

## **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СРЕДСТВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 0 ДО 20 кГц.**

**С.Т. Паринов**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
stp\_50@vniiftri.ru

*В настоящее время происходит бурное развитие средств измерений напряжённости электрического поля (НЭП) в диапазоне частот от 0 до 20 кГц и постоянный рост востребованности соответствующих средств обеспечения единства измерений.*

*В этой связи представляет большой интерес обсуждение основных направлений развития измерительных систем высшей точности в этой области измерений, а также методов и средств передачи размера единицы напряжённости электрического поля.*

*Предметом настоящей работы является обсуждение основных направлений совершенствования Государственного специального эталона ГЭТ 158-96 на основе результатов исследования состояния обеспечения единства измерений напряжённости электрического поля в РФ и за рубежом, а также методов передачи размера единицы НЭП.*

*В результате рассмотрения возможных вариантов совершенствования ГЭТ 158-96 выявлена необходимость кардинального изменения принципов построения эталонного генератора электрического поля. Также рассмотрена возможность передачи размера единицы методом дипольного ослабления НЭП.*

*Currently, there is a rapid development of measuring instruments of the electric field strength (EFS) in the frequency range from 0 to 20 kHz and a constant increasing demand for corresponding means of ensuring the uniformity of measurements.*

*In this regard, the discussion of the main directions in development of highest accuracy measuring systems in this field of measurements, as well as methods and means of transmitting the size of a unit of electric field intensity is of great interest.*

*The subject of this work is the discussion of the main directions of improvement of the State special standard GET 158-96 based on the results of a study of the state of ensuring the uniformity of measurements of the electric field intensity in the Russian Federation and abroad, as well as methods for transferring the size of the EFS unit.*

*As a result of consideration of possible variants for improving the GET 158-96, the need for a fundamental change in the principles of constructing a reference electric field generator was found out. The possibility of transferring the size of a unit by the dipole weakening method of EFS is also considered.*

*Ключевые слова: эталон, напряжённость электрического поля, генератор электрического поля, динамический диапазон, частотный диапазон, погрешность.*

*Key words: standard, electric field strength, electric field generator, dynamic range, frequency range, error.*

### **Введение**

Измерители напряжённости электрического поля (НЭП) широко применяются в науке, технике и здравоохранении. Основные направления их при-

менения: контроль соответствия условий труда и параметров окружающей среды требованиям подзаконных актов [1], специальная оценка соответствия условий труда требованиям федерального законодательства [2, 3], контроль условий применения спецтехники, испытания технических средств на соответствие техническим регламентам, контроль условий производства продукции, критичной к электрическому полю, контроль заряда космических аппаратов вследствие действия солнечного ветра и т.п.

Обеспечение единства измерений НЭП в диапазоне частот 0–20 кГц в Российской Федерации осуществляется в соответствии с Государственной поверочной схемой [4], регулирующей применение Государственного специального эталона ГЭТ 158-96, рабочих эталонов первого и второго разрядов, а также эксплуатацию большого парка рабочих средств измерений.

За время, прошедшее с момента разработки и утверждения ГЭТ 158-96 и ГПС, произошли существенные изменения, предопределяющие необходимость модернизации как эталона, так и средств передачи размера единицы. Для целеполагания на этом этапе развития данного вида измерений необходим анализ состояния обеспечения единства измерений НЭП в РФ и за рубежом.

### **Обеспечение единства измерений напряжённости электрического поля в РФ и СНГ**

Возглавляющий Государственную поверочную схему [4] ГЭТ 158-96 разработан в национальном метрологическом институте (НМИ) РФ ФГУП «ВНИИФТРИ» в 1992–1994 гг. Метрологические характеристики ГЭТ 158-96 приведены в таблице 1.

Таблица 1

| Страна          | Российская Федерация   |                       |                       |                                           |
|-----------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
| НМИ             | Государственный эталон | Динамический диапазон | Частотный диапазон    | Погрешность, по 5 рез-там                 |
| ФГУП «ВНИИФТРИ» | ГЭТ 158-96             | 10 В/м – 2 кВ/м       | 0 Гц,<br>20 Гц–10 кГц | $\Theta \leq 1,4 \%$ ,<br>$S \leq 0,3 \%$ |
|                 |                        |                       | 10–20 кГц             | $\Theta \leq 2,6 \%$ ,<br>$S \leq 0,3 \%$ |

Общий вид эталонного генератора электрического поля ГЭТ 158-96 приведён на рисунке 1.



Рис. 1. Общий вид эталонного генератора электрического поля ГЭТ 158-96.  
Слева — эталонный экранированный конденсатор КПЭ1

В настоящее время в Госреестре более 70 рабочих эталонов НЭП 1 и 2 разрядов, соответствующих [4]. Передача размера единицы подчинённым рабочим эталонам осуществляется методом пространственного ослабления. Число типов рабочих СИ НЭП более 24. Парк рабочих СИ составляет порядка 10 000 приборов. Востребованность ГЭТ 158-96 за последние годы выросла в 2,7 раза. Зависимость востребованности ГЭТ 158-96 от времени приведена на рисунке 2.

В последнее время имеют место следующие тенденции развития данного вида измерений в РФ и СНГ. Ранее, на первом этапе развития данного вида измерений, согласно [5], контроль НЭП производился в диапазоне до 300 кВ/м. Однако в настоящее время установлены как предельно допустимые уровни (ПДУ) напряжённости переменного электрического поля, так и их возможные превышения. Согласно [1, 6] ПДУ составляет 25 кВ/м, а в соответствии с [3] для 4 класса условий труда возможное превышение ПДУ составляет больше 40 раз. Соответственно, потребная верхняя граница диапазона измерений НЭП увеличивается до 1000 кВ/м. Развитие парка рабочих СИ отражает эти тенденции. Так, например, внесённый в Госреестр измеритель параметров электростатического поля ИПЭП-1 производства РБ обеспечивает измерение напряжённости электростатического поля в диапазоне до 1000 кВ/м с погрешностью от 5 % [7]. Измеритель напряжённости электростатического поля EFM 51 производства Германии обеспечивает измере-

ние напряжённости электростатического поля в диапазоне от 2 до 800 кВ/м с разрешением 100 В/м [8].

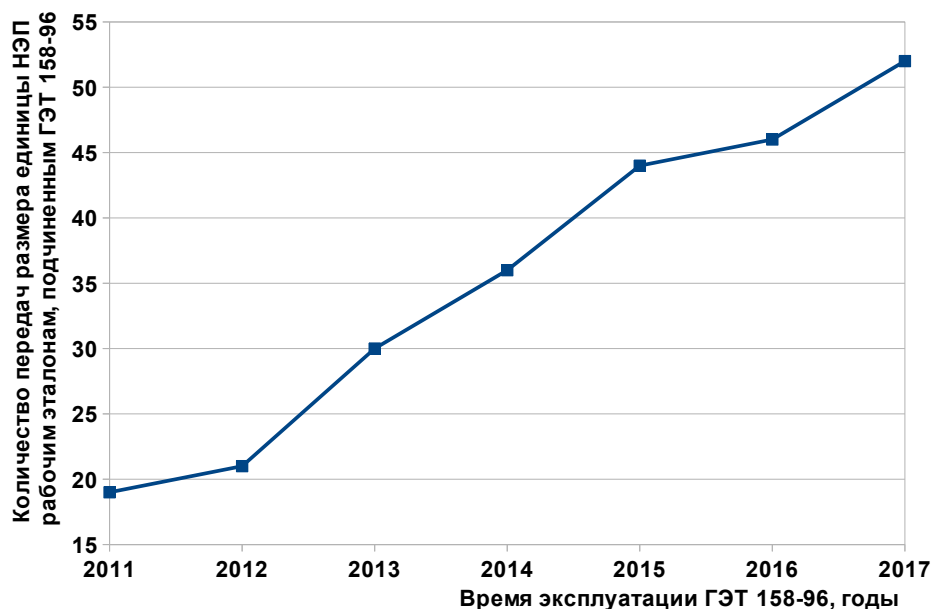


Рис. 2. Зависимость востребованности ГЭТ 158-96 от времени эксплуатации

Также согласно [1, 9] нижняя граница частотного диапазона измерений напряжённости переменного электрического поля расширена до 5 Гц. В перспективе, в соответствии с [10], предусматривается расширение этой границы до 1 Гц.

### **Обеспечение единства измерений напряжённости электрического поля за рубежом**

Состояние обеспечения единства измерений НЭП за рубежом характеризуется следующими факторами: распределением эталонов по регионам мира, НМИ, эксплуатирующими эталонами НЭП в странах мира, характером воспроизводимого эталонами электрического поля, частотным диапазоном воспроизведения НЭП, динамическим диапазоном воспроизведения НЭП, показателями точности воспроизведения НЭП.

Распределение национальных эталонов высшей точности, воспроизводящих НЭП в диапазоне частот ниже 50 кГц, по регионам мира и их характеристики приведены в таблицах 2–4. Источники: [11], а также сайты национальных НМИ.

Таблица 2

| Регион мира      | Европа                   |                       |                    |                     |
|------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| Страна, НМИ      | Идентификатор НМИ в KCDB | Динамический диапазон | Частотный диапазон | Показатели точности |
| Италия, INRIM    | INRIM/203                | 1 В/м – 40 кВ/м       | 50 Гц              | 0,26 %              |
| Италия, INRIM    | INRIM/204                | 1–500 В/м             | 10 Гц – 2 кГц      | 0,26 %              |
| Германия, PTB    | PTB/2.3.435              | 100 В/м – 30 кВ/м     | 16 Гц – 2 кГц      | 0,5 %               |
| Нидерланды, VSL  | VSL/85a                  | 1 В/м – 20 кВ/м       | 0 Гц               | 0,5 %               |
| Нидерланды, VSL  | VSL/85b                  | 1 В/м – 20 кВ/м       | 10 Гц – 10 кГц     | 0,5–1,5 %           |
| Польша, GUM      | GUM/28z                  | 5 В/м – 20 кВ/м       | 10 Гц – 2 кГц      | 1,5–2,5 %           |
| GB, NPL          | NPL/310                  | 20 мВ/м – 1 кВ/м      | 10 Гц – 50 кГц     | 0,68 dB             |
| Швеция, RISE     | RISE/600a                | 1 В/м – 150 кВ/м      | 10 Гц – 50 кГц     | 1 dB                |
| Швейцария, METAS | METAS/218.02.01          | 0,1–60 В/м            | 10 Гц – 50 кГц     | 1,1 dB              |

Таблица 3

| Регион мира       | Америка                  |                       |                    |                     |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| Страна, НМИ       | Идентификатор НМИ в KCDB | Динамический диапазон | Частотный диапазон | Показатели точности |
| Бразилия, INMETRO | INMETRO/8385             | 10 В/м – 20 кВ/м      | 50 Гц              | 1,5 %               |
| США, NIST         | NIST/64100S              | 1 В/м – 0,2 кВ/м      | 50 Гц              | 0,68 dB             |

Таблица 4

| Регион мира  | Азия                     |                       |                    |                     |
|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| Страна, НМИ  | Идентификатор НМИ в KCDB | Динамический диапазон | Частотный диапазон | Показатели точности |
| Вьетнам, VMI | –                        | 0–200 В/м             | 0–50 кГц           | 1,0 dB              |
| Турция, UME  | UME /464                 | 1–300 В/м             | 30 Гц – 50 кГц     | 1,7 dB              |
| Япония, AIST | –                        | –                     | 9–50 кГц           | –                   |

### Выбор основных направлений совершенствования ГЭТ 158-96

Анализ представленной в табл. 1–4 информации позволяет заключить следующее.

- Основная часть эталонов НЭП сосредоточена в странах Европы, традиционно имеющих высокие уровни стандартов безопасности и являющихся экспортёрами технологий и высокотехнологичной продукции.
- В отношении динамического и частотного диапазонов эталоны развитых стран, как правило, но не всегда превосходят эталоны развивающихся стран.
- В отношении заявленных показателей точности лидерами являются страны центральной Европы — Италия и Германия.
- ГЭТ 158-96 имеет сравнимые с лидерами показатели точности.

- ГЭТ 158-96 уступает большинству эталонов развитых стран по нижней границе диапазона частоты воспроизведения напряжённости переменного электрического поля.
- ГЭТ 158-96 уступает большинству эталонов развитых стран по верхней границе динамического диапазона воспроизведения напряжённости электрического поля.
- Одна из тенденций развития мирового эталонного парка отражена в [9], в котором отмечено, что действующие или готовящиеся к введению ПДУ ЕС устанавливает ПДУ на рабочих местах в частотном диапазоне от 1 Гц.

Исходя из данных о развитии данного вида измерений в мире, с учётом принятых в последнее время нормативных документов РФ следует сделать вывод о настоятельной необходимости модернизации ГЭТ 158-96 с целью расширения диапазона воспроизводимых значений НЭП как минимум до 4000 В/м. Также в повестке дня стоит расширение частотного диапазона воспроизведения переменного электрического поля в области низких частот до 5 Гц (в долгосрочной перспективе — до 1 Гц).

Для развития средств передачи размера единицы НЭП характерны следующие тенденции:

- в настоящее время — расширение частотного диапазона в области низких частот до 5 Гц;
- в перспективе, по мере дальнейшего развития нормативной базы, — расширение частотного диапазона в области низких частот до 1 Гц;
- расширение диапазона передачи размера единицы НЭП до 1000 кВ/м;
- переход к функционально более простым и потенциально более точным методам передачи размера единицы.

Для обеспечения расширения диапазона воспроизводимых значений напряжённости электрического поля до 4000 В/м и расширения частотного диапазона воспроизведения переменного электрического поля в области низких частот до 5 Гц в первую очередь необходима модернизация входящего в состав ГЭТ 158-96 эталонного генератора НЭП.

Также необходимо исследование новых методов средств передачи размера единицы НЭП.

Для анализа возможных вариантов построения эталонного генератора НЭП и средств передачи размера единицы НЭП принципиальное значение имеет выбор критериев, применяемых при сравнении потенциально используемых технических решений. Применительно к данному анализу существенными являются такие группы критериев, как метрологические, схемотехнические и стоимостные.

А. К группе метрологических критериев относятся: возможность обеспечения как необходимой точности в заданных динамическом и частотном

диапазонах, максимальная простота в функциональном отношении применяемых средств измерений.

- В. К группе схмотехнических критериев относятся: соответствие схмотехническим требованиям, в том числе по напряжению, по частоте, по нагрузочным характеристикам, простота и доступность применяемых технических решений, надёжность и ремонтпригодность, возможность возникновения нелинейных искажений.
- С. К группе стоимостных критериев относятся: стоимость приобретения аппаратуры и эффективность затрат, необходимых для модернизации ГЭТ.

Применительно к построению эталонного генератора НЭП возможны два варианта — исходный, т.е. построение эталонного генератора поля на основе универсальных калибраторов, и альтернативный — построение эталонного генератора поля на основе сборок «высоковольтный усилитель — эталонный вольтметр».

Исходно при создании ГЭТ в качестве основного подхода было принято построение эталонного генератора поля на основе универсальных калибраторов, нагруженных на полеобразующую систему. Калибраторы, имеющие симметричный выход и полностью перекрывающие рабочий диапазон ГЭТ, промышленностью не выпускаются. Поэтому в разных участках рабочего диапазона использовались калибраторы разных типов. В результате этого в составе эталонного генератора поля в настоящее время имеются 4 калибратора 3 разных типов, два из которых (В1-28 и В1-9) являются морально и физически устаревшими, поддержка производителем эксплуатации двух других (Fluke 9100E) в настоящее время прекращается.

Для расширения динамического диапазона воспроизведения симметричного электрического поля до 4000 В/м в рамках данного подхода необходимо приобретение калибраторов, обеспечивающих режим взаимной синхронизации и выходное напряжение 1050 В в диапазоне частот от 5 Гц до 20 кГц. Промышленность не выпускает калибраторов, полностью соответствующих этим требованиям. Единственным частично подходящим техническим решением является применение двух калибраторов типа Fluke 5730A, совместно с двумя усилителями мощности 5725A. Выходная характеристика сборки калибратор Fluke 5730A — усилитель Fluke 5725A [12] приведена на рис. 3.

Как следует из приведённой характеристики, необходимые требования по напряжению сборкой Fluke 5730A – 5725A удовлетворяются только в диапазоне частот 40 Гц – 20 кГц и только при условии применения дополнительных усилителей. В диапазоне 5–40 Гц данное техническое решение неприменимо, в этом диапазоне необходимо применение дополнительных средств измерений.

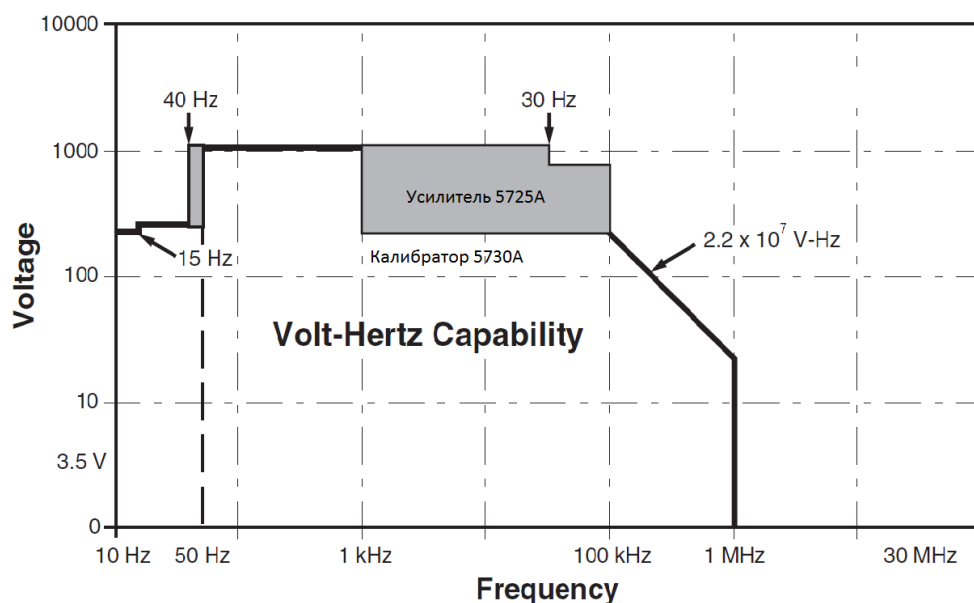


Рис. 3. Выходная характеристика сборки Fluke 5730A — Fluke 5725A

Кроме того, полеобразующая система ГЭТ обладает реактивным и активным импедансами. Соответственно источники симметричного напряжения должны отвечать требованиям согласования, т.е. обеспечивать как токи перезарядки, так и токи утечки. Из технических данных усилителя 5725A следует, что в диапазоне частот 5–30 кГц максимально допустимый ток нагрузки составляет 0,07 А, а максимально допустимая ёмкость нагрузки составляет 0,3 нФ. Из этого следует, что суммарная располагаемая мощность двух сборок 5730A–5725A составляет 154 Вт, что более чем в два раза меньше величины потребной мощности. Также располагаемая ёмкость нагрузки усилителя 5725A более чем в полтора раза меньше потребной величины ёмкости нагрузки. Это означает, что вблизи верхней границы частотного диапазона усилитель 5725A будет работать с перегрузкой, что может повлечь срабатывание защиты, значительные нелинейные искажения, быстрый расход ресурса и (или) выход из строя.

Эффективность затрат на приобретение аппаратуры по исходному варианту невысокая, поскольку имеющиеся в составе калибраторов аппаратные средства воспроизведения и измерения переменных и постоянных токов, сопротивления и высокочастотные возможности оплачиваются при приобретении, но не используются при эксплуатации ГЭТ 158-96.

Вероятность нелинейных искажений также велика, поскольку на верхней границе динамического диапазона выходные каскады усилителя Fluke 5725A будут работать в режиме перегрузки.



Альтернативный вариант построения эталонного генератора симметричного электрического поля предполагает использование специализированных для каждого из двух поддиапазонов частот двухканальных усилителей для питания генератора поля. Измерение напряжений на полеобразующей системе в обоих поддиапазонах частот при этом предполагается эталонными вольтметрами. В этом случае состав эталонного генератора поля, помимо полеобразующей системы, включает в себя задающий генератор сигналов с симметричным выходом, два высоковольтных усилителя постоянного тока, двухканальный усилитель мощности переменного тока класса HV, двухканальное согласующее устройство, два эталонных вольтметра. Граничная частота, разделяющая поддиапазоны, определяется нагрузочной способностью высоковольтных усилителей постоянного тока [13]. Например, для высоковольтных усилителей Trek 609E-6 её расчётная величина составляет 1 кГц, точное значение может быть определено только при детальном исследовании метрологических характеристик эталонного генератора поля после приобретения оборудования.

Блок-схема эталонного генератора симметричного электрического поля по альтернативному варианту в поддиапазоне нижних частот приведена на рис. 4.

Блок-схема эталонного генератора поля при воспроизведении электростатического поля и электрического поля в поддиапазоне низких частот (5 Гц - 1 кГц), диапазон НЭП до 4000 В/м

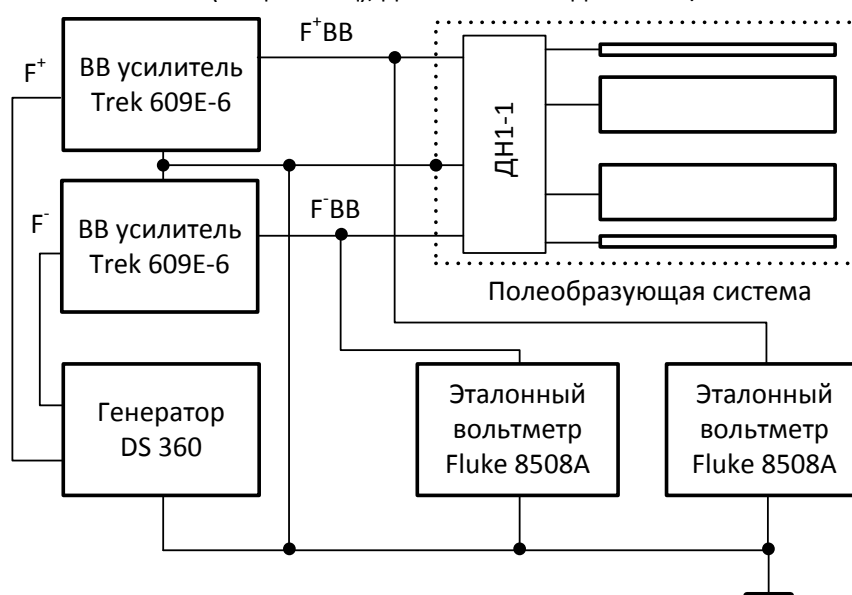


Рис. 4. Блок-схема эталонного генератора симметричного электрического поля по альтернативному варианту в поддиапазоне низких частот 5 Гц – 1 кГц

Блок-схема эталонного генератора симметричного электрического поля по альтернативному варианту в поддиапазоне высоких частот приведена на рис. 5.

Блок-схема эталонного генератора поля при воспроизведении электрического поля в поддиапазоне высоких частот (1 кГц – 20 кГц), диапазон НЭП до 4000 В/м

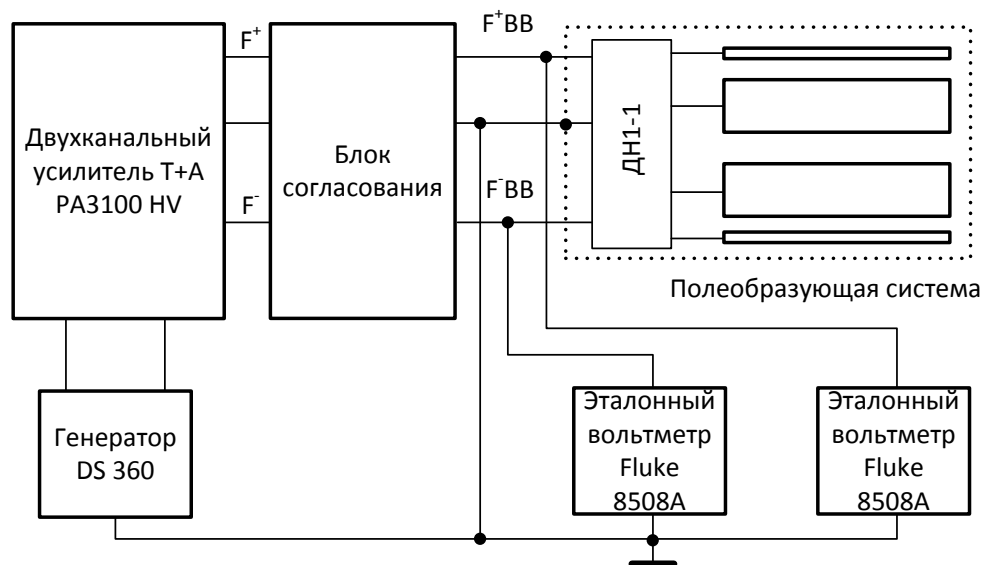


Рис. 5. Блок-схема эталонного генератора симметричного электрического поля по альтернативному варианту в поддиапазоне высоких частот 1–20 кГц

Характеристики приведённой на рис. 4, 5 аппаратуры обеспечивают требования к генератору НЭП с необходимым запасом. В частности, требования по напряжению (с учётом блока согласования) с запасом удовлетворяются в заданном диапазоне частот 5 Гц – 20 кГц.

Кроме того, с запасом удовлетворяются требования согласования, связанные с реактивным и активным импедансами полеобразующей системы ГЭТ и диссипацией мощности в блоке согласования. Согласно [14] номинальная располагаемая мощность каждого канала усилителя Т+А РА3100 НВ примерно на 30 % превышает величину потребной мощности на частоте 20 кГц. Благодаря этому с запасом обеспечиваются как токи утечки и токи зарядки ёмкости нагрузки, так и потери в блоке согласования. Кроме того, это означает, что вблизи верхней границы частотного диапазона усилитель Т+А РА3100 НВ будет нагружен частично, что обеспечивает отсутствие срабатывания защиты, большой ресурс и малую вероятность выхода из строя.

Дополнительно к этому исключительно полезной конструктивной особенностью усилителя Т+А РА3100 НВ является возможность увеличения

его выходной мощности на 50 % путём подключения к его входу POWER LINK внешнего дополнительного источника питания.

Также характеристики и работа усилителя T+A PA3100 HV с частичной нагрузкой гарантируют отсутствие нелинейных искажений. Простота и доступность применяемых технических решений, надёжность и ремонтпригодность также выше по альтернативному варианту, т.к. замена выходных транзисторов усилителя проще и доступней ремонта калибраторов.

Также альтернативный вариант предпочтительнее с точки зрения уменьшения погрешностей. Так, например, в исходном варианте наивысшая точность воспроизведения напряжения достигается на выходах калибраторов. Передача мощности от калибраторов на полеобразующую систему по силовым кабелям приводит к возникновению принципиально неустраняемых погрешностей, причём для погрешностей такого рода характерен рост с увеличением верхней границы динамического диапазона. При альтернативном варианте построения эталонного генератора поля погрешности такого рода полностью исключаются, поскольку появляется возможность точного измерения напряжения непосредственно на электродах полеобразующей системы.

Стоимость аппаратной части по альтернативному варианту относительно исходного варианта составляет около 38 % без учёта стоимости дополнительных технических средств для закрытия частотного диапазона 5–40 Гц и около 29 % с учётом стоимости этих средств.

Эффективность затрат по альтернативному варианту много выше, чем по исходному, поскольку оплачиваются только те основные функции аппаратуры, которые используются для обеспечения расширенных требований к генератору НЭП.

### **Передача размера единицы НЭП**

В области измерений НЭП в последнее время наметилась устойчивая тенденция значительного увеличения верхних границ диапазонов измеряемых величин. В соответствии с действующими в настоящее время нормативными документами имеется необходимость метрологического обеспечения средств измерений НЭП вплоть до значений 500–1000 кВ/м. Для традиционных методов передачи размера единицы напряжённости электростатического поля (таких, как метод нескольких конденсаторов и метод пространственного ослабления) в область больших значений характерен ряд общих признаков — многостадийность, большое число измерений, невысокая точность. Например, для метода пространственного ослабления характерна принципиально неустраняемая зависимость погрешности от точности позиционирования измерителя. Эти похожие свойства являются проявлением известной общей закономерности, согласно которой операции с более сложными объектами, как правило, более просты, причём

во многих случаях верно также и обратное. В силу этих обстоятельств традиционные методы передачи ограниченно применимы для расширенных диапазонов НЭП. В этой связи целесообразно рассмотрение новых подходов к решению проблемы передачи размера единицы в расширенном диапазоне НЭП.

Применительно к данной проблеме, можно выделить следующие существенные аспекты.

Одним из обязательных требований к методу передачи является обеспечение достаточной для СИ 1 разряда погрешности передачи, с учётом метрологического запаса. Это делает затруднительным использование традиционных многостадийных методов вследствие накопления погрешностей.

Также метод передачи должен включать меры по исключению зависимости погрешности передачи от точности позиционирования измерителя.

Кроме того, это также предопределяет необходимость увеличения верхней границы динамического диапазона исходного эталона, поскольку с ростом верхней границы погрешность передачи размера единицы падает. Поскольку обычно передача размера единицы сопряжена с регистрацией малых сигналов, метод передачи должен иметь достаточную помехоустойчивость.

С учётом изложенного, необходимо развитие новых методов передачи размера единицы, свободных от ограничений, характерных для традиционных методов.

Поэтому, в рамках данных представлений очевидна целесообразность экспериментального исследования такого метода передачи размера, в котором эталонный измеритель напряжённости электростатического поля комбинируется с компактным высокостабильным ослабителем поля, агрегируемым с измерителем для реализации функции высокоточного ослабления поля. Конструктивно ослабитель поля может включать в себя совокупность электродов, расположенных внутри полеобразующей системы в области пространства вблизи первичного измерительного преобразователя измерителя НЭП. Детальное обсуждение конструктивного исполнения ослабителя поля выходит за рамки данной работы, можно лишь отметить, что соответствие симметрии электрического поля, как материального объекта, и требования помехоустойчивости достигаются при дипольном характере взаимодействия с полеобразующей системой. Ожидаемым достоинством метода дипольного ослабления является независимость функции ослабления поля от таких частных параметров, как ёмкость конденсаторов и соединительных проводов, точность пространственного позиционирования измерителя поля и т.п. В частности, измеритель НЭП при реализации этого метода всегда располагается в точке максимума напряжённости поля,

вследствие чего результаты измерений в первом приближении не зависят от погрешности позиционирования.

Также есть основания полагать, что конструктивная сложность дипольного ослабителя поля компенсируется простотой операций по передаче размера единицы напряжённости электростатического поля, достигаемой всего двумя измерениями на передаваемое значение (без учёта усреднения).

### Экспериментальное исследование метода дипольного ослабления НЭП

Поскольку данные о погрешности ослабления поля сборкой «измеритель + дипольный ослабитель поля» отсутствуют, экспериментально исследовалась зависимость относительной погрешности  $\delta$  коэффициента ослабления электростатического поля от напряжённости поля  $E$ . В качестве измерителя НЭП использовался эталонный измеритель электрического поля ЭИЭП-0/50. В качестве полеобразующей системы был применён эталонный конденсатор КПЭ 025/025. Источником симметричного высокого напряжения служил прямопоказывающий прецизионный высоковольтный блок питания БПВ-030. Значение коэффициента ослабления электростатического поля составляло 48,85 отн. ед.

На рис. 6 приведена экспериментально определённая зависимость величины  $\delta$  от напряжённости электростатического поля  $E$ .

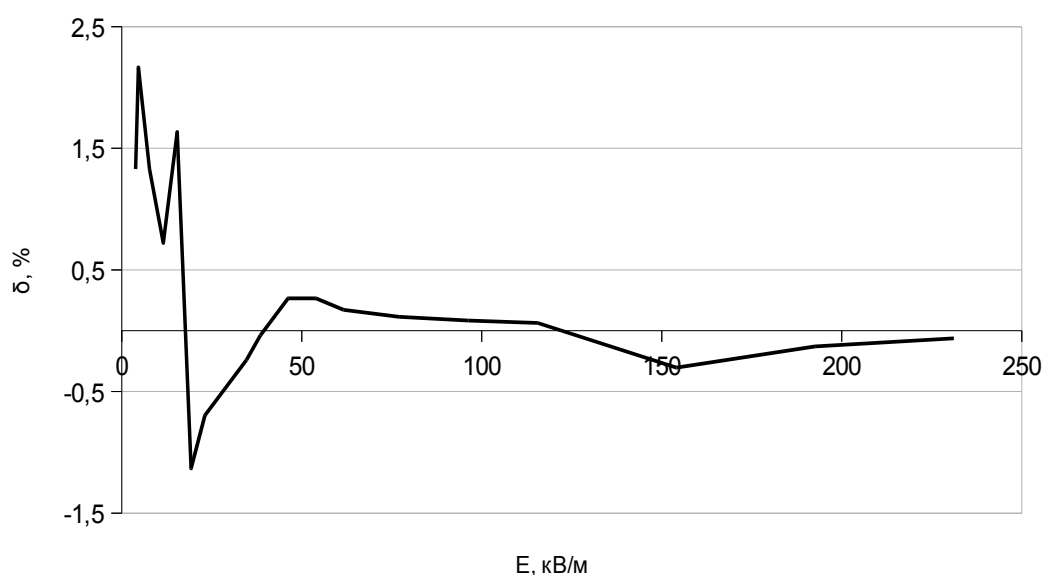


Рис. 6. Зависимость величины  $\delta$  от напряжённости электростатического поля  $E$

Полученные экспериментальные данные, представленные на рис. 6, позволяют сделать ряд выводов о потенциальных возможностях метода дипольного ослабления НЭП.

Во-первых, как следует из полученных экспериментальных результатов, в области напряжённостей поля, превышающих 30 кВ/м, относительная погрешность коэффициента ослабления электростатического поля  $\delta$  сборкой «измеритель + дипольный ослабитель поля» не превышает 0,3 %. Из этого следует, что предложенный метод обладает достаточной помехоустойчивостью в требуемом диапазоне, поскольку регистрация ослабленного поля весьма чувствительна к действию помех.

Во-вторых, для экспериментальной зависимости  $\delta$  от  $E$  характерно прогрессирующее уменьшение отклонений от нуля с ростом напряжённости электростатического поля. Из этого следует, что для предложенного метода характерно снижение погрешности передачи размера единицы по мере роста верхней границы диапазона воспроизводимых величин напряжённости поля, что хорошо согласуется с необходимостью передачи размера единицы НЭП в область 500–1000 кВ/м.

В-третьих, величина  $\delta$  при росте  $E$  асимптотически стремится к нулю. Из этого следует важное свойство метода: коэффициент ослабления не зависит от величины электростатического поля. Следовательно, формула измерения в этом случае имеет простой и очевидный вид:

$$E_{\text{И}} = K_{\text{О}} K_{\text{К}} \Pi_{\text{И}}$$

где  $E_{\text{И}}$  — измеряемое поле;

$K_{\text{О}}$  — коэффициент ослабления дипольного ослабителя;

$K_{\text{К}}$  — коэффициент калибровки измерителя;

$\Pi_{\text{И}}$  — показания измерителя.

В-четвёртых, при напряжённостях поля, превышающих 30 кВ/м, относительная погрешность коэффициента ослабления электростатического поля сборкой «измеритель + дипольный ослабитель поля» на порядок меньше предела допустимой погрешности для СИ 1-го разряда, что с большим превышением обеспечивает необходимый метрологический запас.

В-пятых, мультипликативный характер величины  $K_{\text{О}}$  обеспечивает возможность применения предложенного метода для целей компарирования.

В-шестых, результаты экспериментального исследования позволяют заключить, что данный метод обладает хорошей помехоустойчивостью.

### Заключение

Таким образом, из выполненного анализа возможных вариантов построения эталонного генератора поля следует однозначный вывод, что, в соответствии с принятыми критериями А–С, альтернативный вариант по всем позициям принятых критериев сравнения предпочтительнее исходного варианта.

В отличие от исходного варианта альтернативный вариант обеспечивает:

А. в метрологическом отношении:

- выполнение всех требований в части обеспечения заданных динамического и частотного диапазонов максимально простыми в функциональном отношении средствами измерений;

В. в схемотехническом отношении:

- необходимый запас по нагрузочной способности, гарантирующий выполнение требований, налагаемых располагаемой ёмкостью нагрузки;
- простоту, доступность и надёжность применяемых технических средств;
- надёжность и ремонтпригодность;
- снижение вероятности возникновения нелинейных искажений;

С. в стоимостном отношении:

- снижение в 3,4 раза стоимости приобретения аппаратуры, необходимой для реализации эталонного генератора поля в соответствии с наложенными требованиями;
- повышение эффективности затрат за счёт исключения неиспользуемых функций приобретаемой аппаратуры.

Следовательно, на основе данных об обеспечении единства измерений НЭП в РФ и за рубежом, в соответствии с принятыми критериями необходимо сделать вывод, что на современном этапе развития данного вида измерений принципы построения генераторов НЭП высшей точности нуждаются в коренном пересмотре. Основным и наиболее эффективным направлением совершенствования ГЭТ 158-96 в современных условиях является применение специализированных сборок «усилитель — устройство согласования — эталонный вольтметр».

Также представленные выше экспериментальные результаты в совокупности дают основания заключить о возможности применения метода дипольного ослабления для передачи размера единицы напряжённости электростатического поля в области больших полей, а также о целесообразности его дальнейшего исследования.

Кроме того, следует отметить простоту реализации данного метода, его помехоустойчивость, а также его ценную принципиальную особенность — снижение погрешности передачи размера единицы по мере перехода к полям с большими значениями НЭП.

Также следует отметить применимость исследованного метода для целей компарирования.

#### Литература

1. СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах».

2. Федеральный закон РФ № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».
3. Приказ Минтруда № 33н от 24.01.2014 г.
4. ГОСТ Р 8.564-96 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений напряжённости электрического поля в диапазоне частот 0–20 кГц.
5. ГОСТ 12.1.045-84 Электростатические поля.
6. ГОСТ 12.1.002-84 Электрические поля промышленной частоты.
7. Измеритель параметров электростатического поля ИПЭП-1. Описание типа.
8. Electrostatic Field Meter EFM 51. Technical Information. Part № 7100. EFM 51.
9. ГОСТ Р 51070-97 Измерители напряжённости электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний.
10. База данных KCDB. URL: <https://kcdb.bipm.org/>.
11. Документ Консультативного комитета CCEM МБМВ «CCEM strategic plan V5/3 26/03/2014».
12. Fluke 5730A Multifunction Calibrator. Руководство по эксплуатации
13. Trek Model 609E-6 Specifications.
14. User manual HV-Series PA 3100 HV.