

МАСШТАБНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. С. Ильин¹, И. А. Карчев², А. А. Большакова³, В. П. Перевертов⁴

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1,2,3} Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
⁴ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия
¹ aalexii@mail.ru, ^{2,3} npk4p@niiemp.ru, ⁴ vperevertov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность применения информационно-измерительных систем измерений высоких напряжений определяется постоянной модернизацией и совершенствованием как энергетического оборудования, так и различных областей науки и техники. Повсеместное применение высоковольтных информационно-измерительных систем вызывает необходимость уделить особое внимание масштабным преобразователям высокого напряжения в их составе. Целью работы является ознакомление с современными отечественными делителями напряжений высоковольтными фирмы АО «НИИЭМП», а также описание областей их применения. *Материалы и методы.* Метод масштабного преобразования. Измерение напряжения делителем напряжения. *Результаты.* Приведен обзор делителей напряжения высоковольтных, представлены результаты их работы и сферы применения. *Выводы.* Применение отечественных делителей напряжений в информационно-измерительных системах с рабочими напряжениями до 100 кВ и более позволит увеличить в современное время темпы развития энергетики, науки и техники.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, модернизация, масштабные преобразователи, высокое напряжение, делитель напряжения, импульсный сигнал, измерение

Для цитирования: Ильин А. С., Карчев И. А., Большакова А. А., Перевертов В. П. Масштабные преобразователи высокого напряжения для информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 13–19. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-2

SCALED HIGH VOLTAGE CONVERTERS FOR INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

A.S. Il'in¹, I.A. Karchev², A.A. Bol'shakova³, V.P. Perevertov⁴

¹ Penza State University, Penza, Russia
^{1,2,3} Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia
⁴ Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia
¹ aalexii@mail.ru, ^{2,3} npk4p@niiemp.ru, ⁴ vperevertov@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the use of information-measuring systems for measuring high voltages is determined by the constant modernization and improvement of both power equipment and various fields of science and technology. The widespread use of high-voltage information-measuring systems makes it necessary to pay special attention to scaled high-voltage converters in their composition. The purpose of the work is to familiarize with modern domestic high-voltage voltage dividers of the company JSC "NIIEMP", as well as a description of the scope of their application. *Materials and methods.* Scaled transformation method. Voltage measurement with a voltage divider. *Results.* An overview of voltage dividers of high-voltage is given, the results of their operation and scope of application are presented. *Conclusions.* The use of domestic voltage dividers in information-measuring systems with operating voltages up to 100 kV and more will increase the pace of development of science and technology in modern times.

Keywords: information-measuring system, modernization, large-scale converters, high voltage, voltage divider, pulse signal, measurement

For citation: Ilin A.S., Karchev I.A., Bolshakova A.A., Perevertov V.P. Scaled high voltage converters for information-measuring systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):13–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-2

В соответствии с программой о развитии электроэнергетики до 2035 г., предусматривающей модернизацию действующих и ввод в эксплуатацию новых объектов электроэнергетики, оснащенных информационно-измерительными системами (ИИС) измерений высоких напряжений, возникает необходимость в усовершенствовании и обновлении масштабных преобразователей высоких напряжений для контроля, обслуживания и наладки энергетического оборудования. Создание и широкое применение в последние годы новых высоковольтных ИИС, в том числе ИИС проверки киловольтметров, вызвало настоятельную необходимость в совершенствовании и обновлении их высоковольтной части, в большинстве случаев, представляющих собой делитель напряжения.

АО «НИИЭМП» разрабатывает и производит делители напряжений высоковольтные (ДНВ), предназначенные для преобразования высоких напряжений до уровня, безопасного для последующей передачи, обработки и хранения измерительного сигнала. ДНВ могут использоваться для контроля режимов работы цепей постоянного (до 140 кВ), переменного (до 140 кВ) и импульсного (до 200 кВ) токов электротехнических и радиотехнических ИИС [1].

Принцип работы делителя основан на свойствах пассивных линейных электрических цепей, изменяя амплитуду напряжения в любой точке электрической цепи пропорционально амплитуде входного сигнала.

Согласно теории делителей напряжения, в омических делителях вследствие малых зарядных токов, протекающих по частичным емкостям по отношению к земле в нижней части делителя, распределение напряжения получается нелинейным и частотно-зависимым. Неравномерность распределения напряжения устраняется увеличением параллельных емкостей. Это осуществляется подключением конденсаторов параллельно омическим элементам делителя [2].

ДНВ имеет возможность масштабировать напряжения в широкой полосе частот. Это достигается одновременным подключением демпферных резисторов параллельно и последовательно с конденсаторами. Вместе с резисторами R_1 и R_2 конденсаторы C_1 и C_2 образуют последовательный емкостно-омический делитель (рис. 1). Параллельно этому делителю включены резисторы R_3 и R_4 , обеспечивающие компенсацию стекающего заряда с емкости C_2 через входное сопротивление осциллографа при регистрации длительных или постоянных напряжений [2].

Схема замещения емкостно-омического делителя напряжения представлена на рис. 1.

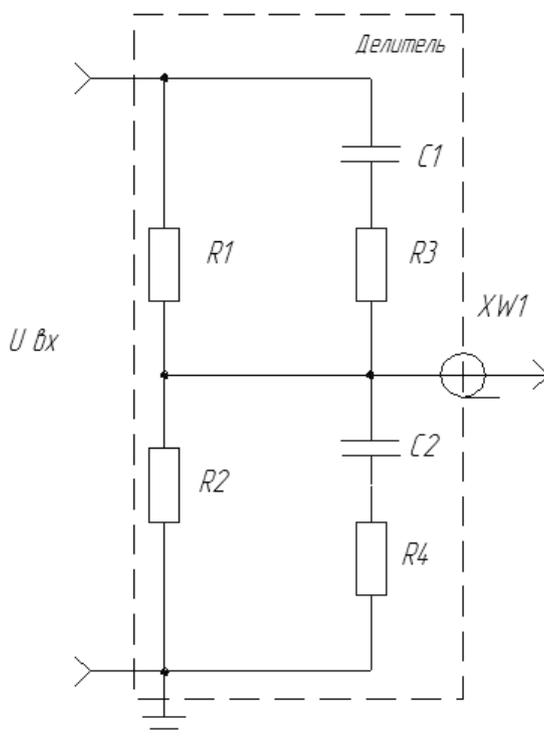


Рис. 1. Схема замещения емкостно-омического делителя напряжения типа ДНВ:

$U_{вх}$ – входное напряжение ДНВ; $U_{вых}$ – выходное напряжение ДНВ; R_1 – сопротивление верхнего плеча; C_1 – емкость верхнего плеча; R_2 – сопротивление нижнего плеча; C_2 – емкость нижнего плеча; R_3 – демпферное сопротивление верхнего плеча; R_4 – демпферное сопротивление нижнего плеча

Делитель дает возможность учитывать паразитные сопротивления и емкости утечки в широком диапазоне частот. Условие частотной компенсации по КД содержит формула

$$C_1 R_1 = C_2 R_2, \quad (1)$$

где R_1 – сопротивление верхнего плеча; C_1 – емкость верхнего плеча; R_2 – сопротивление нижнего плеча; C_2 – емкость нижнего плеча.

Такой делитель при подборе определенных параметров передает с малой погрешностью переменное, постоянное и импульсное напряжения.

Значение входного напряжения ДНВ определяется по формуле

$$U_{\text{вх}} = K_{\text{д}} \cdot U_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{д}}$ – коэффициент деления ДНВ вместе с кабелем; $U_{\text{вых}}$ – напряжение, измеренное на выходе соединительного кабеля.

Конструктивно ДНВ выполнен из высоковольтного электрода, основания и тонкостенного диэлектрического цилиндра.

Верхнее плечо, к которому прикладывается высокое напряжение, расположено внутри диэлектрического цилиндра. Нижнее плечо, на котором напряжение уменьшено по отношению к входному, расположено внутри основания.

На внешней поверхности основания делителя установлено приборное гнездо для подключения соединительного кабеля. Также на основании имеется зажим защитного заземления [3].

На рис. 2 представлен внешний вид делителей типа ДНВ производства АО «НИИЭМП».



Рис. 2. Внешний вид делителей напряжения типа ДНВ производства АО «НИИЭМП»

Делители обеспечивают защиту от поражения электрическим током по классу I по ГОСТ 12.2.007.0-75¹. Степень защиты оболочки делителя по ГОСТ 14254-96 IP40DH. Категория монтажа I, степень загрязнения 1².

¹ ГОСТ 12.2.007.0-75. Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности.

² ГОСТ 14254-96. IP40DH Степени защиты, обеспечиваемые оболочками.

Делители ДНВ имеют два варианта исполнения: ДНВ А – диапазон рабочих частот (0 – 1000 Гц) и ДНВ И – диапазон (50 до $20 \cdot 10^6$ Гц).

Для работы ДНВ А используется кабель соединительный, который состоит из высокочастотного кабеля типа RG-58, на концах которого установлены штекеры для подключения к ДНВ и СИ (рис. 3,а). Для работы с ДНВ И применяется кабель соединительный, состоящий из высокочастотного кабеля типа RG-214/U и фильтра низких частот (рис. 3,б). Для соединения с делителем на одном из концов высокочастотного кабеля расположен штекер. Фильтр, содержащий R, L, C компоненты, размещен в металлическом корпусе, на одной из сторон которого расположен приборный штекер для подключения к СИ или осциллографу [3].



Рис. 3. Внешний вид соединительного кабеля:

- а – кабель соединительный для ДНВ А: 1 – кабель коаксиальный; 2 – штекер для подключения к ДНВ и СИ;
- б – кабель соединительный для ДНВ И: 1 – кабель коаксиальный; 2 – фильтр низких частот;
- 3 – штекер для подключения к ДНВ; 4 – приборный штекер для подключения к СИ

Зависимость нормированного входного напряжения делителей от частоты приведена на рис. 4.

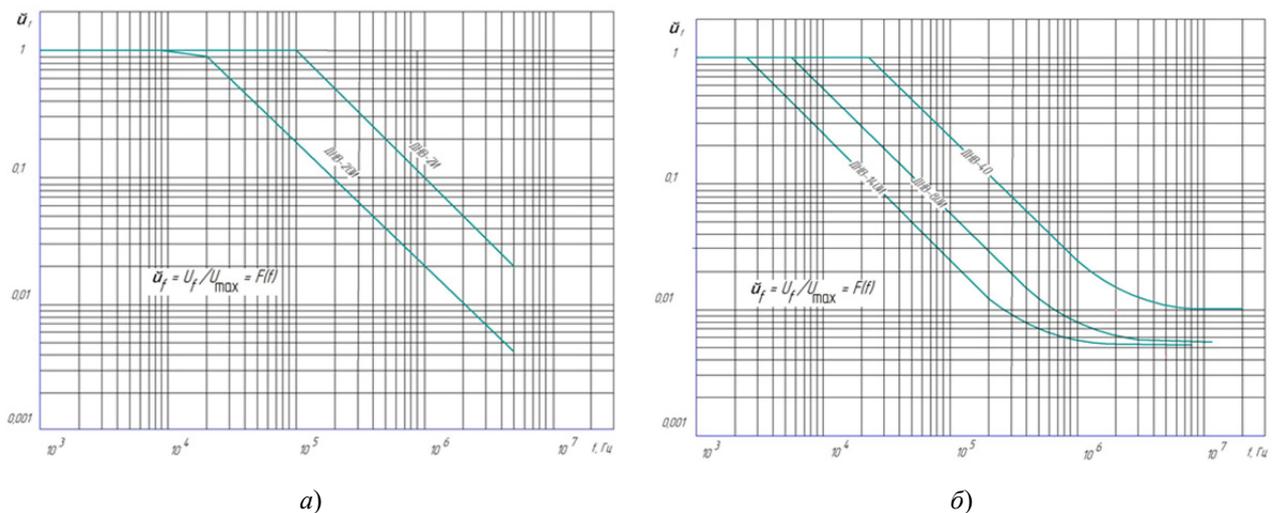


Рис. 4. Зависимость нормированного входного напряжения \bar{u}_f от частоты f :

- а – делителей типа ДНВ-2И и ДНВ-20И;
- б – делителей типа ДНВИ-40, ДНВ-80И и ДНВ-140И

Сравнение форм осциллограмм импульсных сигналов на выходе ДНВ и зарубежных аналогов подробно представлено в статье «Высоковольтные широкополосные делители напряжений», опубликованной в материалах IV общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ 2012)» [4].

В табл. 1 приведены основные метрологические характеристики делителей напряжений типа ДНВ.

Метрологические характеристики

Метрологические характеристики	Тип делителя					
	ДНВ-2И	ДНВ-20И	ДНВИ-40	ДНВ-80А	ДНВ-80И	ДНВ-140И
Диапазон входных напряжений постоянного тока, кВ	0,002–2,4	1–18	1–40	1–80	1–80	14–140
Диапазон входных напряжений переменного тока частотой 50 Гц, кВ	0,014–1,7	1–12	1–30	1–60	1–60	10–100
Основная относительная погрешность преобразования U DC, %	±0,1	±0,1	±0,5	±0,5	±0,5	±1
Основная относительная погрешность преобразования U AC частотой 50 Гц, %	±0,5	±0,5	±1	±1	±1	±1
Коэффициент деления	200	1500	2500	5000	5000	5000
Диапазон рабочих частот, Гц	0–5·10 ⁶	0–5·10 ⁶	0–20·10 ⁶	0–10 ³	0–12·10 ⁶	50–8·10 ⁶
Время нарастания переходной характеристики, нс, не более	70	70	17	–	30	50
Амплитуда импульса, кВ, не более	14	60	100	–	160	230

Делители напряжения типа ДНВ находят применение в ИИС измерений высоких напряжений объектов электроэнергетики, а также в различных областях науки и техники. Потребность оснащения ИИС данными масштабными преобразователями высоких напряжений показывает разнообразие областей применения ДНВ производства АО «НИИЭМП» (рис. 5).



Рис. 5. Применение делителей напряжений типа ДНВ производства АО «НИИЭМП»:
 а – цифровые киловольтметры; б – ИИС поверки киловольтметров; в – высоковольтный широкополосный комплект КМБТ; г – СТАТКОМ-1 подстанции 220 кВ «Могоча» ПАО «ФСК ЕЭС»

Так, делители напряжений типа ДНВ нашли применение в цифровых киловольтметрах СКВ, предназначенных для измерений напряжений постоянного тока, действующих и амплитудных значений напряжений переменного тока. Киловольтметры применяются для поверки измерительных трансформаторов напряжения, контроля и измерения сигналов при производстве и учете электроэнергии [5]. Кроме того, цифровые киловольтметры используются в передвижных электролабораториях [6].

ДНВ является образцовым масштабным преобразователем высокого напряжения постоянного тока в образцовом измерительном канале ИИС поверки киловольтметров УПК-30ПТ. Она предназначена для воспроизведений и измерений напряжений постоянного тока. Используется при проведении испытаний и исследований, при проведении поверки киловольтметров в лабораторных условиях в организациях государственных и ведомственных метрологических служб [7].

ЗАО «ИТЦ Континуум» предлагает высоковольтный широкополосный комплекс КМБТ, низковольтный блок которого сопряжен с делителями напряжения типа ДНВ. Комплекс предназначен для измерения постоянного/переменного/ импульсного напряжения до 100 кВ для лабораторных или промышленных применений. Применим для электроэнергетики, прикладной физики, при тестировании электромедицинского (рентгеновского) и коммуникационного оборудования [8].

В ходе проведения модернизации подстанции 220 кВ «Могоча» ПАО «ФСК ЕЭС» – магистральные электрические сети (МЭС) Сибири, делители напряжений типа ДНВ вошли в состав оборудования СТАТКОМ-1 [9].

Заключение

Делители ДНВ можно рекомендовать для измерения напряжений постоянного (до 140 кВ), переменного (до 100 кВ) и импульсного (до 200 кВ) токов.

Применение данных делителей в информационно-измерительных системах с рабочими напряжениями до 100 кВ и более в широком спектре научно-технических областей позволит увеличить в современное время темпы модернизации и развития энергетики, науки и техники.

Список литературы

1. АО «НИИЭМП». URL: <https://niiemp.ru>
2. Шваб А. Измерения на высоком напряжении. М. : Энергоатомиздат, 1983.
3. Делители напряжения высоковольтные. Технические условия. РУКЮ.411522.020 ТУ. URL: <https://propribory.ru>
4. Воронов А. П., Большакова А. А., Карчев И. А. Высоковольтные широкополосные делители напряжений // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ 2012) : материалы IV Общерос. науч.-техн. конф. (г. Омск, 10–13 октября 2012 г.). Омск : Полиграфический центр КАН, 2012. С. 228–232.
5. Киловольтметры цифровые СКВ. Руководство по эксплуатации. РУКЮ 411116.001 РЭ. URL: <https://www.terra-kip.ru>
6. ПО ЭНЕРГОСПЕЦТЕХНИКА. Передвижные электролаборатории. URL: <https://esteh.nt-rt.ru>
7. Ильин А. С., Кострикина И. А., Воронов А. П., Плаксунов Р. Ф. Установка для поверки киловольтметров УПК-30ПТ // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2020. № 4 (34). С. 44–50. doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5
8. ЗАО «ИТЦ Континуум». URL: <http://www.ec-continuum.ru>
9. В Забайкалье начались испытания рабочим напряжением оборудования СТАТКОМ // Новости – отрасли ТЭК. URL: <http://www.energyland.info/analytic-show-119895>

References

1. AO «NIIEMP». Available at: <https://niiemp.ru>
2. Shvab A. *Izmereniya na vysokom napryazhenii = Measurements at high voltage*. Moscow: Energoatomizdat, 1983. (In Russ.)
3. *Deliteli napryazheniya vysokovol'tnye. Tekhnicheskie usloviya. RUKYu.411522.020 TU = Voltage dividers are high-voltage. Technical conditions. ARM.411522.020 TU*. (In Russ.). Available at: <https://propribory.ru>
4. Voronov A.P., Bol'shakova A.A., Karchev I.A. High-voltage broadband voltage dividers. *Obmen opytom v oblasti sozdaniya sverkhshirokopolosnykh radioelektronnykh sistem (SVCh 2012): materialy IV Obscheros. nauch.-tekhn. konf. (g. Omsk, 10–13 oktyabrya 2012 g.) = Exchange of experience in the field of creation of ul-*

tra-wideband radioelectronic systems (microwave 2012) : materials of the IV All-Russian Scientific and Technical conf. (Omsk, October 10-13, 2012). Omsk: Poligraficheskiy tsentr KAN, 2012:228–232. (In Russ.)

5. *Kilovol'tmetry tsifrovyye SKV. Rukovodstvo po ekspluatatsii. RUKYu 411116.001 RE = Kilovoltmeters digital SLE. Operation manual. ARM 411116.001 RE. (In Russ.). Available at: <https://www.terra-kip.ru>*
6. *PO ENERGO SPETSTEKHNIKA. Peredvizhnye elektrolaboratorii = PA ENERGO SPECTEKHNIKA. Mobile electrical laboratories. (In Russ.). Available at: <https://esteh.nt-rt.ru>*
7. *Pl'in A.S., Kostrikina I.A., Voronov A.P., Plaksunov R.F. Installation for verification of kilovoltmeters UPK-30PT. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control. 2020;(4):44–50. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2020-4-5*
8. *ZAO «ITTs Kontinuum». Available at: <http://www.ec-continuum.ru>*
9. *In Transbaikalia, tests of the operating voltage of the STATCOM equipment began. Novosti – otrasli TEK = News – fuel and energy industries. (In Russ.). Available at: <http://www.energyland.info/analitic-show-119895>*

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Ильин

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
инженер-электроник,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeeil@mail.ru

Иван Анатольевич Карчев

начальник отдела измерительных приборов,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: npk4p@niiemp.ru

Альбина Александровна Большакова

руководитель группы электрических измерений,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: npk4p@niiemp.ru

Валерий Петрович Перевертов

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры наземных
транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В)
E-mail: vpervertov@yandex.ru

Aleksey S. Plin

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
electronics engineer,
Scientific and Research Institute
of Electronic Mechanic Instruments
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Ivan A. Karchev

Head of the measuring instruments department,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Albina A. Bolshakova

Electrical measurement team leader,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Valeriy P. Perevertov

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of ground
transportation and technology tools,
Samara State University of Communications
(2 V Svobody street, Samara, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 02.09.2021

Поступила после рецензирования/Revised 15.10.2021

Принята к публикации/Accepted 09.11.2021