

УДК 621.039.555: 621.376.5: 681.332

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-2-88-95

Разработка высоковольтного стенда для импульсных испытаний энергоемких резисторов

А.В. Щербаков, П.М. Стальков

Для испытания устройств, например энергоемких резисторов, на устойчивость к высоковольтному импульсному воздействию разработан стенд, построенный на основе вакуумного коммутатора или электронно-лучевого вентиля (ЭЛВ), позволяющий формировать тестовые треугольные или прямоугольные импульсы. Амплитуда импульсов — до 30 кВ. Длительность импульсов определяется электрической емкостью конденсаторов и активным сопротивлением в цепи разряда. Электрическая емкость конденсаторных батарей разработанного стенда — 40...640 мкФ, предполагается работа на нагрузку с активным сопротивлением 300...5000 Ом. Фронт импульса определяется индуктивностью и активным сопротивлением разрядной цепи. В разрядную цепь введен ограничительный резистор сопротивлением 5 Ом и реактор индуктивностью 0,1 мГн.

Период повторения ограничен мощностью источника постоянного напряжения питания и предельным значением тока зарядного устройства. Источник постоянного напряжения питания содержит высоковольтный силовой трехфазный трансформатор с естественным воздушным охлаждением и трехфазный выпрямитель, собранный по схеме Ларионова. Все диоды выпрямителя имеют индивидуальную принудительную систему охлаждения. Зарядное устройство активно-резистивное, ограничивающее зарядный ток, выполненное с использованием нескольких высоковольтных резисторов, соединенных последовательно, на максимальное напряжение до 30 кВ мощностью до 2,5 кВт с принудительной системой воздушного охлаждения. Наиболее прогрессивно использование в качестве ограничительного элемента устойчивого к короткому замыканию электронно-лучевого вентиля (ЭЛВ) с пентодной вольт-амперной характеристикой на максимальный постоянный ток до 2А, например ЭЛВ 2/200. Его применение позволяет повысить надежность работы зарядного устройства стенда благодаря способности вентиля к ограничению тока заранее выставленным значением анодного тока вентиля. Максимальное значение тока вентиля определяется напряжением на управляющем электроде. В качестве коммутатора используется высоковольтный вакуумный разрядник с камерой КДВ-10-20/1000 на напряжение замыкания до 35 кВ и пиковый ток до 51 кА.

Для возможности безопасной настройки цифровой измерительной аппаратуры разработана макетная электрическая схема стенда в масштабе по напряжению 1:100.

Проведены экспериментальные исследования энергоемкого резистора сопротивлением около 330 Ом на устойчивость к воздействию импульса напряжением до 20 кВ, разрядом емкости 340 мкФ. Получены положительные результаты.

Для определения предельных значений режимов работы коммутатора, вентиля, сопротивления нагрузки, периода повторения, а также оптимизации номиналов электротехнических элементов схемы проводится компьютерное моделирование электрической схемы стенда в программе EWB.

Ключевые слова: стенд, импульсные испытания, высоковольтный вакуумный коммутатор, электронно-лучевой вентиль, компьютерное моделирование электрических схем.

Development of a High-Voltage Bench for Impulse Tests of High-Energy Resistors

A.V. Shcherbakov, P.M. Stal'kov

For testing various devices, for example, high-energy resistors, to withstand the impact of high-voltage impulses, a bench has been developed, which has at its heart a vacuum switch or an electron-beam switch (EBV) that makes it possible to generate triangular or rectangular test impulses. The impulses have an amplitude of up to 30 kV and duration determined by the electrical capacitance and active resistance in the discharge circuit. The capacitor banks used in the bench have a capacitance ranging from 40 to 640 μF and are supposed to operate on a load with resistance ranging from 300 to 5000 Ω . The impulse front is determined by the discharge circuit inductance and resistance. The discharge circuit also contains a limiting 5 Ω resistor and a 0.1 mH choke.

The impulse repetition frequency is limited by the capacity of the DC power supply voltage source and the charger limiting current. The DC power supply voltage source contains a high-voltage three-phase power transformer with natural air cooling and a three-phase rectifier assembled according to the Larionov circuit arrangement. All rectifier diodes are fitted with an individual forced cooling system. The charging device is of an active-resistive type with charge current limitation and contains a few series-connected high-voltage resistors for a maximum voltage of up to 30 kV and power up to 2.5 kW, and with a forced air cooling system. The use of an EBV with the pentode current-voltage characteristic for the maximum continuous current up to 2A, for example, the ELB 2/200 device, as a current-limiting element resistant to a short-circuit fault seems to be the most promising. Its application makes it possible to achieve more reliable operation of the bench charging device owing to the valve ability to limit the current to the valve's preset anode current value. The maximum value of valve current is determined by the voltage applied to the control electrode. A high-voltage vacuum surge arrester with a KDV-10-20/1000 camera for a switched voltage level of up to 35 kV and peak current of up to 51 kA is used as the switching apparatus.

For the possibility of safely adjusting the digital measurement instruments, the bench mockup electric circuit to a 1:100 voltage scale has been developed.

Experimental investigations of the high-energy resistor with a resistance of about 330Ω for its ability to withstand an impulse voltage of up to 20 kV applied from a charged 340 μF capacitor were carried out, from which positive results have been obtained.

For determining the limit operating modes of the switch, valve, load resistance, repetition frequency, and for optimizing the rated parameters of electrical circuit elements, the bench electric circuit is modeled on a computer using the EWB program.

Key words: bench, impulse tests, high-voltage vacuum switch, electron-beam valve, computer modeling of electric circuits.

Разработка силовых высоковольтных электрических схем стендов для испытания высоковольтных устройств является актуальной задачей и связана с необходимостью больших капитальных вложений. Поэтому для снижения себестоимости разработки необходимо проведение предварительных научно-исследовательских работ, связанных с модельной и макетной оптимизацией высоковольтных комплектующих и режимов работы, особенно работающих в импульсном режиме. Решение этой задачи осуществляется путем:

- создания структурной схемы;
- разработки модельной схемы или ее основных узлов;
- исследования модельной схемы;
- создания макетной схемы;
- исследования макетной схемы или ее основных узлов;
- создания полномасштабной силовой схемы.

Для испытания высоковольтных устройств воздействием аperiodическими импульсами высокого на-

пряжения разработан испытательный стенд с возможностью плавного изменения амплитуды напряжения до 30 кВ. Известны испытательные импульсы, например испытаний изоляции электрооборудования напряжением грозовых и коммутационных импульсов, кратковременным переменным напряжением, постоянным напряжением [1]. Однако возникает необходимость испытать электрооборудование на воздействие треугольного импульса большой энергии, например для испытания энергоемких резисторов с экстремально коротким фронтом и экспоненциальным спадом, характерным для аperiodического разряда конденсатора на резистивную нагрузку. По характеру нарушения формы экспоненты разрядного тока и напряжения определяется устойчивость испытываемого устройства к такого рода воздействию.

Структурная схема испытательного стенда (рис. 1), формирующего аperiodические высоковольтные

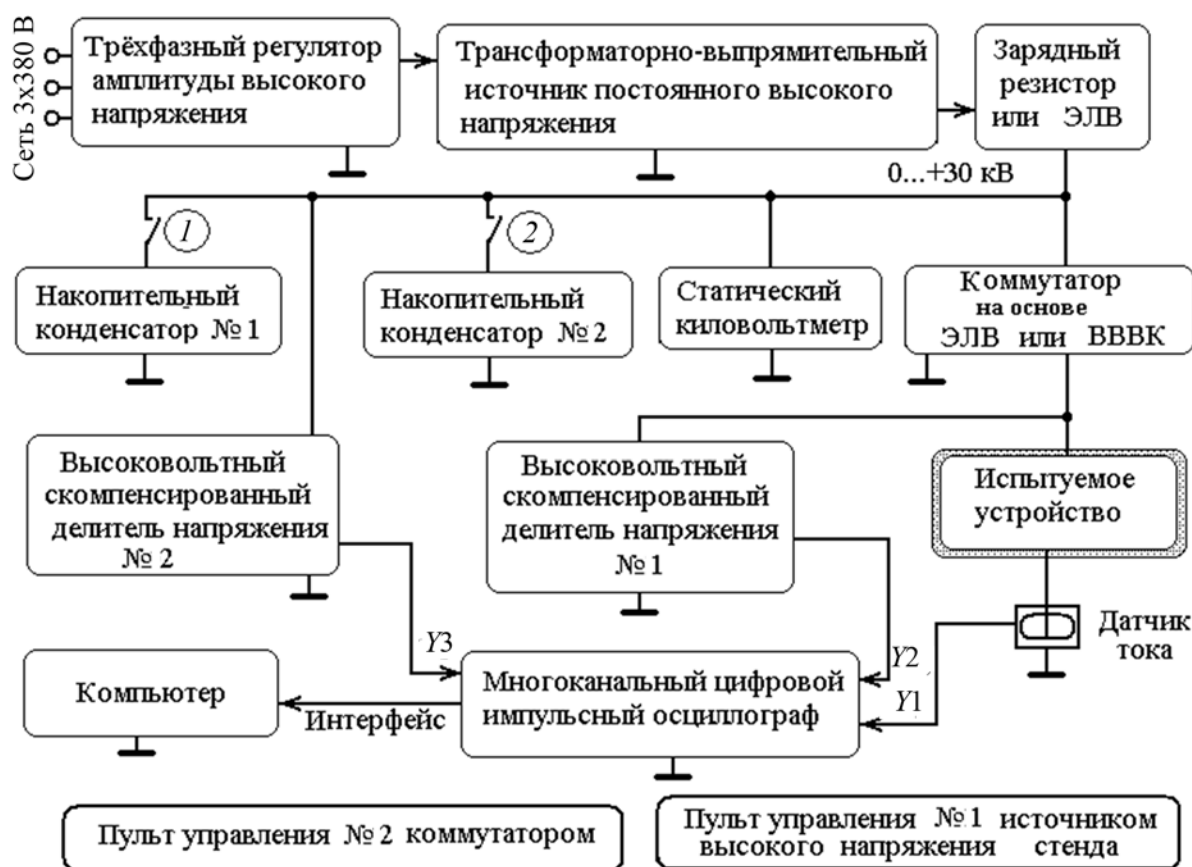


Рис. 1 Упрощенная структурная схема стенда:

1 — замыкатель конденсатора № 1; 2 — то же, конденсатора № 2

импульсы треугольной формы, содержит зарядное устройство, содержащее: источник сетевого трехфазного напряжения питания, регулятор амплитуды сетевого напряжения, повышающий высоковольтный трансформатор, трехфазный выпрямитель, собранный по схеме Ларионова, высоковольтный высокоомный резистор или электронно-лучевой вентиль, накопительный конденсатор, высоковольтный коммутатор — вакуумный механический или на основе ЭЛВ, пассивную резистивно-индуктивную формирующую разрядную цепочку, испытуемое устройство, приборы диагностики и регистрации высокого импульсного напряжения и тока.

На первом этапе разработки схемы осуществляется предварительный расчет электрической схемы с целью определения параметров комплектующих и компьютерное моделирование в любой схемотехнической программе, например EWB (рис. 2). Высоковольтный трехфазный трансформатор моделируется тремя однофазными источниками питания, имеющими сдвиг фаз выходного напряжения друг относительно друга на 120° . Переключатель «пробел» (Spase) моделирует одновременно отключение силового высоковольтного зарядного источника питания и включение коммутатора. Для упрощения модельной схемы выбрано зарядное устройство с пассивным элементом — резистором сопротивлением $R_{зар} = 10$ к. Испытуемое напряжение $U_{dc} = 25$ кВ. В качестве испытуемой нагрузки используется резистор сопротивлением $R_{исп} = 1$ кОм. Для измерения тока используется резистор сопротивлением $R_{изм} = 1$ Ом (или соответствующая модель с эквивалентным сопротивлением равным 1 Ом). Высоковольтный

вольтный делитель с полным сопротивлением 10 М (коэффициент деления 1:100), накопительная емкость $C_{нак} = 640$ мкФ.

В результате модельных исследований получается осциллограмма (рис. 3). Один канал осциллографа U показывает форму напряжения на $C_{нак}$, другой — импульсный ток I испытуемого устройства. На резистивной нагрузке наблюдается экспоненциальный разряд с постоянной времени $\tau = 0,7$ с. По характеру разряда, наличию всплесков или спадов на экспоненте определяется устойчивость устройства к внешнему воздействию.

Например, при нештатном пробое участка «анод-управляющий электрод электронного устройства» высокое анодное напряжение попадает на сравнительно низковольтный подмодулятор этого устройства. С помощью моделирования, подавая на его выход высоковольтный импульс, можно теоретически с помощью компьютера определить устойчивость подмодулятора для ЭЛВ [2], но для практических исследований необходим стенд. Подмодулятор — это автономное устройство, которое обеспечивает формирование относительно катодного потенциала ЭЛВ все рабочие напряжения электродов, отпираания, запираания, питание дополнительных электродов, накала, магниторазрядного насоса, адаптера — оптического приемника сигналов управления и др. Его питание осуществляется через высоковольтный развязывающий трансформатор.

После модельных исследований, перед сборкой полномасштабного варианта электрической схемы стенда целесообразно собрать макетный вариант с масштабом по напряжению, например 1:100 (рис. 4). Тум-

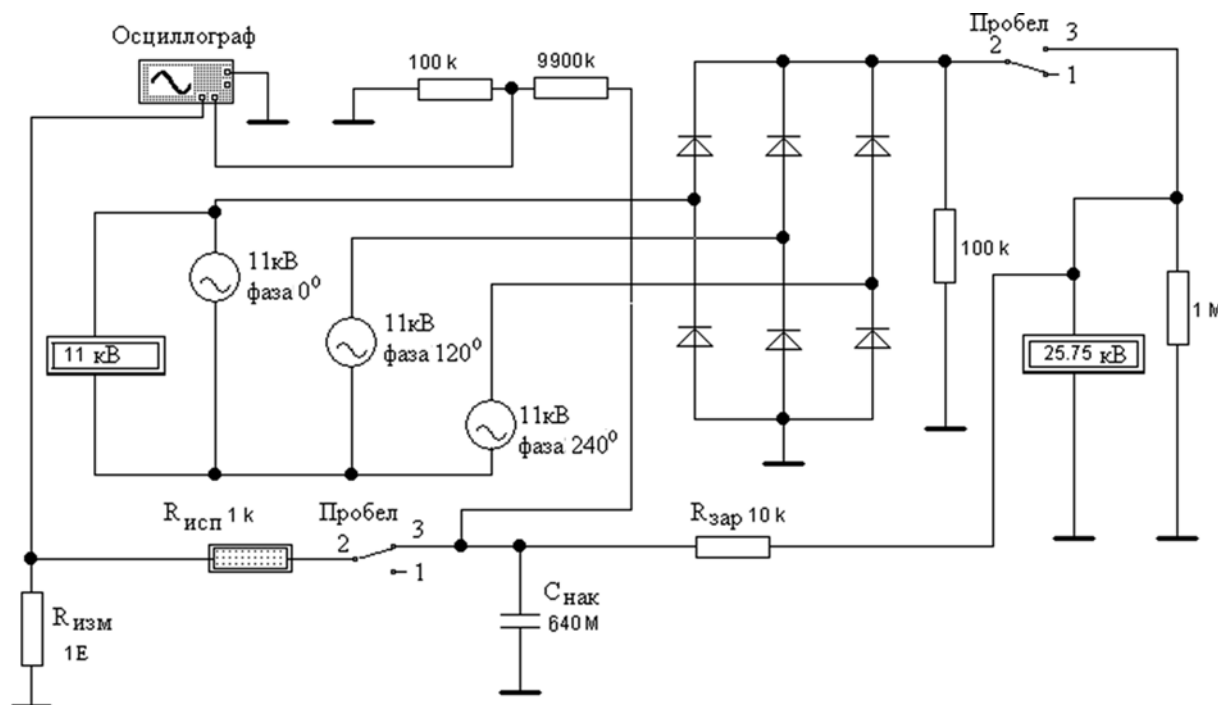


Рис. 2. Модельная схема силовой части высоковольтного импульсного стенда

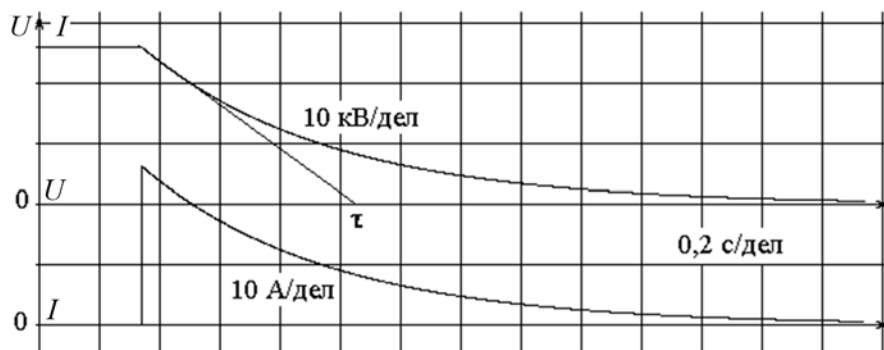


Рис. 3. Модельная осциллограмма напряжения и тока испытуемого устройства

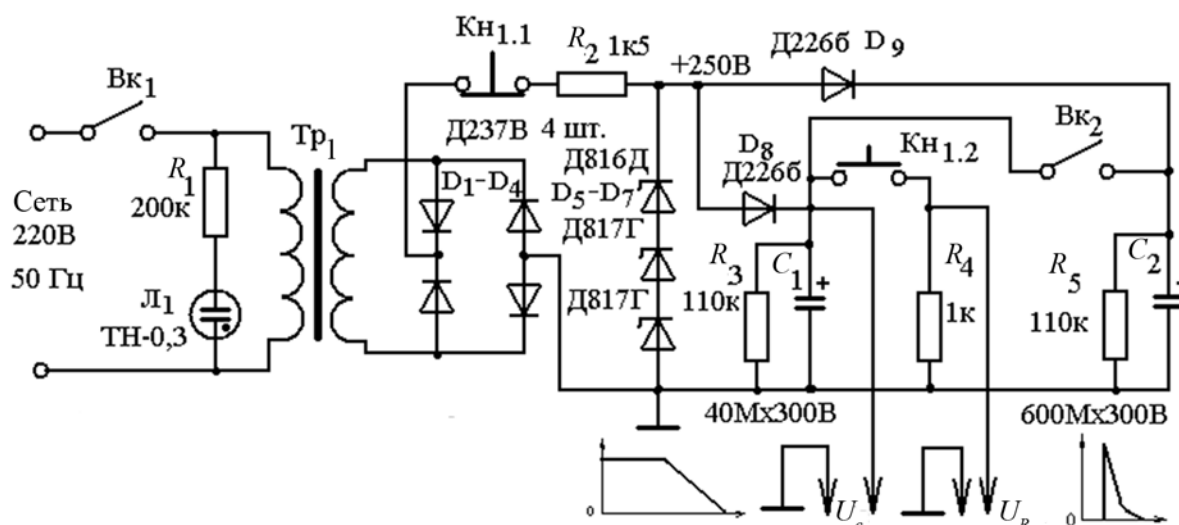


Рис. 4. Электрическая схема макетного варианта стенда в масштабе по напряжению 1:100

блер $Вк_1$ обеспечивает включение сетевого питания, а неоновая лампочка $Л_1$ (ТН-0,3) — индикацию. Кнопка $Кн_{1,1}$ макетирует сразу две функции: отключение от накопительного конденсатора источника питания; коммутацию накопительных конденсаторов C_1 или $C_1 + C_2$ на испытуемое устройство, например резистор R_4 . Выбор величины емкости конденсатора осуществляется с помощью тумблера $Вк_2$. Кнопка $Кн_{1,2}$ — формирование импульса.

Конденсатор C_1 — малой величины, обеспечивает проведение испытаний на воздействие напряжения, а $C_1 + C_2$ — большой величины, обеспечивает испытание на воздействие большой энергии.

Макетный вариант позволяет не только подтвердить полученные модельные параметры стенда, но, что особенно важно, провести безопасную настройку диагностического и регистрирующего оборудования при сравнительно малом напряжении и энергии коммутации, в частности цифрового импульсного осциллографа и компьютера.

Заданные значения параметров импульса определяются не только параметрами схемы, но и электрическими параметрами испытуемого устройства,

например его активным и реактивным сопротивлениями.

В результате полная электрическая схема стенда принимает вид, представленный на рис. 5.

Одним из основных элементов стенда является высоковольтный вакуумный коммутатор (ВВВК). Величина его сопротивления в разомкнутом состоянии должна быть соизмерима с сопротивлением изоляции, минимальная величина в замкнутом состоянии должна быть на два порядка ниже величины сопротивления испытуемого устройства. Он должен иметь большую долговечность и надежность. При этом в разомкнутом состоянии — держать полное рабочее напряжение, в частности 30 кВ при частоте не более 0,01 Гц; держать без повреждения большой импульсный ток в случае пробоя испытуемого устройства. Коммутатор ВВВК более всего удовлетворяет поставленным требованиям при собственном сопротивлении испытуемого устройства 300...5000 Ом, при этом его внутренне сопротивление менее 1 Ом. Коммутатор построен на основе высоковольтной дугогасительной вакуумной камеры типа КДВ-10-20/1000, разработанной ООО «Вакуумные технологии» и ВЭИ [3].

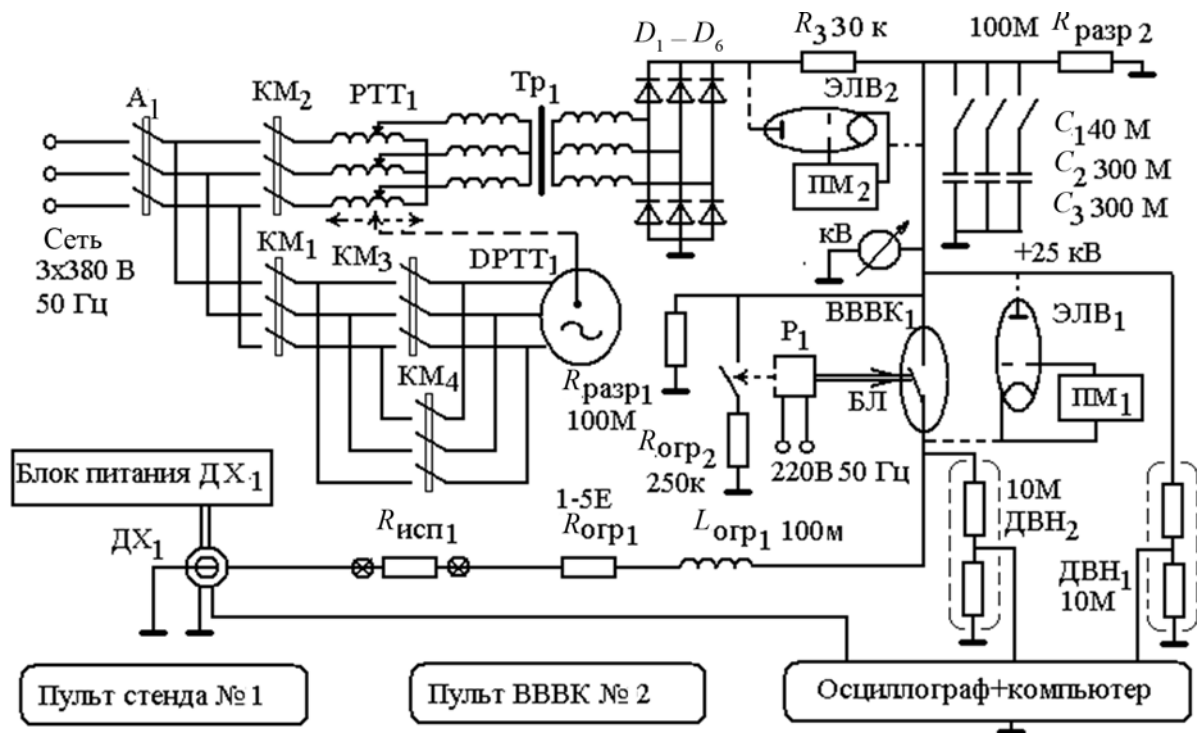


Рис. 5. Электрическая схема испытательного стенда:

A_1 — автоматический сетевой выключатель; KM_1, KM_2, KM_3, KM_4 — контакты пускателей обеспечивающих включение элементов схемы; $РТТ_1$ — электромеханический трехфазный регулятор напряжения; $ДРТТ_1$ — электромеханический привод регулятора напряжения; $Тр_1$ — высоковольтный повышающий трансформатор; R_3 — зарядный резистор; C_1, C_2, C_3 — разрядные конденсаторы; $ДВН_1, ДВН_2$ — высоковольтный делитель напряжения; $ДХ_1$ — датчик тока, работа которого основана на эффекте Холла; $D_1 - D_6$ — высоковольтные диоды выпрямителя; $кВ$ — статический киловольтметр; $ВВВК$ — высоковольтный вакуумный коммутатор; $R_{огр1}, R_{огр2}$ — ограничительные резисторы; $L_{огр}$ — ограничительная индуктивность; $R_{разр1}, R_{разр2}$ — разрядные резисторы; P_1 — катушка разрядного реле; $БЛ$ — шина электрической блокировки $ВВВК$; $R_{исп1}$ — сопротивление испытуемого устройства; $ЭЛВ_1, ЭЛВ_2$ — электронно-лучевой вентиль; $ПМ_1, ПМ_2$ — подмодуляторы; $L_{огр1}$ — ограничительная индуктивность

Основные параметры дугогасительной камеры:

Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальная частота, Гц	50—60
Номинальное испытательное напряжение при разомкнутых контактах:	
промышленной частоты, одноминутное, кВ	42
постоянное, кВ	35
грозового импульса (полного, наибольший пик), кВ	75
номинальный ток, А	1000
Ток включения (наибольший пик), кА	51
Механическая износостойкость	50 000
Коммутационная износостойкость при номинальном токе	50 000
Электрическое сопротивление на постоянном токе при нормированном контактном нажатии, Ом·10 ⁻⁶ , не более	50
Срок службы, год	30
Габаритные размеры, мм:	
высота	200/218
внешний диаметр	76

Физика работы контактов дугогасительной камеры в момент размыкания основана на гашении электрической дуги в вакууме. Благодаря высокой электрической прочности вакуумного промежутка и наличию среды, не поддерживающей горение дуги, время горения дуги

минимальное. Дуга в вакууме возникает при кратковременном перегреве точки размыкания, что приводит к выбросу паров материала контактов в зазор между контактами в момент размыкания. Для стенда принят режим работы только на замыкание при наличии напряжения, а размыкание происходит при отсутствии напряжения. Поэтому исключается перегрев точки контакта и, соответственно, выброс паров. В связи с этим основной характеристикой по напряжению является электрическая прочность коммутируемого вакуумного промежутка в разомкнутом, холодном, состоянии, которая превышает максимальное рабочее напряжение стенда.

Альтернативным вариантом в качестве коммутатора допустимо применение $ЭЛВ_1$, например типа $ЭЛВ 50/100$ (ток 50 А, напряжение 100 кВ, $R_{вн} > 40$ Ом), если его внутреннее сопротивление составляет около 1 % от сопротивления испытуемой нагрузки, т. е. более 40 кОм. Вентиль включается в режиме коммутации при максимальном значении напряжения на управляющем электроде, чтобы обеспечить минимальное значение его внутреннего сопротивления [4]. Он обладает высоким электрическим КПД, обусловленным низким значением анодного потенциала прибора в отличие от тра-

диционных вакуумных приборов — триодов, тетродов. Его вольт-амперная характеристика (ВАХ) имеет пентодный характер. Для пропускания тока в цепи между катодом и анодом необходимо подать на управляющий электрод (УЭ) положительный потенциал, а для запирания — отрицательный. Ток с катода на УЭ будет составлять не более 3...5 % от тока анода. Потенциал анода при этом не превышает 0,2...0,3 от потенциала УЭ. ЭЛВ имеет более высокий КПД в ключевом режиме работы. Величина импульсного тока почти в 10 раз больше стационарного. Максимальное коммутируемое напряжение для существующих ЭЛВ около 200 кВ. Как и все электронные приборы, ЭЛВ обладает свойством «жесткой» управляемости, что дает возможность получать тестовые импульсы не только треугольной, но и прямоугольной формы с крутым фронтом и срезом [5].

Электрическая схема управления замыканием и размыканием дугогасительной камеры ВВБК представлена на рис. 6. В схеме использованы тиристоры как усилительные приборы в связи с большим рабочим током катушек электромеханических защелок (до 30 А). При нажатии кнопки К1 обеспечивается быстрое замыкание контакта ВВБК под воздействием внешнего электромагнитного привода. Одновременно осуществляется срабатывание защелки замкнутого положения. При нажатии кнопки К2 осуществляется размыкание контактов путем отключения «защелки» замкнутого положения и включение защелки разомкнутого положения. Управление осуществляется вручную. Своим нормально замкнутым контактом катушка реле P₁, подключенная параллельно к катушке штатного разрядника L_{разр}, обеспечивает блокировку срабатывания защелки замкнутого положения ВВБК при включенном источнике высокого напряжения питания стенда.

Второй важной частью электрической схемы является зарядное устройство, содержащее, в простейшем случае, высокоомный высоковольтный резистор или блок последовательно соединенных резисторов. Такой вариант схемы позволяет работать с малым электрическим КПД зарядки и малой частотой повторения испытываемых импульсов.

Однако наиболее перспективно применение [6] в зарядном устройстве ЭЛВ₂, например типа ЭЛВ 2/200 (ток 2 А, напряжение 200 кВ, R_{вн} > 500 Ом). Вентиль включается в режиме управляемого ограничителя амплитуды анодного тока, являющегося для стенда зарядным током конденсаторов C₁ — C₃. Максимальное значение анодного тока определяется напряжением на управляющем электроде, и для ЭЛВ 2/200 максимальное значение составляет 2 А. Практически этот ток ограничивается максимально допустимым током выпрямительных высоковольтных диодов D₁ — D₆, который не более 1,5 А.

Напряжение на конденсаторах стенда C₁ — C₃ измеряется непосредственно статическим киловольтметром и дополнительно цифровым осциллографом, подключенным к высоковольтному делителю ДВН₁. Величина и форма разрядного тока определяются с помощью датчика ДХ₁, работа которого основана на эффекте Холла. Выходное напряжение, пропорциональное разрядному току, полученное с датчика, калибруется заранее с помощью вспомогательного резистора. В данном случае 1В напряжения с ДХ₁ эквивалентен току около 30 А. Применение такого датчика тока обеспечивает гальваническую развязку низковольтной измерительной цепи от высоковольтной, что повышает безопасность и надежность.

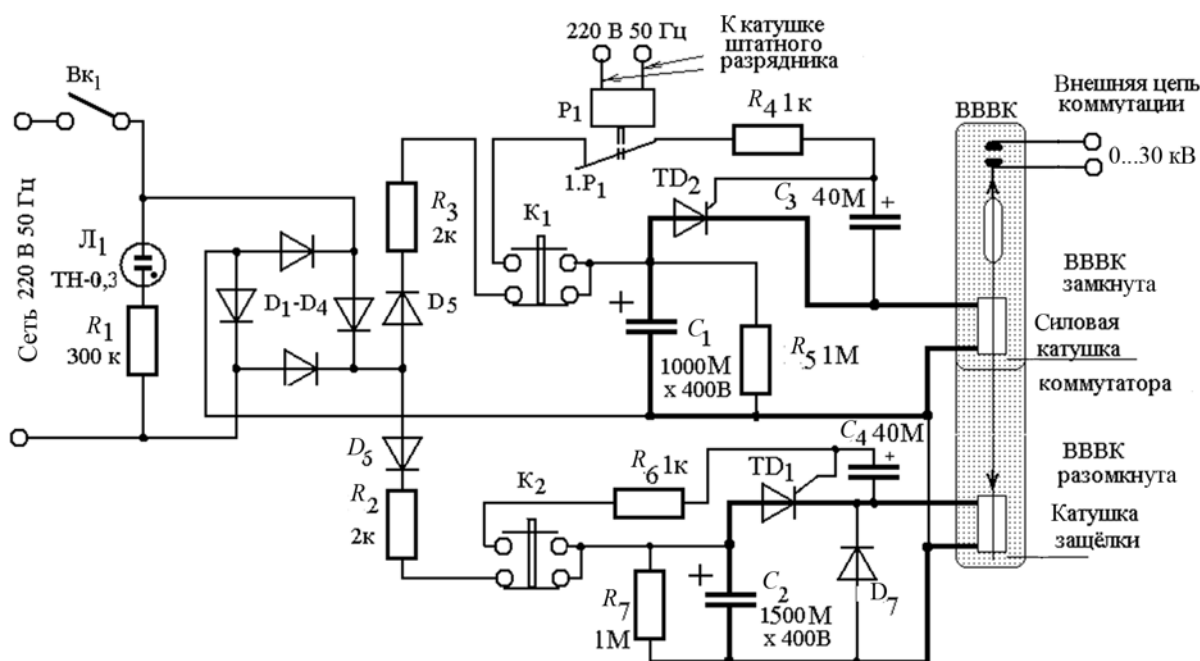


Рис. 6. ВВБК на основе дугогасительной камеры и электрическая схема блока управления

Значение амплитуды напряжения, до которой заряжаются конденсаторы C_1 — C_3 , регулируется оператором. Так как в процессе эксперимента возникает большая импульсная помеха, мешающая устойчивости работы развертки, осциллограф целесообразно включать в режим «самописец», доступный в современных цифровых приборах.

Осциллограммы напряжения и тока регистрируются на компьютере с помощью передачи данных, например с осциллографа GDS-820S по шине USB с использованием на компьютере программного обеспечения Freeview 2.01. Пример полученной осциллограммы при исследовании энергоемкого резистора представлен на рис. 7.

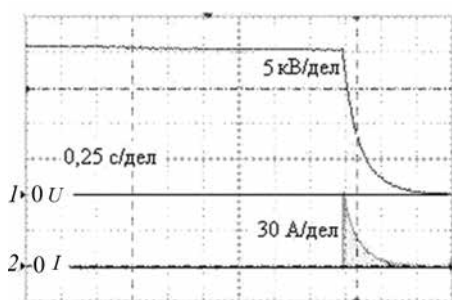


Рис. 7. Осциллограмма напряжения U на разрядном конденсаторе и тока I резистора сопротивлением около 330 Ом:

1 — напряжение на конденсаторной батарее; 2 — ток нагрузки

Из осциллограммы видно, что при напряжении 20 кВ на конденсаторной батарее электрической емкостью 340 мкФ, накапливается энергия около 68 кДж. Исследованию подвергается энергоемкий резистор сопротивлением около 330 Ом. Импульсный ток составляет более 60 А. Максимальное значение энергии конденсаторов емкостью 640 мкФ при напряжении 30 кВ составляет около 300 кДж.

По форме осциллограммы определяется устойчивость исследуемого устройства к высоковольтному импульсному воздействию. Наблюдаемый плавный вид экспоненты (без выбросов напряжения) показывает, что пробоя в исследуемом энергоемком резисторе нет. Одновременно, визуальное и с помощью видеорегистрации, определяется отсутствие всплесков или искр на поверхности резистора, что подтверждает отсутствие поверхностных пробоев. Таким образом, испытываемый резистор выдержал испытание и является работоспособным.

Подведем итоги исследования.

Разработан экспериментальный стенд для проведения высоковольтных испытаний электротехнического оборудования с внутренним сопротивлением 0,3...5 кОм. Стенд используется для испытания энергоемких балластных и ограничительных резисторов путем воздействия импульсом напряжения треугольной формы, максимальная амплитуда до 30 кВ при энергии до 300 кДж.

По характеру регистрируемой формы напряжения и тока испытуемого устройства, отличия ее от экспоненциальной, в частности, наличия выбросов, провалов, колебаний, определяется дефектность изделия.

Применение разработанного высоковольтного импульсного стенда позволяет определить устойчивость к помехам некоторых видов электро- и радиотехнического оборудования, например подмодуляторов для ЭЛВ.

Применение ЭЛВ в качестве «жесткого» по управлению коммутатора вместо дугогасительной камеры дает возможность получить прямоугольные тестовые импульсы напряжения длительностью от единиц микросекунд до нескольких секунд.

Литература

- ГОСТ 1516.2—97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.
- Щербаков А.В. Электронно-лучевые вентили для высоковольтных импульсных устройств // Электротехника. 2014. Т. 1. № 2. С. 38—43.
- КДВ-10-20/1000 УХЛ2 | 106-Дугогасительные камеры. URL: intrademsk.ru>106-dugogasitelnye...kdv-10-20/1000.
- Переводчиков В.И., Стальков П.М. Разработка электронно-оптических систем высоковольтных электронных приборов с торможением электронного потока на аноде // Прикладная физика. 2012. № 2. С. 49—53.
- Переводчиков В.И., Щербаков А.В., Трухачев И.М., Ефанов М.М. Особенности создания источников знакопеременного питания высоковольтных электрофильтров на напряжение более 130 кВ // Электрические станции. 2013. № 5. С. 45—49.
- Щербаков А.В. Эквиваленты нагрузки для источников питания // Электро. 2014. № 3. С. 18—23.

References

- GOST 1516.2—97. Electrical Equipment and Installations for a.c. Voltage 3 KV and Higher. General Methods of Dielectric Tests. (in Russian).
- Shcherbakov A.V. Elektronno-Luchevye Ventili dlya Vysokovol'tnykh Impul'snykh Ustroystv // Elektrotehnika. 2014;1;2;38—43. (in Russian).
- KDV-10-20/1000 UKHL2 | 106-Dugogasitel'nyye Kamery. URL: Intrademsk.ru>106-Dugogasitel'nyye...KDV-10-20/1000.
- Perevodchikov V.I., Stal'kov P.M. Razrabotka Elektronno-Opticheskikh Sistem Vysokovol'tnykh Elektronnykh Priborov s Tormozheniem Elektronnogo Potoka na Anode // Prikladnaya Fizika. 2012;2;49—53. (in Russian).
- Perevodchikov V.I., Shcherbakov A.V., Trukhachev I.M., Efanov M.M. Osobennosti Sozdaniya

Istochnikov Znakoperemennogo Pitaniya Vysokovol'tnykh Elektrofil'trov na Napryazhenie Bolee 130 kV // Elektrieskie Stantsii. 2013;5:45—49. (in Russian).

6. **Shcherbakov A.V.** Ekvivalenty Nagruzki dlya Istochnikov Pitaniya // Elektro. 2014;3:18—23. (in Russian).

Сведения об авторах

Щербаков Александр Владимирович — доктор технических наук, начальник отдела ФГУП «Всероссийский электротехнический институт», e-mail: shav180745@vei.ru

Стальков Павел Михайлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГУП

«Всероссийский электротехнический институт», e-mail: stalkov@vei.ru

Information about authors

Shcherbakov Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Department of Federal State Unitary Enterprise Russian Electrotechnical Institute, e-mail: shav180745@vei.ru

Stal'kov Pavel M. — Ph.D. (Techn.), Senior Researcher of Federal State Unitary Enterprise Russian Electrotechnical Institute, e-mail: stalkov@vei.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2016