

УДК 621.3.08

В.Г. Лисичкин, Е.Ю. Наумов

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Рассмотрены различные способы снижения мощности потребления автогенераторных измерительных приборов. Определен наиболее эффективный способ – уменьшение выходного тока транзисторов, входящих в состав автогенераторного измерителя. Сделан вывод о целесообразности комплексного подхода к решению проблемы энергосбережения при автогенераторных измерениях.

Введение. Существует большое количество методов измерения различных характеристик и параметров сложной среды, основанных на взаимодействии контролируемой среды с переменным электромагнитным полем (ЭМП). Электрические и магнитные свойства сложных (гетерогенных) сред определяются их химическим и минеральным составом и зависят от частоты и напряженности воздействующего поля, а также от температуры, давления, влажности и ряда других характеристик окружающей среды. Оценивая возмущения ЭМП или величину реакции источника поля при измерении параметров среды, можно судить о свойствах измеряемой среды. Особенность автогенераторных методов заключается в том, что взаимодействие электромагнитного поля с гетерогенной средой оценивается с помощью измерительного преобразователя, являющегося элементом автогенератора. Благодаря высокой чувствительности генераторных приборов к изменению режимных параметров, существует возможность бесконтактного неразрушающего контроля свойств различных сред с использованием достаточно простых схемных решений [1, 2].

Теоретические исследования. Понятие «измерительный автогенератор» в общем случае включает в себя любую автоколебательную систему, в которой входное воздействие измерительного преобразователя приводит к изменению амплитуды, частоты или фазы генерируемых колебаний. В большинстве случаев объяснение процессов, происходящих в измерительных автогенераторах, может быть основано на теории автогенераторов. В то же время измерительный автогенератор имеет ряд специфических особенностей, связанных с необходимостью обеспечения максимальной чувствительности к контролируемому параметру.

При работе автогенератора в стационарном

режиме любое внешнее воздействие (сигнал с выхода измерительного преобразователя) может привести к изменению стационарного состояния: изменению амплитуды автоколебательного процесса, срыву и повторному возбуждению генерации с новыми параметрами, переходу в режим прерывистой генерации, изменению режима прерывистой генерации. Использование отмеченных изменений может служить основой для измерения свойств контролируемой среды.

Независимо от режима работы и характеристик измерительного автогенератора, переработка измерительной информации неизбежно сопровождается затратами энергии из внешних источников [1]. Повышение экономичности измерительных устройств (уменьшение энергозатрат на единицу перерабатываемой информации), наряду с их типовыми техническими характеристиками по точности, быстродействию и чувствительности, является достаточно актуальной задачей. Это особенно важно при создании автономных и портативных контрольно-измерительных приборов с быстрой готовностью к измерениям сразу после включения с минимизацией энергопотребления и массогабаритных, а также стоимостных показателей.

Снижение мощности потребления измерительных устройств (ИУ) обеспечивает возможность длительного их питания от автономных источников, не связанных с сетью промышленной частоты, что повышает помехозащищенность и, следовательно, точность измерений.

Несмотря на простоту постановки задачи, минимизация энергопотребления автогенераторных измерительных устройств является сложной проблемой, требующей анализа и учета большого числа взаимосвязанных показателей: точности, быстродействия, динамического диапазона, количества перерабатываемой информации, числа измерительных каналов, режимов работы от-

дельных узлов, степени автономности, надежности, условий эксплуатации и др.

В настоящее время известны некоторые пути снижения мощности потребления ИУ [3-6]: уменьшение напряжения питания и соответственно уровней сигналов, уменьшение тока питания элементов (обеспечение микрорежима) и разработка новых алгоритмов функционирования ИУ в режиме, обеспечивающем минимизацию мощности потребления функциональных узлов и блоков измерительного устройства.

Развитие третьего направления обусловлено широким применением микропроцессорной техники и цифровой обработки сигналов в измерительных устройствах, что позволяет реализовать сложные адаптивные алгоритмы работы ИУ. Представляет определенный интерес рассмотрение некоторой обобщенной характеристики измерительного устройства, которая может связать между собой его основные показатели качества - точность, чувствительность, быстродействие и энергопотребление. С позиций информационно-энергетической теории измерительных устройств доказано, что возможность совершенствования ИУ, то есть возможность повышения их точности, быстродействия и уменьшения потребления, принципиально ограничена. Это следует из известного соотношения [1]:

$$\gamma^2 P_{\text{вх}} t_y = W_{\text{эн}} = W_{\text{ш}} / \eta_{\text{эн}}, \quad (1)$$

где γ - погрешность измерений; $P_{\text{вх}}$ - входная мощность; t_y - задержка времени установления показаний измерительного устройства; $W_{\text{эн}}$ - энергетический порог чувствительности ИУ; $\eta_{\text{эн}}$ - энергетический КПД; $W_{\text{ш}} = 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж - энергия термодинамического шума, которая является теоретическим пределом энергетического порога $W_{\text{эн}}$.

Из (1) следует, что уменьшение произведения $\gamma^2 P_{\text{вх}} t_y$, стоящего в левой части данного выражения и связывающего числовые значения точности, потребления и быстродействия, возможно лишь за счет увеличения энергетического КПД. Для многих устройств значение энергетического КПД устанавливается на определенном историческом уровне, который практически очень трудно преодолеть. Если переписать выражение (1) в виде

$$\gamma^2 P_{\text{вх}} t_y \eta_{\text{эн}} = W_{\text{ш}} = 3,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж} = \text{const}, \quad (2)$$

то становится очевидным, что добиваясь совершенствования тех или иных показателей измерительного устройства, можно идти двумя путями: или добиваться повышения данного показателя (не снижая других) за счет повышения энергетического КПД устройства, или же, не

имея возможности повысить КПД, идти на повышение данного показателя за счет снижения остальных. Таким образом, если на данном уровне развития техники энергетический КПД, а следовательно, и энергетический порог чувствительности $W_{\text{эн}}$ не могут превосходить определенного значения, то уменьшить уровень потребления мощности измерительного устройства можно в обмен на снижение требований по точности и (или) по быстродействию.

Рассмотрим подробнее возможности повышения энергетического КПД для автогенераторного измерительного устройства. Основным узлом такого устройства, определяющим уровень энергопотребления, является транзисторный усилительный каскад, входящий в схему автогенератора. Основными характеристиками усилительного каскада принято считать [4]: коэффициенты усиления по мощности K_p , току K_I и напряжению K_U ; входную мощность $P = U_{\text{вх}}^2 / R_{\text{вх}}$, определяемую входным напряжением $U_{\text{вх}}$ и сопротивлением $R_{\text{вх}}$; выходную мощность $P_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^2 / R_{\text{н}}$, определяемую выходным напряжением $U_{\text{вых}}$ и сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$; максимальную частоту усиления сигналов $f_{\text{в}}$; погрешность передачи значения сигнала γ ; энергетический коэффициент полезного действия $\eta_{\text{эн}}$; мощность $P_{\text{п}}$, потребляемую усилителем от источника питания.

Взяв за основу выражения (1) и (2), можно установить взаимосвязь между основными характеристиками усилительного каскада. Выражение для расчета энергетического КПД имеет вид

$$\eta_{\text{эн}} = P_{\text{вых}} / P_{\text{п}} = P_{\text{вх}} K_p / P_{\text{п}}. \quad (3)$$

Очевидно, что наиболее приемлемым способом повышения КПД измерительного устройства является снижение потребляемой мощности $P_{\text{п}}$.

Для транзисторных усилительных каскадов наиболее эффективным и простым способом повышения экономичности является снижение коллекторного тока (тока стока) транзисторов, обеспечивающее возможность уменьшения мощности потребления в десятки-сотни тысяч раз [3]. Этот путь может в перспективе обеспечить потребление на один каскад в доли нановатт и ниже, что позволяет приблизиться к возможности создания измерительных систем, близких по сложности к мозгу. Уменьшение напряжения питания тоже дает выигрыш, но не более чем в 10 раз, так как ограничивается значением падения напряжения на прямосмещенном p - n переходе (0,3...0,7) В.

Представляет интерес рассмотрение этого вопроса с позиций информационно-энергетической теории измерительных устройств. Известно [1], что любое измерение, дающее информацию о физической системе, требует соответственного увеличения энтропии системы или ее окружения, то есть затрат энергии. Общие затраты энергии $W_{эн}$ любого измерительного устройства описываются выражением (1), где задержка t_y связана с максимальной частотой работы устройства известным соотношением:

$$t_y = 1/2\pi f_e. \quad (4)$$

Минимальным значением энергии, требуемой для осуществления измерений, является энергия термодинамического шума $W_{ш} = 3,5 \cdot 10^{-20}$ Дж. Относительно $W_{ш}$ информационный КПД $\eta_{ин}$ измерительного устройства определяется отношением:

$$\eta_{ин} = W_{ш} / W_{эн}. \quad (5)$$

Значение этого показателя для реальных измерительных устройств находится в пределах $\eta_{ин} = (10^{-4} \dots 10^{-8})$ [1], что показывает огромный запас возможного дальнейшего совершенствования ИУ.

Используя (1) - (5), не трудно получить выражение для мощности потребления в виде:

$$P_n = \frac{W_{ш} K_p}{\eta_{эн} \eta_{ин} \gamma^2 t_y} = \frac{W_{ш} K_p 2\pi f_e}{\eta_{эн} \eta_{ин} \gamma^2}. \quad (6)$$

С учетом известных соотношений

$$K_p = P_{вых} / P_{ex} = U_{вых}^2 R_{ex} / U_{ex}^2 R_{вых} = K_U^2 R_{ex} / R_n \quad (7)$$

выражение (6) можно представить в виде

$$P_n = \frac{W_{ш} K_U^2 R_{ex} 2\pi f_e}{\eta_{эн} \eta_{ин} \gamma^2 R_n} = \frac{W_{ш} U_{вых}^2 R_{ex} 2\pi f_e}{\eta_{эн} \eta_{ин} \gamma^2 R_n}. \quad (8)$$

Анализ выражений (6) и (8) с учетом реальных значений характеристик современных усилителей показывает, что наиболее эффективно снижение мощности потребления за счет уменьшения f_e и изменения соотношения $R_{вх}/R_n$. Увеличение информационного КПД $\eta_{ин}$ в силу малости его значений для современной аппаратуры тоже весьма эффективно для снижения мощности потребления. Один из известных путей повышения $\eta_{ин}$ – применение более совершенных элементов усилительного каскада: транзисторов с низким уровнем шума, большим значением коэффициента передачи тока и верхней граничной частоты.

Выражение (6) можно считать математической моделью идеального измерительного устройства, обеспечивающей сравнение с ней различных элементов, устройств и систем для оценки возможности оптимизации ИУ. Из этого вы-

ражения видно достаточно сильное влияние погрешности измерений γ на мощность потребления: $P_n \approx 1/\gamma^2$, что позволяет рассчитывать на существенное снижение энергопотребления за счет критической оценки целесообразности высокой точности измерений.

Очевидно, что изменение собственно погрешности γ при заданном динамическом диапазоне измерений на каждом пределе определяется требованиями к точности ИУ и не может существенно влиять на значение P_n . Однако погрешность γ может рассматриваться и как мера количества информации, так как в предельном случае минимальное значение погрешности определяется дискретностью индикаторного устройства. При уменьшении диапазона измерений на каждом пределе измерений при автоматическом переключении пределов через минимальный интервал возможно уменьшить количество информации, перерабатываемой ИУ, при сохранении заданной погрешности. Это позволит снизить потребляемую мощность за счет уменьшения требований к точности.

Снижение энергопотребления за счет обмена на быстрдействие можно рассмотреть на примере изменения времени задержки t_y . Эту возможность целесообразно выявлять в процессе анализа ожидаемого режима использования ИУ на этапе проектирования. Можно заранее выявить, какие блоки и узлы измерительного устройства могут отключаться хотя бы на короткое время в процессе измерительного цикла. Кроме того, целесообразно выявить возможность использования ИУ в «дежурном режиме» при минимальном объеме перерабатываемой информации или при ухудшенных метрологических характеристиках. Важным представляется вопрос минимизации частоты измерений, особенно при выводе результатов на цифровой индикатор, учитывая инерционность человеческого фактора. Известно [3], что снижение энергозатрат на выполнение функциональных преобразований в цифровой форме ограничивается, главным образом, динамической мощностью потребления цифровой части измерительных приборов, которая, в свою очередь, пропорциональна частоте переключения логических элементов. Уменьшение этой частоты эквивалентно увеличению времени задержки t_y , что позволяет уменьшать потребляемую мощность. При необходимости представляется целесообразным создание ИУ с переключаемой частотой измерений и пропорциональной мощностью потребления.

Дальнейшее снижение мощности потребления измерительных устройств возможно при

реализации следующих направлений [5, 6]: исследование особенностей работы в микрорежиме активных элементов; дальнейшее развитие микромощной элементной базы; разработка новых структурно-алгоритмических путей снижения мощности потребления.

Выводы. При измерении характеристик и параметров различных сложных сред широкое распространение получили автогенераторные методы. При создании портативных автогенераторных измерительных приборов, работающих в автономном режиме, большое значение имеет минимизация мощности потребления этих приборов. Наиболее эффективным и простым способом снижения энергопотребления автогенераторных измерителей является уменьшение выходного тока транзисторов, что может в перспективе обеспечить потребление в доли нановатт на один каскад.

Существуют и другие способы: уменьшение напряжения питания транзисторных каскадов; обмен существующего запаса по точности и (или) по быстродействию измерительного устройства на снижение потребляемой мощности; внедрение методов цифровой обработки измерительных сигналов, позволяющих реализовать

структурно-алгоритмические методы снижения мощности потребления.

Комплексный подход к решению проблемы энергосбережения автогенераторных измерительных приборов может привести к наилучшим результатам.

Библиографический список

1. *Новицкий П.В.* Основы информационной теории измерительных устройств. - Л.: Энергия, 1968. - 248 с.
2. *Ари Э.С.* Автогенераторные измерения. М.: Энергия, 1976. - 136 с.
3. *Загорский Я.Т., Иванов Б.Р.* Микромощные электронные измерительные устройства. - М.: Энергоатомиздат, 1993. - 320 с.
4. *Кузнецов А.А.* Зависимость мощности потребления от характеристик усилителей // Полупроводниковая электроника в технике связи. Вып. 21. 1981. С. 90-93.
5. *Кузнецов А.А.* Перспективы уменьшения мощности потребления измерительными устройствами // Полупроводниковая электроника в технике связи. Вып. 25. 1985. С. 33-36.
6. *Кузнецов А.А.* Оптимизация основных характеристик информационно-измерительных систем // Полупроводниковая электроника в технике связи. Вып. 22. 1982. С. 143-147.