

УДК 621.385.049.7.519.876.5

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-55-61

Энергосберегающая методика исследования физической модели высоковольтного инвертора на основе электронно-лучевого вентиля

А.В. Щербаков

В схемах инверторов статических компенсаторов (СТК) используются силовые полупроводниковые приборы (СПП), однако предпринимаются попытки создания промышленных образцов высоковольтных инверторов на основе серийных электровакуумных приборов (ЭВП). Перспективными являются высоковольтные электронно-лучевые вентили (ЭЛВ), имеющие среди ЭВП, благодаря рекуперации пучка на аноде, минимально возможное падение напряжения на участке анод – катод в проводящем состоянии и, по сравнению с СПП, высокую крутизну фронта и среза.

Проведено моделирование ЭЛВ в схемотехнической программе EWB с целью определения минимально допустимого сопротивления нагрузки, при которой ЭЛВ имеет максимальный электрический КПД до 0,99.

Для определения целесообразности создания инверторов необходимы не только теоретические, но и экспериментальные исследования на физических моделях с помощью специальных стендов. Разработан высоковольтный энергосберегающий стенд для испытания ЭЛВ в инверторном режиме в схеме СТК. Питание стенда от сети 3×380 В, 50 Гц. С помощью высоковольтного трехфазного трансформатора напряжение может повышаться до 40 кВ, выпрямляется по схеме Ларионова и, благодаря искусственной средней точки, получается 0...+20 кВ и 0...–20 кВ при максимальном токе до 1 А. Амплитуда напряжения плавно меняется с помощью трехфазного электромеханического регулятора, установленного в первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

Синусоидальное напряжение частотой 50 Гц в инверторном режиме формируется на водяном эквиваленте нагрузки с помощью широко-импульсной модуляции (ШИМ) с тактовой плавно изменяемой частотой 1...3 кГц. С целью повышения уровня испытываемой мощности стенда и энергосбережения введено стробирующее логическое устройство (СЛУ), позволяющее работать системе управления ЭЛВ в прерывистом режиме формирования ШИМ. Оно формирует импульсы, обеспечивающие три периода (длительностью 60 мс) синусоидального напряжения частотой 50 Гц и интервалом около 1,2 с.

Применение СЛУ, формирующего пачки управляющих импульсов, позволяет проводить изучение режимов работы ЭЛВ на стенде при кратковременной мощности до 200 кВт в импульсно-периодическом режиме, что значительно (в 10...20 раз) превышает среднее значение мощности сетевого источника постоянного напряжения питания стенда. Даны осциллограммы напряжения на выходе СЛУ и осциллограммы фронта, среза, напряжения и тока нагрузки.

Ключевые слова: электронно-лучевой вентиль, высоковольтный стенд-инвертор, стробирующее логическое устройство периодического управления, энергосбережение.

Для цитирования: Щербаков А.В. Энергосберегающая методика исследования физической модели высоковольтного инвертора на основе электронно-лучевого вентиля // Вестник МЭИ. 2020. № 1. С. 55—61. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-55-61.

An Energy-Saving Technique for Studying an Electron Beam Valve Based High-Voltage Inverter Physical Model

A.V. Shcherbakov

The schemes of inverters applied in static reactive power compensators (SRPC) are as a rule developed with the use of power semiconductor devices (PSD); however, attempts to develop industry-grade prototypes of high-voltage inverters on the basis of serially produced vacuum-tube devices (VTD) are also made. High-voltage electron beam valves (EBV), which feature—owing to beam recovery at the anode—the minimum possible voltage drop across the anode-cathode section in the conductive state among the VTDs and a high steepness of the impulse front and trailing edges in comparison with PSDs, seem to be promising for such applications.

An EBV was simulated in the EWB circuit engineering computer program environment to determine the minimum permissible load resistance at which the EBV has the maximum electrical efficiency up to 0.99.

To determine whether it is advisable to construct such inverters, it is necessary to conduct not only theoretical, but also experimental investigations on physical models using dedicated test benches. A high-voltage energy-saving bench for testing EBVs operating within the SRPC circuit in an inverter mode has been developed. The bench takes power supply from the 3×380 V, 50 Hz network. The bench comprises a three-phase high-voltage transformer, using which the power supply voltage can be increased to a 40 kV level. This voltage is rectified according to the Larionov bridge scheme, and, owing to an artificial midpoint, the 0 to +20 kV and 0 to –20 kV voltages with the maximum current up to 1 A are obtained. The voltage amplitude can be smoothly varied using a three-phase electromechanical regulator installed in the high-voltage transformer primary winding.

A 50 Hz sine-wave voltage is produced in the inverter mode by means of pulse-width modulation (PWM) with a clock frequency smoothly variable in the 1...3 kHz range and is applied to a water equivalent of load. To increase the bench power level during the test and achieve energy saving, a gating

logic device (GLD) was introduced, which allows the EBV control system to operate in an intermittent PWM generation mode. The GLD produces pulses using which three cycles of a 50 Hz sine-wave voltage (with the total duration equal to 60 ms) repeating at approximately 1.2 s intervals are generated.

The use of the GLD producing packs of control pulses makes it possible to study the EBV operation modes on the bench at a short-term power of up to 200 kW in pulse-periodic mode, which is significantly (by 10...20 times) higher than the average power of the bench constant-voltage network power supply source. The GLD output voltage waveforms and the load voltage and current front and trailing edge waveforms are given.

Key words: electron-beam valve, high-voltage inverter bench, periodic-control gating logic device, energy saving.

For citation: Shcherbakov A.V. An Energy-Saving Technique for Studying an Electron Beam Valve Based High-Voltage Inverter Physical Model. Bulletin of MPEI. 2020;1:55—61. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-1-55-61.

Введение

Разработка силовых электрических схем на основе мощных высоковольтных электронно-лучевых приборов — альтернатива современным разработкам на основе полупроводниковой техники. Основными преимуществами вакуумных электронных приборов перед полупроводниковыми являются более высокое быстродействие и малые динамические потери, высокая устойчивость к внешнему электромагнитному и радиационному воздействию, а также возможность кратковременного рассеивания большой мощности в приборе (прибор при коротком замыкании может с успехом использоваться как стабилизатор тока нагрузки с возможностью последующего включения по заданному алгоритму). Пробой прибора внутри или снаружи, в отличие от полупроводниковых, не носит катастрофического характера. Высоковольтность электронно-лучевого прибора позволяет осуществлять бестрансформаторное подключение преобразователя к сети, например 10...35 кВ. В частности, электронно-лучевой вентиль (ЭЛВ) 50/100 (при 50 А, 100 кВ) служит ключевым элементом преобразователя мощностью до 2 МВт, что близко к уровню современных транзисторов (типа IGBT) при использовании современного принципа синтеза инверторов (компенсаторов) на основе многоканального преобразования (МКП) энергетического потока при уровне преобразуемой мощности достигающего единицы и более МВА. Известно, что отсутствие альтернативы какому-либо техническому решению ведет к тупику в развитии перспективных схемных решений.

Стенд для возможности испытания ЭЛВ в режимах статического компенсатора реактивной мощности (СТК) — инструмент, с помощью которого можно исследовать перспективность альтернативных схемных решений.

Они являются своего рода «очистными системами» для энергетической среды, гибкими линиями, восстанавливающими качество электроэнергии, испорченное потребителями, выражающееся в существенном снижении мощности, передаваемой по линии электропередач (ЛЭП) и увеличении активных потерь [1, 2]. Применение СТК позволяет существенно повысить мощность, передаваемую по ЛЭП. Собственная мощность СТК составляет 5...10% от передаваемой мощности. Использование гибких ЛЭП и современных

«интеллектуальных» подстанций позволяет под нагрузкой отключать/включать или ограничивать пропуск электроэнергии при перегрузке, является приоритетным направлением развития современной электроэнергетики.

Как правило, в схемах СТК используются силовые полупроводниковые приборы (СПП). Однако, в 1990-е гг. в России предпринимались попытки создания промышленных образцов высоковольтных силовых электронно-лучевых вентилях, не имеющих аналогов. Они, благодаря рекуперации пучка на аноде, имели минимально возможное падение напряжения на участке анод–катод в проводящем состоянии и (по сравнению с СПП) высокую крутизну фронта и среза [3 — 6].

Для определения целесообразности создания инверторов на основе ЭЛВ предложено проведение экспериментальных исследований на физических моделях с помощью специальных высоковольтных стендов-инверторов [7], поэтому решение указанной проблемы следует считать актуальным.

Для определения предельных характеристик вентиля выполнено схемотехническое моделирование конкретного вентиля (ЭЛВ 50/100 (50А, 100кВ)). Он представлен в схемотехнической программе в виде электрической схемы (рис. 1), параметры которой с высокой достоверностью моделируют анодные и сеточные характеристики реального прибора [8, 9].

Цель моделирования — построение нагрузочной характеристики при нескольких значениях сопротивления нагрузки R_n . Оно позволяет определить электрический КПД вентиля при различных значениях R_n и тока I_n . При построении нагрузочной характеристики для каждой итерации ступенчато выбрано значение R_n от 0,2 до 4,0 кОм при максимальном напряжении источника питания $U_{\text{нм}} = 40$ кВ, максимальном токе вентиля I_n — до 50 А (параметры характерные для СТК на вентиле типа ЭЛВ 50/100). Получены точки, определяющие напряжение на нагрузке U_n , ток нагрузки I_n и падение напряжения dU между анодом и катодом вентиля. Результаты итерации совмещены на одном графике по точкам (рис. 2).

Определена минимальная, приемлемая с точки зрения электрического КПД для данного типа вентиля, величина сопротивления нагрузки R_n . Из графика рис. 2 видно, что дальнейшее уменьшение R_n ведет к ограничению тока вентилем, резкому уменьшению электри-

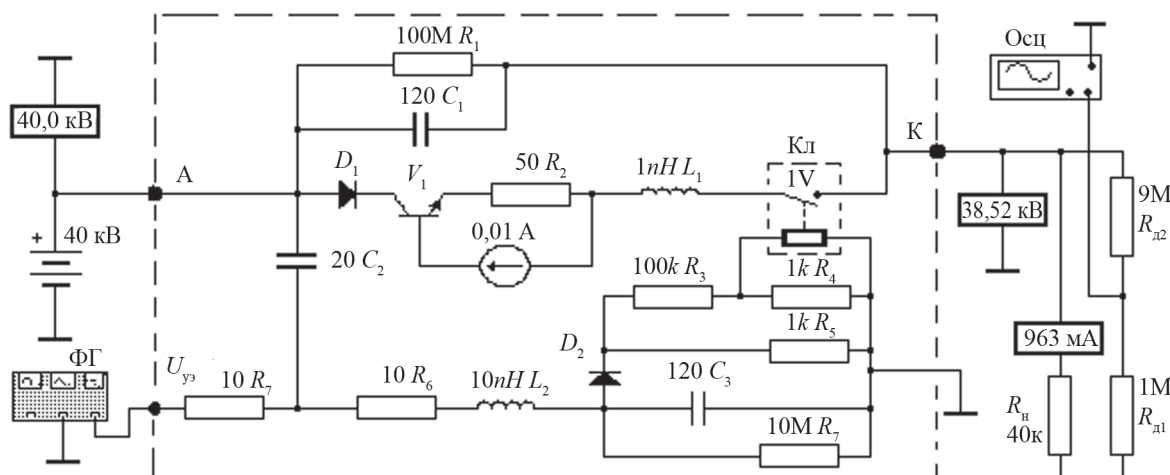


Рис. 1. Схематехническая модельная схема вентиля ЭЛВ 50/100:

А, К — анод и катод вентиля; U_{y3} — напряжение на управляющем электроде; ФГ — функциональный генератор; Кл — электрический ключ; Осц — осциллограф; D — диод; V — транзистор; R_n — сопротивление нагрузки; $R_{д1}$, $R_{д2}$ — резисторы высоковольтного делителя

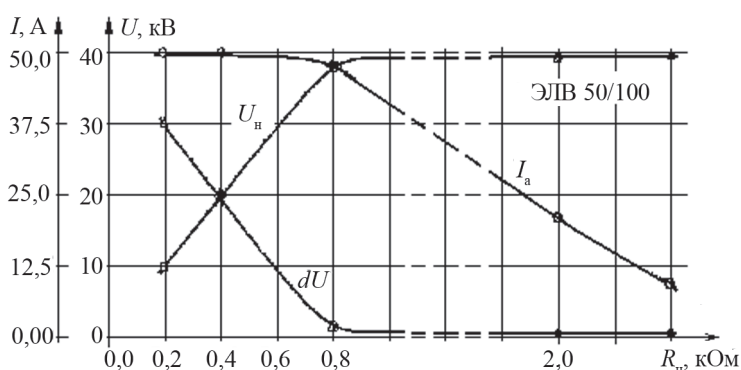


Рис. 2. Расчетная нагрузочная характеристика вентиля ЭЛВ 50/100:

U_n — напряжение на нагрузке; I_a — ток анода; dU — падение напряжения анод–катод ЭЛВ

ческого КПД из-за увеличения падения напряжения dU на участке анод–катод ЭЛВ. Избыточная мощность начинает рассеиваться на аноде ЭЛВ.

Для изучения возможности использования ЭЛВ создан стенд — физическая модель высоковольтного инвертора на напряжение до 5...20 кВ при мощности до 20 кВт. Однофазный мостовой преобразователь собран на базе четырех вентилях меньшей мощности типа ЭЛВ 4/40 (8А, 60 кВ), прототипах штатных вентилях ЭЛВ 50/100 (50А, 100кВ). В последующем предполагается при применении штатных вентилях увеличить напряжение инвертора до 35 кВ и мощность сначала до 200 кВт и выше. В качестве выпрямителей D_1, \dots, D_4 использованы высоковольтные диодные сборки на напряжение более 80 кВ из диодов напряжением более 1 кВ и током более 1,2 А. Для возможности реализации выпрямительного режима СТК вместо полупроводниковых диодов D_1, \dots, D_4 можно использовать те же вентили в режиме широтно-импульсного регулирования (ШИР) как в одно-, так и трехфазной схемах. Структурно-электрическая схема стенда изображена на

рис. 3, а подробная схема питания ЭЛВ и подмодулятора (ПМ) — на рис. 4. Алгоритм коммутации симметричный [10]. При проведении экспериментальных исследований на стенде входное напряжение меняли плавно.

В современной преобразовательной технике преимущественно используется импульсное регулирование мощности на нагрузке. Один из способов реализации ШИР — широтно-импульсная модуляция (ШИМ) на тактовой частоте 1...3 кГц. Конструктивно мостовая схема стенда выполнена в виде двух водоохлаждаемых коммутаторов K_1 (содержит ЭЛВ₁ и ЭЛВ₂) и K_2 (включает ЭЛВ₃ и ЭЛВ₄) (рис. 5), с высоковольтными водяными развязывающими дросселями в анодной и сеточной цепях [11].

Предельный рабочий уровень коммутируемой мощности вентилем-прототипом (ЭЛВ 4/40) позволяет создавать рабочие варианты преобразователей для СТК, однако мощности стенда для проведения полномасштабного макетирования недостаточно. Для возможности повышения его испытываемой мощности разра-

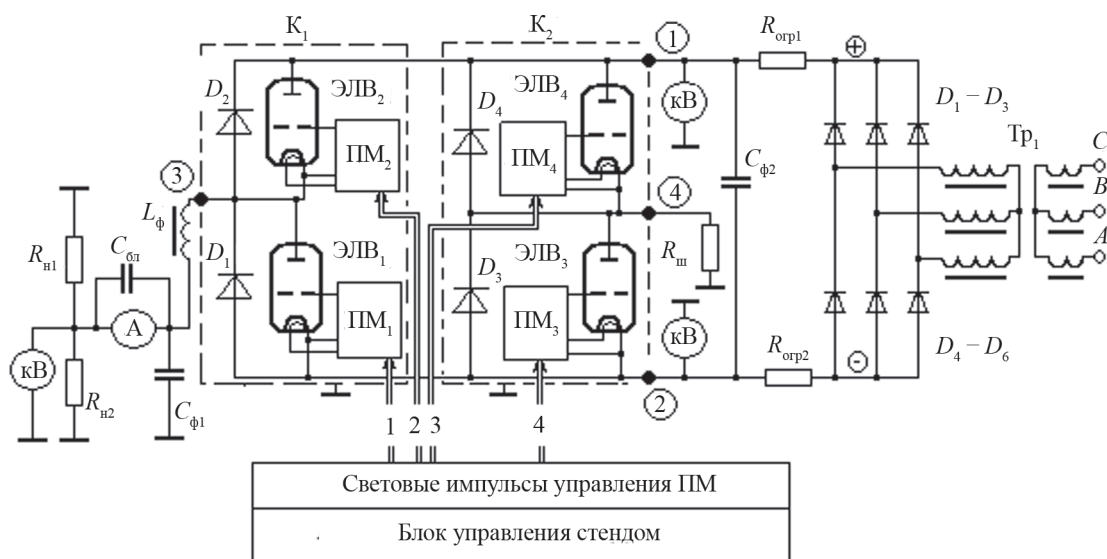


Рис. 3. Структурно-принципиальная схема высоковольтного мостового стенда-инвертора:

ЭЛВ — электронно-лучевой вентиль; $D_1 - D_4$ — сборки диодов; ПМ — подмодулятор; кВ — киловольтметр; А — амперметр; $R_{н1}$ — водоохлаждаемый перестраиваемый эквивалент нагрузки; $R_{орп}$ — защитный ограничительный резистор; $R_{ш}$ — шунт; $Тр_1$ — силовой сетевой повышающий трехфазный трансформатор; A, B, C — фазы напряжения сети 3×380 В, 50 Гц; C_{ϕ} — конденсаторы фильтра; 1, 2 — точки входа постоянного напряжения; 3, 4 — точки выхода знакопеременного напряжения инвертора

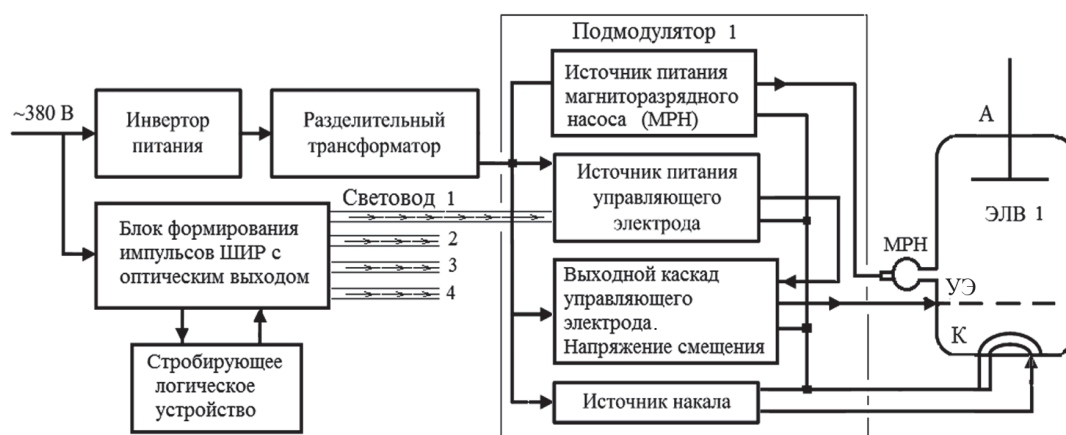


Рис. 4. Схема управления стендом и электропитание ПМ и ЭЛВ:

А — анод; К — катод; УЭ — управляющий электрод; МРН — магниторазрядный насос

ботано стробирующее логическое устройство (СЛЮ), позволяющее не только повысить кратковременную мощность, но и обеспечить энергосберегающий режим работы (рис. 6).

Его применение позволяет в периодическом режиме проводить исследования однофазной физической модели преобразователя мощностью 100...200 кВт при той же средней допустимой максимальной мощности комплектующих стенда 10...20 кВт. Оно формирует стробирующий импульс длительностью 60 мс с периодом около 1,2 с. В течение 60 мс формируются только три периода синусоидального напряжения, соответствующего исследуемой мощности. Реализуется импульсно-периодический режим работы нагрузки. Пауза между периодами следования пачек синусоидального напряжения, равная 1,2 с, определяет скваж-

ность (в данном случае около 20). В таком режиме помимо тепловой нагрузки исследуются частотные характеристики ЭЛВ инвертора. Кратковременную мощность для формирования указанных периодов отдает блок фильтрующих накопительных конденсаторов $C_{\phi 2}$ электрической емкостью около 80 мкФ на напряжение до 100 кВ, подзаряжаемый во время паузы (1,2 с). Подобный режим работы стенда-инвертора обеспечивает существенное энергосбережение при проведении длительных экспериментальных исследований. Дополнительно повышается достоверность изучения частотных характеристик, т. к. увеличивается время экспериментов при сохранении пониженных энергозатрат.

При испытаниях произвольно выберем ШИМ на тактовой частоте 2 кГц и сформируем на нагрузке синусоидальное напряжение частотой 50 Гц. На рисун-

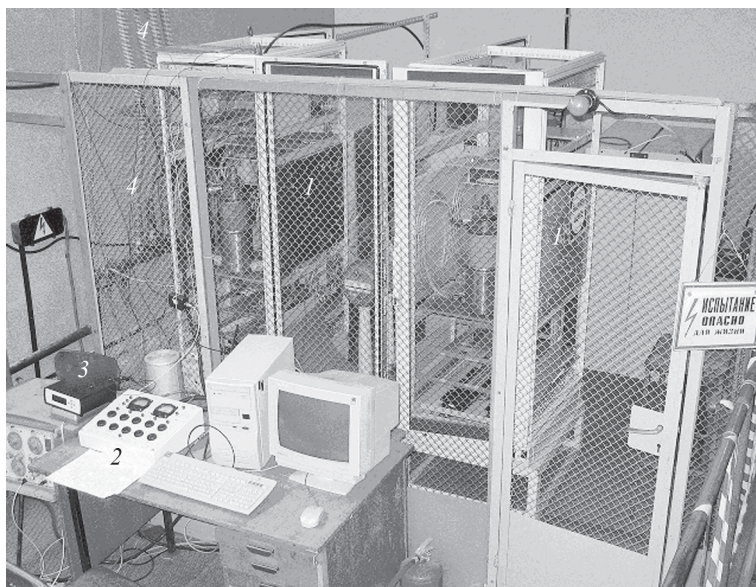


Рис. 5. Физическая модель энергосберегающего стенда-инвертора:

1 — двухвентильные коммутаторы K_1 и K_2 ; 2 — пульт управления; 3 — стробирующее логическое устройство; 4 — эквивалент перестраиваемой водоохлаждаемой нагрузки

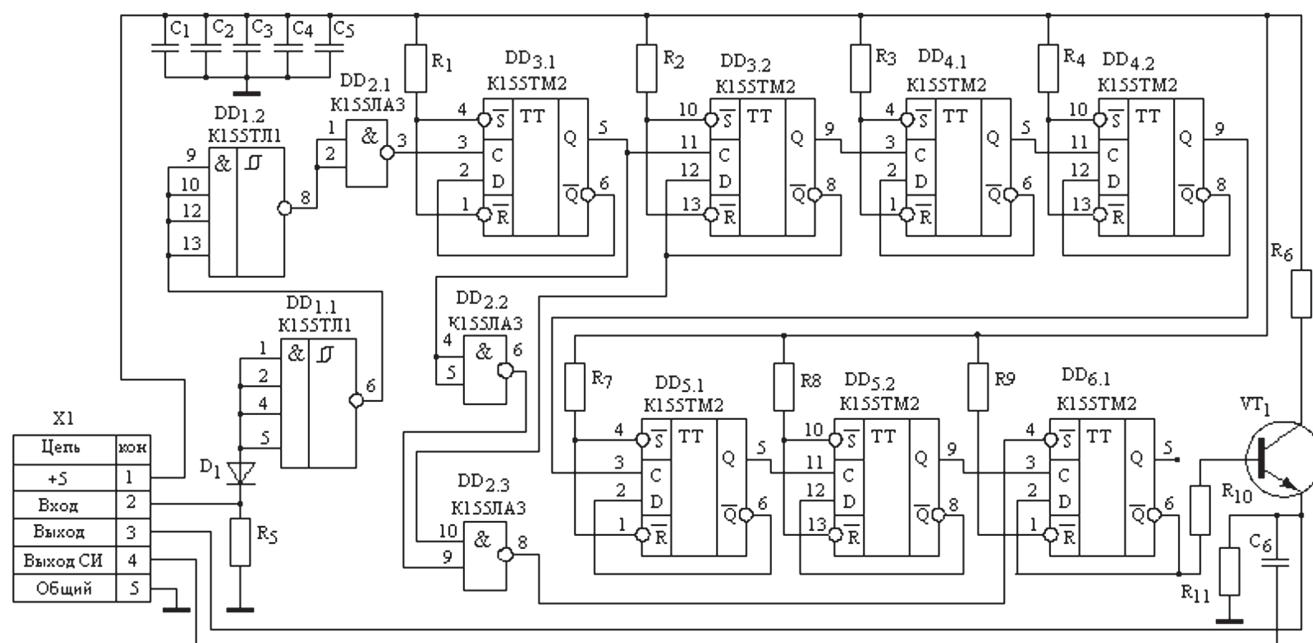


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема СЛУ

ке 7 дана экспериментальная осциллограмма на выходе СЛУ, обеспечивающего работу ПМ ЭЛВ.

Осциллограммы времени включения/отключения ЭЛВ на водоохлаждаемую нагрузку стенда сопротивлением около 2,5 кОм в режиме ШИР при тактовой частоте 2 кГц представлены на рис. 8.

Повышения величины электрической емкости фильтрующего конденсатора $C_{\phi 2}$ и скважности позволяют увеличить кратковременную мощность инвертора при использовании того же самого стенда.

При максимальной длительности фронтов импульса до 2 мкс максимальные коммутационные потери на вентиле составят менее 1% от коммутируемой им мощности. Оценка динамических потерь $P_{дин}$, полученная путем интегрирования переходного режима, — менее 1 кВт. Суммарные статические и динамические потери данной физической модели — 3,7 кВт или 4,5% от коммутируемой мощности при напряжении сети 20 кВ. Предположительно повышение напряжения сети до 33...35 кВ и том же токе приведет к снижению

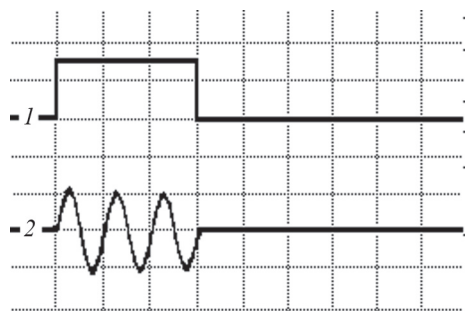


Рис. 7. Формирование управляющего напряжения и напряжения на нагрузке:

1 — напряжение на выходе СЛУ — 2 В/дел; 2 — напряжение на нагрузке — 10 кВ/дел (развертка по оси — 20 мс/дел)

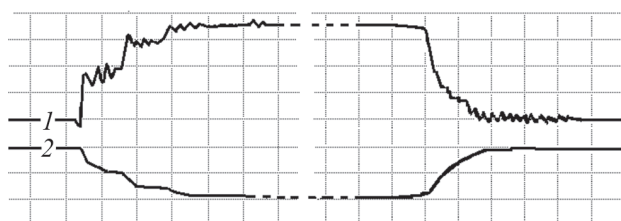


Рис. 8. Параметры импульса напряжения на нагрузке:

развертка — 0,5 мкс/дел; 1 — ток — 1 А/дел; 2 — напряжение — 5 кВ/дел

уровня относительных потерь до 3,5%, поскольку при увеличении рабочего напряжения падение напряжения анод–катод ЭЛВ (активные потери) практически не меняется [12].

Основные достоинства ЭЛВ определяются высокой помехоустойчивостью к воздействию электромагнитного излучения, более широким диапазоном рабочей температуры (вплоть до 300 °С), возможностью отво-

Литература

1. Кузьменко В.А., Таратута И.П., Чуприков В.С. Статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности (опыт разработки и внедрения) // Электро. 2003. № 5. С. 34—38.
2. Местергази В.А., Сухов А.В., Шульга Р.Н. Мобильное устройство электроснабжения с регулируемым напряжением и перестройкой частоты // Электро. 2015. № 1. С. 48—51.
3. Шульга Р.Н. Мировые тенденции в развитии электроэнергетики // Новое в российской электроэнергетике. 2014. № 6. С. 5—12.
4. Perevodchikov V.I., Stalkov P.M. Voltage Drop in Switch High-voltage Vacuum Electronic Devices // Proc. Intern. Conf. Actual Problems of Electron Devices Eng. Saratov, 2010. Pp. 454—459.
5. Переводчиков В.И. Перспективы использования вакуумно-плазменной электроники в энергосберегающей электротехнической аппаратуре // Электричество. 2006. № 9. С. 87—92.

дить большую мощность потерь от анода при коротких замыканиях в нагрузке и устойчивостью приборов к внутреннему пробую, а также возможностью стабилизировать ток нагрузки и менять его по необходимому закону при коротком замыкании нагрузки или при плавном включении/отключении. Это особенно важно при использовании СТК, работающего в схеме питания особо ответственного потребителя.

Заключение

Разработан стенд для проведения экспериментальных исследований ЭЛВ в режимах, характерных для СТК.

На основе разработанных ранее ЭЛВ, работающих в ключевом режиме, возможно создание альтернативных инверторов на основе СПП, мощностью 100...200 кВт для кондиционирования сетей с передаваемой мощностью до 1 МВт, устойчивых к внешнему ионизирующему излучению.

Использование ЭЛВ в инверторе обеспечивает защиту источника питания от короткого замыкания в нагрузке, создает эффект стабилизации тока и позволяет использовать ШИР для управления выходной мощностью.

Созданное стендовое СЛУ, работающее в блоке управления ПМ ЭЛВ, позволяет реализовать энергосберегающую технологию при проведении экспериментальных исследований, повысить длительность испытания, а, соответственно, достоверность при минимальных энергозатратах.

Результаты проведенных исследований показали целесообразность дальнейшего совершенствования конструкции стенда и увеличения мощности, а также ЭЛВ в направлении повышения его долговечности и электротехнических характеристик.

References

1. Kuz'menko V.A., Taratuta I.P., Chuprikov V.S. Statische Tistorne Kompensatory Reaktivnoy Moshchnosti (Opyt Razrabotki i Vnedreniya). Elektro. 2003;5:34—38. (in Russian).
2. Mestergazi V.A., Sukhov A.V., Shul'ga R.N. Mobil'noe Ustroystvo Elektrosnabzheniya s Reguliruemym Napryazheniem i Perestroykoy Chastoty. Elektro. 2015;1: 48—51. (in Russian).
3. Shul'ga R.N. Mirovye Tendentsii v Razvitiy Elektroenergetiki. Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike. 2014;6:5—12. (in Russian).
4. Perevodchikov V.I., Stalkov P.M. Voltage Drop in Switch High-voltage Vacuum Electronic Devices. Proc. Intern. Conf. Actual Problems of Electron Devices Eng. Saratov, 2010:454—459.
5. Perevodchikov V.I. Perspektivy Ispol'zovaniya Vakuumno-plazmennoy Elektroniki v Energoberegayushchey Elektrotekhnicheskoy Apparature. Elektrichestvo. 2006;9: 87—92. (in Russian).

6. **Переводчиков В.И.** Направление вакуумной и плазменной электроники в ВЭИ // История науки и техники. 2011. № 9. С. 66—70.

7. **Пат. № 95434 РФ.** Многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) / Н.В. Матвеев и др. // Бюл. изобрет. 2009. № 18.

8. **Карлащук В.И.** Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: Солон-Р, 2001.

9. **Кардашев Г.А.** Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств. М.: Горячая линия – Телеком, 2002.

10. **Мигдаленок А.А.** Определение оптимального алгоритма коммутации ключей преобразователя частоты индуктора демагнетизатора [Электрон. ресурс] <http://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2013/04/72.pdf> (дата обращения 26.21.2019).

11. **Щербаков А.В.** Импульсный высоковольтный модулятор с частичным разрядом емкостного накопителя // Вестник МЭИ. 2017. № 1. С. 50—57.

12. **Щербаков А.В., Стальков П.М.** Ключевые вакуумные электронно-лучевые вентили в инверторе для статического компенсатора // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 113—120.

6. **Perevodchikov V.I.** Napravlenie Vakuumnoy i Plazmennoy Elektroniki v VEI. Istoriya Nauki i Tekhniki. 2011;9:66—70. (in Russian).

7. **Pat. № 95434 RF.** Mnogofunktsional'nyy Energeticheskiy Kompleks (MEK). N.V. Matveev i dr. Byul. izobret. 2009;18. (in Russian).

8. **Karlashchuk V.I.** Elektronnaya Laboratoriya na IBM PC. Programma Electronics Workbench i ee Primenenie. M.: Solon-R, 2001. (in Russian).

9. **Kardashev G.A.** Virtual'naya Elektronika. Komp'yuternoe Modelirovanie Analogovykh Ustroystv. M.: Goryachaya Liniya – Telekom, 2002. (in Russian).

10. **Migdalenok A.A.** Opredelenie Optimal'nogo Algoritma Kommutatsii Klyuchey Preobrazovatelya Chastoty Induktora Demagnetizatora [Elektron. Resurs] <http://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2013/04/72.pdf> (Data Ob-rashcheniya 26.21.2019). (in Russian).

11. **Shcherbakov A.V.** Impul'snyy Vysokovol'tnyy Modulyator s Chastichnym Razryadom Emkostnogo Nako-pitelya. Vestnik MEI. 2017;1:50—57. (in Russian).

12. **Shcherbakov A.V., Stal'kov P.M.** Klyuchevye Vakuumnye Elektronno-luchevye Ventili v Invertore dlya Statcheskogo Kompensatora. Vestnik MEI. 2018;4:113—120. (in Russian).

Сведения об авторе:

Щербаков Александр Владимирович — доктор технических наук, заместитель начальника отдела Всероссийского электротехнического института, филиала ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. Академика Забавкина», e-mail: shav180745@vei.ru

Information about author:

Shcherbakov Aleksandr V. — Dr.Sci. (Techn.), Deputy Head of the Department of the All-Russian Electrotechnical Institute, Branch of FSUE «RFNC-VNIIEF named Academician Sababakhin», e-mail: shav180745@vei.ru

Статья поступила в редакцию: 26.03.2019

The article received to the editor: 26.03.2019