

## **Комплекс рабочих эталонов для измерений параметров высокого напряжения переменного и постоянного тока.**

Гиниятуллин Ильдар Ахатович, директор

Блощицын Владимир Владимирович, инженер по испытаниям

ООО «Научно – производственное предприятие Марс-Энерго»

199034, Санкт-Петербург, 13-я линия В.О, д.6-8 лит.А, п. 41Н

Тел./факс: (812) 327-21-11

E-mail: [mail@mars-energo.ru](mailto:mail@mars-energo.ru) [www.mars-energo.ru](http://www.mars-energo.ru)

### **Введение.**

В мировой электроэнергетике сейчас преобладают две тенденции: рост энергопотребления развивающимися экономиками (Китай, Бразилия и др.) и построение энергоэффективных экономик (страны западной Европы) ([1],[2]). При этом важность точного измерения электрической энергии возрастает и в одном и в другом случае. Сейчас для коммерческого учета электроэнергии используются трансформаторы напряжения (ТН) классами точностей от 0,5 до 0,2 [3]. Замена измерительных трансформаторов напряжения (ТН) класса точности 0,5 на класс 0,2 позволяет значительно снизить коммерческие потери.

Помимо измерений на переменном напряжении, существует необходимость точных измерений на постоянном напряжении. В связи с развитием полупроводниковой техники, вопросы конвертации переменного и постоянного тока обретают целесообразность: передача мощности на постоянном токе более экономична, и с помощью линий на постоянном токе можно передавать большие мощности [5]. Объёмы передачи энергии на высоком постоянном напряжении будут расти, а эталонная база обязана соответствовать этой тенденции.

Построение современных интеллектуальных электрических сетей (Smart Grid), в частности технология WAMS (Wide Area Measurement Systems) и PMUs (Phasor Measurement Units) также накладывает дополнительные требования на точность измерений комплексных векторов напряжения и тока (фазоров в англоязычной литературе) [6].

Кроме того, безусловную ценность точные измерения высокого напряжения представляют для науки. История науки знает много примеров, когда открытия делались благодаря возможности точного измерения (стр. 114 [7]).

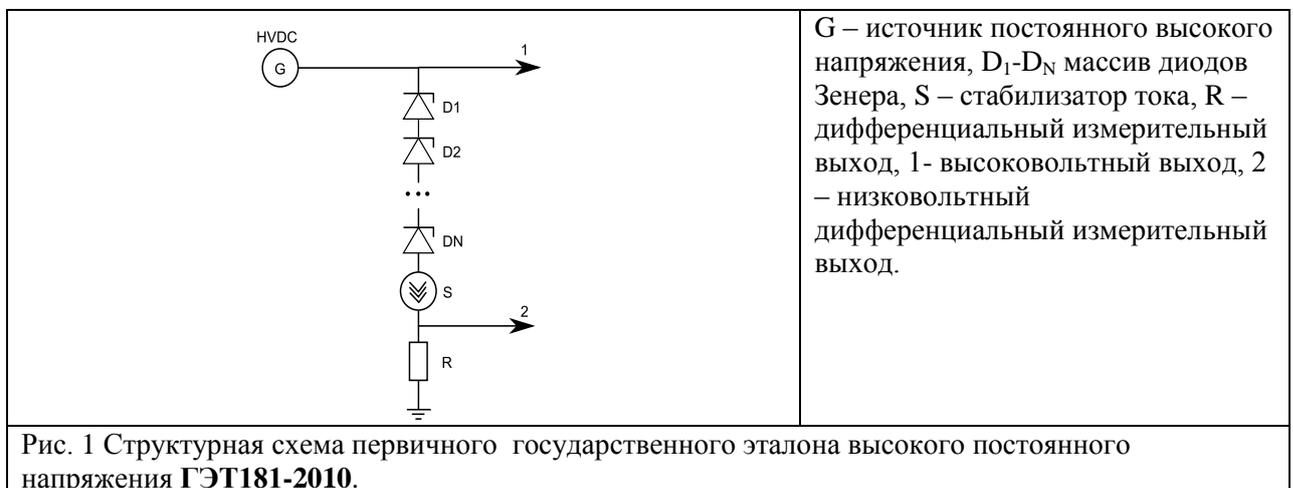
### **Низковольтные эталоны и их связь с высоковольтными.**

Современное развитие метрологии позволяет вводить первичные эталоны, основанные на фундаментальных физических константах (скорость света  $c$ , диэлектрическая проницаемость вакуума  $\epsilon_0$ , постоянная планка  $h$ , гравитационная постоянная  $G$ ). В большинстве национальных институтов метрологии (NIST, PTB, BIPM, METAS, и т.д.) существуют подразделения по квантовой метрологии электрических величин (Quantum Electrical Metrology). Электрическим величинам в этом смысле повезло, т.к. два эффекта - эффект Джозефсона и квантовый эффект Холла, позволяют конструировать квантовые эталоны вольта и ома, соответственно. За этими эталонами стоят константы, вычисляемые с помощью фундаментальных величин - константа

Джозефсона  $K_j = \frac{2e}{h}$  и константа фон Клитцинга  $R_K = \frac{h}{e^2}$  [8]. Однако, если говорить, про эталон вольты, то современные квантовые эталоны, позволяют задавать с большой точностью напряжения до 10 В (при этом это называется High-Voltage Applications) ([9], [10]). Использование самокалибрующихся мостов, позволяет поверять вольтметры вплоть до 1 кВ от первичных стандартов [11], однако поверять оборудование непосредственно от первичных стандартов на большем напряжении затруднительно. Очевидно, что создание по настоящему высоковольтных, по настоящему первичных (восходящих к фундаментальным константам) эталонов высокого напряжения на сегодняшний день затруднено. Поэтому есть некоторый разрыв между низковольтными «фундаментальными» первичными эталонами и высоковольтными первичными эталонами.

В настоящее время в перечне государственных эталонов России, содержатся два высоковольтных эталона **ГЭТ181-2010** (*Государственный первичный специальный эталон единицы электрического напряжения постоянного тока-вольта в диапазоне  $\pm(1...500)$  кВ*) и **ГЭТ175-2009** (*Государственный первичный специальный эталон единиц коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига на высоком электрическом напряжении переменного тока промышленной частоты в диапазоне от 1 кВ до 500 кВ*).

Государственный первичный эталон **ГЭТ181-2010** включает в себя источник напряжения постоянного тока, высоковольтный дифференциальный блок, низковольтный измерительно-стабилизирующий блок, персональный компьютер, ПО. Ключевые компоненты данного первичного эталона – это высоковольтный дифференциальный блок и низковольтный измерительно-стабилизирующий блок (рис.1). В их разработке и изготовлении принимало участие «НПП Марс-Энерго». Суть дифференциального модуля – массив диодов Зенера. Диоды Зенера часто используются как вторичные эталоны напряжения (стр. 289 [12]).



Стабилизатор тока в данной схеме необходим из-за наличия зависимости стабилизируемого напряжения от тока, протекающего через диод. Данная схема обладает масштабируемостью (количество диодов, определяет опорное напряжение). Благодаря тому, что есть нормальный разброс вокруг номинального значения стабилизируемого напряжения каждого из диодов, массивы диодов обеспечивают более высокую точность опорного напряжения.

Первичный государственный эталон единиц коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига **ГЭТ175-2009** включает в себя эталонный измерительный трансформатор напряжения 4820-NV-spez фирмы Naefely, эталонный трансформатор NVRD-40 фирмы Epro,

возимые меры емкости КГИ-30-1-50, КГИ-230-1-50, измеритель Power Sentinel 1133A фирмы ARBITER SYSTEMS и мост эталонный МВЭ-01.

## Рабочие эталоны, производимые «НПП Марс-Энерго».

Измерения высокого напряжения, как правило, осуществляются либо с помощью эталонных трансформаторов (как, например, в государственном эталоне ГЭТ175-2009), либо с помощью разнообразных высоковольтных делителей. Делители по сравнению с эталонными трансформаторами обладают рядом преимуществ, они легче (и поэтому успешно используются в составе передвижных высоковольтных лабораторий), а кроме того, специальные типы делителей резистивные и резистивно-емкостные могут использоваться для измерения постоянного и импульсного высокого напряжения. Компания «НПП Марс-Энерго» выпускает для высоковольтных измерений напряжения резистивно-емкостные делители ДНИ.

В том случае, когда измеряемый сигнал имеет сложную форму, т.е. состоит из быстрых и медленных изменений напряжения (имеет широкий спектр), то коэффициент деления изменяется от  $k_C = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$  (коэффициент деления емкостного делителя) для быстрого изменения сигнала, до  $k_R = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$  для медленного ([13], [14]). Любой делитель, можно представить, как резистивно-емкостной, т.к. всегда есть паразитные токи утечки (разрядки конденсаторов), а также паразитные емкости. Только в случае специфических емкостных или резистивных делителей, соответствующие паразитные сопротивления/емкости неизвестны. Таким образом, чисто емкостной, делитель, имеет непредсказуемый коэффициент деления на низких частотах, а резистивный на высоких. По сравнению с резистивными и емкостными делителями, преимуществом обладает резистивно-емкостной делитель.

Резистивно-емкостной делитель ДНИ 100÷300 (Рис. 2) позволяет производить измерения на постоянном и переменном токе. Он имеет модульную структуру и может работать в составе одной – трех ступеней, каждая из которых рассчитана на 100 кВ.

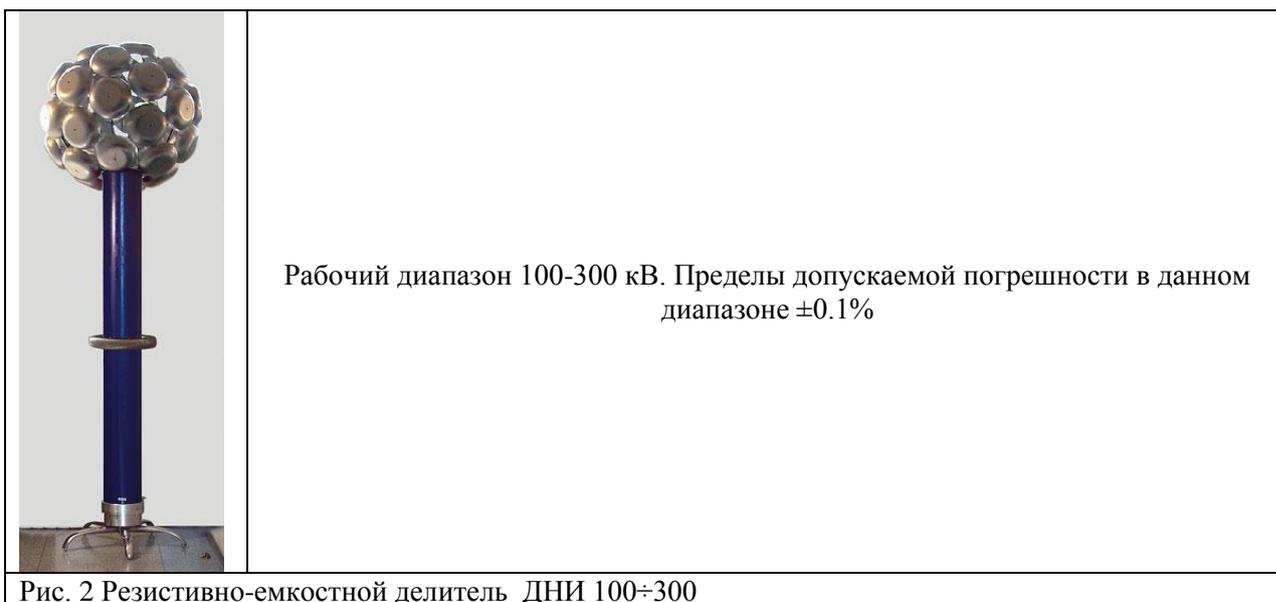
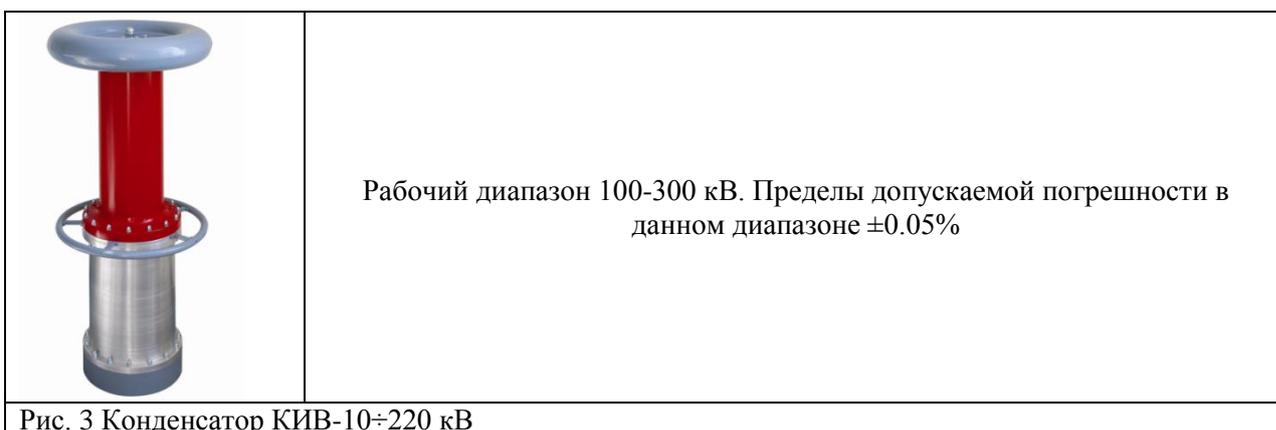
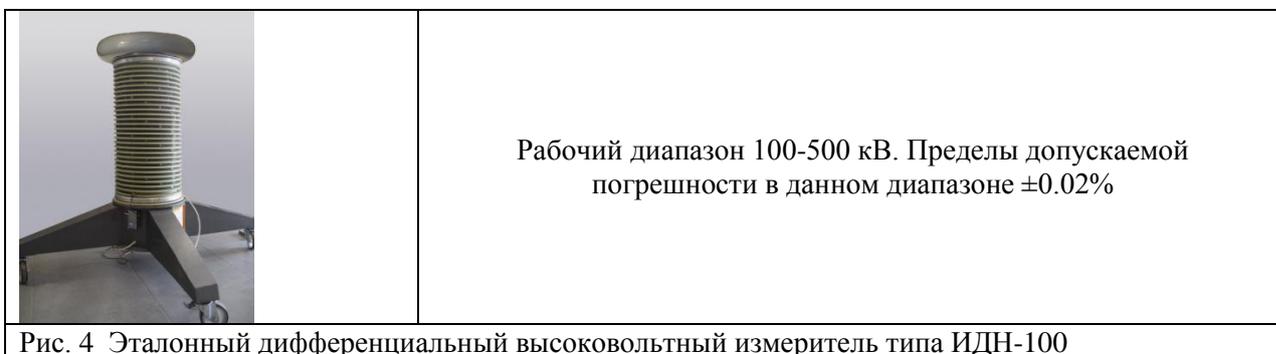


Рис. 2 Резистивно-емкостной делитель ДНИ 100÷300

Традиционный продукт, широко используемый в стране - это комплексы для поверки трансформаторов напряжения. Они включают в себя высоковольтный эталонный преобразователь ПВЕ, магазины нагрузок и многофункциональный измерительный прибор Энергомонитор 3.3Т1. Этот комплекс надежно воспроизводит первичный государственный эталон коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига. Класс точности данной измерительной системы 0.07. Преобразователь ПВЕ состоит из меры ёмкости – конденсатора КИВ (Рис. 3) и преобразователя-усилителя, и имеет пределы допускаемой погрешности  $\pm 0.05\%$  в рабочем диапазоне напряжений. Ряд номинальных напряжений для серии конденсаторов КИВ – от 3 до 230 кВ.



Для точного измерения высокого постоянного напряжения используются также дифференциальные схемы (как в государственном эталоне ГЭТ181-2010). Рабочий эталон постоянного напряжения ИДН-100÷500 (Рис. 4) во многом похож на первичный эталон постоянного высокого напряжения ГЭТ181-2010, однако, в отличие от него, в нем используются вместо диодов Зенера прецизионные источники опорного напряжения (ИОН), что предъявляет меньшие требования к качеству стабилизации тока в цепи опорного напряжения. Прибор ИДН имеет модульную структуру. Каждый из модулей рассчитан на 100 кВ. Количество секций от 1 до 5 обеспечивает воспроизведение напряжения от 100 кВ до 500 кВ. В качестве источника питающего дифференциальную высоковольтную схему проектируется малогабаритный источник постоянного напряжения, который обеспечивает малые пульсации напряжения, благодаря применению трехфазной мостовой схемы и фильтра низкой частоты.



Для выполнения измерений со всеми выше перечисленными высоковольтными приборами используется вольтметр амплитудный постоянного и переменного тока ВА-3.1 (Рис. 5). Вольтметр может функционировать в одном из пяти режимов: пиковый детектор, средняя амплитуда,

амплитудный детектор, дифференциальная средняя амплитуда, дифференциальный амплитудный детектор и обеспечивает индикацию на графическом дисплее результатов измерения. Измеренные значение напряжения отображаются на дисплее в соответствующих единицах В, кВ или МВ автоматически. В случае пробоя измеренные значения отображаются и регистрируются. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения пикового и амплитудного значения напряжения  $\pm(0.05 + 0.02 \cdot |U_{п}/U - 1|)\%$ .



Для решения проблем с поверкой по ГОСТ 8.216-88 измерительных трансформаторов напряжения ёмкостного типа «НПП Марс-Энерго» разрабатывается специальный регулируемый источник высокого напряжения 110-330 кВ. Проблема эта обусловлена тем, что к регулируемому источнику высокого напряжения предъявляются довольно жесткие требования. Источник должен обеспечивать значительный ток в нагрузке (порядка 0,5А) и регулировку напряжения на нагрузке 80, 100 и 120 % от номинального значения, и, кроме того, он должен обеспечивать возможность регулирования частоты напряжения в нагрузке в пределах от 49 до 51 Гц с отклонением частоты от любых установленных значений в указанном диапазоне не более  $\pm 0,1$  Гц. Поверка должна производиться на местах эксплуатации, что предъявляет дополнительное требование по мобильности элементов этого источника.

Наиболее пригодным и перспективным представляется построение регулируемого источника высокого напряжения по следующей топологической схеме (Рис.6).

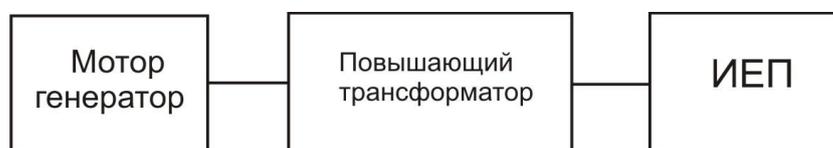


Рис.6.

Рассмотрим функциональное назначение каждого из элементов топологической схемы регулируемого источника высокого напряжения.

Мотор-генератор с системой управления предназначен для формирования переменного напряжения от 0 до 220 В с регулируемой частотой в пределах от 49 до 51 Гц. Выбор мотор-генератора обусловлен тем, что он компактен, не критичен в эксплуатации, выдаёт чистую форму сигнала и четко обеспечивает заданный амплитудно-

частотный диапазон работы. Следующим элементом схемы является повышающий трансформатор. Он предназначен для простого повышения напряжения с 220 В до 10-12 кВ. Основным элементом регулируемого источника высокого напряжения является индуктивно-емкостной преобразователь (ИЕП). Данный преобразователь содержит линейные реактивные элементы L и C и основан на явлениях резонанса в электрических цепях). Регулируя напряжение на выходе мотор-генератора, можно будет установить необходимое напряжение на измерительном трансформаторе. Для обеспечения стабильной и точной работы регулируемого источника высокого напряжения, вся установка обязана обратными связями по напряжению и частоте.

## **Выводы.**

Точные измерения на высоком постоянном и переменном напряжении необходимы для снижения коммерческих потерь. Кроме того, построение электрических интеллектуальных сетей будущего (Smart Grid) будет требовать высокой точности измерения напряжения, в частности для надежной работы системы мониторинга векторов напряжения (WAMS). Также, безусловную ценность представляет возможность точного измерения напряжения для развития метрологии и науки в целом.

Рабочие эталоны высокого напряжения должны надежно воспроизводить первичные эталоны. «НПП Марс-Энерго» представляет полный спектр рабочих эталонов для измерений высокого напряжения, которые могут использоваться для межлабораторных сличений, в стационарных и в передвижных высоковольтных лабораториях.

## Литература.

1. International Energy Statistics. Total Electricity Net Generation. // U. S. Energy Information Administration  
<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12>
2. Yearbook Statistical Energy Review 2010. Total energy consumption // Enerdata  
<http://yearbook.enerdata.net/>
3. ГОСТ 1983-2001 // Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. — 2003 г..
4. ГОСТ 8.216-88 // Государственная система обеспечения единства измерений. Трансформаторы напряжения. Методика поверки. — 1989 г..
5. Лозина Н. и Мазуров М. ПЕРЕДАЧА ПОСТОЯННОГО ТОКА. Перспективы применения. // Новости электротехники. — 2007 г.. — 46 : Т. 4.
6. Synchrophasor Measurement Accuracy Characterization / Team, North American Synchrophasor Initiative Performance & Standards Task. — 2007.
7. Squires G. L. Practical physics. — [б.м.] : Cambridge University Press, 2001. — 212 стр. — 0521779405, 9780521779401.
8. Каршенбойм С. Г. Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН. — 2005 г.. — 175. — 271–298 стр..
9. Benz Samuel P. [и др.] An AC Josephson Voltage Standard for AC–DC Transfer-Standard Measurements // IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT. — Апрель 2007 г.. — 2 : Т. 56.
10. Dresselhaus P. D. [и др.] Design of SNS Josephson Arrays for High Voltage Applications // IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY. — Июнь 2007 г.. — 2 : Т. 17.
11. Ryan Hugh M. High voltage engineering and testing. — [б.м.] : IET, 2001. — 726 стр. — 0852967756, 9780852967751.
12. Gläser M. и Kochsiek M. Handbook of Metrology. Encyclopedia of Applied Physics. — [б.м.] : Wiley-VCH, 2010. — Т. 1.
13. Базелян Э. М. Райзер Ю.П. Искровой разряд. — [б.м.] : МФТИ, 1997. — 5-89155-013-Х.
14. Meyers Robert Encyclopedia of Physical Science and Technology, Measurements, Techniques, and Instrumentation. — 1992.
15. IEC 60044-2 // Instrument transformers – Part 2: Inductive voltage transformers.
16. Базелян Э. М. Райзер Ю.П. Искровой разряд. — М. : МФТИ, 1997. — 5-89155-013-Х.
17. Meyers R. Encyclopedia of Physical Science and Technology, Measurements, Techniques, and Instrumentation / ред. Meyers Robert. — 1992.