

УДК 621.317.421

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ПЕРВИЧНОГО СПЕЦИАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ  
МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ДИАПАЗОНЕ 1–10 Тл  
ГЭТ 82-85**

**А.Е. Ескин**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
eskin@vniiftri.ru*

*Аннотация. Рассмотрены пути совершенствования Государственного первичного специального эталона единицы магнитной индукции в диапазоне 1–10 Тл ГЭТ 82-85 с целью расширения функциональных возможностей за счёт обеспечения воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного и импульсного магнитных полей в диапазоне от 0,1 до 14 Тл. В статье рассмотрены эталонные установки постоянного и импульсного поля и приведён анализ погрешностей создаваемого эталона.*

*Ключевые слова: эталон, магнитная индукция.*

**IMPROVEMENT OF THE STATE PRIMARY SPECIAL  
STANDARD OF MAGNETIC INDUCTION UNIT  
IN THE RANGE OF 1–10 T OF GET 82-85**

**A.E. Eskin**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
eskin@vniiftri.ru*

*Abstract. The ways of improving the State primary special standard of the magnetic induction unit in the range of 1–10 T of GET 82-85 are considered in order to expand the functional capabilities by ensuring the reproduction of the unit of magnetic induction of constant and pulsed magnetic fields in the range from 0.1 to 14 T. The article considers the reference standard of constant and pulsed field and provides an analysis of the errors of the developed standard.*

*Keywords: standard, magnetic induction.*

Средства измерений магнитной индукции сильных магнитных полей — постоянного и импульсного — применяются при производстве магнитотвёрдых и сверхпроводящих материалов, при проведении изыскательских научных работ, изготовлении медицинских ЯМР-томографов. При этом в последние годы наблюдается значительное расширение применения данных средств измерений в вышеуказанных областях и повышение их значимости.

Отдельно необходимо выделить применение средств измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля при производстве сверхпроводящих материалов по проекту международного термоядерного реактора (ИТЕР). Принципиальным отличием требований к средствам измерений магнитной

индукции, которые необходимы для контроля характеристик сверхпроводящих материалов, является более широкий динамический диапазон с расширением верхней границы до 14 Тл.

При этом существующая система обеспечения единства измерений магнитной индукции постоянного магнитного поля, базирующаяся на ГЭТ 82-85 и ГЭТ 12-2011, обеспечивает диапазон измерений только до 10 Тл и не позволяет осуществлять передачу единицы магнитной индукции средствами измерений в диапазоне до 14 Тл.

Кроме того, существует большой парк средств измерений (около 3000), которые имеют режим измерения амплитуды магнитной индукции однократных импульсов. Сферой применения таких средств измерений являются производство и применение магнитотвёрдых материалов, которые требуют для своего намагничивания создания сильного импульсного магнитного поля до 14 Тл.

Усовершенствование ГЭТ 82-85 позволит расширить динамический диапазон эталона до 14 Тл и обеспечить метрологическую прослеживаемость к эталонам от перспективных и существующих средств измерений магнитной индукции импульсного магнитного поля.

### Состав эталона

Эталон будет состоять из двух установок: постоянного магнитного поля и импульсного магнитного поля.

#### *Установка постоянного магнитного поля*

Структурная схема установки постоянного магнитного поля приведена на рис. 1. В её основе — измерители магнитной индукции постоянного магнитного поля на основе ядерного магнитного резонанса (ЯМР). При измерении магнитной индукции при комнатной температуре в диапазоне от 1 до 12 Тл будет использоваться тесламетр РТ2026 с использованием резонанса протонов  $H^1$ , свыше 12 Тл — дейтерия; при температуре 4,2 К будет использоваться тесламетр «Сибирь» в диапазоне от 1 до 13 Тл с использованием резонанса ядер алюминия.

В основе метода ЯМР лежит возможность определения магнитной индукции при помощи простого соотношения:

$$B = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\gamma},$$

где  $\gamma$  — гиромагнитное отношение ядер вещества,  $f$  — частота ядерного магнитного резонанса.

Преимущества метода — привязка к физической константе и измерению частоты.

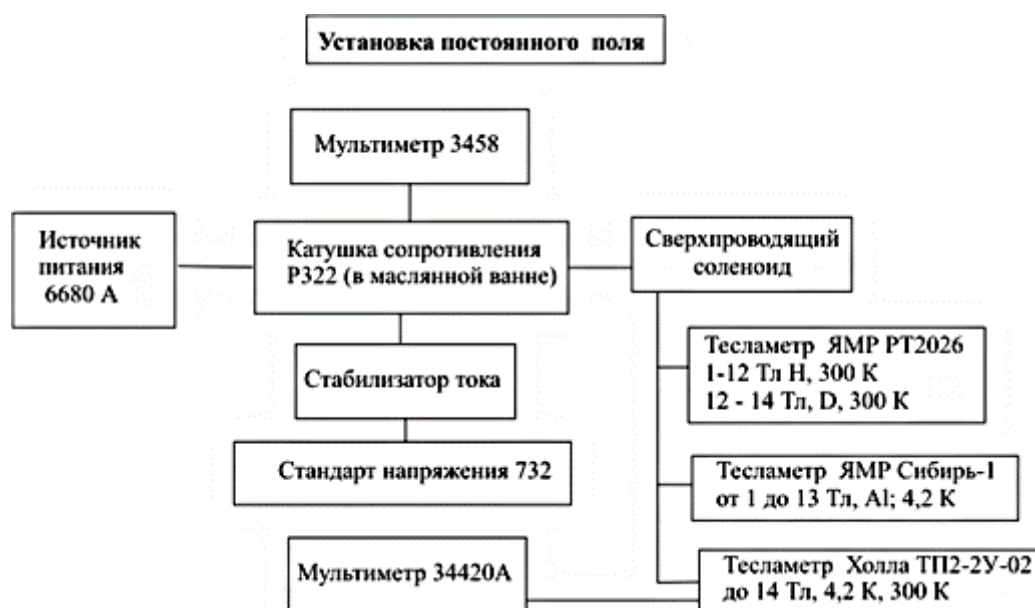


Рис. 1. Структурная схема установки постоянного магнитного поля

Этот метод наиболее точный для измерения магнитной индукции постоянного поля. Погрешность измерения ЯМР-тесламетром составляет  $10^{-7}$ .

Недостаток — может измерять только магнитную индукцию однородного поля 0,01 %/см.

В качестве источника магнитного поля возможно использовать два варианта построения:

- заливной соленоид;
- соленоид с замкнутой системой охлаждения.

Наиболее оптимальная система для эксплуатации (соленоид с замкнутой системой охлаждения), позволяющая обеспечить работу без покупки дорогостоящего жидкого гелия, может работать как непрерывно, так и быть подготовлена к работе в течение суток при периодическом использовании. Недостаток системы — высокая стоимость.

Система с покупным заливным соленоидом примерно в полтора раза дешевле, но может эксплуатироваться только при покупке жидкого гелия (одна заправка (40 л по 1500 руб. за 1 л) — около 60 тыс. руб.).

Были рассмотрены два варианта изготовления соленоида:

- на основе сверхпроводящего провода из NbSn (производства АО «ВНИИНМ»);
- на основе ВТСП-ленты (производства ЗАО «Супер Окс»).

Наиболее перспективным представляется соленоид на основе ВТСП-ленты, который позволяет создавать магнитное поле до 1 Тл при температуре жидкого азота (77 К) и до 14 Тл при температуре жидкого гелия (4,2 К).

Значение магнитной индукции в рабочем объёме соленоида рассчитали как сумму значений индукции  $B_i$  от каждого витка с током (рис. 2).

$$B = \sum_{i=1}^n B_i. \quad (1)$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2} \cdot \frac{R^2}{(R^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (2)$$

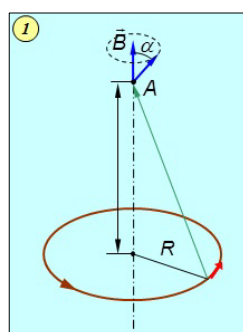


Рис. 2. Магнитное поле витка с током

Были проведены численные расчёты значений магнитной индукции и показано, что, при изменении количества витков, слоёв провода и расстояния между секциями, достижима неоднородность магнитного поля в рабочем объёме 0,01 %.

### Установка импульсного магнитного поля

Структурная схема установки импульсного магнитного поля приведена на рис. 3. Установка будет состоять из измерителя магнитной индукции магнитного поля на основе индукционного датчика, источника импульсного тока и катушек магнитной индукции.



Рис. 3. Структурная схема установки импульсного поля

Требования к источнику импульсного поля:

- длительность фронта импульса от 0,1 до 5 мс;
- диапазон генерируемых полей от 0,1 до 14 Тл;
- формы генерируемых импульсов — биполярная и однополярная, приведены на рис. 4.

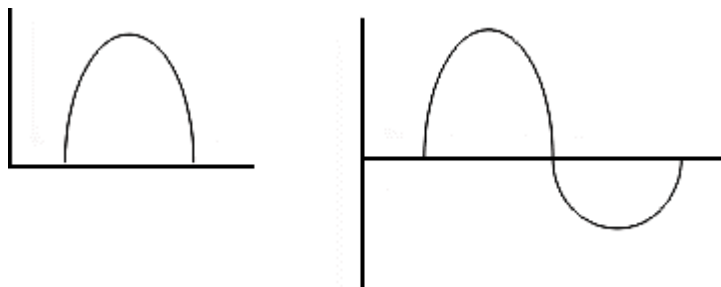


Рис. 4. Форма генерируемых импульсов

Установка для импульсных магнитных полей состоит из четырёх основных частей: источника энергии, накопителя энергии, ключа и, собственно, соленоида. Источник энергии — высоковольтные выпрямители постоянного тока, накопители — батареи высоковольтных конденсаторов большой ёмкости, ключи — вакуумные разрядники или тиристоры. Конденсаторные батареи при ёмкости в несколько тысяч микрофарад и напряжении до 3 кВ способны накопить энергию в несколько десятков килоджоулей.

Схема генерации импульса тока в активно-индуктивной нагрузке с помощью ёмкостного накопителя энергии — конденсаторной батареи ёмкостью  $C$  с начальным напряжением  $E_0$  — приведена на рис. 5.

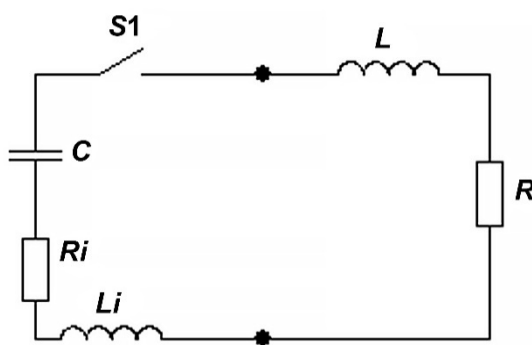


Рис. 5. Схема генерации импульса тока в активно-индуктивной нагрузке с помощью конденсаторной батареи

Разряд конденсаторной батареи является колебательным с экспоненциально затухающей амплитудой.

Для обеспечения генерации однополярного импульса разработана оригинальная схема «разделённого колебания» (рис. 6). Суть схемы заключается в том, что при разряде конденсатора на индуктивность в момент, когда ток через индуктивность равен нулю, напряжение на конденсаторе становится отрицательным, и если в этот момент конденсатор переключить на другую (вспомогательную катушку), то конденсатор перезарядится до напряжения первоначального заряда (в схеме без потерь). В реальной схеме остаётся от 50 до 75 % первоначального напряжения, что позволяет быстрее заряжать накопительную ёмкость и уменьшать нагрев катушек. Кроме того, такая схема будет полезна при разработке устройств для намагничивания постоянных магнитов тем, что не имеет обратного импульса поля, что позволяет более эффективно намагнить образец.

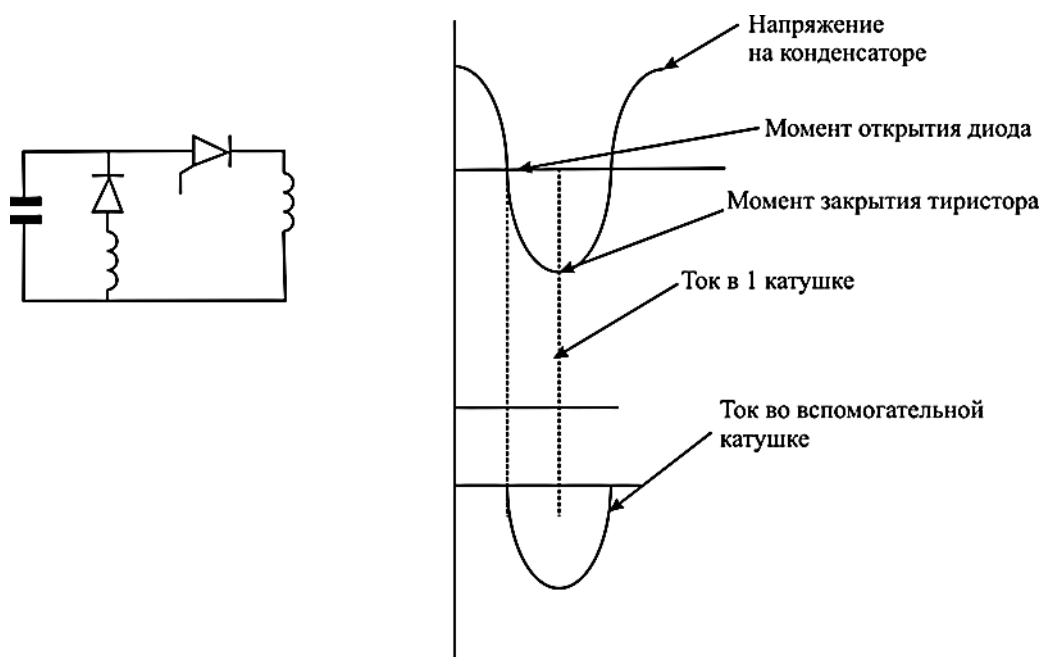


Рис. 6. Принципиальная схема и формы сигналов, объясняющие работу схемы

Измерение магнитной индукции импульсного магнитного поля будет осуществляться с помощью индукционного метода (измерительной катушки).

Сигнал на выходе измерительной катушки пропорционален производной значения магнитной индукции, следовательно, для получения значения магнитной индукции необходим интегратор.

Был выбран наиболее точный метод интегрирования аналогового сигнала — метод цифрового интегрирования с точной синхронизацией интервала интегрирования.

Схема такого интегратора [1] приведена на рис. 7.

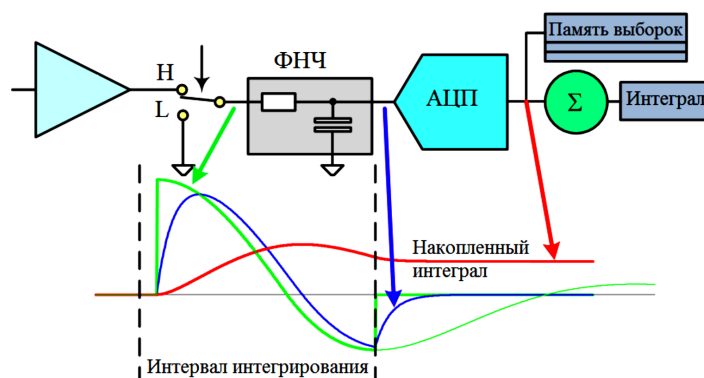


Рис. 7. Структурная схема цифрового интегратора и сигналы в различных точках схемы

Использование фильтра приводит не только к ограничению спектральных компонент, но и к нежелательному искажению сигнала во временной области, что делает невозможным точную синхронизацию интервала интегрирования. По этой причине необходимо сначала выделить во времени ту часть сигнала, которая далее будет подвергнута фильтрации и интегрированию. Это можно сделать, добавив в измерительный тракт до фильтра быстродействующий ключ, пропускающий необходимую часть сигнала. Поскольку точная синхронизация обеспечивается с помощью ключа, можно применить фильтр с необходимыми частотными характеристиками, «растянув» сигнал во времени. Это позволяет применять медленные, высокоразрядные АЦП и тем самым максимально приблизиться к теоретическому пределу методической погрешности.

Основные свойства такой схемы можно окончательно сформулировать следующим образом:

- точная синхронизация интервала интегрирования осуществляется за счёт постановки быстродействующего аналогового ключа, при этом погрешность моментов начала и окончания интегрирования находится на уровне единиц наносекунд;
- расположенный за ключом ФНЧ обеспечивает необходимый уровень методической погрешности приближения интеграла суммой цифровых отсчётов. В реальных системах нестабильность срабатывания мощных импульсных источников достигает 50–100 нс. В этой связи требования по нестабильности синхронизации — около 10 нс.

Процедура измерения разбивается на несколько этапов:

1. До начала интегрирования ключ находится в положении «L».
2. С началом фазы интегрирования ключ переводится в положение «H», и сигнал поступает на вход ФНЧ и АЦП, отсчёты которого суммируются.
3. При поступлении импульса триггера (момент измерения интеграла) быстродействующий ключ вновь переводится в положение «L», отсекая сигнал, однако суммирование некоторого числа отсчётов продолжается для того, чтобы учесть переходной процесс фильтра, содержащий информацию об искомом интеграле.

На основании рассмотрения различных методов интегрирования сигналов наиболее предпочтительным является метод цифрового интегрирования с точной синхронизацией интервала интегрирования.

Описанный выше принцип построения цифрового интегратора с точной синхронизацией был реализован приборе VsDC3 [2].

Измеренное значение магнитной индукции переменного магнитного поля «В» с помощью индукционных преобразователей можно рассчитать по формуле:

$$B = \frac{U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot K_{sw}}, \quad (3)$$

где  $K_{sw}$  — коэффициент измерительной катушки (суммарная площадь витков),  $m^2$ ;  $f$  — частота переменного магнитного поля, Гц;  $U$  — напряжение на выходе катушки, В.

Для перекрытия всего диапазона требуются три измерительных преобразователя.

Расчётные параметры измерительных катушек приведены в таблице 1.

Таблица 1

|                                  |      |     |     |
|----------------------------------|------|-----|-----|
| Длительность фронта импульса, мс | 5    | 0,5 | 0,1 |
| $K_{sw}$ , $mm^2$                | 1140 | 230 | 23  |
| Диаметр каркаса, мм              | 3    | 2,5 | 2,5 |
| Количество витков                | 506  | 146 | 15  |

Для обеспечения передачи единицы как в соленоидальных, так и в электромагнитных системах будут изготовлены два типа датчиков в виде цилиндрических и плоских катушек.

### Метрологические характеристики эталона

В таблице 2 приведены сравнения метрологических характеристик текущего ГЭТ 82-85 и ожидаемые значения после модернизации.

Таблица 2

#### Основные характеристики ГЭТ 82-85

| Параметр                                                            | Значение текущего ГЭТ 82-85 | Ожидаемые значения после модернизации |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Рабочий диапазон магнитной индукции постоянного магнитного поля, Тл | 1...10                      | 1...14                                |
| СКО                                                                 | $1 \cdot 10^{-6}$           | $5 \cdot 10^{-7}$                     |
| НСП                                                                 | $7 \cdot 10^{-6}$           | $5 \cdot 10^{-6}$                     |
| Рабочий диапазон магнитной индукции импульсного магнитного поля, Тл | —                           | 0,1...14                              |
| СКО                                                                 | —                           | $1 \cdot 10^{-3}$                     |
| НСП                                                                 | —                           | $1 \cdot 10^{-3}$                     |

Основные источники систематической погрешности воспроизведения магнитной индукции постоянного поля и их оценки  $\Theta_i$  приведены в таблице 3.

Таблица 3

| Источник погрешности                                                      | Тип распределения | Граница погрешности |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| Неточность определения гиромагнитного отношения ядер                      | равномерное       | $10^{-8}$           |
| Неточность измерения частоты ЯМР                                          | равномерное       | $10^{-8}$           |
| Неточность фиксации частоты ЯМР                                           | равномерное       | $10^{-7}$           |
| Сдвиги частоты ЯМР, обусловленные химическими сдвигами и материалом зонда | равномерное       | $10^{-6}$           |

Основные источники систематической погрешности воспроизведения магнитной индукции импульсного поля и их оценки  $\Theta_i$  приведены в таблице 4.

Таблица 4

| Источник погрешности                                    | Тип распределения | Граница погрешности |
|---------------------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| Неточность определения постоянной измерительной катушки | равномерное       | $10^{-4}$           |
| Неточность расчёта интеграла                            | равномерное       | $10^{-4}$           |
| Неточность измерения напряжения                         | равномерное       | $10^{-5}$           |

Неисключённая систематическая погрешность  $\Theta_0$  при доверительной вероятности 0,99 рассчитывается по формуле

$$\Theta_0 = 1,4 \sqrt{\sum_i \Theta_i} \quad (4)$$

и составляет для постоянного поля —  $1,5 \cdot 10^{-6}$ , для импульсного поля —  $3 \cdot 10^{-4}$ , что не превышает ожидаемых значений после окончания модернизации эталона.

Усовершенствование ГЭТ 82-85 позволит расширить динамический диапазон эталона до 14 Тл постоянных магнитных полей и обеспечить метрологическую прослеживаемость к эталонам от перспективных и существующих средств измерений магнитной индукции импульсного магнитного поля.

### Список литературы

1. Батраков А.М., Ильин И.В., Павленко А.В. Прецизионные цифровые интеграторы с точной синхронизацией // Автометрия. — 2015. — Т. 51. — № 1. — С. 62–69.
2. Батраков А.М., Вагин П.В., Павленко А.В. и др. Прецизионные многофункциональные интеграторы VsDC2 и VsDC3. — Новосибирск, 2012. — 24 с. (Препр. /ИЯФ СО РАН; 2012-031).

Статья поступила в редакцию: 30.06.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 14.07.2022 г.

Статья принята в работу: 25.07.2022 г.