

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Комяков Александр Анатольевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

Тел.: 8-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### Пономарев Антон Витальевич

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника», ОмГУПС.

### Эрбес Виктор Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-производственной лаборатории «Энергосберегающие технологии и электромагнитная совместимость», ОмГУПС.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Комяков, А. А. Разработка технологии повышения энергетической эффективности производственных процессов в сервисных локомотивных депо [Текст] / А. А. Комяков, А. В. Пономарев, В. В. Эрбес // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – № 2 (34). – С. 76 – 85.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Komyakov Alexander Anatolievich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

Phone: 8-904-322-89-05.

E-mail: tskom@mail.ru

### Ponomarev Anton Vitalevich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Cand.Tech.Sci., the senior lecturer of chair «Theoretical the electrical engineer», OSTU.

### Erbes Viktor Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation. Cand.Tech.Sci., senior researcher of research-and-production laboratory «Energy-efficient technologies and electromagnetic compatibility», OSTU.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Komyakov, A. A. The development technologies of increasing energy efficiency of production processes in service locomotive depo. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 76 – 85 (In Russian).

УДК 620.91

**К. В. Менакер, Д. А. Яковлев, М. В. Востриков**

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ), г. Чита, Российская Федерация

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НЕТЯГОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

**Аннотация.** В статье предложен способ повышения эффективности систем электропитания нетяговых потребителей за счет квадратичного накопления электрической энергии на реактивных элементах в режиме биений частоты. Приводится доказательство энергетической эффективности режима биений по сравнению с режимом полного резонанса применительно к реализации квазирезонансных импульсных источников электропитания. В статье рассматриваются также вопросы выбора оптимальной частоты биений по критерию максимального отношения накапливаемой энергии на реактивных элементах контура к затрачиваемой от первичного источника.

**Ключевые слова:** резонанс, колебательный контур, импульсный источник, квадратичный способ, частота свободных колебаний.

Konstantin V. Menaker, Dmitriy A. Yakovlev, Maksim V. Vostrikov

Transbaikal Institute of Railway Transport, Chita, the Russian Federation

## INCREASE OF EFFICIENCY OF OPERATION OF ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEMS OF NONTYAGOVY CONSUMERS

**Abstract.** The article proposes a method for increasing the efficiency of power supply systems for non-tangible consumers due to quadratic accumulation of electric energy on reactive elements in the frequency-beating mode. The proof of the energy efficiency of the beating regime in comparison with the full resonance regime with respect to the implementation of quasiresonance pulsed power supplies is given. The article also deals with the choice of the optimal beat frequency by the criterion of the maximum ratio of the accumulated energy on the reactive elements of the circuit to the one expended from the primary source.

**Keywords:** resonance, oscillatory circuit, pulse source, quadratic method, frequency of free oscillations.

Импульсные источники электропитания являются неотъемлемой частью большинства современных электронных устройств, включая системы электропитания нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Современные устройства электропитания микропроцессорных систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи практически полностью импульсного исполнения.

От эффективности источников электропитания во многом зависит экономичность питаемых устройств. Исследования показали, что несмотря на то, что коэффициент полезного действия ряда современных импульсных источников относительно высок, имеется большой запас по повышению его значения. Во время работы импульсных источников электропитания переменный или постоянный ток первичного источника преобразуется в импульсный высокочастотный ток с последующим его преобразованием в требуемый уровень напряжения на нагрузке. Накопление энергии и последующая ее передача на нагрузку происходит в реактивных элементах в течение одного периода работы электронных ключей. В этом и состоит ограничение эффективности современных импульсных источников.

В работах [1 – 6] была предложена концепция создания высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе закона квадратичного накопления электрической энергии, заключающегося в квадратичном увеличении энергии магнитного и электрического поля реактивных элементов в течение нескольких тактов (периодов) синхронного взаимодействия с первичным источником, затраченная энергия которого есть линейная функция времени.

В данной работе приведено доказательство возможности реализации высокоэффективных импульсных источников электропитания в режиме биения частоты, имеющем ряд технических преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными схемами.

Проведенные исследования показали, что действие закона квадратичного накопления энергии наблюдается и в режиме биений частоты. Известно, что при включении в последовательную RLC-цепь источника гармонического напряжения, частота которого близка к резонансной, но не равна ей, в цепи наблюдаются биения, заключающиеся в периодическом увеличении амплитуды тока или напряжения до значения, существенно превышающего амплитуду вынужденной составляющей [7].

Проанализируем переходные процессы, возникающие при подключении последовательной RLC-цепи к источнику гармонического напряжения  $u(t) = E_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi)$ , мгновенное значение ЭДС которого при  $t = 0$  равно нулю ( $\psi = -\pi / 2$ ).

Данный режим подробно рассмотрен во многих работах, в том числе и в источниках [7, 8]. Вынужденная и свободная составляющие тока в этом режиме описываются известными выражениями:

$$i_{\text{вын}}(t) = I_{m \text{ вын}} \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi - \varphi) = I_{m \text{ вын}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi); \quad (1)$$

$$i_{cb}(t) = A_1 \cdot e^{-(\delta - j\omega_{cb})t} + A_2 \cdot e^{-(\delta + j\omega_{cb})t}, \quad (2)$$

где амплитуда вынужденной составляющей тока

$$I_{m \text{ вын}} = E_m / \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}; \quad (3)$$

постоянные интегрирования:

$$A_1 = \frac{(\delta + j\omega_{cb}) \cdot \sin \varphi - \omega \cdot \cos \varphi}{2j\omega_{cb}} \cdot I_{m \text{ вын}}; \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{\omega \cdot \cos \varphi - (\delta - j\omega_{cb}) \cdot \sin \varphi}{2j\omega_{cb}} \cdot I_{m \text{ вын}}; \quad (5)$$

аргумент комплексного входного сопротивления цепи

$$\varphi = \arctg \left( \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} \right). \quad (6)$$

С учетом соотношений (3) – (5) выражение (2) для свободной составляющей тока принимает вид:

$$\begin{aligned} i_{cb}(t) &= \left\{ \frac{e^{j\omega_{cb}t} + e^{-j\omega_{cb}t}}{2} \cdot \sin \varphi + \left[ \frac{\delta \cdot \sin \varphi}{\omega_{cb}} - \frac{\omega \cdot \cos \varphi}{\omega_{cb}} \right] \cdot \frac{e^{j\omega_{cb}t} - e^{-j\omega_{cb}t}}{2j} \right\} \cdot I_{m \text{ вын}} \cdot e^{-\delta t} = \\ &= \left\{ \sin \varphi \cdot \cos \omega_{cb}t + \left[ \frac{\delta \cdot \sin \varphi}{\omega_{cb}} - \frac{\omega \cdot \cos \varphi}{\omega_{cb}} \right] \cdot \sin \omega_{cb}t \right\} \cdot I_{m \text{ вын}} \cdot e^{-\delta t}. \end{aligned} \quad (7)$$

При частоте внешнего воздействия, равной (очень близкой) частоте свободных колебаний  $\omega_{cb}$ , и высокой добротности колебательного контура, при которой  $\omega_{cb}$  практически совпадает с резонансной частотой цепи  $\omega_0$ , выражение (7) существенно упрощается [7]:

$$i_{cb}(t) = (\sin \varphi \cdot \cos \omega_0 t - \cos \varphi \cdot \sin \omega_0 t) \cdot I_{m \text{ вын}} \cdot e^{-\delta t} = -I_{m \text{ вын}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi). \quad (8)$$

Ток цепи после коммутации равен сумме свободной и вынужденной составляющих:

$$i(t) = I_{m \text{ вын}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) - I_{m \text{ вын}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi). \quad (9)$$

Согласно выражению (9) свободная составляющая тока является затухающей гармонической функцией времени. В начальный момент времени амплитуда свободной составляющей тока равна амплитуде вынужденной составляющей, а затем уменьшается по экспоненциальному закону. Через промежуток времени, равный  $(4 \div 5) \cdot \tau = (4 \div 5) \cdot 1/\delta$ , после коммутации амплитуда свободной составляющей становится пренебрежимо малой и переходной процесс можно считать практически закончившимся (см. рисунок 1). Амплитуда тока цепи вследствие уменьшения свободной составляющей плавно увеличивается, стремясь в пределе к установившемуся значению  $I_{m \text{ вын}}$ , не превышая его.

Значение энергии, потребленной первичным источником за время  $t$ , принято определять по выражению:

$$W_3 = \int_0^t u(t) \cdot i(t) \cdot dt. \quad (10)$$

Однако выражение (10), по мнению авторов и по результатам экспериментальных проверок, является некорректным. Значение энергии, затраченной источником за время  $t$ , должно

определяться мгновенным значением напряжения источника и только вынужденной составляющей тока:

$$W_3 = \int_0^t u(t) \cdot i_{\text{вын}}(t) \cdot dt. \quad (11)$$

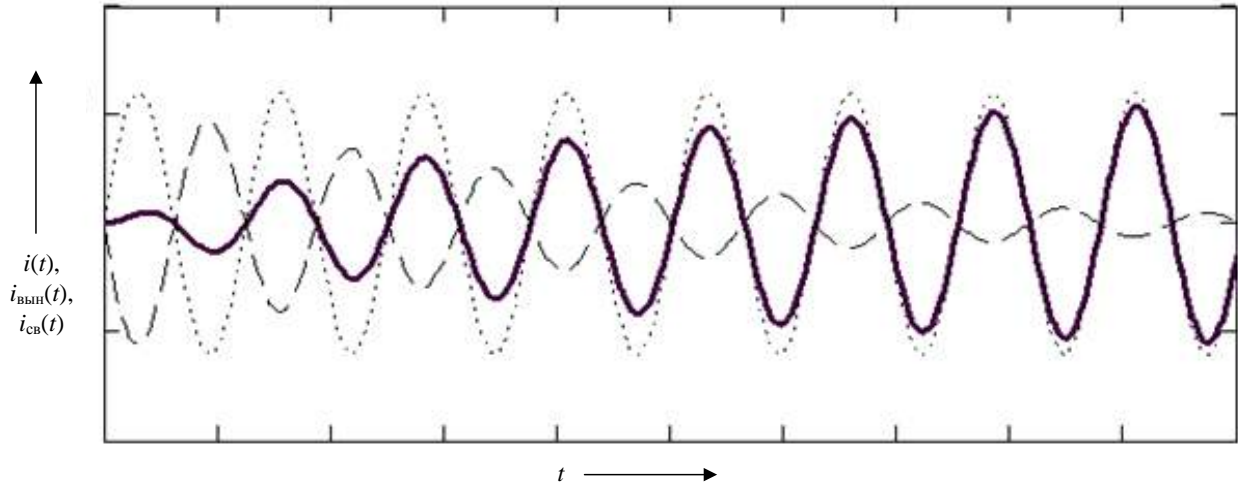


Рисунок 1 – Зависимости составляющих тока последовательной RLC-цепи от времени при включении источника гармонического напряжения частотой, равной частоте свободных колебаний ( ———— — сумма свободной и вынужденной составляющих тока; ..... — вынужденная составляющая тока; — — — — свободная составляющая тока)

Учет в выражении (11) только вынужденной составляющей тока, а не суммарного значения свободной и вынужденной составляющих закономерен в связи с самим определением свободной составляющей тока. *Характер свободных процессов не зависит от вида внешнего воздействия на цепь, а определяется только параметрами пассивных элементов, а также топологией цепи после коммутации. Вынужденный же режим работы цепи задается действующими в цепи независимыми источниками энергии [7].*

Энергия, запасенная в индуктивности в момент времени  $t$ , определяется суммарным значением свободной и вынужденной составляющих тока цепи:

$$W_L = \frac{L \cdot i^2(t)}{2}. \quad (12)$$

Поскольку суммарное значение свободной и вынужденной составляющих тока согласно выражению (9) в любой момент времени меньше вынужденной составляющей тока, то запасенное значение энергии в индуктивности всегда меньше потребленной первичным источником.

Интерес представляет режим включения в последовательную RLC-цепь источника гармонического напряжения, частота которого близка к резонансной, но не равна ей. В этом режиме наблюдаются биения, заключающиеся в периодическом увеличении амплитуды тока или напряжения до значения, существенно превышающего амплитуду вынужденной составляющей (рисунок 2).

Возникновение биений в рассматриваемой режиме объясняется тем, что вследствие несовпадения частот внешнего воздействия и свободных колебаний фазовые соотношения между свободной и вынужденной составляющими тока непрерывно изменяются.

Произведем оценку значений энергии, затраченной от источника и запасенной в индуктивности за период времени нарастания суммарного тока от нуля до максимального значения при первом биении.

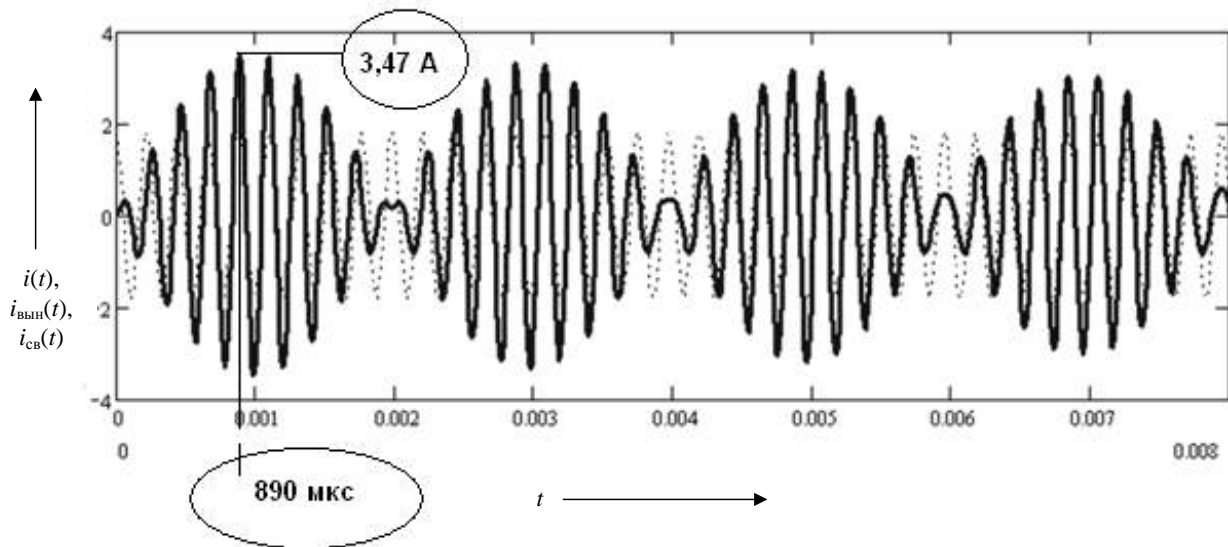


Рисунок 2 – Зависимости составляющих тока последовательной RLC-цепи от времени при включении источника гармонического напряжения частотой, близкой частоте свободных колебаний ( ———— – сумма свободной и вынужденной составляющих тока; ..... – вынужденная составляющая тока)

Примем параметры RLC-цепи:  $L = 1 \text{ мГн}$ ,  $C = 1 \text{ мкФ}$ ,  $R = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $E_m = 12 \text{ В}$ . Частота свободных колебаний  $\omega_{\text{св}}$  составит  $3,162 \cdot 10^4 \text{ рад/с}$ . Примем частоту внешнего воздействия  $\omega = 0,9 \cdot \omega_{\text{св}} = 2,846 \cdot 10^4 \text{ рад/с}$ . Осциллограмма суммарного тока свободной и вынужденной составляющих для анализируемой схемы представлена на рисунке 2. Значение энергии, потребленной первичным источником за время 890 мкс, согласно выражению (11):

$$W_3 = \int_0^{0,00089} u(t) \cdot i_{\text{вын}}(t) \cdot dt = 1,572 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.}$$

Запасенная энергия в индуктивности к моменту времени  $t = 890 \text{ мкс}$  согласно выражению (12):

$$W_L = \frac{L \cdot i^2(t)}{2} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot (3,47 \text{ А})^2}{2} = 6,015 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

Анализ полученных результатов показывает, что за счет синхронного сложения свободной составляющей тока с вынужденной составляющей в определенные моменты времени в цепи наблюдается квадратичное накопление энергии на реактивных элементах контура. Данное явление может быть с успехом применено для реализации квазирезонансных источников электропитания, в которых частота внешнего воздействия близка, но не равна частоте свободных колебаний контура.

Положительной стороной использования режима биений при построении квазирезонансных источников является не только повышение их эффективности, но и возможность увеличения удельной выходной мощности устройств до двух – трех раз по сравнению с традиционными схемами за счет действия квадратичного тока или напряжения на реактивных элементах колебательного контура. Низкая частота съема электрической энергии, равная частоте биений, способствует упрощению схемы квазирезонансных источников в целом из-за

отсутствия необходимости преобразования высокочастотного сигнала в сигнал промышленной частоты.

Частота биений определяется абсолютной разностью угловых частот свободной и вынужденной составляющей [7]:

$$\omega_6 = \frac{|\omega - \omega_0|}{2}. \quad (13)$$

Выбор оптимальной частоты биений является многокритериальной задачей. Решение данной задачи в первом приближении можно осуществить по максимальному значению запасенной на индуктивности энергии, определяемой суммарным значением тока вынужденной и свободной составляющих. Если пренебречь затуханием свободной составляющей тока ( $\delta = 0$ ), то по выражению (9) получаем [7]:

$$i(t) = 2 \cdot I_{m\text{вын}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega + \omega_0}{2} \cdot t - \varphi\right) = \frac{2 \cdot E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \times \cos\left(\frac{\omega + \omega_0}{2} \cdot t - \arctg\left(\frac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right)\right). \quad (14)$$

Исследование функции (14) на экстремум ввиду ее сложной зависимости от частоты первичного источника целесообразно проводить в два этапа. Амплитудное значение функции (14) определяется выражением:

$$I_m(t) = 2 \cdot I_{m\text{вын}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) = \frac{2 \cdot E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right). \quad (15)$$

Производная функции (15) по частоте имеет вид:

$$\frac{dI_m}{d\omega} = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \cdot \left[ \cos\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \cdot t - \frac{2}{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{\omega - \omega_0}{2} \cdot t\right) \times \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \cdot \left(L + \frac{1}{\omega^2 C}\right) \right]. \quad (16)$$

Функция (16) определена при множестве значений времени. Максимальное значение тока  $I_m(t)$  согласно выражению (15) функция принимает в момент времени

$$t_m = \frac{\pi}{|\omega - \omega_0|}. \quad (17)$$

График функции (16) для ранее принятых параметров RLC-контура, соответствующий моменту времени  $t_m$ , представлен на рисунке 3.

Анализ графика показывает, что уравнение производной амплитуды суммарного тока контура не имеет корней, кривая асимптотически стремится к нулю, но не достигает этого значения. Однако из данного графика возможно определение границ частот, при которых биения практически не наблюдаются и режим работы контура близок к режиму резонанса. Границы этих частот ( $W_{\min} - W_{\max}$ ) соответствуют максимальным значениям функции, которые расположены симметрично относительно частоты свободных колебаний контура. Начиная с максимальных значений, кривая представленная на рисунке 3, экспоненциально убывает. Совершенно очевидно, что выбор частоты внешнего воздействия целесообразно осуществлять вне пределов границ ( $W_{\min} - W_{\max}$ ), ограниченных амплитудными значениями

кривой. Однако конкретное значение частоты внешнего воздействия целесообразно определять путем исследования функции (14) на экстремум.

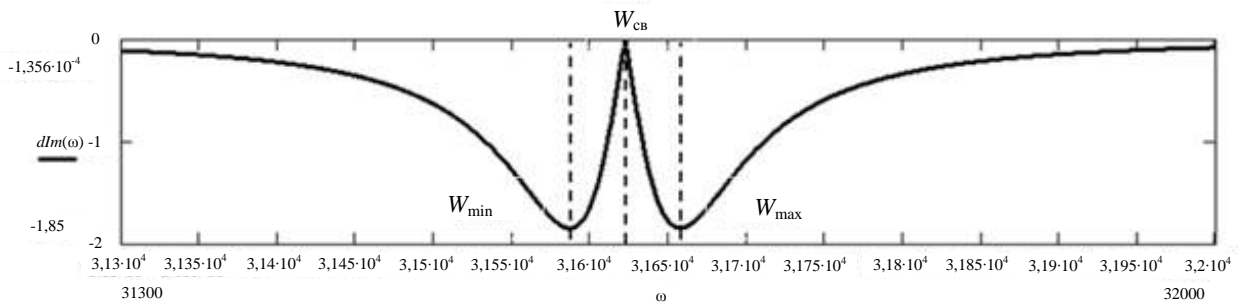


Рисунок 3 – График производной функции амплитуды тока контура

График производной функции (14) для ранее принятых параметров RLC-контура, соответствующий моменту времени  $t_m$ , представлен на рисунке 4.

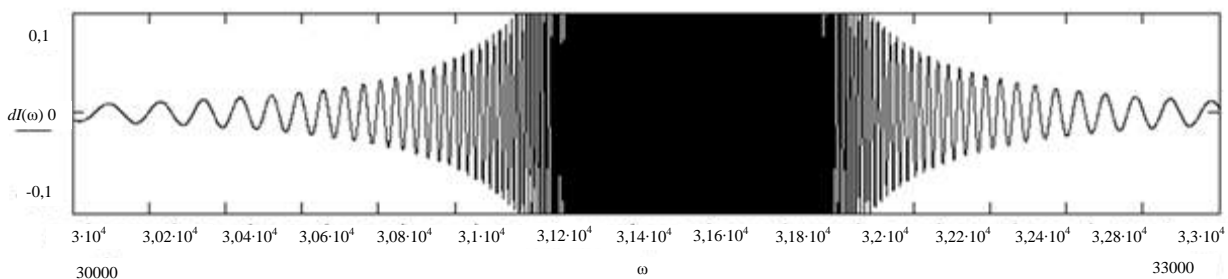


Рисунок 4 – График производной функции суммарного тока контура

Анализ полученного графика показывает, что исследуемая функция принимает нулевые значения с переменным периодом, величина которого возрастает по мере удаления от значения частоты свободных колебаний контура. Это означает, что функция (14) тока контура имеет множество экстремумов. Проведенные исследования показали, что оптимальными частотами по соотношению затраченной от источника и накопленной на реактивных элементах энергии являются частоты, лежащие в областях с наибольшими периодами колебаний функции, представленной на рисунке 4. Так, для анализируемого контура оптимальные частоты лежат в области от  $2,8 \cdot 10^4$  до  $3,04 \cdot 10^4$  рад/с в меньшую сторону от частоты свободных колебаний и аналогично в большую сторону. Выбор конкретной частоты зависит от требуемой частоты биений, на которой собственно и будет осуществляться съем накопленной энергии. В случае необходимости получения промышленной частоты выходного сигнала частота биений должна соответствовать 50 Гц.

Следует сказать о сложностях реализации квазирезонансных источников электропитания, основанных на режиме биений. В реальных контурах коэффициент затухания имеет малое, но конечное значение. Свободная составляющая тока в таких контурах экспоненциально уменьшается во времени, а биения носят затухающий характер. Решение данной проблемы возможно за счет использования в составе контуров параметрических элементов, индуктивность или емкость которых изменяется в незначительных пределах в зависимости от значения тока или напряжения. В этом случае биения будут носить незатухающий характер.

Квазирезонансные источники электропитания, основанные на режиме биений, несмотря на отсутствие теоретического обоснования постепенно находят практическое применение. В работах [9, 10] представлено описание работы импульсного источника электропитания, схема которого представлена на рисунке 5.

Режим биений в данной схеме реализован путем достижения полуволнового резонанса на воздушном высокочастотном трансформаторе, вторичные обмотки L2, L3 которого реализованы в виде однопроводниковой длинной линии со средней точкой. Преимущества данного источника электропитания и область его применения подробно описаны в работе [5].

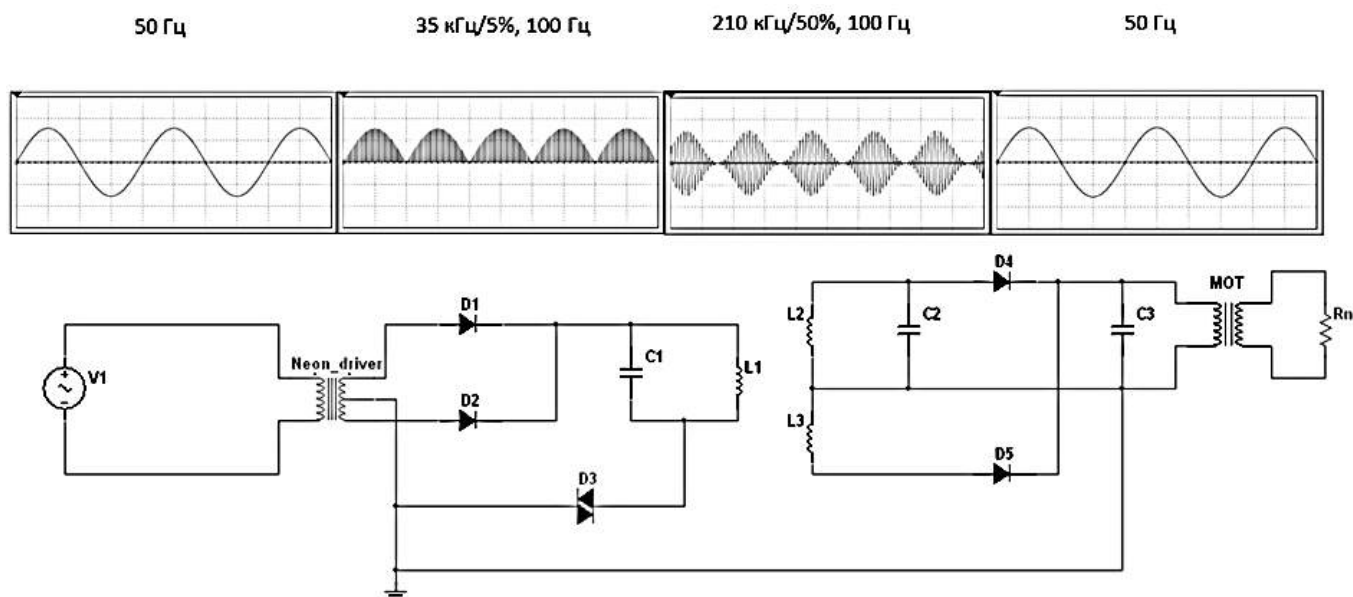


Рисунок 5 – Упрощенная схема импульсного источника электропитания на основе режима биений частоты

Подводя итоги, можно отметить, что режим биений может быть с успехом использован при построении многообразных схем высокоэффективных импульсных источников электропитания, используемых, в том числе, и в системах электропитания нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Использование данного режима перед классическими подходами построения импульсных источников дает большие преимущества по соотношению затраченной от первичного источника и накопленной на реактивных элементах энергии и позволяет относительно просто без использования дополнительных инверторных схем получать на выходе переменное напряжение требуемой частоты.

### Список литературы

1. Менакер, К. В. Создание ударного контура возбуждения импульсного резонансного преобразователя мощности [Текст] / К. В. Менакер, А. С. Цветаева // Электротехника / Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности. – М. – 2015. – № 5. – С. 36 – 40.
2. Менакер, К. В. Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе квадратичного способа накопления энергии [Текст] / К. В. Менакер, М. В. Востриков, А. С. Цветаева // Силовая электроника / Медиа КиТ. – М. – 2016. – №1 (58). – С. 46 – 50.
3. Менакер, К. В. Создание высокоэффективных импульсных источников электропитания на основе схем ФАПЧ [Текст] / К. В. Менакер, М. В. Востриков // Силовая электроника / Медиа КиТ. – М. – 2016. – № 6 (63). – С. 44 – 47.
4. Менакер, К. В. Импульсный преобразователь мощности [Текст] / К. В. Менакер, А. С. Цветаева // Автоматика, связь, информатика / ОАО «Российские железные дороги». – М. – 2012. – № 6. – С. 21 – 23.

5. К вопросу создания преобразователя мощности как резервного источника питания [Текст] / К. В. Менакер, А. С. Цветаева и др. // *Электробезопасность / Южно-Уральский гос. ун-т.* – М. – 2012. – № 1. – С. 50 – 53.
6. Семенов, Н. Н. Применение импульсного преобразователя мощности для резервирования питания, различных устройств и цепей тяговых подстанций [Текст] / Н. Н. Семенов, К. В. Менакер // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока / Сибирский гос. ун-т водного транспорта.* – Новосибирск. – 2012. – № 1. – С. 417 – 419.
7. Попов, В. П. Основы теории цепей: Учебник для вузов [Текст] / В. П. Попов. – М.: Высшая школа, 1985. – С. 291 – 294.
8. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Учебник [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1996. – С. 244, 245.
9. Donald, L. Smith. Resonance energy methods [Text] / L. S. Donald, – TransWorld Energy, CEO, 2002. – P. 33 – 37.
10. Donald, L. Smith. An answer to America,s energy deficit [Text] / L. S. Donald, – TransWorld Energy, CEO, 1997. – P. 47 – 49.

## References

1. Menaker K. V., Tsvetaeva A. S. Creation of a shock contour of excitement of the pulse resonant converter of power [Sozдание udarnogo kontura vozbuzhdeniya impul'snogo rezonansnogo preobrazovatelya moshchnosti]. *Electrician – The journal of All-Russian Research Institute of the cable industry*, 2015, no. 5, pp. 36 – 40.
2. Menaker, K. V., Vostrikov M. V., Tsvetaeva A. S. Creation of highly effective pulse sources of power supply on the basis of a square way of accumulation of energy [Sozдание vysokoeffektivnyh impul'snyh istochnikov elektropitaniya na osnove kvadratichnogo sposoba nakopleniya energii]. *Power electronics – The journal Ltd company «Media KiT»*, 2016, no. 1 (58), pp. 46 – 50.
3. Menaker, K. V., Vostrikov M. V. Creation of highly effective pulse sources of power supply on the basis of schemes FAPCH [Sozдание vysokoeffektivnyh impul'snyh istochnikov elektropitaniya na osnove skhem FAPCH]. *Power electronics – The journal Ltd company «Media KiT»*, 2016, no. 6 (63), pp. 44 – 47.
4. Menaker, K. V., Tsvetaeva A. S. The pulse converter of the power [Impul'snyj preobrazovatel' moshchnosti]. *Automatic equipment, communication, informatics – The journal JSCo «RZD»*, 2012, no. 6, pp. 21 – 23.
5. Menaker K. V., Tsvetaeva A. S., Litvincev A. G., Semenov N. N. To a question of creation of the converter of power as reserve electrical safety power supply [K voprosu sozdaniya preobrazovatelya moshchnosti kak rezervnogo istochnika pitaniya]. *Electrical safety – The journal of Southern Ural State University*, 2012, no. 1, pp. 50 – 53.
6. Semyonov, N. N., Menaker K. V. Use of the pulse converter of power for reservation of food, various devices and chains of traction substations [Primenenie impul'snogo preobrazovatelya moshchnosti dlya rezervirovaniya pitaniya, razlichnyh ustrojstv i cepej tyagovyh podstancij]. *Scientific problems of transport of Siberia and the Far East – The journal of Siberian State. University of the water transport*, 2012, no. 1, pp. 417 – 419.
7. Popov V. P. *Osnovy teorii cepej* (Bases of the theory of chains). Moscow: Vyssh. shk., 1985, 294 p.
8. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* (Theoretical bases of electrical equipment). Moscow: Vyssh. shk., 1996. 245 p.
9. Donald L. Smith. Resonance energy methods, TransWorld Energy, 2002, pp. 33 – 37.
10. Donald L. Smith. An answer to America,s energy deficit, TransWorld Energy, 1997, pp. 47 – 49.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Менакер Константин Владимирович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ.

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

### Яковлев Дмитрий Александрович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ.

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

### Востриков Максим Викторович

Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗабИЖТ).

Магистральная ул., д. 11, г. Чита, 672040, Российская Федерация.

Старший преподаватель кафедры «Электроснабжение», ЗабИЖТ.

Тел.: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Менакер, К. В. Повышение эффективности работы систем электропитания нетяговых потребителей [Текст] / К. В. Менакер, Д. А. Яковлев, М. В. Востриков // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2018. – 2 (34). – С. 85 – 94

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Menaker Konstantin Vladimirovich

Transbaikal Institute of Railway Transport (Zabizht).  
11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Supply, Zabizht.

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

### Yakovlev Dmitry Alexandrovich

Transbaikal Institute of Railway Transport (Zabizht).  
11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Supply, Zabizht.

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

### Vostrikov Maxim Viktorovich

Transbaikal Institute of Railway Transport (Zabizht).  
11, Magistralnaya st., Chita, 672040, the Russian Federation.

Senior lecturer of the Department of Electric Power Supply, Zabizht.

Phone: +7 (3022) 24-06-90.

E-mail: sekretar@zab.megalink.ru

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Menaker K. V., Yakovlev D. A., Vostrikov M. Increase of efficiency of operation of electric power supply systems of nontyagovy consumers. Journal of Transsib Railway Studies, 2018, vol. 2, no 34, pp. 85 – 94 (In Russian).

УДК 621.331

УДК 629.4

**М. М. Никифоров, А. С. Вильгельм, А. Ж. Еркебаев**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ И УЧАСТКОВОЙ СКОРОСТИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

**Аннотация.** В статье изложены методологические подходы к оценке эффективности мероприятий, направленных на повышение эффективности применения рекуперативного торможения и использования энергии рекуперации. Приведен пример расчета эффективности использования энергии рекуперации на двухпутном участке постоянного тока. Выполнен анализ влияния изменения таких параметров участка, как техническая и участковая скорость движения грузовых поездов, на эффективность использования энергии рекуперации. В статье приведены результаты оценки составляющих энергии рекуперации, формирующих экономическую эффективность рекуперации, и описаны подходы к прогнозированию изменения этой эффективности в зависимости от изменения влияющих факторов.

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, система тягового электроснабжения, энергия рекуперации, эксплуатационные показатели, техническая и участковая скорость движения поездов