

ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНОГО ЗАПАСА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ АВТОНОМНОГО ФОРМИРОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

А. А. Волков¹, П. А. Трифонов²

¹ – *Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»;*

² – *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 31.01.2021 г.

Аннотация. На основе уравнения энергетического баланса автономного формирователя электромагнитного поля с учетом потерь холостого хода получены соотношения, определяющие минимальный запас энергии источника питания, необходимый для генерации последовательности импульсов с заданными параметрами. Рассматривались идеальный генератор постоянной электродвижущей силы, а также емкостной и индуктивный накопители энергии. Установлено, что использование реактивного накопителя в качестве источника питания генератора электромагнитного поля при некоторых значениях параметров формируемой импульсной последовательности и постоянных времени разрядных цепей позволяет получить небольшой энергетический выигрыш перед генератором электродвижущей силы.

Ключевые слова: формирователь электромагнитного поля, источник питания, накопитель энергии, потери холостого хода.

ESTIMATION OF THE MINIMUM ENERGY RESERVE OF THE POWER SOURCE OF AN AUTONOMOUS PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD FORMER

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

Abstract. Based on the energy balance equation of an autonomous electromagnetic field shaper, taking into account the no-load losses, the relations determining the minimum energy reserve of the power source necessary for generating a sequence of pulses with specified parameters are obtained. An ideal generator of constant electromotive force, as well as capacitive and inductive energy storage is considered. It has been established that the use of a reactive storage device as a power source for an electromagnetic field generator at some values of the parameters of the generated pulse sequence and the time constants of the discharge circuits makes it possible to obtain a small energy gain before the electromotive force generator.

Keywords: electromagnetic field shaper, microwave generator, power source, energy storage, no-load losses.

ВВЕДЕНИЕ

Формирователи импульсного электромагнитного поля (ЭМП) являются неотъемлемой частью радиоизлучающих средств и находят широкое практическое применение в радиолокации, радиосвязи, радиоэлектронной борьбе и других отраслях народного хозяйства. В общем случае в состав формирователя входят источник питания, генератор ЭМП и излучающая антенна. В зависимости от условий применения и решаемых задач формирователи ЭМП могут быть зависимыми от внешних электрических сетей и автономными. В первом случае в качестве источников энергии могут использоваться промышленные (бытовые) или бортовые электрические сети с очень большим энергетическим ресурсом, обеспечивающие необходимую потребляемую мощность. Во втором случае запас энергии источника питания во время выполнения задачи, как правило, пополняться не может, но при этом его должно быть достаточно для формирования последовательности импульсов ЭМП с заданными параметрами.

Типичной задачей, для решения которой целесообразно использовать автономные формирователи ЭМП, является задача электромагнитного поражения радиоэлектронных средств [1]. Для доставки формирователя в район расположения целей могут быть использованы различные воздушные носители — ракеты, управляемые и неуправляемые авиационные бомбы, снаряды и т. п. [1,2]. Указанные типы носителей имеют жесткие массогабаритные ограничения при размещении на них полезных нагрузок.

При разработке автономных формирователей ЭМП необходимо решить ряд технических задач, одной из которых является оценка требуемого запаса энергии источника питания. Данный показатель позволяет осуществить выбор типа источника питания и определить его массогабаритные параметры [3]. Кроме этого, запас энергии источника питания определяет параметры излучения генератора и, следовательно, эффективность формирователя ЭМП. В известной литературе [3, 4, 5] указанный вопрос освещен не достаточно, поэтому целью статьи является оценка требований к запасу энергии источника питания автономного формирователя ЭМП.

ТРЕБОВАНИЯ К МИНИМАЛЬНОМУ ЗАПАСУ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Запас энергии источника питания должен обеспечить генерацию последовательности импульсов с заданными параметрами с учетом возможных потерь в генераторной схеме. При формировании импульсной последовательности энергетические потери удобно разделить на потери, сопутствующие процессу генерации импульсов, и потери, возникающие во время пауз между импульсами, т.е. в состоянии холостого хода. Тогда требование к начальной энергии источника питания можно представить в виде:

$$W_{\text{ИП}0} \geq W_{\text{ИП}0 \text{ min}} = \sum_{i=1}^N W_{\text{ИП ген } i} + \sum_{i=1}^{N-1} W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ИП}0}$ — запас энергии источника питания; $W_{\text{ИП}0 \text{ min}}$ — минимально допустимое значение энергии источника питания; $W_{\text{ИП ген } i}$ — энергия источника питания, затраченная на генерацию i -го импульса с сопутствующими потерями; $W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}$ — энергия источника питания, теряемая в состоянии холостого хода во время паузы между i -м и $(i+1)$ -м импульсами; N — количество импульсов в последовательности.

В состоянии генерации импульса потери учитываются показателем эффективности генератора — коэффициентом полезного действия (КПД). Энергия i -го сгенерированного импульса ЭМП W_i равна:

$$W_i = \eta_i W_{\text{ИП ген } i}, \quad (2)$$

где η_i — КПД генератора при формировании i -го импульса.

Потери энергии во время пауз между импульсами удобно выражать в долях энергии, затраченной на генерацию импульса:

$$\chi_{w\ i(i+1)} = \frac{W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}}{W_{\text{ИП ген } i}}, \quad (3)$$

где $\chi_{w\ i(i+1)}$ — коэффициент потерь энергии во время паузы между i -м и $(i + 1)$ -м импульсами (коэффициент потерь холостого хода). Этот показатель зависит от типа генератора, типа источника питания и генераторной схемы.

С учетом (2) и (3) минимальная энергия источника питания будет определяться выражением:

$$W_{\text{ИП0 min}} = \sum_{i=1}^{N-1} \left((1 + \chi_{w\ i(i+1)}) \frac{W_i}{\eta_i} \right) + \frac{W_N}{\eta_N}. \quad (4)$$

Анализ электрических процессов в схеме “источник питания — генератор ЭМП” удобно проводить на основе упрощенных эквивалентных схем, позволяющих установить основные закономерности в первом приближении [3]. Далее будет считаться, что генератор как элемент нагрузки представляет собой постоянное активное сопротивление величиной $R_{\text{н}}$, а потери холостого хода обусловлены токами утечки через постоянное активное сопротивление величиной R_{χ} . В качестве основных моделей источников питания будут рассмотрены идеальный источник постоянной электродвижущей силы (ЭДС) [6], а также емкостной и индуктивный накопители энергии [5].

Параметры формируемой импульсной последовательности в общем случае могут меняться от импульса к импульсу. Однако на практике чаще всего используется режим генерации последовательности N импульсов постоянной длительности τ с постоянным периодом повторения T . Поэтому ниже будет рассматриваться указанный режимы работы формирователя ЭМП. Также будет считаться, что КПД генератора не зависит от номера импульса, т. е. $\eta_i = \eta$.

Эквивалентная схема цепи питания формирователя ЭМП будет иметь вид, показанный на рисунке 1, где обозначено: S — переключатель состояний формирователя; 1 — положение переключателя в состоянии генерации импульса; 2 — положение переключателя в состоянии холостого хода; E — ЭДС идеального генератора; C , L — емкость и индуктивность, соответственно, емкостного и индуктивного накопителей.

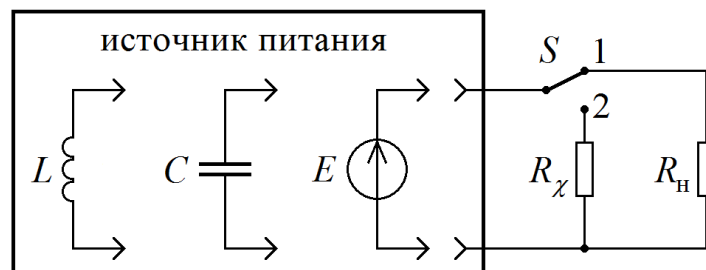


Рис. 1. Эквивалентная схема цепи питания формирователя ЭМП

При использовании в качестве источника питания генератора постоянной ЭДС значения энергий $W_{\text{ИП ген } i}$ и $W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}$ будут равны:

$$W_{\text{ИП ген } i} = W_{\text{ИП ген}} = \frac{E^2 \tau}{R_{\text{н}}}, \quad (5)$$

$$W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)} = W_{\text{ИП ХХ}} = \frac{E^2 (T - \tau)}{R_{\text{Х}}}. \quad (6)$$

Подстановка (5) и (6) в (3) дает:

$$\chi_{w \ i(i+1)} = \chi_w = \frac{R_{\text{н}} (T - \tau)}{R_{\text{Х}} \tau}. \quad (7)$$

В рассматриваемом режиме при использовании в качестве источника питания идеального генератора ЭДС энергия формируемого импульса, как и коэффициент потерь холостого хода, не зависит от номера импульса, т.е. $W_i = W$. Следовательно, нижняя граница энергии идеального генератора ЭДС будет определяться выражением:

$$W_{\text{ИП } 0 \text{ min}} = \left(1 + \frac{R_{\text{н}} (N - 1) (T - \tau)}{R_{\text{Х}} N \tau} \right) \frac{NW}{\eta}. \quad (8)$$

Полная энергия последовательности импульсов ЭМП в данном случае не зависит от длительности и периода повторения импульсов и равна $W_{\Sigma} = NW$.

Процессы разряда емкостных и индуктивных накопителей через активную нагрузку описываются, соответственно, дифференциальными уравнениями [6]:

$$C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R} = 0, \quad (9)$$

$$L \frac{di_L}{dt} + Ri_L = 0, \quad (10)$$

где u_C — напряжение на емкостном накопителе; i_L — ток через индуктивный накопитель; R — сопротивление цепи разряда. В состоянии генерации импульса $R = R_{\text{н}}$, а в состоянии холостого хода $R = R_{\text{Х}}$.

Уравнения (9) и (10) при помощи замены переменных, соответственно $W_{\text{ИП мгн}} = Cu_C^2/2$ и $W_{\text{ИП мгн}} = Li_L^2/2$, где $W_{\text{ИП мгн}}$ — мгновенная энергия реактивного накопителя, могут быть преобразованы к единому энергетическому уравнению:

$$\frac{dW_{\text{ИП мгн}}}{dt} + 2 \frac{W_{\text{ИП мгн}}}{\tau_0} = 0, \quad (11)$$

где τ_0 — постоянная времени разрядной цепи. Для емкостного накопителя $\tau_0 = RC$, а для индуктивного — $\tau_0 = L/R$.

Считая момент времени t_0 началом разряда накопителя, решение (11) можно представить в виде [7]:

$$W_{\text{ИП мгн}} (t) = W_{\text{ИП мгн}} (t_0) e^{-2(t-t_0)/\tau_0}. \quad (12)$$

Согласно (12) на генерацию i -го импульса формирователь затратит энергию:

$$W_{\text{ИП ген } i} = W_{\text{ИП } i} \left(1 - e^{-2\tau/\tau_{\text{н}}} \right) \quad (13)$$

где $W_{\text{ИП } i}$ — энергия накопителя в момент начала i -го импульса; $\tau_{\text{н}}$ — постоянная времени разрядной цепи в состоянии генерации импульса: $\tau_{\text{н}} = R_{\text{н}}C$ — для емкостного накопителя, $\tau_{\text{н}} = L/R_{\text{н}}$ — для индуктивного накопителя.

Энергия накопителя в конце i -го импульса равна $W_{\text{ИП } i} e^{-2\tau/\tau_{\text{н}}}$, поэтому энергия потерь холостого хода во время паузы между i -м и $(i + 1)$ -м импульсами будет определяться выражением:

$$W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)} = W_{\text{ИП } i} e^{-2\tau/\tau_{\text{н}}} \left(1 - e^{-2(T-\tau)/\tau_{\text{Х}}} \right), \quad (14)$$

где τ_χ — постоянная времени разрядной цепи в состоянии холостого хода: $\tau_\chi = R_\chi C$ — для емкостного накопителя, $\tau_\chi = L/R_\chi$ — для индуктивного накопителя.

Подстановка (13) и (14) в (3) дает:

$$\chi_{w\ i(i+1)} = \chi_w = \frac{e^{-2\tau/\tau_n}}{1 - e^{-2\tau/\tau_n}} \left(1 - e^{-2(T-\tau)/\tau_\chi}\right). \quad (15)$$

При использовании в качестве источника питания емкостного или индуктивного накопителя коэффициент потерь холостого хода, как и в предыдущем случае, не зависит от номера импульса. Энергия формируемого импульса при этом является функцией номера импульса.

На формирование i -го импульса и за время последующей межимпульсной паузы накопитель израсходует энергию $W_{\text{ИП ген } i} + W_{\text{ИП ХХ } i(i+1)}$. Следовательно, энергия накопителя в момент начала $(i + 1)$ -го импульса будет равна:

$$W_{\text{ИП } i+1} = W_{\text{ИП } i} e^{-2\left(\frac{\tau}{\tau_n} + \frac{T-\tau}{\tau_\chi}\right)}. \quad (16)$$

Закон изменения энергии $W_{\text{ИП } i}$, как следует из (16), имеет вид:

$$W_{\text{ИП } i} = W_{\text{ИП } 1} e^{-2(i-1)\left(\frac{\tau}{\tau_n} + \frac{T-\tau}{\tau_\chi}\right)}. \quad (17)$$

Из (2) с учетом (13) и (17) можно определить закон изменения энергии формируемых импульсов ЭМП:

$$W_i = W_1 e^{-2(i-1)\left(\frac{\tau}{\tau_n} + \frac{T-\tau}{\tau_\chi}\right)}, \quad (18)$$

где $W_1 = \eta W_{\text{ИП } 1} (1 - e^{-2\tau/\tau_n})$ — энергия первого импульса, являющаяся наибольшей в последовательности. При увеличении номера импульса энергия убывает по экспоненциальному закону.

Полная энергия последовательности импульсов ЭМП равна:

$$W_\Sigma = \sum_{i=1}^N W_i = W_1 \frac{1 - e^{-2N\left(\frac{\tau}{\tau_n} + \frac{T-\tau}{\tau_\chi}\right)}}{1 - e^{-2\left(\frac{\tau}{\tau_n} + \frac{T-\tau}{\tau_\chi}\right)}}. \quad (19)$$

В данном случае энергия W_Σ зависит не только от количества импульсов, но и от их длительности и периода повторения, а также от параметров цепи питания формирователя.

Подстановка (15) и (18) в (4) приводит к выражению:

$$W_{\text{ИП } 0 \text{ min}} = \frac{1 - e^{-\frac{2N\tau}{\tau_n} \left(1 + \frac{\tau_n}{\tau_\chi} \frac{(N-1)(T-\tau)}{N\tau}\right)}}{1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau_n}}} \frac{W_1}{\eta} \quad (20)$$

При выполнении условий $\tau \ll \tau_n$ и $T - \tau \ll \tau_\chi$, т. е. при очень коротких импульсах и интервалах между ними, энергии импульсов в последовательности будут примерно одинаковыми, а выражение (20) примет вид:

$$W_{\text{ИП } 0 \text{ min}} = \left(1 + \frac{\tau_n}{\tau_\chi} \frac{(N-1)(T-\tau)}{N\tau}\right) \frac{NW_1}{\eta}. \quad (21)$$

Из сравнения (21) с (8) можно сделать вывод о том, что при очень больших по сравнению с длительностью импульсов и межимпульсными интервалами постоянных времени цепей разряда источник энергии на основе реактивного элемента ведет себя как генератор ЭДС.

ОЦЕНКА И СРАВНЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО МИНИМАЛЬНОГО ЗАПАСА ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ

Поскольку в формирователях ЭМП с емкостными и индуктивными накопителями энергия излучаемых импульсов уменьшается при увеличении номера, то для проведения корректного сравнения рассматриваемых источников питания необходимо перейти к оценкам, связанным с полной энергией импульсной последовательности. Для формирователей с генератором ЭДС такая оценка в соответствии с (8) определяется формулой:

$$W_{\text{ИП0 min}} = \left(1 + \chi \frac{(N-1)(T-\tau)}{N\tau} \right) \frac{W_{\Sigma}}{\eta}, \quad (22)$$

где $\chi = R_{\text{н}}/R_{\chi}$ — коэффициент потерь мощности.

Для формирователей с реактивным накопителем оценка минимального запаса энергии в соответствии с (19) и (20) проводится по формуле:

$$W_{\text{ИП0 min}} = \frac{1 - e^{-\frac{2N\tau}{\tau_{\text{н}}}\left(1 + \chi \frac{(N-1)(T-\tau)}{N\tau}\right)}}{1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau_{\text{н}}}}} \frac{1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau_{\text{н}}}\left(1 + \chi \frac{T-\tau}{\tau}\right)}}{1 - e^{-\frac{2N\tau}{\tau_{\text{н}}}\left(1 + \chi \frac{T-\tau}{\tau}\right)}} \frac{W_{\Sigma}}{\eta}, \quad (23)$$

где $\chi = \tau_{\text{н}}/\tau_{\chi}$. Для емкостного накопителя $\chi = R_{\text{н}}/R_{\chi}$, а для индуктивного — $\chi = R_{\chi}/R_{\text{н}}$.

Анализ (22) и (23) показал, что величина минимального запаса энергии как генератора ЭДС, так и реактивного накопителя, отнесенная к полной энергии последовательности импульсов ЭМП, практически не зависит от количества импульсов уже при $N \geq 10$.

С использованием выражений (22) и (23) проведена оценка требуемого минимального запаса энергии источников питания формирователей ЭМП, построенных на основе мощных релятивистских сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов [8]. Такие формирователи технически реализуемы [9] и позволяют генерировать СВЧ импульсы ЭМП гигаваттного уровня мощности.

В качестве исходных данных для расчета приняты типовые значения длительностей и периода повторения импульсов ЭМП мощных релятивистских СВЧ генераторов. У современных приборов данного типа характерные длительности импульсов составляют десятки-сотни наносекунд, а частоты повторения не превышают сотен герц, т. е. выполняется условие:

$$T \gg \tau. \quad (24)$$

Ниже будет считаться, что $N \gg 1$. При этом с учетом условия (24) оценка минимального запаса энергии источников питания может быть проведена по формулам:

— для идеального генератора ЭДС:

$$W_{\text{ИП0 min}} = \left(1 + \frac{\chi T}{\tau} \right) \frac{W_{\Sigma}}{\eta}; \quad (25)$$

— для реактивного накопителя:

$$W_{\text{ИП0 min}} = \frac{1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau_{\text{н}}}\left(1 + \frac{\chi T}{\tau}\right)}}{1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau_{\text{н}}}}} \frac{W_{\Sigma}}{\eta}. \quad (26)$$

На рисунке 2 показаны графики зависимостей требуемого минимального запаса энергии источников питания разных типов, нормированного к величине W_{Σ}/η , от длительности импульсов при различных значениях произведения χT .

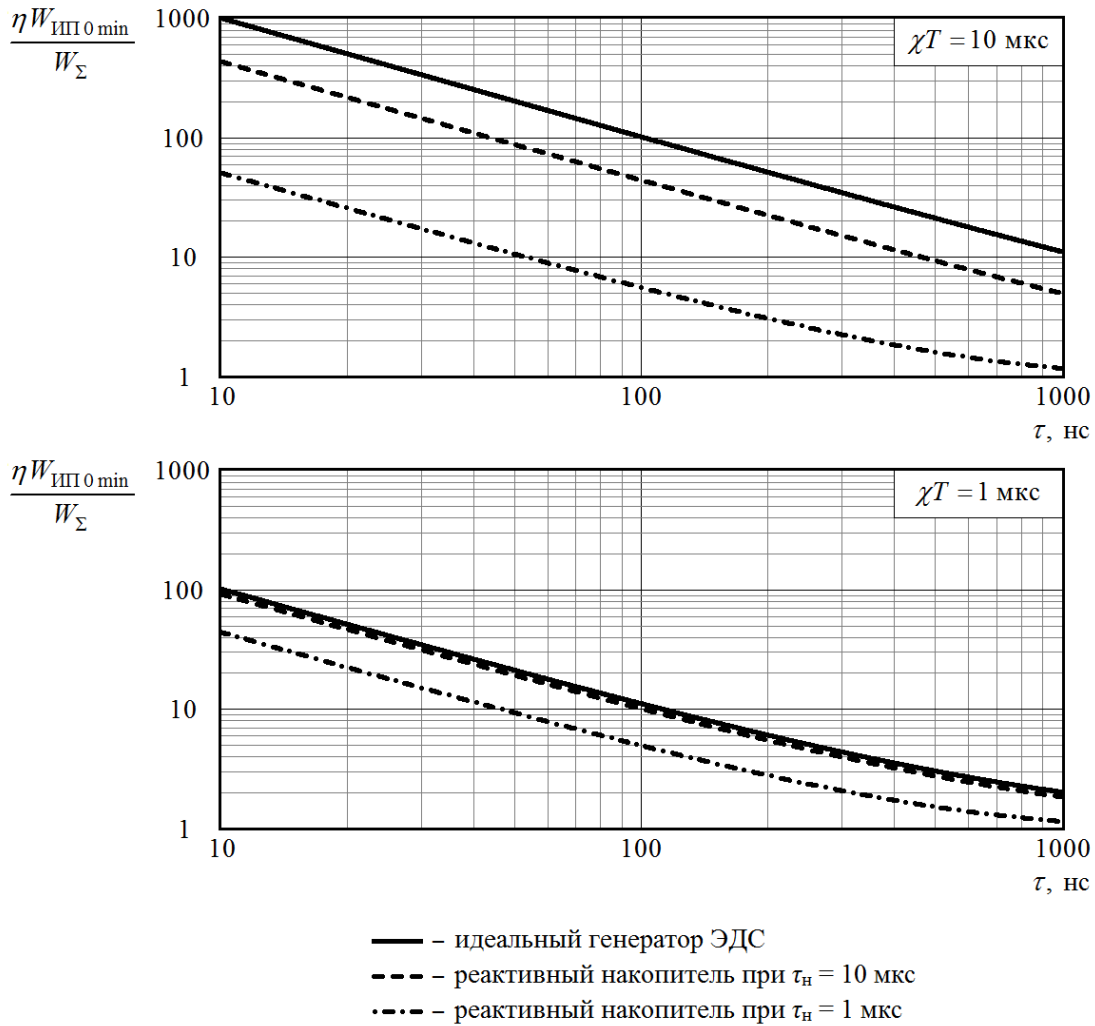


Рис. 2. Зависимости требуемого минимального запаса энергии источников питания разных типов от длительности формируемых импульсов.

Из графиков видно, что требуемый минимальный запас энергии снижается при увеличении длительности импульса, а также при уменьшении периода повторения и (или) потерь холостого хода. Кривая, соответствующая источнику ЭДС, является граничной для кривых, соответствующих реактивному накопителю, при неограниченном увеличении постоянной времени разрядной цепи. Указанная величина оказывает существенное влияние на требуемый минимальный запас энергии реактивного накопителя. При уменьшении τ_n снижается необходимый запас энергии накопителя, однако при этом, согласно (18), уменьшается и энергосодержание всех импульсов в последовательности, следующих за первым. В частности, при $\tau_n = \tau + \chi T$ более 86% энергии всей пачки будет содержаться в первом импульсе. Дальнейшее уменьшение τ_n приведет к режиму формирования одиночного импульса. Поэтому для обеспечения пачечного режима постоянную времени цепи разряда реактивного накопителя следует выбирать из условия $\tau_n > \tau + \chi T$. При некоторых значениях параметров импульсно-периодического режима и постоянных времени реактивный накопитель имеет небольшой энергетический выигрыш перед генератором ЭДС. Так при $\tau = 100 \text{ нс}$, $\chi T = 10 \text{ мкс}$ требуемый запас энергии генератора ЭДС составляет $101W_\Sigma/\eta$, а запас энергии реактивного накопителя при тех же исходных данных и $\tau_n = 100 \text{ мкс}$ – $91,5W_\Sigma/\eta$ (меньше на 9,4%). При указанных парамет-

рах для схемы с реактивным накопителем энергия каждого последующего импульса в пачке, начиная со второго, будет составлять 0,817 от энергии предыдущего импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получены соотношения, определяющие минимальный запас энергии источника питания, необходимый для генерации последовательности импульсов с заданными параметрами. Основой для этого послужило уравнение энергетического баланса автономного формирователя ЭМП с учетом потерь холостого хода. В качестве основных моделей источников питания рассматривались идеальный генератор постоянной ЭДС, а также емкостной и индуктивный накопители энергии. Установлено, что в импульсно-периодическом режиме потери холостого хода оказывают существенное влияние на требуемый начальный запас энергии источника. Для их компенсации необходима дополнительная энергия, величина которой пропорциональна количеству импульсов и межимпульсной паузе. Кроме того, требуемый начальный запас энергии емкостных и индуктивных элементов зависит от постоянных времени разрядных цепей. При очень больших по сравнению с длительностью импульсов и межимпульсными интервалами постоянных времени цепей разряда источник энергии на основе реактивного элемента ведет себя как генератор ЭДС. Уменьшение постоянных времени цепей разряда снижает требуемый энергетический запас, но при этом увеличивает различие формируемых импульсов по энергии. При малых значениях постоянных времени почти вся энергия накопителя будет израсходована на формирование первого импульса, а пачечный режим обеспечен не будет. Использование реактивного накопителя в качестве источника питания генератора ЭМП при некоторых значениях параметров формируемой импульсной последовательности и постоянных времени разрядных цепей позволяет получить небольшой энергетический выигрыш перед генератором ЭДС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарёв, Л. Н. Шустов. — М. : Вузовская книга, 2007. — 468 с.
2. Средства поражения и боеприпасы / Под ред. В. В. Селиванова. — М. : Издательство МГТУ им. Баумана, 2008. — 984 с.
3. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В. Е. Фортова. — М. : Наука, 2002. — 399 с.
4. Диденко, А. Н. Мощные электронные пучки и их применение / А. Н. Диденко, В. П. Григорьев, Ю. П. Усов. — М. : Атомиздат, 1977. — 280 с.
5. Накопители энергии / Под ред. Д. А. Бута. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 440 с.
6. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи / Л. А. Бессонов. — М. : Высшая школа, 1978. — 528 с.
7. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Э. Эльсгольц. — М. : Наука, 1969. — 424 с.
8. Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика / А. Н. Диденко. — М. : Наука, 2003. — 446 с.
9. Источники СВЧ излучения с виртуальным катодом [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://portal.tpu.ru:7777/departments/laboratory/lab42/sciense/svch_virt (дата обращения 2.07.2021 г.).

REFERENCES

1. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G., Shustov L.N. Radio-electronic fight. Power defeat of radio-electronic systems. [Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G., Shustov L.N.

Radioelektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioelektronnykh system]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, 468 p.

2. Means of destruction and ammunition. [Sredstva porazheniya i boyepripasy]. Ed. by V.V. Selivanov. Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2008, 984 p.

3. Explosive generators of powerful pulses of electric current. [Vzryvnyye generatory moshchnykh impul'sov elektricheskogo toka]. Ed. by V.E. Fortov. Moscow: Nauka, 2002, 399 p.

4. Didenko A.N., Grigor'yev V.P., Usov Yu.P. Powerful electron beams and their application. [Didenko A.N., Grigor'yev V.P., Usov Yu.P. Moshchnyye elektronnyye puchki i ikh primeneniye]. Moscow: Atomizdat, 1977, 280 p.

5. Energy storage devices. [Nakopiteli energii]. Ed. by D.A. But. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 440 p.

6. Bessonov L.A. Theoretical foundations of electrical engineering: electrical circuits. [Bessonov L.A. Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki: elektricheskiye tsepi]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978, 528 p.

7. Elsgolz L.E. Differential equations and calculus of variations. [Elsgolz L.E. Differentsial'nyye uravneniya i variatsionnoye ischisleniye]. Moscow: Nauka, 1969, 424 p.

8. Didenko A.N. Microwave power engineering: Theory and practice. [Didenko A.N. SVCh-e'nergetika: Teoriya i praktika]. Moscow: Nauka, 2003, 446 p.

9. Sources of microwave radiation with a virtual cathode. [Istochniki SVCh izlucheniya s virtual'nym katodom]. Access mode:

http://portal.tpu.ru:7777/departments/laboratory/lab42/sciense/svch_virt
(accessed 2.07.2021).

Волков Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, преподаватель Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", Воронеж, Россия
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru

Volkov Aleksey Anatolevich, candidate of engineering sciences, lecturer of Military Educational-Research Centre of Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin", Voronezh, Russia
E-mail: volkov_aa@autorambler.ru

Трифонов Павел Андреевич, доктор технических наук, профессор Воронежского государственного университета, доцент, Воронеж, Россия
E-mail: bk_123@bk.ru

Trifonov Pavel Andreevich, doctor of engineering sciences, professor of Voronezh State University, docent, Voronezh, Russia
E-mail: bk_123@bk.ru