

Особенности работы импульсных модуляторов с магнетронами с безнакальным запуском

Features of operation of pulse modulators with magnetrons with cold cathode

DOI:

В.А.Мельников¹, Генеральный директор АО «Плутон», г. Москва, доктор технических наук,

С.А.Платонов¹, начальник лаборатории радиотехнического оборудования АО «Плутон», кандидат технических наук,

И.П.Ли¹, Директор технологического центра «Базовые технологии ЭВП» АО «Плутон», кандидат технических наук,

Ю.В.Поляков¹, Директор по технической политике – главный технолог АО «Плутон»/
s.platonov@pluton.msk.ru

V.A.Melnykov¹, General Director of JSC "Pluton", Moscow, doctor of technical Sciences,

S.A.Platonov¹, Head of laboratory equipment JSC "Pluton", candidate of technical Sciences,

I.P.Li¹, Director of the technology center, "the Underlying technology EVP" JSC "Pluton", candidate of technical Sciences,

Y.V.Polyakov¹, Director of technical policy, chief technologist JSC "Pluton"/
s.platonov@pluton.msk.ru

¹АО «Плутон»

¹AS «Pluton»

В статье рассмотрены особенности работы модуляторов на основе импульсных трансформаторов с магнетронами с безнакальным запуском. Отмечена высокая надёжность работы таких магнетронов при обеспечении требований по параметрам модулирующего импульса. Дается рекомендация по применению современных твердотельных модуляторов без импульсных трансформаторов.

The article discusses the features of the operation of modulators based on pulse transformers with magnetrons with cold cathode. The high reliability of the operation of such magnetrons is noted when meeting the requirements for the parameters of the modulating pulse. A recommendation is given for the use of modern solid-state modulators without pulse transformers.

Ключевые слова: Безнакальный магнетрон, твердотельный модулятор

Keywords: Magnetron with cold cathode, solid-state modulator

В настоящее время требования к информативности радиолокационных систем (РЛС) стремительно увеличиваются. За счёт совершенствования ЭКБ появляется возможность формировать радиолокационные сигналы методом прямого цифрового синтеза с последующей цифровой обработкой отраженных от целей сигналов. В случае необходимости обеспечения большой дальности работы РЛС в таких схемах требуется

использовать весьма дорогостоящий усилитель СВЧ сигналов (твердотельный или электровакуумный). Однако, во многих применениях, таких как метеолокаторы, локаторы обзора окружающего пространства и т.п., по прежнему целесообразно использование простых РЛС на основе сравнительно дешёвых магнетронных передатчиков импульсного действия. Одним из существенных недостатков таких передатчиков является небольшой срок службы магнетронов.

В настоящее время в АО «Плутон» серийно выпускается линейка безнакальных магнетронов, работающих в диапазонах длин волн 3 см, 2 см и 8 мм, с наработкой от 500 часов до 10000 часов. Отдельные образцы приборов сохраняют работоспособность в течение 20000 часов и более. Конструкция безнакальных магнетронов позволяет обеспечить значительную для электровакуумных приборов (ЭВП) наработку до отказа. Однако для обеспечения высокой наработки требуется выполнить ряд требований по параметрам питающих импульсов напряжения.

Как правило, в схемах импульсных модуляторов магнетронных передатчиков используется хорошо зарекомендовавшая себя схема с частичным разрядом накопительной ёмкости и импульсным трансформатором (ИТ) (рисунок 1). В таких схемах источник сравнительно невысокого напряжения ($U_{ИП}$), от 100 до 1000 В, в паузах между импульсами заряжает накопительный конденсатор ($C_{НАК}$), во время импульса транзисторный коммутатор (K_1) подключает накопитель к первичной обмотке импульсного трансформатора (T_1) на выходе которого формируются импульсы напряжения требуемой величины 1,5-15 кВ.

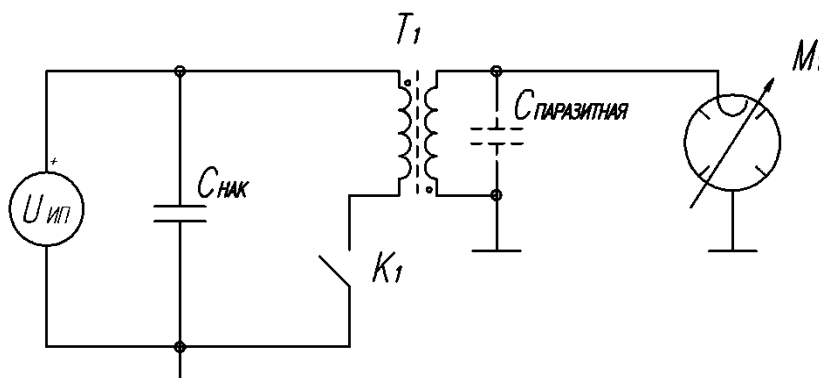


Рис. 1. Схема модулятора с частичным разрядом накопительной ёмкости и ИТ.

Fig. 1. The scheme of the modulator with a partial discharge of the storage capacity and PT.

Такие схемы просты в реализации, используют малое количество комплектующих элементов и, как следствие, имеют малую стоимость. При этом такие схемы не лишены недостатков:

- использование импульсного трансформатора может приводить к существенным искажениям формы модулирующего импульса;
- в случае пропуска импульса магнетроном или при задержке запуска магнетрона появляются выбросы напряжения;
- из-за наличия индуктивности рассеяния обмоток трансформатора «затягивается» тыл импульса;
- сложно изменять длительность импульса из-за возможности насыщения сердечника ИТ.

Безнакальные магнетроны принципиально отличаются от традиционных, накаливаемых магнетронов. В них процесс запуска можно условно разделить на две стадии: появление первичного тока автоэмиссионного катода (АЭК) и начало формирования СВЧ колебаний; формирование вторичного тока за счёт обратной бомбардировки вторичноэмиссионного катода (ВЭК) и формирование основной части СВЧ импульса. Следует отметить, что невозможно задать точного момента запуска магнетрона так как: 1) образование тока АЭК происходит из локальных неоднородностей на поверхности АЭК и имеет случайный характер; 2) накопление пространственного заряда происходит во время каждого импульса и требует некоторого времени, зависящего от многих параметров, не поддающихся точному контролю; 3) процесс возбуждения СВЧ колебаний также носит случайный характер. Запуск безнакального магнетрона, то есть появление на выходе номинальной мощности, происходит в течение некоторого времени, которое для 3 см приборов составляет 50-250 нс, для 2 см приборов 30-200 нс, для 8 мм приборов 10-100 нс от момента формирования на магнетроне напряжения, достаточного для протекания тока АЭК. Учитывая вышесказанное, следует отметить, что безнакальным магнетронам свойственна некоторая задержка появления СВЧ колебаний относительно фронта модулирующего импульса. Эта задержка может изменяться случайным образом от импульса к импульсу и характеризуется величиной флюктуации переднего фронта огибающей ВЧ импульса. Этот параметр нормируется в технических условиях на магнетроны и измеряется по ОСТ 11 0354-86. Как правило, среднеквадратичная величина флюктуаций не превышает 5-10 нс.

Рассмотрим работу схемы модулятора с импульсным трансформатором. Типовые эпюры импульсов модулирующего напряжения, тока магнетрона и огибающей ВЧ импульса для таких схем приведены на рисунках 2 и 3.

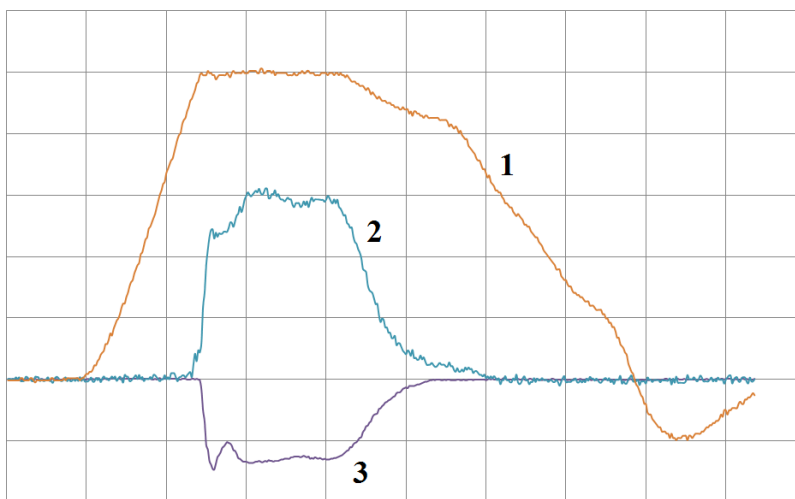


Рис. 2. Эпюры импульсов: 1) модулирующего напряжения; 2) тока магнетрона (за вычетом тока паразитной емкости магнетрона); 3) огибающей ВЧ импульса.

Fig. 2. Pulse plots: 1) the modulating voltage; 2) the magnetron current (minus the current of the parasitic capacitance of the magnetron); 3) the envelope of the RF pulse.

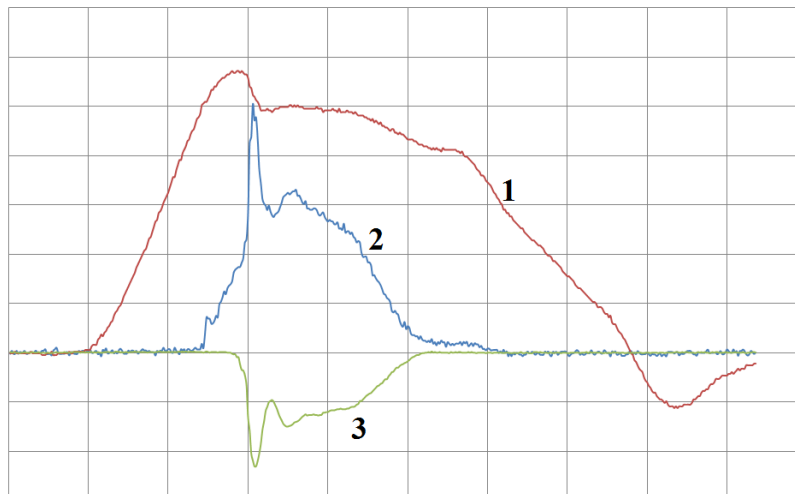


Рис. 3. Эпоэры импульсов при появлении флюктуации ВЧ огибающей.
 Fig. 3. Pulse plots when the RF envelope fluctuation appears.

В момент замыкания коммутатора (K_1) через первичную обмотку ИТ начинает протекать ток намагничивания и ток заряда паразитных ёмкостей ($C_{\text{ПАРАЗИТНАЯ}}$). Напряжения на выходе ИТ увеличивается. Одновременно происходит накопление энергии в индуктивностях рассеяния первичной и вторичной обмотки трансформатора. При малых напряжениях, прикладываемых к магнетрону, активный ток через него практически отсутствует [1], его активное сопротивление стремится к ∞ - ИТ нагружен на несогласованную нагрузку.

При напряжении на катоде порядка 0,8-0,9 от номинального значения появляются условия для протекания тока АЭК. Величина тока АЭК при этом, как правило, составляет 0,05-0,1 от номинального тока магнетрона. На этом участке напряжения ИТ всё ещё находится в рассогласованном режиме. При достижении напряжением номинального значения, ток магнетрона резко возрастает до номинального значения – ИТ переходит в согласованный режим работы (см. рисунок 2).

При наличии флюктуаций фронта ВЧ импульса ИТ не переходит в режим согласования, сопротивление магнетрона остаётся повышенным относительно номинала, в результате [2] появляются броски напряжения (см. рисунок 3). К моменту, когда в магнетроне сформируются СВЧ колебания и через него начнет протекать ток, напряжение между катодом и анодом может превысить допустимые значения. Как правило, для магнетронов допускаются броски напряжения не более 3% от U_a . Как показано в [2], при рассогласовании ИТ броски напряжения могут достигать 10% и более. Запуск магнетрона при повышенном напряжении приводит к тому, что через катод магнетрона начинает протекать увеличенный ток. Это может приводить к локальным перегревам катода, ухудшению вакуума, деградации АЭК и выходу его из строя. Также, при напряжении на 10% выше номинального значения возможно возбуждение паразитных видов колебаний или полный срыв колебаний, что приводит к неустойчивой работе магнетрона. При дальнейшем увеличении напряжения возникают пробой, которые неминуемо приводят к деградации катода и его быстрому выходу из строя.

После окончания импульса ключ (K_1) размыкается, ток через него прекращается. Однако энергия, накопленная в паразитных индуктивностях ИТ, не может рассеяться мгновенно. За счёт ЭДС самоиндукции протекание тока через магнетрон прекращается не

мгновенно, а со скоростью, определяемой активным током магнетрона и параметрами паразитных элементов ИТ. На спаде импульса напряжения и тока появляется характерный «пьедестал» (см. рисунок 2 и 3). В это время ток магнетрона преимущественно обеспечивает АЭК, при этом экранирующее действие пространственного заряда практически отсутствует – АЭК подвергается бомбардировке ионами остаточных газов, что приводит к его деградации. Также к негативным факторам, обусловленным такой формой спада импульса, можно отнести: фактическое удлинение модулирующего импульса, появление СВЧ «фона», обеспечиваемого протеканием малых токов при напряжении на магнетроне выше порога возбуждения, который уменьшает минимальное расстояние обнаружения целей.

Описанные выше процессы характерны не только для магнетронов с безнакальным запуском. В схемах аналогичных рис. 1 с накаливаемыми магнетронами также проявляются указанные особенности работы ИТ, однако в этом случае негативные последствия оказываются не столь разрушительны, как в магнетронах с АЭК. Независимо от выбранной схемы или типа ЭВП недопустимо появление бросков напряжения, превышающих установленные требования. С целью устранения возможности появления бросков напряжения следует вводить в схему ограничители напряжения и цепи формирования фронта импульса [3]. Спад импульса модулирующего напряжения необходимо обеспечивать разрядными резисторами, дросселями или дополнительными активными разрядными цепями.

В современных радиопередающих устройствах целесообразно использование схем модуляторов без использования импульсных трансформаторов, например схему, приведённую на рисунке 4.

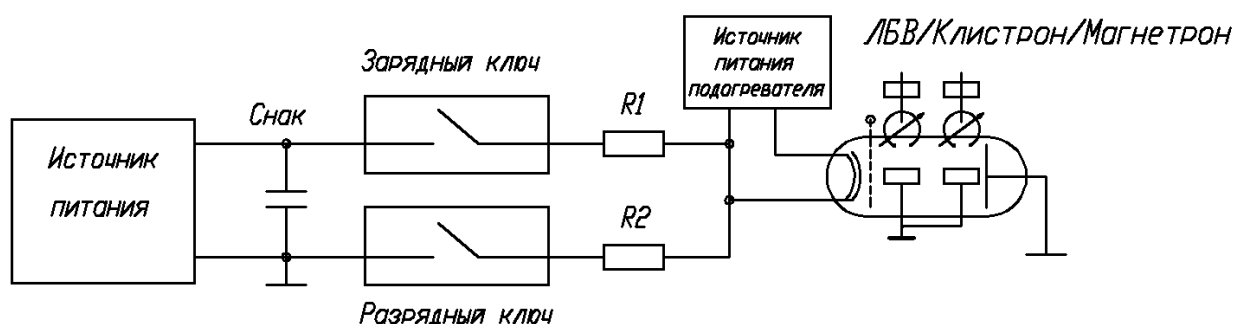


Рис. 4. Схема системы импульсного электрического питания ЭВП СВЧ.

Fig. 4. Diagram of the system of pulsed electric power supply of the microwave EVD.

В такой схеме происходит накопление электрической энергии при полном напряжении ЭВП СВЧ, накопительная ёмкость во время импульса подключается к нагрузке высоковольтным ключом (зарядный ключ). В паузах между импульсами нагрузка шунтируется другим ключом (разрядным). Скорости нарастания и спада импульса модулирующего напряжения определяются номиналами резисторов R1 и R2 соответственно и величиной паразитной ёмкости нагрузки. Также возможно использование цепей корректирующих форму фронта импульса. В такой схеме при появлении пропусков или флюктуаций величина броска напряжения определяется падением напряжения на резисторе R1 при протекании тока нагрузки и задаётся на стадии проектирования модулятора. В такой схеме возможно легко изменять

длительность импульса. В качестве коммутирующих элементов возможно использование составных твердотельных ключей [4]. На рисунке 5 приведены эпюры импульсов модулирующего напряжения и ВЧ огибающей, формируемые такими модуляторами.

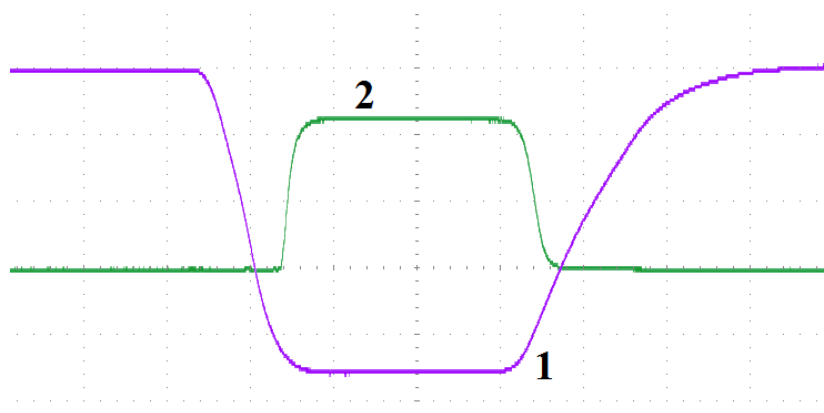


Рисунок 5. Эпюры импульсов: 1) модулирующего напряжения; 2) ВЧ огибающей.
Figure 5. Pulse plots: 1) modulating voltage; 2) RF envelope.

Список использованных источников:

1. Бычков С.И. Магнетронные передатчики. М. Военное издательство Министерства обороны Союза ССР, 1955.
2. Ицхоки Я. С. Импульсные трансформаторы (Теория, расчет, конструкция и испытание). - М. : Изд-во Бюро Новой Техники, 1950. - 742 с.
3. Евтянов С.И. Радиопередающие устройства. М., Связьиздат, 1950.
4. Радиопередающие системы для мощных импульсных РЛС. Казанцев В.И., Алексеев В.А., Сергеев В.Г., Хижняков П.М. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана спец выпуск №2 2009г.