

УДК 621.314

## РЕЗОНАНСНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ РЕАКТИВНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ. АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

- 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;*
- СЕРИКОВ Г.С. *канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильной электроники Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: georgy301212@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;*
- УСМОНОВ Э.Р. *студент автомобильного факультета Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: emiraliusmonov@gmail.com;*

**Цель работы.** Анализ электромагнитных процессов и теоретическое обоснование принципиальной возможности резонансного усиления реактивной мощности гармонических сигналов в схеме из двух реальных индуктивно связанных последовательных активно-реактивных контуров, где «входным» элементом является индуктивность вторичного контура.

**Методы исследования.** Исследование данной тематики было проведено наиболее обширно и полноценно, а именно: изучены все возможные источники теоретического обоснования данной работы; сопоставлены все факторы, рассмотренные в источниках; оценены практические факты явления резонанса на примере экспериментальной модели.

**Полученные результаты.** Предложена схема реализации преобразователя, где имеет место трансформация уже не только напряжений, а мощности гармонических токов и напряжений. Получено, что при соответствующем выборе параметров, предложенная схема резонансного преобразователя может рассматриваться как усилитель реактивной электрической мощности с максимально возможным коэффициентом усиления  $K_{\max} = 0,5 \cdot ((\omega \cdot L_2) / R_2)$ ,  $\omega$  – резонансная частота,  $L_2$  – «выходная» индуктивность,  $R_2$  – активное сопротивление. Физически, максимум усиления мощности резонансным преобразователем обусловлен минимально возможной перекачкой энергии из вторичного контура в первичный контур с источником входного гармонического напряжения. Количественные оценки, выполненные для экспериментальной модели, подтвердили результаты качественного анализа и показали, что предложенная схема резонансного усилителя может обеспечить высокие показатели его действенности (например, усиление электрической мощности в ~ 38 раз!).

**Научная новизна.** Научная новизна настоящей работы состоит в обосновании принципиальной действенности резонансного усилителя реактивной электрической мощности, основанном на выводах обобщенного теоретического анализа электромагнитных процессов и численных оценках для одного из вариантов его экспериментальной реализации.

**Практическая ценность.** Проведенные теоретические исследования предложенной схемы резонансного усилителя электрической мощности представляют практический интерес для дальнейших экспериментальных исследований, а так же, например, для формулировки рекомендаций в разработках схемных элементов источников мощности для магнитно-импульсного притяжения заданных областей поверхности тонкостенных листовых металлов. Весьма перспективным в направлении проведенных исследований видится поиск условий наиболее эффективной действенности, экспериментальное изучение электромагнитных процессов в предложенной схеме резонансного усилителя реактивной мощности и разработке предложений по преобразованию реактивной в активную электрическую мощность.

**Ключевые слова:** резонанс; индуктивность; трансформатор Тесла; электрическая мощность; коэффициент трансформации

## I. ВВЕДЕНИЕ

Негативных проявлений резонанса описано достаточно много. В то же время данное явление может играть и позитивную роль. Здесь следует вспомнить о применении резонансных устройств в электротехнике. Так, авторами [1], [2] предложены силовые схемы резонансных преобразователей с подключением нескольких источников питания и нагрузок в системах комплексного электропитания. В работе [3] описаны варианты реализации резонансных стабилизаторов напряжения с однополярным возбуждением контура для космических аппаратов, обоснованы преимущества преобразователя с последовательным резонансным контуром и др. Конструктивно, все эти преобразователи могут быть различными, но их объединяет общий признак: действенность этих устройств основана на резонансе в электрических цепях.

Обобщение даже небольшого числа вышеприведенных примеров из различных сфер естествознания (в частности, это механика и электротехника) позволяет сделать вывод о широких возможностях резонансных явлений для создания новых технических систем любого назначения. В пользу такого заключения свидетельствует физический принцип подобия, позволяющий связать пространственные и временные характеристики процессов различной природы, отвлекаясь от их конкретного содержания [4], [5].

## II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Не вдаваясь в критику преимуществ и недостатков возможных резонансных электротехнических устройств, среди них, без сомнения, можно выделить наиболее эффективное предложение с коэффициентом преобразования более чем в  $\sim 1000$  раз, запатентованное еще в начале прошлого века и названное по имени его изобретателя «трансформатором Тесла» [6], [7]. Последний, принципиально состоит из двух индуктивно связанных резонансных контуров с отличительной особенностью. Вторичная обмотка разомкнута. Здесь имеет место распределенная емкость, величина которой обеспечивается геометрией и физическим состоянием внешнего окружения. Отсюда создание резонансных условий весьма проблематично, а выходной ток ничтожно мал. Имеет место усиление только напряжения, но не электрической мощности.

Вычислению характеристик трансформатора Тесла посвящены работы [8], [9]. Авторами получены аналитические выражения для возбуждаемых токов и напряжений, подтвержденные экспериментальными выводами самого Н. Тесла, даны оценки амплитуд выходного напряжения при вариации рабочих частот относительно резонансного значения и др.

Если трансформатор Тесла дополнить последовательным включением сосредоточенной емкости в цепь вторичной обмотки, то полученная схема из двух индуктивно связанных активно-реактивных контуров в режиме «резонанса напряжений» может представ-

лять собой уже преобразователь с возможностями усиления не только по напряжению, но и по току. Процессы в схеме идеализированного варианта такого устройства проанализированы авторами авторитетного издания [10]. Было показано, что при достаточно малом активном сопротивлении во вторичном контуре возбуждаются не нулевые ток и напряжения. При этом ток первичного контура стремится к нулю, хотя напряжение источника сохраняет конечную величину. Рассматривая коэффициент усиления, как отношение входной и выходной мощностей, можно утверждать, что в данной схеме, действительно, должно иметь место усиление электрической мощности [11], [12].

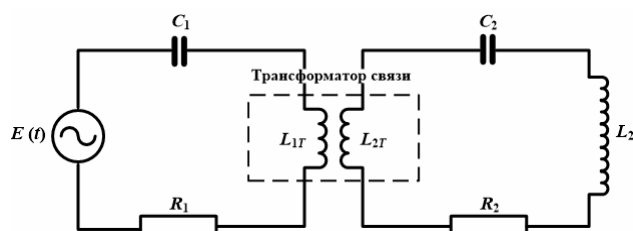
В работе [13] получены аналитические соотношения для основных характеристик электромагнитных процессов в предложенной системе из двух индуктивно связанных активно-реактивных контуров с реальными элементными компонентами. Данные соотношения являются базовыми для дальнейшего обоснования практической дееспособности предложенного усилителя реактивной электрической мощности.

## III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Анализ электромагнитных процессов и теоретическое обоснование принципиальной возможности резонансного усиления реактивной мощности гармонических сигналов в схеме из двух реальных индуктивно связанных последовательных активно-реактивных контуров, где «выходным» элементом является индуктивность вторичного контура.

## IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для ясности в последующем изложении вынесем из работы [13] схему усилителя (рис. 1) и базовые аналитические зависимости (формулы (1)).



Первый – «входной» контур:  $E(t)$  – источник гармонического напряжения,  $C_1$  – емкость,  $L_{1T}$  – индуктивность первичной обмотки трансформатора связи между контурами,  $R_1$  – активное сопротивление; второй – «выходной» контур:  $L_{2T}$  – индуктивность вторичной обмотки трансформатора связи,  $C_2$  – емкость,  $L_2$  – индуктивность «выходного» элемента усилителя,  $R_2$  – активное сопротивление.

Рисунок 1. Схема резонансного усилителя мощности

Выражения для токов –  $I_{1,2}$ , возбуждаемых в контурах усилителя,

$$\begin{cases} I_1 = E \cdot \frac{R_2}{\left((\omega \cdot M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2\right)}; \\ I_2 = -i \cdot \frac{E}{Z} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_{1T} \cdot C_1}} = \frac{1}{\sqrt{(L_2 + L_{2T}) \cdot C_2}}$  – резонансная

частота,

$M_{12} = k_{1,2} \cdot \sqrt{L_{1T} \cdot L_{2T}}$  – взаимдуктивность,

$k_{1,2} \in [0, 1]$  – коэффициент уровня электромагнитной связи между обмотками трансформатора связи,

$$Z = \frac{(\omega \cdot M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}{\omega \cdot M_{12}};$$

Из (1) получаем следующие зависимости.

Модуль отношения амплитуд токов,

$$\left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \frac{(\omega \cdot M_{12})}{R_2}; \quad (2)$$

Как следует из (2), при  $\frac{(\omega \cdot M_{12})}{R_2} > 1$ , должно

иметь место усиление тока.

Далее, вычислим мощность в первичной обмотке трансформатора связи.

$$\begin{aligned} Q_{L_{1T}} &= \left| I_1^2 \cdot \omega \cdot L_{1T} \right| = \\ &= \frac{E^2}{R_1} \cdot \left( \frac{\frac{R_1 \cdot R_2}{(\omega \cdot M_{12})^2}}{\left( 1 + \frac{R_1 \cdot R_2}{(\omega \cdot M_{12})^2} \right)} \right)^2 \cdot \left( \frac{\omega \cdot L_{1T}}{R_1} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

«Выходная» мощность источника гармонического напряжения, являющаяся базовой характеристикой усилителя при оценке его эффективности,

$$P_1 = |E \cdot I_1| = \frac{E^2 \cdot R_2}{\left((\omega \cdot M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2\right)}; \quad (4)$$

«Выходная» мощность – мощность сигнала в «выходном» элементе –  $L_2$ ,

$$Q_{L_2} = \left| I_2^2 \cdot (\omega \cdot L_2) \right| = E^2 \cdot \frac{(\omega \cdot M_{12})^2 \cdot (\omega \cdot L_2)}{\left((\omega \cdot M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2\right)}; \quad (5)$$

С помощью выражений (3) – (5) определим характерные показатели действенности предложенного преобразователя реактивной мощности гармонических токов и напряжений.

Отношение «выходной» мощности второго к «выходной» мощности первого контура, как отношение мощности в индуктивности –  $L_2$  к мощности в индуктивности –  $L_{1T}$ ,

$$\frac{Q_{L_2}}{Q_{L_{1T}}} = (k_{1,2} \cdot Q_2)^2; \quad (6)$$

где  $Q_2 = \frac{\omega \cdot L_2}{R_2} = \frac{\sqrt{L_2}}{R_2} \cdot \sqrt{C_2}$  – добротность второго контура.

Из выражения (6) следует, что при  $k_{1,2} \cdot Q_2 > 1$  во втором контуре должно иметь место усиление мощности относительно ее величины на «входе» в контур. Варьировать соотношение указанных мощностей можно с помощью уровня электромагнитной связи между контурами (явление индукции) и добротности второго контура (явление резонанса).

Отношение «выходной» мощности усилителя к «выходной» мощности источника гармонического напряжения,

$$\frac{Q_{L_2}}{P_1} = \frac{(\omega \cdot M_{12})^2}{\left((\omega \cdot M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2\right)} \cdot Q_2; \quad (7)$$

Из (7) следует, что интегральное усиление мощности определяется уровнем электромагнитной связи между контурами, индуктивностями трансформатора связи между ними, рассеянием энергии на активных сопротивлениях в них и добротностью «выходного» контура. Первые две характеристики обусловлены явлением электромагнитной индукции. Последняя – резонансными свойствами усилителя.

Прежде чем перейти к количественной интерпретации полученных характеристик процессов в резонансном усилителе обратимся к зависимостям для тока во втором контуре –  $I_2$ .

Соответствующее выражение перепишем в виде, удобном для дальнейшего анализа.

$$I_2 = -i \cdot \frac{E}{Z}; \quad (8)$$

где  $Z = \frac{(\omega \cdot M_{12})^2 + R_1 \cdot R_2}{\omega \cdot M_{12}}$ ;

Очевидно, что функциональная зависимость  $Z = Z(\omega \cdot M_{12})$  должна иметь минимум, что определяет максимум тока  $I_2$  как функции аргумента –

$(\omega \cdot M_{12})$ .

Необходимое условие существования экстремума для  $Z = Z(\omega \cdot M_{12})$  запишется в виде [14]:

$$\frac{dZ(\omega \cdot M_{12})}{d(\omega \cdot M_{12})} = \frac{(\omega \cdot M_{12})^2 - R_1 \cdot R_2}{(\omega \cdot M_{12})^2} = 0; \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, модуль эквивалентного сопротивления как функция аргумента  $(\omega \cdot M_{12})$ , достигает минимума при  $(\omega \cdot M_{12})_{\min} = \sqrt{R_1 \cdot R_2}$ . А собственно минимум сопротивления  $Z_{\min} = 2\sqrt{R_1 \cdot R_2}$ .

В терминах параметров схемы резонансного усилителя мощности условие реализации минимальной величины эквивалентного сопротивления  $Z$  имеет вид:

$$\omega \cdot k_{12} \cdot \sqrt{L_{1T} \cdot L_{2T}} = \sqrt{R_1 \cdot R_2}; \quad (10)$$

Из выражения (10) следует оценка значения коэффициента электромагнитной связи  $k_{12}$ , обеспечивающего максимум вторичного тока:

$$k_{12_{\max}} = \sqrt{\frac{R_1 \cdot R_2}{(\omega \cdot L_{1T}) \cdot (\omega \cdot L_{2T})}}; \quad (11)$$

Физически, найденный минимум эквивалентного сопротивления, связывающего вторичный ток с напряжением источника мощности и, очевидно, максимум усиления мощности резонансным преобразователем, можно объяснить минимально возможной перекачкой энергии из вторичного контура в первичный. Причем данное положение вещей обусловлено уровнем электромагнитной связи между контурами согласно формуле (11).

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{1m} = \frac{E}{2R_1}; \\ U_{L_{1T}m} = E \cdot \frac{Q_1}{2}; \\ P_{1m} = \frac{E^2}{2R_1}; \\ I_{2m} = \frac{E}{2\sqrt{R_1 \cdot R_2}}; \\ U_{L_{2m}} = E \cdot \frac{(\omega \cdot L_2)}{2\sqrt{R_1 \cdot R_2}}; \\ Q_{2m} = \frac{E^2}{R_1} \cdot \frac{Q_2}{4}; \end{array} \right. \quad (12)$$

где  $Q_1 = \frac{(\omega \cdot L_{1T})}{R_1}$  – добротность первого контура.

С учетом полученных соотношений переписаны основные зависимости для характеристик протекающих процессов в режиме максимума тока и мощности в «выходном» элементе резонансного усилителя мощности и дополнены выражениями для напряжений (формула (12)).

Теперь, модуль отношения токов в контурах:

$$\left| \frac{I_2}{I_1} \right| = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}; \quad (13)$$

Из (13) следует, что отношение токов обратно пропорционально корню квадратному из отношения активных сопротивлений в контурах, то есть, определяется уровнем рассеяния энергии.

Далее, отношение выходной и входной мощности – максимальный коэффициент преобразования мощности в предлагаемом резонансном усилителе:

$$K_{\max} = \frac{Q_{2m}}{P_1} = \frac{Q_2}{2}; \quad (14)$$

Из (14) следует, что максимальный коэффициент усиления достигается исключительно за счет резонансного возбуждения системы усилителя; полученный результат полностью согласуется с качественным выводом Н. Тесла [6].

Анализ, результаты, численные оценки.

Результаты анализа зависимостей (12) – (14), описывающих электромагнитные процессы в режиме максимума возможной эффективности преобразования электрической энергии, представлены в нижеследующих обобщающих положениях.

Полученные результаты представляют собой количественные показатели действенности резонансного усилителя мощности из двух индуктивно связанных последовательных RLC – контуров.

В отличие от трансформатора Тесла, в предложенной схеме преобразователя имеет место трансформация уже не только напряжения, а мощности гармонических токов и напряжений.

Связь между резонансным током и напряжением источника мощности имеет индуктивный характер и эквивалентное сопротивление связи можно интерпретировать как эквивалентную индуктивность всей системы в целом.

При соответствующем выборе параметров предложенная схема резонансного преобразователя может рассматриваться как усилитель реактивной электрической мощности с максимально возможным коэффициентом усиления:

$$K_{\max} = 0,5 \cdot \left( \frac{\omega \cdot L_2}{R_2} \right) = 0,5 \cdot \left( \frac{\sqrt{L_2}}{R_2} \right),$$

где  $\omega$  – резонансная частота,  $L_2$  – «выходная» индуктивность,  $R_2$  – активное сопротивление,  $C_2$  – емкость вторичного контура.

Физически, максимум усиления мощности резонансным преобразователем обусловлен минимально возможной перекачкой энергии из вторичного выходного контура в первичный контур с источником входного гармонического напряжения.

Для количественной иллюстрации полученных результатов выполним численные оценки в рамках конкретного примера расчета для экспериментальной модели усилителя электрической мощности.

Пример расчета.

Вычисления проведем для экспериментальной модели резонансного преобразователя мощности, схема замещения которого представлена на рис. 1, в режиме максимума эффективности.

Исходные данные.

1. Источник гармонического напряжения:

1.1. амплитуда –  $E_m = 1,0$  В

1.2. рабочая частота –  $f = 25$  кГц

2. Первичный контур:

2.1. резонансная частота –  $f = 25$  кГц

2.2. индуктивность (первичная обмотка трансформатора связи) –  $L_{1T} \approx 14,8$  мкГн

2.3. конденсатор емкостью –  $C_1 = 2,763$  мкФ

2.4. суммарное активное сопротивление источника мощности, соединительных проводов и первичной обмотки трансформатора связи –  $R_1 = 0,1$  Ом

3. Вторичный контур:

3.1. резонансная частота –  $f = 25$  кГц

3.2. индуктивность вторичной обмотки трансформатора связи –  $L_{2T} \approx 14,8$  мкГн

3.3. индуктивность соленоида (выходного элемента преобразователя) –  $L_2 \approx 169,2$  мкГн

3.4. конденсатор емкостью –  $C_2 = 0,22$  мкФ

3.5. активное сопротивление соединительных проводов, вторичной обмотки трансформатора связи и «выходной» катушки индуктивности –  $R_2 = 0,35$  Ом

Вычисления.

1. Коэффициент электромагнитной связи между обмотками –  $k_0 \approx 0,08$

2. Первичный контур:

2.1. возбуждаемый ток –  $I_1 = 5,0$  А

2.2. напряжение на первичной обмотке транс-

форматора связи между обмотками –  $U_{1T} = 11,58$  В

2.3. мощность от источника –  $P_1 = I_1 \cdot E_m = 5,0$  Вт

3. Вторичный контур:

3.1. Эквивалентное индуктивное сопротивление –  $Z = 0,374$  Ом

3.2. возбуждаемый ток –  $I_2 = 2,67$  А

3.3. напряжение на вторичной обмотке трансформатора связи между обмотками («входное» напряжение вторичного контура) –  $U_{2T} = 6,19$  В

3.4. «выходное» напряжение на соленоиде –  $U_{L2} \approx 70,8$  В

3.5. «выходная» мощность –  $Q_{L2} = I_2 \cdot U_{L2} = 189,2$  Вт

4. Интегральные параметры:

4.1. отношение возбуждаемых вторичного и первичного токов (усиление по току) –  $\frac{I_2}{I_1} \approx 0,534$

4.2. отношение «выходного» напряжения и напряжения источника –  $\frac{U_{L2}}{E_m} \approx 70,8$

4.3. отношение «выходной» мощности усилителя и «выходной» мощности от источника напряжения – коэффициент усиления мощности –

$$K_{\max} = \frac{Q_{L2}}{P_1} \approx 37,84$$

4.4. отношение «выходной» мощности преобразователя и «выходной» мощности первого контура –  $\frac{Q_{L2}}{P_{L1T}} \approx 3,3$

Проведенные вычисления подтвердили выводы качественного анализа и показали, что предложенная схема из двух активно-реактивных контуров в режиме «резонанса напряжений» может обеспечить высокие показатели преобразования не только напряжения, но и тока в «выходном» элементе вторичного контура.

Рассчитанная модель усилителя реактивной электрической мощности была успешно апробирована практически. Как показали эксперименты в предложенной схеме возможно усиление с коэффициентом  $K \approx 33$ , что подтверждает достоверность соответствующего результата вычислений (расхождения  $\sim 14\%$ ) [15].

В заключение следует добавить, что настоящее предложение найдет практическое применение в качестве одного из схемных элементов источника мощности для магнитно-импульсного восстановления кузовных покрытий транспортными средствами (МИУС-2) [16], и соответствующий способ резонансного повышения напряжения уже защищен патентом Украины [17].

## V. ВЫВОДЫ

Проведен анализ протекающих процессов, на основании которого теоретически обоснована принципиальная возможность эффективного резонансного усиления реактивной мощности гармонических сигналов в схеме из двух реальных индуктивно связанных последовательных активно-реактивных контуров, где «выходным» элементом является индуктивность вторичного контура.

Показано, что максимально возможный коэффициент усиления электрической мощности составляет

$$K_{\max} = \frac{Q_2}{2}, \text{ где } Q_2 = \frac{\omega \cdot L_2}{R_2} = \frac{\sqrt{L_2}}{R_2} - \text{добротность, } \omega$$

– резонансная частота,  $L_2$  – «выходная» индуктивность,  $R_2$  – активное сопротивление,  $C_2$  – емкость «выходного» контура схемы усилителя.

Количественные оценки, выполненные для экспериментальной модели, подтвердили результаты качественного анализа и показали, что предложенная схема резонансного усилителя может обеспечить высокие показатели его действенности (например, усиление электрической мощности в ~ 38 раз!)

Дальнейшие перспективы – экспериментальные исследования для обоснования практической дееспособности предложенного резонансного усилителя реактивной электрической мощности.

Работа проводилась кафедрой физики ХНАДУ в рамках Научного исследования: «Энергосберегающие малозатратные технологии питания и ремонта транспортных средств» 08-53-19, финансируемого Министерством образования и науки Украины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [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 Soloot, K. Niayesh, E. Hashemi, J. Jadidian // 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] Benenson, W. Handbook of Physics [Текст] / W. Benenson, J. W. Harris, H. Stoker, H. Lutz. – New York.: Springer, 2002. – 1186 с.
- [5] Denicolai, M. Tesla transformer for experimentation and research [Текст]: дис. канд. техн. наук / Denicolai M. – Helsinki university of Technology, 2001. – 96 с.
- [6] Tesla, N. My inventions and other writings [Текст] / N. Tesla. – Penguin, 2011. – 144 с.
- [7] Gerekos, Ch. The Tesla Coil [Текст]: дис. канд. техн. наук / Gerekos Ch. – Université Libre de Bruxelles, Brussels, 2012. – 77 с.
- [8] Батыгин, Ю. В. Резонанс во вторичном контуре трансформатора Тесла при возбуждении гармоническим напряжением [Текст] / Ю. В. Батыгин, Е. А. Чаплыгин, С. А. Шиндерук, О. С. Сабокарь // Вісник НТУ "ХПІ". Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харьков, 2017. – № 30. – С. 25-31.
- [9] Batygin, Yu. V. The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer [Текст] / Yu. V. Batygin, S. A. Shinderuk, G. S. Serikov // «Danish Scientific Journal». – 2018. – № 11-1. – С. 72-79.
- [10] Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники [Текст] / К. С. Демирчян, Л. П. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Изд. 4-е. Том 1. – СПб.: «Питер», 2003. – 463 с. : ил.
- [11] Tilbury, M. The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide [Текст] / M. Tilbury. – McGraw-Hill, 2008. – 442 с.
- [12] Атабеков, Г. И. Основы теории цепей [Текст] / Г. И. Атабеков. – Л.: Энергия, 2006. – 220 с.
- [13] 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». – Харьков, 2018. – № 32. С. 59-63.
- [14] 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.
- [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. унт-т. – Луцьк, 2018. – № 13. – С. 18-24.
- [16] Batygin, Yu. V. Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies [Текст] / Yu. V. Batygin, M. V. Barbashova, O. S. Sabokar. – New

York.: Springer, 2018. – 99 с.

[17] Пат. 133471 України, Н 03 Н 7/00. Спосіб генерування високих амплітуд змінної синусоїдальної напруги в резонансному режимі / Батигін Ю. В., Сабокар О. С., Серіков Г. С., Шиндерук С. О.; за-

явник та патентовласник Харківський нац. автот. – дорожн. ун – т. – № у 2018 10651; заявл. 29.10.2018; опубл. 10.04.19, Бюл. №7.

Стаття надійшла до редакції 23.04.2019

## РЕЗОНАНСНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ. АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ

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;*

СЕРІКОВ Г.С.

*канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобільної електроніки Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: georgy301212@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;*

УСМОНОВ Е.Р.

*студент автомобільного факультету Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, Харків, Україна, e-mail: emiraliusmonov@gmail.com;*

**Мета роботи.** Аналіз електромагнітних процесів і теоретичне обґрунтування принципової можливості резонансного підсилення реактивної електричної потужності гармонічних сигналів в схемі із двох реально індуктивно пов'язаних послідовних активно-реактивних контурів, де «вихідним» елементом є індуктивність вторинного контуру.

**Методи дослідження.** Дослідження даної тематики було проведено найбільш широко та повноцінно, а саме: вивчені всі можливі джерела теоретичного обґрунтування даної роботи; співставлені всі фактори, що розглянуті у джерелах; оцінені практичні факти явища резонансу на прикладі експериментальної моделі.

**Отримані результати.** Запропоновано схему реалізації перетворювача, де має місце трансформація вже не тільки напруги, а й потужності гармонічних струмів і напруг. Отримано, що за відповідного вибору параметрів, запропонована схема резонансного перетворювача може розглядатися у якості підсилювача реактивної електричної потужності із максимально можливим коефіцієнтом підсилення –  $K_{max} = 0,5 \cdot ((\omega \cdot L_2) / R_2)$ ,  $\omega$  – резонансна частота,  $L_2$  – «вихідна» індуктивність,  $R_2$  – активний опір. З огляду на фізику процесу, максимум підсилення потужності резонансним перетворювачем обумовлений мінімально можливою перекачкою енергії із вторинного контуру до первинного із джерелом вхідної гармонічної напруги. Кількісні оцінки, виконані для експериментальної моделі, підтвердили результати якісного аналізу й показали, що запропонована схема резонансного підсилювача може забезпечити високі показники його дієвості (наприклад, підсилення електричної потужності у ~ 38 разів!).

**Наукова новизна.** Наукова новизна цієї роботи полягає в обґрунтуванні принципової дієвості резонансного підсилювача реактивної електричної потужності, що базується на висновках загального теоретичного аналізу електромагнітних процесів та кількісних оцінок для одного із варіантів його експериментальної реалізації.

**Практична цінність.** Проведені теоретичні дослідження запропонованої схеми резонансного підсилювача електричної потужності представляють практичний інтерес для подальших експериментальних досліджень, а також, наприклад, для формулювання рекомендацій в розробках схемних елементів джерел потужності для магнітно-імпульсного притягання заданих областей поверхні тонкостінних листових металів. Великим перспективним в напрямку проведених досліджень бачиться пошук умов найбільш ефективної дієвості, експериментальне вивчення електромагнітних процесів в запропонованій схемі резонансного підсилювача реактивної потужності і розробці пропозицій щодо перетворення реактивної в активну електричну потужність.

**Ключові слова:** резонанс; індуктивність; трансформатор Тесла; електрична потужність; коефіцієнт трансформації

## RESONANT REACTIVE POWER AMPLIFIER. ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES

- BATYGIN YU.V. *Sci.D, Professor, Chief of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine, e-mail: yu.v.batygin@gmail.com;*
- SERIKOV G.S. *Ph.D, Associate professor, Associate professor of the automobile electronics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: georgy301212@gmail.com;*
- SHINDERUK S.O. *Ph.D, 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, Assistance tutor of the physics chair of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: v.strelnikova91@gmail.com;*
- USMONOV E.R. *Student of the automobile school of Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine e-mail: emiraliusmonov@gmail.com;*

**Purpose.** Analysis of electromagnetic processes and the theoretical substantiation of the fundamental possibility of the reactive power resonant amplification of harmonic signals in a circuit of two real inductively coupled sequential active-reactive circuits, where the “input” element is the secondary circuit

**Methodology.** The study of this topic was carried out most extensively and fully, namely: studied all possible sources of theoretical substantiation of this work; all factors considered in sources are compared; practical facts of the resonance phenomenon are estimated by the example of an experimental model.

**Findings.** The implementation scheme of the converter is proposed, where there is not only the voltage transformation, but the power of harmonic currents and voltages. It was found that with an appropriate choice of parameters, the proposed resonant converter circuit can be considered as a reactive electric power amplifier with the highest possible gain—  $K_{max} = 0,5 \cdot ((\omega L_2) / R_2)$ ,  $\omega$  is the resonant frequency,  $L_2$  is the “output” inductance,  $R_2$  is the active resistance. Physically, the maximum power gain by a resonant transducer is due to the minimum possible transfer of energy from the secondary circuit to the primary one with an input harmonic voltage source. The quantitative estimates made for the experimental model confirmed the results of the qualitative analysis and showed that the proposed resonant amplifier circuit can provide high indicators of its effectiveness (for example, an increase in electrical power of ~ 38 times!).

**Originality.** The scientific novelty of this work consists in substantiating the principle efficiency of a resonant amplifier of reactive electrical power, based on the findings of a generalized theoretical analysis of electromagnetic processes and numerical estimates for one of its experimental implementation options.

**Practical value.** The theoretical studies carried out on the proposed scheme of a resonant electric power amplifier are of practical interest for further experimental studies, as well as, for example, for formulating recommendations in the development of circuit elements of power sources for magnetic-pulsed attraction of specified surface areas of thin-walled sheet metals. The search for the conditions for the most effective efficiency, the experimental study of electromagnetic processes in the proposed scheme of a resonant reactive power amplifier and the development of proposals for the conversion of reactive into active electrical power seem very promising in the direction of the research.

**Keywords:** resonance; inductance; Tesla transformer; electric power; transformation coefficient

### REFERENCES

- [1] Pavlov, H. V., Obrubov, 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 byudzhethoe uchrezhdenie vysshego



- obrazovaniya» Publ. Reshetnevskie chteniya. 1, 19, 290–292
- [4] Benenson, W., Harris, J. W., Stoker, H., & Lutz H. (2002). Handbook of Physics. New York: Springer Publ.
- [5] Denicolai, M. (2001). Tesla transformer for experimentation and research. Helsinki university of Technology.
- [6] Tesla, N. (2011). My inventions and other writings. Penguin.
- [7] Gerekos, Ch. (2012) The Tesla Coil. Brussels: Université Libre de Bruxelles
- [8] Batygin, Yu. V., Chaplygin, Ye. A., Shinderuk, S. A. & Sabokar, O. S. (2017) Rezonans vo vtorichnom konture transformatora Tesla pri vzbuzhdenii garmonicheskim napryazheniem [Resonance in the secondary circuit of Tesla transformer excited by harmonic voltage]. Visnik NTU "KhPI". Matematichne modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. 30(1252), 25–31.
- [9] Batygin, Yu. V., Shinderuk, S. A., Serikov, G. S. (2018). The quantitative indices of the induction effects and the resonance phenomena in the Tesla transformer. «Danish Scientific Journal», 11–1, 72–79
- [10] Demirchyan, K. S., Neyman, L. R., Korovkin, N. V. & Chechurin, V. L. (2003). Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki 4th ed., 1, Spb.: «Piter».
- [11] Tilbury, M. (2008). The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide, McGraw-Hill
- [12] Atabekov, G. I. (2006). Osnovy teorii tsepei. L: Energiia.
- [13] 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
- [14] Korn, G. A., Korn, T. M. (2000). Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: definitions, theorems, and formulas, for reference and review. Mineola, N.Y.: Dover Publications.
- [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] Batygin, Yu. V., Barbashova, M. V., Sabokar O. S. (2018) Electromagnetic metal forming for advanced processing technologies. New York: Springer Publ.
- [17] Batygin, Yu. V., e.a. Sposib generuvannya vysokoyh amplitud zminnoi' synusoï'dal'noi' naprugy v rezonansnomu rezhymi [Method for generating high amplitudes of sinusoidal voltage variable in resonance mode]. Patent Ua, no. 133471, 2019.