

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА • ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

В. Г. ГУСЕВ, И. А. КОСУЛИН

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ
ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ
МАЛОЙ ЗАДАННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ
С ДЕЛИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ
ЦИФРОАНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрен метод проведения измерений электрических параметров биологических тканей в режиме заданного значения рассеиваемой электрической мощности. Рассмотрены принципы построения и особенности работы цифровых измерительных генераторов заданной электрической мощности – устройств, обеспечивающих проведение измерений в этом режиме. *Электрические параметры биологических объектов ; электрическая мощность ; измерительные генераторы*

В ряде областей науки и техники, например, при проведении биологических и медицинских исследований, а также в электрохимии, в силу существенной тепловязимости и нелинейности объектов исследования является практически невозможным получение воспроизводимых результатов при использовании традиционных методов проведения электрических измерений. Под традиционными понимаются режимы с заданным электрическим напряжением или заданным электрическим током. Невозможность их использования обусловлена тем, что параметры объекта существенно изменяются вследствие воздействия на объект электрической энергией, в результате чего результат измерения зависит как от предыдущего состояния объекта, от длительности и уровня воздействия на него, так и от ряда внешних факторов [1].

При исследовании нелинейных и тепловязимых объектов является целесообразным использование режима измерения, обеспечивающего однозначное энергетическое воздействие, в том смысле, что в объекте измерения в единицу времени будет рассеиваться заданная электрическая мощность, т. е. его термодинамическое состояние при повторных измерениях будет одинаковым в пределах значения некоторой погрешности.

На практике использование такого подхода к проведению измерений требует разработки специального класса электронных устройств,

обеспечивающих неизменное значение электрической мощности, рассеиваемой в произвольном сопротивлении нагрузки, подключенной к их выходу, с погрешностью, не превышающей заданного значения, получившего название измерительных генераторов заданной электрической мощности (ИГЗМ) [2].

Один из подходов, позволяющих реализовать ИГЗМ, заключается в том, что на нагрузку осуществляется воздействие определенным электрическим параметром, например, напряжением, значение которого определяется в результате деления заданного значения мощности воздействия на значение протекающего в цепи нагрузки тока. Схема одного из вариантов такого ИГЗМ представлена на рис. 1. Идея ее работы заключается в следующем.

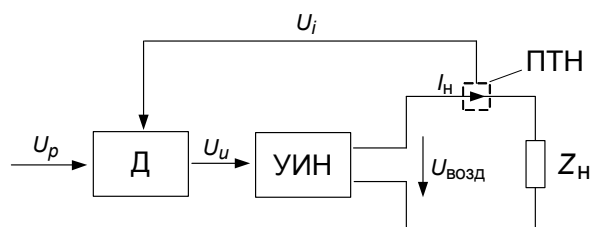


Рис. 1. Схема ИГЗМ с блоком деления на основе УИН

На нагрузку Z_n осуществляется непрерывное воздействие напряжением $U_{\text{возд}}$, формируемым управляемым источником напряжения (УИН). Значение напряжения $U_{\text{возд}}$ определяется значением управляющего для УИН напряжения U_u . В

свою очередь, значение напряжения U_u определяется как частное от деления напряжения U_p , соответствующего значению заданной мощности $P_{\text{зад}}$, на значение напряжения U_i , характеризующего ток I_n в цепи нагрузки. Операция деления осуществляется делителем (Д), преобразование величины тока нагрузки I_n в соответствующее ему напряжение U_i – преобразователем ток-напряжения (ПТН).

Таким образом, ИГЗМ, построенные на основе схемы по рис. 1, для обеспечения заданного значения рассеиваемой в нагрузке электрической мощности непрерывно воздействуют на нее напряжением $U_{\text{возд}}$, значение которого определяется из уравнения

$$U_{\text{возд}} = \frac{P_{\text{зад}}}{I_n} \quad (1)$$

или, в терминах рассматриваемой схемы,

$$U_{\text{возд}} = K \frac{U_p}{U_i}, \quad (2)$$

где $U_{\text{возд}}$ – выходное напряжение УИН, $P_{\text{зад}}$ – значение заданной мощности воздействия, I_n – ток нагрузки, U_p – напряжение, определяющее $P_{\text{зад}}$, U_i – напряжение, формируемое ПТН, K – обобщенный коэффициент, учитывающий соответствие между значениями I_n и U_i , $P_{\text{зад}}$ и U_p , и определяемый характеристиками преобразования ПТН и УИН.

Таким образом, логика работы ИГЗМ, его быстродействие и точность во многом определяются характеристиками используемого делителя, в зависимости от типа которого выделяют аналоговые и цифровые ИГЗМ.

В аналоговых ИГЗМ применяются микросхемы аналоговых делителей, например, AD734, AD539. Операция деления напряжения U_p , характеризующего мощность воздействия, на напряжение U_i , характеризующее ток нагрузки I_n , в результате которой определяется требуемое значение напряжения воздействия $U_{\text{возд}}$, осуществляется непрерывно. При изменении значения U_p или сопротивления Z_n в ИГЗМ происходит процесс установления в цепи нагрузки значения напряжения $U_{\text{возд}}$ и тока I_n , соответствующих заданной мощности рассеяния $P_{\text{зад}}$.

Аналоговые ИГЗМ обладают определенными недостатками, главный из которых – возможность потери устойчивости, связанная с тем, что в микросхемах аналоговых делителей наблюдается частичное прохождение без преобразования сигналов, поданных на отдельные входы, вследствие чего возникает положитель-

ная обратная связь. Потеря устойчивости проявляется либо в возникновении автоколебаний, либо в появлении триггерного эффекта.

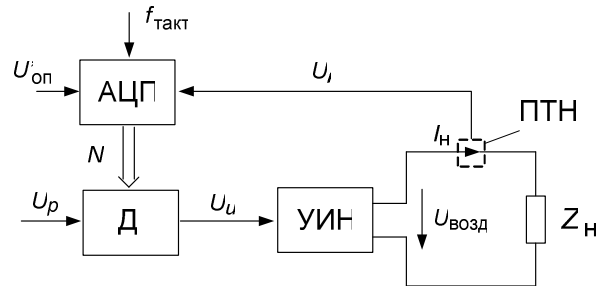


Рис. 2. Структурная схема цифрового ИГЗМ с делителем и УИН

Данное явление устранено в схеме цифрового ИГЗМ, представленной на рис. 2. В отличие от схемы аналогового ИГЗМ в нее введен аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий напряжение U_i в цифровой код N . Напряжение U_i , характеризующее напряжение воздействия на нагрузку $U_{\text{возд}}$, формируется делителем как частное от деления напряжения U_p на цифровой код N .

Применение АЦП в рассматриваемой схеме делает иным принцип работы цифрового ИГЗМ по сравнению с аналоговым. Это обусловлено двумя обстоятельствами – *периодичностью* осуществления операции деления во времени, связанной с тактированием АЦП тактовым сигналом с частотой $f_{\text{такт}}$, и *квантованностью* представления значений U_i , обусловленной их преобразованием в цифровой код N . Рассмотрим эти моменты более подробно.

Из-за периодичности выполнения операций деления переходный процесс установления заданной мощности $P_{\text{зад}}$ в цифровых ИГЗМ не является непрерывным, а представляет собой последовательность однократных операций деления, осуществляемых в определенные моменты времени (итераций).

Установление заданного значения рассеиваемой в нагрузке мощности $P_{\text{зад}}$ при итерационном подходе происходит следующим образом. Если последовательно производить операции деления значения заданной мощности $P_{\text{зад}}$ на значение тока нагрузки I_n , то в виде частного при каждой операции деления будем получать уточненное значение напряжения воздействия $U_{\text{возд}}$. После некоторого количества итераций будет получено значение напряжения $U_{\text{возд}}$, воздействие которым обеспечит рассеяние в нагрузке мощности $P_{\text{зад}}$ в пределах некоторой по-

грешности. Общий алгоритм установления мощности $P_{\text{зад}}$ будет иметь вид $U_{\text{возд1}} \rightarrow I_1 \rightarrow U_{\text{возд2}} = P_{\text{зад}}/I_1 \rightarrow U_{\text{возд2}} \rightarrow I_2 \rightarrow U_{\text{возд3}} = P_{\text{зад}}/I_2 \rightarrow U_{\text{возд3}} \rightarrow I_3 \rightarrow \dots$, где $U_{\text{возд}i}$ – рассчитанное в ходе i -й итерации значение напряжения $U_{\text{возд}i}$, I_i – значение тока нагрузки, используемое для его расчета в i -й итерации.

Итерационный характер процесса установления мощности обуславливает большую устойчивость цифровых ИГЗМ по сравнению с аналоговыми, поскольку действие обратной связи между ИГЗМ и нагрузкой не является непрерывным.

Включение в схему ИГЗМ АЦП приводит к возникновению инструментальной погрешности его работы, связанной с преобразованием значения напряжения U_i в цифровой код N и зависящей от разрядности АЦП.

Из-за квантованности представления напряжения U_i , получаемые в результате деления напряжения U_p на напряжение U_i , значения напряжения U_u также будут квантованными. Поскольку напряжение воздействия на нагрузку $U_{\text{возд}}$ определяется U_u , будут квантованы и его значения. В итоге цифровой ИГЗМ будет обеспечивать воздействие на нагрузку значениями мощности $P_{\text{зад}}$, принадлежащими конечному множеству значений.

Одним из подходов, применяемых при разработке цифровых ИГЗМ, является применение делителя на основе перемножающего цифроаналогового преобразователя (ЦАП), выполненного на основе R-2R матрицы сопротивлений и КМОП-ключей, схема которого приведена на рис. 3.

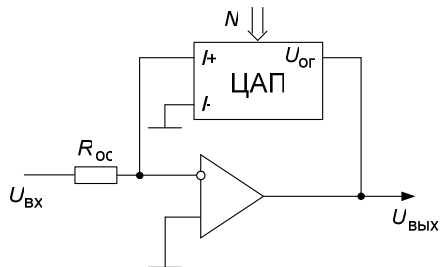


Рис. 3. Схема делителя на ЦАП

Данная схема по сути представляет собой инвертирующий усилитель на ОУ с перемножающим ЦАП, включенным в качестве резистора обратной связи (сопротивление этого «резистора» зависит от входного кода N). Можно показать, что если в качестве резистора $R_{\text{ос}}$ используется резистор, расположенный на кристалле ЦАП, равный по номиналу резистору R-2R матрицы, для схемы по рис. 3 справедливо соотношение

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВХ}} \cdot \frac{2^n}{N}, \tag{3}$$

где n – разрядность ЦАП, N – входной цифровой код.

Таким образом, если в схеме ИГЗМ входному напряжению $U_{\text{ВХ}}$ будет соответствовать напряжение U_p , задающее значение мощности воздействия, а код N будет соответствовать напряжению U_i , характеризующему ток нагрузки I_n , то на выходе делителя получим напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$, соответствующее напряжению U_u схемы по рис. 2.

Следует отметить, что при значении кода N «все нули», что соответствует делению на десятичный ноль, обратная связь ОУ (рис. 3) размыкается. Предотвратить возникновение данной ситуации можно каким-либо образом «запретив» данный код либо соединив выход делителя и инвертирующий вход ОУ резистором с сопротивлением, равным $R_m \cdot 2^{n+1}$ (R_m – сопротивление резистора R-2R матрицы, n – разрядность ЦАП) [3]. Сложность использования второго варианта связана с необходимостью точного определения номинала резистора и согласования его ТКС с резисторами R-2R матрицы [4].

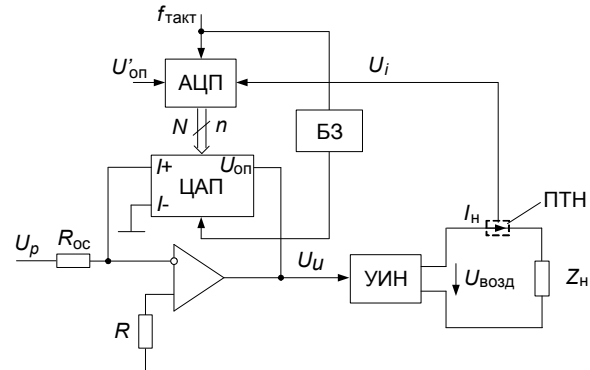


Рис. 4. Схема цифрового ИГЗМ с делителем на ЦАП

Схема цифрового ИГЗМ с делителем на основе ЦАП представлена на рис. 4. Указанный на схеме блок задержки БЗ обеспечивает последовательный во времени запуск преобразования АЦП и ЦАП и приведен условно, так как ЦАП может начинать преобразование не по тактовому сигналу, а по сигналу готовности данных АЦП.

Работу ИГЗМ с делителем на ЦАП можно рассмотреть по временной диаграмме, приведенной на рис. 5. На ней представлено изменение уровней тока I , протекающего в нагрузке, напряжения U_i и соответствующего ему кода N , характеризующих этот ток, напряжения U_u , ха-

рактически напряжение воздействия на нагрузку, и рассеиваемой мощности P . Значения тока нагрузки I , напряжений U_i и U_u , при которых значение рассеиваемой мощности равно заданному значению $P_{\text{зад}}$, обозначены на диаграмме соответственно как I' , U'_i и U'_u . Значения тока нагрузки I , напряжений U_i и U_u , существовавших в цепи до подключения ее к ИГЗМ, обозначены на диаграмме соответственно как I_H , U_{iH} и U_{uH} , рассеиваемой мощности – как P_H .

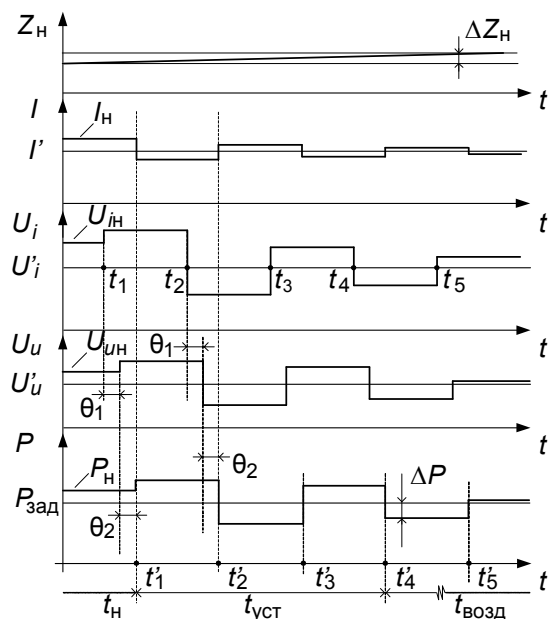


Рис. 5. Временная диаграмма работы ИГЗМ с делителем на ЦАП

Тактирование работы схемы ИГЗМ соответствует тактовым импульсам АЦП, которым на диаграмме соответствуют моменты времени t_1, t_2, \dots, t_n . После прихода первого тактового импульса t_1 на вход АЦП код N , соответствующий полученному в момент времени t_1 значению U_i , поступает в делитель на ЦАП. Из-за конечной скорости работы ЦАП, значение U_u , соответствующее частному от деления, поступает на выход делителя с некоторой задержкой θ_1 . Аналогично УИН задает напряжение воздействия на нагрузку, соответствующее U_u , с некоторой задержкой θ_2 , обусловленной конечной скоростью изменения выходного напряжения УИН. Этому напряжению соответствует некоторая рассеиваемая мощность P , являющаяся результатом первой операции деления. Установлению значения этой мощности на диаграмме соответствует момент времени t'_1 . Из-за конечных скоростей операции деления θ_1 и установления вычисленного значения выходного напряжения УИН θ_2 между измерением значения тока нагрузки I и

установлением уточненного значения мощности P существует временная задержка θ , определяемая по формуле

$$\theta = \theta_1 + \theta_2. \quad (4)$$

После прихода тактового импульса t_2 , в схеме происходят аналогичные рассмотренному процессу, приводящие к установлению в нагрузке уточненного значения мощности воздействия P в момент времени t'_2 и т.д. Через некоторое число тактовых импульсов отклонение значения рассеиваемой мощности ΔP , определяемая по формуле

$$\Delta P = P_{\text{зад}} - P, \quad (5)$$

становится меньше некоторого значения $\Delta P_{\text{зад}}$, определяющего точность ИГЗМ, т. е. $\Delta P \leq \Delta P_{\text{зад}}$. Этот момент времени считается окончанием режима установления мощности, обозначенного на временной диаграмме как $t_{\text{уст}}$, и началом режима воздействия, обозначенного как $t_{\text{возд}}$.

Рассматриваемая схема обеспечивает непрерывный цикл операций деления и определения уточненных значений напряжения воздействия. Сходимость значений I, U, P теоретически имеет бесконечный характер, после некоторого момента времени погрешность обеспечения мощности становится меньше заданного значения и в ходе деления идет ее дальнейшее снижение. Исходя из квантованности значений тока и напряжения, с которыми работает ИГЗМ, можно предположить, что в какой-то момент времени будет достигнуто значение I , при котором получаемые в результате операции деления значения $U_{\text{возд}}$ не будут являться уточненными в силу ограниченной точности преобразования напряжения U_i АЦП, обусловленной его разрядностью. При изменении параметров нагрузки или изменении напряжения U_p ИГЗМ вновь переходит в режим установления мощности воздействия.

Быстродействие ИГЗМ, т. е. время его перехода в режим воздействия, зависит от значения тактовой частоты $f_{\text{такт}}$, определяющей число операций деления, выполняемых в единицу времени.

В интервалах между тактовыми импульсами на временной диаграмме значения рассеиваемой мощности P постоянны, т. е. длительность импульсов воздействия мощностью равна периоду тактовой частоты АЦП. Отсюда следует, что период тактовых импульсов АЦП $T_{\text{ти}}$ не может быть меньше суммарного времени задержки θ , т.е. должно выполняться условие $T_{\text{ти}} > \theta$. Фак-

тически это является одним из критериев выбора частоты тактового сигнала АЦП $f_{\text{такт}}$.

Погрешность задания мощности и принципиальная возможность установления режима заданной мощности тесно связаны с соотношением быстродействия ИГЗМ и скоростью изменения параметров нагрузки. Под параметрами нагрузки понимаются ее активное сопротивление и состояние внутренних источников напряжения и тока. На схеме характеристика нагрузки обозначена как Z_n , ее изменение – как ΔZ_n .

Поскольку значение рассеиваемой мощности определяется уровнями $U_{\text{возд}}$ и значением Z_n , очевидно, что при недостаточном быстродействии ИГЗМ и высокой скорости изменения параметров нагрузки мы получим бесконечную процедуру определения значения $U_{\text{возд}}$ без приближения рассеиваемой мощности к заданному значению. Другими словами, из-за высокой скорости изменения Z_n в течение интервалов времени между тактовыми импульсами значение рассеиваемой мощности будет значительно меняться и ИГЗМ никогда не войдет в режим воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение приведенной в данной статье схемы цифрового ИГЗМ позволяет сделать ряд выводов относительно ее практического применения. Во-первых, ИГЗМ с цифровым делителем для обеспечения заданной мощности рассеяния реализуют итерационный подход, заключающийся в осуществлении последовательных операций определения уточненного напряжения воздействия на нагрузку. Во-вторых, быстродействие ИГЗМ зависит от частоты выполнения этих операций, определяемой тактовой частотой АЦП, точность ИГЗМ – от разрядности АЦП. В-третьих, в конкретном случае необходимо применять ИГЗМ, обладающий достаточно хорошими динамическими характеристиками для обеспечения возможности установления режима заданного значения рассеиваемой

мощности с учетом характера и скорости изменения параметров исследуемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волович, Г. И.** Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств / Г. И. Волович. М. : Додэка-XXI, 2005. 528 с.
2. **Гусев, В. Г.** Получение информации о параметрах и характеристиках организма и физические методы воздействия на него / В. Г. Гусев. М. : Машиностроение, 2004. 597 с.
3. **Демин, А. Ю.** Практическое применение измерительных генераторов заданной электрической мощности / А. Ю. Демин // Датчики и системы. 2004. № 7. С. 38–40.
4. **Wynne, J.** CMOS Multiplying DACs and Op Amps Combine to Build Programmable Gain Amplifiers, p.1 / J. Wynne // Analog Devices, AN-320A [Электронный ресурс] (<http://www.analog.com>).

ОБ АВТОРАХ



Гусев Владимир Георгиевич, проф. каф. инф.-изм. техн. Дипл. инж.-электромех. по авиац. приборостр. (УАИ, 1965). Д-р техн. наук по элем. и устр. выч. техн. и сист. упр. (защ. в МИЭТ, 1987). Засл. деят. науки РФ. Иссл. в обл. преобр. инф. и устр. биомед. назначения.



Косулин Иван Андреевич, асс. той же каф. Дипл. инж. по биотехнич. и мед. апп. и сист. (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. разр. приб. биомед. назначения.