

УДК 621.039.555: 621.376.5: 681.332

Импульсный высоковольтный модулятор с частичным разрядом емкостного накопителя

А.В. Щербаков

Щербаков Александр Владимирович — доктор технических наук, начальник отдела Всероссийского электротехнического института (Москва), e-mail: avshcherbakov@vei.ru

Для стационарных импульсных высоковольтных устройств, когда нет жестких требований по массогабаритным показателям, модулятор с частичным разрядом емкостного накопителя может быть конкурентоспособным модулятору с полным разрядом емкостного накопителя. Коммутатор должен быть «жестким» по управлению, иметь малое прямое падение напряжения на открытом приборе, термокатод, работающий в режиме пространственного заряда, должен обеспечивать заданную длительность импульса и частоту повторения. Использование в качестве «жесткого» коммутатора новых высоковольтных модуляторных ламп, электронно-лучевых вентилях с малыми потерями мощности на аноде и высокопереваянными электронно-оптическими системами, например типа ЭЛВ 50/100, позволяют создавать последовательные или параллельные схемы модуляторов мощностью более 1 МВт вполне конкурентоспособные схемам, созданным на основе соединенных последовательно большого количества сравнительно низковольтных полупроводниковых коммутаторов.

Параметры импульсов, сформированных таким модулятором, при правильном расчете, согласно общеизвестным методикам, в широких пределах практически не зависят от изменения величины активного сопротивления нагрузки, а сами силовые схемы не боятся воздействия любого вида внешнего электромагнитного или рентгеновского излучения. Рассматриваются две основные схемы построения модуляторов: параллельная, формирующая импульс отрицательной полярности, и последовательная, формирующая импульсы как положительной, так и отрицательной полярности. Нагрузка модуляторов должна иметь активное сопротивление, не менее чем в 10 раз превышающее сопротивление анод-катод открытого коммутатора. Для возможности оперативного и наглядного определения предельных значений режимов работы коммутаторов, сопротивления нагрузки и оптимизации номиналов электротехнических элементов модулятора проводится компьютерное моделирование электрической схемы в программе EWB.

Ключевые слова: импульсный модулятор с частичным разрядом емкостного накопителя, параллельная и последовательная схемы формирования импульсов, компьютерное моделирование электрических схем модуляторов.

A Pulsed High-Voltage Modulator with Partial Discharge of the Storage Capacitor

A.V. Shcherbakov

Shcherbakov Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Department of the All-Russian Electrotechnical Institute (Moscow), e-mail: avshcherbakov@vei.ru

For stationary high-voltage pulsed devices, which do not necessarily have to comply with stringent requirements for their weight and dimensions, a modulator with partial discharge of the capacitive storage can be competitive to a modulator with complete discharge of the capacitor. The switch shall be rigidly controlled and have a low forward voltage drop on the open device; the thermionic cathode operating in the space charge mode shall ensure the specified pulse duration and repetition rate. With the new high-voltage modulator tubes, electron-beam valves featuring small power losses at the anode, and high-perveance electro-optical systems, for example, an EBV 50/100 system, used as a “rigid” switch, it becomes possible to design series or parallel modulator circuits with a capacity of more than 1 MW, which are quite competitive to the schemes synthesized based on a large number of series-connected relatively low-voltage semiconductor switches.

If properly calculated using well-known techniques, such a modulator can generate pulses the parameters of which are almost independent on the load resistance varying in a wide range, and the power circuit themselves are insensitive to the effect of any external electromagnetic or X-ray radiation. Two basic modulator circuit arrangements are considered: a parallel one, which generates a negative polarity pulse, and a series one, generating pulses of both positive and negative polarity. The modulator's load resistance shall be no less than 10 times the anode-cathode resistance of the open switch. For the possibility of determining, in a prompt and vivid manner, the limit values of the switch operating mode and the load resistance, and for optimizing the modulator's nominal electrical parameters, the electric circuit is simulated on a computer using the EWB program.

Key words: pulse modulator with partial discharge of the storage capacitor, parallel and series pulse generating circuits, computer simulation of modulator electrical circuits.

Высоковольтный импульсный модулятор (ИМ) — устройство, предназначенное для обеспечения питанием силовым высоковольтным импульсным напряжением нагрузки, например, генератора ультравысокочастотных (УВЧ) или сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний для технологических или специальных целей [1]. Длительность выходных импульсов в зависимости от назначения, может быть в интервале от 2 мкс до 100 с, при частотах повторения от 100 ... 0,01 Гц и рабочих напряжениях на нагрузке от 4 ... 100 кВ. Наиболее универсальный по применению модулятор с частичным разрядом емкостного накопителя, практически не чувствительный к изменению формы импульса в большом диапазоне изменения сопротивления нагрузки. В этом случае используется только «жесткий» (полностью управляемый по управляющему электроду) коммутатор.

В ИМ могут использоваться как вакуумные, так и полупроводниковые высоковольтные коммутаторы. При использовании вакуумных приборов при скважности $S > 100$ импульсный режим работы оксидного термокатода, характеризующийся большим значением импульсного тока, постепенно переходит в «квазистационарный», характеризующийся постепенным снижением амплитуды импульсного тока до уровня стационарного. Развитие высоковольтной вакуумной техники шло в направлении создания новых ламп — электронно-лучевых вентилях (ЭЛВ), обладающих существенно повышенным анодным напряжением, амплитудой постоянного и импульсного токов катода, уменьшением падения напряжения анод-катод во время коммутации, уменьшением массогабаритных показателей на единицу коммутируемой мощности, повышением электрического КПД. ЭЛВ по конструкции — триод, однако имеет пентодную вольт-амперную характеристику, характерную для пентодов, ламп с дополнительными управляющими электродами (сетками). Для повышения плотности тока в электронно-оптической системе (ЭОС) используются ленточные катоды, установленные в щелевые ЭОС, имеющие высокое значение перваанса — основной характеристики влияния объемного заряда на пучок заряженных частиц, определяемого как отношение тока пучка частиц к эквивалентному ускоряющему напряжению в данной точке в степени $3/2$ (мА/В $^{3/2}$). Для снижения падения напряжения на участке анод-катод используется специальная конструкция анода, в которой обеспечивается рекуперация энергии падающего электронного пучка за счет его электростатического торможения в полой аноде (коллекторе). В результате были разработаны высоковольтные вентили, у которых прямое падение напряжение насыщения (анод-катод) — около 1...2 кВ при 100 кВ анодного питания (при максимальном импульсном токе 500 А). При этом сопротивление коммутации $R_{\text{ком}}$, определяемое как частное от деления падения напряжения анод-катод на коммутируемый ток 1...2 кВ/500 А,

составляет около $R_{\text{ком}} = 2...4$ Ом. Падение напряжения коллектор-эмиттер множества соединенных последовательно высоковольтных транзисторов имеет приблизительно то же значение. Максимальная частота повторения импульсов, коммутируемых этим ЭЛВ, определяется как обратная величина значения периода повторения импульсов при выбранной длительности (но не более 10 мкс), при которой сохраняется режим работы катода в режиме пространственного заряда. Практически это 500 мкс, соответственно она составляет $F = 2$ кГц. При снижении длительности импульса частота повторения пропорционально возрастает.

Количество включенных последовательно транзисторов должно, как минимум, на 30...40 % обеспечивать превышение суммарного рабочего напряжения. Например, для получения напряжения коммутации не менее 100 кВ требуется последовательное соединение транзисторов (напряжение каждого 1,5 кВ) в количестве 100 шт. При рабочем напряжении в высоковольтном блоке каждого транзистора, равном 1 кВ, будет иметь место падение напряжения $(3,5...4)100 = 350...400$ В, без учета падения напряжения на последовательно включенных вспомогательных элементах схемы каждого транзисторного модуля. Сопротивление коммутатора такого полупроводникового блока ИМ при токе 100 А — около $R = 400/100 = 4$ Ом, что соизмеримо с ЭЛВ.

В последние годы разработаны и выпускаются малыми партиями вентили типа ЭЛВ 2/200 (постоянный ток 2 А, импульсный — до 10 А, напряжение анод-катод 200 кВ, коммутируемая мощность до 200 кВт), ЭЛВ 4/40 (постоянный ток 8 А, импульсный — до 80 А, напряжение анод-катод 50 кВ, коммутируемая мощность до 400 кВт) и ЭЛВ 50/100 (постоянный ток 50 А, импульсный — до 500 А, напряжение до 100 кВ, коммутируемая мощность до 5 МВт) [2—4]. ЭЛВ имеют жидкостную или жидкостно-воздушную систему охлаждения анода и управляющего электрода. Предельное значение любого тока лампы ограничивается током насыщения катода. Скорость нарастания тока через прибор (di/dt) ограничивается паразитными емкостями управляющий электрод — катод и выходными характеристиками подмодулятора (ПМ), устройства, формирующего все рабочие потенциалы на электродах, а также обеспечивающего усиление и гальваническую развязку управляющего потенциала.

Кратковременное (доли микросекунды) превышение анодного напряжения выше предельно допустимого может привести к обратимому пробоя (искрению). После такого пробоя практически все свойства ЭЛВ полностью восстанавливаются.

Транзисторы, используемые в качестве коммутаторов в ИМ, не имеют такой способности, как лампы — ограничение предельно значения коммутируемого тока осуществляется током насыщения. Поэтому последовательно в цепь коллектор-эмиттер (или сток-исток)

необходимо включать устройство, ограничивающее предельное значение тока, особенно при формировании фронта. Рабочее или вызванное помехой превышение скорости нарастания тока через прибор (di/dt) более предельно допустимого значения приводит к пробую транзистора. Иногда параметр характеризуется как предельная рабочая частота. Чем выше значение этой частоты, тем с большей крутизной тока допускается коммутация. Повышение напряжения или крутизны нарастания (du/dt) на любом из электродов транзистора выше предельно допустимого также может привести к необратимому пробую. Обычно чем больше мощность и предельное значение рабочего напряжения транзистора, тем хуже его частотные характеристики.

Например, отечественный биполярный транзистор КТ8192А имеет напряжение на коллекторе до 1500 В при токе 30...50 А, времени спада 0,5 мкс, прямом напряжении насыщения $U_{к.нас} \leq 3...4$ В. Перспективные приборы серии MOSFET модулей 2МП414АС – 2МП414 УС на импульсные токи 50 ... 500 А при максимальном напряжении до 1700 В имеют время выключения менее 0,36 мкс. Приборы выполнены в одноключевом (включая чоппер), полумостовом, мостовом, шестиключевом исполнении (проект ТУ АЕЯР.432170.517 ТУ. Два типа шестиключевых IGBT модулей 2Е414АС6-ЖС6 на токи 100 ... 200 А; 1200 В, при напряжении до 1700 В со встроенными элементами самоконтроля, имеют время выключения не более 0,36 мкс при $U_{к.нас} \leq 2,8...3,5$ В, $I_{к.макс}$. Приборы по конструкции аналогичны корпусам типа Е-9-Pack (IXYS, США), EconoPACKTM (EUPEC, Германия) (проект ТУ АЕЯР.432170.517 ТУ) [5]. Импортный полевой транзистор типа TSD5MG40V при напряжении до 1000 В имеет сопротивление перехода 0,7 Ом при $U_{к.нас} \leq 2,8...3,5$ В, $I_{к.макс} \leq 9$ А [6].

Различают анодные и сеточные ИМ. Например, модулятор для магнетрона обеспечивает полное значение мощности напряжения питания прибора, поэтому называется анодным. Сеточный ИМ имеет значительно меньшую мощность, так как обеспечивает импульсное питание только цепи управляющего электрода.

Анодный ИМ обеспечивает формирование импульсного напряжения отрицательной или положительной полярности относительно заземленного электрода нагрузки с крутизной фронта и среза значительно меньше длительности импульса и минимально возможными пульсациями на вершине импульса. ИМ могут иметь как постоянную длительность импульса, так и оперативно изменяющуюся, устанавливаемую обычно автоматически системой управления по информации от внешних датчиков цепи оперативной обратной связи. Часто конкретное значение длительности импульса, частоты повторения и частоты заполнения определяется при оптимизации воздействия УВЧ/СВЧ излучения на нагрузку.

Основными недостатками такого ИМ по отношению, например к ИМ с полным разрядом емкостного накопителя, при той же выходной мощности, являются:

- большие массогабаритные показатели из-за наличия промежуточного накопительного конденсатора связи, общая емкость которого может в десятки раз превышать суммарную электрическую емкость конденсаторов модулятора с полным разрядом емкостного накопителя, необходимую для получения заданной энергии на нагрузку;

- при использовании ламп при анодных напряжениях более 20 кВ пучок электронов, тормозящийся на аноде, создает сначала «мягкое», а затем, при дальнейшем повышении напряжения, «жесткое» рентгеновское излучение, для защиты от которого требуется наличие экрана, что также повышает массогабаритные показатели;

- применение лампы требует наличия цепей накала, что приводит к дополнительной потере мощности и увеличивает время готовности к работе;

- ИМ на основе лампового коммутатора (по сравнению с ИМ на основе полупроводникового коммутатора) имеет меньшую вибро- и ударную устойчивость.

Преимущества по отношению к ИМ с полным разрядом емкостного накопителя:

- малая чувствительность изменения формы импульса на нагрузке при изменении величины ее сопротивления;

- возможность оперативного изменения длительности импульса, в том числе под нагрузкой;

- амплитуда напряжения на нагрузке практически совпадает с амплитудой напряжения анодного питания;

- применение автоматической коррекции амплитуды импульса под нагрузкой путем изменения потенциала управляющего электрода позволяет уменьшить электрическую емкость конденсатора связи;

- если используется лампа, то имеет место высокая устойчивость силовой схемы модулятора к внешнему радиационному воздействию как СВЧ, так и рентгеновского диапазона;

- при использовании лампы имеет место повышенная устойчивость к воздействию высоких температур (до 300 °С), что позволяет снизить массогабаритные показатели системы охлаждения;

- при использовании лампы путем экстраполяции потери эмиссионной способности катода можно с хорошей точностью прогнозировать время планово-предупредительного ремонта (ППР) не дожидаясь отказа.

Выбор того или иного типа модулятора, согласно техническому заданию (ТЗ), осуществляется на этапе конструкторской проработки, назначения и места установки.

При построении ИМ с частичным разрядом емкостного накопителя используют в основном два типа построения электрических схем: параллельные и по-

следовательные. Рассмотрим схемы ИМ на основе модуляторных ламп. Схемы на транзисторах аналогичны, но имеют дополнительные силовые электротехнические элементы для каждого транзистора, обеспечивающие уравнивание фронтов включения множества соединенных последовательно полупроводниковых приборов, а также падения напряжения в момент включения и отключения этих приборов. Применение любого типа уравнивающих устройств снижает частотные характеристики полупроводниковых коммутаторов в заданном диапазоне рабочих температур до уровня наихудшего прибора.

Наиболее распространена параллельная схема анодного ИМ [7, 8] с заземленным катодом модуляторной лампы и заземленным анодом нагрузки (рис. 1), например для питания магнетронов, ламп бегущей волны (ЛБВ) и других аналогичных приборов СВЧ диапазона.

Потенциал электрической схемы ПМ находится практически на потенциале земли, а ее выходной электрод — на потенциале управляющего электрода лампы.

Последовательная схема ИМ более универсальна, но сложнее в конструкторской реализации [9]. Один электрод нагрузки заземлен. Анод, катод и ПМ нахо-

дятся на высоком потенциале относительно потенциала земли (рис. 2).

В первом типе схемы ПМ, или адаптер, находится на рабочем потенциале коммутируемого напряжения. При последовательной схеме подключения управляющая часть ПМ или адаптера, связана с системой управления через высоковольтную развязывающую цепь. Это высокочастотный (или импульсный) высоковольтный разделительный трансформатор. Наиболее предпочтительна высоковольтная световодная оптронная развязка, обладающая значительно лучшими частотными характеристиками и помехоустойчивостью.

В ламповом ИМ для исключения выхода в окружающее пространство рентгеновского и другого вида излучения, превышающего допустимые санитарные нормы, для коммутаторов предусматриваются защитные стальные или свинцовые экраны.

Использование импульсного трансформатора (ИТ) целесообразно, если рабочее напряжение на нагрузке превышает допустимое напряжение коммутатора. ИТ, как правило, ухудшает электрический КПД схемы, снижает надежность, увеличивает массогабаритные показатели, а также ухудшает первоначально полученные на его первичной обмотке параметры фронта, среза и

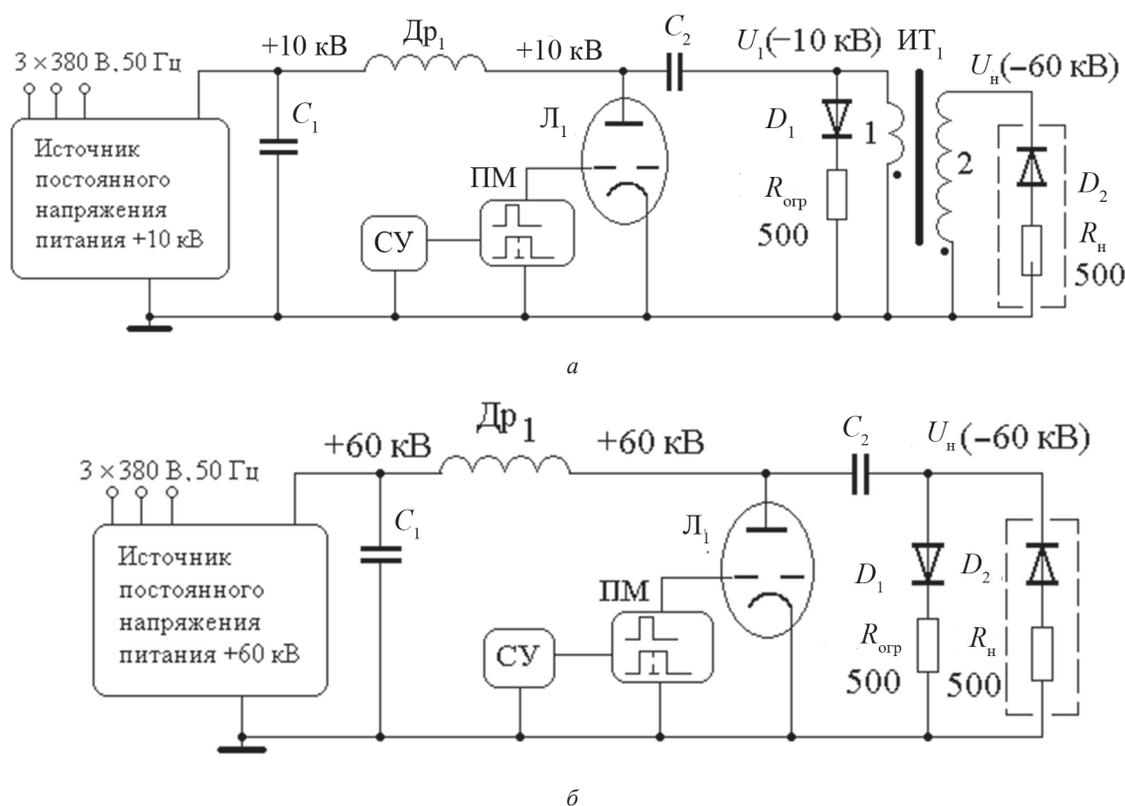


Рис. 1. Параллельные схемы подключения модуляторной лампы:

a — трансформаторная; *b* — бестрансформаторная; C_1 — первичный накопитель; C_2 — вторичный накопитель; Dr_1 — зарядный дроссель; ПМ — подмодулятор; СУ — система управления алгоритмом работы; L_1 — коммутаторная лампа; D_1 — обратный диод; $R_{орп}$ — ограничительный резистор; D_2 — диод, характеризующий вентильный характер нагрузки; $R_н$ — активное сопротивление нагрузки

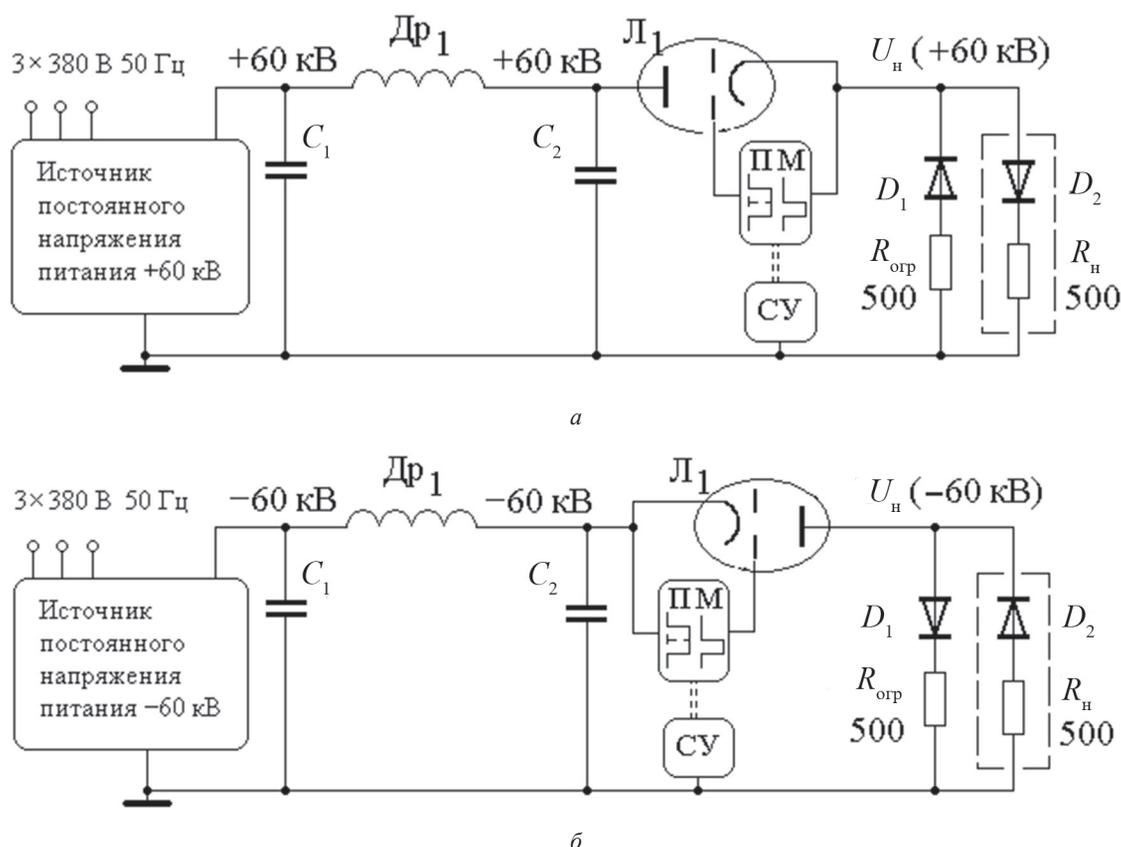


Рис. 2. Последовательная схема подключения модуляторной лампы в ИМ, формирующий на нагрузке импульс полярности:

a — положительной; *б* — отрицательной

пульсации на вершине. При увеличении длительности импульса увеличиваются его массогабаритные показатели. Однако применение ИТ позволяет получить несколько гальванически развязанных, синфазных импульсных напряжений различной амплитуды и полярности, например при подключении ЛБВ.

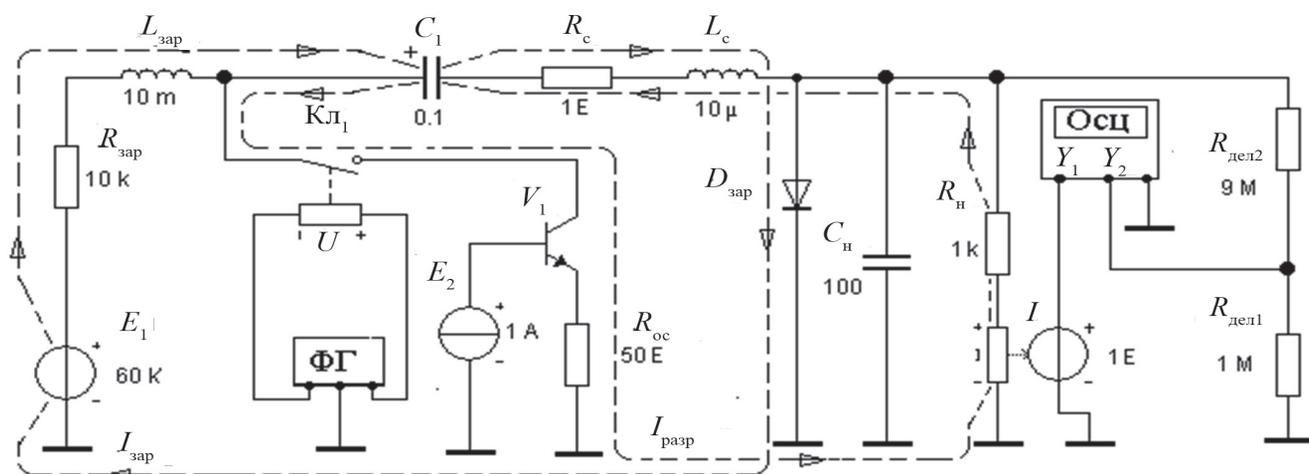
Охлаждение коммутатора модулятора — воздушное или, как правило, комбинированное жидкостно-воздушное. Основная частота первичной сети электропитания модулятора — 50...60 Гц. В случае использования для питания сетевого высокочастотного инверторно-выпрямительного источника питания на промежуточной частоте — около 12...30 кГц, существенно уменьшаются массогабаритные показатели и появляется возможность плавного регулирования высокого напряжения источника питания, в том числе под нагрузкой.

Компьютерная оптимизация номинальных значений комплектующих элементов электрической схемы ИМ — это современный инструмент, позволяющий существенно снизить себестоимость разработки.

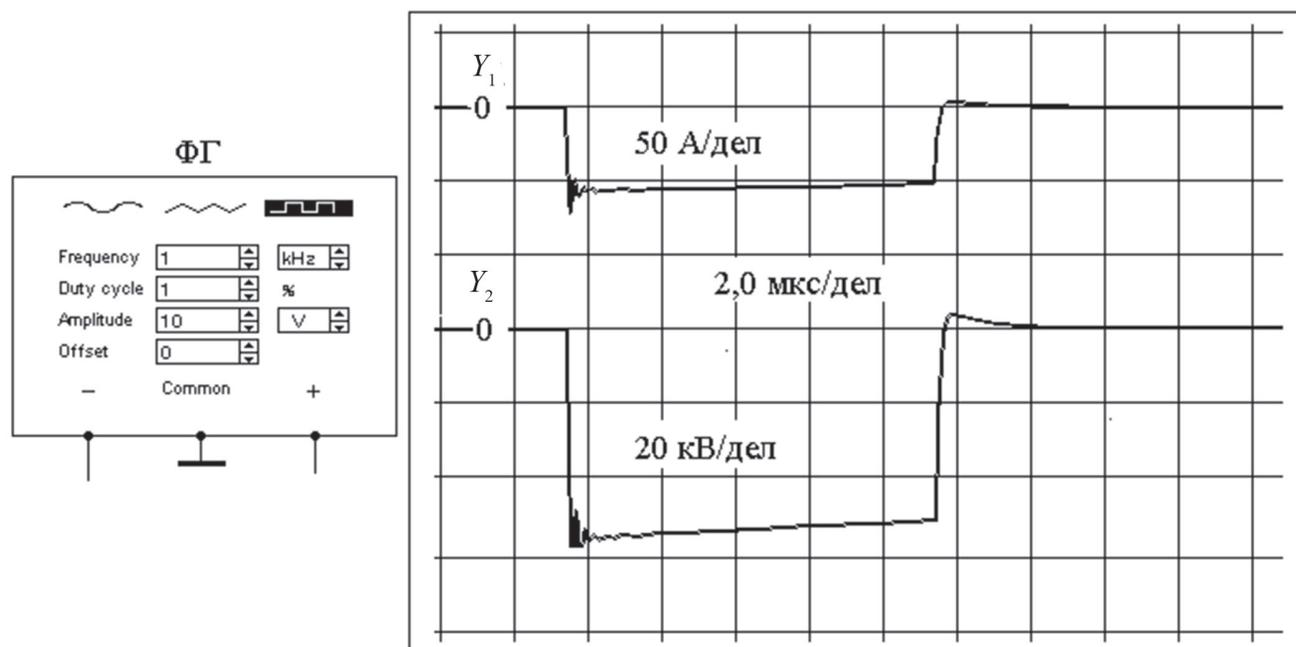
Цель оптимизации — выбор электрических параметров комплектующих, обеспечивающих сохранение оптимальной формы импульса при изменении величины нагрузки или температуры. Схематехническое компьютерное моделирование электрической схемы ИМ проводится, например в программе EWB. В этой

программе в качестве модели, например лампы ЭЛВ 50/100, используется схематехническая цепочка, содержащая линейные и нелинейные схематехнические элементы, позволяющие проводить полную идентификацию режима работы ЭОС в силовой схеме с учетом пентодной вольт-амперной характеристики [10].

На рис. 3 представлена модельная схема анодного ИМ с частичным разрядом емкостного накопителя на основе «жесткого» коммутатора, собранного по параллельной схеме. Режим работы элементов схемы характеризуется модельной осциллограммой напряжения и тока нагрузки. При моделировании оптимизируются типы основных электрических комплектующих схемы, а также параметры коммутатора, влияющие на фронт, срез, скол вершины импульса. Определяется падение напряжения на открытом коммутаторе. Чем меньше паразитные емкости коммутатора, его цепей управления (их значение вводится в модельную схему) и больше анодный ток, тем меньше длительность фронта и среза. На рис. 3 приведены также параметры виртуального осциллографа: развертка по оси X и цена деления по двум осям вертикального отклонения — Y_1 и Y_2 . Для регулирования длительности импульса может быть использован виртуальный штатный функциональный генератор (ФГ). Изменяя его параметры, скважность,



а



б

Рис. 3. Схема анодного ИМ параллельного типа:

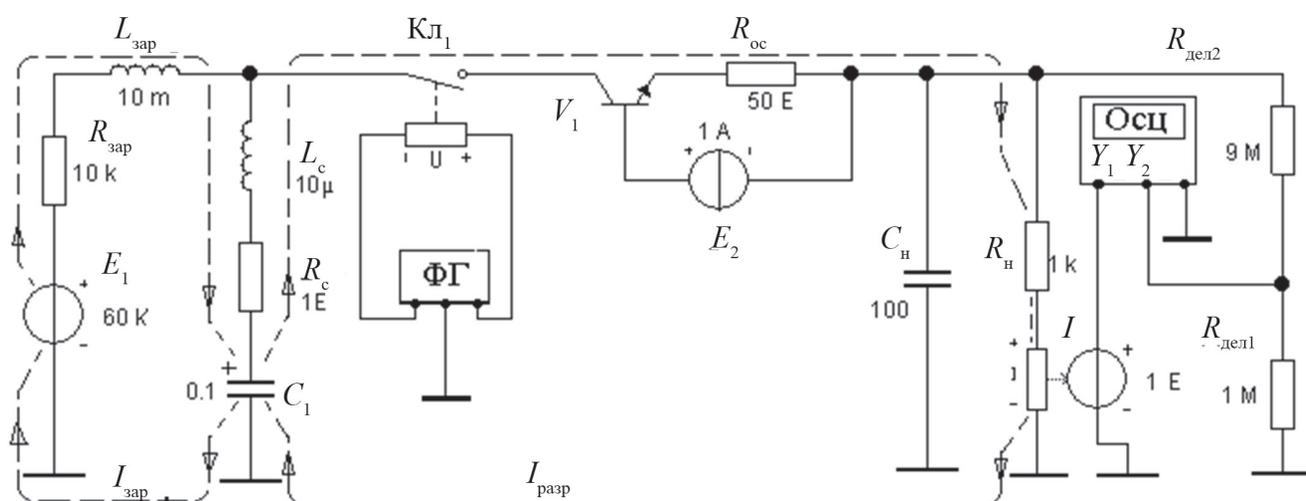
а — модельная схема; б — модельная осциллограмма и режим работы ФГ; Y_1 — ток нагрузки; Y_2 — напряжение на нагрузке; E_1 — внешний источник силового постоянного напряжения питания; E_2 — виртуальный вспомогательный источник тока; ФГ — функциональный генератор; C_1 — силовой конденсатор связи; C_n — паразитная емкость нагрузки; $R_{зар}$ — зарядный резистор; R_c — активное сопротивление электрической цепи конденсатора связи; $R_{ос}$ — вспомогательный резистор обратной связи; R_n — сопротивление нагрузки; $R_{дел1}$ — сопротивление нижнего плеча делителя; $R_{дел2}$ — сопротивление верхнего плеча делителя; $L_{зар}$ — зарядная индуктивность; L_c — паразитная индуктивность электрической цепи конденсатора; I — виртуальный измеритель тока; Осц — импульсный виртуальный осциллограф

выраженную в процентах, и частоту импульсного напряжения прямоугольной формы F , можно оперативно изменять параметры формируемого выходного силового импульса ИМ путем изменения времени включения и отключения вспомогательного реле $КЛ_1$. При моделировании используется ждущий режим работы виртуального осциллографа Осц. Вспомогательные элементы: транзистор V_1 , источник тока E_2 , активное сопротивление $R_{ос}$ — моделируют пентодность вольт-

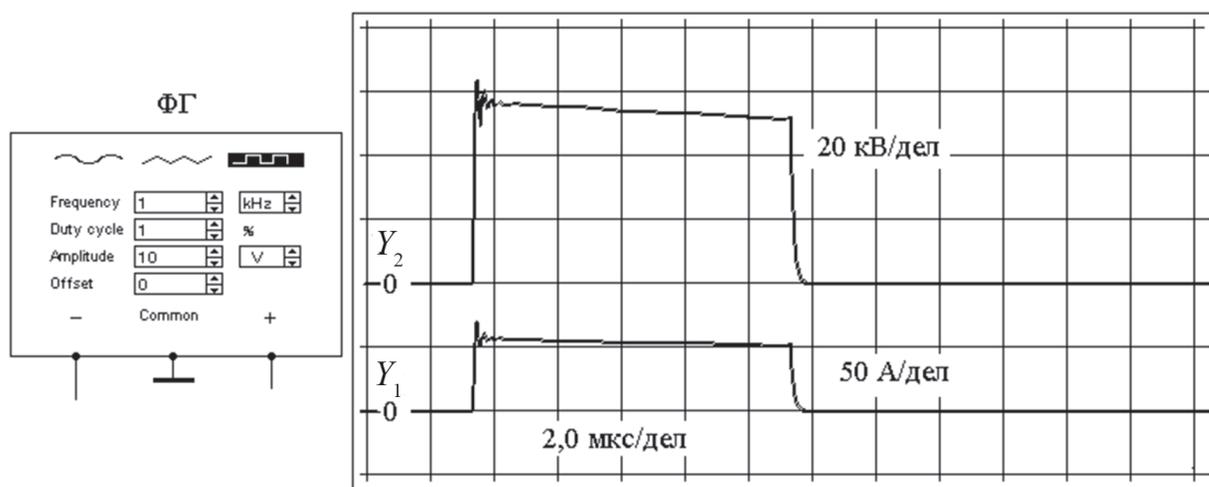
амперной характеристики коммутатора. Пунктиром указаны направления зарядных ($I_{зар}$) и разрядных ($I_{разр}$) токов емкостного накопителя (конденсатора связи C_1).

На рис. 4 представлена модельная схема анодного ИМ последовательного типа с частичным разрядом емкостного накопителя, формирующая на нагрузке импульс положительной полярности.

Изменение масштаба развертки в сторону уменьшения позволяет определить крутизну нарастания тока



а



б

Рис. 4. Схема анодного ИМ последовательного типа:

а — модельная схема; б — модельная осциллограмма и режим работы ФГ.

коммутатора и нагрузки для выбора коммутатора и конденсатора связи. При оптимизации элементной базы в модельную схему подставляются наиболее вероятные значения паразитных емкостей, индуктивностей, сопротивлений. В результате оптимизации определяются параметры, а по ним типы электротехнических элементов, которые при минимальной стоимости обеспечивают выполнение заданных выходных параметров импульса на нагрузке.

Итак, можно сделать следующие выводы.

Электрическая схема ИМ на основе «жесткого» коммутатора с частичным разрядом емкостного накопителя большой электрической емкости позволяет получить амплитуду импульса напряжения на нагрузке, близкую к напряжению источника питания.

Параметры напряжения на нагрузке у анодного ИМ с частичным разрядом емкостного накопителя более стабильны в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки.

Применение высоковольтной лампы, например ЭЛВ на полное рабочее напряжение, позволяет использовать бестрансформаторную схему.

Выбор типа коммутатора осуществляется на этапе эскизного проекта, электрические характеристики коммутатора на основе ЭЛВ близки к электрическим характеристикам коммутатора, собранного на основе множества последовательно соединенных транзисторов.

Коммутатор на основе модуляторной лампы, например типа ЭЛВ, имеет высокую устойчивость к воздействию любого вида внешнего электромагнитного или рентгеновского излучения.

Литература

1. Щербаков А.В. Агрегаты питания электрофильтров и реакционных камер на основе электронно-лучевых вентилей // Экологический вестник России. 2010. № 4. С. 52—54; № 5. С. 52—54.

2. **Щербаков А.В.** Электронно-лучевые вентили для высоковольтных импульсных устройств // Электротехника. 2014. Т. 1. № 2. С. 38—43.

3. **Щербаков А.В., Трухачев И.М.** Работа электронно-лучевого вентиля в сильноточных устройствах генерирования УВЧ-колебаний: материалы IX симпозиума «Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики». Истра, 2007.

4. **Переводчиков В.И., Щербаков А.В., Трухачев И.М. и др.** Исследование путей создания преобразователя для энергетики на основе вакуумных ключевых электронных приборов // Электротехника. 2012. № 10. С. 18—24.

5. **Информация** АО ОКБ «Искра».

6. **URL:** http://elwo.ru/publ/spravochniki/moshhnye_importnye_polevye_tranzistory/2-1-0-586

7. **Щербаков А.В.** Система питания и возбуждения генератора УВЧ-излучения: Сб. науч. трудов Высоковольтная вакуумно-плазменная электроника / В.И. Переводчиков, ред. М.: ФГУП ВЭИ, 2008. С. 302—311.

8. **Щербаков А.В.** Перспективные источники знакопеременного и импульсного питания электрофильтра и реакторной камеры // Электро. 2006. № 5. С. 16—20.

9. **Щербаков А.В.** Высоковольтный источник знакопеременного питания со следящей системой управления // Электротехника. 2013. № 9. С. 2—9.

10. **Щербаков А.В.** Компьютерное моделирование силовых высоковольтных импульсных схем: Сб. докладов Симпозиума «Электротехника 2010», «Травэк». 2006. С. 2—9.

References

1. **Shherbakov A.V.** Agregaty Pitaniya Jelektrofil'trov i Reakcionnyh Kamer na Osnove Elektronno-Luchevykh

Ventilej. *Ekologicheskij vestnik Rossii*. 2010;4:52—54; 5: 52—54. (in Russian).

2. **Shherbakov A.V.** Jelektronno-Luchevye Ventili dlja Vysokovol'tnyh Impul'snyh Ustrojstv. *Elektrotehnika*. 2014; 2(1):38—43. (in Russian).

3. **Shherbakov A.V., Truhachev I.M.** Rabota Jelektronno-Luchevogo Ventilja v Sil'notochnyh Ustrojstvah Generirovanija Uvch-Kolebanij:materialy IX Simpoziuma. «Elektrotehnika 2030. Perspektivnye tehnologii elektroenergetiki». Istra, 2007. (in Russian).

4. **Perevodchikov V.I., Shherbakov A.V., Truhachjov I.M. i dr.** Issledovanie Putej Sozdanija Preobrazovatelja dlja Energetiki na Osnove Vakuumnyh Kljuchevyh Elektronnyh Priborov. *Jelektrotehnika*. 2012;10:18—24. (in Russian).

5. **Informacija** АО ОКБ «Искра».6. (in Russian).

6. **URL:** http://elwo.ru/publ/spravochniki/moshhnye_importnye_polevye_tranzistory/2-1-0-586

7. **Shherbakov A.V.** Sistema Pitaniya i Vozbuzhdenija Generatora Uvch-Izluchenija: Sb. Nauch. Trudov Vysokovol'tnaja vakuumno-Plazmennaja Elektronika / V.I. Perevodchikov red. M.: FGUP VJeI, 2008:302—311. (in Russian).

8. **Shherbakov A.V.** Perspektivnye Istochniki Znakoperemennogo i Impul'snogo Pitaniya Elektrofil'tra I Reaktornoj Kamery. *Elektro*. 2006;5:16—20. (in Russian).

9. **Shherbakov A.V.** Vysokovol'tnyj Istochnik Znakoperemennogo Pitaniya so Sledjashhej Sistemoj Upravlenija. *Elektrotehnika*. 2013;9:2—9. (in Russian).

10. **Shherbakov A.V.** Komp'juternoe Modelirovanie Silovyh Vysokovol'tnyh Impul'snyh Shem: Sb. Dokladov Simpoziuma «Elektrotehnika 2010», «Travjek». 2006: 2—9. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 02.09.2015