АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXX 1984 Вып. 1

УДК 621.791.16; 621.396.6–181.480.02.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ МИКРОСВАРКИ

Голямина И. П., Горячев А. В., Гуляев А. А., Мастеров А. Е., Пономарев Д. М., Славинский З. М.

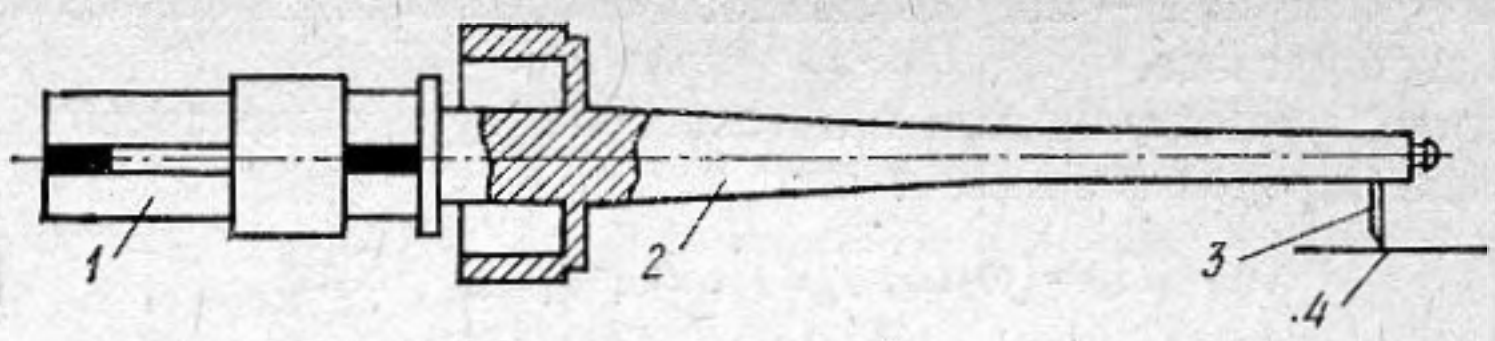
Предложена математическая модель ультразвуковой колебательной системы с рабочим инструментом для микросварки. Показано достаточное совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей. Предложен метод определения акустического сопротивления нагрузки на колебательную систему в зависимости от времени в процессе микросварки.

Одной из наиболее сложных операций при сборке изделий микроэлектроники является операция образования неразъемных контактов между внешними выводами прибора и контактными площадками планарной стороны кристалла. Среди методов сборки, используемых на этой операции, последнее время все чаще предпочтение отдается ультразвуковой сварке [1] алюминиевой проволокой, так как этот метод не требует нагрева собираемых изделий, предъявляет менее высокие требования к качеству свариваемых материалов, легко поддается автоматизации и т. п.

Однако повсеместное использование ультразвуковой сварки сдерживается необходимостью поддержания в микросварочных установках резонансного режима высокодобротной колебательной системы (механическая добротность обычно превышает 500, а электрическая — 150), работающей в сложных условиях кратковременной, быстро меняющейся нагрузки. При этом следует учитывать уход параметров системы из-за смены рабочего инструмента и изменения технологических режимов. Это привело к широкому применению в промышленных микросварочных установках генераторов со сложными режимами работы — автоматический поиск резонансной частоты колебательной системы, многократное свипирование частоты и т. п. Применение такого типа генераторов требует учета влияния переходных процессов на режим работы колебательной системы. Действительно, например, для колебательной системы с резонансной частотой $f_м = 65$ кГц и добротностью $Q=500$ время переходного процесса составляет $3Q/\pi f_м \approx 7$ мс. А при достигнутом уровне технологии сам процесс микросварки длится 15÷30 мс. Таким образом, с учетом изменения частоты возбуждения в процессе сварки время работы колебательной системы в неустановившемся режиме составляет от 50 до 100% общего времени процесса микросварки.

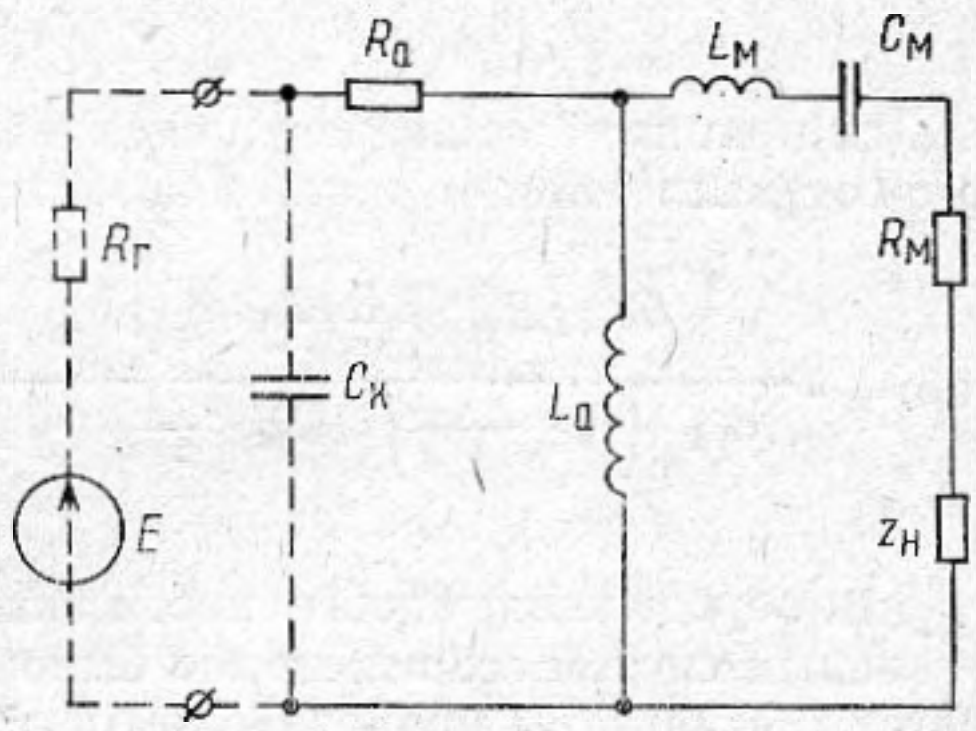
В настоящей работе предлагается метод исследования переходных процессов в ультразвуковой колебательной системе, позволяющий определить амплитуду колебаний в зоне сварки в зависимости от времени при возбуждении системы сложными электрическими сигналами.

Исследуемая колебательная система приведена на фиг. 1 и состоит из ферритового преобразователя *1*, зарекомендовавшего себя наиболее надежным из известных типов преобразователей, и сложной стержневой системы *2* (цилиндр — конус — цилиндр) с коэффициентом усиления по амплитуде ~4. На конце стержневой системы закреплен рабочий инструмент *3*, представляющий собой стержень в 1/2 длины волны изгибных колебаний. Форма инструмента выбрана таким образом, чтобы амплитуда колебаний его в зоне сварки *4* была равна амплитуде продольных колебаний на конце стержневой системы. Рабочая резонансная частота исследуемой колебательной системы составляет 65 кГц, а механическая добротность ее — 500.



Фиг. 1. Ультразвуковая колебательная система

При исследовании переходных процессов в основу модели колебательной системы была положена известная эквивалентная схема [2, 3], применяемая обычно для магнитострикционных излучателей (схема представлена на фиг. 2), где: $R_г$ — внутреннее сопротивление, а E — ЭДС генератора; $C_к$ — компенсирующая емкость; $R_а$ — сопротивление электрических потерь преобразователя, включающее в себя потери в обмотке и потери на гистерезис в сердечниках; $L_а$ — индуктивность намагничивания преобразователя; $L_м$, $C_м$, $R_м$ — эквивалентная индуктивность, емкость и активное сопротивление механической колебательной системы; $Z_н$ — эквивалентное сопротивление акустической нагрузки зоны сварки.



Фиг. 2. Эквивалентная схема ультразвуковой колебательной системы

Определение параметров элементов эквивалентной схемы колебательной системы (параметрическая идентификация) проводилось в частотной области вблизи рабочей резонансной частоты. При этом предполагалось, что поток рассеяния магнитного поля равен нулю, так как обмотка намотана непосредственно на ферритовые стержни, и что добротность механической и электрической систем достаточно высока, чтобы пренебречь влиянием активных сопротивлений на расчет резонансных частот. Величина $L_а$ была измерена с помощью стандартного измерителя индуктивности на частоте, не совпадающей ни с одним из резонансов колебательной системы.

Экспериментально по частотной зависимости модуля полного электрического сопротивления обмотки были определены следующие характеристики ненагруженной ($Z_н=0$) колебательной системы без компенсирующей емкости: $f_{эм}$ — частота электромеханического резонанса (параллельного резонанса контура, состоящего из $L_а$, $L_м$, $C_м$, $R_м$ для эквивалентной схемы); $f_м$ — частота механического резонанса (последовательный резонанс контура, состоящего из $L_м$, $C_м$, $R_м$ для эквивалентной схемы) и $|Z_м|$ — модуль полного сопротивления колебательной системы на этой частоте. Для эквивалентной схемы без компенсирующей емкости справедливы следующие соотношения:

$$(L_м+L_а)C_м\omega_1^2=1,\ L_мC_м\omega_2^2=1, \qquad (1)$$

где $\omega_1=2\pi f_{эм}$, $\omega_2=2\pi f_м$.

Из системы (1) были определены величины: $C_м=[1-(\omega_1/\omega_2)^2]/L_а\omega_1^2$, $L_м=1/C_м\omega_2^2$.

Затем к входу обмотки возбуждения колебательной системы была подключена компенсирующая емкость, величина которой была выбрана таким образом, чтобы сместить частоту резонанса электрического контура $f_э$ (элементы $L_а$, $R_а$, $C_к$ эквивалентной схемы) вверх от механического резонанса. На частоте $f_э$ амплитуда колебаний примерно равна нулю и, следовательно, их вносимое сопротивление в электрический контур минимально. Далее были определены характеристики нагруженной колебательной системы с компенсирующей емкостью: $f_э$ — частота резонанса электриче-

ского контура и $|Z_э|$ — модуль полного сопротивления колебательной системы на этой частоте.

Из условий резонанса электрического контура с компенсирующей емкостью были определены величины:

$$R_а=(\omega_э L_а)^2/|Z_э|,\ R_м=|Z_м|-R_а, \qquad (2)$$

где $\omega_э=2\pi f_э$.

Такое определение $R_а$ и $R_м$ правомерно ввиду высокой добротности колебательной системы.

В таблице приведены значения параметров элементов эквивалентной схемы, полученные указанным методом на одном из образцов исследуемой колебательной системы.

Элемент	$C_к$	$R_а$	$L_{рас}$	$L_а$	$L_м$	$C_м$	$R_м$
Значение параметра	0,047 мкФ	5,58 Ом	0	96,2 мкГн	14,4 мГн	417 пФ	2,42 Ом

Для принятой эквивалентной схемы (фиг. 2) зависимость полного входного сопротивления от частоты возбуждения $Z(j\omega)$ имеет вид:

$$Z(j\omega)=-\frac{\left(j\omega L_м+\frac{1}{j\omega C_м}+R_м\right)j\omega L_а+R_а\left(j\omega L_м+\frac{1}{j\omega C_м}R_м+j\omega L_а\right)}{j\omega C_к\left[\left(R_а+\frac{1}{j\omega C_к}\right)\left(j\omega L_м+\frac{1}{j\omega C_м}+R_м+j\omega L_а\right)+j\omega L_а\left(j\omega L_м+\frac{1}{j\omega C_м}+R_м\right)\right]}. \qquad (3)$$

Для определения адекватности эквивалентной схемы и реальных колебательных систем их поведение было исследовано в области резонансных частот. Результаты приведены на фиг. 3. Как видно из фиг. 3, частотные характеристики модуля полного сопротивления принятой эквивалентной схемы и реальной колебательной системы практически полностью совпадают. Расхождение их на частотах $f_{эм}$, $f_{эм}'$ объясняется тем, что в реальных колебательных системах механическая система представляет собой распределенную структуру. Однако поскольку режим электромеханического резонанса колебательной системы не является рабочим в процессе сварки, то с достаточно высокой точностью можно ограничиться представлением механической системы как контура второго порядка согласно схеме фиг. 2, избежав таким образом неоправданного усложнения модели.

Аналогичные экспериментальные исследования были проведены для более чем 20 различных колебательных систем. Они показали, что принятая эквивалентная схема адекватно описывает частотные свойства всех реальных ненагруженных колебательных систем данного класса.

Принимая во внимание достаточно высокую точность описания колебательной системы эквивалентной схемой, представленной на фиг. 2, задача исследования переходных процессов в ней при возбуждении сложными сигналами сводится к решению этой задачи для эквивалентной схемы с учетом того, что ток, протекающий в $Z_н$, эквивалентен амплитуде ξ механических колебаний рабочего инструмента [2].

В теории электрических цепей и сигналов решение подобных задач основывается на построении математической модели, которая представляет собой систему уравнений, описывающую поведение электрической цепи, т. е. напряжения и тока в элементах схемы при произвольном законе изменения во времени ЭДС и токов независимых источников. Такие модели принято называть математическими моделями электрических цепей во временно́й области [4].

Математической моделью, соответствующей эквивалентной схеме, представленной на фиг. 2, во временно́й области является система уравнений в

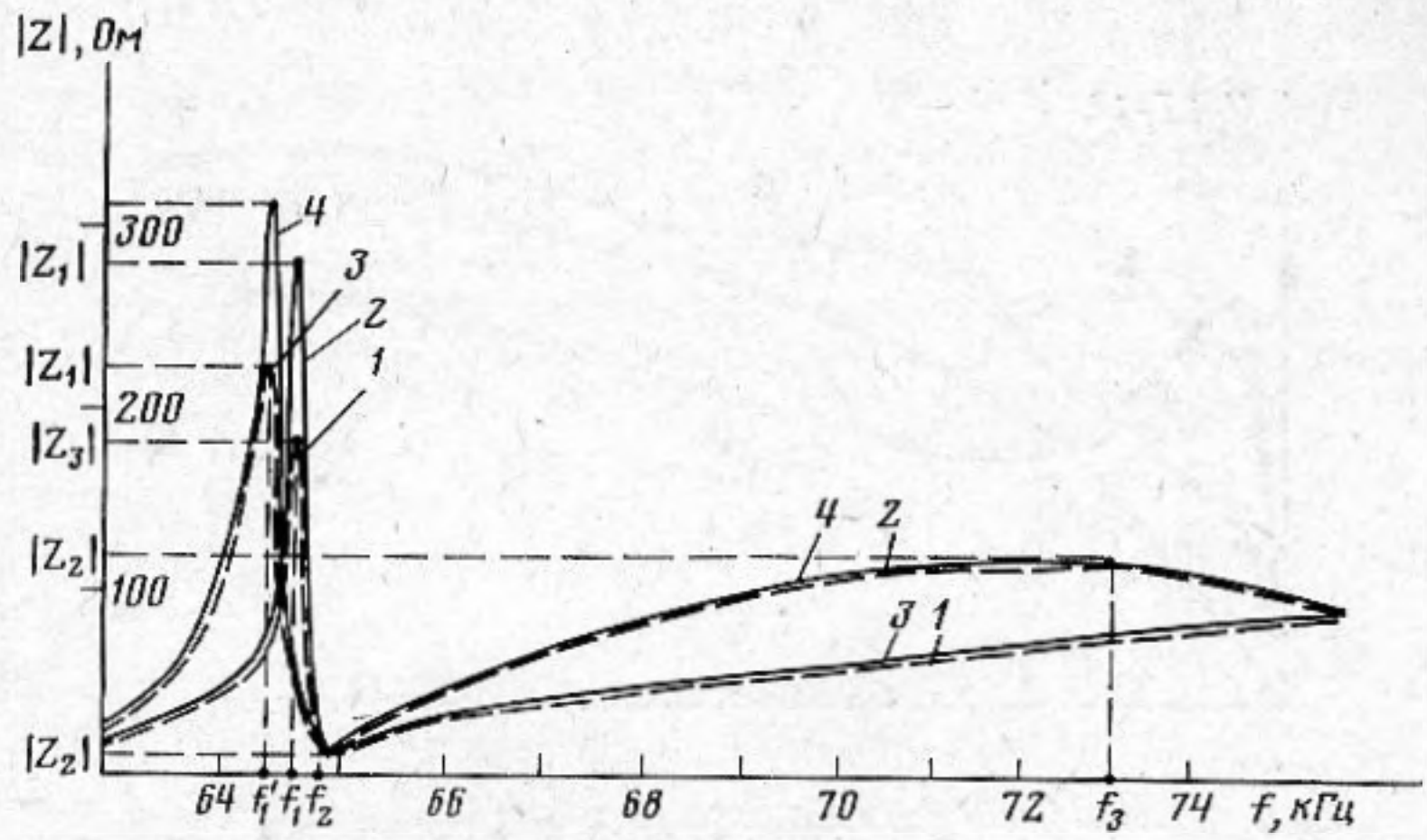
пространстве состояний, которая на основании [4] имеет следующий вид:

$$\frac{dX_1(t)}{dt}=\frac{1}{L_а}[X_3-R_а(X_1+X_2)],\quad \frac{dX_2(t)}{dt}=\frac{1}{L_м}[X_3-X_4-X_2R_н-R_м(X_1+X_2)],$$

$$\frac{dX_3(t)}{dt}=\frac{1}{C_к R_г}[V-X_3-R_г(X_1+X_2)],$$

$$\frac{dX_4(t)}{dt}=\frac{1}{C_м}X_2,\quad Y_1=X_3,\quad Y_2=(V-X_3)/R_г,\quad Y_3=X_2, \tag{4}$$

где в качестве состояний выбраны: X_1 — ток в $L_а$, X_2 — ток в $L_м$, X_3 — напряжение на $C_к$, X_4 — напряжение на $C_м$, а в качестве выходных парамет-



Фиг. 3. Зависимость модуля входного сопротивления колебательной системы от частоты возбуждения. *1*, *3* — без компенсирующей емкости; *2*, *4* — с компенсирующей емкостью. Сплошные кривые — результат расчета, пунктирные — эксперимент

ров — Y_1 — напряжение на обмотке колебательной системы ($U_с$), Y_2 — ток в генераторе ($I_г$), Y_3 — ток через $R_н$ (колебательное смещение рабочего конца инструмента); (в системе уравнений (4) величина $Z_н$ заменена величиной $R_н$, так как в процессе микросварки нагрузка, согласно [1], носит практически чисто активный характер, что подтверждается неизменностью значений резонансной частоты колебательной системы); в качестве внешнего воздействия выбрана величина V — ЭДС генератора.

Решение системы уравнений (4) при произвольном внешнем воздействии $V(t)$ находится с помощью метода матричной экспоненты [5]. В общем виде это решение запишется как

$$X(t)=e^{-\bar{A}t}X(0)+e^{\bar{A}t}\int_0^t e^{-\bar{A}\tau}\bar{B}V(\tau)\,d\tau,$$

$$Y(t)=\bar{C}^T e^{\bar{A}t}X(0)+\int_0^t e^{-\bar{A}(t-\tau)}\bar{B}V(\tau)\,d\tau+dV(t), \tag{5}$$

а в дискретном виде, удобном для расчетов на ЭВМ,— как

$$X[(n+1)\Delta t]=e^{\bar{A}\Delta t}X(n\Delta t)+(e^{\bar{A}\Delta t}-I)\bar{A}^{-1}\bar{B}V(n\Delta t), \tag{6}$$

$$Y[(n+1)\Delta t]=\bar{C}^T X[(n+1)\Delta t]+dV[(n+1)\Delta t].$$

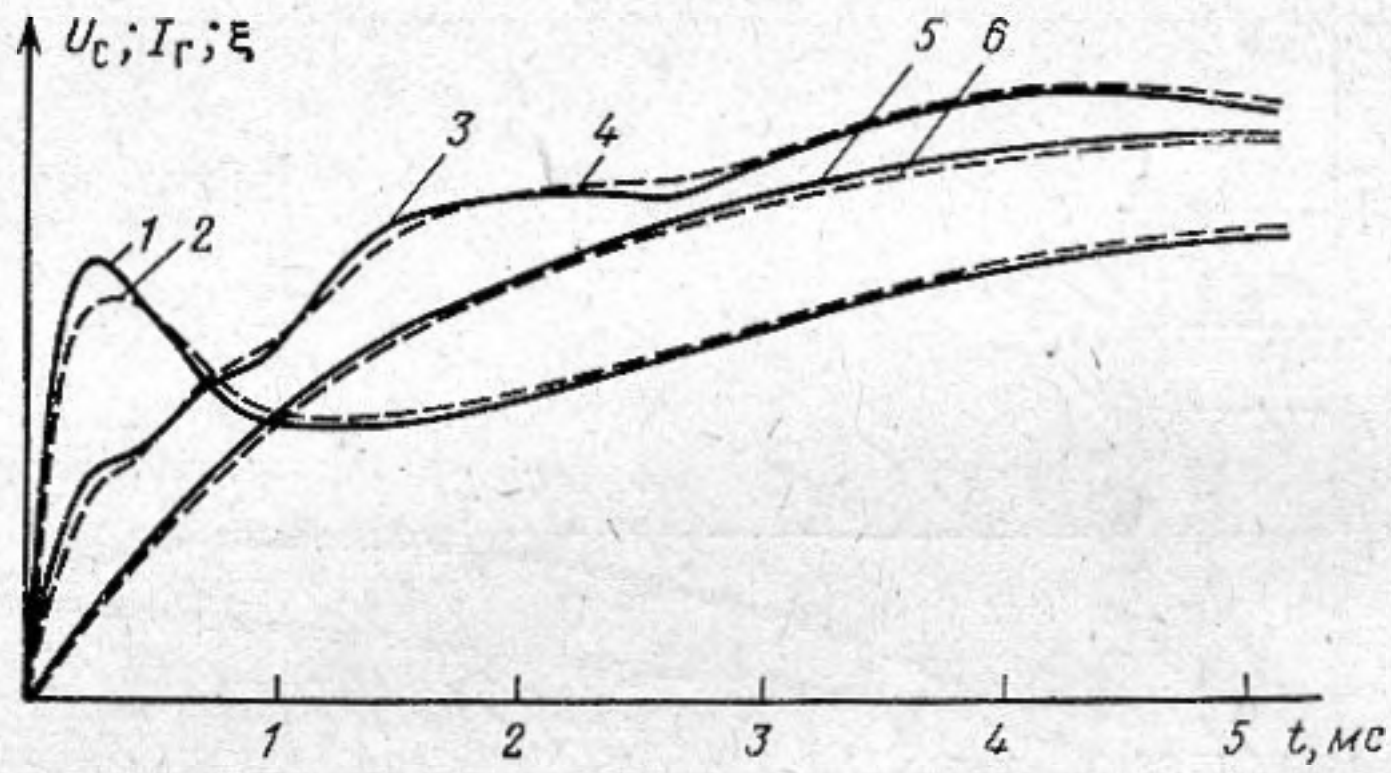
Здесь $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$ — матрицы, определяемые структурой электрической цепи и законами Кирхгофа для нее, I — единичная матрица.

Решение модели колебательной системы в пространстве состояний осуществлялось на ЭВМ типа СМ-3 с помощью специально разработанной программы на языке ФОРТРАН-4. Исходными данными для расчетов служили значения параметров элементов эквивалентной схемы (см. таблицу),

а также параметров режима работы генератора и значение сопротивления акустической нагрузки.

Адекватность полученной математической модели и реальной колебательной системы исследовалась для двух принципиально различных режимов возбуждения: моночастотное возбуждение на частоте резонанса, когда система достаточно быстро входит в установившийся режим работы, и возбуждение в режиме многократного свипирования частоты, когда система на протяжении всей длительности возбуждающегося импульса не входит в установившийся режим. Рассмотрим оба эти вида возбуждения на примере ненагруженной колебательной системы с $R_н=0$.

Пусть $E(t)=E_0 \sin \omega_м t$ — возбуждение колебательной системы на постоянной частоте, где E_0 — амплитудное значение ЭДС генератора. Рас-



Фиг. 4. Зависимости амплитуд $U_с(t)$ — *1*, *2*, $I_г(t)$ — *3*, *4* и $\xi(t)$ — *5*, *6* от времени для ненагруженной колебательной системы при возбуждении на частоте $f_м$. Сплошные кривые — результат расчета; пунктирные — эксперимент

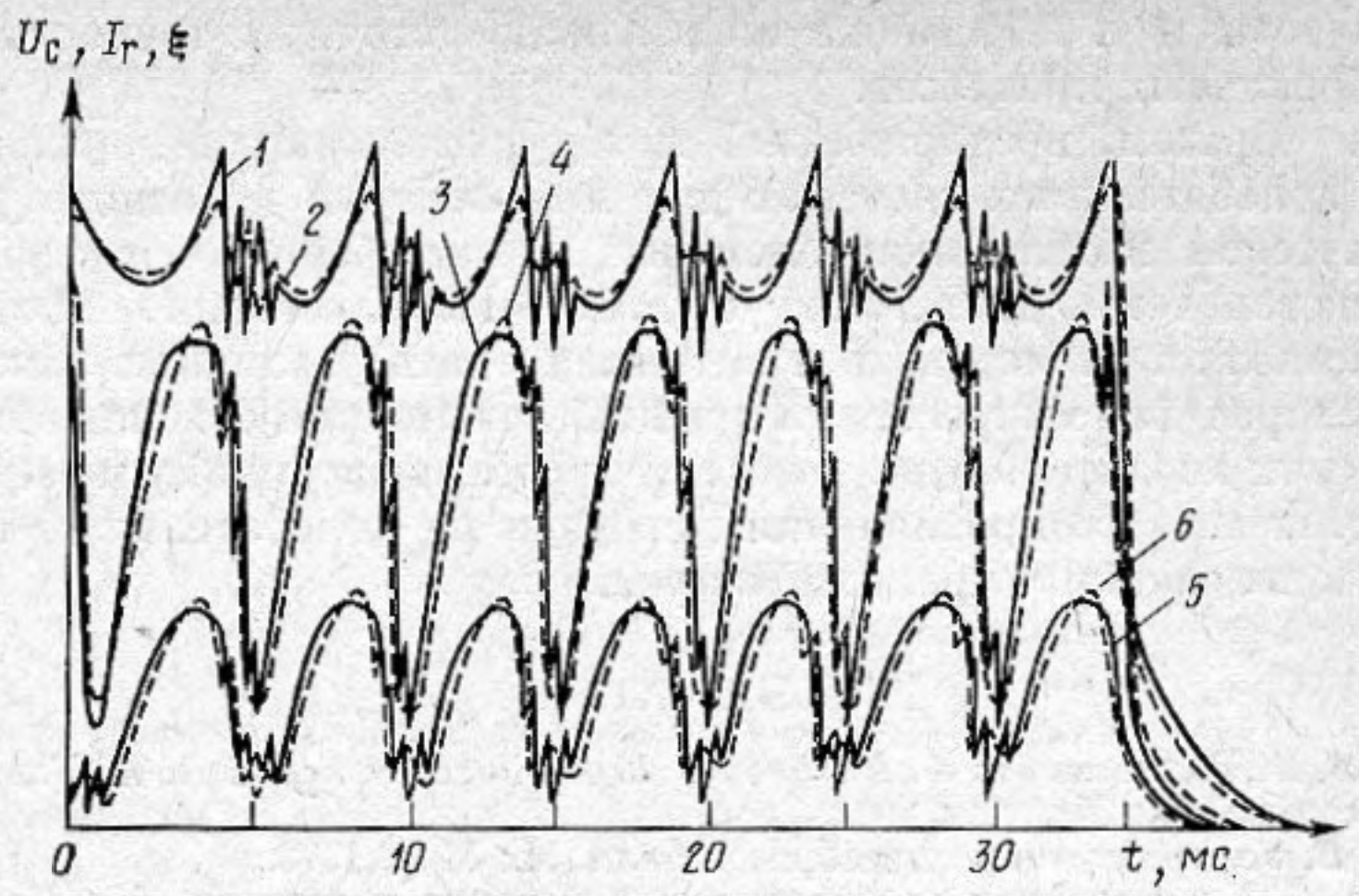
считанные зависимости амплитуд $U_с(t)$, $I_г(t)$ и $\xi(t)$ приведены на фиг. 4 (для наглядности сигналы на фигурах представлены в форме огибающих амплитуды). Теперь пусть $E(t)=E_0 \sin[\omega_0+\Delta\omega(t/t_п-[t/t_п])]t$, что соответствует работе генератора в режиме многократного свипирования частоты с общим числом свипирования за время сварки, равным 7; здесь $\omega_0=2\pi[f_м-0{,}75\ (кГц)]$, $\Delta\omega=2\pi\Delta f$; $\Delta f=1{,}5$ кГц — диапазон свипирования; $t_п=5$ мс — время одного свипирования; $[t/t_п]$ — антье отношения $t/t_п$.

Рассчитанные зависимости $U_с(t)$, $I_г(t)$, $\xi(t)$ представлены на фиг. 5. На фиг. 4 и 5 приведены также графики зависимостей $U_с(t)$, $I_г(t)$, $\xi(t)$, снятые экспериментально на колебательной системе, параметры которой были заложены в модель для указанных выше режимов в отсутствие нагрузки. Величины $U_с(t)$ и $I_г(t)$ определялись с помощью запоминающего осциллографа С8-2. Амплитуда колебаний $\xi(t)$ определялась с помощью бесконтактного микрофонного ультразвукового виброметра, сигнал с которого подавался также на запоминающий осциллограф.

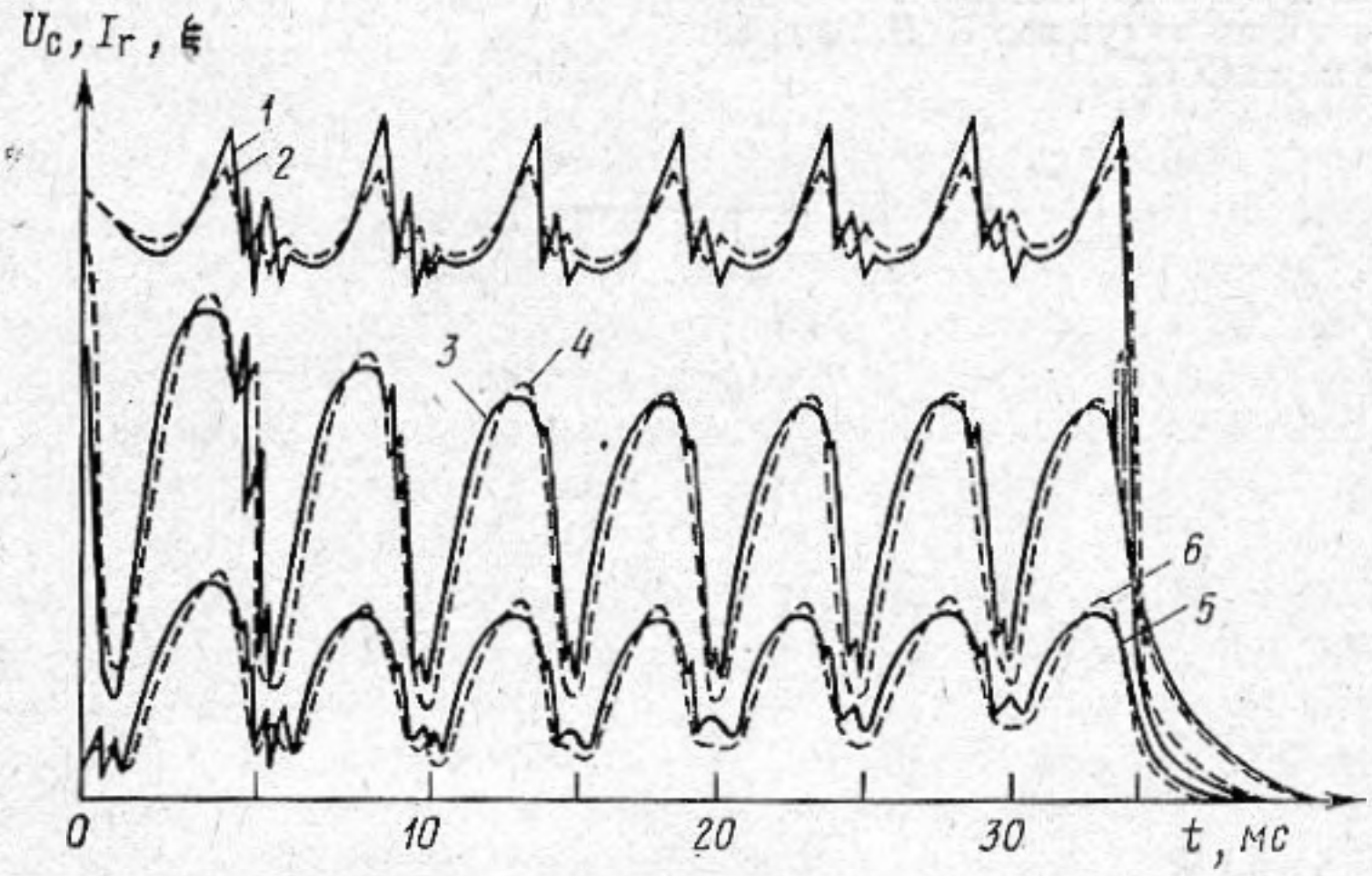
Как видно из фиг. 4 и 5, рассчитанные по модели зависимости $U_с(t)$, $I_г(t)$, $\xi(t)$ идентичны процессам в реальной ультразвуковой системе.

Исследование точности описания полученной математической моделью процессов, имеющих место в колебательной системе при сварке, затруднено в связи с отсутствием строгого математического описания закона изменения акустического сопротивления нагрузки на колебательную систему со стороны зоны сварки. Однако наличие модели позволяет решить обратную задачу — зная параметры реальной колебательной системы $f_{эм}$, $f_м$, $|Z_м|$, $f_э$, $|Z_э|$ и определив экспериментально указанным выше способом законы изменения в процессе сварки величин $U_с(t)$, $I_г(t)$, $\xi(t)$, найти закон изменения сопротивления зоны сварки.

На фиг. 6 приведен пример изменения величины $U_с(t)$, $I_г(t)$, $\xi(t)$ в процессе приварки алюминиевой проволоки диаметром 27 мкм к золоченому контактному выводу корпуса интегральной схемы при возбужде-



Фиг. 5. Зависимости амплитуд U_C — *1*, *2*, $I_Г$ — *3*, *4* и ξ — *5*, *6* от времени для ненагруженной колебательной системы при возбуждении в режиме многократного свипирования частоты. Сплошные линии — результат расчета; пунктирные — эксперимент



Фиг. 6. Зависимости амплитуд U_C — *1*, *2*, $I_Г$ — *3*, *4* и ξ — *5*, *6* от времени для колебательной системы в процессе сварки при возбуждении в режиме многократного свипирования частоты. Сплошные кривые — результат расчета, пунктирные — эксперимент

нии колебательной системы в режиме многократного свипирования частоты. Анализ различных законов изменения сопротивления нагрузки в процессе решения модели колебательной системы для данного случая показал, что наиболее адекватным эксперименту является выражение:

$$R_Н(t)=R_{Но}(1-e^{-t/\tau}), \qquad (7)$$

где $R_{Но}$=2,4 Ом; $\tau=0{,}3\cdot10^{-4}$ с — коэффициенты, определяемые изменением режима работы колебательной системы в процессе сварки.

На фиг. 6 приведены зависимости $U_C(t)$, $I_Г(t)$, $\xi(t)$, рассчитанные по модели с учетом реальных характеристик колебательной системы, режима ее возбуждения и изменения сопротивления зоны сварки в соответствии с (7). Идентичность зависимостей, рассчитанных по модели и измеренных в процессе сварки на реальной колебательной системе, подтверждает достаточную точность описания предложенной моделью переходных процессов в колебательной системе в процессе сварки, а также правильность описания сопротивления нагрузки выражением (7).

Аналогичные исследования, проведенные для других режимов возбуждения колебательной системы (однократное свипирование, автоматический

поиск частоты и т. п.), также показали достаточную точность описания моделью реальных процессов.

Таким образом, предложенный метод исследования переходных процессов в колебательных системах для микросварки на основе разработки математической модели эквивалентной схемы ферритового преобразователя представляется достаточно точным. Использование предложенной модели позволяет исследовать и оптимизировать различные режимы работы генераторов для микросварки с целью повышения стабильности их технологических характеристик, а также определять величину и закон изменения акустического сопротивления нагрузки на колебательную систему со стороны зоны сварки в процессе сварки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Грачев А. А., Кожевников А. П., Лебига В. А., Россошинский А. Н.* Ультразвуковая микросварка. М.: Энергия, 1977.
2. *Кикучи Е.* Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир, 1972.
3. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностр. лит., 1957.
4. *Дезоер Ч. А., Ку Э. С.* Основы теории цепей. М.: Связь, 1976.
5. *Директор С., Рорер Р.* Введение в теорию систем. М.: Мир, 1974.

Научно-исследовательский институт
технологии и организации производства
Акустический институт им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
27.VII.1982