

УДК 621.314

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕПОСРЕДСТВЕННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

- БАТЫГИН Ю.В. д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;
- ЧАПЛЫГИН Е.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com;
- ШИНДЕРУК С.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net;
- СТРЕЛЬНИКОВА В.А. аспирант, ассистент кафедры физики Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;
- НЕСКРЕБА Э.Е. студент автомобильного факультета Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: eeneskreba12@ukr.net;

Цель работы. Получение аналитических амплитудно-временных зависимостей возбуждаемых токов и численных оценок их характеристик при непосредственном возбуждении резонансного последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

Методы исследования. Математический аппарат теории электрических цепей в расчётах переходных процессов при подключении последовательных резонансных контуров. Численные оценки характеристик протекающих электромагнитных процессов.

Полученные результаты. Определены амплитудно-временные формы тока в последовательном активно-реактивном контуре при его резонансном возбуждении периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения с резонансной частотой их следования. Выполнены численные оценки характеристик возбуждаемых токов. Отмечена несколько большая эффективность униполярного возбуждения гармонических процессов в сравнении с возбуждением осциллирующими последовательностями периодических импульсов напряжения. Показано, что с увеличением добротности резонансного контура – Q вклад высших спектральных составляющих вне зависимости от вида входного напряжения существенно падает, и при $Q \gg 1$ возбуждаемый ток становится строго гармоническим.

Научная новизна. Научная новизна настоящей работы состоит в получении аналитических амплитудно-временных зависимостей и численных оценок для возбуждаемых токов при непосредственном подключении источника ангармонического напряжения к последовательному резонансному контуру и инициирована практическими задачами в разработках электротехнических устройств, реальная действенность которых возможна только в условиях, достаточно близких к резонансным.

Практическая ценность. Полученные выражения для токов, возбуждаемых при непосредственном подключении источника ангармонического напряжения к последовательному резонансному активно-реактивному контуру, и результаты проведенного анализа необходимы для проектирования электротехнических устройств с резонансными компонентами. Весьма перспективным в направлении дальнейших исследований видится решение задачи и анализа процессов в системе из двух индуктивно-связанных последовательных резонансных контуров, возбуждаемых временной последовательностью ангармонических сигналов.

Ключевые слова: последовательный резонансный контур, прямоугольные импульсы напряжения; добротность активно-реактивного контура; резонанс напряжений.

I. ВВЕДЕНИЕ

Резонанс играет существенную роль в различных физических процессах, поэтому, в зависимости от

желаемого результата, исследователи сталкиваются как с негативными, так и с положительными сторонами этого явления.

Особое место резонансные явления занимают в

електротехніке, где являются одним из возможных способов повышения эффективности работы электротехнических устройств. В основном резонансные схемы используют для разработок силовых преобразователей [1], импульсных трансформаторов [2], преобразователей энергии солнечных батарей [3] и др.

Опираясь на физический принцип подобия, можно сделать заключение о широте применения резонанса для создания технических устройств любого назначения [4], [5]. Актуальность работ такого рода также подтверждается предложениями и разработками резонансных систем, направленными на развитие современной электроэнергетики [6], [7].

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В электротехнике и силовой электронике явление резонанса позволяет настраивать аппаратуру на заданные частоты и обеспечивать ее работу с максимальной эффективностью [8], [9]. Известны два вида электрических резонансов. Это резонанс токов и резонанс напряжений. Последний представляет особый интерес, например, для создания высоковольтных импульсных трансформаторов и питания высокоомной нагрузки повышенным напряжением [10], [11], в устройствах индукционного нагрева и др. [12], [13].

Физическая сущность резонанса напряжений состоит в следующем. Если соединить последовательно резистор, электрический конденсатор и катушку индуктивности (последовательный активно-реактивный контур), то для синусоидального сигнала определенной частоты указанная схема будет демонстрировать нулевое реактивное сопротивление. Причина проста. конденсатор и катушка накапливает энергию, конденсатор ее отдает, и наоборот. Следует подчеркнуть, что этот эффект проявляется только для синусоидального сигнала, на определенной частоте и в установившемся режиме [14], [15].

Принципиальные вопросы возбуждения резонансных систем гармоническими напряжениями или токами в специальной литературе описаны достаточно подробно, см. например научное издание [16]. Практические приложения и новые разработки, связанные с созданием конкретных резонансных электротехнических устройств (в частности, это усилители реактивной мощности) освещены авторами публикаций [17], [18].

Общим недостатком известных работ является их направленность на исследование электромагнитных процессов в различных конструкциях резонансных систем, возбуждаемых исключительно гармоническими сигналами. Но развитие преобразовательной техники требует новых исследований возникновения резонанса в практически интересных случаях, когда последовательный активно-реактивный контур по техническим причинам должен возбуждаться ангармоническими сигналами (то есть, в отсутствие специальных амплитудно-частотных инверторов), спектр

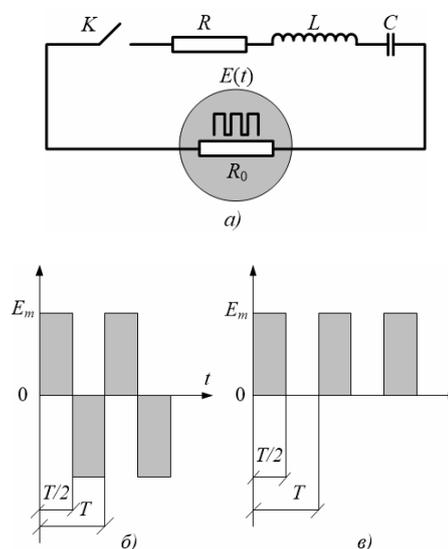
которых наряду с основной частотой колебаний содержит, так называемые, высшие гармоники с частотами, кратными основному типу колебаний.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение аналитических амплитудно-временных зависимостей возбуждаемых токов и численных оценок их характеристик при непосредственном возбуждении резонансного последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Расчетные модели исследуемого последовательного активно-реактивного контура и временных форм возбуждающего напряжения представлены на рис. 1.



а) схема замещения последовательного резонансного контура; R, L, C – элементы контура; $E(t)$ – источник напряжения с внутренним сопротивлением R_0 ; б, в) временные формы возбуждающих импульсов напряжения: б – осциллирующий, в – униполярный сигналы.

Рисунок 1. Расчетные модели

Постановка задачи. Сопротивление соединительных проводов и проводов обмотки индуктивности – R , а также внутреннее сопротивление источника – R_0 , так что их сумма много меньше реактивных сопротивлений контура, $(R_0 + R_1) \ll \omega_0 L$ и $(R_0 + R_1) \ll \frac{1}{\omega_0 C}$, где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота, L – индуктивность, C – емкость (рис. 1а).

Источник питания генерирует последовательность прямоугольных импульсов напряжения с амплитудой – E_m и частотой следования – $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ (T – период), равной собственной частоте контура –

ω_0 , так что $\omega_0 = \omega_1$.

Амплитудно-временные формы возбуждающих сигналов – $E(t)$: осциллирующие или униполярные прямоугольные импульсы с длительностью, равной половине периода их следования (рис. 1б, в).

Отметим, что принимаемая постановка задачи позволяет сконцентрироваться на проблеме формирования квазигармонического тока и напряжения при резонансном возбуждении активно-реактивного контура ангармоническими сигналами.

Расчётные соотношения.

При решении поставленной задачи воспользуемся операторным методом расчёта электрических цепей [16], [18].

Дифференциальное уравнение относительно напряжения на ёмкости – $U_C(t)$ в пространстве изображений по Лапласу при нулевых начальных условиях $\left\{ U_C(0) = \frac{dU_C(0)}{dt} = 0 \right\}$ имеет вид [16], [19]:

$$p^2 U_C(p) + 2\delta \cdot p U_C(p) + \omega_0^2 \cdot U_C(p) = \omega_0^2 \cdot E(p); \quad (1)$$

где p – оператор Лапласа;

$$U_C(p) = L\{U_C(t)\}; \quad E(p) = L\{E(t)\}$$

$$\delta = \frac{L}{2(R_0 + R_1)} \text{ – декремент затухания;}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ – собственная частота контура.}$$

Решение уравнения (1) позволяет найти L -изображение возбуждаемого тока [19].

Из (1) получаем следующие зависимости.

Модуль отношения амплитуд токов,

$$I(p) = C \cdot p U_C(p) = \frac{1}{L} \cdot F(p) \cdot E(p); \quad (2)$$

$$\text{где } F(p) = \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega^2} - \left(\frac{\delta}{\omega} \right) \cdot \frac{\omega}{(p + \delta)^2 + \omega^2};$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Оригинал выражения (2) запишется как свёртка функций [19].

$$I(t) = \frac{1}{L} \cdot F(t) * E(t); \quad (3)$$

где $F(t) \leftrightarrow F(p)$; $E(t) \leftrightarrow E(p)$ – оригиналы сомножителей в формуле (2).

Согласно постановке задачи диссипация энергии минимальна, что означает достаточную малость величины относительного декремента затухания

$\left(\delta_0 = \frac{\delta}{\omega} \ll 1 \right)$ и равенство частоты возбуждаемого

сигнала собственной частоте исследуемого резонансного контура $\left(\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$. В этом случае выражение для $F(p)$ в выражении (2) можно упростить.

После перехода в пространстве оригиналов получаем следующее соотношение [19].

$$F(p) \approx \frac{(p + \delta)}{(p + \delta)^2 + \omega_0^2} \leftrightarrow F(t) = e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_0 t); \quad (4)$$

Свёртка функций в выражении (3) с учётом (4) при введении фазовой зависимости вместо временной в развёрнутом виде принимает вид [19]:

$$I(\varphi) = \frac{1}{(\omega_0 \cdot L)} \cdot \int_0^\varphi e^{-\delta_0(\varphi-x)} \cdot \cos(\varphi-x) \cdot E(x) dx; \quad (5)$$

где $\varphi = \omega_0 \cdot t$ – фаза,

$$\delta_0 = \frac{\delta}{\omega_0} \text{ – относительный декремент затухания.}$$

Амплитудно-временную зависимость возбуждающего напряжения из последовательности осциллирующих прямоугольных импульсов (рис. 1б) можно представить разложением Фурье по синусам кратных дуг [19]:

$$E(\varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \sin(\omega_n \cdot \varphi); \quad (6)$$

$$\text{где } E_n = \frac{2}{\pi} E_m \cdot \frac{[(-1)^n - 1]}{n^2 - 1} \text{ и } \omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n \right)}{\omega_0} \text{ – ам-}$$

плитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

Ряд (6) поставим под знак интеграла в выражении (5). Учтём малость относительного декремента затухания. Полученный результат преобразуем, полагая, что собственная частота контура совпадает с частотой первой гармоники разложения (6). После выполнения необходимых тождественных преобразований получаем амплитудно-временную зависимость для тока, возбуждаемого в режиме резонанса напряжений всеми гармониками входного сигнала.

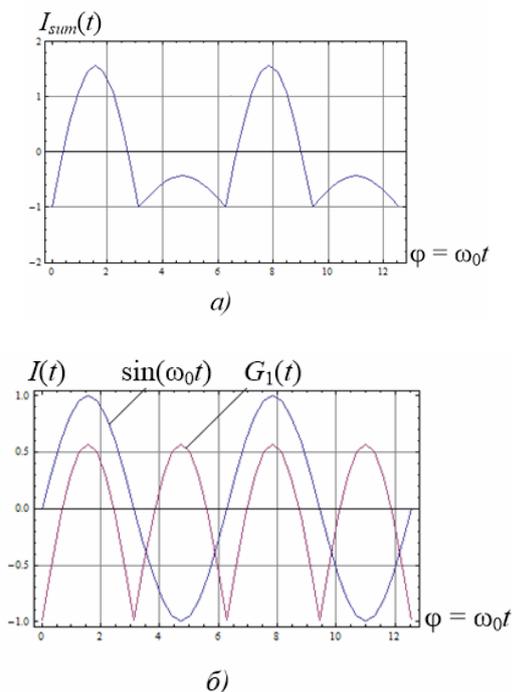
$$I_{sum}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{Q} \cdot G_1(t) \right); \quad (7)$$

где $Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{(R_0 + R)}$ – добротность контура,

$$G_1(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n - 1}{n^2 - 1} \right) \cos(n(\omega_0 t)).$$

Некоторые численные оценки, иллюстрирующие формирование резонансного тока в рассматриваемых

условиях возбуждения последовательного активно-реактивного контура, представлены ниже (рис. 2).



а) суммарный сигнал, включающий все гармонические составляющие; б) резонансная гармоника – $\sin(\omega_0 t)$, сумма высших гармоник – $G_1(t)$.

Рисунок 2. Временные зависимости тока, возбуждаемого осциллирующей последовательностью прямоугольных импульсов напряжения (рис. 1б), с нормировкой на амплитуду резонансной гармоники

Прокомментируем полученные результаты.

Первая гармоника возбуждающего напряжения определяет гармоническую составляющую тока с частотой, равной резонансной частоте, и амплитудой, равной отношению амплитуды первой гармоники возбуждающего напряжения и активного сопротивления последовательного резонансного контура.

Вклад высших гармоник пропорционален функции $G_1(t)$ и обратно пропорционален добротности контура – Q .

Суммарная амплитуда высших гармоник (при $Q = 1$) равна амплитуде резонансной гармоники ($G_{1max} \approx 1$).

При достаточном увеличении добротности и выполнении условия – $\frac{1}{Q} \cdot G_{1max} \ll 1$ входное напряжение из серии осциллирующих импульсов с частотой следования, равной резонансной частоте контура, возбуждает исключительно гармонический ток. Вклад высших гармоник есть бесконечно малая величина порядка $\sim \left(\frac{1}{Q} \cdot G_{1max} \ll 1\right)$ Для наглядности укажем

количественную оценку, следующую, например, из зависимостей на рис.1. В принятых условиях расчёта имеет место довольно существенный вклад высших гармоник в формирование результирующего суммарного тока ($|G_1(t)| \sim (0,5 \div 10) \cdot |\sin(\omega_0 t)|$ рис.1б), что приводит к значительному искажению его амплитудно-временной формы в сравнении со строгой гармонической зависимостью (рис.1а).

Аналогично предыдущему проанализируем возбуждение резонансного RLC -контура периодической последовательностью униполярных прямоугольных импульсов напряжения длительностью, равной половине периода повторения (рис. 1в).

Соответствующую фазовую (амплитудно-временную) зависимость представим разложением Фурье по косинусам кратных дуг [18], [19]:

$$E(\varphi) = \frac{\pi}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot \cos\left(\omega_n \cdot \left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)\right); \quad (8)$$

$$\text{где } E_n = \frac{2}{\pi} \cdot E_m \cdot \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n} \text{ и } \omega_n = \frac{\left(\frac{2\pi}{T} \cdot n\right)}{\omega_0}$$

амплитуды и относительные частоты гармоник спектрального разложения, соответственно.

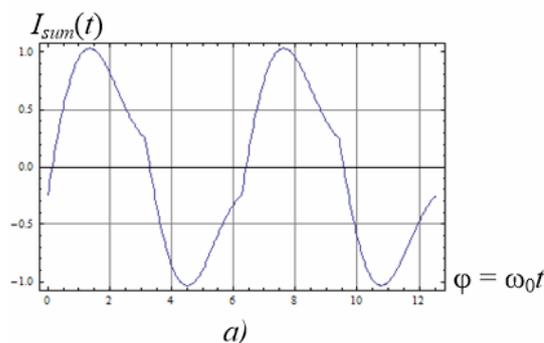
Вычислим интеграл в выражении (5) с подстановкой разложения (8).

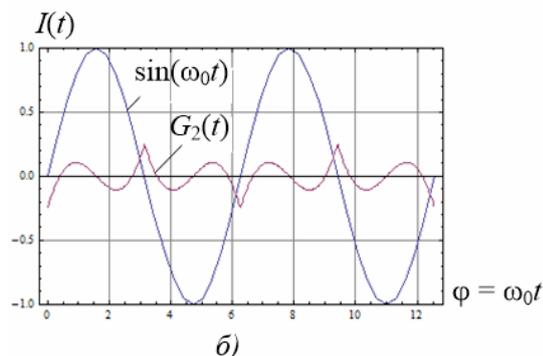
Пренебрегая бесконечно малыми слагаемыми порядка $\sim \delta_0$, после введения резонансных условий для первой гармоники входного сигнала получаем выражение для возбуждаемого тока с учётом всех гармонических составляющих спектра.

$$I_{sum}(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_m}{(R_0 + R)} \cdot \left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{Q} \cdot G_2(t)\right); \quad (9)$$

$$\text{где } G_2(t) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{n} \cdot \cos\left(n \cdot \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right)\right).$$

Расчётные зависимости по формуле (9) представлены на графиках (рис. 3).





а) суммарный сигнал, включающий все гармонические составляющие; б) резонансная гармоника – $\sin(\omega_0 t)$, сумма высших гармоник – $G_2(t)$.

Рисунок 3. Временные зависимости тока, возбуждаемого последовательностью униполярных импульсов напряжения, с нормировкой на амплитуду резонансной гармоники

Примечание. Принятые формы возбуждающих напряжений как осциллирующие, так и униполярные, в своём спектральном разложении содержат различные гармонические временные функции [19]. Те из них, что обладают частотой, совпадающей с собственной частотой резонансного контура, возбуждают в нём синусоидальный ток, переменный во времени.

В той же последовательности, что и ранее, формулируем основные результаты анализа при возбуждении униполярными импульсами напряжения, следующими с частотой, равной частоте резонансного контура.

Первая гармоника определяет гармоническую составляющую тока с частотой, равной резонансной частоте, и амплитудой, равной отношению амплитуды первой гармоники возбуждающего напряжения и активного сопротивления последовательного резонансного контура.

Вклад высших гармоник так же, как и ранее, пропорционален функции $G_2(t)$ и обратно пропорционален добротности контура – Q . Но в отличие от предыдущего, следует отметить несколько большую эффективность униполярного возбуждения гармонических процессов в сравнении с возбуждением осциллирующими последовательностями периодических импульсов напряжения. Так суммарная амплитуда высших гармоник (при $Q = 1$) меньше аналогичной величины при возбуждении осциллирующими импульсами ($G_{1max} \approx 1$) и более чем в 4 раза меньше амплитуды резонансной гармоники ($|G_{2max}| \approx 0,25$ рис. 3б). То есть, в принятых условиях расчёта амплитудно-временная форма результирующего суммарного тока приближается к соответствующей строгой гармонической зависимости (рис. 3а).

Но так же, как и ранее для возбуждения осцил-

лирующими сигналами при условии – $\frac{1}{Q} \cdot |G_{2max}| \ll 1$

входное напряжение из серии униполярных импульсов возбуждает исключительно гармонический ток. Вклад высших гармоник в формирование возбуждаемого тока есть бесконечно малая величина порядка \sim

$$\left(\frac{1}{Q} \cdot |G_{2max}| \right).$$

В заключение следует отметить, что выбор того или иного способа возбуждения резонансной структуры, в конечном итоге, определяется конкретными техническими заданиями на её реализацию, включающими комплекс необходимых требований (например, конструктивная простота, компактность устройства, итоговая себестоимость и др.), в перечне которых вопрос об эффективности имеет смысл как одна из его составляющих.

V. ВЫВОДЫ

Получены аналитические амплитудно-временные зависимости возбуждаемых токов и численные оценки их характеристик при непосредственном возбуждении резонансного последовательного активно-реактивного контура периодическими сериями из прямоугольных униполярных или осциллирующих импульсов напряжения. Отмечена несколько большая эффективность униполярного возбуждения гармонических процессов в сравнении с возбуждением осциллирующими последовательностями периодических импульсов напряжения. Показано, что с увеличением добротности резонансного контура – Q вклад высших спектральных составляющих вне зависимости от вида входного напряжения существенно падает, и при $Q \gg 1$ возбуждаемый ток становится строго гармоническим. Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования: «Енергозберігаючі маловитратні технології живлення та ремонту транспортних засобів» 08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Павлов, Г. В. Резонансные преобразователи в энергоэффективных электротехнических системах [Текст] / Г. В. Павлов, А. В. Обрубов // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – Харьков, 2014. – №9. – С. 13-23.
- [2] Agheb, E. A. On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers [Текст] / E. Agheb, A. Hayati Soolot, K. Niayesh, E. Hashemi, J. Jadianian // Acta Physica Polonica. – 2009. – №115. – С. 1152-1154.
- [3] Осипов, А. В. Резонансные преобразователи энергии солнечной батареи [Текст] / А. В. Осипов, Ю. А. Шиняков, М. М. Черная, А. А. Ткаченко // «Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования»: Решетневские

- чтения. Т.1. – 2015. – №19. – С. 290-292.
- [4] Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов [Текст] / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, А. К. Лебедев. – М.: «Оникс», 2006. – 1056 с.
- [5] Benenson, W. Handbook of Physics [Текст] / W. Benenson, J. W. Harris, H. Stoker, H. Lutz. – New York.: Springer, 2002. – 1186 с.
- [6] Denicolai, M. Tesla transformer for experimentation and research [Текст]: дис. канд. техн. наук / Denicolai M. – Helsinki university of Technology, 2001. – 96 с.
- [7] Резонансный усилитель мощности тока промышленной частоты [Электронный ресурс]: Материалы сайта – 2019. Режим доступа: <http://allpowr.ru/33>
- [8] Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г. А. Месяц. – М.: «Наука», 2004. – 705 с.
- [9] Бакалов, В. П. Основы теории цепей: учебн. для ВУЗов [Текст] / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Крук. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 597 с.
- [10] Craven, R. M. Optimizing the secondary coil of a tesla transformer to improve spectral purity [Текст] / R. M. Craven, I. R. Smith, B. M. Novac // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2014. – №42(1), С. 143-148.
- [11] Naidu, M. S. High Voltage Engineering (Third edition) [Текст] / M. S. Naidu, V. Kamaraju. – Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2013. – 504 с.
- [12] Пат. 95481 України, F 23 Q 7/00. Спосіб індукційного нагріву металевих елементів автомобільних конструкцій / Батигін Ю. В., Гнатов А. В., Чаплигін Є. О., Сабокар О. С., заявник та патентовласник Харківський нац. автом. – дорожн. ун – т. – № u 2014 07576; заявл. 07.07.2014; опубл. 25.12.14, Бюл. №24.
- [13] Индуктор, индукционное оборудование [Электронный ресурс]: Материалы сайта – 2019. Режим доступа: inductor-avto.ru
- [14] Батыгин, Ю. В. Резонансный усилитель электрической мощности. Основные расчётные соотношения [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, С. А. Шиндерук // Вісн. НТУ «ХПІ». Сер.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. Політехн. Ін-т». – Харків, 2018. – № 32. С. 59-63.
- [15] Батыгин, Ю. В. Резонансный усилитель электрической мощности. Экспериментальные исследования [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, С. А. Шиндерук // Перспективні технології та прилади: зб. наук. пр. / Луцький нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2018. – № 13. – С. 18-24.
- [16] Атабеков, Г. И. Основы теории цепей [Текст] / Г. И. Атабеков. – Л: Энергия, 2006. – 220 с.
- [17] Батыгин, Ю. В. Резонансный усилитель реактивной электрической мощности. Анализ электромагнитных процессов [Текст] / Ю. В. Батыгин, Г. С. Сериков, С. А. Шиндерук, В. А. Стрельникова, Э. Р. Усмонов // Електротехніка та електроенергетика. – Запорожье, 2019. – № 2. – С. 34-42.
- [18] Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Изд. 4-е. Том 1. – СПб. : «Питер», 2003. – 463 с. : ил.
- [19] Korn, G. A. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas, for reference and review [Текст] / G. A. Korn, T. M. Korn. – Mineola, N.Y.: Dover Publications, 2000, 1130 с.

Стаття надійшла до редакції 17.09.2019

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ ЗА БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ЗБУДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРУ ПРЯМОКУТНИМИ ІМПУЛЬСАМИ НАПРУГИ

БАТИГІН Ю.В.

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;

ЧАПЛИГІН Є.О.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com;

ШИНДЕРУК С.О.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net;

СТРЕЛЬНИКОВА В.А.

аспірант, асистент кафедри фізики Харківського національного автомобільно-

дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;

НЕСКРЕБА Е.Є.

студент автомобільного факультету Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: eeneskreba12@ukr.net;

Мета роботи. Отримання аналітичних амплітудно-часових залежностей струмів, що збуджуються і чисельних оцінок їх характеристик при безпосередньому збудженні резонансного послідовного активно-реактивного контуру періодичними серіями з прямокутних уніполярних або коливальних імпульсів напруги.

Методи дослідження. Математичний апарат теорії електричних ланцюгів в розрахунках перехідних процесів при підключенні послідовних резонансних контурів. Чисельні оцінки характеристик протікають електромагнітних процесів.

Отримані результати. Визначено амплітудно-часові форми струму в послідовному активно-реактивному контурі при його резонансному збудженні періодичними серіями з прямокутних уніполярних або коливальних імпульсів напруги з резонансною частотою їх слідування. Виконано чисельні оцінки характеристик порушуваних струмів. Відзначена децю більша ефективність уніполярного збудження гармонічних процесів у порівнянні із збудженням осцилюючими послідовностями періодичних імпульсів напруги. Показано, що із підвищенням добротності резонансного контуру – Q внесок вищих спектральних складових незалежно від виду вхідної напруги істотно падає, та при $Q \gg 1$ струм, що збуджується стає строго гармонічним.

Наукова новизна. Наукова новизна представленої роботи полягає в отриманні аналітичних амплітудно-часових залежностей та чисельних оцінок для струмів, що збуджуються при безпосередньому підключенні джерела ангармонічної напруги до послідовного резонансного контуру і ініційована практичними завданнями в розробках електротехнічних пристроїв, реальна дієвість яких можлива тільки в умовах, досить близьких до резонансних.

Практична цінність. Отримані вирази для струмів, що збуджуються за безпосереднього підключення джерела ангармонічної напруги до послідовного резонансного активно-реактивного контуру, і результати проведеного аналізу необхідні для проектування електротехнічних пристроїв із резонансними компонентами. Доволі перспективним у напрямку подальших досліджень є рішення задачі та аналізу процесів у системі із двох індуктивно-пов'язаних послідовних резонансних контурів, що збуджуються часовою послідовністю ангармонічних сигналів.

Ключові слова: послідовний резонансний контур, прямокутні імпульси напруги; добротність активно-реактивного контуру; резонанс напруг.

ELECTROMAGNETIC PROCESSES WITH DIRECT EXCITATION OF SERIAL RESONANT CIRCUIT BY RECTANGULAR VOLTAGE PULSES

BATYGIN YU.V.

D.Sc. in engineering, professor, chief of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;

CHAPLYGIN E.A.

Ph.D. in technical sciences, associate professor, associate professor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: chaplygin.e.a@gmail.com;

SHINDERUK S.O.

Ph.D. in technical sciences, associate professor, associate professor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: s.shinderuk.2016102@ukr.net;

STRELNIKOVA V.A.

P.G. student, assistant professor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;

NESKREBA E.YE.

Student of the automobile faculty of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: eeneskreba12@ukr.net

Purpose. Obtaining the analytical amplitude-time dependencies of exited currents and numerical estimations of their characteristics with direct excitation of resonant sequential active-reactive circuit by periodic series of rectangular unipolar or oscillating voltage pulses.

Methodology. The mathematical apparatus of the theory of electric circuit in transients calculations when connecting serial resonant circuits. Numerical estimations of the occurring electromagnetic processes characteristics.

Findings. The amplitude-time forms of current in a series active-reactive circuit are determined during its resonant excitation by the periodic series of the rectangular unipolar or oscillating voltage pulses with a resonant repetition

rate. Numerical estimates of the characteristics of the excited currents are performed. The somewhat higher efficiency of unipolar excitation of harmonic processes is noted in comparison with the excitation of periodic voltage pulses by oscillating sequences. It is shown that with an increase in the quality factor of the resonance circuit - Q , the contribution of the higher spectral components, regardless of the input voltage type, substantially decreases, and for $Q \gg 1$ the excited current becomes strictly harmonic.

Originality. The scientific novelty of the present work consists in obtaining analytical amplitude-time dependences and numerical estimates for the excited currents by directly connecting the anharmonic voltage source to a series resonant circuit and is initiated by practical tasks in the development of electrical devices, the real effectiveness of which is possible only under conditions close to resonant.

Practical value. The obtained expressions for the currents excited by directly connecting the anharmonic voltage source to the series resonant active-reactive circuit, and the results of the analysis are necessary for the design of electrical devices with resonant components. It seems very promising in the direction of further research to solve the problem and analyze processes in a system of two inductively coupled series resonant circuits excited by a time sequence of anharmonic signals.

Keywords: serial resonant circuit; rectangular voltage pulses; active-reactive circuit Q -factor; voltage resonance

REFERENCES

- [1] Pavlov, H. V., Obruchov, A. V. (2014). Rezonansnye preobrazovateli v energoeffektivnykh elektrotekhnicheskikh sistemakh [Resonant amplifiers in energy efficient electrical engineering systems]. Energoberezhenie, energetika, energoaudit. Sp. is. 1, 9 (128), 13-23.
- [2] Agheb, E., Hayati Soloot, A., Niayesh, K., Hashemi, E. & Jadidian, J. (2009). On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers. Acta Physica Polonica. 115 (6), 1152-1154.
- [3] Osipov, A. V., Shyniakov, Yu. A., Chernaya, Yu. A. & Tkachenko, A. A. (2015). Rezonansnye preobrazovateli energii solnechnoy batarei [Resonant energy transformers in solar battery] «Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya» Publ. Reshetnevskie chteniya. 1, 19, 290-292.
- [4] Iavorskii, B. M., Detlaf, A. A. & Lebedev, A. K. (2006). Spravochnik po fizike dlia inzhenerov i studentov VUZov. Moscow: Oniks Publ.
- [5] Benenson, W., Harris, J. W., Stoker, H., & Lutz H. (2002). Handbook of Physics. New York: Springer Publ.
- [6] Denicolai, M. (2001). Tesla transformer for experimentation and research. Helsinki university of Technology.
- [7] Rezonansnyy usilitel' moshchnosti toka promyshlennoy chastoty [Resonant power amplifier of industrial frequency current] (2019). Available at: <http://allpowr.su/ru/33>
- [8] Mesyats, G. A. (2004). Impul'snaya energetika i elektronika. M: Nauka.
- [9] Bakalov, V. P., Dmitrikov V. F., & Kruk B. I. (2007). Osnovy teorii tsepey 3rd ed. M: Goryachaya liniya – Telekom.
- [10] Craven, R. M., Smith, I. R. & Novac, B. M. (2014). Optimizing the secondary coil of a tesla transformer to improve spectral purity. IEEE Transactions on Plasma Science, 42 (1), 143-148.
- [11] Naidu, M. S. & Kamaraju, V. (2013). High Voltage Engineering 3rd edition. N. Y.: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- [12] Batygin, Yu. V., e.a. Sposib indukciynogo nagrivu metal'nykh elementiv avtomobil'nykh konstrukcij [Method for induction heating of metal automobile construction elements]. Patent Ua, no. 95481, 2014.
- [13] Induktor, induktsionnoe oborudovanie [Inductor, induction equipment] (2019). Available at: induktor-avto.pf.
- [14] Batygin, Yu. V., Serikov, G. S., Sinderuk, S. A. (2018). Rezonansnyy usilitel' elektricheskoy moshchnosti. Osnovnye raschetnye sootnosheniya [Resonant amplifier. The main calculation relations]. Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriya: Problemi udoskonalennya elektrichnikh mashin i aparativ. Teoriya i praktika.: zb.nauk. pr. 32(1308), 59-63.
- [15] Batygin, Yu. V., Serikov, G. S., Sinderuk, S. A. (2018). Rezonansnyy usilitel' elektricheskoy moshchnosti. Eksperimental'nye issledovaniya [Resonant amplifier. Experimental research]. Luts'k: LNTU. Zb.naukovikh prats': Perspektivni tekhnologii ta priladi, 13, 18-24.
- [16] Atabekov, G. I. (2006). Osnovy teorii tsepei. L: Energiia.
- [17] Batygin, Yu. V., Serikov, G. S., Sinderuk, S. A., Strelnikova, V. A. & Usmonov, E. R. (2019). Resonant reactive power amplifier. Analysis of electromagnetic processes. Electrical Engineering and Power Engineering, 2, 34-42.
- [18] Demirchyan, K. S., Neyman, L. R., Korovkin, N. V. & Chechurin, V. L. (2003). Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki 4th ed., 1, Spb.: «Piter».
- [19] Korn, G. A., Korn, T. M. (2000). Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Mineola, N.Y.: Dover Publications.