

УДК 621.317.08

В. Г. ГУСЕВ, А. Ю. ДЕМИН

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ МАЛОЙ ЗАДАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ (ДЛЯ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ)

Рассматриваются вопросы построения и практического применения развивающегося подкласса измерительных устройств — измерительных генераторов заданной электрической мощности. Приводятся результаты исследований.

Измерение; генератор; заданная электрическая мощность

Одной из часто измеряемых физических величин является электрическое сопротивление и характеризуемые им величины (например, концентрация растворов или расход жидких сред). Как правило, измерение сопротивления проводится в режимах обеспечения заданного тока или напряжения. Эти два подхода вполне оправдывают себя в случаях, когда исследуемый объект не является теплозависимым, т. е. его сопротивление практически не зависит от его температуры. В противном случае трудно получить результаты, воспроизводимые при повторных измерениях. С подобной проблемой часто сталкиваются при измерениях в медицине, электрохимии. Поэтому создание высокоточных измерительных преобразователей для теплозависимых объектов измерения является важной научно-технической задачей. Многолетние исследования, проводимые на кафедре информационно-измерительной техники УГАТУ, позволили установить, что при построении устройств, предназначенных для измерения параметров теплозависимых компонентов, целесообразно применять измерительные цепи, обеспечивающие неизменное значение мощности, рассеиваемой в объекте измерений независимо от его электрического сопротивления. Такой подход обеспечивает определенность термодинамического состояния и неизменность теплового возмущения, вносимого в объект измерения.

Электронные устройства, которые обеспечивают неизменное значение электрической мощности, рассеиваемой в произвольном сопротивлении нагрузки, подключенной к их выходу, с погрешностью, не превышающей заданное значение, были названы измерительными генераторами заданной мощности (ИГЗМ). В опубликованных работах рассмо-

трены общие принципы построения ИГЗМ и некоторые эскизные структуры аналоговых и цифровых генераторов. Их авторами проведены первые экспериментальные исследования. Однако разработанные ранее структуры не в полной мере удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям: так, в медицине при исследовании кожного покрова пациентов необходимы ИГЗМ, работающие в динамическом диапазоне сопротивлений нагрузки 10, имевшиеся схемы генераторов были рассчитаны на работу в узком динамическом диапазоне 3.

С учетом того, что в большинстве случаев значение мощности получается только с использованием компонентов интегральной электроники, для сопротивлений до 1 МОм это значение мощности, рассеиваемой в нагрузке, не превышает 2 мВт. Дальнейшее увеличение мощности, рассеиваемой в нагрузке, возможно при использовании отдельных усилителей мощности. Вопросы построения усилителей мощности достаточно хорошо изучены, поэтому интерес с научной точки зрения представляет исследование именно маломощных ИГЗМ. Классификация способов построения ИГЗМ может выглядеть так, как показано на рис. 1. Генераторы заданной мощности здесь подразделяются на две группы в зависимости от значения получаемой мощности: постоянного мгновенного и постоянного среднего. Значение мощности получается либо прямым путем за счет реализации уравнений, результатом которых является ток или напряжение, воздействующие на нагрузку, либо косвенным путем, за счет дополнительной коррекции электрических параметров. Следует отметить, что все типы ИГЗМ строятся с помощью управляемых источников тока (УИТ) или напряжения (УИН). О достоинствах и недостатках генераторов на основе

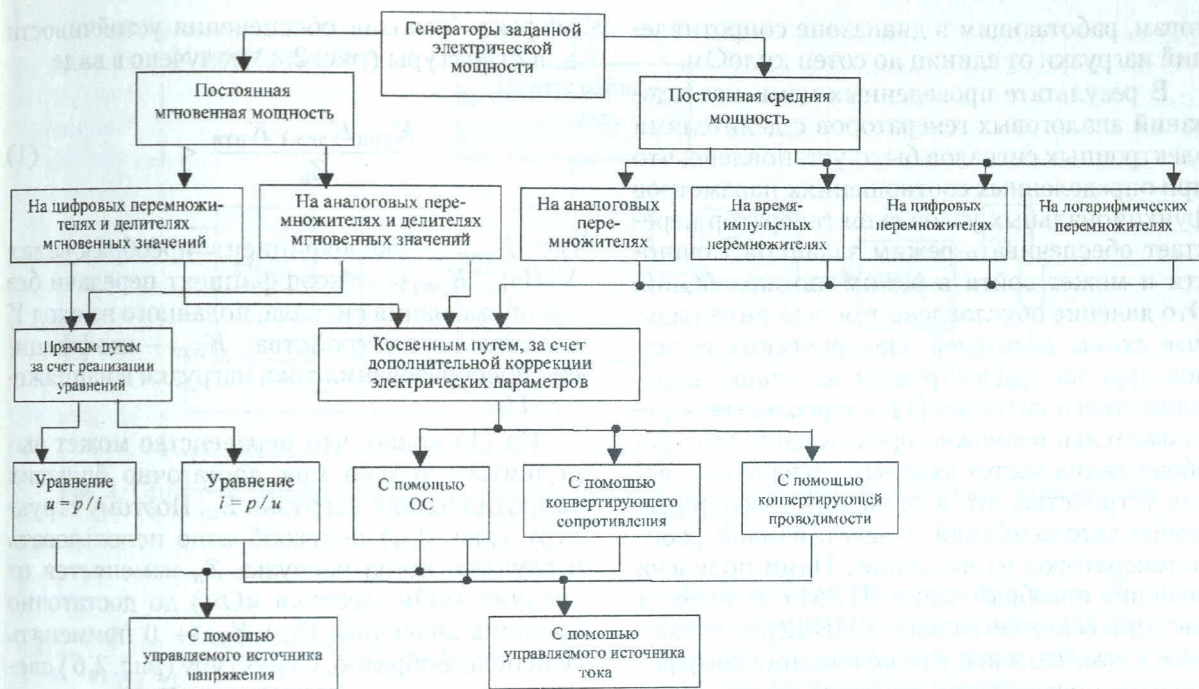


Рис. 1. Классификация способов и технических приемов построения генераторов электрической мощности

аналоговых и цифровых микросхем далее мы расскажем более подробно.

Еще несколько слов о практическом применении генераторов подобного типа. В медицине остро стоит вопрос получения достоверной информации о состоянии электрических параметров кожного покрова человека, так как, измеряя их в биологически активных точках, возможно проводить экспресс-диагностику психофизического состояния человека. Так, например, известно о появлении линий или зон сниженного электрического сопротивления, проявляющихся при определенных заболеваниях внутренних органов. Были разработаны и использовались приборы для оценки потенциала и электрического сопротивления зон кожного покрова. Но задача диагностики по электрическим свойствам кожного покрова оказалась более сложной, чем представлялась разработчикам методов диагностики по электрическим параметрам, и соответствующие приборы применяются ограниченно. Это во многом есть результат плохой стабильности и воспроизводимости результатов, получаемых при выполнении простейших измерительных операций, и несовершенства существующей измерительной аппаратуры. Из-за этих обстоятельств даже очень перспективный для диагностики метод Фолля не признан Всемирной организацией здравоохранения и используется, в основном, как метод, не входящий в

состав диагностических исследований, оплачиваемых из фонда медицинского страхования. Поэтому в России он применяется ограниченно. Необходимость в применении режима заданной электрической мощности внешнего воздействия обусловлена тем, что только он позволяет получить определенность и воспроизводимость внешнего возмущения, вносимого в объект измерений. При измерительных операциях, проводимых в режимах заданного тока или напряжения, рассеиваемая в объекте мощность зависит от свойств самого объекта. В итоге параметры нелинейного тепловязисимого сопротивления определяются в неопределенном термодинамическом режиме и поэтому плохо воспроизводимы. Из-за этого обстоятельства укоренилось мнение о невозможности получения хорошей стабильности и воспроизводимости результатов при выполнении измерительных операций с использованием источника внешней электрической энергии. Применение ИГЗМ позволяет строго нормировать мощность, вносимую в объект измерения, и за счет этого существенно повысить воспроизводимость получаемых результатов. Системы, основанные на генераторах подобного типа, можно применять не только для целей медицинской диагностики, но и, например, в системах для электрофореза, при создании «детекторов лжи» и так далее. Поэтому наибольшее внимание в наших исследованиях было уделено именно генера-

торам, работающим в диапазоне сопротивлений нагрузки от единиц до сотен килоОм.

В результате проведенных нами исследований аналоговых генераторов с делителями электронных сигналов было установлено, что при определенных соотношениях параметров функциональных узлов схем генератор перестает обеспечивать режим заданной мощности и может войти в режим автоколебаний. Это явление обусловлено тем, что интегральные схемы делителей электрических сигналов друг на друга строятся на основе перемножителей сигналов [1], а у реальных перемножителей возможно прохождение без преобразования частот входных сигналов на выход устройства, что и приводит к возникновению автоколебаний и неустойчивой работе генераторов на их основе. Нами получена функция преобразования ИГЗМ с делителем электрических сигналов и УИН [2], отличающаяся тем, что в ней учтено влияние коэффициентов прохождения частот входных сигналов делительного устройства.

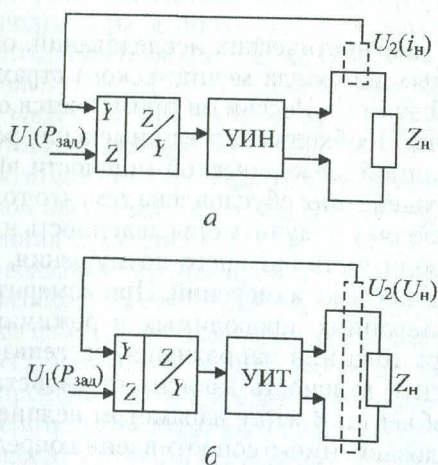


Рис. 2. Структуры генераторов заданной электрической мощности: с УИН (а); с УИТ (б)

Предложено влияние прохождения частот через делительное устройство устранять схемотехническим способом, путем введения двух дополнительных каналов.

Показано, что существует опасность потери устойчивости, которая имеется у структур (рис. 2).

Она обусловлена тем, что если устройство деления сигналов друг на друга неидеально и через него частично проходит без преобразования сигнал, поданный на вход Y , то в структуре возникает положительная обратная связь. Когда петлевое усиление достигнет единицы, устойчивость теряется и возникают автоколебания или проявляется триггерный

эффект. Условие обеспечения устойчивости для структуры (рис. 2, а) получено в виде

$$\frac{K_{\text{УИН}} K_{\text{дел}} Y K_{\text{ПТН}}}{Z_{\text{н}}} < 1, \quad (1)$$

где $K_{\text{УИН}}$ — коэффициент преобразования УИН; $K_{\text{дел}} Y$ — коэффициент передачи без преобразования сигнала, поданного на вход Y делительного устройства; $K_{\text{ПТН}}$ — коэффициент преобразования тока нагрузки в напряжение U_2 .

Из (1) видно, что неравенство может выполняться только при достаточно больших сопротивлениях нагрузки $Z_{\text{н}}$. Поэтому структуру (рис. 2, а) целесообразно использовать в случаях, когда нагрузка $Z_{\text{н}}$ изменяется от средних (кОм–десятки кОм) до достаточно больших значений. При $Z_{\text{н}} \rightarrow 0$ применять ее нецелесообразно. Структуру (рис. 2, б) следует использовать тогда, когда $Z_{\text{н}}$ изменяется от малых значений $Z_{\text{н}} \rightarrow 0$ до средних. При очень больших значениях $Z_{\text{н}} \rightarrow \infty$ структура может потерять устойчивость и в этом случае использовать ее нецелесообразно. Технические возможности обеих структур во многом зависят от значения $K_{\text{дел}} Y$, т.е. от качества устройства деления сигналов друг на друга. Чем меньше $K_{\text{дел}} Y$, тем больший диапазон возможных изменений коэффициентов $K_{\text{УИН}}$ и $K_{\text{ПТН}}$.

Специально для автоматизированных систем управления была разработана структура цифрового ИГЗМ на основе однокристалльной микроЭВМ (ОМЭВМ) с встроенными ЦАП и АЦП. Она показана на рис. 3.

В предлагаемой структуре на входной мультиплексор контроллера поступает сигнал $U(i_{\text{н}})$ от ПТН, пропорциональный току $i_{\text{н}}$, протекающему в сопротивлении нагрузки. Затем данный сигнал поступает на АЦП, после чего попадает в микроконтроллер, где может подвергаться предварительной обработке, и затем осуществляется операция деления для получения численного значения, соответствующего напряжению, которое должно воздействовать на нагрузку для обеспечения режима заданной мощности; временные интервалы воздействующего напряжения также формируются программно. После этого код, характеризующий напряжение воздействия, поступает на ЦАП, откуда данное напряжение поступает на УИН и затем непосредственно на сопротивление нагрузки.

Функция преобразования цифровых ИГЗМ с указанной структурой

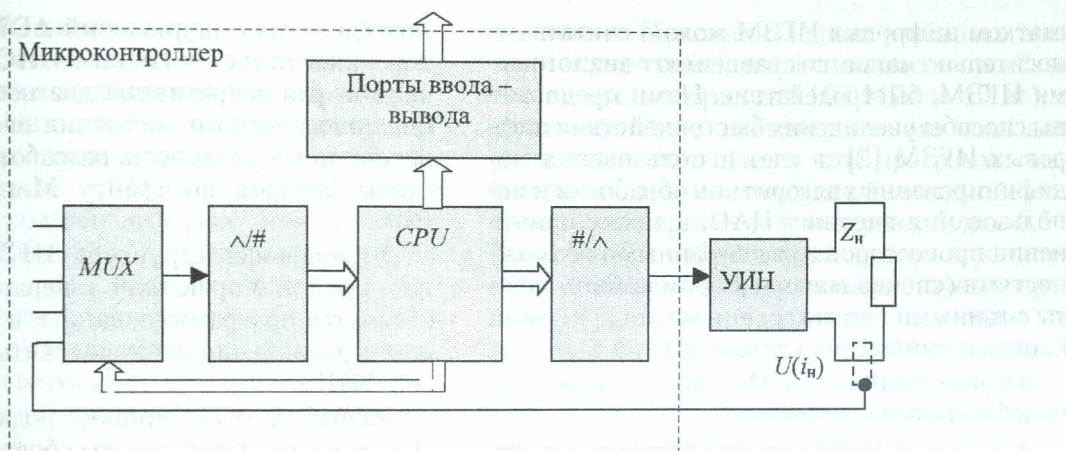


Рис. 3. Структура генератора заданной электрической мощности на микроконтроллере с управляемым источником напряжения

$$P = \frac{K_{уин}}{K_{птн} K_1} \frac{U_{ЦАП}}{2^n - 1} \frac{U_{АЦП}}{2^m - 1} N_0 = K N_0, \quad (2)$$

где $K = U_{АЦП} U_{ЦАП} K_{уин} / (K_{птн} K_1 (2^n - 1) \times (2^m - 1))$; $K_{уин}$ — коэффициент преобразования УИН; $K_{птн}$ — коэффициент преобразования ПТН; K_1 — коэффициент преобразования усилителя напряжения от ПТН; $U_{ЦАП}$ — максимальное выходное напряжение ЦАП; n — число разрядов ЦАП; $U_{АЦП}$ — максимальное входное напряжение АЦП; m — число разрядов АЦП; N_0 — код, хранящийся в ОМЭВМ и характеризующий значение мощности воздействия.

При выводе данной математической модели были приняты следующие допущения:

- а) характеристики преобразования УИН, ПТН, ЦАП и АЦП линейны;
- б) коэффициенты преобразования функциональных блоков стабильны;
- с) время преобразования ЦАП и АЦП значительно меньше времени изменения сигнала на их входах.

Справедливость первого допущения обусловлена техническими характеристиками современных ЦАП и АЦП, а справедливость третьего допущения обусловлена выбором ЦАП и АЦП с соответствующим быстродействием.

Математическая модель позволяет проводить расчет ИГЗМ и сделать следующие выводы:

1) Погрешности коэффициентов преобразования отдельных функциональных блоков $K_{уин}$, $K_{птн}$, K_1 могут быть сведены к пренебрежимо малым значениям путем предварительной цифровой обработки сигналов, поступающих в ОМЭВМ.

2) Величины разрядностей n , m , N_0 определяют основную погрешность ИГЗМ: чем эти значения выше, тем выше точность поддержания заданной мощности.

Показано, что полная погрешность цифрового ИГЗМ определяется погрешностями АЦП, ЦАП и конечным числом разрядов произведения (частного), а также изменением сопротивления нагрузки в течение одного цикла преобразования. Для ИГЗМ с операцией деления к погрешностям ЦАП и АЦП будет дополнительно добавляться погрешность деления ($\pm 0,5$ младшего разряда ЦАП). У ИГЗМ, в которых режим заданной мощности обеспечивается за счет осуществления умножения кода тока нагрузки на код напряжения, данная составляющая погрешности будет отсутствовать, но устройства, построенные по подобной структурной схеме, будут иметь очень низкое быстродействие (рабочая частота установления заданной мощности на сопротивлении нагрузки менее 10 кГц) за счет большого количества итераций. Предложены алгоритмы обработки измерительной информации ИГЗМ, написана программа рабочего цикла ИГЗМ [2]. С ее помощью и по известным техническим параметрам ОМЭВМ определены частоты установления заданной мощности и полные погрешности ИГЗМ на их основе. Цифровые ИГЗМ с разработанной структурой имеют на порядок меньшую погрешность, чем имеющиеся аналоги, и в два-три раза лучше по быстродействию (частоты установления заданной мощности превышают 30 кГц).

Анализ характеристик современных ОМЭВМ и ЦАП, а также результаты расчетов позволяют утверждать, что погрешность предлагаемых ИГЗМ составляет 0,1–1,9%. Недо-

статком цифровых ИГЗМ можно считать относительно малое, по сравнению с аналоговыми ИГЗМ, быстродействие. Нами предложены способы увеличения быстродействия цифровых ИГЗМ [2] за счет использования модифицированных алгоритмов обработки и использования внешних ЦАП, а также применения процессоров с расширенными возможностями (специальным набором команд работы с данными или встроенными аппаратными блоками умножения (деления)).

Использование ИГЗМ, построенных по подобной схеме, позволяет:

- получить устойчивую структуру, так как операция деления выполняется в цифровой форме;
- корректировать изменения характеристик преобразования отдельных функциональных узлов от изменения температуры путем цифровой обработки сигнала;
- регистрировать и (или) выводить информацию об измеряемом параметре во внешние устройства для управления технологическим процессом;
- гибко изменять режим работы ИГЗМ за счет программного кода;
- уменьшить массогабаритные показатели и увеличить надежность генератора;
- обеспечить получение стабильных метрологических характеристик в течение длительного времени, что важно при серийном производстве и интенсивной эксплуатации.

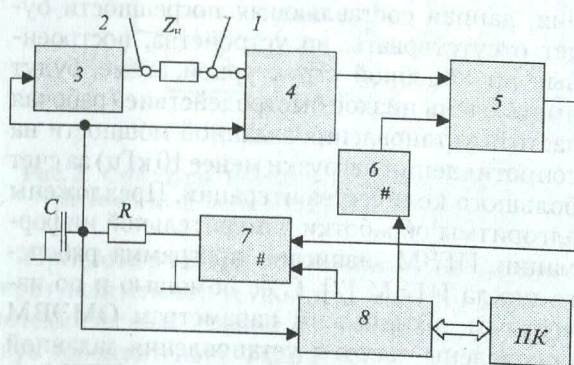


Рис. 4. Упрощенная структура ИГЗМ: 1 – электрод № 1; 2 – электрод № 2; 3 – инвертор напряжения; 4 – блок воздействия и измерения (БВИ); 5 – БДН; 6 – БОН; 7 – блок коммутации; 8 – плата сбора данных

Для подтверждения теоретических исследований и практического применения в области исследования электрических параметров кожного покрова пациентов был разработан и применялся на практике ИГЗМ, собранный по схеме с аналоговым делителем сигнала

(делитель напряжений AD734). Генератор применяется в составе ИИС, предназначенной для оперативной диагностики психофизиологического состояния операторов ответственных установок, разработанной с участием авторов по гранту Минобразования РФ.

Упрощенная структура ИГЗМ приведена на рис. 4. Управление генератором осуществляется программно, данные о напряжении на сопротивлении нагрузки считываются платой АЦП.

Разработанный прибор подключается к ПК через интерфейс платы сбора данных ЛА-4 (12 бит АЦП, 16 однополосных или 8 дифференциальных аналоговых каналов, 16 разрядов цифрового порта, гальваническая развязка аналоговых входов, шина ISA). Длительность импульса мощности, воздействующего на нагрузку, задается в настройках разработанного для данного прибора программного обеспечения, работающего с платой, и для режима работы по прерыванию от платы сбора информации она может быть установлена от 1 мс и более, скважность импульсов – любая. Генератор работает в режиме обеспечения заданной мгновенной мощности, на нагрузку воздействуют импульсы напряжения, их частота следования и скважность задаются программно. ИГЗМ обеспечивает четыре значения мощности воздействия от 4 до 0,3 мВт, выбор мощности воздействия также осуществляется программно.

Принцип работы ИГЗМ описывается уравнением (3). К объекту измерений (в данном случае – биологической ткани) прикладывается напряжение

$$u_{\text{возд}} = p_{\text{возд}} / i_{\text{возд}}, \quad (3)$$

где $p_{\text{возд}} = \text{const}$ – заданная мощность воздействия, $i_{\text{возд}}$ – ток через биологическую ткань.

Ток $i_{\text{возд}}$ преобразуется с помощью совмещенного УИН и ПТН (далее БВИ) в напряжение $u(i)$, которое в данном варианте построения устройства поступает на вход блока деления напряжений (далее – БДН), реализованного на аналоговом делителе AD734.

Выходное напряжение делительного устройства равно

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{K} \frac{U_2}{U_1},$$

где K – коэффициент пропорциональности.

БВИ выполняет две функции — обеспечение напряжения воздействия на сопротивление нагрузки и измерения тока, протекающего в ней. На второй вход БДН поступает опорное напряжение $u_{\text{бон}}$ с блока опорных напряжений (далее — БОН), характеризующее электрическую мощность, рассеиваемую в нагрузке. БОН обеспечивает получение четырех напряжений, определяющих четыре мощности воздействия. Соответствующая мощность воздействия устанавливается программно и получается в результате подачи нужной комбинации управляющих бит от цифрового порта платы ЛА-4.

В результате деления на выходе БДН получается напряжение

$$u_{\text{бдн}} = k \frac{u_{\text{бон}}}{u(i)}, \quad (4)$$

где k — масштабный коэффициент, определяемый БДН (1/В), для данной схемы включения AD734 он равен 10.

Это напряжение должно присутствовать на нагрузке для обеспечения рассеяния мощности, определяемой напряжением $u_{\text{бон}}$.

Для получения данных о погрешности поддержания на нагрузке заданной мощности проведена серия экспериментов, в ходе которых сопротивление нагрузки задавалось с помощью образцовых резисторов в диапазоне 10–950 кОм и фиксировалось значение напряжения с помощью платы 12-разрядного АЦП (длительность импульса — 1 мс, скважность — 2). Число наблюдений для каждого значения мощности воздействия — 25. Значение мощности находилось по значениям напряжения и сопротивления нагрузки. Для мощностей P_1, P_2, P_3, P_4 получены соответственно следующие значения СКО: $1,06 \cdot 10^{-6}$, $9,93 \cdot 10^{-7}$, $5,09 \cdot 10^{-6}$, $1,28 \cdot 10^{-6}$ Вт. Установлено, что максимальное значение погрешности обеспечения мощности (4,3%) получается для минимальной мощности воздействия 0,293 мВт и максимального значения сопротивления нагрузки, и при увеличении мощности оно уменьшается для 0,410 мВт соответственно на 2,5%. Это связано с тем, что с уменьшением мощности и увеличением сопротивления нагрузки уменьшается ток нагрузки, а следовательно, и напряжение, поступающее на вход делителя напряжений, что и приводит к росту погрешности операции деления. Работа ИИС (в состав которой входит ИГЗМ) под управлением программы, выполняемой в многозадачной операционной системе, накладывает ограничение на минимальное время воздействия импульса заданной

мощности. При вычислениях реального времени осуществляется считывание количества тактов процессора (для 100 МГц ≈ 10 нс), с учетом выполнения программного кода для расчетов и того факта, что программа выполняется под многозадачной системой, минимальный временной интервал будет 0,5–1 мс. Чтобы избежать указанного ограничения, необходимо блок задания точных временных интервалов включать как один из внешних блоков на плате ИГЗМ и программировать режим его работы через цифровой порт либо использовать встроенные во многие платы сбора данных таймеры.

Впервые исследовано влияние реактивной составляющей сопротивления нагрузки на технические характеристики генератора. Установлено, что подключение к активной нагрузке ИГЗМ индуктивной составляющей (до 80 мкГн) не влияет на длительность переходного процесса установления заданной мощности и погрешность поддержания заданной мощности. Емкостная составляющая нагрузки ИГЗМ до нескольких сотен пикоФарад не нарушает режима заданной мощности генератора, но увеличивает длительность переходного процесса (для сопротивлений нагрузки до 200–300 кОм) и изменяет тип переходного процесса установления значения напряжения нагрузки для малых мощностей воздействия, так как требуется время на зарядку емкости нагрузки.

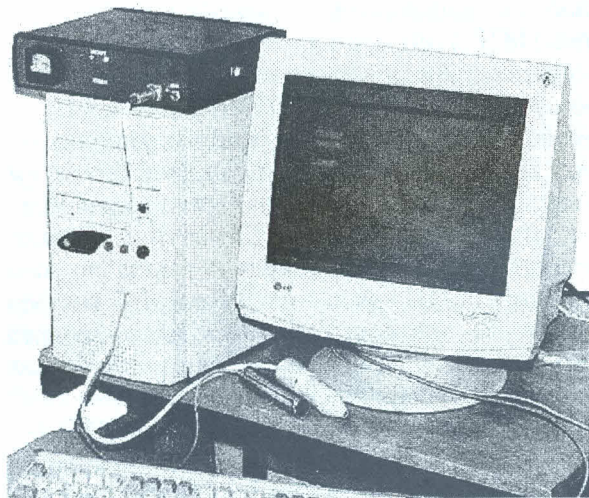


Рис. 5. Диагностическая система для измерения электрических параметров локальных зон кожного покрова в работе с ПК

Установлено, что применение ИГЗМ с аналоговыми делителями нежелательно при наличии у нагрузки с сопротивлением 100

кОм и более емкостной составляющей порядка нескольких сотен пикофарад, ввиду большого времени переходного процесса (более 140 мкс) и возможного выхода генератора из режима заданной мощности. На рис. 5 приведена фотография системы измерения параметров локальных зон кожного покрова пациентов, в которой применен разработанный аналоговый ИГЗМ.

Как представляется, на данном этапе у измерительных генераторов заданной электрической мощности большие перспективы применения как в медицине, так и в других областях. При этом, несмотря на достижения современной электроники в области прецизионных аналоговых интегральных схем, будущее всё-таки за цифровыми генераторами на основе однокристалльных микроЭВМ со встроенными ЦАП и АЦП, превосходящими аналоговые генераторы по всем параметрам, кроме, пожалуй, быстродействия. Для более детального ознакомления с принципами работы и проектирования ИГЗМ, а также измерительных систем на их основе можно рекомендовать источники [3, 4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимонтеев В. Н., Величко В. А. Аналоговые перемножители сигналов в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Радио и связь, 1982. 112 с.
2. Демин А. Ю. Измерительные генераторы малой заданной мощности (развитие теории, ис-

следования, разработка): Дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2004.

3. Гусев В. Г., Мирин Н. В., Черников И. Г. Принципы построения и структуры измерительных генераторов заданной электрической мощности // Измерительная техника. 1999. № 4. С. 26–31.
4. Демин А. Ю. Практическое применение измерительных генераторов заданной электрической мощности // Датчики и системы. 2004. № 7. С. 38–40.

ОБ АВТОРАХ



Гусев Владимир Георгиевич, проф., зав. каф. ИИТ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1965). Д-р техн. наук по элементам и устройствам выч. техники и систем управления (УГАТУ, 1987). Засл. деят. науки РБ, засл. изобр. БАССР. Иссл. в обл. электронных преобразователей.



Демин Алексей Юрьевич, ст. преп. той же кафедры. Дипл. магистр техн. и технол. по приборостроению (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по элементам и устройствам вычислительной техники и систем управления (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. измерит. техники.

