

# Испытания на воздействие переменным магнитным полем. Программно-аппаратное обеспечение метода последовательного резонанса

И. Романов, к. ф. - м. н.<sup>1</sup>

УДК 621.37 | ВАК 05.11.00

Обеспечение электромагнитной совместимости технических средств – одна из актуальных проблем электронной техники, связанных с непрерывным развитием всех отраслей промышленности. Наиболее достоверный способ подтвердить способность технических средств функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством (без изменения характеристик) при воздействии непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам – натурные испытания. Разработанный в лаборатории ЭМС АО «ТЕСТПРИБОР» стенд «Воздействие переменным магнитным полем» обеспечивает проведение испытаний оборудования на электромагнитную совместимость и внешние факторы согласно действующей нормативно-технической документации.

**В** разработке реализован принцип последовательного резонанса в LC-контуре (равенство полного сопротивления цепи активному сопротивлению на частоте последовательного резонанса) [1, 2]. Преимуществами резонансного метода являются возможность получения высокочастотных магнитных полей большой амплитуды, а также работа аппаратуры на активное сопротивление [3, 4]. Схема подключения катушки Гельмгольца представлена на рис. 1.

Для получения однородного магнитного поля используются катушки Гельмгольца – два соосно расположенных одинаковых радиальных устройства, расстояние между центрами которых равно их среднему радиусу. В центре системы – зона однородного магнитного поля. Плотность магнитного потока в катушке пропорциональна электрическому току:

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

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $H \cdot A^{-2}$ ;

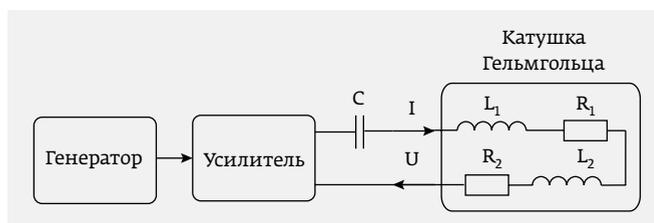
$n$  – количество витков;  $I$  – сила электрического тока, А;  $r$  – радиус катушки.

Для уменьшения влияния человеческого фактора на результаты испытаний, сокращения времени цикла испытаний, а также для автоматизации процессов в испытательной лаборатории предлагаются испытательный стенд и программный комплекс, 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.

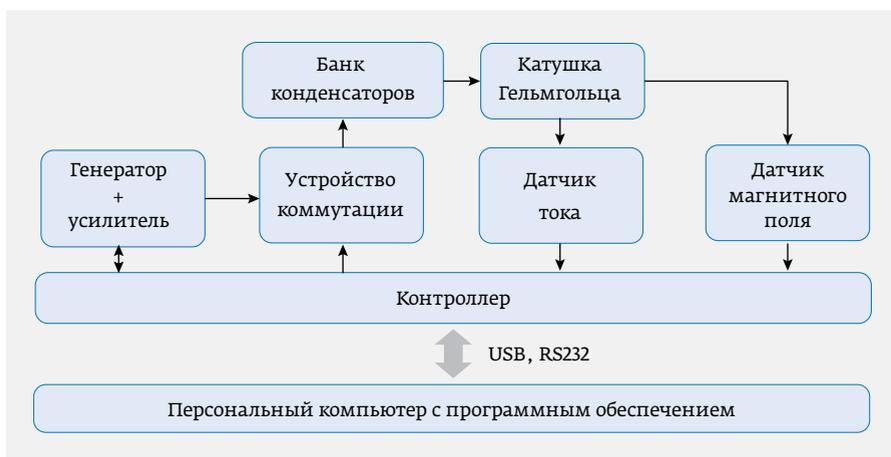
Испытательный стенд состоит из генератора, усилителя, устройства коммутации, банка конденсаторов, катушки Гельмгольца, датчиков тока магнитного поля, контроллера, персонального компьютера с программным обеспечением.

Генератор (сигналов) предназначен для задания частоты и уровня воздействия магнитным полем на объект, усилитель (мощности) – для регулирования тока в LC-цепи до требуемого уровня. Банк конденсаторов представляет собой набор устройств, которые наряду с катушкой Гельмгольца обеспечивают последовательный резонанс в диапазоне рабочих частот. Устройство коммутации (конденсаторов) служит для подключения, отключения и переключения конденсаторов в LC-цепи для обеспечения последовательного



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

<sup>1</sup> АО «ТЕСТПРИБОР», инженер-испытатель, romanov@test-expert.ru.



**Рис. 2.** Схема автоматизированной испытательной установки для воздействия переменным магнитным полем

резонанса в диапазоне рабочих частот (без образования искрового разряда и коммутационных процессов, вызванных переключением контактирующих устройств). Катушка Гельмгольца преобразует электрический ток в магнитное поле. Датчик тока контролирует уровень 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 – для управления (частотой, амплитудой и временем воздействия) испытательной установки.

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

В случае «большого сигнала» (эквивалентная схема на рис. 4а) источник сигнала (усилитель), обозначенный NE, работает в нелинейном режиме и характеризует нелинейную зависимость между током и напряжением источника сигнала (усилителя) и коммутирующего устройства. Зависимость значения магнитного поля в катушке Гельмгольца ( $L$  на рис. 4а) от частоты соответствует резонансной кривой, представленной на рис. 4б.

Характерным отличием резонансных кривых (рис. 4б и рис. 3б) является наличие бифуркации (раздвоения),

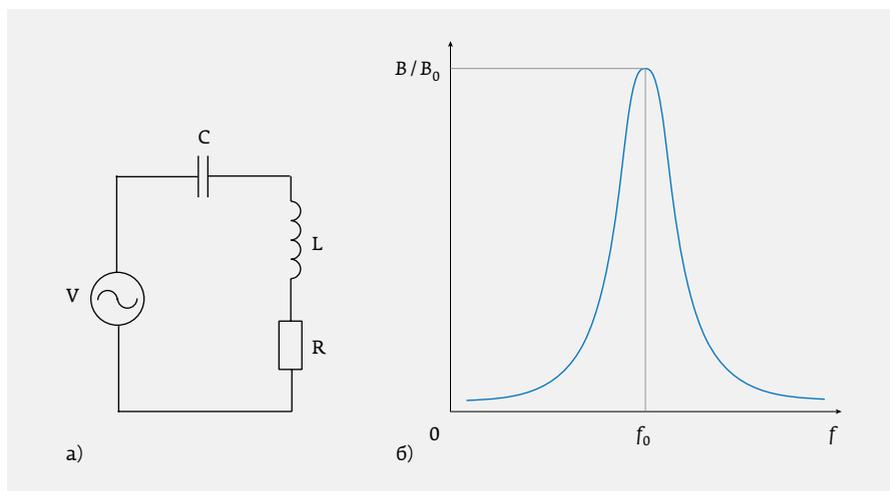
то есть существуют частоты, которым соответствует несколько значений магнитного поля. На практике это означает, что в нелинейном режиме при движении (на резонансной кривой) от меньшей частоты к большей (по траектории А на рис. 4б) максимум магнитного поля будет отличаться от максимума при движении от большей частоты к меньшей (траектория В на рис. 4б). Отметим, что эти показатели уровня магнитного поля, образованного катушкой Гельмгольца, могут различаться в разы.

В программном обеспечении испытательного стенда реализован алгоритм поиска абсолютного максимума на нелинейной резонансной кривой

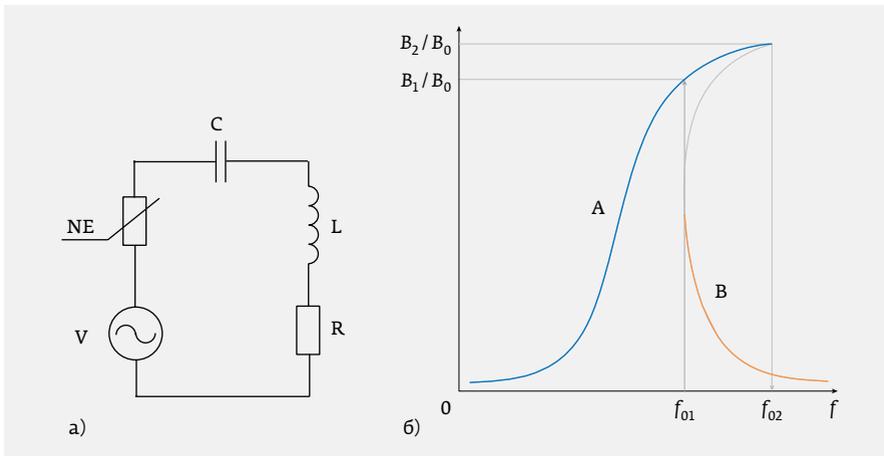
с использованием численных методов. Алгоритм позволяет оценить величину, первую и вторую производные магнитного поля по частоте, чтобы на основе полученных данных установить направление движения по траектории на резонансной кривой согласно заданному критерию.

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:

- в «малосигнальном» приближении: оба алгоритма обеспечивают необходимый уровень магнитного поля 100 мкТл. При этом наименьшее время сканирования в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц показал алгоритм простого переключения;



**Рис. 3.** Эквивалентная схема испытательной установки в линейном режиме (а) и линейный последовательный резонанс (б)



**Рис. 4.** Эквивалентная схема испытательной установки в нелинейном режиме (а) и нелинейный последовательный резонанс (б). Тонкая линия соответствует неустойчивой траектории, жирная линия – устойчивой траектории движения на резонансной кривой

- в приближении «большого сигнала»: алгоритм поиска абсолютного максимума на нелинейной резонансной кривой успешно установил заданный уровень магнитного поля (3 мТл) в диапазоне частот от 50 Гц до 20 кГц. Алгоритм простого переключения частоты не обеспечил выставление уровня магнитного поля при идентичных параметрах испытательной аппаратуры.

Набор программ персонального (управляющего) компьютера включает в себя: основную программу, подпрограммы управления алгоритмами, модуль математических моделей, подпрограмму взаимодействия с внешним оборудованием и интерфейс. Основная программа предназначена



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

для реализации взаимодействия подпрограмм и модулей программного обеспечения. Интерфейс служит для ввода параметров испытательного стенда и 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.

Программное обеспечение контроллера представляет собой микропро-

грамму для трансляции данных между управляющим компьютером и оборудованием испытательного стенда, а также для сбора данных датчиков.

Таким образом, испытательный стенд «Воздействие переменным магнитным полем» работает на основе последовательного резонанса в LC-цепи. В статье приведены общие структурные схемы стенда, эквивалентные схемы в «малосигнальном» приближении, в приближении «большого сигнала» и 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 сделать вывод о запасе испытательных диапазонов (магнитной индукции и частот) стенда для достижения больших величин при частичной модернизации оборудования, а также о значительном сокращении времени одного цикла испытаний по сравнению с ручным перестроением резонансной частоты.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Yang K. C.** Radio Frequency Circuit Design  
URL: <http://www.radiolocman.com/view/article.html?di=163905>
2. **Helmholtz Coil.** Accel Instruments Corp.  
URL: <http://www.accelinstruments.com/Helmholtz-Coil/Helmholtz-Coil.html>
3. **Романов И.** Резонансный метод в испытаниях на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю // КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ. 2017. № 4. С. 180–182.
4. **Романов И. В.** Резонансный метод в испытаниях на восприимчивость к высокочастотному магнитному полю // VI Всероссийская научно-техническая конференция ЭМС: Сб. докладов. – М, 2017. С. 61–66.