

ской стеной, то надо возбуждать МАБ полем модели излучения провода наихудшего случая только возле стены, и рассчитывать ЭМ поле в точке наблюдения как сумму поля по аналитической модели провода и поля, рассчитанного методом МАБ (ЭМ поля, отраженного от стены) (рисунок 1).

Применение указанного принципа для тривиальных задач, для которых разработаны аналитические модели наихудшего случая, дает верный результат: поскольку нет объектов, не описываемых аналитической моделью, область S должна распространяться на бесконечность.

Комплексные амплитуды электрического и магнитного полей рассчитываются на основе комплексных амплитуд канальных волн [2]. Для расчета амплитуды электрического и магнитного полей методом МАБ предлагается отбрасывать фазы при амплитудах канальных волн (чтобы уменьшить влияние резонансов).

Для проверки предлагаемой методики произведен расчет распределения амплитуды электрического поля для сегмента провода, расположенного перпендикулярно металлической стенке. Сегмент имеет длину 1 м ($z = 0,01$ м), область расчета V имеет размеры $4 \times 4 \times 4$ м (границы координат по осям: $[-2; 2]$, $[-2, 2]$, $[-2, 2]$ м); Провод расположен вдоль оси x. Координаты центра провода: (0, 0, 0,01 м). Амплитуда тока вдоль провода: 1 мА. Частота расчета: 1 ГГц. Вдоль каждой оси область расчета разбита на 60 блоков МАБ. Результат расчета представлен на рисунке 3. В качестве аналитических моделей («Аналитическая модель» и «Аналитическая модель наихудшего случая») использовались модели излучения одиночного сегмента провода в свободном пространстве, полученные упрощением разработанных ранее моделей для сегмента провода, расположенного параллельно металлической поверхности [1] («Укороченная модель» и «пессимистическая модель», соответственно).

УДК 621.373.52

ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ГЕНЕРАТОРА МИКРОСВАРКИ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 60–140 кГц Петухов И.Б., Кипарин И.Н.

ОАО «Планар-СО»
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время в установках присоединения проволочных и ленточных выводов в изделиях электронной техники используется ультразвуковая или термозвуковая микросварка с резонансной частотой ультразвукового преобразователя (УЗП) в широком диапазоне частот – в основном от 60 до 140 кГц. Известны также конструкции УЗП с двойной резонансной частотой,

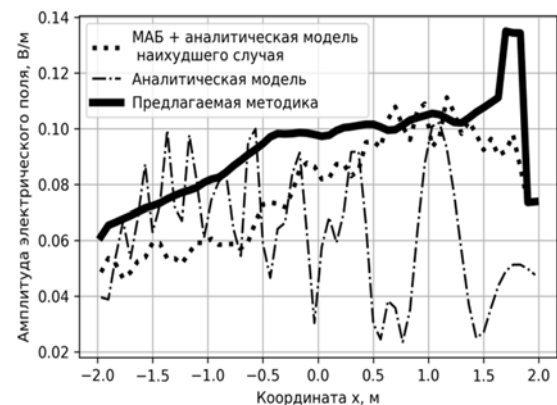


Рисунок 3 – Пространственное распределение амплитуды напряженности электрического поля для тестовой задачи, указанной на рисунке. Координата y равна 0,7 м, координата z равна 1,37 м

Из рисунка 3 видно, что предлагаемый подход позволил получить огибающую для большей части точек наблюдения. Уменьшение амплитуды напряженности электрического поля в области отрицательных значений координаты x предположительно связано с приближением к границе области расчета МАБ.

Предлагаемая методика также проверена на задаче определения амплитуды напряженности электрического поля провода внутри металлического ящика с апертурой. Полученные результаты удовлетворяют требованиям наихудшего случая.

Литература

1. Орлов Е.Е. Вычислительно эффективная широкополосная пессимистическая модель излучения сегмента провода для анализа электромагнитной совместимости / Е.Е. Орлов, Е.В. Синькевич, С.В. Малый // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3 (105). – С. 32–39.
2. Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. – «Наука»: глав. ред. физико-математической литературы, 1983.

той, например, одна резонансная частота в стандартном диапазоне 60 кГц, а вторая – в диапазоне повышенной частоты (≥ 100 кГц) [1]. Это расширяет технологические возможности оборудования монтажа выводов, обеспечивая гибкие режимы микросварки на контактных площадках кристаллов и внешних выводах корпуса или ленточного носителя.

При микросварке проволочных или ленточных выводов подводимая мощность к УЗП зависит от диаметра присоединяемых выводов, импеданса УЗП на резонансной частоте и обычно подразделяется на два диапазона. Для диапазона с диаметром от 17,5 до 80 мкм алюминиевой или золотой проволоки подводимая мощность составляет от 0,5 до 4 Вт при значении импеданса УЗП 15–25 Ом. Для проводников диаметром 100–500 мкм максимальная подводимая мощность ограничивается 30–40 Вт при том же значении импеданса УЗП. Эффективность используемой ультразвуковой системы (УЗС) оценивается в первую очередь точностью подводимой мощности на резонансной частоте УЗП ультразвуковым генератором (УЗГ).

Функцию захвата и удержания резонансной частоты при работе УЗС выполняет система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) УЗГ. Преимущество использования ФАПЧ заключается в ступенчатой характеристике фазового угла между напряжением и током УЗП на резонансной частоте (кривая 2, рисунок 1). Прохождение кривой 2 слева через горизонтальную ось частоты соответствует нулевому фазовому сдвигу между напряжением и током УЗП, при этом импеданс УЗП имеет минимальное значение. Прохождение кривой 2 через ось частоты в точке справа соответствует так называемой точке антирезонанса УЗП, где импеданс УЗП имеет максимальное значение. Разность значений частоты антирезонанса и частоты резонанса определяет электромеханический коэффициент связи (типичное значение находится в диапазоне $0,3 \div 0,38$) [2].

При аппаратной реализации системы ФАПЧ установок проволочного монтажа существуют некоторые особенности. Для эффективной работы системы ФАПЧ как минимум в двухчастотном диапазоне, возможна оптимизация традиционных схемотехнических решений. Структурная схема элементов двухчастотной системы ФАПЧ УЗГ приведена на рисунке 2 [3].

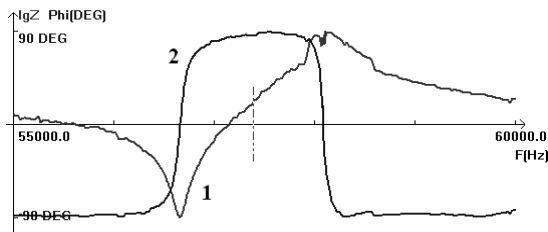


Рисунок 1 – Зависимости импеданса УЗП (1) и фазового угла (2) между напряжением и током от частоты

Фазовращатель 90° и фильтр, как правило, выполняют перестраиваемыми. Недостатком такого решения является необходимость подстройки под резонансную частоту УЗП.

В случае использования широкополосного фазовращателя на 90° недостатком является сложность реализации либо значительное ослабление полезного сигнала с повышением рабочей частоты при реализации в виде интегратора.

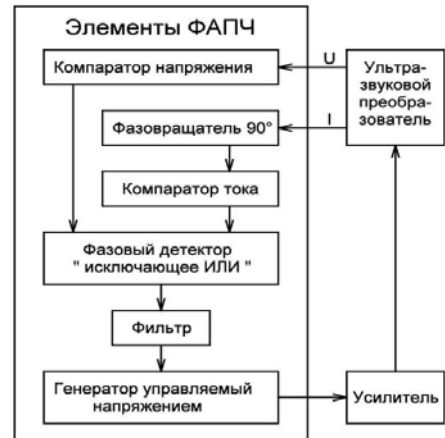


Рисунок 2 – Структурная схема элементов двухчастотной системы ФАПЧ УЗГ

Для упрощения конструкции с улучшением функциональности УЗГ реализована схема, представленная на рисунке 3.

Фазовращатель -45° представляет дифференцирующую RC-цепь. Фазовращатель $+45^\circ$ представляет интегрирующую RC-цепь. Постоянные времени дифференцирования и интегрирования равны. Благодаря этому обеспечивается точная разность фаз 90° между выходными сигналами компараторов тока и напряжения в диапазоне рабочих частот.

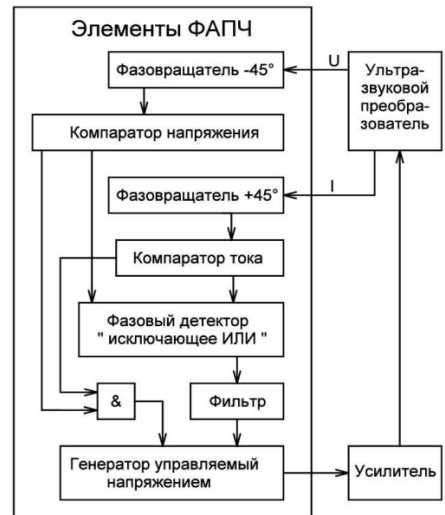


Рисунок 3 – Усовершенствованная схема УЗГ

Для удержания рабочей частоты УЗГ на резонансной частоте УЗП между импульсами сварки по структурной схеме, представленной на рисунке 2, генератор управляемый напряжением (ГУН) на выходе вырабатывает небольшое «дежурное» напряжение, поступающее на вход уси-

лителя. Выходное напряжение с усилителя поступает на УЗП. Напряжение с УЗП преобразуется компаратором напряжения в сигнал формы меандр, который поступает на первый вход фазового детектора «исключающее ИЛИ». Данный тип фазового детектора предполагает разность фаз 90° между сигналами тока и напряжения с выходов компараторов тока и напряжения на резонансной частоте УЗП.

Сигнал тока УЗП проходит через регулируемый фазовращатель, осуществляющий фазовый сдвиг в 90° между сигналами тока и напряжения на рабочей частоте УЗП. Далее компаратор тока преобразует форму сигнала в меандр и этот сигнал поступает на второй вход фазового детектора «исключающее ИЛИ». Сигнал с выхода фазового детектора через фильтр поступает на вход ГУН, удерживая резонансную частоту УЗП. При отклонении фазового сдвига от 90° между сигналами тока и напряжения с выходов компараторов тока и напряжения, системой ФАПЧ вырабатывается сигнал рассогласования, сдвигающий резонансную частоту влево или вправо от точки резонанса УЗП. Это обусловлено фазо-частотной характеристикой УЗП (см. рисунок 1).

При резонансе фазовый детектор «исключающее ИЛИ» вырабатывает сигнал равный середине диапазона ($1/2$ питания фазового детектора). При изменении фазового сдвига, а значит и отклонения частоты от резонанса, на входе ГУН будет присутствовать сигнал рассогласования, который вернет ГУН на частоту резонанса УЗП. Ввиду того, что сигнал рассогласования отклоняется от средней точки фазового детектора в ту или иную сторону, ГУН уменьшает или увеличивает рабочую частоту, приближая ее к резонансной частоте УЗП.

В некоторых случаях, наличие «дежурного» напряжения на УЗП, пусть и небольшого, нежелательно, особенно при присоединении особо тонких проводников (≤ 20 мкм), внося воздействие на поверхность проволоки перед рабочим ультразвуковым импульсом.

Для обеспечения режима работы УЗГ и нормальной работы ФАПЧ без «дежурного» напряжения на УЗП предложена структура усовершенствованной схемы УЗГ согласно рисунку 3.

Основное отличие заключается в использовании двух фазовращателей по 45° свободных от регулировки. Добавлен логический элемент «И», подключенный входами к компараторам, а выходом к ГУН. Благодаря этому удается удерживать частоту ГУН на резонансной частоте УЗП при отсутствии сигналов компаратора напряжения и тока в промежутках между рабочими импульсами. Таким образом реализован режим работы, когда между запусками рабочих импульсов частота ГУН близка или равна частоте резонанса УЗП.

Литература

1. DeAngelis D.A. Ultrasonic transducer for wire bonding and methods of forming wire bonds using ultrasonic transducers / D.A. DeAngelis, G.W. Shulze // Patent US 8.251.275B2. – 28.08.2012. – P.1–22
2. Lin S. Analysis of the sandwich ultrasonic transducer with two sets of piezoelectric elements / S. Lin, C. Xu // Smart materials and structures. – 2008. – № 17. – P. 1–9.
3. Петухов И.Б. Способ формирования синусоидального напряжения на микросхеме DDS AD9833 для системы фазовой автоподстройки частоты / И.Б. Петухов, И.Н. Кипарин // 10-я МНТК «Приборостроение-2017». – 2017. – С. 229–230.

УДК 53.082.78

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.

*Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Как правило, первостепенными требованиями для трибосопряжений являются низкий коэффициент трения, высокая микротвердость и устойчивость к износу. Предшествующими исследованиями [1–3] было показано, что состав, структура и свойства металлов и сплавов на их основе могут быть эффективно модифицированы с помощью ионной имплантации по методу [2], либо путем нанесения покрытий [3]. Намечившиеся в последнее время тенденции широкого использования наноразмерных структур вынуждают повышать локальность методов измерения трибопараметров как по поверхности, так и по глубине

материала. Первым важным шагом для решения проблемы представляется унификация требований к испытываемым образцам и контртелу. С этой целью авторами было разработано специализированное устройство [4], прототипом которого послужило устройство для измерения коэффициента трения методом «плоскость на диске» [5]. При разработке новой системы основное внимание было уделено расширению возможностей метода [4].

Методика и обсуждение результатов. Установлено, что для решения поставленных задач одним из наиболее эффективных методов иссле-