

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Разработка приборов и элементной базы радиоэлектронной аппаратуры требует проведения испытаний оборудования согласно действующей нормативно-технической документации на электромагнитную совместимость и внешние воздействующие факторы. Настоящая статья посвящена описанию решения задачи по обеспечению испытательных лабораторий предприятий оборудованием для испытаний на воздействие переменным магнитным полем с помощью резонансных методов.

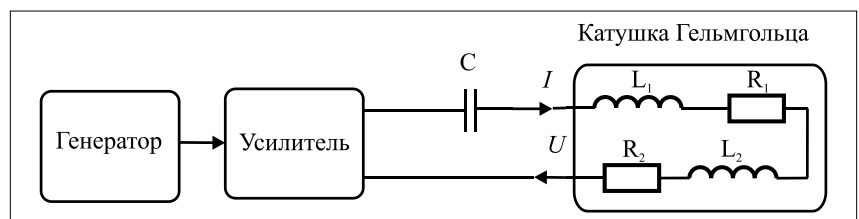
В испытательной лаборатории ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» (Москва) разработан испытательный стенд на воздействие переменным магнитным полем, работающий с использованием известного принципа последовательного резонанса в LC-контуре [1, 2], который заключается в равенстве полного сопротивления цепи активному сопротивлению на частоте этого резонанса. Преимуществом резонансного метода является возможность получения высокочастотных магнитных полей большой амплитуды, а также работа аппаратуры на активное сопротивление [3, 4]. На рис. 1 представлена схема такого испытательного стенда.

Для получения однородного магнитного поля используются катушки Гельмгольца, которые являются двумя соосно расположенными одинаковыми радиальными катушками. Расстояние между их центрами равно их среднему радиусу. В центре такой системы колец образуется зона однородного магнитного поля. Плотность магнитного потока в катушке пропорциональна электрическому току:

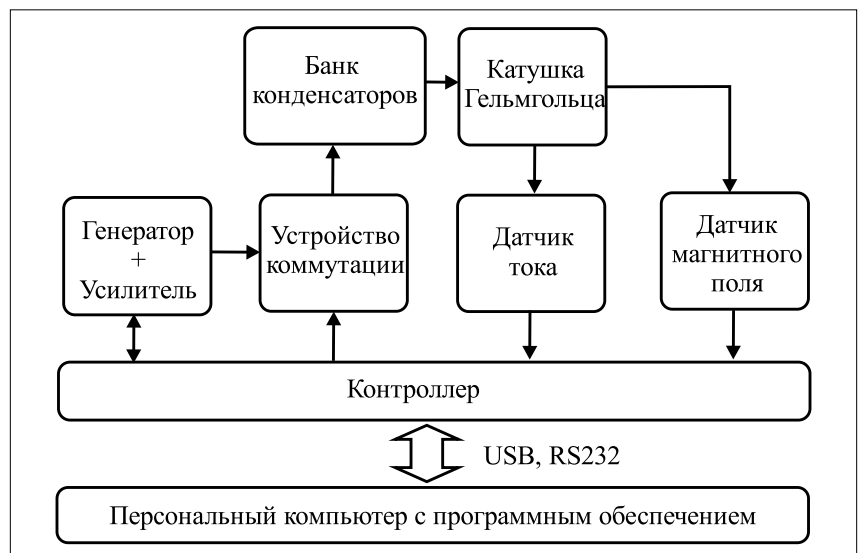
$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\mu_0 n I}{r}, \quad (1)$$

где B — магнитная индукция, Тл; μ_0 — магнитная постоянная, Н·А⁻²; n — количество витков; I — сила электрического тока, А; r — радиус катушки.

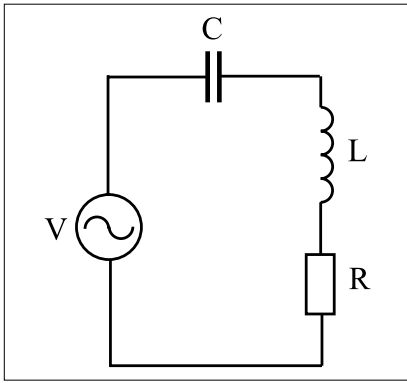
Для уменьшения влияния человеческого фактора на результаты испытаний, уменьшения времени цикла испытаний, автоматизации процессов в испытатель-



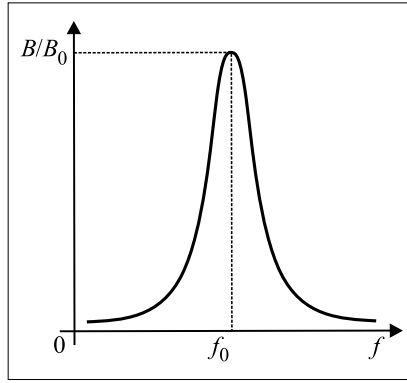
▲ Рис. 1. Схема подключения катушки Гельмгольца в режиме последовательного резонанса



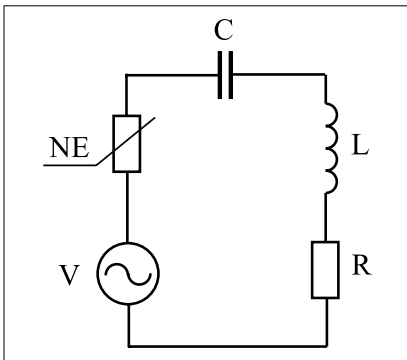
▲ Рис. 2. Схема автоматизированной испытательной установки на воздействие переменным магнитное полем



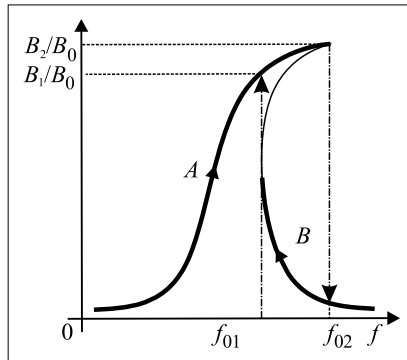
▲ Рис. 3а. Эквивалентная схема испытательной установки в линейном режиме



▲ Рис. 3б. Линейный последовательный резонанс



▲ Рис. 4а. Эквивалентная схема испытательной установки в нелинейном режиме



▲ Рис. 4б. Нелинейный последовательный резонанс. Тонкая линия соответствует неустойчивой траектории; жирная линия соответствует устойчивой траектории движения

ной лаборатории ведется разработка испытательного стенда, а также программного комплекса, которые обеспечивают настройку последовательного резонансного контура (LC-цепи) на рабочую частоту в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Общая структурная схема испытательной установки представлена на рис. 2.

Испытательный стенд состоит из следующих элементов: генератора, усилителя, устройства коммутации, банка конденсаторов, катушки Гельмгольца, датчика тока, датчика магнитного поля, контроллера, персонального компьютера с программным обеспечением.

Генератор сигналов предназначен для задания частоты и уровня воздействия магнитным полем на объект. Усилитель мощности предназначен для усиления тока в LC-цепи до требуемого уровня. Банк конденсаторов представляет собой набор конденсаторов, который совместно с катушкой Гельмгольца обеспечивает последовательный резонанс в диапазоне рабочей частоты. Устройство коммутации (конденсаторов) служит для подключения, отключения и переключения конденсаторов в LC-цепи, обеспечивая последовательный резонанс в диапазоне рабочей частоты (без образования искрового разряда и коммутационных процессов, вызванных переключением контактирующих устройств). Катушка Гельмгольца преобразует электриче-

ский ток в магнитное поле. Датчик тока предназначен для контроля уровня тока в LC-цепи. Датчик магнитного поля (датчик Холла) обеспечивает контроль уровня магнитного поля в катушке Гельмгольца. Контроллер предназначен для управления и коммутации сигналов между элементами испытательной установки. Персональный компьютер с программным обеспечением предназначен для управления (частотой, амплитудой

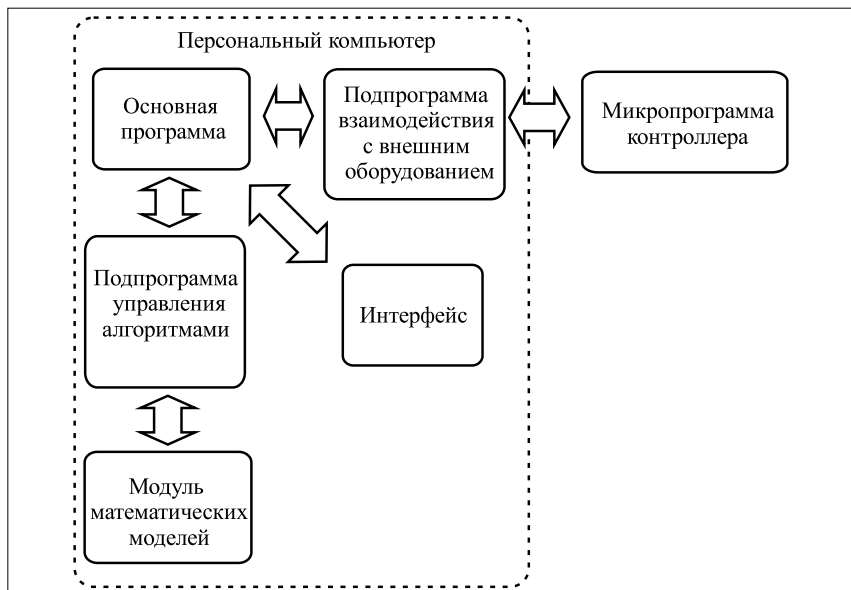
и временем воздействия) испытательной установки.

На рис. 3а представлена эквивалентная схема испытательной установки в «малосигнальном» приближении. В этом случае источник сигнала (усилитель) работает в линейном режиме. Зависимость значения нормированного магнитного поля в катушке Гельмгольца (см. L на рис. 3а) от частоты соответствует резонансной кривой на рис. 3б.

На рис. 4а представлена эквивалентная схема испытательной установки в приближении «большого сигнала». В этом случае источник сигнала (усилитель) работает в нелинейном режиме. На рис. 4а такой элемент, обозначенный как NE, характеризует нелинейную зависимость между током и напряжением источника сигнала (усилителя) и коммутирующего устройства. Зависимость магнитного поля в катушке Гельмгольца (L на рис. 4а) от частоты соответствует резонансной кривой на рис. 4б.

Характерным отличием резонансных кривых (на рис. 4б от рис. 3б) является наличие бифуркации (раздвоения), т. е. наличие частот, которым соответствует несколько значений магнитного поля. На практике это значит, что в нелинейном режиме при переходе с меньшей частоты к большей (см. траекторию A на рис. 4б) максимум магнитного поля отличается от максимума при перемещении с большей частоты к меньшей (см. траекторию B на рис. 4б). Заметим, что значения этих уровней магнитного поля, излучаемого катушкой Гельмгольца, могут отличаться друг от друга в несколько раз.

В программном обеспечении (см. схему на рис. 5) испытательного стенда реализован алгоритм поиска абсолютного максимума на нелинейной резонансной



▲ Рис. 5. Схема программного обеспечения автоматизированной испытательной установки на воздействие переменным магнитным полем

кривой с использованием численных методов. Алгоритм оценивает величину, первую и вторую производные магнитного поля по частоте, затем на основе полученных данных устанавливает направление движения по траектории на резонансной кривой согласно заданному критерию.

Сравнительные результаты применения алгоритма поиска абсолютного максимума на нелинейной резонансной кривой относительно алгоритма простого переключения на заданную частоту (в этом случае частота устанавливается без контроля предыдущего состояния стенда) можно представить так:

- в «малосигнальном» приближении обоим алгоритмам удалось обеспечить необходимый уровень магнитного поля 100 мкТл. При этом наименьшее время сканирования в диапазоне частоты 50 Гц...20 кГц показал алгоритм простого переключения;
- в приближении «большого сигнала» алгоритм поиска абсолютного максимума на нелинейной резонансной кривой успешно установил заданный уровень магнитного поля (3 мТл) в диапазоне частоты от 50 Гц...20 кГц. Алгоритм простого переключения частоты не обеспечил выставление уровня магнитного поля при идентичных параметрах испытательной аппаратуры.

Набор программ персонального (управляющего) компьютера состоит

из основной программы, подпрограммы управления алгоритмами, модуля математических моделей, подпрограммы взаимодействия с внешним оборудованием и интерфейса. Основная программа предназначена для реализации взаимодействия подпрограмм и модулей ПО. Интерфейс служит для ввода параметров испытательного стенда, отображения информации от датчиков и текущего состояния испытательного стенда. Подпрограмма управления алгоритмами обеспечивает последовательность работы испытательного стенда. В модуле математических моделей задаются формы, рассчитываются характеристики и параметры резонансных кривых испытательного стенда. Подпрограмма взаимодействия с внешним оборудованием предназначена для связи персонального компьютера с оборудованием испытательного стенда.

ПО контроллера состоит из одной микропрограммы, которая обеспечивает трансляцию данных между управляющим компьютером и оборудованием испытательного стенда, а также непосредственный сбор данных от датчиков.

Таким образом, в статье приведены результаты разработки стенда для испытаний на воздействие переменным магнитным полем, работающего на основе явления последовательного резонанса в LC-цепи. Приведены общие структурные схемы стенда, экви-

валентные схемы в «малосигнальном» приближении и «большого сигнала», а также соответствующие резонансные кривые. Описаны сравнительные результаты работы испытательной установки с использованием алгоритмов поиска абсолютного максимума и простого переключения в линейном и нелинейном режимах. Полученные результаты позволяют утверждать, что имеется определенный запас по испытательным диапазонам (магнитной индукции и частот) стенда, таким образом, можно увеличить данные значения при частичной модернизации оборудования и значительно сократить время одного испытательного цикла по сравнению с ручной перестройкой резонансной частоты. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. KC Yang. *Radio Frequency Circuit Design*. <http://www.radiolocman.com/review/article.html?di=163905>.
2. Helmholtz Coil. *Accel Instruments Corp*. <http://www.accelinstruments.com/Helmholtz-Coil/Helmholtz-Coil.html>.
3. И. В. Романов. *Резонансный метод в испытаниях на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю. // Компоненты и технологии*. 2017, № 4.
4. И. В. Романов. *Резонансный метод в испытаниях на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю. // VI Всероссийская научно-техническая конференция «ЭМС»: Сборник докладов*. Москва, 2017.