитопровода трансформаторов использовали измерения вибраций в двух режимах работы: холостого хода и нагрузки. При этом в режиме холостого хода предполагается наличие вибраций только активной стали, вибрации обмотки считаются сравнительно малыми и они не учитываются. В режиме нагрузки к вибрациям магнитопровода, которые считаются неизменными из-за постоянства основного магнитного потока, добавляются вибрации обмоток и вибрации элементов конструкции, по которым протекают потоки рассеяния. Измерения в двух режимах позволяют разделить влияние этих источников вибраций и определить тем самым техническое состояние каждого из диагностируемых узлов.

При диагностировании электрических машин наряду со спектральными методами широко используются измерения переходных процессов, возникающих при включении и выключении машин, при

подаче на обмотки кратковременных импульсов тока или возбуждении в корпусе контролируемого объекта затухающих колебаний. В работе [31] анализируются возможности метода, суть которого заключается в том, что на одну из обмоток трансформатора подается прямоугольный импульс низкого напряжения (100...500 В), а с других обмоток снимаются осциллограммы переходных процессов - реакции обмоток на этот импульс. Сравнивая результаты текущих измерений с данными, полученными ранее, можно проследить динамику изменений технического состояния обмоток трансформатора и предупредить тем самым выход его в аварийный режим.

Объектом диагностирования в [34] является асинхронный двигатель. Оценка его технического состояния определяется на основе измерений параметров вращения ротора при его выбеге, то есть сразу после отключения питания. Измеряемой величиной служит электрический сигнал в обмотках статора, возбуждаемый остаточным магнитным полем вращающегося по инерции ротора. По результатам измерений временных зависимостей частоты вращения определяются параметры, позволяющие выявить изменения технического состояния двигателя, обусловленные необратимыми процессами при его старении.

Оценку качества прессовки сердечника статора турбогенератора авторы [24] проводили, используя импульсное возбуждение поперечных колебаний в нескольких сечениях сердечника и измеряя соответствующий виброакустический сигнал. С помощью математической обработки входного сигнала и сигнала отклика вычислялась передаточная функция, из которой определялась резонансная частота в каждом сечении. Значения этих частот, а также время распространения акустического сигнала от точки возбуждения колебаний до места расположения пьезодатчиков позволяют сделать оценку технического состояния статора, включая и систему крепления сердечника к корпусу статора.

Подводя итог вышеизложенному, можно отметить высокую информативность спектрального анализа вибродиагностических параметров и фазных токов электрических машин, в частности, связь дефектов объекта контроля с изменением амплитуд третьих гармоник, появлением в спектре комбинационных частот и пульсаций всех гармоник.

Важную дополнительную информацию о техническом состоянии объектов можно получить на основе анализа корреляционных функций и кепстров, а также на основе измерений характеристик переходных процессов.

При решении задач вибродиагностики измерения вибраций в подавляющем большинстве случаев осуществляют с помощью пьезоэлектрических преобразователей и значительно реже - с помощью индуктивных и вихретоковых датчиков. Из зарубежных фирм-производителей наиболее известна Bruel & Kjaer (Дания), кроме нее вибродиагностическое оборудование выпускают фирмы Schenk, Zedo (Германия), Bently Nevada (США), Castle GR (Великобритания), НКК (Япония) и ряд других фирм. Из отечественных производителей следует отметить НПП «Мера» (г. Мытищи), фирму ВиКонт (г. Москва), НПП «Мета» (г. Екатеринбург), Всероссийский теплотехнический институт (г. Москва).

Разработанная НИИ «Мера» компьютерная автоматизированная система непрерывного контроля и диагностирования (КАСНКД) предназначена для контроля технического состояния энергетических установок (турбо- и гидроагрегатов, генераторов). Диагностика осуществляется на основе измерений таких параметров, как среднеквадратичные значения виброскоростей, размах виброскоростей и виброперемещений, амплитуда гармоник виброперемещений, спектр, амплитудно-фазо-частотная характеристика в нестационарных режимах (выбег/разбег). При этом измерения абсолютных вибраций, осуществляемые с помощью пьезоэлектрических датчиков, проводятся в частотном диапазоне 10... 1000 Гц для виброскоростей и 0,8...200 Гц для виброперемещений. Диапазон частот относительных виброперемещений, измеряемых вихретоковыми датчиками, составляет величину 0...500 Гц. Приведенная погрешность измерения виброперемещений и виброскоростей для всех датчиков составляет величину 5% [38].

Что касается измерений таких диагностических параметров, как фазные токи и напряжения, то какое-то стандартное оборудование промышленностью не производится. Имеются отдельные научно-практические разработки, предназначенные либо для решения чисто

научных задач, либо изготовленные в единичных экземплярах и используемые в качестве испытательных стендов на некоторых предприятиях [10, 31, 19, 107]. Для измерений фазных токов обычно используются измерительные шунты, для измерений фазных напряжений - соответствующие делители. Гальваническая развязка осуществляется с помощью трансформаторов или с помощью специальных разделительных усилителей [107], позволяющих реализовывать практически безинерционную измерительную систему, что очень важно при проведении, например, измерений характеристик переходных процессов. Все это указывает на важность и актуальность разработок диагностического оборудования, обладающего способностями измерять не только вибрации объекта контроля, но также и другие диагностические параметры, такие как, фазные токи и напряжения, акустические шумы. При этом необходимо учесть, что измерения должны осуществляться как в стационарном, так и в переходном режимах, а сложность обработки полученной в ходе измерений информации требует обязательного включения в измерительную систему компьютера.

### **Функциональная диагностика автомобильных двигателей**

Оценку технического состояния отдельных узлов автомобиля в процессе его эксплуатации осуществляют с помощью приборов, встроенных в автомобиль. Такие приборы способны обнаружить лишь серьезные нарушения в работе, а дефекты, связанные с относительно небольшим снижением мощности двигателя, увеличением расхода топлива, повышением токсичности выхлопных газов и т.д., могут быть не замечены даже опытным водителем. В современных автомобилях с системой распределенного впрыска топлива, управляемой контроллером, диагностику двигателя и узлов, обеспечивающих его работу, осуществляет сам контроллер. Он выдает соответствующие коды неисправностей, облегчающие специалисту поиск и устранение дефекта. Вместе с тем, эта диагностика позволяет выявить лишь небольшую часть дефектов, возникающих в процессе эксплуатации автомобиля. Более полную и объективную оценку технического состояния автомобиля вообще и



двигателя, в частности, можно получить лишь на диагностических стендах или при помощи специальных приборов.

Самым важным узлом любого автомобиля является двигатель, а также узлы, обеспечивающие его работу (системы зажигания и подачи топлива, генераторная установка, стартер и аккумуляторная батарея). Поэтому основное внимание уделяется диагностированию именно этих узлов. Можно выделить четыре основные задачи, решаемые в процессе диагностирования:

1. Определение и сравнительный анализ мощностных показателей двигателя в целом и его цилиндров в отдельности при различных частотах вращения коленчатого вала.

2. Контроль состава рабочей смеси и концентрации токсичных веществ в выхлопных газах, к которым относятся главным образом углеводороды (несгоревшее топливо), окись углерода и окись азота.

3. Определение давления газа в надпоршневом пространстве в конце такта сжатия для каждого из цилиндров.

4. Измерение и анализ напряжений и токов в первичной и вторичной цепях системы зажигания.

Эффективную мощность двигателя определяют на специальных тормозных стендах или с помощью приборов, основанных на бесстендовых методах измерений. Из тормозных стендов наибольшее распространение получили роликовые стенды (с беговыми барабанами), имитирующими сопротивление качения при разных скоростях движения автомобиля. Для создания нагрузки в стендах чаще всего применяют вихретоковые тормозные устройства, обеспечивающие высокую стабильность тормозных характеристик и широкий диапазон плавной регулировки.

Среди бесстендовых методов определения мощности, развиваемой двигателем, наиболее простым является метод, основанный на поочередном отключении отдельных цилиндров двигателя при его работе [130]. Выключенные цилиндры создают нагрузку для двигателя, что приводит к снижению частоты вращения коленчатого вала тем больше, чем больше мощность отключаемых цилиндров и чем меньше мощность работающих. Особенно эффективен этот метод для двигателей с



небольшим количеством цилиндров. Другой бесстендовый метод определения мощности двигателя основан на измерении кинематических характеристик свободного разгона автомобиля (без внешней нагрузки). Мощность рассчитывается на основе измерений угловых скоростей в начале и конце некоторого временного интервала  $t_{изм}$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - угловые скорости в начале и конце времени измерений;  $J_{пр}$  - приведенный момент инерции движущихся масс двигателя (постоянный для данной модели двигателя коэффициент).

$$P = \frac{J_{пр} (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{2t_{изм}}$$

В автомобилях с электронной системой дозирования топлива содержание остаточного кислорода в отработавших газах, измеренное специальным датчиком (А,-зондом), используется для точного контроля процесса сгорания топливно-воздушной смеси. Основу датчика составляет твердый электролит из ZrO-керамики. При высокой температуре этот электролит становится электропроводящим и генерирует характерный гальванический заряд, который является показателем содержания кислорода в газе.

Содержание оксида углерода в отработавших газах определяют путем измерения интенсивности каталитического окисления СО или степени поглощения отработавшими газами инфракрасного излучения. Второй метод обладает более высокой точностью измерений и достаточно высокой селективностью, что позволяет отдельно определять все основные компоненты отработавших газов: СО, СО<sub>2</sub>, NO, СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>. Принцип действия оптического газоанализатора основан на избирательном поглощении ИК-излучения молекулами газов, то есть каждая компонента газа поглощает излучение определенных длин волн. Основу датчика составляет фотоакустическая ячейка с двумя оптическими каналами, один заполняется анализируемым газом, в другом содержится чистый воздух или азот. Излучение, модулированное по интенсивности, поглощается газами того и другого канала, вызывая в них вследствие теплового расширения акустические волны, которые регистрируются специальным конденсаторным микрофоном.

Давление газов в надпоршневом пространстве в конце такта сжатия (компрессию) можно определить с помощью специального прибора - компрессометра, принцип действия которого основан на преобразовании давления газа в цилиндре в линейные перемещения поршня компрессометра. Передача давления газа из цилиндра в компрессометр осуществляется через свечное отверстие, что позволяет проводить измерения только для неработающего двигателя. Более предпочтительным методом, позволяющим измерять давление газа в цилиндре работающего двигателя, является косвенный метод, в котором измеряется ток стартера при запуске двигателя. В основу метода положена зависимость создаваемого стартером крутящего момента (а значит и потребляемого им тока) от давления сжатого газа в цилиндрах двигателя. Обычно в качестве датчика тока используется шунт, включаемый между аккумуляторной батареей и корпусом автомобиля.

Измерение и анализ напряжений и токов в первичной и вторичной цепях системы зажигания является одной из самых важных задач, поскольку наибольшее относительное число отказов в процессе эксплуатации автомобиля с карбюраторным двигателем падает именно на систему зажигания [110]. Кроме оценки состояния непосредственно самих обмоток катушки зажигания на предмет выявления обрывов и межвитковых замыканий, измерение осциллограмм электрических процессов позволяет определить углы замкнутого состояния контактов прерывателя и углы опережения зажигания для каждого из цилиндров, состояние контактов прерывателя и свечей зажигания и т.д. Измерения обычно осуществляют с помощью осциллографа, на вход которого поступают сигналы от специальных датчиков, позволяющих бесконтактно измерять ток и напряжение с проводов первичной и вторичной цепей системы зажигания. В качестве датчиков в этих случаях используют токовые клещи и емкостные делители напряжения.

Важную информацию о состоянии механических узлов двигателя дают измерения виброакустических параметров. Переменность нагрузки и изменение направления действующих сил в цилиндропоршневой группе, кривошипно-шатунном механизме, всех подшипниках и механизме газораспределения при наличии зазоров в местах сопряжения приводит к

ударам, вызывающим вибрации деталей механизма и всего двигателя. Колебания деталей при этом происходят с собственными частотами, характерными для каждой детали. Фазы колебаний, вызванных ударными воздействиями в механизмах двигателя, связаны с углами поворота коленчатого вала двигателя. Поэтому при диагностировании с использованием виброакустических сигналов возможна их временная или фазовая селекция, а также частотная селекция в диапазоне частот собственных колебаний этих деталей. Так например, при оценке зазоров в сопряжении поршень-гильза наиболее информативный участок спектра расположен в диапазоне частот 2...4 кГц, для поршневых колец - в диапазоне 10... 16 кГц, для шатунных и коренных подшипников - в диапазоне 0,5...2 кГц [НО].

Диагностирование генераторной установки, обеспечивающей нормальную работу двигателя, обычно осуществляют с помощью осциллографических измерений выходного напряжения. При исправных выпрямляющих диодах и обмотках генератора выходное напряжения содержит пульсирующую составляющую, обладающую хорошей периодичностью. В случае межвитковых замыканий, обрывов в обмотках статора, коротких замыканий или обрывов в выпрямляющих диодах форма выходного напряжения меняется, что позволяет обнаружить дефект. Для диагностирования подшипников генератора можно использовать любые виброакустические методы, дающие информацию об общем состоянии каждого из подшипников.

Современное диагностическое оборудование по сложности, функциональным возможностям и стоимости можно разделить на три группы. Первая группа включает в себя стационарные диагностические комплексы, изготовленные в виде стойки с компьютером и вспомогательным оборудованием. Параметры двигателя измеряются с помощью датчиков, входящих в комплект и подсоединяющихся к поворотной консоли. Среди основных фирм-производителей такого оборудования в первую очередь следует отметить фирмы Bosch (Германия), Siemens (Германия), Automotive Diagnostic (США), Sun Electric (Голландия). Возможности таких комплексов очень большие. Так, например, диагностический комплекс FSA 560 фирмы Bosch позволяет

диагностировать бензиновые и дизельные двигатели с числом цилиндров до 12, контактные и бесконтактные системы зажигания с одно- и двухискровыми катушками зажигания, системы подачи топлива (механические и с электронной системой впрыска, для карбюраторных и дизельных двигателей), электронную систему управления автоматической коробкой передач, электронную систему безопасности [48].

Так, при проверке системы зажигания измеряются угол протекания тока (аналогично УЗСК в контактной системе зажигания), угол опережения зажигания, величина напряжения на клеммах катушки зажигания, значения тока и напряжения разрыва, напряжение пробоя искрового промежутка свечи, напряжение и длительность искрового разряда. В некоторых комплексах измеряют даже количество колебаний, происходящих в катушке зажигания после окончания искрового разряда. Помимо параметров системы зажигания, такие приборы позволяют проверять работу пусковых устройств и энергоснабжения, величину разрядки газа за дроссельной заслонкой, частоту вращения коленчатого вала, а встроенный газоанализатор - состав выхлопных газов. Чтобы сравнить эффективность работы цилиндров, используются специальные режимы - так называемый мощный баланс с автоматическим или ручным отключением цилиндров. Замер давления смеси в цилиндре в конце сжатия производится за один цикл работы стартера (примерно за 8-10 секунд) по амплитуде пульсаций его тока.

Эксплуатация столь многофункциональной диагностической системы существенно облегчается за счет встроенной информационно-диагностической системы на CD-ROM, способной идентифицировать 158 автомобильных систем 28 марок автомобилей, содержащей схемы и графики встроенных систем, электрических схем, планы расположения шлангов. Система содержит информацию о заводских параметрах диагностируемых элементов, обеспечивая оптимизацию процесса диагностирования.

Вторая группа приборов это диагностические комплексы на основе портативных компьютеров Среди фирм-производителей таких комплексов можно отметить Bosch (Германия), Lucas (Англия), Interro (США). По своим возможностям приборы данной группы практически ничем не

уступают выше рассмотренным стационарным комплексам, а стоимость их в несколько раз ниже. Такие приборы изготавливаются в модульном исполнении. К основному процессорному блоку с монитором и клавиатурой подключается один из модулей (например, четырехканальный осциллограф или четырехкомпонентный газоанализатор), который предназначен для измерения определенной группы параметров и является связующим звеном между датчиками и компьютером. В качестве примера можно перечислить возможности портативного мотор-тестера PDA 100A производства фирмы Interro: диагностика электронной и обычной систем зажигания с количеством цилиндров до восьми; графическое представление данных по системе зажигания и давлению в цилиндрах; определение эффективности работы цилиндров; измерение пускового и зарядного тока; возможность вывода информации на специализированный дисплей или принтер и т.д. [16]

И наконец, к третьей группе относятся мотор-тестеры с автономным питанием, не предполагающими совместную работу с компьютером, однако, как правило, имеющие встроенный микроконтроллер для обеспечения специализированных измерений и эксплуатационных удобств. Такие тестеры, отличающиеся друг от друга по своим возможностям, выпускает довольно большое количество фирм, в том числе и отечественных. Так например, тестер ДСТ-2М, принятый заводами АВТОВАЗ и ГАЗ в качестве базового диагностического инструмента для отечественных автомобилей с электронными системами впрыска топлива и зажигания, обладает следующими возможностями. Он способен считывать коды неисправностей системы управления, исправлять их, просматривать параметры, поступающие с датчиков, управлять исполнительными механизмами, накапливать данные и просматривать их для обнаружения и анализа неисправностей. Базовой концепцией, заложенной в конструкцию тестера, является возможность расширения области применения за счет системы аппаратных и программных картриджей, позволяющих диагностировать автомобили с различными системами электронного впрыска топлива.

## 5.2. Использование полей рассеяния для оценки технического состояния электромеханических объектов

Поле рассеяния или поток рассеяния-это часть магнитного поля (магнитного потока), создаваемого протекающими по обмоткам электрической машины токами. Рассмотрим более подробно это понятие на примере трансформатора (рис.5.1). Токи  $I_1$  и  $I_2$ , протекая по обмоткам, создают магнитные потоки, которые накладываясь друг на друга, образуют результирующий магнитный поток трансформатора. Его можно разложить

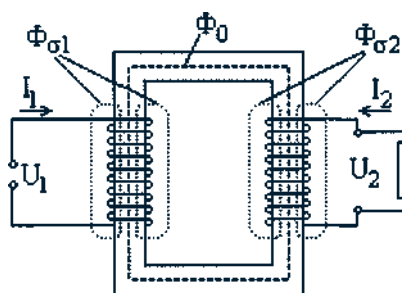


Рис. 5.1. Составляющие магнитного потока трансформатора

на три составляющие. Одна из этих составляющих (поток  $\Phi_0$ ) замыкается по магнитопроводу трансформатора и сцепляется полностью с витками первичной и вторичной обмоток. Поток  $\Phi_0$  называется главным потоком или потоком взаимной индукции. Два других потока имеют ту особенность, что каждый из них сцеплен только с

витками одной из обмоток и не участвует в передаче энергии из одной обмотки в другую. Потоки  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  называются потоками рассеяния соответственно первичной и вторичной обмоток. Аналогичным образом вводится понятие потоков рассеяния для электрических двигателей и генераторов, в которых роль первичной и вторичной обмоток играют обмотки статора и ротора.

Потоки рассеяния значительной своей частью замыкаются вне магнитопровода, то есть по воздуху или маслу. Так как магнитные проницаемости неферромагнитной среды во много раз меньше, чем стали, то магнитные сопротивления этих участков будут большими и магнитным сопротивлением на участке в магнитопроводе можно пренебречь. Вследствие большого магнитного сопротивления на их пути потоки рассеяния будут относительно небольшими. Поскольку магнитная проницаемость среды мала и постоянна, то это приводит к тому, что поля рассеяния будут пропорциональны соответствующему электрическому току. Это дает возможность, измерив характеристики поля рассеяния, получить информацию и об источнике этих полей, то есть об



электрических токах, протекающих по обмоткам трансформатора, статора, ротора электродвигателя и т.д. Тем самым появляется возможность для оценки технического состояния электромеханических объектов использовать в качестве диагностических параметров поля рассеяния как замену или как дополнение другим диагностическим параметрам — фазным токам и напряжениям.

Измерение полей рассеяния у разобранных электродвигателей и использование результатов измерений для оценки их технического состояния используется довольно давно [109]. Однако небольшие величины магнитных полей рассеяния и относительно невысокая чувствительность соответствующих датчиков практически исключали возможность диагностирования работающих электрических машин. Лишь в последние несколько лет в научной литературе стали появляться сообщения о тех или иных разработках, в которых решалась задача измерения полей рассеяния у объектов, находящихся в рабочем состоянии. Появились приборы для измерения слабых постоянных и переменных магнитных полей с возможностью ввода результатов измерений посредством последовательного интерфейса RS-232 в компьютер [128]. Это дает возможность использовать данные приборы для диагностики электрических машин.

Непосредственное использование полей рассеяния для решения задач диагностики описано в [126], где в качестве объектов диагностики выступают электродвигатели, устанавливаемые в стиральные машины, а сама процедура измерений осуществляется на специальных стендах. Авторы [32] для измерения полей рассеяния мощных трансформаторов предложили конструкцию индукционных датчиков, имеющих довольно большие габариты и стационарно монтируемые вблизи обмоток трансформатора, что, естественно, не позволяет использовать их для диагностирования каких-либо других объектов. Кроме оценки технического состояния объектов, измерение полей рассеяния могут быть использованы для решения других задач, в частности, для определения частоты вращения двигателя на основе вычисления основной гармоники поля рассеяния [123]. Другая задача - регулировка частоты вращения и



электромагнитного момента асинхронного двигателя на основе измерения характеристик поля рассеяния [131].

В ряде задач по диагностике электрических машин использование в качестве диагностических параметров полей рассеяния более предпочтительно, чем фазных токов. Например, при диагностике автомобильных генераторов, большинство из которых имеет встроенные выпрямительные диоды на выходе, измерить индуцируемый в обмотках генератора переменный ток не представляется возможным без его демонтажа. Анализ же пульсаций выпрямленного тока позволяет обнаружить лишь серьезные дефекты типа коротких замыканий в диодах или обрывов обмоток генератора. Спектральный анализ полей рассеяния генератора позволяет получить необходимую информацию для обнаружения более слабо проявляющихся дефектов, например, межвитковых замыканий. В ряде случаев измерить в реальных производственных условиях питающий электродвигатели ток бесконтактным способом технически довольно сложно, поскольку доступ к силовому кабелю может быть затруднен. Реальным выходом в этом случае может быть измерение полей рассеяния электродвигателя. Тем не менее, несмотря на очевидные достоинства и необходимость измерения полей рассеяния как дополнительного источника диагностической информации, работа в этом направлении практически не ведется, а количество публикаций на эту тему исчисляется единицами.

В разработанном нами автоматизированном диагностическом комплексе [96] оценка технического состояния производится на основе измерений целого комплекса параметров, а именно вибраций, фазных токов и полей рассеяния. Поля рассеяния измеряются с помощью магнитоиндуктивных датчиков, описанных в главе 2. Их чувствительность позволяет измерять постоянные и переменные магнитные поля с индукцией на уровне единиц микротесла, что дает возможность диагностировать маломощные электрические машины, а также приборы бытового назначения, электромагнитные клапаны, реле и т.д.

В качестве примера на рис.5.2 представлены осциллограммы поля рассеяния, создаваемого электрической дрелью. Диапазон изменений сигнала с выхода 10-разрядного АЦП в данном случае составляет около

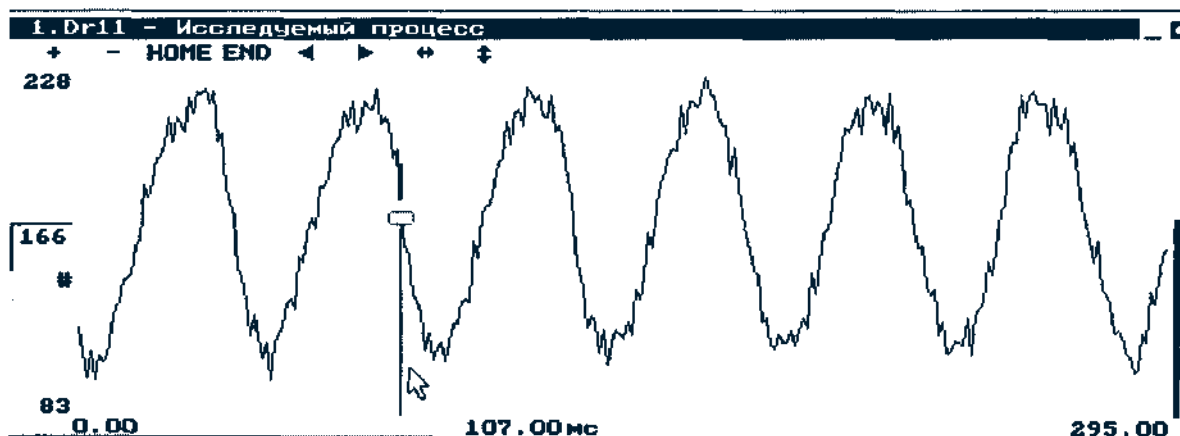


Рис. 5.2. Осциллограмма поля рассеяния электрической дрели

150 единиц. Преобразовывать цифровой код в единицы измеряемой величины (в амперы) нет необходимости, поскольку для диагностики важно не абсолютное значение измеряемой величины, а ее спектральный состав, то есть отношение амплитуд всех гармоник к амплитуде основной гармоники, а также их фазы. Сравнение спектров полей рассеяния от электродвигателей и соответствующих спектров питающих эти двигатели электрических токов позволяют сделать вывод, что и те и другие спектры имеют примерно одинаковую информативность с точки зрения функциональной диагностики.

### 5.3. Комплекс для функциональной диагностики электрических машин на основе персонального компьютера

Электрические машины относятся к достаточно сложным объектам функциональной диагностики. Их техническое состояние можно определить<sup>^</sup> лишь получив полную информацию о диагностических параметрах всех узлов и элементов, образующих диагностируемый объект. Взаимосвязь этих элементов такова, что нарушения в работе одного из них могут повлиять на диагностические параметры, характеризующие состояние других элементов. Это может сильно усложнить поиск дефектного узла или привести к ошибкам в оценке технического состояния объекта. Как отмечалось выше, возникновение межвитковых и межфазных замыканий в обмотках электрической машины приводит к появлению в спектрах ее фазных токов высокочастотных гармоник. Наличие дефектов в подшипниковом узле электродвигателя или нарушения центровки вала

приводимого им механизма вызывают периодические изменения момента сопротивления, что также приводит к искажению спектров фазных токов, в частности, в них появляются гармоники с комбинированными частотами. Амплитуда этих гармоник зависит от степени проявления дефекта, а также от напряжения питания. Если качество сетевого напряжения невысокое, что может быть вызвано, например, подключением к сети импульсных блоков питания большой мощности или другого энергоемкого оборудования, то спектральный состав фазных напряжений сильно отличается от идеального, в нем появляются высокочастотные гармоники. При этом искажения напряжения питания могут носить нерегулярный характер, если причина их появления обусловлена подключением к сети энергоемкого оборудования (например, сварочного аппарата).

Таким образом, при наличии нескольких источников, вызывающих похожие изменения диагностических параметров, дать однозначную оценку технического состояния объекта с указанием конкретного дефектного узла, практически очень сложно. Поэтому необходимы комплексные измерения максимально полной совокупности диагностических параметров. При этом измерения большинства из них должны проводиться одновременно, что предполагает полную синхронизацию работы всех измерительных устройств.

Серьезные затруднения при решении такой задачи может вызвать следующее обстоятельство. Многие из диагностических параметров отличаются между собой по физической природе, их измеряют разными методами, используя разные датчики и измерительные устройства, осуществляющие преобразование сигналов с датчиков. Если, например, вибрацию измерять пьезоэлектрическими датчиками, электрические токи - с помощью шунтов, а поля рассеяния - с помощью магнитомодуляционных преобразователей, то обеспечить синхронизацию в работе всех используемых измерительных устройств и осуществить ввод результатов измерений в компьютер может оказаться очень непросто.

Решение проблемы видится в использовании многофункционального устройства, способного с помощью какого-то одного типа датчиков измерять большую совокупность различных физических величин, характеризующих техническое состояние объектов. Такими широкими

функциональными возможностями, кроме датчиков резисторного типа, обладают лишь электромагнитные датчики. С их помощью можно осуществлять измерения практически всех, наиболее значимых диагностических параметров, в том числе вибраций, фазных токов, напряжений, полей рассеяния, а также характеристик акустических волн и температуры.

Разработанные нами приборы для функциональной диагностики электрических машин реализованы в двух конструктивных вариантах. Первый вариант изготовлен на основе платы расширения, размещаемой в разьеме системной магистрали персонального компьютера [99]. Этот вариант предназначен для диагностирования оборудования в стационарных условиях, например, в испытательных стендах на предприятиях, производящих соответствующую продукцию (электродвигатели, вентиляторы, компрессоры, генераторы и т.д.). Вторым вариантом реализован в виде портативного микропроцессорного прибора, работающего совместно с компьютером типа «Ноутбук» или автономно. Автономный режим работы позволяет обеспечить сбор и хранение в течение определенного времени в памяти прибора диагностической информации с последующей передачей ее по мере необходимости в персональный компьютер. В основном этот прибор предназначен для диагностирования электрических машин в условиях, когда транспортировка объекта контроля к испытательному стенду нецелесообразна или невозможна.

Программное обеспечение диагностического комплекса включает в себя часть программ, обеспечивающих функционирование виртуальных приборов и подробно описанных в главе 4. В первую очередь, это относится к программам «Спектроанализатор» и «Анализатор нестационарных процессов», а также к большинству сервисных программ. Для удобства анализа измерительной информации в программе «Спектроанализатор» реализован многооконный интерфейс, позволяющий формировать на экране монитора сразу несколько рабочих окон. В них можно выводит спектры и осциллограммы измеряемых величин, а именно вибраций, электрических токов, напряжений, полей рассеяния. С тем, чтобы иметь возможность обнаруживать небольшие отличия в

диагностической информации, полученной от испытуемого и эталонного объектов, предусмотрен вывод в каждое из окон двух графиков, а также дополнительной информации, включающей в себя координаты графиков в точке нахождения курсора, амплитуду и частоту основной гармоники, амплитудные значения первой и второй производных измеряемой величины и т.д.

В качестве примера на рис.5.3 приведены спектры вибраций, фазного тока и поля рассеяния от электродвигателя форвакуумного насоса. Каждое из окон можно в любой момент активизировать, сделать пассивным или закрыть совсем. По желанию оператора размеры окон и их положение на экране монитора можно изменять. Кроме этого, в графиках можно изменять масштаб по оси абсцисс, формат выводимых данных (полулогарифмический масштаб, относительные или абсолютные единицы), смещать графики по оси времени или частоты. Все это облегчает сравнительный анализ диагностических параметров и сокращает время на всю процедуру диагностирования.

Для удобства работы с результатами измерений программа предоставляет возможность ведения базы данных на жестком диске персонального компьютера. Сохраняемый файл содержит в себе номер измерительного канала, по которому были получены данные, тип данных (спектр или осциллограмма), строку комментария и сами данные. Текстовый формат записанных в файл данных позволяет легко импортировать результаты измерений в другие прикладные программы. В диалоговом окне открытого файла имеется возможность просмотра комментария файлов, в котором обычно содержится информация об объекте и условиях проведения измерений. Это делает работу с базой данных более удобной для оператора.

Дополнительную информацию, позволяющую уточнить вид дефекта, можно получить из измерений диагностических параметров в нестационарных режимах работы электрической машины, в частности, при ее выбеге или разбеге. Так например, изменения в спектре вибросигнала электродвигателя может быть обусловлено как дефектами подшипникового узла, так и наличием высших гармоник у поля в

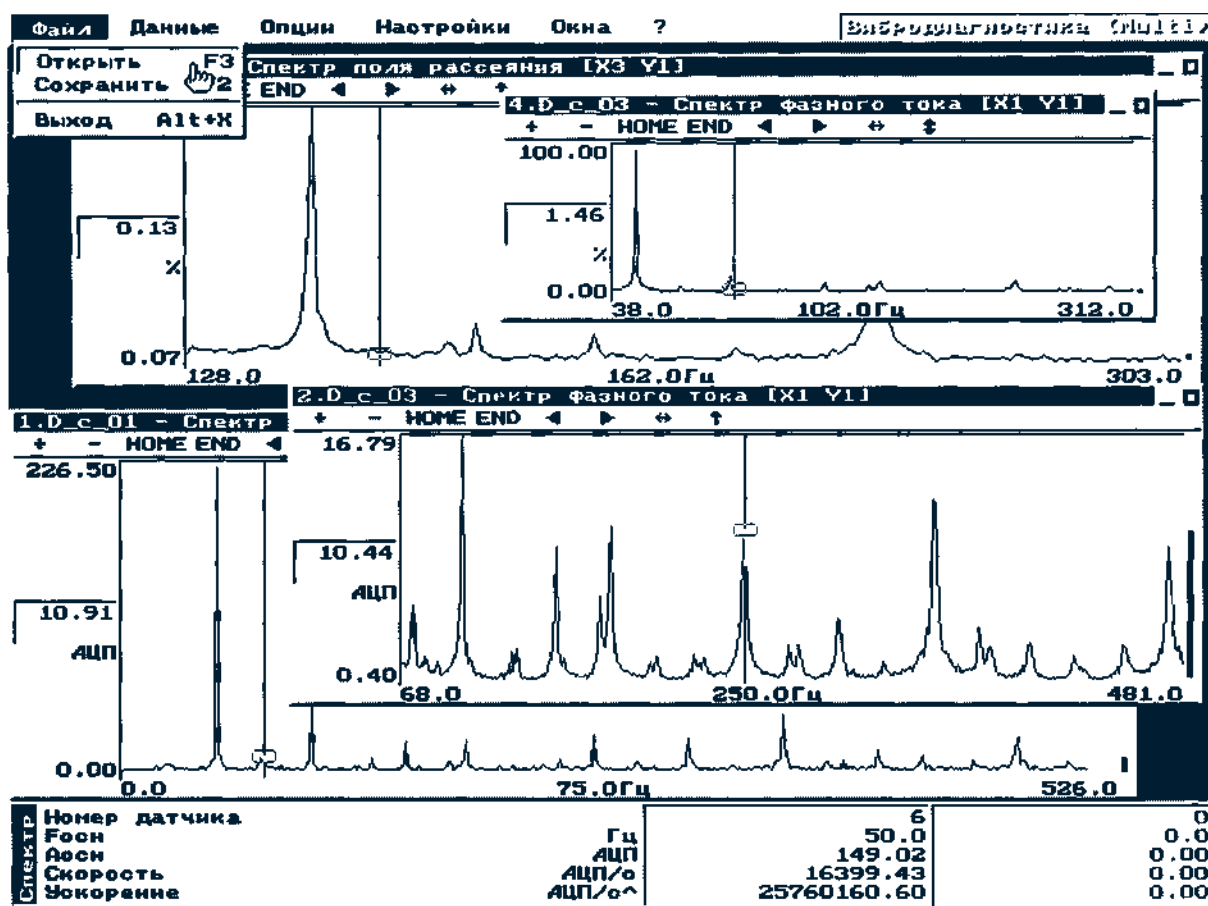


Рис. 5.3. Спектры вибраций, фазного тока и поля рассеяния электродвигателя форвакуумного насоса

воздушном зазоре. Разделить эти две причины можно, проводя измерения вибраций сразу после отключения двигателя от цепи питания, то есть при выбеге двигателя, когда влияние электромагнитных полей сведено к минимуму. С другой стороны, проводя измерения токов или полей рассеяния сразу после включения двигателя, когда он еще не набрал скорость, можно получить информацию о параметрах двигателя при нахождении его в трансформаторном режиме [91].

Все перечисленные выше задачи требуют более продолжительных измерений, чем в случае стационарных процессов. К тому же в них обычно интерес представляет динамика изменений измеряемой величины, например, изменение частоты и амплитуды основной гармоники в процессе торможения или разгона двигателя. Важно при этом выводить на экран одновременно все спектры, вычисленные на основе выборок, формируемых в различные моменты времени. С этой точки зрения более предпочтительна программы «Анализатор нестационарных процессов».

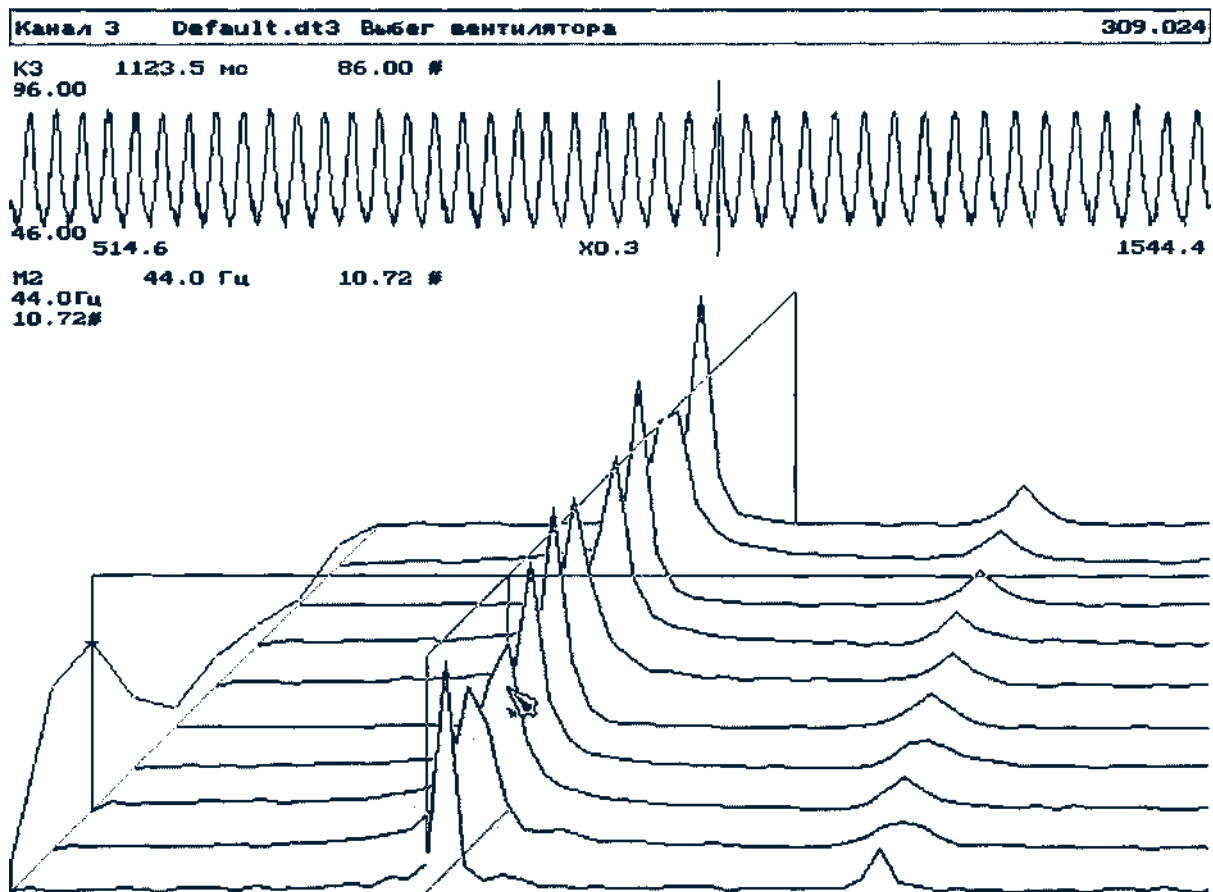


Рис. 5.4. Спектры вибраций вентилятора при его выбеге, измеренные в различные моменты времени

В качестве примера на рис.5.4 представлены спектры вибраций вентилятора при его выбеге, измеренные в различные моменты времени. По своему назначению и возможностям обе рассмотренные выше программы заметно отличаются: первая обладает более широкими возможностями по обработке сигнала, вторая позволяет производить измерения на более длительном временном интервале. Поэтому предусмотрена возможность передачи произвольного участка осциллограммы из второй программы в первую для более полной математической обработки результатов измерений. Это, в частности, дает возможность вычислять спектральную плотность мощности и кепстр сигнала, автокорреляционную функцию, а также функцию взаимной корреляции двух фрагментов осциллограммы, измеренных в различные моменты времени.



#### **5.4. Портативный прибор для диагностики электрических машин**

Диагностирование электрических машин на специальных испытательных стендах имеет свои ограничения. Часто встречаются случаи, когда транспортировка объекта к испытательному стенду невозможна из-за больших габаритов объекта или по причине того, что объект является важным составным узлом технологического оборудования, отключение которого приводит к серьезным негативным последствиям. Это касается, например, силовых трансформаторов, к которым подключено большое количество потребителей энергии, или насосов по перекачке нефти и газа по соответствующим транспортным магистралям. В этих случаях более предпочтительна транспортировка средств диагностики к контролируемому объекту. При этом необходимо учитывать, что возможности подключиться к источнику сетевого напряжения может и не быть, то есть средства диагностики должны быть выполнены в портативном варианте.

Портативный вариант диагностического прибора может быть реализован двумя способами, а именно, на основе микропроцессорного устройства, которое позволяет осуществить сбор диагностических параметров, их длительное хранение в энергонезависимой памяти и передачу в компьютер по мере необходимости или на основе портативного компьютера типа «Ноутбук». Таким образом, в первом случае участие компьютера необходимо лишь на стадии обработки и анализа диагностической информации, во втором случае компьютер используется на всех стадиях операции диагностирования. Включение портативного компьютера в измерительный процесс не всегда целесообразно, поскольку, с одной стороны, это серьезно удорожает диагностический прибор, а с другой стороны, из-за ограниченных размеров системного блока компьютера невозможно смонтировать плату расширения внутри его, что в принципе могло бы расширить возможности прибора и снизить его стоимость. Первый способ является более дешевым, но главный его недостаток в том, что в микропроцессорном устройстве нет возможности оперативно просмотреть результаты измерений, представленные обычно в виде осциллограмм и спектров. К тому же его память для хранения результатов измерений имеет ограниченный объем, что при большом

количестве измеряемых диагностических параметров может также оказаться очень серьезным недостатком.

В разработанном нами портативном диагностическом приборе процесс измерений возможен как при участии портативного компьютера, так и без него. В случаях, когда датчики для измерений диагностических параметров закреплены вблизи объекта стационарно и приблизительный диапазон изменений измеряемых величин известен, то необходимости в оперативном просмотре результатов измерений нет, соответственно нет необходимости и в «Ноутбуке». Если же измерения проводятся датчиками, входящими в комплект к прибору, а примерные значения измеряемых величин не известны, то, как правило, требуются какие-то предварительные измерения, на основании которых, например, определяются параметры настроек прибора. В этом случае «Ноутбук» может облегчить эту задачу.

Конструктивную основу прибора составляет микропроцессорное устройство для сбора и хранения диагностических параметров, рассмотренное в главе 3. Программное обеспечение включает в себя управляющую программу, разработанную на языке макроассемблера и записанную в ПЗУ прибора, а также программу для внешнего управления прибором и обработки измерительной информации, которая написана на языке программирования Borland Delphi и хранится на жестком диске компьютера. Управляющая программа организует работу прибора в трех режимах. Первый режим «ПЕРЕДАЧА» предназначен для опроса датчиков, формирования пакета данных и пересылки его в персональный компьютер или в «Ноутбук». Во втором режиме «НАКОПЛЕНИЕ» осуществляется опрос датчиков и запись результатов измерений в статическое ОЗУ прибора. Третий режим «ОБМЕН» предназначен для ввода настроек прибора из компьютера и передачи содержимого ОЗУ из прибора в компьютер.

На рис. 5.5 изображены блок-схемы алгоритмов процедуры измерения и основного цикла управляющей программы. Следует отметить, что на процедуру измерений, включающую в себя установку номера канала, формирование управляющих импульсов для измерительного устройства, чтение АЦП, запись результата измерений в ОЗУ и т.д.,

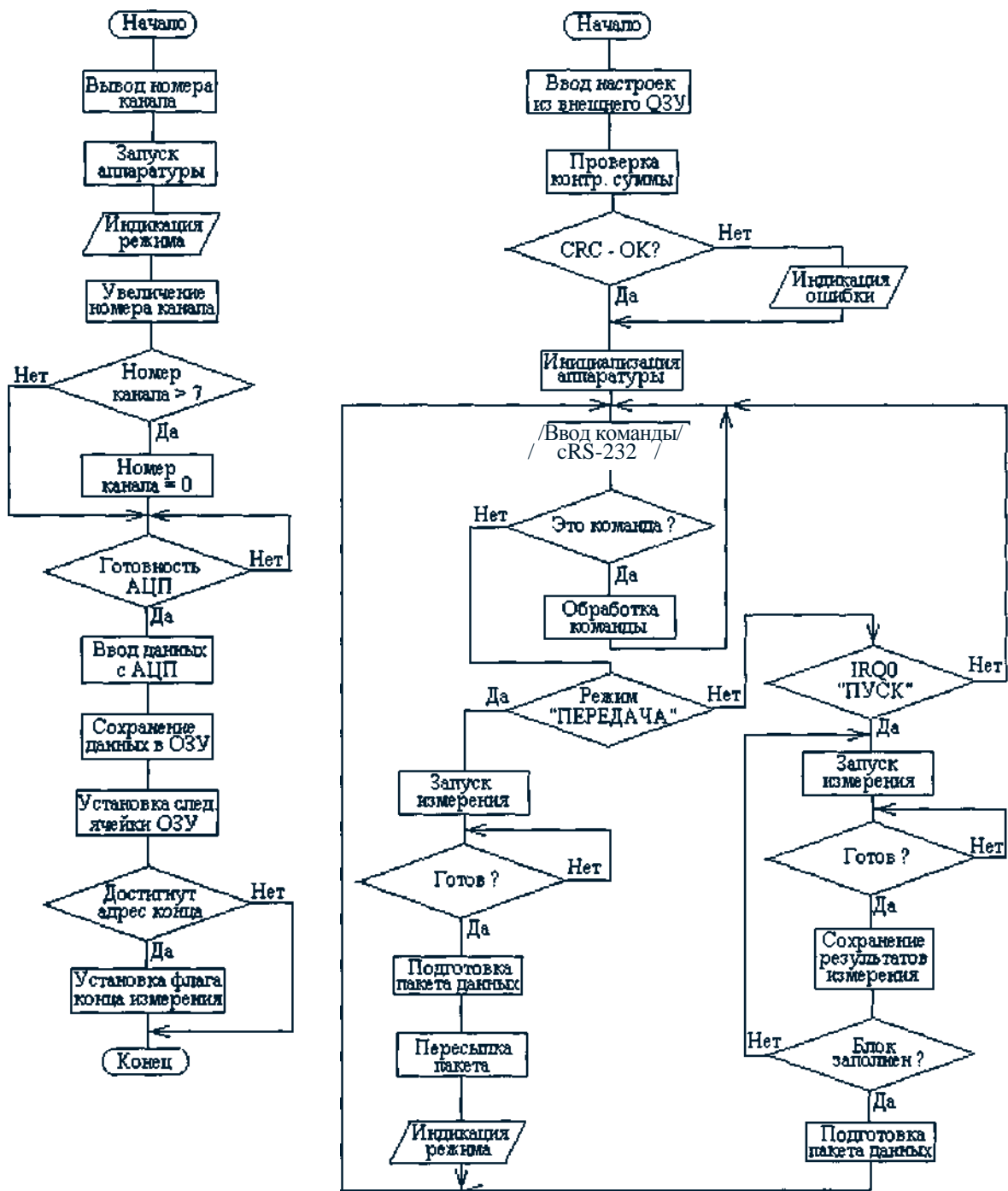


Рис.5.5. Блок-схемы алгоритмов процедуры измерений (слева) и основного цикла управляющей программы (справа).

накладываются жесткие ограничения на продолжительность ее выполнения, а именно, она должна выполняться за время меньшее, чем продолжительность однократного измерения. Так например, при максимальной частоте опроса датчиков 16 кГц продолжительность измерения не может превышать 62,5 мкс. При использовании в

микроконтроллере кварцевого резонатора 11,059 МГц это соответствует 57 машинным циклам. Таким образом, вся процедура измерений должна выполняться примерно за 50-55 машинных цикла.

Режим «ОБМЕН» предназначен для конфигурирования и получения информации о состоянии прибора (установленный режим работы, частота опроса датчиков, количество подключенных каналов, объем и количество банков памяти для измерений), а также ввода/вывода данных по последовательному интерфейсу. Этот режим активизируется лишь при получении соответствующей команды и автоматически отключается после ее выполнения. Управляющая команда состоит из 2-х байт. Первый байт, являющийся идентификатором команды, предназначен в основном для исключения ложных срабатываний прибора, которые могут в принципе возникнуть при наличии помех или неправильной настройки последовательного порта. Второй байт - это непосредственно сама команда, состоящая из кода операции и операнда. В таблице 5.3 приведены коды и назначение команд, управляющих работой прибора.

Таблица 5.3. Команды, управляющие работой прибора

Код	Наименование	Операнд	Примечание
ЮН	Тестирование и очистка ОЗУ, сброс установок	-	
20Н	Сброс прибора	-	
30Н	Теплый старт	-	
40Н	Удаление измерения	DO - D3 - номер удаляемого измерения	Измерения сдвигаются на освободившееся место
50Н	Включить канал в опрос	DO - D2 - номер канала	Все включенные в опрос каналы опрашиваются в порядке возрастания номера
60Н	Исключить канал из опроса	DO-D2 - номер канала	
70Н	Запрос измерения	DO - D3 - номер измерения	
80Н	Установка частоты опроса	DO-D2 - код частоты опроса	01h - 1 кГц 02h - 2 кГц 04h - 4 кГц 08h - 8 кГц 10B-16кГц
90Н	Режим «ПЕРЕДАЧА»	-	
0A0H	Режим «НАКОПЛЕНИЕ»	-	
0B0H	Информация о состоянии прибора	-	
0C0H	Авто определение подключенных датчиков		В измерении будут участвовать только подключенные датчики
0D0H	Проверка контрольной суммы ОЗУ	-	
0E0H	Произвести измерение в текущий банк памяти	-	Аналогична нажатию на кнопку «ПУСК»

Все команды можно разделить на три категории:

1. Служебные команды, включающие в себя тестирование и очистку ОЗУ, сброс, «теплый» старт, проверку контрольной суммы ОЗУ.

2. Команды настроек прибора, позволяющие включать измерительный канал в опрос или исключать его из опроса, устанавливать частоту опроса, а также режим «ПЕРЕДАЧА» и «НАКОПЛЕНИЕ», автоматически определить номера подключаемых к прибору датчиков.

3. Команды ввода/вывода информации, позволяющие передавать результаты измерений из прибора в компьютер, удалять последнее измерение, получать информацию о состоянии прибора.

Особо следует отметить команды «Запрос измерения» и «Информация о состоянии прибора». При получении этих команд прибор начинает пересылку данных по последовательному интерфейсу в компьютер. При этом сначала передается заголовок, содержащий информацию о числе передаваемых байт, номере канала и частоте опроса датчиков. В заголовок включается также контрольная сумма блока данных, после нее передаются собственно сами результаты измерений. Такой формат послышки позволяет зафиксировать возможные искажения при передаче информации, которые могут возникать при значительной длине соединительного кабеля между прибором и компьютером. Аналогичным образом передается информация и о состоянии прибора. На рис.5.6 представлена блок-схема алгоритма работы прибора в режиме «ОБМЕН».

Используемые в приборе микросхема статического ОЗУ и источник автономного питания являются потенциально ненадежным звеном в процессе сбора и хранения информации. Например, при внезапном отключении основного источника питания или при наличии импульсных помех в сетевом напряжении могут возникнуть сбои при работе с памятью данных, приводящие к потерям и искажению информации. С тем, чтобы своевременно обнаружить эту ситуацию и предотвратить ее негативные последствия, предприняты специальные меры защиты. В частности, подключение ОЗУ к шине данных осуществляется только при явном обращении к нему (программное управление сигналом CS в моменты записи и считывания информации). Кроме того, при любых изменениях внешней памяти данных своевременно подсчитывается его контрольная

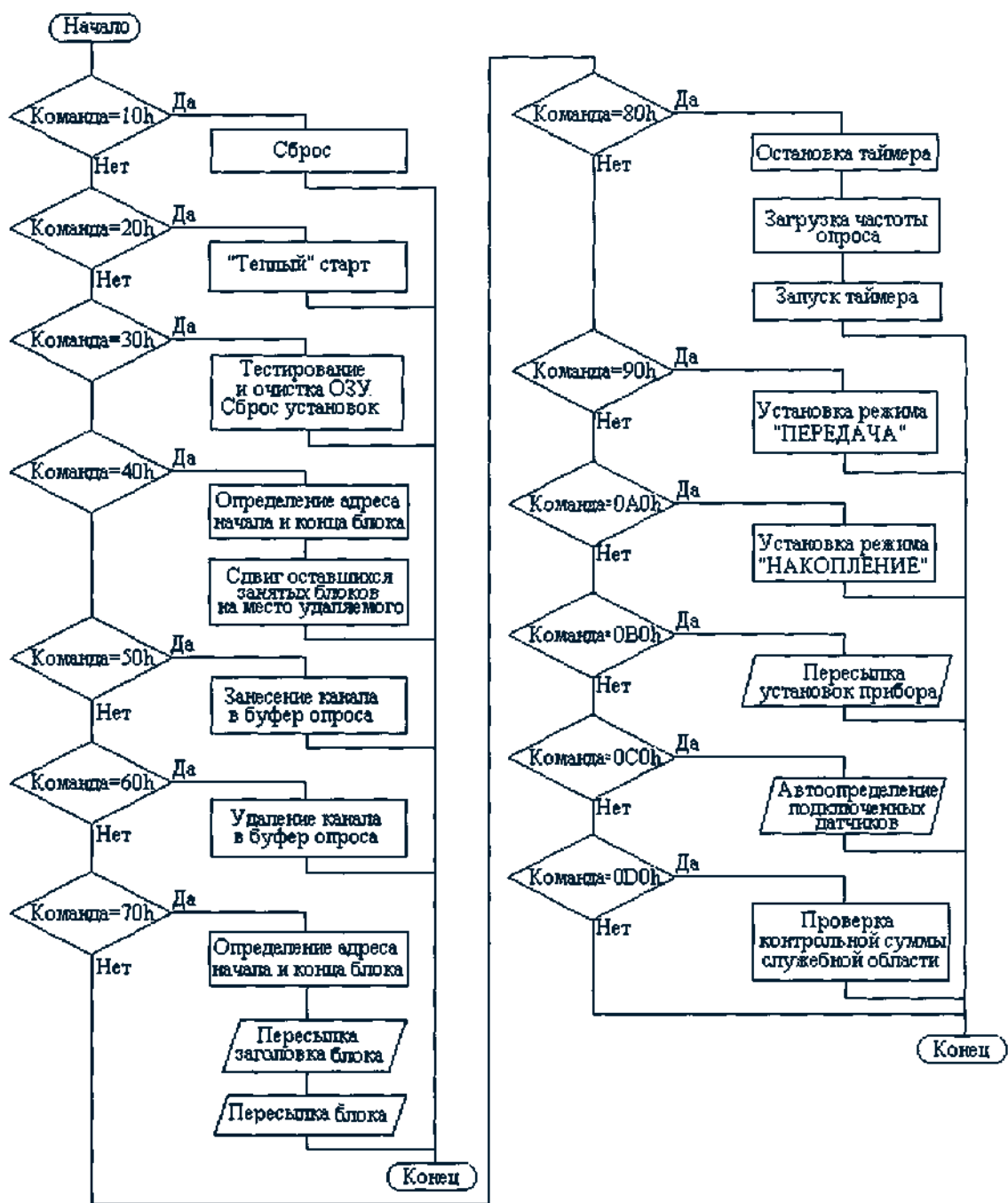


Рис. 5.6. Блок-схема алгоритма работы прибора в режиме «ОБМЕН»

сумма и записывается в служебную область памяти, причем запись осуществляется как в прямом, так и в дополнительных кодах, что позволяет проверять также и служебную область ОЗУ. При каждом включении прибора контрольная сумма вычисляется заново и сравнивается с предыдущим значением. При их несовпадении на световом индикаторе появляется специальный сигнал, предупреждающий о возможном искажении содержимого ОЗУ.

К особенностям управляющей программы также следует отнести применение режима пониженного энергопотребления при работе прибора в режиме «НАКОПЛЕНИЕ». Это позволяет значительно снизить ток, потребляемый процессором, и, таким образом, увеличить срок службы автономного источника питания. Выход из этого режима происходит при поступлении управляющего импульса на вход внешнего запроса прерывания микроконтроллера INTO, который формируется при нажатии кнопки «ПУСК» на передней панели прибора или кнопки запуска на корпусе датчика.

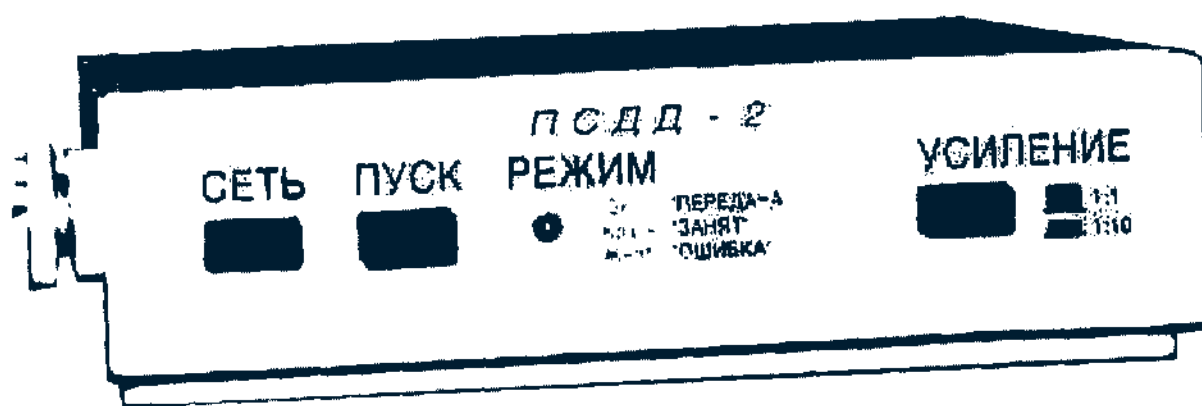


Рис. 5.7. Внешний вид прибора для диагностики электрических машин

Внешний вид прибора представлен на рис.5.7. Его габаритные размеры 180x180x45 мм, масса около 400 грамм. Питание прибора осуществляется от специального блока питания, вырабатывающего напряжения  $\pm 12$  В и +5 В. Потребляемая мощность прибора составляет примерно 3,5 Вт. Режим длительного хранения результатов измерений в статической памяти прибора поддерживается литиевой батареей, вырабатывающей напряжение 3 В. На передней панели прибора расположены кнопки управления (включение питания, запуск измерений и переключение коэффициента усиления), а также трехцветный индикатор, предназначенный для визуального определения состояния прибора.



## 5.5 Портативный мотор-тестер для диагностики автомобильных двигателей

В настоящее время довольно большое число зарубежных и отечественных фирм предлагает широкий выбор оборудования для диагностики автомобильных двигателей, так называемых мотор-тестеров. Между собой они отличаются сложностью и, соответственно, функциональными возможностями, количеством одновременно измеряемых параметров, степенью автоматизации по обработке диагностической информации и, наконец, ценой, которая часто в несколько раз превышает стоимость недорогого автомобиля. Многие из них с помощью специальных датчиков и пробников способны измерять такие параметры, как угол протекания тока (аналогично углу замкнутого состояния контактов в контактной системе зажигания), угол опережения зажигания, напряжения на первичной и вторичной обмотках катушки зажигания, длительность искрового разряда свечи. Кроме параметров системы зажигания такие мотор-тестеры способны измерять частоту вращения коленчатого вала, химический состав выхлопных газов, ток стартера и многие другие параметры. Подобного рода тестеры имеют в своем составе компьютер и, как правило, являются стационарными приборами, хотя имеются и портативные варианты, выполненные в виде «чемоданчика» с жидкокристаллическим дисплеем. Как и стационарные, они обладают достаточно широкими возможностями по измерению диагностических параметров по нескольким каналам и обработке полученной информации. Хотя портативные приборы и намного дешевле стационарных (порядка 5... 10 тысяч долларов) [16], для частных автовладельцев такие мотор-тестеры являются мало доступными.

Снизить стоимость и одновременно сохранить широкие функциональные возможности можно, если использовать для измерения различных диагностических параметров датчики какого-то одного типа. В этом случае измерительная цепь, осуществляющая преобразование измеряемой величины в цифровой код, является общей для всех датчиков, что существенно упрощает конструкцию прибора, а значит и его стоимость. Если же необходимо проводить измерения несколькими датчиками одновременно, то в этом случае используется режим

временного мультиплексирования, при котором датчики подключаются к измерительной цепи в соответствии с заданным алгоритмом работы прибора.

В разработанном нами мотор-тестере источниками диагностической информации являются электромагнитные датчики, а конструктивную основу прибора составляет рассмотренное в главе 3 многофункциональное микропроцессорное устройство, изготовленное на основе программируемого микроконтроллера SAB 80c517 фирмы Siemens. Прибор имеет встроенную статическую память объемом 128 Кбайт для длительного хранения результатов измерений и настроек прибора, двухстрочный ЖК-индикатор и несколько управляющих клавиш, с помощью которых осуществляется выбор нужного пункта меню на экране индикаторного устройства. Наличие у контроллера восьми параллельных портов и встроенного 10-разрядного АЦП с мультиплексором на 12 входов позволило существенно расширить функциональные возможности тестера по сравнению с описанным выше прибором для диагностики электрических машин. В частности, это касается осциллографии напряжения аккумуляторной батареи в различных режимах работы двигателя, а также возможности подключения к прибору датчиков резисторного типа.

Основными узлами автомобиля, которые можно диагностировать с помощью мотор-тестера, являются система зажигания, генератор, стартер, форсунки инжекторного двигателя, аккумуляторная батарея, а также все механические узлы, являющиеся источниками вибраций. Диагностирование системы зажигания осуществляется на основе бесконтактного измерения токов в первичной и вторичной обмотках катушки зажигания. Дополнительную информацию можно получить, измеряя поле рассеяния вблизи катушки зажигания. Диагностирование генератора, а также форсунок инжекторного двигателя и стартера осуществляется на основе измерений магнитных полей с помощью соответствующих датчиков. Измерение напряжения аккумуляторной батареи осуществляется непосредственной подачей его через мультиплексор на вход АЦП и записью результатов преобразования в оперативную память прибора.

Управляющая программа, записанная в ПЗУ прибора, обеспечивает выполнение всех функций, присущих рассмотренному выше портативному прибору для диагностики электрических машин. В частности, это включает в себя установку номера измерительного канала и опрос соответствующих датчиков, запись результатов измерений в ОЗУ, вывод служебной информации и результатов измерений на ЖК-индикатор, обмен данными между мотор-тестером и компьютером посредством последовательного интерфейса.

Мотор-тестер может функционировать как автономно, так и под управлением компьютера. В первом случае результаты измерений записываются в статическую память для длительного хранения и передаются в компьютер для последующей обработки по мере необходимости. Во втором случае обмен данными происходит в реальном времени. Это включает в себя не только передачу данных из тестера в компьютер и их обработку с представлением результатов на экране монитора в графической форме, но и передачу из компьютера в тестер управляющих команд, обеспечивающих изменение настроек прибора и выполнение некоторых специальных функций. Соответствующая программа, предназначенная для внешнего управления работой мотор-тестера, разработана на языке Borland Delphi и хранится на жестком диске компьютера. Она предоставляет оператору широкие возможности по управлению прибором, а именно:

- производить тестирование прибора при обнаружении сбоев в его работе;
- выполнять предварительную установку параметров прибора;
- включать или выключать режим автоматической идентификации датчиков, подключенных к прибору;
- вводить данные, хранящиеся в оперативной памяти прибора;
- удалять часть хранящейся в ОЗУ информации или производить полную очистку памяти;
- отображать объем свободной памяти прибора;
- отображать результаты измерений в графической форме;
- записывать данные в виде файла на жесткий диск в формате, позволяющем импортировать их в другие прикладные программы.

В качестве примера на рис.5.8 приведен вид основного меню управляющей программы. В графических окнах представлены результаты измерения тока в первичной цепи катушки зажигания (слева) и поля рассеяния генератора (справа). В верхней части расположены стандартные элементы управления, а именно, экранное меню и полоска инструментов. Выбор пункта меню или пиктограммы в полоске инструментов позволяют активизировать нужную функцию программы. Доступ к основным функциям возможен также и при помощи «горячих» клавиш.

Для облегчения восприятия результатов измерений отображение всей информации осуществляется в отдельные графические окна. Количество окон, их размеры и расположение на экране в любой момент может быть изменено. При многоканальных измерениях наблюдать все графики в одном окне одновременно не очень удобно, поэтому предусмотрен режим селекции, позволяющий отображать только те графики, которые считает нужными видеть оператор. Для удобства работы с графиками имеется набор сервисных функций, таких как автоматическое масштабирование по осям X и Y, ручное изменение масштаба, сдвиг графиков по оси X и т.д.

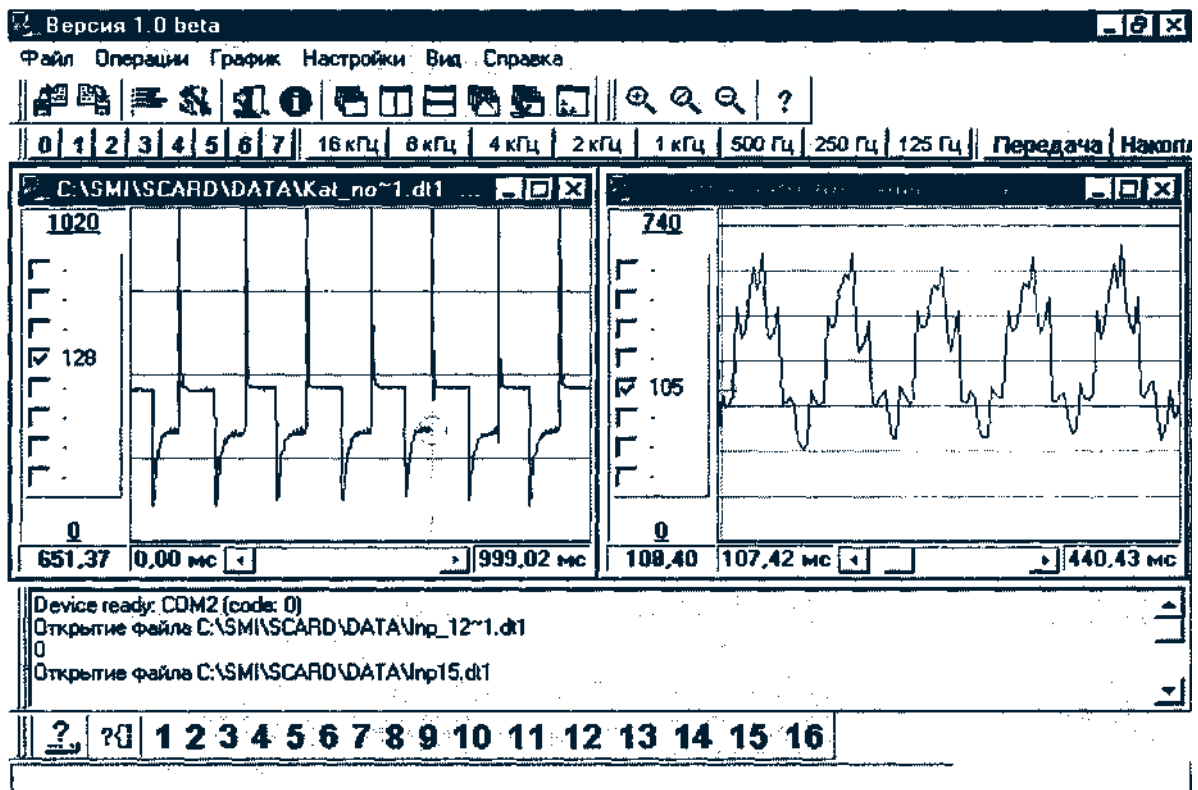


Рис. 5.8. Вид основного меню программы для управления мотор-тестером

Под инструментальной полоской находятся кнопки управления, позволяющие активизировать нужные измерительные каналы, изменять частоту опроса датчиков и выбирать один из рабочих режимов (ПЕРЕДАЧА или НАКОПЛЕНИЕ). В нижней части экрана расположены две кнопки управления для загрузки установок прибора и автоматической идентификации датчиков. Рядом расположены номера банков памяти, в которых хранится информация о результатах измерений. Это позволяет оперативно переслать информацию из любого банка в компьютер, а также определять объем свободной памяти в ОЗУ прибора.

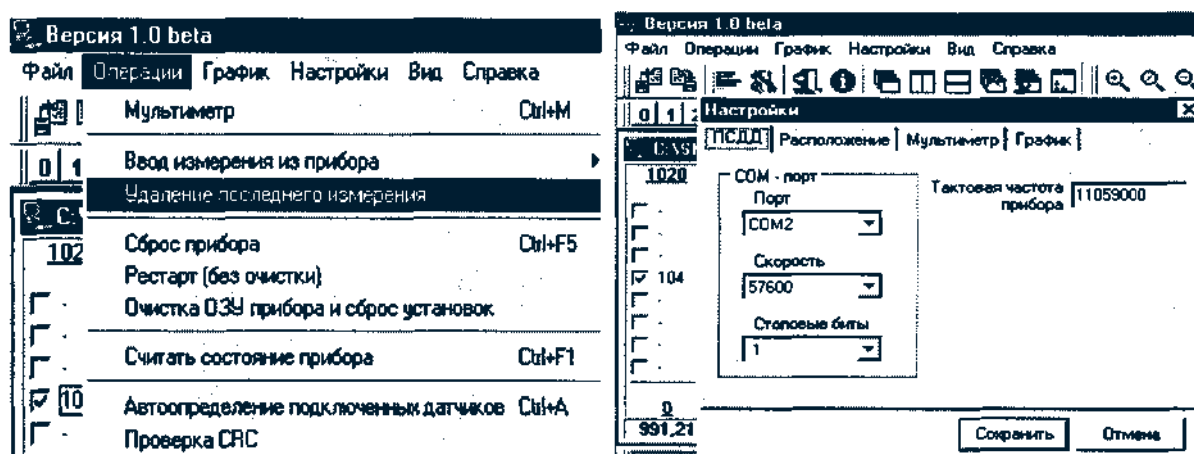


Рис.5.9. Фрагменты экрана монитора при выборе пунктов меню *Операции* и *Настройки*

Полный доступ ко всем ресурсам прибора можно осуществить с помощью экранного меню, содержащего шесть основных пунктов: *Файл*, *Операции*, *График*, *Настройки*, *Вид* и *Справка*. В качестве примера на рис.5.9 приведены фрагменты экрана монитора при выборе пунктов *Операции* и *Настройки*. В пункте *Настройки*, кроме выбора нужного номера компорта, скорости передачи данных, количества стоп-бит и частоты синхронизации микроконтроллера, можно установить путь к нужному файлу с данными, параметры работы мультиметра, формат графиков. Кроме этого, можно изменить номера задействованных измерительных каналов, частоту опроса датчиков и режим работы прибора. Пункт *Файл* позволяет произвести запись данных на диск и их чтение, а также выход из программы. Пункты *График* и *Вид* предназначены для изменения формата графических данных, их представления на экране, а также вывода на экран служебной информации.

Глава шестая

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ПРОЦЕССОВ**

**6.1. Автоматизированный вискозиметр вибрационного типа**

Контроль современных технологических процессов предъявляет высокие требования не только к первичным измерительным преобразователям, в частности, к их чувствительности, быстродействию и точности, но и к средствам обработки измерительной информации. Сложная математическая обработка больших массивов данных, ограниченное время на анализ результатов, принятие решений и выработку управляющих сигналов, необходимость длительного хранения и документирования информации - все это требует включения в контрольно-измерительный процесс компьютеров. Если в 1998 году согласно опросу, проведенному среди ведущих разработчиков измерительной техники, лишь 29% всех измерений осуществлялось под управлением компьютеров, то в настоящее время эта цифра уже составляет около 50% [68].

Рассмотренные в главе 4 виртуальные приборы для контроля технологических процессов представляют собой с конструкторско-технологической точки зрения простейший вариант автоматизированного контрольно-измерительного прибора. Кроме компьютера, платы расширения и набора датчиков, никаких дополнительных электромеханических или электронных блоков не требуется. Разумеется, это позволяет решать ограниченный, хотя и довольно широкий круг задач. В то же время существует немало физических величин, характеризующих технологические процессы и, следовательно, требующих измерения и контроля, которые можно измерить лишь косвенным способом на основе некоторой совокупности прямых измерений. Как правило, такие измерения простыми средствами не решаются и, кроме платы расширения и датчиков, необходимы дополнительные блоки, осуществляющие те или иные преобразования или создающие необходимые условия для измерений нужной физической величины.

Одной из таких задач является измерение вязкости жидких или пастообразных веществ, осуществляемое так называемыми вискозиметрами. Измерение вязкости является одной из обязательных



технологических операций на предприятиях пищевой и нефтехимической промышленности. Большой диапазон значений динамической вязкости (от  $10^{-6}$  Па·с для газов до  $10^{12}$  Па·с для расплавов пластмасс) обусловили широкое разнообразие методов вискозиметрии. Среди них наибольшее распространение получили несколько методов, а именно, капиллярный, падающего шарика, ротационный и вибрационный [36].

В капиллярном методе измеряется время истечения определенного объема вещества через калиброванный капилляр радиуса  $r$  и длины  $l$  под действием постоянного перепада давления. Расчет динамической вязкости  $\eta$  осуществляется согласно формуле Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8Vl},$$

где  $p_1$  - давление на входе капилляра,  $p_2$  - давление на его выходе,  $V$  - объемный расход вещества. Формула Пуазейля справедлива для установившегося ламинарного потока в капилляре неограниченной длины, поэтому на практике приходится вводить ряд поправок.

В методе падающего шарика измеряется скорость  $v$  установившегося движения шарика в веществе под действием силы тяжести и силы трения. Динамическая вязкость вычисляется по формуле:

$$\eta = \frac{K(\rho - \rho_0)}{v},$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  - плотности материала шарика и измеряемого вещества соответственно,  $K$ - приборная константа. В некоторых приборах шарик заменяется цилиндром или телом другой формы.

Принцип действия ротационных вискозиметров основан на измерении сил вязкого трения, возникающих в слое вещества, находящегося в зазоре между двумя коаксиальными, равномерно вращающимися относительно друг друга цилиндрами. В целях упрощения конструкции обычно вращается только один цилиндр, движение которого через слой вещества передается второму цилиндру, создавая крутящий момент  $M$ . Измерив этот момент и зная частоту вращения первого цилиндра  $\omega$ , можно определить динамическую вязкость по формуле  $\eta = K \cdot M / \omega$ , где  $K$ - приборная константа.



Вибрационные методы основаны на измерении сил сопротивления вынужденным колебаниям тела в измеряемом веществе либо скорости затухания свободных колебаний. Способы расчета динамической вязкости по результатам вибрационных измерений зависят от конкретной схемы прибора. С точки зрения автоматизации измерений наиболее предпочтительными являются два последних метода - ротационный и вибрационный, к тому же эти методы позволяют осуществлять контроль вязкости вещества непрерывно.

В разработанном нами автоматизированном вискозиметре используется вибрационный метод, основанный на измерении коэффициента затухания свободных колебаний крутильного маятника, находящегося в измеряемом веществе и, тем самым, подвергающемся воздействию сил вязкого трения [95]. Зависимость угла поворота маятника от времени ( $\varphi(t)$ ) в этом случае описывается выражением:

$$\varphi(t) = \varphi_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (6.1)$$

где  $\varphi_0$  - угол отклонения от положения равновесия в начальный момент времени;  $\beta$ - коэффициент затухания колебаний;  $\omega$ - циклическая частота колебаний;  $\alpha$ - начальная фаза.

С помощью бесконтактного датчика индуктивного типа измеряется временная зависимость  $q(f)$  и по уменьшению амплитуды затухающих колебаний рассчитывается коэффициент затухания  $D$  зависящий от свойств вещества и размеров колеблющейся в веществе сменной насадки. Далее по полученным значениям коэффициента затухания с помощью градуировочного файла определяется динамическая вязкость вещества, в котором совершаются колебания маятника. Процедура градуировки вискозиметра осуществляется на основе серии измерений контрольных проб с известной вязкостью. При формировании градуировочного файла используется кубическая сплайн-интерполяция.

Внешний вид прибора представлен на рис. 6.1. Конструктивно он состоит из измерительного устройства, включающего в себя крутильный маятник и датчик угла поворота; блока контроля температуры, состоящего из соответствующего измерительного преобразователя и индикатора; специализированной платы ввода/вывода; персонального компьютера. С

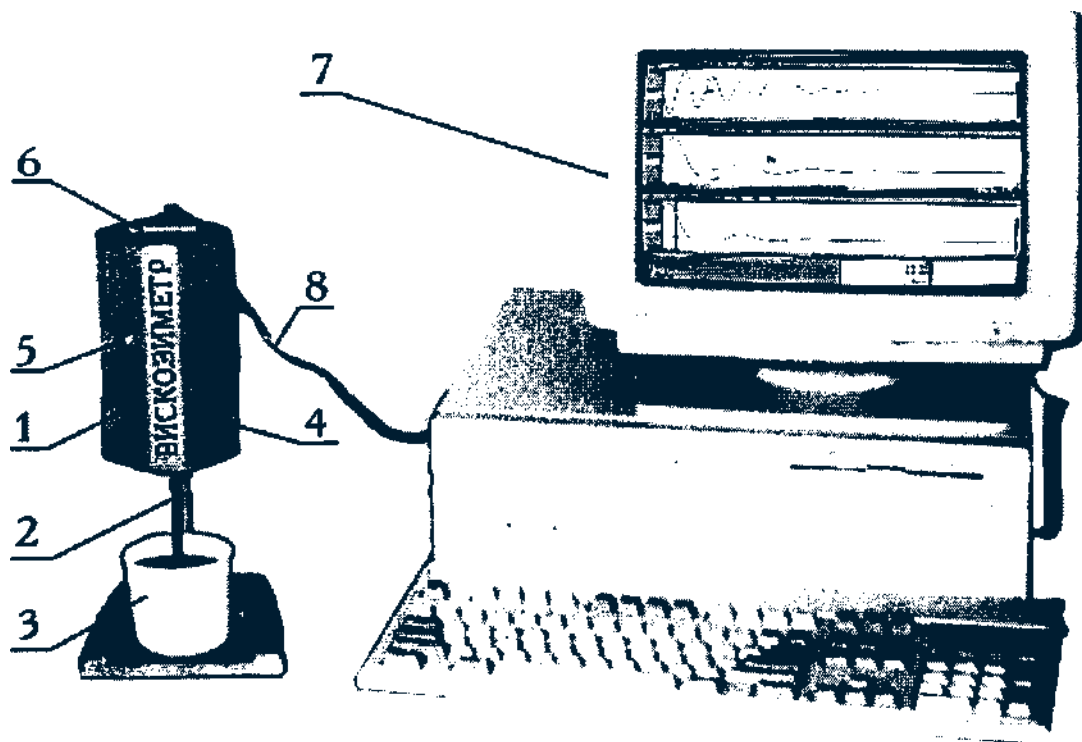


Рис. 6.1. Внешний вид автоматизированного вискозиметра: 1 - корпус измерительного устройства; 2 - крутильный маятник; 3 - стакан с веществом; 4 - спусковая защелка; 5 - кнопка установки ждущего режима, 6 - ЖК-индикатор; 7 - компьютер; 8 - кабель

целью расширения диапазона измерений динамической вязкости в приборе используется несколько сменных насадок разных размеров и формы. Старт колебаниям дается с помощью спускового механизма. В процедуре измерений используется ждущий режим, то есть формирование исходного массива данных начинается при выполнении определенного условия, а именно, при первом прохождении маятником положения равновесия. Контроль температуры измеряемого вещества осуществляется с помощью соответствующего датчика, находящегося в веществе, и жидкокристаллического индикатора, размещенного на верхней крышке измерительного устройства.

Пакет прикладных программ обеспечивает сбор данных с измерительного устройства, представление результатов измерений в графической и текстовой формах, запись результатов измерений в файл и их чтение из файла, а также ряд сервисных функций, доступ к большинству из которых осуществляется по паролю. Эти сервисные функции дают возможность осуществить градуировку прибора, произвести

необходимые изменения в базе данных и протоколе измерений, сменить настройки прибора и формат выводимой на экран монитора информации. Смена настроек прибора предполагает изменение частоты опроса датчиков, номеров измерительных каналов, коэффициента усиления выходного усилителя, параметров ждущего режима, пароля, а также включение и выключение цифровых фильтров.

На рис.6.2 представлен вид основного меню программы «Автоматизированный вискозиметр». Определение вязкости пробы осуществляется на основе усреднения пяти результатов измерений вязкости, при этом для контроля данные после каждого измерения затухающих колебаний выводятся на экран в виде графика. Результаты измерений зависимости  $q(f)$  по желанию могут быть сохранены, усредненные же значения вязкости вместе с соответствующей погрешностью и статусной информацией записываются в протокол измерений автоматически.

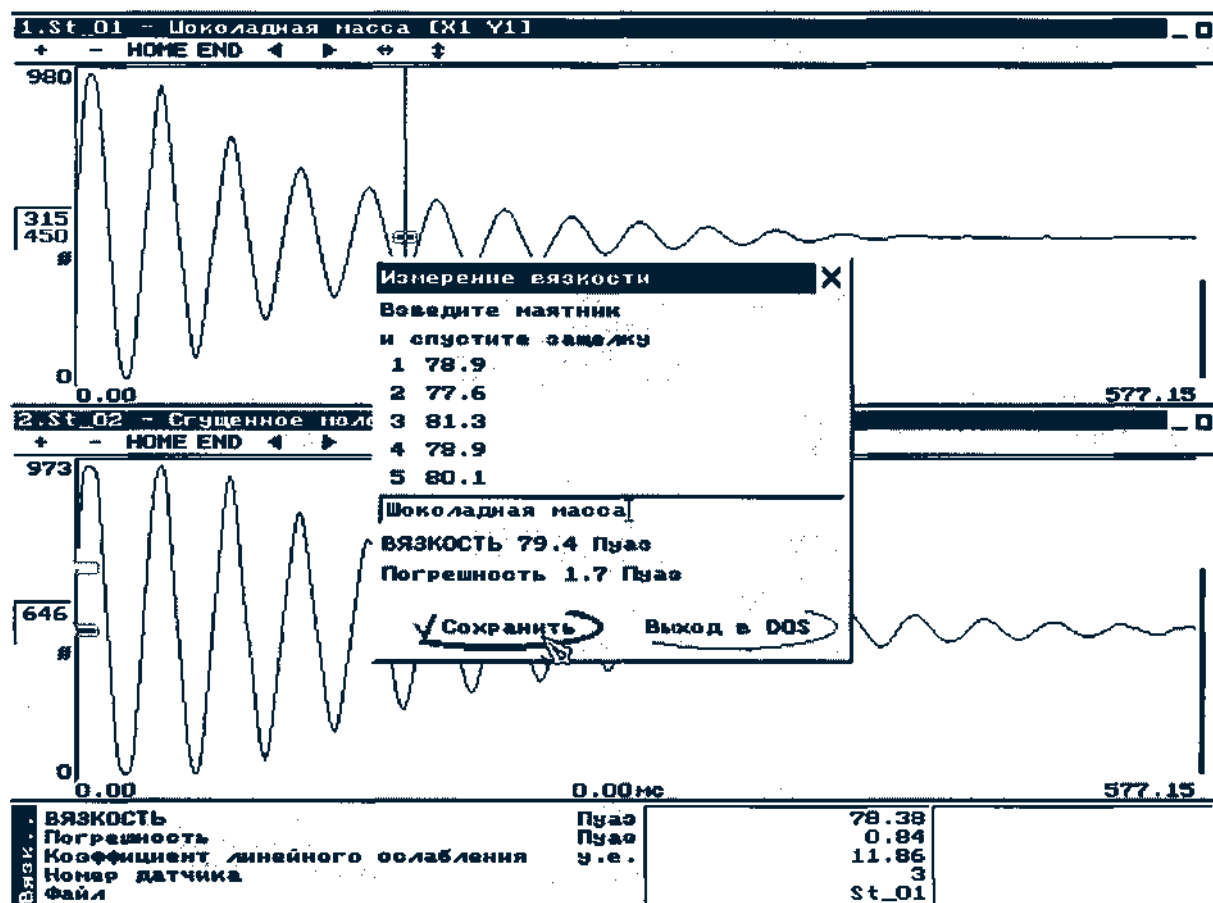


Рис. 6.2. Вид основного меню программы «Автоматизированный вискозиметр»

Для вычисления коэффициента затухания  $\beta$  по измеренной зависимости  $\phi(C)$  на первом этапе определяются точки, соответствующие локальным экстремумам  $\phi(C)$ . Далее методом наименьших квадратов определяется угловой коэффициент прямой, с помощью которой аппроксимируется зависимость  $\ln \phi(C) = f(t)$ , который согласно (6.1) по абсолютной величине равен  $\beta$ . С тем, чтобы снизить влияние шума или случайных выбросов в измеряемом сигнале на точность определения локальных экстремумов  $\phi(C)$ , исходный сигнал подвергается процедуре низкочастотной фильтрации. Это включает в себя операции прямого преобразования Фурье, умножения Фурье-образов на весовую функцию, подавляющую высокочастотные гармоники и, наконец, обратного преобразования Фурье, восстанавливающего зависимость  $\phi(C)$ .

Эксплуатация прибора предусматривает два уровня доступа к его ресурсам, что обеспечивается соответствующей системой паролей. Нижний уровень, предназначенный для лаборантского состава, дает возможность лишь проводить измерения вязкости согласно указаниям, выводимым на экран монитора, при этом все результаты измерений автоматически записываются в протокол для длительного хранения с указанием времени измерений, лица, проводившего измерения, наименования пробы, а также другой статусной информации. Верхний уровень, предназначенный для инженерного состава, предоставляет дополнительные возможности, позволяющие осуществить смену настроек прибора, провести операцию градуировки, стереть ненужную информацию из протокола измерений, осуществить смену пароля. Такой двухуровневый доступ практически исключает возможность преднамеренного искажения результатов измерений, что в целом повышает объективность контроля соответствующего технологического процесса.

Для оценки погрешности прибора производились серии контрольных измерений проб с различной вязкостью. Количество измерений в каждой серии равнялось 30. Вычислялись среднеквадратичные отклонения, утроенное значение которых принимались в качестве доверительных интервалов. Из всех значений доверительного интервала выбиралось максимальное, которое использовалось для определения основной приведенной погрешности прибора, что в итоге дало величину 2,5 %.

Вискозиметр был разработан и изготовлен по заказу Ульяновской кондитерской фабрики «Волжанка» и предназначен для контроля вязкости шоколадной массы. Опыт его использования показал, что продолжительность однократного измерения не превышает нескольких секунд, включая время на подготовительные операции. Такая оперативность особенно важна для контроля веществ, обладающих сильной зависимостью вязкости от температуры, к которым, в частности относится шоколадная масса.

## **6.2. Автоматизированный измеритель влажности**

Контроль влажности твердых и сыпучих веществ предполагает решение задачи количественного определения содержания воды в веществе, выраженного в процентах или долях единицы от общей массы вещества. Объектами контроля может быть продукция предприятий пищевой промышленности (печенье, конфеты, вафли, тесто, колбаса), деревообрабатывающих фабрик, мукомольных заводов и т.д. Методов определения влажности твердых и сыпучих объектов на сегодняшний день существует довольно много, все они делятся на две группы: прямые и косвенные. Косвенные методы основаны на измерении каких-либо характеристик объекта, функционально зависящих от его влажности (электропроводность, диэлектрическая проницаемость, теплопроводность, показатель преломления и т.д.). В большинстве из них можно непрерывно контролировать влажность объектов, а соответствующие датчики достаточно легко могут быть интегрированы в автоматизированные измерительные системы. Однако влияние на результаты измерения параметров объекта, таких как химический и гранулометрический состав пробы, сортность материала, удельная поверхность и т.д. не позволяет использовать эти методы для решения задач, где требуется высокая точность измерений[36].

В этих случаях обычно применяют прямые методы, среди которых основным является термовесовой метод. Суть метода заключается в измерении массы пробы вещества до и после сушки, на основании чего определяется величина относительной влажности:

$$\Psi = \frac{m_0 - m}{m_0} \cdot 100\% ,$$

где  $m_0$  и  $m$ - массы пробы до и после сушки соответственно.

Время окончания сушки определяется по отсутствию изменений массы пробы, что предполагает проведение сравнительного анализа промежуточных результатов измерений. Это обстоятельство, а также необходимость в повышении точности и объективности измерений, делает целесообразным автоматизацию процесса технологического контроля влажности. В разработанном нами приборе [88] весь процесс контроля влажности, включающий в себя измерение массы пробы, сушку инфракрасным излучением, математическую обработку результатов измерений, их хранение и документирование производится под управлением персонального компьютера.

Внешний вид прибора представлен на рис.6.3. Кроме персонального компьютера в его состав входят весовое устройство на базе четырех силоизмерительных преобразователей индуктивного типа; источник инфракрасного излучения, в качестве которого используется теплоэлектронагреватель (ТЭН); блок управления ТЭНом; специализированная плата сбора данных, размещаемая в системной магистрали компьютера, комплект сменных кювет для проб вещества.

Работа измерителя влажности организована следующим образом. В кювету помещается проба вещества массой несколько граммов, после чего производится запуск процесса измерений, начинающегося с измерения исходной массы пробы  $t_0$  и включения ТЭНа. Через строго фиксированные промежутки времени (обычно через одну секунду) производятся измерения массы пробы с представлением текущих результатов на экране монитора в графической и текстовой формах. В процессе измерений, в соответствии с заданными настройками прибора, ТЭН периодически отключается и включается вновь. С помощью изменения времени нахождения ТЭНа во включенном и выключенном состояниях можно варьировать скорость испарения влаги в пробе, тем самым обеспечивается возможность использовать прибор для измерений влажности самых разных веществ.

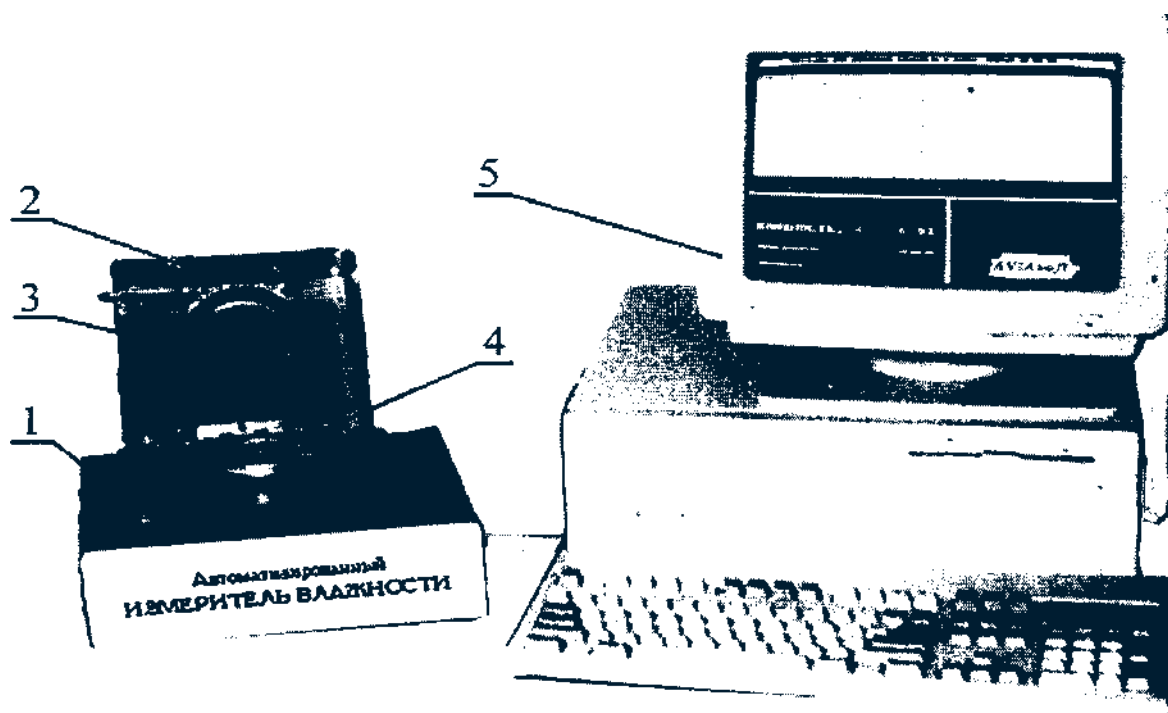


Рис. 6.3. Внешний вид автоматизированного измерителя влажности: 1-корпус прибора; 2-крышка; 3-ТЭН; 4-кювета с веществом; 5-персональный компьютер

В весовом устройстве для измерения массы пробы используются четыре индуктивных датчика, размещенных по периметру грузоприемной платформы. Каждый из датчиков представляет собой пару катушек индуктивности, намотанных на полый цилиндрический каркас. Внутри каркаса может перемещаться ферритовый стержень, жестко связанный с грузоприемной платформой. Перемещение платформы под действием силы тяжести пробы приводит к перемещению сердечника вдоль оси каркаса, что сопровождается увеличением индуктивности одной катушки и уменьшением другой. Эти изменения преобразуются в напряжение и далее в цифровой код, который вводится в компьютер. Использование четырех датчиков позволяет снизить влияние перекоса грузоприемной платформы, вызванного неравномерным распределением пробы вещества по поверхности кюветы.

Условием окончания процесса измерений является отсутствие изменений массы пробы, что говорит о полном удалении влаги из вещества. Практически выход из режима измерений производится одним из трех способов. Первый способ представляет собой автоматический выход, основанный на анализе последних результатов измерений массы и



установления факта отсутствия ее изменений. Этот способ применяется в случаях, когда не накоплен достаточный опыт измерения влажности данного конкретного вещества и неизвестно примерное время, требующееся для полного удаления влаги. Второй способ выхода из режима измерений осуществляется автоматически по истечении определенного времени, заданного в настройках прибора. Этот способ требует знания приблизительного времени сушки, что обычно имеет место в реальных производственных условиях. Третий способ является ручным и осуществляется путем нажатия соответствующей клавиши или выбора пункта меню. В этом способе отсутствие изменений массы пробы в процессе ее сушки определяется визуально по графику на экране монитора.

Пакет прикладных программ обеспечивает настройку прибора и установку режимов измерений; сбор данных, их статистическую обработку и представление результатов на экране монитора; запись результатов в файл для длительного хранения и их чтение из файла; управление включением и выключением источника инфракрасного нагрева; градуировку датчиков и т.д. Как и в описанном выше автоматизированном вискозиметре, большинство из этих функций можно осуществить лишь по паролю, то есть используется два уровня доступа к ресурсам прибора - для лаборантского и инженерного составов.

Вид основного меню программы «Автоматизированный измеритель влажности» представлен на рис.6.4. В графическое окно выводится зависимость массы пробы от времени сушки, в информационное окно — текущее значение массы и массы в исходном состоянии, а также значение влажности, рассчитанное по окончанию измерений. В этом же окне имеются четыре кнопки управления, позволяющие инициировать процесс измерений, сменить настройки прибора, получить информацию о последнем измерении влажности или закончить работу с прибором. Все эти функции доступны на любом уровне, кроме функции смены настроек прибора, требующих знания пароля. Справа от информационного окна выводятся графические образы массы пробы в процессе ее сушки, измеряемые всеми датчиками.

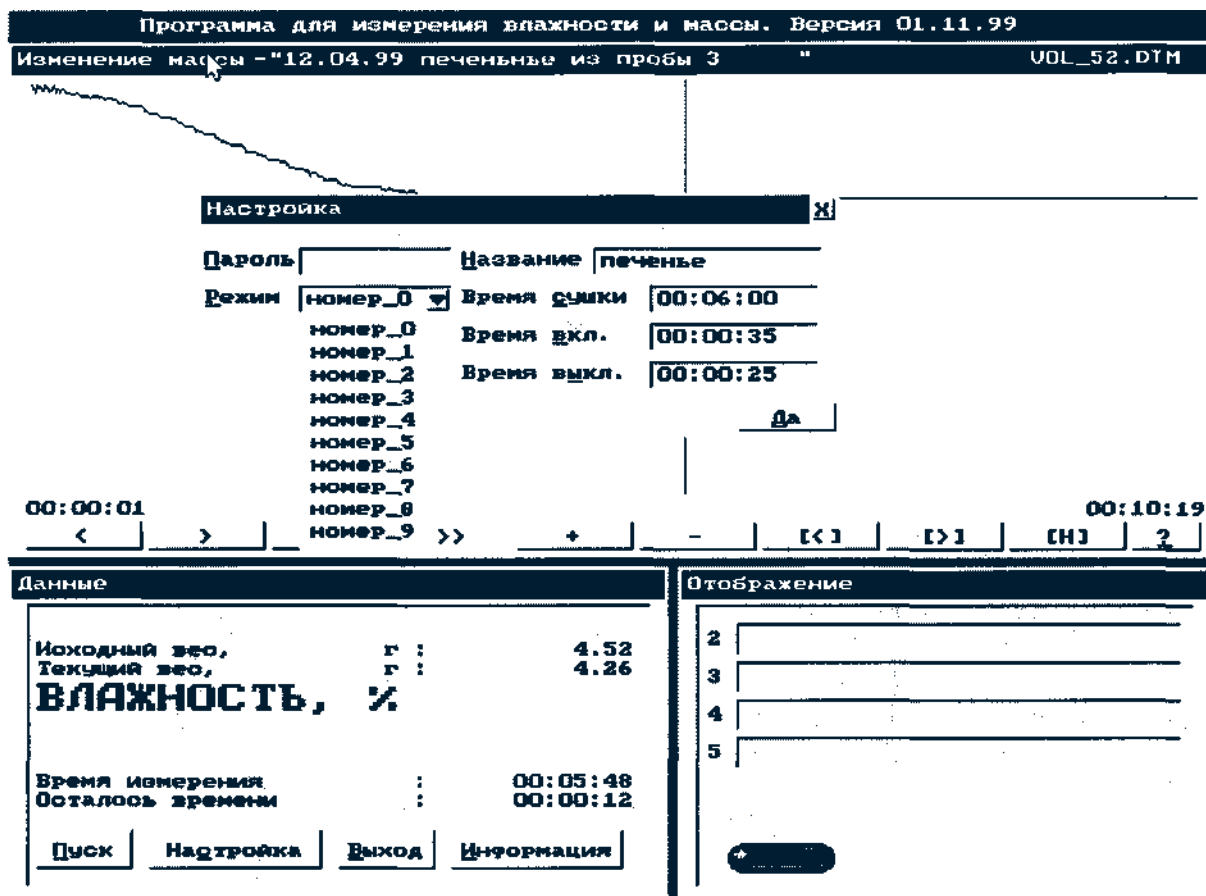


Рис .6.4. Вид меню программы «Автоматизированный измеритель влажности»

С помощью пароля можно активизировать скрытую полоску меню с пунктами, дающими доступ ко всем ресурсам прибора. В частности, выбор соответствующего пункта меню позволяет проверить работу всего прибора или отдельных его блоков (ТЭНа, датчиков, платы), проверить выполнение отдельных процедур, составляющих измерительный процесс, просмотреть записанные ранее результаты измерений, изменить время сушки и шаг опроса датчиков, а также способ выхода из режима измерений, включить или выключить звуковые предупредительные сигналы и т.д.

В качестве примера на рис.6.5 показаны фрагменты экрана монитора при выборе некоторых пунктов меню. Выбор, например, пунктов *Файл* и *Алгоритм* приводят к обязательному выполнению последовательности операций, исключающей пропуск каких-либо процедур, предусмотренных схемой измерений. В то же время имеется возможность выполнить лишь часть операций, что бывает полезным на стадии отработки режимов измерений. Пункты меню *Настройка* и *Нагреватель* позволяют выбрать из библиотеки нужный режим включения/выключения ТЭНа.

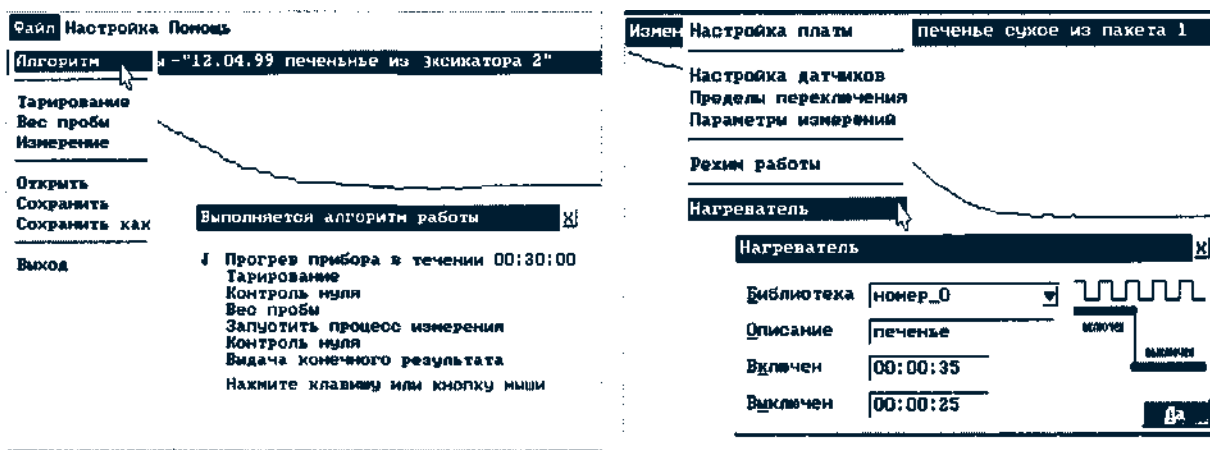


Рис. 6.5. Фрагменты экрана монитора при выборе пунктов меню *Файл* и *Настройка*

Автоматизированный измеритель влажности изготовлен по заказу Ульяновской кондитерской фабрики «Волжанка» и предназначен для контроля влажности готовой продукции (печенье, вафли, конфеты и т.д.). Опыт его использования показал, что время измерений влажности значительно сокращается по сравнению со стандартным термовесовым методом, в котором отсутствует возможность контроля массы пробы в процессе ее сушки. Так, например, измерение влажности печенья описанным выше прибором занимает время порядка 5-6 минут, в то время как продолжительность измерений в стандартном тепловоздушном методе, требующем 30 минут сушки в специальном сушильном шкафу при температуре 130° и последующего остывания в течение 30 минут в эксикаторе, составляет время порядка одного часа. В задачах, требующих высокой оперативности измерений влажности, это может оказаться очень важным фактором.

В измерителе влажности, как и в описанном выше вискозиметре, используются два уровня доступа к ресурсам прибора. Полностью все ресурсы доступны лишь после набора пароля, в противном случае можно лишь провести измерения и ознакомиться с протоколом, куда автоматически заносятся все результаты измерений. Без знания пароля невозможно внести изменения в настройки прибора или как-то исправить содержимое файла с протоколом результатов измерений. Все это, в конечном итоге, способствует надежности и объективности технологического контроля влажности.

### **6.3. Микропроцессорный комплекс для измерений и контроля перемещений, толщины и геометрических размеров**

В настоящее время сложились два основных направления в разработке и производстве автоматизированных средств измерений [45]. Одно из них базируется на использовании специализированных плат сбора данных, позволяющих осуществлять управление измерительным прибором и передавать результаты измерений в компьютер, а также реализовывать так называемые виртуальные приборы, конструктивно состоящие из одной или нескольких плат сбора данных. Другое направление - это разработка автономных приборов с микропроцессорным управлением, способных осуществлять процесс измерений и обработки результатов полностью самостоятельно и, только когда это необходимо, передавать результаты в компьютер посредством последовательного или параллельного интерфейса.

Рассматриваемый ниже микропроцессорный комплекс [89] относится ко второму направлению. Его основное назначение - измерение геометрических размеров объектов несложной формы и контроль возможного выхода размеров за пределы технологических допусков; контроль толщины диэлектрических и металлических слоев, например, лакокрасочных покрытий на металлической основе; измерение перемещений объектов в случаях, когда скорость их перемещений невелика и соответствует возможностям последовательного интерфейса.

Конструктивной основой комплекса является описанное в главе 3 микропроцессорное устройство, структурная схема которого изображена на рис.3.2. Управляет работой устройства контроллер, выполненный на основе ПЛК 80с3 1 фирмы Intel. В основном режиме работы все результаты измерений выводятся на индикаторное устройство и одновременно с этим посредством последовательного интерфейса RS-232 передаются в персональный компьютер для их последующей обработки и представления на экране монитора в графической и текстовой формах.

Внешний вид комплекса, состоящего из измерительного устройства, сопряженного с персональным компьютером, пульта управления с индикаторным устройством и набора электромагнитных датчиков, представлен на рис.6.8. Клавиатура на пульте управления позволяет

вывести на индикатор информацию от одного из измерительных каналов, изменить формат выводимой информации, зафиксировать показания индикаторного устройства. Кнопки управления на передней панели устройства служат для изменения коэффициента усиления выходного преобразователя параметров. Здесь же расположены разъемы для подключения пульта и кабеля, соединяющего прибор с компьютером.



Рис. 6.8. Внешний вид микропроцессорного комплекса

В комплексе используются три разновидности датчиков: индуктивные, вихретоковые и индуктивные контактного типа. Их основные характеристики представлены в таблице 6.1. Конструктивные особенности всех датчиков, за исключением пятого, подробно описаны в главе 2. Что касается индуктивного датчика контактного типа, то его основу составляет упругая пружина от динамометра, жестко соединенная с контактным щупом. Пружина находится внутри полого цилиндра и под действием внешнего усилия может растягиваться, пока контактный щуп не достигнет поверхности объекта. Так как деформация пружины вызывает изменения ее индуктивности, то это дает возможность измерять величину растяжения пружины, а значит и вертикальное перемещение контактного щупа от нулевого положения до поверхности объекта. Тем самым можно определить геометрический размер объекта в одном из направлений.

Для оценки погрешности были проведены серии измерений с использованием специальных образцов, геометрические размеры которых предварительно измерялись микрометром. Указанные образцы обеспечивали строго определенные расстояния между датчиком и объектом. Число измерений в серии выбиралось равным 30 и предполагалось, что распределение случайных погрешностей подчиняется нормальному закону. В качестве оценки случайной погрешности принималось утроенное среднее квадратичное отклонение; к нему добавлялось значение инструментальной погрешности измерительного устройства, рассчитанное в главе 2, что в итоге для основной приведенной погрешности дало величину 0,4 %. Таблица 6.1.

Основные характеристики датчиков

Номер датчика	Тип датчика	Измеряемая величина	Диапазон измерений, мм	Погрешность, %	Габариты, мм
1	индуктивный	расстояние	0...10	0,4	12x12x5
2	вихретоковый	расстояние	0...40	0,4	040x40
3	вихретоковый	толщина	0..2	0,4	020x30
4	вихретоковый	толщина	0...0Д	0,4	015x30
5	индуктивный (контактный)	расстояние	0...100	0,4	020x180

Вид экрана монитора при работе с программой контроля геометрических размеров показан на рис.6.9. Программа предназначена для измерения размеров у нескольких объектов, графические образы которых выведены на экран, анализа результатов измерений на предмет выхода их за пределы допустимых диапазонов и подсчета количества объектов, у которых геометрические размеры в норме. Изменение номера контролируемого объекта осуществляется с клавиатуры компьютера.

Момент времени, когда автоматически производится контрольный отсчет, определяется по кратковременной фиксации показаний датчика при дополнительном условии, что щуп датчик находится в пределах границ рабочей зоны измерений. Имеется дополнительная возможность осуществить контрольный отсчет путем нажатия соответствующей клавиши. Продолжительность анализируемого временного интервала для определения факта касания щупа с объектом, а также границ рабочей зоны контроля, могут быть программно изменены с помощью нажатия соответствующей «горячей» клавиши.



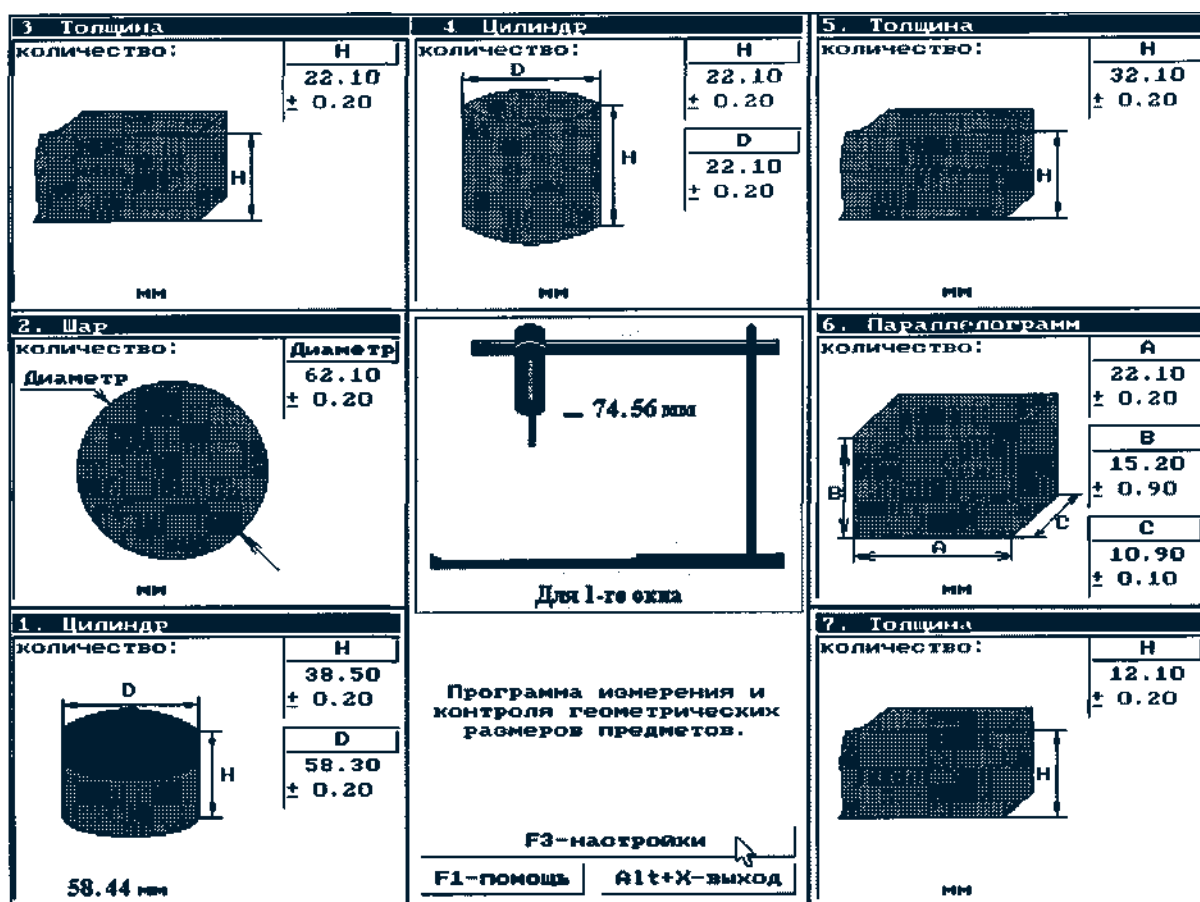


Рис. 6.9. Вид экрана монитора в программе «Контроль геометрических размеров»

Данная программа позволяет осуществлять измерения и контроль геометрических размеров, включая и толщину. Для измерений и контроля перемещений объектов с помощью датчиков, входящих в состав комплекса, предусмотрена возможность ввода результатов измерений в соответствующие программы, в частности, «Мультиметр» и «Многоканальный осциллограф», описанные в главе 4. В этом случае чтение результатов измерений производится не с выхода АЦП платы расширения, а из компорта компьютера. Кроме этого, комплекс может быть использован для измерений и других, не связанных с геометрическими размерами или перемещениями, физических величин, например, массы, силы, индукции постоянного магнитного поля и т.д.

Рассмотренный микропроцессорный комплекс может использоваться при проведении контрольно-измерительных операций в случаях, когда имеется большое количество объектов контроля, и когда не требуется высокая точность измерений, а в большей мере важна производительность.



Примером может служить операция контроля размеров деталей, изготовленных штамповкой. Автоматизированная отбраковка в этом случае производится значительно быстрее, чем ручная. Кроме этого, к комплексу можно подключить несколько датчиков и, тем самым, дать возможность осуществлять контроль одновременно нескольким операторам, что еще больше способствует увеличению производительности данной технологической операции.

#### **6.4. Измерительные преобразователи с двумя степенями свободы и их использование в устройствах дистанционного управления**

Измерительные преобразователи линейных и угловых перемещений типа сельсинов широко применяются в различного рода системах дистанционного управления и контроля в качестве устройств измерения положения объектов или в качестве устройств формирования управляющих воздействий на исполнительные механизмы. Наибольшее развитие в силу своей простоты конструкции и надежности в работе получили преобразователи, управляющие одной координатой объекта, например, угловым перемещением руля в самолетах и судах, линейным перемещением затворов шлюзовых камер и т.д. Вместе с тем, существует множество задач, в которых требуется измерять положение объекта (или формировать сигналы, изменяющие это положение), обладающего двумя и более степенями свободы. Например, при бурении нефтяной скважины требуется контролировать отклонение ее оси от заданного направления, отклонение в данном случае характеризуется двумя углами. Аналогично, при наблюдении за удаленными объектами с помощью телескопической системы, необходимо знать пространственную ориентацию телескопа, что также требует измерений двух координат.

Разработкой соответствующих двухкоординатных систем активно занимался научный коллектив под руководством Куликовского Л. Ф. [54]. Ими создано довольно большое количество различных преобразователей с двумя и тремя степенями свободы, отличающихся друг от друга как по конструкции, так и по принципу действия. Среди них имеются ферродинамические, электродинамические и магнитоиндукционные преобразователи, а также параметрические преобразователи индуктивного,

емкостного и резисторного типов [44]. Что касается их применения, то это, в первую очередь, следящие системы, измерители траекторий и пространственных углов (вектометры), компенсаторы переменного тока и напряжения. Кроме этого, измерительные преобразователи с двумя степенями свободы можно использовать в качестве устройств дистанционного управления беспилотными летательными средствами, роботами-манипуляторами, а также для ввода информации в компьютер, в частности, устройств управления курсором на экране монитора.

Последняя задача является типичной задачей дистанционного управления объектом, имеющим две степени свободы. Вместе с этим, разработка устройств управления курсором имеет и самостоятельное значение. Несмотря на то, что для управления курсором используется много самых разных манипуляторов, поиск новых конструктивных вариантов постоянно продолжается [25]. Безусловным лидером среди них является манипулятор типа «мышь», однако в некоторых случаях, в частности, в мультимедийных или игровых приложениях, требующих быстрого и точного позиционирования курсора, более удобны манипуляторы других типов.

Одним из таких устройств является разработанный нами манипулятор типа «электронный компас» [86], в котором управление перемещениями курсора осуществляется посредством изменений ориентации манипулятора относительно магнитного поля Земли. Внешний вид манипулятора представлен на рис.6.10. Его основу составляют два

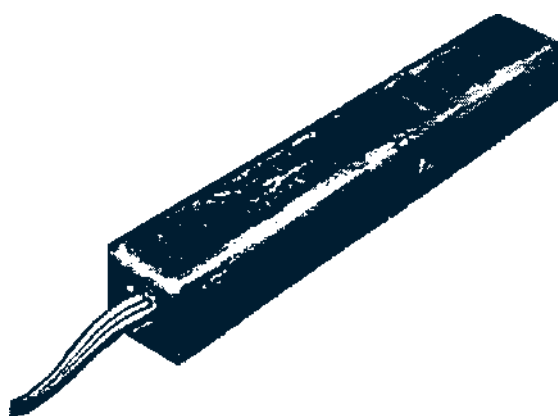


Рис. 6.10. Манипулятор типа «электронный компас»

взаимно перпендикулярных друг к другу датчика магнитного поля. В отличие от авторов работы [127], использующих для измерения магнитного поля Земли магниторезистивные датчики, в нашем манипуляторе применены индуктивные датчики магнитного поля [87], подробно описанные в главе 2. Один из датчиков управляет X-координатой курсора,

другой Y-координатой. Каждый датчик содержит катушку индуктивности с сердечником из материала с прямоугольной петлей гистерезиса. С помощью подмагничивающего поля рабочая точка выводится на крутой участок зависимости  $\mu(H)$ . Изменение ориентации датчика относительно магнитного поля Земли приводит к изменению магнитной проницаемости сердечника и, соответственно, индуктивности измерительной катушки. Эти изменения преобразуются в напряжение и далее в цифровой код, который вводится в компьютер. Чувствительность датчика составляет величину порядка  $5 \cdot 10^4$  В/Тл, что вполне достаточно для использования его в качестве электронного компаса (для сравнения, горизонтальная составляющая магнитного поля Земли примерно равна 50 мкТл).

Ввод координат курсора в компьютер производится с помощью платы расширения, описанной в главе 4. Взаимодействие платы с центральным процессором осуществляется через запросы прерывания и шину данных. Через шину данных передается информация о параметрах датчиков, о номере канала измерения и о факте нажатия кнопок управления манипулятора. Через нее же процессор передает в плату информацию, задающую режим работы измерительного устройства. Это позволяет программно изменять чувствительность датчиков, количество задействованных каналов измерения, частоту опроса датчиков. Кроме того, наличие нескольких измерительных каналов позволяет задействовать одновременно несколько манипуляторов, что может оказаться полезным в некоторых приложениях, например в диалоговых играх.

Конструктивно манипулятор выполнен в пластмассовом корпусе размером 140x20x10 мм. Перемещение курсора по экрану осуществляется наклоном манипулятора вправо/влево и вперед/назад. Две кнопки управления выполняют те же функции, что и у «мыши». По сравнению с «мышью» данный манипулятор имеет ряд преимуществ. В частности, для работы с ним не требуется свободной поверхности стола. Есть возможность работать с клавиатурой, одновременно удерживая манипулятор в руке. И, наконец, в нем нет механически перемещаемых узлов, являющихся самым уязвимым местом с точки зрения надежности.

Другим устройством, предназначенным для управления положением курсора на экране монитора, является манипулятор типа «индуктивный

мини-джойстик» [97] с перемещающейся в специальном шарнире управляющей рукояткой. Внешний вид устройства показан на рис. 6.11 а. Его принцип действия основан на управлении перемещениями курсора посредством изменений параметров двух индуктивных датчиков. Один из датчиков управляет X - координатой курсора, другой Y - координатой.

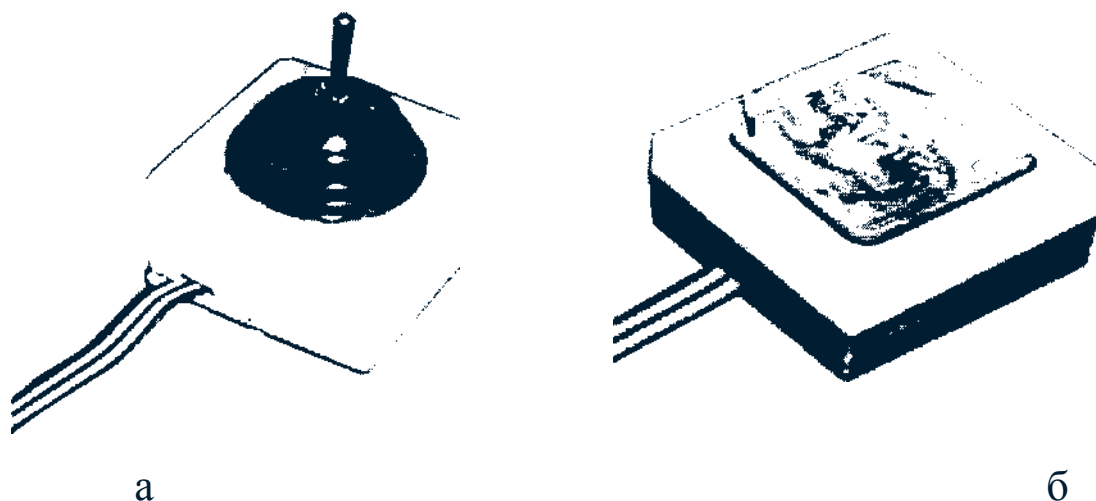


Рис. 6.11. Внешний вид манипуляторов с управляющей рукояткой (а) и управляющей клавишей (б)

Манипулятор выполнен в пластмассовом корпусе размером 20x20x10 мм, высота управляющей рукоятки около 10 мм. Внутри корпуса на печатной плате смонтированы четыре дросселя марки ДГТМ 0,1/50 мкГн, образующие квадрат, в плоскости которого находится ферритовый стержень, соединенный посредством шарнира с управляющей рукояткой. Наклон рукоятки вперед/назад или вправо/влево вызывает перемещения ферритового стержня относительно дросселей, что приводит к изменению их индуктивности. Эти изменения в плате расширения преобразуются в цифровой код, поступающий в компьютер.

Принцип действия манипулятора, изображенного на рис.6. И б, основан на управлении положением курсора посредством изменения сопротивлений магнитных цепей двух датчиков (для X- и Y- координат). Каждый датчик состоит из двух чувствительных элементов, конструкция которых показана на рис.2.7в. Эти элементы, расположенные по периметру печатной платы, включаются в измерительное и опорное плечи первичного преобразователя, изменение их параметров вызывает соответствующие изменения выходного напряжения измерительного устройства.

Изменение положения курсора на экране монитора осуществляется с помощью управляющей клавиши, слегка выступающей над крышкой манипулятора. Клавиша соединена с корпусом манипулятора в одной точке с помощью специального шарнира, что дает возможность произвольно изменять ориентацию плоскости клавиши относительно вертикальной оси. Снизу по периметру клавиши закреплены ферромагнитные пластины. Наклон клавиши манипулятора вправо/влево и вперед/назад, вызывает изменения зазора между соответствующей пластиной и магнитопроводом чувствительного элемента, что, в свою очередь, вызывает изменения параметров обоих датчиков. Изменения параметров датчиков преобразуются в цифровой код, который с помощью платы расширения вводится в компьютер. Основное достоинство двух последних типов манипуляторов в их конструктивной простоте и небольших габаритных размерах, что дает возможность встраивать их в клавиатуру компьютера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт эксплуатации разработанных и описанных в монографии приборов показал, что новый способ преобразования параметров электромагнитных датчиков позволяет значительно улучшить основные характеристики приборов и расширить их области применения. Во-первых, повышение быстродействия дает возможность увеличить спектральный диапазон измеряемых вибраций, причем измерения осуществляются бесконтактным способом, что очень важно для задач вибродиагностики. Во-вторых, способ обеспечивает высокую чувствительность датчиков, что позволяет измерять не только общепринятый набор диагностических параметров, в частности, вибрации, электрические токи и напряжения, но и относительно слабые электромагнитные поля рассеяния, несущие важную информацию о техническом состоянии контролируемого объекта. В-третьих, сам принцип работы первичного преобразователя, основанный на возбуждении переходных процессов кратковременными импульсами, дает возможность легко реализовать многоканальный режим работы, при котором измерения осуществляются одновременно несколькими датчиками, причем по функциональному назначению датчики могут отличаться друг от друга.

Технические возможности специализированной платы расширения для персонального компьютера, являющейся конструктивной основой виртуальных приборов, и развитое программное обеспечение позволяют значительно сократить время на разработку новых автоматизированных контрольно-измерительных приборов, в которых источниками измерительной информации являются датчики электромагнитного типа. Этому же способствует и разработка базовых конструктивных вариантов измерительных устройств на основе программируемых микроконтроллеров.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. - М.: Машиностроение, 1965.
2. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А. А. Измерительная техника. - М.: Высш. школа, 1991.
3. Аш Ж. и др. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. - М.: Мир, 1992.
4. Бажанов А. А. Обзор развития средств измерений и тестирования: с 1980-х в XXI век // Мир компьютерной автоматизации. - 1999. - № 4.
5. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. - М.: Радио и связь, 1985.
6. Биргер И. А. Техническая диагностика. - М.: Машиностроение, 1978.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. - М.: Наука. 1981.
8. Бударин А. А. Концепция построения виртуальной измерительной лаборатории // Мир компьютерной автоматизации. - 2000. - № 3.
9. Булычев А. В., Ванин В. К. Метод контроля состояния механической части асинхронного электродвигателя // Электротехника. - 1997. - № 10.
10. Бутов А. В., Пикульский В. А., Поляков Ф. А., Шандыбин М. И. Электромагнитный метод выявления замыканий листов активной стали статора турбогенератора // Электрические станции. - 1998. - № 11.  
Н.Бычков М. Г., Кисельникова А. В., Семенчук В. А. Экспериментальные исследования шума и вибраций в вентильно-индукторном электроприводе // Электричество. - 1997.-№ 12.
12. Волгин Л. И. Аналоговые операционные преобразователи для измерительных приборов и систем. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
13. Волгин Л. И. Линейные электрические преобразователи для измерительных приборов и систем. - М.: Сов. радио, 1971.
14. Волохов С. А. Диагностирование обрыва стержня ротора асинхронного двигателя // Электротехника. - 1998. - № 2.
15. Вострокнутов Н. Н. Цифровые измерительные устройства. Теория погрешностей, испытания, поверка. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
16. Газетин С. А. На тестер надейся...// За рулем. - 1999. - № 6.
17. Гармаш В. С. Метод контроля исправности стержней ротора короткозамкнутого АД // Изв. вузов. Энергетика. - 1990.- № 10.
18. Гашимов М. А., Гаджиев Г. А., Мирзоева С. М. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин // Электрические станции. - 1998.-№10.
19. Гашимов М. А., Гаджиев Г. А., Мирзоева С. М. Диагностирование эксцентриситета и обрыва стержней ротора в асинхронных электродвигателях без их отключения // Электротехника. - 1998. - № 10.
20. Гемке Р. Г. Неисправности электрических машин. - Л.: Энергоиздат, 1989.
21. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. - М.: Машиностроение, 1987.
22. Геращенко В. В., Жадик А. В. Микропроцессорное устройство для диагностирования двигателей // Автомобильная промышленность. - 1999. - № 4.
23. Гольдштейн Е. И. Нетрадиционные способы функционального контроля и диагностики электромеханических, электротехнических и электротехнологических систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2000. - № 1.



24. Григорьев А. В., Осотов В. Н., Ямпольский Д. А. О вибрационном контроле технического состояния статоров турбогенераторов ТГВ-300 // Электрические станции.-1998. - №8.
25. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. - СПб.: Питер, 1997.
26. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника. - М.: Высш. школа, 1991.
27. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. - Л.: Энергоатомиздат, 1988.
28. Датчики и приборы для измерения неэлектрических величин: Справочник / Карцев Е. А., Карцева Е. В. - М.: Московское НТО приборостроителей и метрологов, 1992.
29. Дорошко С. М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам. - М.: Транспорт, 1984.
30. Достал И. Операционные усилители. - М.: Мир, 1982.
31. Дробышевский А. А., Левицкая Е. И., Андреев Д. В., Бельцер В. Р. Диагностика деформаций обмоток силовых трансформаторов т реакторов методом низковольтных импульсов // Электротехника. - 1997. - №3.
32. Елагин В. П., Коробов О. Г., Лурье А. И., Панибратец А. Н. Устройство для измерения магнитного поля рассеяния трансформатора / Патент РФ // Изобретения. - 1997.-№33.
33. Зангер Г. Электронные системы. Теория и применение. - М.: Мир, 1980.
34. Зверлов Б. В., Лисов А. А., Соколов Б. П., Субботин А. А. Определение механических потерь электрических машин роторного типа и установление уровня деградации // Измерительная техника. - 1999. - № 4.
35. Изерман Р. Перспективные методы контроля, обнаружения и диагностики неисправностей и их применение // Приборы и системы управления. - 1998. - № 4.
36. Измерения в промышленности. Справочник. В 3-х кн. / Под ред. П. Профоса.- М.: Металлургия, 1990.
37. Инструментальные средства для микроконтроллеров. Каталог. - М.: Фитон, 1998.
38. Иртегов Ю. П., Линькова Г. П., Потапов И. А. Автоматизированные системы непрерывного контроля состояния энергетических установок // Энергетик. -1999.- № 9.
39. Казаченко В. Ф. Микроконтроллеры Intel MCS-196/296. - М.: ЭКОМ, 1997.
40. Калявин В. П., Мозгалецкий А. В. Технические средства диагностирования.-Л.: Судостроение, 1984.
41. Каппелини В., Константинович А. Дж., Эмилиани П. Цифровые фильтры и их применение. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
42. Карасев В. А., Максимов В. П., Сидоренко М. К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1978.
43. Карманов С. В. Техническая диагностика - основа рационального обслуживания // Энергетик. - 1998. - №10.
44. Карпов Е. М. Измерительные преобразователи с двумя степенями свободы и их применение. - М.: Энергия, 1972.
45. Керер Р. Новая тенденция в области измерений на базе персональных компьютеров // Приборы и системы управления. - 1997. - №4.
46. Коллакот Р. А. Диагностирование механического оборудования. - Л.: Судостроение, 1980.
47. Коломбет Е. А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов.- М.: Радио и связь, 1991.
48. Кольский Н. И. Контроль и диагностика узлов автомобилей // Контрольно-измерительные приборы и системы. - 1998. - № 10.

49. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. -М.: Машиностроение, 1987.
50. Королев Д. М., Никулин В. Б., Колесников С. А. Применение сплайн-функций для обработки результатов измерений // Приборы и системы управления. -1998.-№ 6.
51. Кулаичев А. П. Компьютерный контроль процессов и анализ сигналов. - М.: Информатика и компьютеры, 1999.
52. Куликов В. А. Измерительная техника на базе ПК: основы, тенденции и предложения на рынке (обзор по материалам зарубежной печати) // Контрольно-измерительные приборы и системы. - 1998. - № 5.
53. Куликовский К. Л., Купер В. Я. Методы и средства измерений. - М.: Энергоатомиздат, 1986.
54. Куликовский Л. Ф. Автоматические информационно-измерительные приборы. - М.-Л.: Энергия, 1966.
55. Куликовский Л. Ф. Индуктивные измерители перемещений. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.
56. Левин С. Ф. Virtual instruments: что это? Приборы или программы // Контрольно-измерительные приборы и системы. - 1998. - № 5.
57. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин.- Л.: Энергоатомиздат, 1983.
58. Логинов В. Н. Электрические измерения механических величин. - М.: Энергия. 1976.
59. Малиновский В. Н. Цифровые измерительные мосты. - М.: Энергия, 1976.
60. Мартяшин А. И., Шахов Э. К., Шляндин В. М. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения. - М.: Энергия, 1976.
61. Марпл С. П. Цифровой спектральный анализ и его приложения. - М.: Мир, 1990.
62. Методы электрических измерений / Под ред. Цветкова Э. И. -Л.: Энергоатомиздат, 1990.
63. Мозгалеvский А. В., Еаскаров Д. В. Техническая диагностика. - М.: Высш. школа, 1975.
64. Немцов М. В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. -М.: Энергоатомиздат, 1989.
65. Новиков Ю. В., Калашников О. А., Гуляев С. Э. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC. - М.: ЭКОМ., 1998.
66. Новицкий П. В., Кнорринг В. Г., Гутников В. С. Цифровые приборы с частотными датчиками. -Л.: Энергия, 1970.
67. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. -Л.: Энергия, 1970.
68. Опрос выявляет основные тенденции в области измерительных систем // Приборы и системы управления. - 1999. - №5.
69. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы. - Киев.: Высш. школа, 1986.
70. Пархоменко П. П., Согомонян Е. С. Основы технической диагностики. - М.: Энергия, 1981.
71. Пасынков В. В., Чиркин Л. К., Шинков А. Д. Полупроводниковые приборы. - М.: Высш. школа, 1981.
72. Перцовский М. И. Системы промышленной и лабораторной автоматизации: методы и средства построения // Мир компьютерной автоматизации. - 2000. - № 3.

72. Перцовский М. И. Системы промышленной и лабораторной автоматизации: методы и средства построения. // Мир компьютерной автоматизации. - 2000. - № 3.
73. Проектирование датчиков для измерения механических величин. / Под ред. Е. П. Осадчего. - М.: Машиностроение, 1979.
74. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник/ Под ред. Черенкова В. В. - Л.: Машиностроение, 1987.
75. Руднев П. И., Шиляев С. Н. Виртуальные приборы или как сделать контрольно-измерительную систему быстро и качественно.// Контрольно-измерительные приборы и системы. - 1998. - №5.
76. Руднев П. И., Шиляев С. Н. Один компьютер - вся измерительная лаборатория. Спектроанализаторы. // Приборы и системы управления. - 1999. - № 3.
77. Русов В. А. Контроль прессовки обмоток и магнитопровода крупных трансформаторов по вибропараметрам. // Электрические станции. - 1998. - №6.
78. Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры.- Л.: Энергия, 1979.
79. Сергеев А. Г., Крохин В. В. Метрология. - М.: Логос, 2000.
80. Смирнов В. И. Виртуальные приборы на основе датчиков индуктивного типа.// Датчики и системы. - 2001. - № 1.
81. Смирнов В. И. Индуктивное устройство для измерения линейных перемещений. / Патент РФ № 2125708 // Изобретения. - 1999.- № 3.
82. Смирнов В. И. Индуктивный датчик магнитного поля. // Метрология. - 1999. -№ 10.
83. Смирнов В. И. Индукционно-индуктивные датчики и способ интегрирования их выходных сигналов. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001.- №4..
84. Смирнов В. И. Компьютерная диагностика электродвигателей. // Научно-технический калейдоскоп. - 2000.- № 1.
85. Смирнов В. И. Новый способ преобразования параметров датчиков индуктивного и резисторного типов: возможности и перспективы. // Вестник УлГТУ. Серия «Приборостроение, электроника, энергетика». - Ульяновск: УлГТУ, 1998.
86. Смирнов В. И. Способ ввода координат курсора. / Патент РФ № 2151420 // Изобретения. - 2000. - № 17.
87. Смирнов В. И. Способ и устройство преобразования сигналов от датчиков индуктивного и резисторного типов. / Патент РФ № 2168728 //Изобретения. 2001.-№ 16
88. Смирнов В.И. Устройство управления курсором. // Приборы и системы управления. - 1999. - №4.
89. Смирнов В. И., Абакумов В. И., Жарков В. В., Ильин М. Г. Автоматизированный измеритель влажности. // Радиоэлектронная техника. Сборник научных трудов. - Ульяновск: УлГТУ, 1999.
90. Смирнов В. И., Абакумов В. И., Жарков В. В., Ильин М. Г. Микропроцессорное устройство контроля геометрических размеров // Радиоэлектронная техника. Сборник научных трудов. - Ульяновск: УлГТУ, 1999.
91. Смирнов В. И., Абакумов В. И., Жарков В. В., Ильин М. Г. Новая схема первичного преобразователя и виртуальный прибор на ее основе. // Ученые записки. Серия физическая. - Ульяновск: УГУ, 1999.
92. Смирнов В. И., Жарков В. В. Измерение параметров электродвигателя в нестационарных режимах работы. // Радиоэлектронная техника. Сборник научных трудов. - Ульяновск: УлГТУ, 2000.

93. Смирнов В. И., Жарков В. В. Измерение полей рассеяния электрических машин. // Электроника, приборостроение, энергоэлектрика. Сборник научных трудов.- Ульяновск: УлГТУ, 2000.
94. Смирнов В. И., Жарков В. В. Использование спектральных методов для определения частоты вращения и величины радиальных биений объектов роторного типа. // Труды Ульяновского научного центра «Ноосферные знания и технологии».- 1999.-№ 1.
95. Смирнов В. И., Жарков В. В. Новый способ преобразования параметров индуктивных датчиков и измерительные устройства, реализованные на его основе. // Датчики и системы. - 2001. - № 4.
96. Смирнов В. И., Жарков В. В., Ильин М. Г. Автоматизированный вискозиметр. // Измерительная техника. - 2000. - № 6.
97. Смирнов В. И., Жарков В. В., Ильин М. Г. Автоматизированный комплекс для диагностики функционального состояния электрических машин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2000. - № 7.
98. Смирнов В.И., Ильин М. Г. Индуктивный мини-джойстик. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2000. - №5.
99. Смирнов В. И., Ильин М. Г. Контроллер измерительного устройства. // Радиоэлектронная техника. Сборник научных трудов. - Ульяновск: УлГТУ, 2000.
100. Смирнов В. И., Сергеев В. А., Абакумов В. И., Ильин М. Г. Специализированная сенсорная плата расширения. // Приборы и системы управления. - 1999.-№ 10.
101. Смирнов В. И., Сергеев В. А., Жарков В. В. Автоматизированный вибродиагностический комплекс. // Автоматизация и современные технологии. - 1999.-№ 10.
102. Смирнов В. И., Сергеев В. А., Жарков В. В., Ильин М. Г. Многофункциональный измерительный комплекс. // Измерительная техника. - 2000. - №1.
103. Смирнов В. И., Сергеев В. А., Смирнова А. М. Устройство для измерения линейных перемещений. / Патент РФ № 2052765 // Изобретения. - 1996. - № 2.
104. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC. / Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. - М.: Мир, 1992.
105. Спектор С. А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений. - Л.: Энергоатомиздат, 1987.
106. Сташин В. В., Урусов А. В., Мологонцева О. Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. - М.: Энергоатомиздат, 1990.
107. Столяров О. А., Червяков В. Б., Щипанов А. А. Компьютеризированные стенды испытаний электрических асинхронных двигателей. // Новые промышленные технологии. - 1998. - № 4-5.
108. Стрела В. И. Диагностика дефектов двигателей внутреннего сгорания.// Неразрушающий контроль качества. - 1991. - № 4.
109. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования.-Киев.:Техника, 1983.
- НО. Технические средства диагностирования: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. - М.: Машиностроение, 1989.
111. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы. -М.: Энергоатомиздат, 1990.
112. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин.- М.-Л.: Энергия, 1966.

113. Ферреро А. Измерения при несинусоидальных сигналах : новые подходы к старой проблеме науки и техники измерений. // Приборы и системы управления. - 1999.-№ 10.
114. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС.- М.:Мир, 1985.
115. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: В 2-х кн. - М.: Мир, 1986.
116. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы. - М.: Энергия, 1974.
117. Шляндин В. М. Цифровые измерительные устройства. - М.: Высш. школа, 1981.
118. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. Л.:Энергоатомиздат, 1986.
119. Шуп Т. Е. Прикладные численные методы в физике и технике. - М.: Высш. школа, 1990.
120. Юрьев А. С. Автосалон - 99. // Контрольно-измерительные приборы и системы.- 1999.-№ 10.
121. Явленский К. П., Явленский А. К. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем. - М.: Машиностроение, 1983.
122. Яковлев Н. И. Бесконтактные электроизмерительные приборы для диагностирования электронной аппаратуры. -Л.: Энергоатомиздат, 1990.
123. Bowers Stewart V. Induction motor speed detemination by flux spectral analysis.// Патент США. - 1996. НПК 324/173.
124. Burth M., Ropke K., Filbert D. Diagnose von Universalmotoren mit Hilfe des Strom- und Vibrationsignal. // Technische Messen. - 1997. - № 1.
125. Cameron D., Lang J., Umans S. The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors.- IEEE Transactions on Industry Applications. Nov/Dec. - 1992.-№ 6.
126. Carsten L., Durakbasa T. Energy flow based quality control for electric motors.// Sound and Vibrations. - 1998. - № 7.
127. Dettmann F., Loreit U. Magneto-resistiver sensor zur erdfeldmessung mit batteriebetrieb// Sensor Mag. - 1999. - № 2.
128. Gleich- und Wechselfelder erfassen. // Elektrische Maschinen.-1999.- №1.
129. Eaton W. The inductive proximity sensor: Industry's workhorse. // Instrumentation and Control Systems. - 1989. - № 9.
130. Mauer G. F. On-line cylinder fault diagnostics for Internal Combustion engines. // IEEE Trans. on Industrial Electronics. - 1990. - №3.
131. Takeshi N., Hiroaki T., Aisushi F., Kaneo M. Бесконтактное измерение вторичного тока и потока асинхронного двигателя для устойчивого регулирования его момента и частоты вращения с использованием обратной связи по вторичному току. // Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. - 1998. - № 6.
132. Vieten M. Vibrationsmessungen in Maschine integrieren. // Maschinenmarkt. - 1997.-№ 13.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие.....</b>	<b>3</b>
<b>Глава первая. Переходные процессы в электромагнитных датчиках и их использование для преобразования параметров.....</b>	<b>5</b>
1.1. Классификация существующих способов преобразования параметров электромагнитных датчиков.....	5
1.2. Анализ переходных процессов в ZC-колебательном контуре.....	11
1.3. Переходные процессы в LD-контуре как основа способа преобразования параметров ЭМД.....	14
1.4. Техническая реализация способа преобразования, основанного на измерение длительности переходного процесса в LD-контуре.....	19
<b>Глава вторая. Конструктивные особенности электромагнитных датчиков и их основные характеристики.....</b>	<b>25</b>
2.1. Классификация электромагнитных датчиков по принципу действия.....	25
2.2. Анализ требований, предъявляемых к датчикам и измерительным устройствам, предназначенным для решения задач функциональной диагностики.....	37
2.3. Конструктивные особенности датчиков, основанных на преобразовании параметров в длительность переходных процессов.....	41
2.4. Формирование градуировочных зависимостей с использованием сплайн-интерполяции.....	51
2.5. Математическая модель измерительного устройства и оценка инструментальной составляющей погрешности.....	56
2.6. Оценка методической погрешности вихретокового датчика, обусловленной конечными размерами объекта измерений.....	67
<b>Глава третья. Базовые варианты конструкций микропроцессорных измерительных устройств.....</b>	<b>71</b>
3.1. Анализ архитектуры современных программируемых микроконтроллеров и их функциональных возможностей.....	71
3.2. Автономное микропроцессорное устройство для контроля технологических параметров и процессов.....	76
3.3. Микропроцессорное устройство для сбора и хранения диагностических параметров.....	81
3.4. Многофункциональное измерительное устройство.....	85

Глава четвертая. <b>Виртуальные приборы как средства контроля технологических параметров и процессов.....</b>	<b>88</b>
4.1. Особенности построения современных виртуальных приборов, их основные технические характеристики и возможности.....	88
4.2. Специализированная сенсорная плата расширения для персонального компьютера.....	91
4.3. Многоканальный цифровой осциллограф.....	97
4.4. Мультиметр.....	100
4.5. Многоканальный детектор-счетчик металлических объектов..	102
4.6. Спектроанализатор.....	105
4.7. Анализатор нестационарных процессов.....	115
Глава пятая. <b>Автоматизированные приборы для функциональной диагностики электрических машин и автомобильных двигателей .....</b>	<b>119</b>
5.1. Анализ современных методов и средств функциональной диагностики электрических машин и автомобильных двигателей.....	119
5.2. Использование полей рассеяния для оценки технического состояния электромеханических объектов.....	139
5.3. Комплекс для функциональной диагностики электрических машин на основе персонального компьютера.....	142
5.4. Портативный прибор для диагностики электрических машин.....	148
5.5. Портативный мотор-тестер для диагностики автомобильных двигателей.....	155
Глава шестая. <b>Автоматизированные приборы для контроля технологических параметров и процессов.....</b>	<b>160</b>
6.1. Автоматизированный вискозиметр вибрационного типа.....	160
6.2. Автоматизированный измеритель влажности.....	166
6.3. Микропроцессорный комплекс для измерений и контроля перемещений, толщины и геометрических размеров.....	172
6.4. Измерительные преобразователи с двумя степенями свободы и их использование в устройствах дистанционного управления.....	176
<b>Заключение.....</b>	<b>181</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>182</b>



**Научное издание**  
СМИРНОВ Виталий Иванович

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
И КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ДАТЧИКОВ**

Редактор М.М.Козлова

Изд. лиц. 020640 от 22.10.97.

Подписано в печать 02.07.01. Формат 60x84/16

Бумага писчая. Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд.л. 10,00.

Тираж 150 экз. Заказ "1776

Ульяновский государственный технический университет

432027, Ульяновск, Северный Венец, 32,

Типография УлГТУ, 432027, Ульяновск, Северный Венец, 32.