

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.318.4

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142547

© Батыгин Ю.В.¹, Чаплыгин Е.А.², Шиндерук С.А.³, Третинников Е.А.⁴

ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА ПРИ ОТКЛОНЕНИИ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ОТ РЕЗОНАНСНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Цель. Определение амплитудно-временной зависимости напряжения на выходе вторичного контура, а также численные оценки, иллюстрирующие количественные показатели процесса при отклонении возбуждающей частоты от резонансного значения, определяющего действительность трансформатора Тесла, как эффективного электрического преобразователя. **Результаты.** Получены зависимости выходного напряжения от рабочих частот протекающих электродинамических процессов, позволяющие оценить эффективность преобразования напряжения в трансформаторе Тесла. **Научная новизна.** Получены амплитудно-временные зависимости напряжения на выходе вторичного контура трансформатора Тесла, а также численные оценки, иллюстрирующие количественные показатели процесса при отклонении возбуждающей частоты от резонансного значения. **Практическая значимость.** Границы диапазонов рабочих частот, определяющих величины интегральных коэффициентов преобразования напряжения, устанавливаются значением добротности вторичного контура трансформатора Тесла – Q_2 . Максимум интегрального коэффициента преобразования напряжения, существенно превышающего величину (в $\sim Q_2$ раз), обусловленную электромагнитной связью между обмотками трансформатора Тесла, достигается в весьма узкой полосе вблизи резонансной частоты (относительное отклонение $\sim 1/2Q_2 \rightarrow 0$). При незначительном отклонении рабочей частоты от резонансного значения (не более чем на $\sim \pm 10\%$) величина интегрального коэффициента преобразования напряжения существенно падает (более чем на порядок), и при низких частотах возбуждающего напряжения трансформатор Тесла работает как обычный повышающий преобразователь напряжения с коэффициентом трансформации, величина которого устанавливается известным явлением электромагнитной индукции. **Ключевые слова:** трансформатор Тесла, резонанс, коэффициент преобразования энергии, резонансный контур, воздушный трансформатор.

Батигін Ю.В., Чаплигін Є.О., Шиндерук С.О., Третинников Є.О. Вихідна напруга трансформатора Тесла при відхиленні робочої частоти від резонансного значення. Мета. Визначення амплітудно-часової залежності напруги на виході вторинного контуру, а також чисельні оцінки, що ілюструють кількісні показники процесу при відхиленні частоти, що збуджує, від резонансного значення, що визначає дієвість трансформатора Тесла, як ефективного електричного перетворювача. **Методологія.** Обчислення проведені за допомогою методів аналізу електричних ланцюгів з гармонійними струмами і напругами, без будь-яких додаткових фізичних гіпотез про

¹ д-р техн. наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, г. Харків, yu.v.batygin@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, г. Харків, chaplygin.e.a@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, г. Харків, s.shinderuk.2016102@ukr.net

⁴ студент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, г. Харків, ztretinnikov@gmail.com

матеріальний зміст нашого світу. **Результати.** Отримано залежності вихідної напруги від робочих частот електродинамічних процесів, що протікають, що дозволяють оцінити ефективність перетворення напруги в трансформаторі Тесла. **Наукова новизна.** Отримано амплітудно-часові залежності напруги на виході вторинного контуру трансформатора Тесла, а також чисельні оцінки, що ілюструють кількісні показники процесу при відхиленні частоти, що збуджує, від резонансного значення. Показано, що межі діапазонів робочих частот, що визначають величини інтегральних коефіцієнтів перетворення напруги, встановлюються значенням добротності вторинного контуру трансформатора Тесла. У досить вузькій смузі частот поблизу резонансного значення ефективність перетворення напруги максимальна, при частотах, істотно нижче резонансної, трансформатор Тесла працює як звичайний повітряний трансформатор з електромагнітним зв'язком між обмотками. **Практична значимість.** Межі діапазонів робочих частот, що визначають величини інтегральних коефіцієнтів перетворення напруги, встановлюються значенням добротності вторинного контуру трансформатора Тесла – Q_2 . Максимум інтегрального коефіцієнта перетворення напруги, що істотно перевищує величину ($\nu \sim Q_2$ раз), що обумовлена електромагнітним зв'язком між обмотками трансформатора Тесла, досягається в досить вузькій смузі поблизу резонансної частоти (відносно відхилення $\sim 1/2Q_2 \rightarrow 0$). При незначному відхиленні робочої частоти від резонансного значення (не більше ніж на $\sim \pm 10\%$) величина інтегрального коефіцієнта перетворення напруги істотно падає (більш ніж на порядок), і при низьких частотах напруги, що збуджує, (ν першому наближенні – на порядок нижче резонансної частоти вторинного контуру) трансформатор Тесла працює як звичайний перетворювач напруги, що підвищує, з коефіцієнтом трансформації, величина якого встановлюється відомим явищем електромагнітної індукції.

Ключові слова: трансформатор Тесла, резонанс, коефіцієнт перетворення енергії, резонансний контур, повітряний трансформатор.

Yu.V. Batygin, E.O. Chaplygin, S.O. Shynderuk, E.O. Tretinnikov. The Tesla transformer output voltage with an operating frequency deflection from the resonant value.

Purpose. Determination of the amplitude-time dependence of the voltage at the output of the secondary circuit, as well as numerical estimations illustrating the quantitative indices of the process when the exciting frequency deviates from the resonance values determining the effectiveness of the Tesla transformer as an effective electrical converter. **Results.** Dependences of the output voltage on operating frequencies of the proceeding electrodynamic processes that make it possible to estimate the voltage transformation efficiency in the Tesla transformer have been received. **Scientific Novelty.** The amplitude-time dependences of the voltage at the output of the Tesla transformer secondary circuit have been obtained, as well as the numerical estimations showing the quantitative indices of the process when the exciting frequency deviates from the resonant value. **Practical value.** The operating frequencies range limits determining the values of the integral voltage conversion factors have been found out from the value of the Q -factor of the Tesla transformer secondary circuit – Q_2 . The maximum of the integral voltage conversion coefficient, which is much higher than the value (in $\sim Q_2$ times), caused by the electromagnetic coupling between the windings of the Tesla transformer, is achieved in a very narrow band near the resonant frequency (relative deviation $\sim 1/2Q_2 \rightarrow 0$). With an insignificant deviation of the operating frequency from the resonant value (by no more than $\pm 10\%$), the value of the integral voltage conversion coefficient drops significantly (by more than an order of magnitude) and at low frequencies of the exciting voltage (in the first approximation, an order of magnitude lower than the resonant frequency of the secondary circuit), the Tesla transformer works as a normal step-up voltage converter with a transformation coefficient, the value of which is set by the well-known phenomenon of electromagnetic induction.

Keywords: Tesla transformer, resonance, power conversion transformation coefficient, resonant circuit, air transformer.

Постановка проблеми. Вопрос генерации, преобразования и передачи электрической энергии с минимальными потерями на ее рассеивание является современной проблемой энергетики. Получение систем, способных эффективно использовать реакцию окружающей среды путем выбора необходимых параметров работы самой системы, – это техническая задача, не имеющая однозначного решения.

Патент США на «Аппарат для производства электрических токов высокой частоты и потенциала» был получен 22 сентября 1896 г. Николой Тесла. Устройство, с помощью которого была реализована идея автора, получило в специальной литературе название «трансформатора Тесла» с соответствующим коэффициентом трансформации – $k > 1000$. Практически настройка «трансформатора Тесла» осуществляется подбором параметров первичного контура с последующей трансформацией низковольтного напряжения в «выходное» высоковольтное напряжение на обмотке многовиткового соленоида вторичного контура.

Актуальность исследования амплитудно-временных зависимостей напряжения на выходе вторичного контура, а также численных оценок количественных показателей процесса, видится перспективной, поскольку трансформатор Тесла является высокоэффективным преобразователем напряжения, выходные характеристики которого определяются резонансным возбуждением «открытого» активно-реактивного контура.

Анализ последних исследований и публикаций. Не вдаваясь в довольно многочисленные современные достижения в исследованиях [1-3] и разработках конструктивного исполнения трансформатора Тесла [3-5], сконцентрируемся на фундаментальном положении его действительности: при строгом равенстве возбуждающей частоты и собственной частоты вторичного контура происходит резонансное возрастание амплитуды выходного напряжения, необъяснимое известными индукционными эффектами. Его амплитуда на несколько порядков превышает величину входного сигнала. Необходимость строгого совпадения частот, в первую очередь, была отмечена и самим Н.Тесла: «...После тщательной настройки...можно вызвать движение электричества, в тысячи раз превышающее исходное...» [6].

С практической точки зрения представляют интерес ответы на вопросы, насколько допустимо отклонение возбуждающей частоты от собственной частоты резонансного контура и как это отклонение влияет на амплитуду выходного напряжения. Данная информация в современной научной литературе отсутствует.

Целью статьи является определение амплитудно-временной зависимости напряжения на выходе вторичного контура, а также численные оценки, иллюстрирующие количественные показатели процесса при отклонении возбуждающей частоты от резонансного значения, определяющего действительность трансформатора Тесла, как эффективного электрического преобразователя.

Изложение основного материала. В первую очередь следует отметить, что при проведении вычислений используются хорошо апробированные методы анализа электрических цепей с гармоническими токами и напряжениями без привлечения каких-либо гипотетических представлений о природе материального мира [7, 8]. Расчётная схема замещения представлена на рисунке.

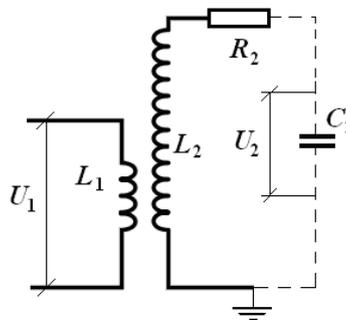


Рисунок – Расчётная схема замещения трансформатора Тесла: U_1, L_1 – возбуждающее напряжение и индуктивность в первичном контуре; R_2, L_2, C_2 – активное сопротивление, индуктивность, ёмкость вторичного контура; U_2 – выходное напряжение вторичного контура

Постановка задачі.

• Первичная обмотка трансформатора Тесла индуктивно связана с вторичной так, что её витки w_1 частично покрывают соответствующее число витков вторичной обмотки $w_2^{(1)}$ и можно считать, что, вследствие индуктивной связи, коэффициент трансформации по напряжению будет равен $k_1 = \frac{w_2^{(1)}}{w_1}$.

• Вторичная обмотка разомкнута (в соответствии с классической терминологией имеет место режим холостого хода [7, 8]), вследствие чего влиянием вторичной обмотки на электромагнитные процессы в первичном контуре можно пренебречь [1-6].

• Расчётная схема представлена на рисунке, где первичный контур без влияния вторичного контура может рассматриваться как независимый источник гармонического напряжения на индуктивности $-L_1$, $U_1(t) = U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t)$, где ω_1 – частота и $U_{1m} = \text{const}$ – постоянная амплитуда.

• Добротность вторичного контура, соответственно рекомендации Н. Тесла, должна быть достаточно большой, то есть $Q_2 = \left(\frac{\omega_2 L_2}{R_2} \right) \gg 1$, где ω_2 – частота электромагнитных процессов [1].

• Исследование процесса в последовательном вторичном контуре начинается с переходного режима. Начальные условия: $U_2(0) = \frac{dU_2(0)}{dt} = 0$.

Расчётные соотношения.

Согласно принятой постановке задачи, вторичный последовательный активно-реактивный контур возбуждается через индуктивную связь источником гармонического напряжения с постоянной амплитудой. В этой связи электромагнитные процессы в цепи вторичного контура можно рассматривать как процессы вынужденных колебаний под действием внешней гармонической силы.

Пусть $U_2(t)$ – выходное напряжение, определяемое как напряжение на индуктивности или ёмкости вторичного контура, что справедливо при достаточной малости величины активного сопротивления $-R_2$.

Соответствующее уравнение состояния можно записать в виде [7, 8]:

$$\frac{d^2 U_2(t)}{dt^2} + 2\delta_2 \frac{dU_2(t)}{dt} + \omega_{20}^2 U_2(t) = (\omega_{20}^2 k_1) U_{1m} \sin(\omega_1 t), \quad (1)$$

где $\omega_{20} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ и $\delta_2 = \frac{R_2}{2L_2}$ – собственная частота и декремент затухания контура вторичной обмотки трансформатора Тесла, соответственно.

Опуская громоздкие промежуточные преобразования, амплитудно-временную зависимость напряжения, возбуждаемого на выходе вторичного контура, включая переходной режим при заданных тривиальных начальных условиях $U_2(0) = \frac{dU_2(0)}{dt} = 0$ [8, 9], запишем установившийся режим, когда $t \gg \frac{1}{\delta_2}$, что представляет наибольший практический интерес. Пренебрегая слагаемыми $e^{-\delta_2 t} \rightarrow 0$ для выходного напряжения, перепишем в виде, являющемся базовым для проведения дальнейшего анализа.

$$U(t) = \frac{kU}{\left[\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega} \right) + \left(2\delta \left(\frac{\omega}{\omega} \right) \right) \right) \right]} \cdot \left[\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega} \right) \right) \sin(\omega t) - \left(2\delta \left(\frac{\omega}{\omega} \right) \right) \cos(\omega t) \right], \quad (2)$$

где $\delta_{20} = \left(\frac{\delta_2}{\omega_{20}} \right)$ – относительный декремент затухания.

Требование достаточной малости потерь является обязательным по отношению к преобразователю энергии любого вида. В этой связи дальнейшее рассмотрение можно проводить, полагая, что относительный декремент затухания $-\delta_{20} \ll 1$ есть бесконечно малая величина [9].

С помощью выражения (2) проанализируем зависимость выходного напряжения трансформатора Тесла при отклонении рабочей частоты от резонансного значения для вторичного контура. Для количественной оценки интересующей зависимости введём интегральный коэффициент преобразования напряжения, определяемый отношением амплитуд выходного и возбуждающего напряжения $K_{Tesla} \stackrel{def}{=} \frac{U_{2m}}{U_{1m}}$.

1. Низкочастотный режим.

Частота возбуждающего напряжения много меньше собственной частоты вторичного контура, то есть $\left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}}\right) \ll 1$.

В пренебрежении бесконечно малыми величинами порядка $\left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}}\right)^2$ и $\left(\delta_{20}\left(\frac{\omega_1}{\omega_{02}}\right)\right)$ выходное напряжение $U_2(t)$ будет представлено выражением:

$$U_2(t) \approx (k_1 U_{1m}) \cdot \sin(\omega_1 t). \quad (3)$$

Результат (3) свидетельствует о том, что при достаточно низких рабочих частотах трансформатор Тесла работает как обычный преобразователь напряжения с коэффициентом преобразования – K_{Tesla} , величина которого устанавливается исключительно электромагнитной связью первичной и вторичной обмоток, то есть $K_{Tesla} \rightarrow k_1$.

2. Высокочастотный режим.

Частота возбуждающего напряжения сравнима с собственной частотой вторичного контура: $\left(\frac{\omega_1}{\omega_{20}}\right) = (1 + \Delta)$, где Δ – вариация частоты возбуждающего сигнала относительно собственной частоты вторичного контура трансформатора Тесла.

Поскольку практический интерес представляет режим, близкий к резонансному, примем, что $\Delta \in [0; \pm 0,1]$.

В рамках принятого допущения, пренебрегая малыми величинами второго порядка относительно Δ , после несложных тождественных преобразований получаем выражение для выходного напряжения трансформатора Тесла.

$$U_2(t) \approx -\frac{(k_1 Q_2) U_{1m}}{\sqrt{1 + (2Q_2 \Delta)^2}} \cos(\omega_1 t - \psi_\Delta), \quad (4)$$

где $\psi_\Delta = \arctg(2Q_2 \Delta)$; $Q_2 = \left(\frac{\omega_{20} L_2}{R_2}\right) = \frac{1}{2\delta_{20}}$ – добротность вторичного контура.

Полученный результат приводит к следующим выводам.

а) При $\Delta \ll \frac{1}{2Q_2}$, что следует из $(2Q_2 \Delta)^2 \ll 1$, $\psi_\Delta \rightarrow 0$ и выражение (4) описывает процесс в случае резонанса:

$$U_2(t) \approx - (k_1 Q_2) U_{1m} \cdot \cos(\omega_1 t). \quad (5)$$

Из (5) получаем интегральный коэффициент преобразования напряжения в трансформаторе Тесла.

$$K_{Tesla} \rightarrow (k_1 \cdot Q_2) \gg 1. \quad (6)$$

Результат (6) показывает, что трансформация напряжения при выполнении резонансных условий возбуждения ($\omega_1 \approx \omega_{20}$) и требования достаточно большой добротности вторичного контура ($Q_2 \gg 1$) происходит с эффективностью, намного превышающей трансформацию за счёт индуктивной связи между первичным и вторичным контурами, так как $\frac{K_{Tesla}}{k_1} \rightarrow Q_2 \gg 1$.

Подчеркнём, что полученный результат (6) не только согласуется с рекомендацией Н. Тесла, но и является количественным показателем его феноменологического качественного

указания о связи добротности вторичного контура трансформатора с напряжением, возбуждаемым на его выходе [6].

б) При $\Delta \gg \frac{1}{2Q_2}$, что следует из $(2Q_2\Delta)^2 \gg 1$, получаем, что $\psi_\Delta = \arctg(2Q_2\Delta) \rightarrow \frac{\pi}{2}$ и формула (5) принимает вид:

$$U_2(t) \approx -\left(\frac{k_1}{2\Delta}\right)U_{1m} \sin(\omega_1 t) \quad (7)$$

Полученный результат свидетельствует о некотором превышении интегрального коэффициента преобразования над индуктивным коэффициентом трансформации напряжения, то есть $K_{Tesla} \rightarrow \left(\frac{k_1}{2\Delta}\right)$.

в) При $\Delta \approx \frac{1}{2Q_2}$, что следует из $(2Q_2\Delta)^2 \approx 1$, получаем, что $\psi_\Delta = \arctg(2Q_2\Delta) \rightarrow \frac{\pi}{4}$ и формула (4) принимает вид:

$$U_2(t) \approx -\frac{(k_1 Q_2)}{\sqrt{2}} U_{1m} \cos\left(\omega_1 t - \frac{\pi}{4}\right). \quad (8)$$

Коэффициент интегрального преобразования напряжения в этом случае будет равен:

$$K_{Tesla} \rightarrow \left(\frac{k_1 Q_2}{\sqrt{2}}\right) \gg 1. \quad (9)$$

Численные оценки. Иллюстрацию практического применения полученных соотношений для оценки возможных величин интегральных коэффициентов преобразования напряжения в трансформаторе Тесла можно провести для исходных данных, близких к рекомендациям автора изобретения [7]: собственная частота и добротность вторичного контура – $f_{20} = 300$ кГц и $Q_2 \approx 1000$. Коэффициент трансформации по напряжению за счёт электромагнитной связи между обмотками – $k_1 \approx 15$.

Оценки.

1. Условная ширина полосы частот в окрестности, «достаточно близкой» к резонансному значению, обеспечивающая максимум интегрального коэффициента преобразования напряжения – $K_{Tesla} \approx k_1 \cdot Q_2 = 15000$:

- а) относительная величина – $\Delta \ll \frac{1}{2Q_2} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, для первого порядка малости относительно граничного значения [9] – $\Delta_{real} \approx 0,1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 10^{-4}$;
- б) абсолютное значение – $\Delta f_{20} \approx \pm 15,0$ Гц.

2. Условная ширина полосы частот в «близкой» окрестности её резонансного значения, обеспечивающая наиболее близкий к максимуму интегральный коэффициент преобразования напряжения, – $K_{Tesla} \approx \frac{k_1 Q_2}{\sqrt{2}} \approx 10606$:

- а) относительная величина – $\Delta \approx \frac{1}{2Q_2} = 0,5 \cdot 10^{-3}$;
- б) абсолютное значение – $\Delta f_{20} \approx \pm 150$ Гц.

3. Условная ширина полосы частот в «дальней» окрестности её резонансного значения, обеспечивающая интегральный коэффициент преобразования напряжения, – $K_{Tesla} \approx \frac{k_1}{2\Delta} \approx 1500$:

- а) относительная величина для первого порядка бесконечно большой величины относительно граничного значения [9] – $\Delta \approx 10 \frac{1}{2Q_2} = 0,5 \cdot 10^{-2}$;
- б) абсолютное значение – $\Delta f_{20} \approx \pm 1500$ Гц.

4. При частотах, на порядок меньших резонансного значения (это собственная частота вторичного контура), $f \leq 0,1 \cdot f_{20} = 30000$ Гц, интегральный коэффициент преобразования напряжения – $K_{Tesla} \approx k_1 = 15$.

Полученные зависимости и оценки выходного напряжения от частотных характеристик будут справедливы для любых активно-реактивных схем (при условии малого затухания и высокой добротности на резонансной частоте), возбуждаемых гармоническими сигналами.

Выводы

Получены зависимости выходного напряжения от рабочих частот протекающих процессов, позволяющие оценить эффективность преобразования напряжения в различных режимах работы трансформатора Тесла.

Основные результаты выполненных оценок сводятся к следующим положениям.

Границы диапазонов рабочих частот, определяющих величины интегральных коэффициентов преобразования напряжения, устанавливаются значением добротности вторичного контура трансформатора Тесла – Q_2 .

Максимум интегрального коэффициента преобразования напряжения, существенно превышающего величину (в $\sim Q_2$ раз), обусловленную электромагнитной связью между обмотками трансформатора Тесла, достигается в весьма узкой полосе вблизи резонансной частоты (относительное отклонение $\sim \frac{1}{2Q_2} \rightarrow 0$).

При незначительном отклонении рабочей частоты от резонансного значения (не более чем на $\sim \pm 10\%$) величина интегрального коэффициента преобразования напряжения существенно падает (более чем на порядок), и при низких частотах возбуждающего напряжения (в первом приближении – на порядок ниже резонансной частоты вторичного контура) трансформатор Тесла работает как обычный повышающий преобразователь напряжения с коэффициентом трансформации, величина которого устанавливается известным явлением электромагнитной индукции.

Список использованных источников:

1. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers / M. Denicolai // Review of Scientific Instruments. – 2002. – Vol. 73 (9). – Pp. 3332-3336.
2. Voitkans J. Tesla Coil Theoretical Model and its Experimental Verification / J. Voitkans, A. Voitkans // Electrical, Control and Communication Engineering. – 2014. – № 7. – Pp. 11-19.
3. Ацюковский В.А. Трансформатор Тесла: энергия из эфира / В.А. Ацюковский. – Жуковский : ООО «Петит», 2004. – 24 с.
4. On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers / E. Agheb, A. Hayati Soloot, K. Niayesh, E. Hashemi, J. Jadidian // Acta Physica Polonica. – 2009. – Vol. 115 (6). – Pp. 1152-1154.
5. Tilbury M. The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide / M. Tilbury. – McGraw-Hill, 2008. – 442 p.
6. Тесла Н. Лекции и статьи / Н. Тесла. – М. : Tesla Print, 2003. – 386 с.
7. Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – М. : Оникс, 2006. – 1056 с.
8. Атабеков Г.И. Основы теории цепей / Г.И. Атабеков. – Л. : Энергия, 2006. – 220 с.
9. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.

References:

1. Denicolai M. Optimal performance for Tesla Transformers. *Review of Scientific Instruments*, 2002, vol. 73, no. 9, pp. 3332-3336.
2. Voitkans J., Voitkans A. Tesla Coil Theoretical Model and its Experimental Verification. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2014, no. 7, pp. 11-19.
3. Atsiukovskii V.A. *Transformator Tesla: energija iz efira* [Tesla coil: energy from air]. Zhukovskyy, Petyt Publ., 2004. 24 p. (Rus.)
4. Agheb E., Hayati Soloot A., Niayesh K., Hashemi E., Jadidian J. On the Optimum Design of Air-Cored Tesla Transformers. *Acta Physica Polonica*, 2009, vol. 115, no. 6, pp. 1152-1154.
5. Tilbury M. The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide. McGraw-Hill Publ., 2008. 442 p.

6. Tesla Nikola. *Leksii i stat'i* [Lectures and articles]. Moscow, Tesla Print Publ., 2003. 386 p. (Rus.)
7. Iavorskii B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. *Spravochnik po fizike dlia inzhenerov i studentov VUZov* [Physics handbook for engineers and students of universities]. Moscow, Oniks Publ., 2006. 1056 p. (Rus.)
8. Atabekov G.I. *Osnovy teorii tsepei* [Fundamentals of circuit theory]. Leningrad, Energiia Publ., 2006. 220 p. (Rus.)
9. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 832 p. (Rus.)

Рецензент: А.В. Гнатов
д-р техн. наук, проф., ХНАДУ

Статья поступила: 01.12.2017

УДК 621.316.722

doi: 10.31498/2225-6733.36.2018.142548

© Хорошко Р.А.¹ Теницький Б.А.² Бялобржеський О.В.³

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В КОЛІ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ, ЩО ЖИВИТЬ СИНХРОННИЙ ДВИГУН

В роботі шляхом моделювання проведено дослідження розподілу потужності електричної енергії системи електроживлення виробничого цеху. В якості енергоємного об'єкту з нелінійним навантаженням обрано привід синхронного двигуна, що керується тиристорним перетворювачем. В ході досліджень розглянуто вплив даної системи на потужність електричної енергії.

Ключові слова: компоненти потужності, синхронний двигун.

Хорошко Р.А., Теницький Б.А., Бялобржеский А.В. Исследование динамических характеристик мощности электрической энергии в цепи тиристорного регулятора напряжения, что питает синхронный двигатель. В работе путем моделирования проведено исследование распределения мощности электрической энергии системы электроснабжения производственного цеха. В качестве энергоёмкого объекта с нелинейной нагрузкой выбрано привод синхронного двигателя, управляемого тиристорным преобразователем. В ходе исследований рассмотрено влияние данной системы на мощность электрической энергии.

Ключевые слова: компоненты мощности, синхронный двигатель.

R.A. Khoroshko, B.A. Tenitsky, O.V. Bialobrzhesky. Dynamic characteristics research of electric output in the circuit with thyristor voltage regulator supplying the synchronous motor. Societal development is followed by increasing consumption of electrical energy. Sharp increase of energy consumption is conditioned by escalation of production and technological advancement. The number of industrial consumers is rising, most of which are non-linear, non-symmetrical and ever-changing. Primarily they are semiconductor converters of high power capacity. These are thyristor converters and thyristor regulators. Thyristor voltage regulators are widespread in different production spheres. Mostly they are used as soft start devices for synchronous and asynchronous machines.

¹ студент, КрНУ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, metacritic@ukr.net

² студент, КрНУ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук
³ канд. техн. наук, доцент, КрНУ «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, seemal@kdu.edu.ua