

чивается не только соблюдением приведенных выше правил, но и пониманием того, что он является лишь инструментом для систематизации имеющейся информации. Данный метод дает лишь общие, хотя и однозначные рекомендации. Разработка на его основе практических мероприятий — это достаточно сложная и кропотливая работа, к которой должны привлекаться квалифицированные специалисты с глубоким пониманием текущего состояния объекта управления и тенденций инновационного развития в области его практического применения.

Литература:

1. Andrews, K. R. The Concept of Corporate Strategy / K. R. Andrews. — Rev. ed., — Homewood, Ill.: R. D. Irwin, Inc., 1980. — 180 p.
2. Котлер, Ф. Стратегический менеджмент по Котлеру: лучшие приемы и методы / Ф. Котлер, Р. Бергер, Н.;

пер. с англ. И. Матвеева. — 3-е изд. — М.: Альпина Паблишер, 2016. — 130 с.

3. Эванс, В. Ключевые стратегические инструменты. 88 инструментов, которые должен знать каждый менеджер / В. Эванс; пер с англ. В. Н. Егорова. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 456 с.

4. Гольдштейн, Г. Я. Стратегический менеджмент: учеб. пособие / Г. Я. Гольдштейн. — Изд. 2-е, доп. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003. — 94 с.

5. Кадышева, Е. SWOT-анализ: сделай качественно [Электронный ресурс] / Е. Кадышева // Сообщество менеджеров: Executive.ru — краудсорсинговый проект. — Режим доступа: <http://www.e-executive.ru/management/practices/597364>. — Дата доступа: 04.01.2019.

6. Мурзич, И. К. Оценка риска при принятии решений в военной сфере / И. К. Мурзич // Наука и военная безопасность. — 2017. — № 4. — С. 61–66.

УДК 621.373.5

**ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ
В МНОГОМОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА**

**APPLICATION OF THE DISCRETE ENERGY RECUPERATION
IN MULTIMODULAR STRUCTURE OF THE PULSE MODULATOR**

С. И. Коновалов,

вед. инженер-конструктор НПО «ОКБ ТСП», канд. техн. наук, г. Минск, Республика Беларусь

А. А. Шихов,

вед. инженер-конструктор НПО «ОКБ ТСП», г. Минск, Республика Беларусь

S. Konovalov

Leading Engineer of SPLLC “OKB TSP”, Candidate of Technical Science, Minsk, Republic of Belarus

A. Shykhau,

Leading Engineer of SPLLC “OKB TSP”, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 18.01.2019 г.

В статье рассмотрен режим дискретной рекуперации энергии на примере идеализированной модели многомодульной структуры импульсного модулятора. Предложен асинхронный алгоритм управления силовыми ключами. Проведен сравнительный анализ применения синхронного и асинхронного алгоритмов управления. Получены обобщенные математические выражения для КПД таких устройств с *N*-модулями. Определены эффективные алгоритмы управления для многомодульной структуры. Полученные результаты подтверждены экспериментально.

The possibilities of a method of the discrete energy recuperation on the example of multimodular idealized model of the impulse modulator are considered in the article. The asynchronous algorithm of power switch control is proposed. The comparative analysis of application of the synchronous and asynchronous algorithm is made. The generalized mathematical expressions for efficiency of such devices with *N*-modules are given. Effective control algorithms for multimodular structure are defined. The results are proved by experimental way.

Ключевые слова: рекуперация энергии, многомодульная структура, импульсный модулятор, алгоритмы управления, силовой ключ, СВЧ, КПД.

Keywords: energy recuperation, multimodular structure, impulse modulator, algorithms of control, power switch, very high frequencies, efficiency factor.

Введение.

Одной из важных задач, решаемых при проектировании импульсных модуляторов (ИМ) для приборов СВЧ и других устройств, требующих перезаряда емкостной нагрузки, является повышение КПД. Значительные потери энергии, без принятия специальных мер по увеличению габаритов и массы устройств охлаждения, приводят к перегреву аппаратуры и ухудшению ее надежности. В моменты коммутации силовых ключевых элементов и в ходе переходных процессов потери пропорционально растут с увеличением частоты модулирующих импульсов и находятся в квадратичной зависимости от напряжения на нагрузке в конце заряда. В работах [1] и [2] была предложена многомодульная структура ИМ с дискретной рекуперацией энергии и асинхронным алгоритмом управления зарядными и разрядными ключами модулей, позволяющая реализовать ступенчатый перезаряд емкости нагрузки и существенно снизить потери в ИМ. Было показано, что для частного случая, когда питающие напряжения и нагрузки всех N модулей одинаковы, при N -ступенчатом (асинхронном) управлении мощность потерь снижается пропорционально количеству модулей в сравнении с синхронным управлением. Однако для практической реализации подобных высоковольтных структур ИМ разработка алгоритма управления силовыми ключами требует учета нелинейной функциональной зависимости эквивалентной нагрузочной емкости каждого модуля от его номера в структуре и решения задачи оптимизации значений питающих напряжений модулей по критерию равенства их потерь. В связи с этим возникает необходимость разработки математической модели многомодульной структуры ИМ в целях оценки ее эффективности и формирования рекомендаций практического характера.

Структура и алгоритмы управления многомодульным ИМ.

Структура идеализированного многомодульного ИМ с синхронным и асинхронным управлением приведена на рис. 1.

ИМ в общем случае содержит N источников постоянного напряжения $U_{num1}-U_{numN}$ для питания модулей, зарядные и разрядные ключи модулей $S_{зар1}-S_{зарN}$, $S_{раз1}-S_{разN}$ с блоками управления, ограничительные сопротивления $R_{огр}$ и обратные диоды VD . Ограничительные сопротивления $R_{огр}$ обеспечивают уменьшение токов перезаряда эквивалентных паразитных емкостей нагрузок и сквозных токов через ключевые элементы. Эквивалентная емкость нагрузки $C_{нэ}$ подключена к выходным выводам ИМ. Полный разряд емкости нагрузки $C_{нэ}$ обеспечивается открытым состоянием всех разрядных $S_{раз.n}$ и закрытым состоянием всех зарядных $S_{зар.n}$ ключей.

В случае синхронного управления осуществляется одновременная коммутация всех зарядных или всех разрядных ключей. При формировании фронта и вершины импульса сначала происходит размыкание $S_{раз.n}$, а затем — замыкание $S_{зар.n}$. При формировании спада и паузы между

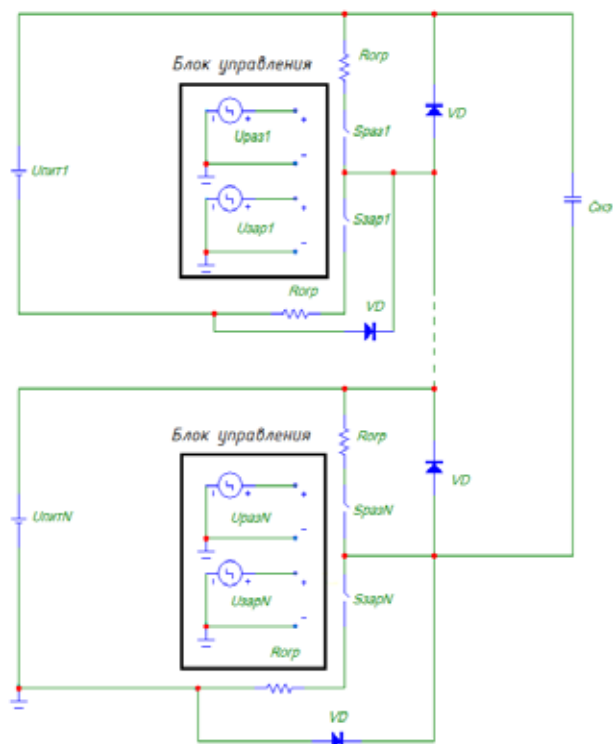


Рис. 1. Структура идеализированного многомодульного ИМ

импульсами сначала происходит размыкание $S_{зар,n}$, а затем — замыкание $S_{раз,n}$.

При организации асинхронного алгоритма управления коммутация ключевых элементов модулей производится с заданной временной задержкой. Применение временного сдвига обеспечивает формирование ступенчатого напряжения апериодической формы в течение фронта и спада импульса. Регулируя длительность и амплитуду отдельных ступеней так, чтобы переходные процессы коммутации были практически завершены к моменту начала следующей ступени, возможно формирование импульсов с требуемой длительностью фронта и спада при уменьшении потерь энергии. Из-за уменьшения напряжений в моменты коммутации при таком управлении также снижается и мощность коммутационной помехи.

При асинхронном управлении в общем случае формирование каждой ступени можно организовать путем коммутации ключа одного из

модулей или путем одновременной коммутации ключей двух и более модулей.

Синхронный и асинхронный алгоритмы управления для многомодульного ИМ приведены на рис. 2, где $U_{з1}-U_{зN}$, $U_{р1}-U_{рN}$ — напряжения, управляющие зарядными и разрядными ключами; U_c — напряжение на эквивалентной емкости нагрузки.

Следует заметить, что в реальном ИМ из-за температурных и других нестабильностей параметры цепей не остаются постоянными, и, как следствие, возникают всплески (провалы) при формировании вершины и паузы между модулирующими импульсами.

Формирование математической модели для оценки энергетической эффективности многомодульной структуры ИМ.

Эффективность устройства для заряда емкостной нагрузки принято оценивать по КПД [3].

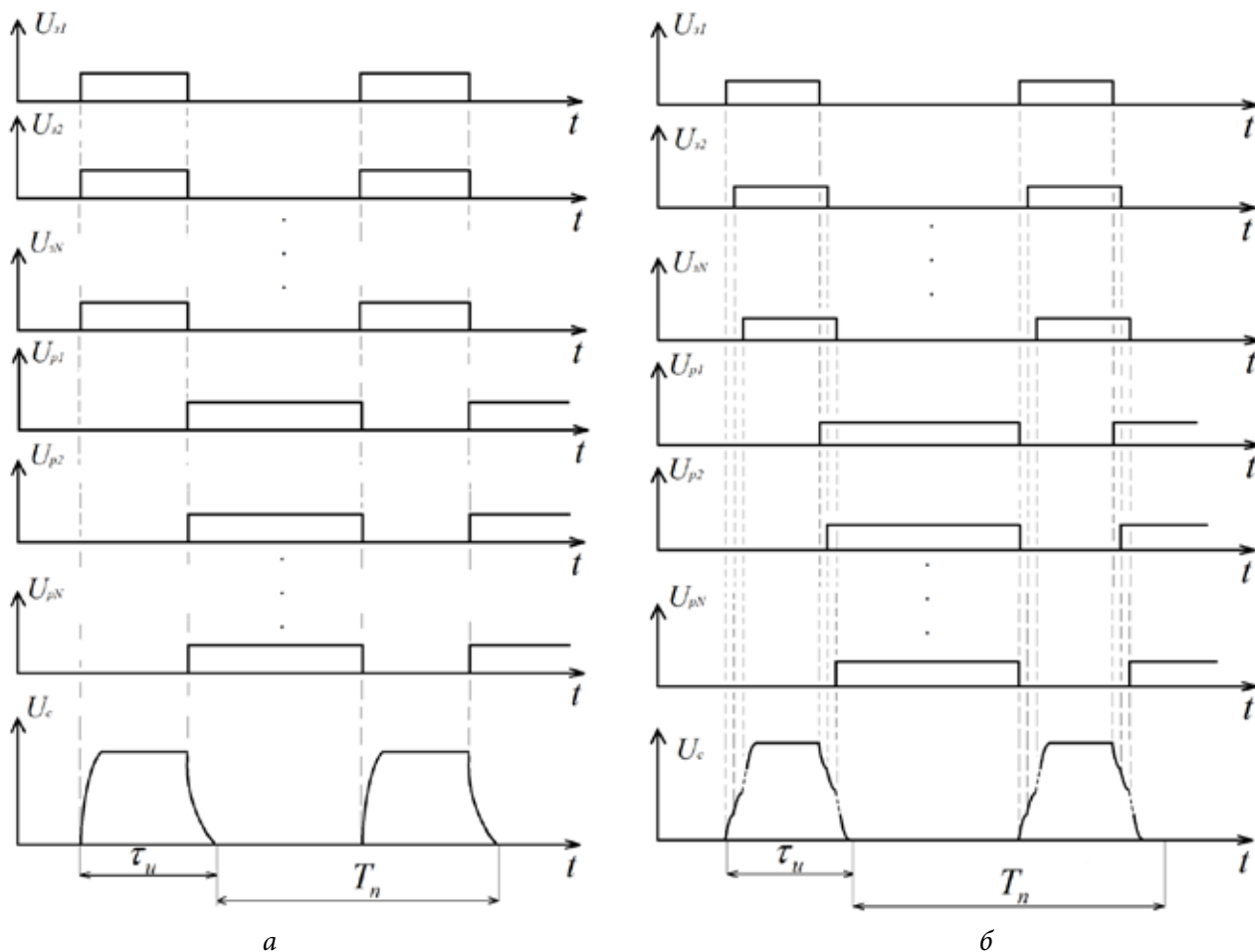


Рис. 2. Алгоритмы управления: а — синхронный, б — асинхронный

Для многомодульного ИМ, состоящего из N модулей, на этапе заряда выражение для КПД можно записать в виде:

$$\eta_{3.N} = \frac{W_{3.N}}{W_{И.N}} = \frac{\sum_{n=1}^N W_{3.n}}{\sum_{n=1}^N W_{И.n}} = \frac{W_{3.N}}{W_{3.N} + W_{ПЗ.N}}, \quad (1)$$

где $W_{3.N}$ — энергия заряда, полученная нагрузкой от N модулей; $W_{И.N}$ — энергия, потребляемая от источников питания N модулей, на этапе заряда; $W_{3.n}$ — энергия заряда, полученная нагрузкой от n -го модуля; n — номер модуля в структуре ИМ; $W_{И.n}$ — энергия, потребляемая от источника питания n -го модуля для заряда; $W_{ПЗ.N}$ — энергия потерь в N модулях на этапе заряда.

$$W_{ПЗ.N} = \sum_{n=1}^N W_{ПЗ.n}, \quad (2)$$

где $W_{ПЗ.n}$ — энергия потерь n -го модуля на этапе заряда.

При асинхронном управлении, в отличие от синхронного, формирование каждой ступени (такта) можно организовать путем одновременной коммутации ключей одного или нескольких модулей.

В общем случае для многоступенчатого заряда, определяемого количеством временных тактов заряда, энергия потерь n -го модуля на этапе заряда:

$$W_{ПЗ.n} = \sum_{k=1}^K W_{ПЗ.n.k}, \quad (3)$$

где k — номер такта заряда; K — количество тактов заряда; $W_{ПЗ.n.k}$ — энергия потерь n -го модуля в k -м такте заряда.

В общем случае $K \leq N$.

Рассмотрим упрощенный вариант идеализированной модели N -модульного ИМ, схема которого показана на рис. 3.

В данном варианте ИМ напряжения источников питания всех N модулей равны: $U_{пит1} = U_{пит2} = \dots = U_{питN} = U_{П}$; ключевые элементы и диоды не имеют потерь; ограничительные сопротивления $R_{огр}$ вынесены в цепь нагрузки и представ-

лены в виде одного эквивалентного сопротивления $R_{огр.э}$. Рассмотрим случай полного заряда и полного разряда эквивалентной емкости нагрузки $C_{нэ}$. Ее заряд при этом происходит до максимального напряжения, равного сумме напряжений источников питания модулей, а разряд — до нулевого значения напряжения. Постоянная времени цепи заряда и разряда $\tau_{ц} = R_{огр.э} C_{нэ}$ будет неизменной в каждом такте заряда и разряда. Будем считать, что переходные процессы завершаются за время $3\tau_{ц}$, что обеспечивает заряд и разряд до уровня, составляющего 95 % от значения питающего напряжения.

Для упрощения расчетов в дальнейшем будет рассмотрено асинхронное управление при поочередной коммутации ключей модулей. В этом случае $K = N$.

Для асинхронного заряда энергия потерь будет определяться суммой энергий потерь в каждом такте:

$$W_{ПЗ.N} = \sum_{k=1}^N W_{ПЗ.k}, \quad (4)$$

где $W_{ПЗ.k}$ — энергия потерь в k -м такте заряда; N — количество тактов заряда, равное количеству модулей ИМ.

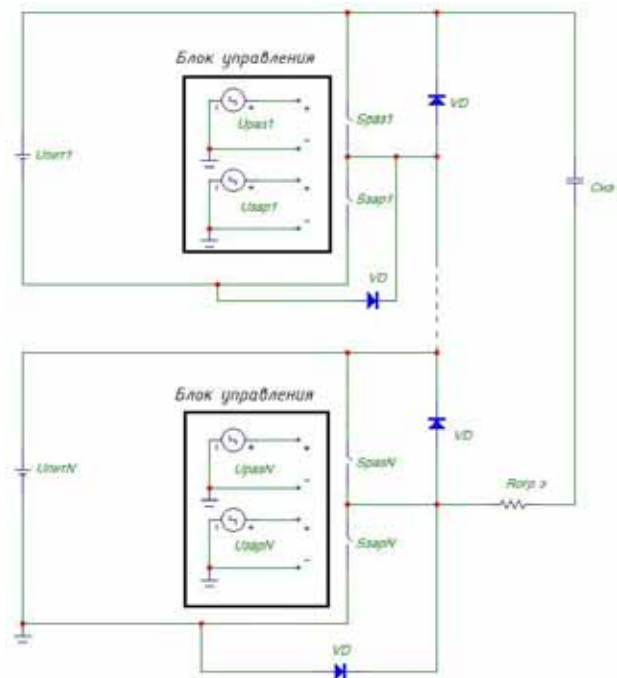


Рис. 3. Упрощенный вариант структуры многомодульного ИМ

В свою очередь, энергию потерь при заряде в k -м такте за время $3\tau_{\text{ц}}$ можно определить, используя выражение:

$$W_{\text{ПЗ},k} = \int_0^{3\tau_{\text{ц}}} R_{\text{ор.э}} i_{3,n}^2(t) dt = \\ = R_{\text{ор.э}} \int_0^{3\tau_{\text{ц}}} \frac{(U_{\text{H},k} - U_{\text{H},(k-1)})^2}{R_{\text{ор.э}}^2} e^{-\frac{2t}{\tau_{\text{ц}}}} dt \approx \frac{U_{\text{П}}^2 C}{2}.$$

Тогда $W_{\text{ПЗ},N} = \sum_{k=1}^N \frac{U_{\text{П}}^2 C_{\text{нз}}}{2} = \frac{U_{\text{П}}^2 C_{\text{нз}} N}{2}.$

Энергию заряда, получаемую нагрузкой, можно определить с помощью выражения:

$$W_{3,N} = \sum_{k=1}^N W_{3,k} = \frac{C_{\text{нз}}}{2} \sum_{k=1}^N (U_{3,k}^2 - U_{3,(k-1)}^2), \quad (5)$$

где $U_{3,k}$ — напряжение на нагрузке в конце k -го такта; $U_{3,(k-1)}$ — напряжение на нагрузке в конце $(k-1)$ -го такта или в начале k -го такта.

Энергия заряда емкости нагрузки в k -м такте:

$$W_{3,k} = \frac{C_{\text{нз}} (U_{3,k}^2 - U_{3,(k-1)}^2)}{2} = \\ = \frac{C_{\text{нз}}}{2} [(kU_{\text{П}})^2 - (k-1)^2 U_{\text{П}}^2] = \frac{2k-1}{2} C_{\text{нз}} U_{\text{П}}^2.$$

Тогда энергия заряда в конце k -го такта будет равна:

$$W_{3,K} = \sum_{k=1}^K W_{3,k} = \frac{C_{\text{нз}} U_{\text{П}}^2}{2} \sum_{k=1}^K (2k-1) = W_{3,1} K^2,$$

где $W_{3,1}$ — энергия заряда $C_{\text{нз}}$ в конце первого такта.

Следовательно, энергия заряда в конце такта находится в квадратичной зависимости от номера такта и при $K = N$ имеем: $W_{3,N} = W_{3,1} N^2.$

При синхронном управлении энергия потерь $W_{\text{ПЗ},c}$ при заряде с нулевого значения напряжения до $NU_{\text{П}}$ равна энергии заряда емкости нагрузки и определяется выражением:

$$W_{\text{ПЗ},c} = \frac{(NU_{\text{П}})^2 C_{\text{нз}}}{2}.$$

Тогда $\frac{W_{\text{ПЗ},c}}{W_{\text{ПЗ},N}} = N.$

Следовательно, энергия потерь при асинхронном заряде уменьшается пропорционально количеству модулей в случае равенства количества K тактов заряда количеству модулей $N.$

При разряде емкости нагрузки, помимо рассеивания энергии в виде тепла в разрядных резисторах, возможна также рекуперация (возврат) энергии в конденсаторы выходных фильтров источников питания модулей. Параметры таких конденсаторов для стабилизированных источников питания модулей выбираются, исходя из допустимого уровня пульсаций их выходных напряжений при увеличении напряжений на конденсаторах в ходе рекуперации.

На этапе разряда КПД многомодульного ИМ, состоящего из N модулей, имеет вид:

$$\eta_{\text{P},N} = \frac{W_{\text{рек},N}}{W_{\text{P},N}} = \frac{\sum_{n=1}^N W_{\text{рек},n}}{\sum_{n=1}^N W_{\text{P},n}}, \quad (6)$$

где $W_{\text{рек},N}$ — энергия рекуперации в источники питания модулей от N модулей; $W_{\text{P},N}$ — энергия разряда, равная энергии заряда, полученной нагрузкой от N модулей; $W_{\text{рек},n}$ — энергия рекуперации n -го модуля; $W_{\text{P},n}$ — энергия разряда n -го модуля.

Так как $W_{\text{P},N} = W_{3,N}$, для получения выражения КПД $\eta_{\text{P},N}$ можно воспользоваться соотношением (5) для $W_{3,N}$ на этапе заряда.

Энергию рекуперации для n -го модуля в общем виде можно записать:

$$W_{\text{рек},n} = \sum_{l=1}^L W_{\text{рек},n,l}, \quad (7)$$

где $W_{\text{рек},n,l}$ — энергия рекуперации n -го модуля в l -м такте разряда; L — количество тактов разряда.

В общем виде энергия рекуперации в источник питания n -го модуля на l -м такте разряда:

$$W_{\text{рек},n,l} = \int_0^{t_{\text{раз},l}} U_{\text{П},n} i_{\text{рек},l}(t) dt, \quad (8)$$

где $i_{\text{рек},l}(t)$ — мгновенное значение тока рекуперации в l -м такте разряда; $t_{\text{раз},l}$ — время разряда в l -м такте разряда.

В общем виде энергию разряда также можно представить:

$$W_{p.N} = W_{рек.N} + W_{Пр.N} , \quad (9)$$

где $W_{Пр.N}$ — энергия потерь в N модулях на этапе разряда.

При асинхронном (рекуперативном) разряде энергия потерь будет равна:

$$W_{Пр.N} = \sum_{n=1}^N W_{Пр.n} , \quad (10)$$

где $W_{Пр.n}$ — энергия потерь в n -м модуле на этапе разряда.

По аналогии с этапом заряда можно доказать, что энергия потерь при $N = L$ и полном асинхронном разряде будет в N раз меньше энергии потерь синхронного разряда.

Мощности потерь, рассеиваемые в ИМ, можно разделить на статические и динамические. Статические потери определяются параметрами проводимости используемых транзисторов и скважностью формируемых импульсных последовательностей. Они рассчитываются как сумма мощностей, рассеиваемых в элементах схемы в паузах между импульсами и во время плоской части импульса. Динамические потери определяются энергией, выделяемой на силовых ключах во время формирования фронта и спада импульсов. Мощность этих потерь определяется емкостью нагрузки, паразитными параметрами монтажа ИМ, частотой импульсов и рабочим напряжением модулей [4].

Для обеспечения потребления равных мощностей от источников питания модулей и исключения перекаса потерь в модулях в алгоритме управления следует реализовать циклический сдвиг очередности работы ключей модулей при формировании каждого нового импульса. При этом один цикл будет содержать количество импульсов, равное числу силовых модулей. Кроме того, как показано в [4], в высоковольтных структурах при последовательном соединении ключевых элементов возникает зависимость величины эквивалентной паразитной емкости нагрузки модуля от номера модуля, что приводит к перекасу потерь в ключах. Для выравнивания потерь в этом случае приходится включать дополнительные конденсаторы различных номиналов параллельно ключевым элементам. Это

приводит к увеличению суммарных потерь. Для многомодульной структуры ИМ, представленной на рис. 1, выравнивание потерь можно получить подстройкой значений питающих напряжений модулей, что не приведет к увеличению общих потерь в ИМ.

Во время формирования фронта и спада импульса возможно появление колебаний, обусловленное возбуждением паразитного LC-контура [5]. Такой контур образован паразитной индуктивностью в цепи нагрузки и ее емкостью. При разработке конструкции ИМ следует минимизировать индуктивность его выводов за счет уменьшения длины соединительных проводников и применения безындукционных ограничительных резисторов.

При проектировании ИМ многомодульной структуры возникает необходимость решения оптимизационной задачи по отысканию значений ряда определяющих параметров согласно выбранному критерию предпочтения. К таким параметрам относятся:

- количество модулей в структуре ИМ;
- количество тактов коммутации на этапах заряда и разряда;
- значения питающих напряжений модулей;
- тип силовых ключей по напряжению, току и быстродействию;
- значения ограничительных сопротивлений модулей, удовлетворяющих допустимому рабочему току силовых ключей, длительностям фронта и спада импульсов модуляции;
- выбор оптимального алгоритма управления (моментов коммутации ключей, использование циклограммы) по критерию выравнивания и минимизации потерь в модулях.

Так, выбор количества модулей зависит от амплитуды напряжения выходного импульса и параметров силовых ключей. Расчет значений ограничительных сопротивлений требуется производить, исходя из минимума тепловых потерь при различных амплитудах токов в разных тактах заряда и разряда или равенства амплитуды токов в каждом такте.

Моделирование переходных процессов в двухмодульной структуре ИМ.

В настоящее время в силовой преобразовательной технике в качестве силовых ключей используют мощные МДП-транзисторы (*MOSFET*) или биполярные транзисторы с изолированным

затвором (*IGBT*) [6]. Поскольку при изготовлении транзисторов существует внутренний разброс параметров структуры, а также присутствуют паразитные емкости, создающие эффект Миллера, требуется осуществлять переключение транзисторов с некоторой паузой для исключения сквозных токов.

Процессы коммутации в двухмодульной идеализированной модели импульсного модулятора (ИМ) с синхронным и асинхронным управ-

лением были выполнены с помощью программы схемотехнического моделирования *MicroCap 9* [7].

На рис. 4 и 5 приведены графики результатов моделирования для синхронного и асинхронного управления силовыми ключами. Параметры элементов модели были выбраны следующими: амплитуда импульса — 2кВ; длительность импульса — 4 мкс; эквивалентная емкость нагрузки — 240 пФ; ограничительные сопротивления (зарядные и разрядные) — 510 Ом.

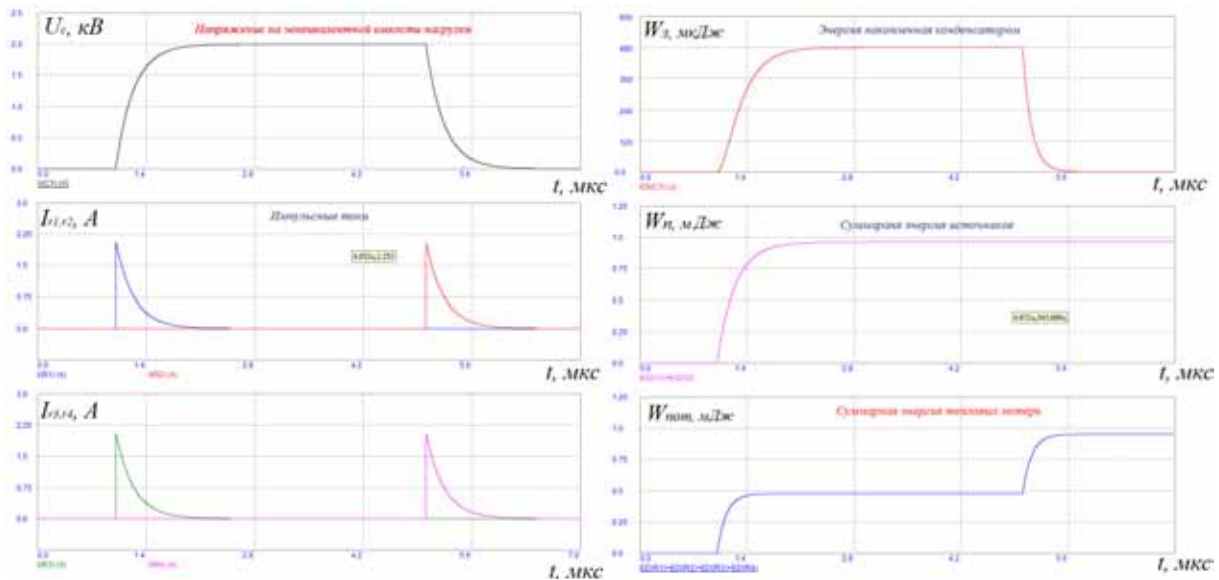


Рис. 4. Результаты моделирования переходных процессов при синхронном управлении

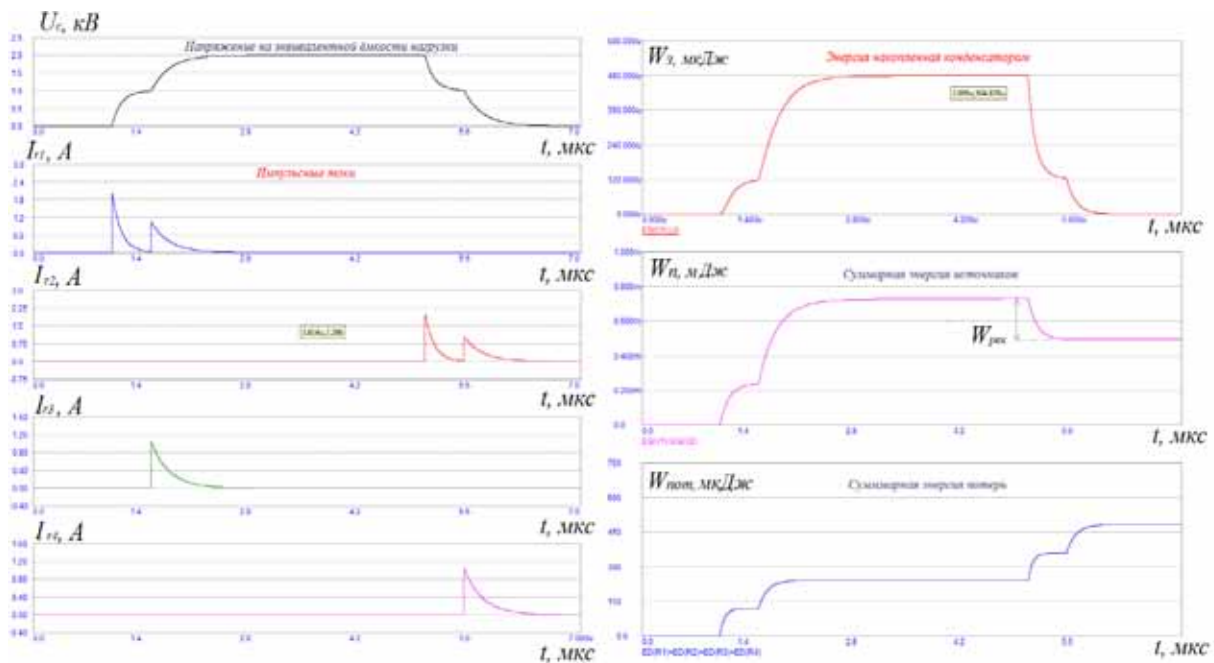


Рис. 5. Результаты моделирования переходных процессов при асинхронном управлении

При асинхронном управлении фронт и спад имеют двухступенчатую форму. За счет того, что моменты коммутации разнесены во времени, наблюдается процесс рекуперации энергии в ис-

точник питания. При этом уменьшаются тепловые потери и энергопотребление. Сравнительный анализ энергетических показателей для двух видов управления приведен в таблице.

Сравнительный анализ двухмодульной структуры ИМ с синхронным и асинхронным управлением

Синхронное управление	Асинхронное управление
Энергия в эквивалентной емкости нагрузки	
480 мкДж	480 мкДж
Суммарная энергия, потребляемая от источников	
960 мкДж	480 мкДж
Суммарная энергия тепловых потерь	
На этапе заряда — 480 мкДж На этапе разряда — 480 мкДж	На этапе заряда — 240 мкДж На этапе разряда — 240 мкДж
Энергия рекуперации в источник	
Равна нулю	240 мкДж
КПД	
<p>На этапе заряда:</p> $\eta_{зс} = \frac{(U_{\kappa}^2 - U_0^2)}{2U_n^2(e^{-\frac{t_3}{RC}} - 1)} \rightarrow 0,5 ,$ <p>На этапе разряда: вся накопленная энергия рассеивается в тепло</p>	<p>На этапе заряда:</p> $\eta_{зас} = \frac{(U_{\kappa 1}^2 - U_0^2) + (U_{\kappa 2}^2 - U_{\kappa 1}^2)}{2U_n^2((e^{-\frac{t_3}{RC}} - 1) + 2(e^{-\frac{t_3}{2RC}} - 1))} \rightarrow 0,66 ,$ <p>где $U_{\kappa 1}$ — напряжение на емкости после 1-й ступени заряда, $U_{\kappa 2}$ — напряжение на емкости после 2-й ступени заряда.</p> <p>На этапе разряда:</p> $\eta_{p2} = \frac{2U_{n2}(U_{\kappa 2} - U_{n2})(e^{-\frac{t_{рек}}{RC}} - 1)}{(U_0^2 - U_{\kappa 1}^2) + (U_{\kappa 1}^2 - U_{\kappa 2}^2)} \rightarrow 0,49$

Как видно из таблицы, при асинхронном управлении суммарная энергия тепловых потерь вдвое меньше, чем при синхронном управлении. За счет дискретной рекуперации энергии в источник уменьшается энергопотребление и возрастает КПД как на этапе заряда, так и на этапе разряда емкости нагрузки.

Практическая реализация и выводы.

Для проверки полученных результатов была выполнена практическая реализация опытного образца импульсного твердотельного модулятора для пролетного клистрона многофункциональной РЛС с выходной импульсной СВЧ-мощностью 10 кВт. ИМ работает под потенциалом 12 кВ относительно корпуса и обладает защитой от возможных пробоев в клистроне. Образец содержит шесть

последовательно соединенных однотипных модулей, формирующих импульсное напряжение с максимальной амплитудой 3,5 кВ и широким диапазоном изменения периода повторения импульсов. В качестве ключевых элементов применены высоковольтные МДП-транзисторы. Было установлено, что применение дискретной рекуперации энергии в таком модуляторе при формировании длительности фронтов 1–1,2 мкс позволило уменьшить мощность потерь в среднем в 5,2 раза, что согласуется с расчетными данными. Отличия от расчетных данных вызваны наличием сопротивлений реальных ключевых элементов (транзисторов), паразитных параметров монтажа, а также зависимостью паразитных параметров от номера модуля, что связано с различными значениями потенциалов модулей относительно корпуса ИМ.

Таким образом, получены математические выражения и проведены расчеты для оценки энергетической эффективности многомодульной структуры ИМ. Полученные результаты показывают, что применение асинхронного алгоритма управления в многомодульной структуре позволяет реализовать режим дискретной рекуперации энергии и существенно снизить тепловые потери, а также мощность коммутационной помехи. Это приводит к уменьшению массы и габаритов ИМ, а также способствует повышению надежности всего передающего устройства многофункциональной РЛС.

Литература:

1. Коновалов, С. И., Доницков, О. В. Исследование процессов коммутации в твердотельных импульсных модуляторах приборов СВЧ с апериодической формой перезаряда емкости нагрузки / С. И. Коновалов, О. В. Доницков // *Новости науки и технологий*. — 2015. — № 4 (35). — С. 12–17.

2. Импульсный модулятор с формирователем ступенчатого напряжения: Евразийский патент EP019111, МПК H03F003/217, H03K, H02M / С. И. Коновалов,

Ю. А. Польшинкин, Г. В. Кирячок, Т. В. Бондаровец; заявитель: Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП». — № 201101539; заявл. 23.08.2011; опубл. 28.02.2013.

3. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника / В. И. Мелешин. — М.: Техносфера, 2005. — 185 с.

4. Платонов, С. А. Твердотельные импульсные модуляторы мощных генераторных электровакуумных приборов СВЧ: дис. канд. техн. наук: 05.12.04; защищена 20.09.2014 — М., 2014. — 181 с.

5. Казанцев, В. И. Влияние паразитных параметров на разброс напряжений в высоковольтных твердотельных ключах, построенных по последовательной схеме / В. И. Казанцев, С. А. Платонов, В. Г. Сергеев // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение*. — 2012. — Спец. выпуск.

6. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. Серия «Компоненты и технологии» / Б. Ю. Семенов. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. — 416 с.

7. Амелина, М. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9,10 / М. А. Амелина, С. А. Амелин. — Смоленск: Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012. — 617 с.

УДК 001.895:316.334.52

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ИННОВАЦИОННОЙ СФЕРЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ ГЛОБАЛЬНОГО ИНДЕКСА ИННОВАЦИЙ

ANALYSIS OF DEVELOPMENT OF INNOVATION SPHERE OF THE REPUBLIC OF BELARUS BASED ON THE GLOBAL INNOVATION INDEX

С. Б. Соболевский,

зав. отделом ГУ «БелИСА», канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

М. С. Перепелица,

науч. сотрудник ГУ «БелИСА», аспирант, г. Минск, Республика Беларусь

А. Г. Климков,

зав. сектором ГУ «БелИСА», аспирант, г. Минск, Республика Беларусь

S. Sobolevskiy,

Head of the Department of the SO "BellISA", PhD, Associate Professor, Minsk, Republic of Belarus

M. Perapialitsa,

Science officer of the SO "BellISA", PhD student, Minsk, Republic of Belarus

A. Klimkou,

Head of the Sector of the SO "BellISA", PhD student, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 22.01.2019 г.

Выполнена индикативная оценка текущего состояния и динамики развития инновационной сферы Республики Беларусь по результатам Глобального индекса инноваций в 2012–2018 гг. Определены сильные и слабые стороны инновационного профиля Республики Беларусь.