

Полупроводниковое устройство управления высоковольтным вакуумным прибором

ЩЕРБАКОВ А.В., ЕФАНОВ М.М.

Использование высоковольтных вакуумных приборов (ВВП) для технологических целей при коммутации высоких напряжений (до 200 кВ) в импульсном, квазистационарном и стационарном режимах на периодически пробивающуюся нестационарную нагрузку требует создания надёжных полупроводниковых устройств управления (УУ), подмодуляторов, находящихся на потенциале катода, обеспечивающих работоспособность коммутатора в условиях возникновения искрового пробоя. Разработаны два типа полупроводниковых УУ коммутационного и инверторного типов для ВВП типа электронно-лучевой вентиль (ЭЛВ), секундной, микросекундной длительности импульса на выходные напряжения от -1 до $+6$ кВ, током $0,1\dots, 1$ А. Минимальная длительность фронта и среза выходного импульса УУ коммутационного типа $1,0$ мкс, инверторного типа до 100 мкс длительность импульса управления не ограничена. В программе EWB предложена методика компьютерного исследования процессов, происходящих в электрической схеме УУ при воздействии на выходные клеммы высоковольтной импульсной помехи, аналога искрового пробоя амплитудой до 200 кВ, током до 1 кА.

Ключевые слова: полупроводниковое устройство управления, высоковольтные импульсы, моделирование устойчивости

Полупроводниковые устройства управления (УУ) высоковольтными вакуумными приборами (ВВП) практически вытеснили применявшиеся ранее подмодуляторы на основе маломощных электронных ламп благодаря меньшим массогабаритным характеристикам и потребляемой мощности. В настоящее время выпускается обширная номенклатура ВВП на напряжение сотни киловольт и токи десятки ампер, например, в России (завод «Светлана»,) НПО «Торий», ОАО НПО «Контакт», а также в ряде зарубежных фирм «Thompson» (Швейцария), «Varian» (США). В частности корпорация Richardson Electronics комплектует специализированные рынки промышленного, медицинского, научного и коммуникационного теле-радиооборудования на основе ВВП, обеспечивая высокое качество обслуживания по стандарту IS09002.

Для всех этих приборов необходимо УУ, которое является адаптером, преобразующим исходный маломощный импульсный или квазистационарный сигнал управления в потенциалы управления ВВП, и является одним из основных вспомогательных устройств. От его надёжности во многом зависит работоспособность ВВП, обладающего высокой помехоустойчивостью, радиационной устойчивостью, повторяемостью электрических характеристик, устойчивостью к внешним и внутренним пробоям, способностью восстанавливаться после искровых пробоев внутри или снаружи прибора, работой при сравнительно высоких рабочих температурах, устойчивостью к воздействию интенсивного электромагнитного и рентгеновского излучения, хорошей прогнозируемостью времени отказа,

а также способностью к ограничению ранее заданного предельного значения тока, например, электронно-лучевые вентили (ЭЛВ).

Разработан ряд коммутаторов на основе ЭЛВ, имеющих пентодную вольт-амперную характеристику благодаря использованию в качестве анода цилиндра Фарадея. Прибор способен коммутировать высокое напряжение на нагрузке амплитудой до 200 кВ при токе до 2 А (ЭЛВ 2/200), имеющей нестабильный комплексный характер сопротивления. Падение напряжения на открытом приборе $300\text{--}500$ В. Используется, например, для питания электрофильтров (ЭФ) пылеочистки [1, 2]. Для питания особо ответственного потребителя [3–6] разработан более мощный вентиль типа ЭЛВ 4/40 (50 кВ, 8 А) или ЭЛВ 50/100 (100 кВ, 50 А). На его основе был создан макетный образец статического компенсатора напряжения (СТАТКОМ), содержащий инверторно-выпрямительное высоковольтное устройство при действующем значении напряжения до 35 кВ переменного тока частотой 50 Гц с ШИМ регулированием при частоте дискретизации $2\text{--}3$ кГц. Именно при разработке этого нового высокотехнологичного устройства возникла проблема выхода из строя полупроводниковых УУ при нештатном искровом пробое анод–управляющий электрод в ЭЛВ. Напряжение на управляющем электроде ЭЛВ и соответственно напряжение на выходе УУ колеблются в интервале от -1 кВ до $+6$ кВ.

Устройство управления со световодной оптической развязкой обеспечивает работоспособность ЭЛВ на любом потенциале по отношению к потенциалу земли. Несмотря на предпринимаемые

серьёзные технологические и конструкторские доработки конструкции ЭЛВ всё же остаётся высокая вероятность искрового пробоя внутри прибора с анода на управляющий электрод, что существенно снижает надёжность УУ. Поэтому возникла необходимость создания его электрической схемы с высокой устойчивостью к появлению на выходном электроде импульсов напряжения, достигающих уровня рабочего анодного потенциала, равного иногда сотням киловольт.

Тенденция конструирования современной схемотехники на основе полупроводников позволила существенно снизить массогабаритные показатели УУ, но привела к необходимости использования дополнительных активных и пассивных защитных элементов, например стабилитронов, варисторов, индуктивностей, емкостей, обеспечивающих шунтирование или снижение амплитуды высоковольтных выбросов, чтобы не допустить их воздействия на выходные транзисторы, формирующие управляющие потенциалы. Наиболее эффективной защитой УУ от выбросов напряжения, вызванных искровым пробоем, является снижение амплитуды этой помехи путём уменьшения крутизны её фронта при сохранении длительности, например посредством использования высоковольтных фильтров низкой частоты, установленных между выходной клеммой УУ и управляющим электродом ЭЛВ.

Коммутационные и инверторные схемы УУ. По принципу построения высоковольтных УУ были разработаны два основных типа электрических схем для формирования напряжения положительной (до +6 кВ) и отрицательной (до -1 кВ) полярности на управляющем электроде ЭЛВ.

Устройства управления коммутационного типа содержат коммутаторы напряжения положительной и отрицательной полярности на основе высоковольтных соединённых последовательно транзисторов (рис. 1), позволяющие формировать сравнительно короткие фронты управляюще-

го напряжения t_{ϕ} длительностью около 1 мкс, соответственно максимальная частота среза спектральной характеристики, равная $f_{\text{ср}} = 1/6t_{\phi}$, соответствует примерно 170 кГц. Следует иметь в виду, что транзисторные сборки коммутаторов напряжения запирания и напряжения отпираания должны иметь одинаковые пробивные напряжения, на 20, 30% превышающие сумму напряжений источников напряжения запирания и напряжения отпираания. В нашем случае это напряжение более 7 кВ.

Устройства управления инверторного типа согласно сигналам от системы управления формируют поочерёдно с помощью двух одинаковых маломощных полумостовых инверторов напряжения отпираания (+2, +6 кВ) и запирания (-0,5, -1 кВ) относительно катода по управляющему электроду ЭЛВ с использованием четырех сравнительно низковольтных транзисторов и двух высокочастотных разделительных трансформаторов на напряжение развязки более 7 кВ (рис. 2). Длительность фронта t_{ϕ} управляющего напряжения зависит от частоты инвертора: чем больше частота, тем короче фронт. Практически при частоте инверторов УУ $f_{\text{инв}}$ около 50 кГц длительность фронта при условии, что для формирования требуется не более двух периодов частоты инвертора, определяется как $t_{\phi} = 2/f_{\text{инв}}$ и равен примерно 20 мкс.

Устройства управления первого типа использовались в ЭЛВ, комплектующих малоинерционные высоковольтные устройства специального назначения для импульсной манипуляции напряжения до 40 кВ, а также для СТАТКОМ при амплитуде напряжения до 50 кВ и максимальной частоте дискретизации до 3 кГц. Максимально допустимая длительность фронта управляющего импульса УУ должна быть не более 20 мкс. Устройства управления второго типа первоначально разработаны вместо ламповых для перспективных источников знакопеременного питания электрофильтров (ЭФ)

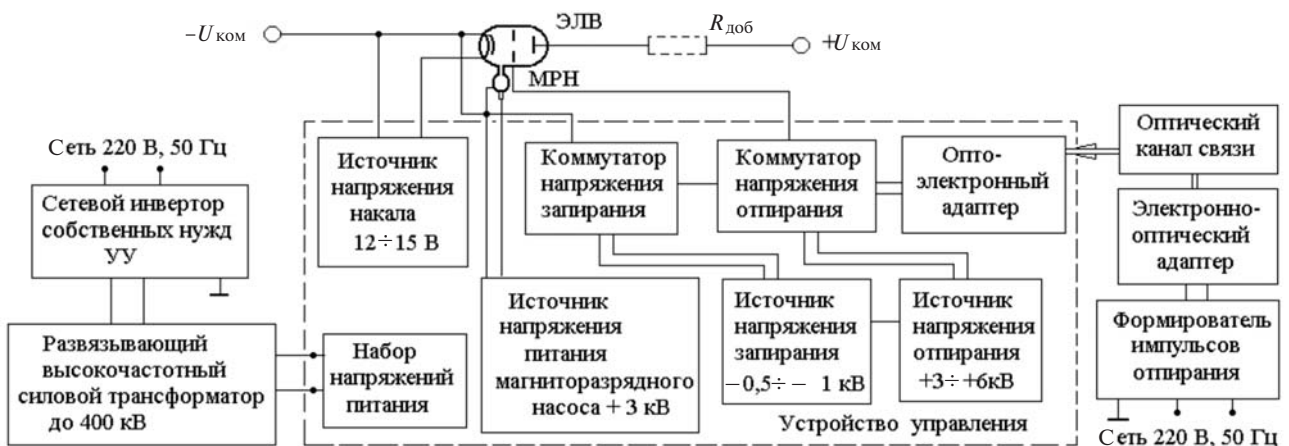


Рис. 1. Структурная схема УУ коммутационного типа

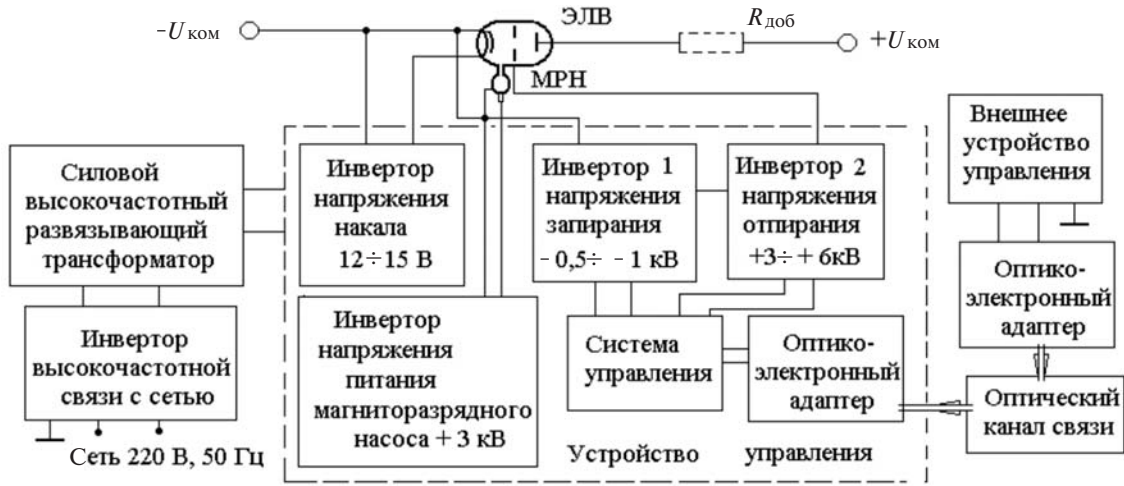


Рис. 2. Структурная схема УУ инверторного типа

пылеочистки, где допустимо максимальное значение фронта до 100 мкс.

Защита от высоковольтных помех, вызванных искровым пробоем анод–управляющий электрод ЭЛВ, по выходному электроду УУ обычно осуществляется за счёт включённых параллельно каждому выходному транзистору варисторов. Управление УУ, находящегося на высоком потенциале относительно земли, осуществляется через световод и оптоэлектронный адаптер, содержащий фотодиод (фототранзистор), операционный усилитель, выходной транзистор и является практически безынерционным устройством. Для штатной работы защиты необходимо, чтобы время включения защитных варисторов (или другого типа защитных приборов) было значительно меньше времени нарастания высоковольтного импульса помехи от искрового разряда. В противном случае варистор не успеет включить и, соответственно, не будет выполнять своих защитных функций по ограничению напря-

жения. Наличие крутых фронтов напряжения, прикладываемых к активному устройству защиты, может привести к его постепенной деградации, поэтому для повышения надёжности и долговечности защиты необходимо на выходе УУ дополнительно установить последовательно индуктивность, а параллельно – ёмкости. Фрагмент электрической схемы выходного каскада УУ инверторного типа представлен на рис. 3.

Такой П-образный фильтр, если будет правильно рассчитан, кроме всего прочего, ещё и с точки зрения высоковольтности, обеспечит гарантированные выходные параметры управляющего напряжения и одновременно защиту от искрового пробоя. Это возможно только в том случае, если предельная частота среза высокочастотной составляющей спектра управляющего сигнала у фильтра меньше, чем у помехи. Используя эту разницу в значении верхних частот среза помехи (около 1,7 МГц) и управляющего сигнала, необходимо создать, например, высоко-

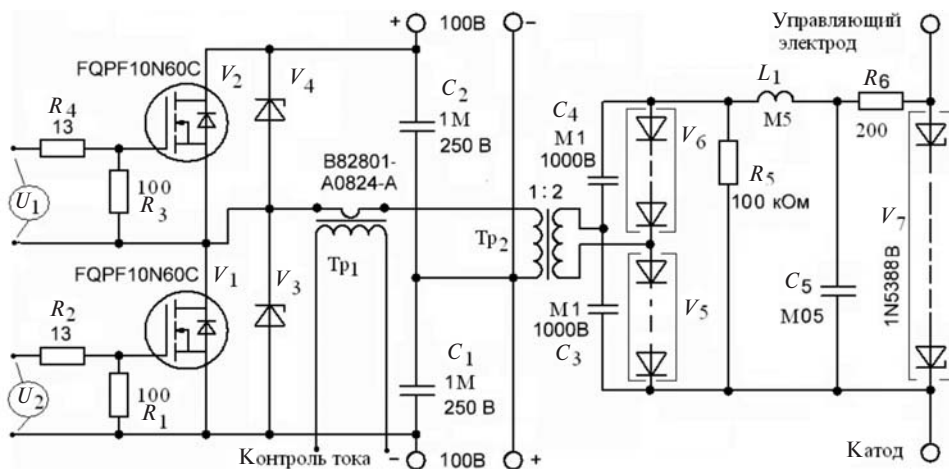


Рис. 3. Фрагмент электрической схемы инвертора, формирующего напряжение запирающего ЭЛВ: U_1, U_2 – высокочастотные противофазные напряжения управления транзисторами УУ; V_3, V_4, V_7 – защитные стабилитроны (варисторы); V_5, V_6 – высоковольтные высокочастотные диоды; L_1 – защитная индуктивность; R_6 – дополнительный защитный резистор

вольтный П-образный фильтр нижних частот типа «К», включённый относительно катода, содержащий индуктивность L_1 и конденсаторы $C_{рез} = C_3C_4/(C_3+C_4)$ и C_5 , обеспечивающий непрерывное возрастание затухания по мере удаления в высокочастотную область от частоты среза $f_{ср}$ в полосу «непропускания». Благодаря этому фильтру амплитуда импульсной помехи, сформированной искровым пробоем сравнительно малой длительности, не успевает развиться на выходной клемме УУ до напряжения пробоя выходной транзисторной сборки. Ориентировочно параметры индуктивности и ёмкости можно определить: $L_1 = 0,32R/f_{ср}$; $C_{рез} = 160/Rf_{ср}$, где R – сопротивление нагрузки; $f_{ср}$ – частота среза, кГц. Так как ЭЛВ практически всегда работает в режиме тока управляющего электрода, то, соответственно, имеет место его активное сопротивление R , т.е. участка управляющий электрод–катод в проводящем состоянии, которое, например, для ЭЛВ 2/200 составляет около 60 кОм.

Например, согласно алгоритму управления сначала работает только *инвертор 1*, формирующий отрицательный потенциал. Когда появляется световой управляющий сигнал, то *инвертор 1* отключается и включается *инвертор 2*. При формировании отпирающего напряжения потенциал анод–катод ЭЛВ резко уменьшается и, как правило, пробой не наступает. При формировании запирающего напряжения из-за резкого обрыва анодного тока ЭЛВ анодное напряжение анод–катод и анод–управляющий электрод ЭЛВ скачком возрастает за счёт ЭДС самоиндукции соединительных проводов силовой цепи. Это дополнительное сравнительно небольшое возрастание повышает вероятность искрового пробоя участка анод–управляющий электрод ЭЛВ, приводящую к появлению на управляющем электроде, и соответственно, на выходе УУ высоковольтного импульса.

Дополнительное повышение устойчивости УУ к появлению высокого напряжения из-за искрового пробоя ЭЛВ заключается в том, что при включении *инвертора 1*, формирующего напряжение запирающего, источник питания *инвертора 2*, формирующий напряжение отпирающего, отключается и наоборот, аналогично идеологии, разработанной для перспективных источников знакопеременного питания [7], а также путём использования малоинерционных стабилизаторов или варисторов V_7 . Включение дополнительно резистора R_6 способствует подавлению возможных колебательных процессов в схеме. Его номинал определяется экспериментально при наладке, допускается (1, 5)%-е падение напряжения управления.

Ограничение длительности импульсного тока искрового пробоя осуществляется не только особенностями технологической обработки вакуумно-

го промежутка анод–катод ЭЛВ (в частности уменьшения остаточных загрязнений в приборе), но и значением ёмкости высоковольтного конденсатора в цепи питания анода ЭЛВ. Экспериментально выяснено, что фронт искрового пробоя определяется временем формирования разряда паразитной ёмкости анод–катод вентиля (практически около 0,1 мкс), а длительность – временем удержания тока пробоя (практически менее 10 мкс). Поэтому важно правильно выбирать тип защитных стабилизаторов или варисторов: необходимо, чтобы не только время их срабатывания было бы как минимум в 10 раз меньше времени нарастания тока импульса искрового пробоя, но и чтобы выделяющаяся импульсная и средняя мощность не превышала предельно допустимую.

Экспериментальное исследование частотных характеристик УУ коммутационного типа показало, что оно способно формировать сравнительно короткий фронт и срез двуполярного выходного напряжения длительностью менее 1 мкс, соизмеримого с параметрами искрового пробоя, что затрудняет применение каких-либо частотных фильтров, так как частота среза импульса выходного напряжения и импульса искрового пробоя приблизительно одинаковые.

Для устройств ионизации атмосферного воздуха и статического компенсатора напряжения, допустимые значения фронта и среза могут быть значительно больше 1 мкс, поэтому для этого типа приборов приемлемой можно считать более помехоустойчивую схему УУ инверторного типа. Значение выходного напряжения инверторов при том же напряжении питания выходных транзисторов определяется коэффициентом трансформации выходного высокочастотного разделительного трансформатора и определяется вольт-амперной характеристикой применяемого ЭЛВ.

Для ограничения амплитуды тока искрового пробоя имеет смысл последовательно в цепь анода установить добавочный резистор $R_{доб}$ на полное напряжение источника высоковольтного анодного питания. При этом падение напряжения при протекании постоянного тока до 2 А будет не более 500 В. При анодном напряжении 200 кВ (ЭЛВ 2/200) при сопротивлении резистора, равном 200 Ом, его средняя мощность рассеяния будет до 1 кВт, а импульсная – до 200 кВт. Эта мощность легко отводится, так как согласно требованиям по технике безопасности вся электрическая схема устройства расположена в баке с трансформаторным маслом. В этом случае максимальный ток искрового пробоя внутри прибора с анода на управляющий электрод ограничивается значением $200 \text{ кВ} / 200 \text{ Ом} = 1 \text{ кА}$.

Моделирование электрической схемы. Обычно после проведения предварительных расчётов по

классической методике осуществляется экспериментальная наладка, которая занимает сравнительно много времени и может привести к повреждению комплектующих, что, в свою очередь, приводит к повышению стоимости разработки. Поэтому для снижения временных и материальных затрат, повышения достоверности выбранных номиналов в настоящее время широко используются схемотехнические программы компьютерного моделирования, например EWB и Multisim. Программа Multisim имеет значительно больше возможностей, но требует более высокой квалификации оператора и занимает больше места на компьютере. Обе программы практически взаимозаменяемы, и их выбор определяется, в основном, оператором в зависимости от конкретного задания.

Для возможности предварительного исследования процессов, происходящих при пробое участка анод–управляющий электрод ЭЛВ наиболее целесообразно использовать программу EWB. Перед началом моделирования по классическим методикам рассчитываются номиналы всех комплектующих и предельные значения штатных токов и напряжений.

Следует иметь в виду, что для получения достоверных результатов при схемотехническом моделировании компьютерный оператор должен иметь практические навыки работы не только с программой, но и с электронными схемами. В противном случае можно получить искажённые результаты, не

отражающие реальную картину процессов, происходящих в электрической схеме. При моделировании в программе EWB на одном поле монитора поочередно, по нарастающей сложности, с сохранением промежуточных итераций составляются все блоки модельной схемы, в том числе инвертора и блока, моделирующего появление высокого напряжения на участке анод–управляющий электрод при токе пробоя до 1 кА. Модельная схема представлена на рис. 4. Она включает: модель задающего генератора инвертора – коммутатора 1, например, на рабочую частоту 50 кГц; модель инвертора собственных нужд на частоту 30 кГц 2; модель инвертора – коммутатора 3, модель высоковольтного выходного источника напряжения запираия 4, модель источника высоковольтных импульсов искрового разряда 5 на напряжение, например, до 200 кВ. При питании инвертора напряжением около 200 В используется полумостовая схема инвертора, питающаяся от двух отдельных источников напряжения +100 В и –100 В. При моделировании повышающий трансформатор инвертора запираия T_1 имеет, например, коэффициент трансформации $K=2$, кроме того учитываются его собственные индуктивности и ёмкости обмоток. Развязывающий трансформатор собственных нужд для удобства моделирования заменён двумя T_2, T_3 . Ключ S_6 обеспечивает включение инвертора, а ключ S_7 моделирует появление напряжения искрового пробоя. В процессе одновременного моделирования всей схе-

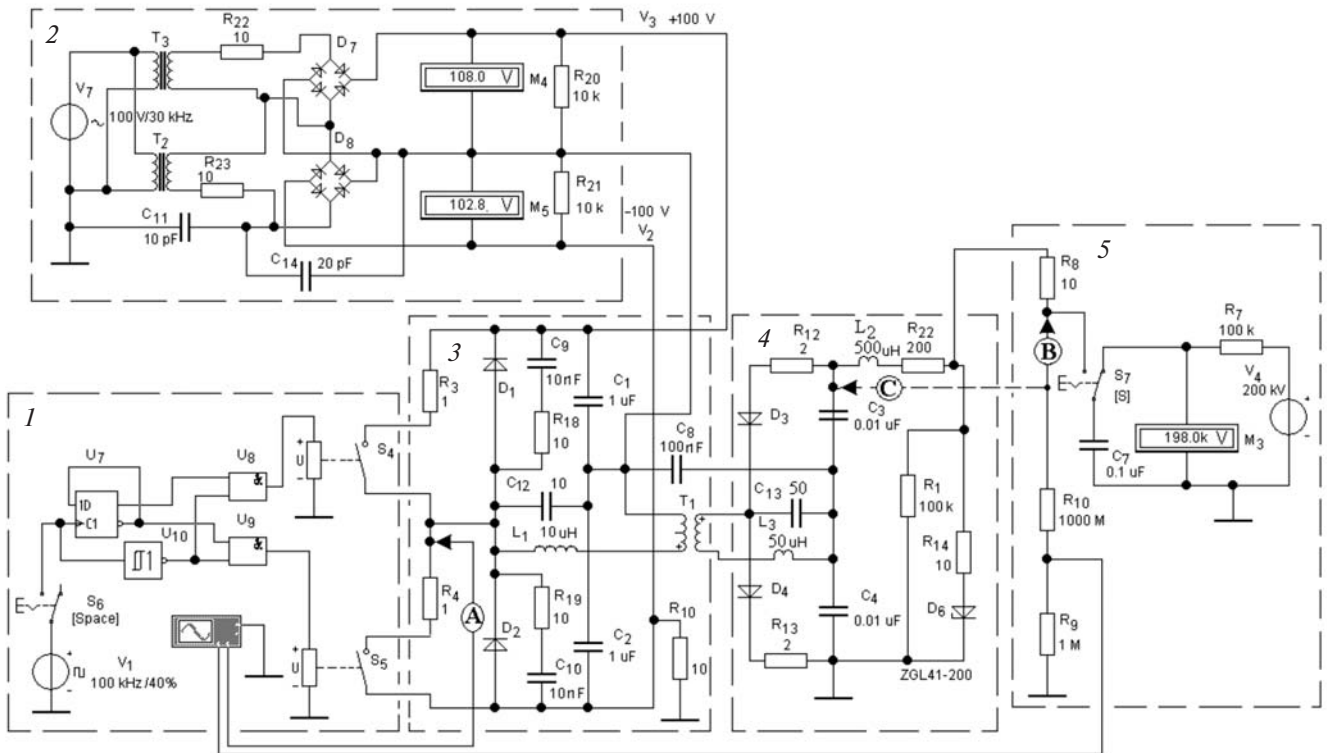


Рис. 4. Модельная схема испытания воздействия высоковольтного пробоя анод–управляющий электрод ЭЛВ на элементы схемы УУ: 1–5 – автономные модельные блоки; V – напряжение питания; A, B, C – точки подключения виртуального осциллографа

мы при последовательном возрастании числа комплектующих возможен сбой программы EWB из-за недостатка оперативной памяти компьютера или программы, поэтому допускается моделирование поблочно, при этом блоки заменяются эквивалентными элементами, например блок 2 заменяется двумя источниками постоянного напряжения с эквивалентными внутренними сопротивлениями. Из множества полученных модельных итераций, в результате которых получается множество модельных осциллограмм, исходя из практического опыта выбираются наиболее достоверные.

При проведении модельных исследований виртуальный осциллограф включается в режим отсутствия автозапуска или «автопаузы», галочка в окне «Analysis Option / Instrument / Pause after each screen», ключ «S» отключён, ключ «Spase» включён. Включается клавиша «Activate simulation» и начинается тестирование. Следует обратить внимание на то, что при включении режима «автопаузы» в меню программы, иногда возникает самопроизвольное уменьшение входного сопротивления по оси Y виртуального осциллографа до 1 кОм, что приводит к невозможности проведения тестирования. В этом случае требуется найти одну из предшествующих итераций, где этого дефекта не было, и в дальнейшем при тестировании переименовывать новые итерации, поэтому желательно до начала работы на рабочем поле собрать источник импульсного напряжения, высоковольтный делитель и виртуальный осциллограф. Далее предварительно необходимо провести проверку реакции схемы на случайное включение и отключение ключа «Spase», а также на сохранность после настройки «Analysis Option / Instrument / Pause after each screen» входного сопротивления виртуального осциллографа.

Если перенастроить виртуальный осциллограф не удаётся или нет предшествующей корректной итерации в данной программе, то это можно устранить путём переустановки программы, включения «автопаузы» на первом рабочем поле. В этом случае первое рабочее поле, как правило, работает без сбоя входного сопротивления виртуального осциллографа. В дальнейшем, при модификации этого поля, осуществляется многократное его переименование согласно каждой новой модели.

Длительность развёртки и цена деления виртуального осциллографа для получения достоверных результатов выбираются из соображений получения наибольшей амплитуды по осям Y и X . При тестировании пробоя в момент прохода половины осциллограммы по оси X виртуального осциллографа оператор включает и тотчас отключает ключ S – имитатор прохождения искрового пробоя. Таким образом, сразу получается одна из тестовых модельных осциллограмм, отражающая амплитуду на-

пряжения пробоя в различных частях схемы. На рис. 5 приведены модельные циклограммы, состоящие из нескольких осциллограмм с общей ценой деления по оси X (рис. 5,а): A – напряжение на модельном транзисторе; B – положительное импульсное напряжение высоковольтного источника помехи; C – то же напряжение после П-образного фильтра на выходной клемме УУ, формирующего отрицательное напряжение.

Как видно, импульсное напряжение на выходной клемме УУ задано равным 200 кВ. В промежуточной точке после высоковольтного фильтра оно будет уже значительно меньше, около 3 кВ, а на участке сток–исток транзистора уже вполне допустимое – около 500 В. На модельной циклограмме (рис. 5,б) представлены напряжение на задающем генераторе инвертора D и напряжение отрицательного смещения ЭЛВ E амплитудой до -500 В, а также напряжение помехи и характер восстановления напряжения смещения на управляющем электроде ЭЛВ после пробоя.

На модельной осциллограмме A , отражающей работу инвертора, хорошо просматривается наведенный импульс от источника искрового разряда B . Первоначальное напряжение отрицательного смещения, равное -500 В, восстанавливается при-

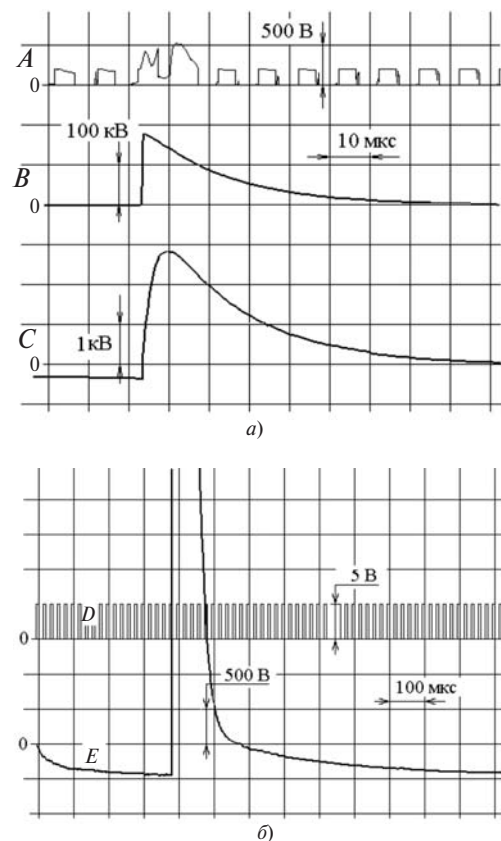


Рис. 5. Модельные осциллограммы напряжения: A – на транзисторе инвертора записания; B – на выходной клемме генератора искрового импульса; C – после высоковольтного фильтра; D – на задающем генераторе; E – на выходе УУ до и после воздействия высоковольтного импульса помехи

близительно через 50, 100 мкс. После появления высоковольтного импульса помехи наблюдается несколько периодов сбоя частоты инвертора, формирующего напряжение смещения. Предположительно эти сбои связаны с самим процессом компьютерного моделирования. Для предварительного определения напряжения высоковольтного импульса на другие блоки можно провести аналогичное моделирование для всех блоков УУ. Составление циклограмм осуществляется в процессе компьютерного редактирования в одной из графических программ, например в «mspaint», черно-белой палитре с отключённым режимом «непрозрачный фон».

Как видно из модельных осциллограмм, выброс напряжения искрового пробоя появляется на выходном электроде УУ, транзисторах и в промежуточных точках. Поэтому желательно иметь как минимум две основные точки защиты: одну непосредственно на выходе, а другую у транзисторов. Для этого параллельно транзисторам устанавливаются безынерционные с малоиндуктивным монтажом защитные стабилитроны или варисторы. Допустимо включение последовательно с включёнными параллельно транзистором и варистором небольших индуктивностей. При использовании транзисторов на напряжение сток–исток 1 кВ при питающем напряжении до 200 В выброс напряжения сток–исток не должен превышать 500 В. Как известно, импульсное напряжение на соединённых последовательно паразитных емкостях делится обратно про-

порционально значениям этих емкостей. Поэтому желательно иметь минимально возможное значение электрической ёмкости силового разделительного трансформатора питания собственных нужд T_2 , T_3 , а значение паразитной электрической ёмкости формирователя напряжения запирающего 3, 4 (рис. 4) сравнительно большого значения, но чтобы не нарушалась работоспособность УУ. В этом случае практически всё напряжение пробоя выделится между сетевой и выходной обмотками высоковольтного разделительного трансформатора T_2 , T_3 , рассчитанного на полное рабочее напряжение.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментальных исследований УУ разработан высоковольтный стенд. Принципиальная электрическая схема стенда приведена на рис. 6. Испытания искровым разрядом проводятся в импульсном режиме с большой скважностью. В качестве нагрузки УУ используется непосредственно сопротивление участка управляющий электрод–катод ЭЛВ, а в качестве физической модели нагрузки (R_H) сам ЭЛВ. Электрофильтр обладает сравнительно большим активным сопротивлением. Для его моделирования используется набор безындуктивных резисторов ТВО-20, обеспечивающих анодный ток от 0,2 до 2 А. Регулируемое по амплитуде и длительности маломощное импульсное напряжение высоковольтного имитатора искровых пробоев подаётся от отдельного блока и регистрируется с помощью высоковольтного делителя и цифрового

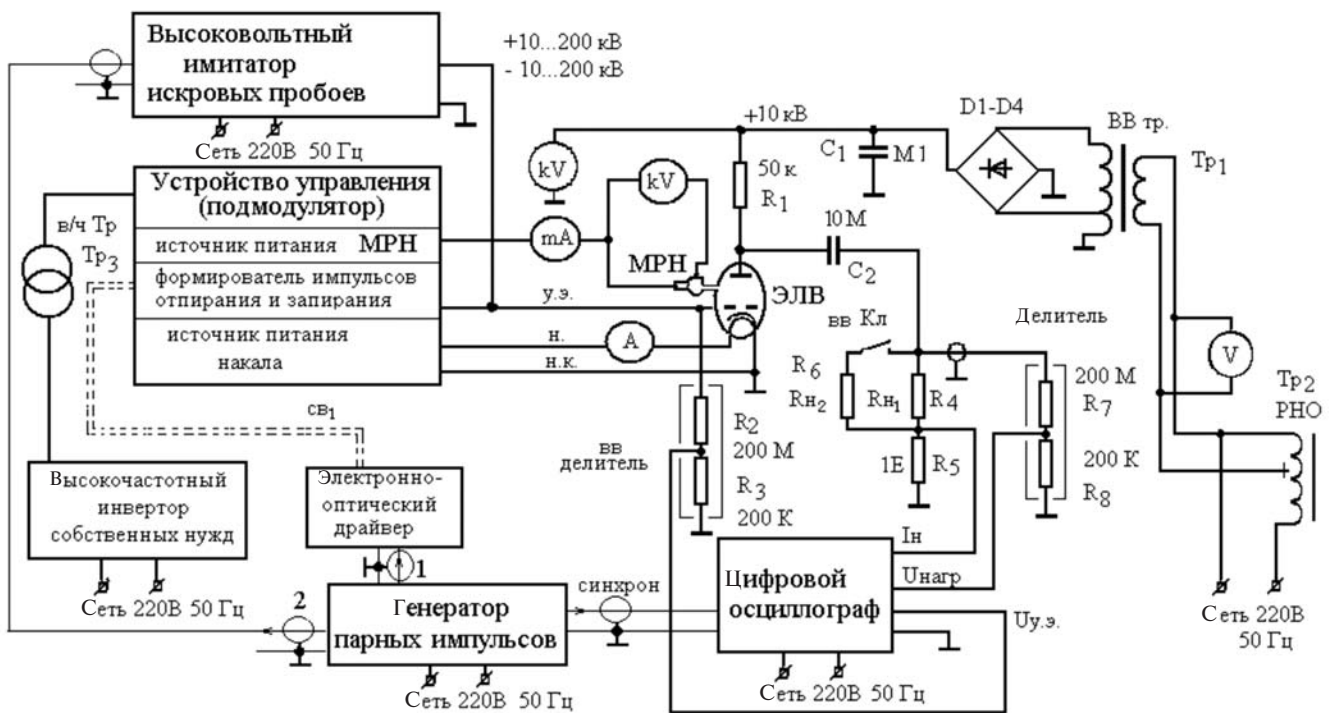


Рис. 6. Структурно-электрическая схема стенда для испытания УУ: CB_1 – световод; Tr_1 – высоковольтный трансформатор питания стенда; Tr_2 – регулятор напряжения однофазный; в/ч Tr_3 – развязывающий силовой трансформатор собственных нужд

осциллографа с граничной частотой усиления 100, 250 МГц.

В состав стенда входят: регулируемый источник анодного напряжения ЭЛВ на напряжение 0, 10 кВ, ток до 0,2 А, ограничительный резистор до 50 кОм, емкостный накопитель промежуточного звена (конденсатор связи) ёмкостью до 10 мкФ на напряжение до 20 кВ, испытываемое УУ, формирующее управляющее напряжение отпирания 2, 6 кВ, запирающего $-0,5$, -1 кВ, разделительный развязывающий высокочастотный трансформатор собственных нужд на рабочее напряжение развязки, например до 40 кВ, высокочастотный инвертор собственных нужд. Высокое анодное напряжение ЭЛВ ограничивается амплитудой +10 кВ, что позволяет проводить исследование УУ без опасности возникновения рентгеновского излучения, одновременно существенно снижается уровень опасности при работе с высоким напряжением. Стационарные амплитуды напряжений измеряются с помощью штатных киловольтметров, а импульсные амплитуды напряжений и токов – с помощью цифрового осциллографа, например GDS 820S, и высоковольтного делителя, например Tektronix P6015A на 20 кВ постоянного и 40 кВ импульсного напряжения при максимальной частоте 75 МГц. Следует иметь в виду, что при напряжении более 15 кВ на электродах схемы начинают возникать коронные разряды, которые не только снижают точность измерений, но и представляют опасность для оператора.

Исследование на помехоустойчивость УУ, т.е. исследование вредного влияния импульсного воздействия высокого напряжения, эквивалентного искровому пробое, осуществляемому путём подачи отпирательного и запирающего импульсов от высоковольтного импульсного трансформатора, первичная обмотка которого коммутируется с помощью вакуумного управляемого разрядника, например РВУ-20.

Стенд работает следующим образом: при подаче высокого напряжения через зарядный резистор заряжается основной (C_1) и промежуточный (C_2) – емкостные накопители до напряжения источника постоянного питания (0, +20 кВ). Другой конец накопителя C_2 подключён к нагрузке, которая находится под рабочим напряжением. При подаче от УУ импульса управления вентиль открывается и через него от источника питания через ЭЛВ проходят два тока: основной от емкостного накопителя C_2 и паразитный от C_1 через R_1 . Затем ЭЛВ запирается. Практически паразитный ток выбирается равным 1–2% основного при скважности более 100.

От имитатора искровых пробоев постепенно, по нарастающей, могут подаваться высоковольтные импульсы с дискретной длительностью 0,1, 1 мкс

амплитудой до 40 кВ как положительной, так и отрицательной полярности. При проведении исследований на напряжение более 40 кВ необходимо заменить не только импульсный делитель на более высоковольтный (или ввести предварительное скомпенсированное высоковольтное деление измеряемого напряжения), но и использовать дополнительную защиту от высокого напряжения и рентгеновского излучения персонала и оборудования.

Выводы. 1. Исследование УУ на помехоустойчивость показало, что устойчивость к высоковольтному импульсу помехи инверторного типа выше, чем коммутационного. Минимальная длительность фронта и среза которую можно получить на выходе НН коммутационного типа около 1 мкс, а инверторного, на основе двух высокочастотных инверторов до 20 мкс.

2. Повысить помехоустойчивость УУ можно:

при включении последовательно с высоковольтным коммутирующим ЭЛВ высоковольтного, с малым сопротивлением, резистора, ограничивающего амплитуду тока искрового пробоя анода на управляющий электрод;

подключении дополнительно между выходом УУ и управляющим электродом ЭЛВ П-образного фильтра нижних частот, содержащего два конденсатора и индуктивность;

поочерёдном дополнительном включении и отключении источников питания инверторов, формирующих напряжение запирающего и отпирания;

использовании безынерционных защитных стабилитронов или варисторов в цепях транзисторов и выходных трансформаторов.

3. С помощью схемотехнической программы EWB можно предварительно оценить устойчивость не только УУ, но и любого схемотехнического устройства к воздействию высоковольтной импульсной помехи.

4. Окончательную проверку устойчивости устройства к искровым высоковольтным пробоям можно осуществить с помощью испытательного стенда и импульсного имитатора, формирующего напряжение, аналогичное возникающему при искровом пробое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на изобретение № 2291000. Устройство для питания электрофильтра (варианты) / А.В. Щербаков. – БИ, 2007, № 1.

2. Переводчиков В.И., Щербаков А.В., Трухачёв И.М., Ефанов М.М. Особенности создания источников знакопеременного питания перспективных высоковольтных электрофильтров на напряжение более 130 кВ. – Электрические станции, 2013, № 5, с. 45–49.

3. Щербаков А.В., Сухов А.В., Корунов Н.И., Трухачев И.М. Высоковольтный высокочастотный униполярный коммутатор на основе электронно-лучевого вентиля. – Электро, 2009, № 1, с. 34–38.

4. **Патент** на полезную модель № 104793 от 09 июня 2010 г. Высоковольтный статический компенсатор напряжения / К.Н. Корунов, Н.В. Матвеев, В.И. Переводчиков, Ю.К. Розанов, А.В. Сухов, И.М. Трухачев, А.В. Щербаков, В.Н. Шапенко, Р.Н. Шульга.

5. **Патент** на полезную модель № 95434 от 27 июня 2010 г. Многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) / Н.В., Матвеев, В.И. Переводчиков, Ю.К. Розанов, А.Р. Шульга, Р.Н. Шульга, А.В. Щербаков.

6. **Патент** на изобретение RU 2432659 от 03.11.2009. Система автоматического управления многофункциональным энергетическим комплексом/Н.В. Матвеев, В.И. Переводчиков, Ю.К. Розанов, А.Р. Шульга, Р.Н. Шульга, А.В. Щербаков.

7. **Щербаков А.В.** Высоковольтный источник знакопеременного питания со следящей системой управления. – Электротехника, 2013, № 9, с. 2–9.

[09.09.14]

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No.2, pp. 22–30.

The Semiconductor Device for Control of a High-Voltage Vacuum Tube

A.V. SHCHERBAKOV and M.M. EFANOV

The use of high-voltage vacuum tubes (HVVTs) for process needs in switching high voltages (up to 200 kV) in impulse, quasi steady-state, and steady-state modes on a periodically flashed over unsteady load generates the need to construct reliable semiconductor control devices (CDs) and submodulator operating at the cathode potential, which ensure operability of the switching device when a spark breakdown occurs. Two types of semiconductor CDs of switching and inverter types are developed for HVVTs relating to the category of an electron-beam valve for second and microsecond pulse duration and output voltages from -1 to +6 kV and currents in the range 0.1-1.0 A. The minimal front and tail duration of the output impulse is 1.0 μs for a switching type CD and up to 100 μs for an inverter-type CD; the control impulse duration is not limited. In the EWB program, a procedure is proposed for computer-aided investigation of the processes occurring in the CD electrical circuit when the output terminals experience the effect of high-voltage impulse interference, which is an analog of spark breakdown with amplitude of up to 200 kV and current up to 1 kA.

Key words: semiconductor control device, high-voltage impulses, stability simulation

REFERENCES

1. **Patent** na izobreteniyе No. 2291000. *Ustroystvo dlya pitaniya elektrofilitra (varianty)* (Patent for Invention No. 2291000. A device for current supply of electric filter (variations))/A.V. Shcherbakov. Bulletin, 10.01.2007, No. 1.

2. **Perevodchikov V.I., Shcherbakov A.V., Trukhachev I.M., Efanov M.M.** *Elektricheskiye stantsii (Electrical Stations)*, 2013, No. 5, pp. 45–49.

3. **Shcherbakov A.V., Sukhov A.V., Korunov N.I., Trukhachev I.M.** *Elektro (Electro)*, 2009, No. 1, pp. 34–38.

4. **Patent** na poleznuyu model' No. 104793 ot 27.06.2010. *Ysvokovol'tnyy staticheskiy kompensator napryazheniya* (Utility patent No. 104793, 27 Yune 2010. High-voltage static voltage compensator)/K.V. Korunov, N.V. Matveyev, V.I. Perevodchikov,

А в т о р ы : Щ е р б а к о в А л е к с а н д р В л а д и м и р о в и ч окончил радиотехнический факультет Московского электротехнического института связи в 1969 г. В 2010 г. защитил докторскую диссертацию «Научно-технические основы создания систем питания высоковольтных устройств пыле- и газоочистки на основе электронно-лучевых вентилей и газоразрядных приборов» во Всероссийском электротехническом институте им. В.И. Ленина (ВЭИ). Начальник отдела ВЭИ.

Е ф а н о в М и х а и л М и х а и л о в и ч окончил факультет электронной техники Московского энергетического института в 1992 г. Главный специалист отдела ВЭИ.

Yu.K. Rosanov, A.V. Sukhov, I.M. Trukhachev, A.V. Shcherbakov, V.N. Shapenko, R.N. Shul'ga.

5. **Patent** na poleznuyu model' No. 95434. *Mnogofunktsional'nyi energeticheskii kompleks (MEK)* (Utility patent No. 95434. Multifunctional energy complexes (MEC))/ N.V. Matveyev, V.I. Perevodchikov, Yu.K. Rozanov, A.R. Shul'ga, A.V. Shcherbakov. Bulletin, 2010, No. 18.

6. **Patent** na izobreteniyе RU No. 2432659. *Sistema avtomaticheskogo upravleniya mnogofunktsional'nym energeticheskim kompleksom* (Patent for Invention RU No. 2432659. Automatic control system of multifunctional energy complex)/N.V. Matveyev, V.I. Perevodchikov, Yu. K. Rozanov, A.R. Shul'ga, R.N. Shul'ga, A.V. Shcherbakov, 03.11.2009.

7. **Shcherbakov A.V.** *Elektrotehnika (Electrical Engineering)*, 2013, No. 9, pp. 2–9.

Authors: Shcherbakov Aleksandr Vladimirovich (Moscow, Russia) – Doctor Techn. Sci., Chief Scientific Researcher, Head of the Department, All-Russia Institute of Electrical Engineering (ARIEE).

Efanov Mikhail Mikhailovich (Moscow, Russia) – Chief Specialist of the Department, ARIEE.

