

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ**

УДК 621.3.011

**БЕСКОНТАКТНЫЙ ЗАРЯД ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРАНСФОРМАТОРА ТЕСЛА**

**А.А. Щерба**, чл.-корр. НАН Украины, **Н.А. Ломко**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: nlomko@ied.org.ua

*Исследованы процессы, обеспечивающие бесконтактный заряд емкости по одному проводу, частично расположенному в поле трансформатора Тесла (ТТ). Получены зависимости величины напряжения на емкости и времени ее заряда от взаимного расположения ТТ и провода, обеспечивающего заряд, а также его длины и сечения. Исследованы особенности одновременного заряда нескольких емкостей, зависимость времени их заряда от взаимного положения частично расположенных в поле ТТ зарядных проводников, а также исследованы условия заряда батареи конденсаторов от малоомощного источника энергии. Библиограф. 8, рис. 8, табл. 2.*

**Ключевые слова:** трансформатор Тесла, конденсатор, напряжение заряда, частичная емкость, ток смещения.

**Введение.** Решение задачи бесконтактной передачи энергии и ее накопления является актуальным, особенно в технологиях, не позволяющих передавать ее другими способами. В работах [3–5, 7] перечислены области возможных практических применений тесловских процессов и отмечена необходимость теоретических и экспериментальных исследований высокочастотных электромагнитных процессов зарядки емкостных накопителей энергии с учетом токов утечки в однопроводных электрических схемах. Способ однопроводного заряда емкостного накопителя энергии по электрической схеме, предложенный С.В. Авраменко и развитый в указанных работах, основан на применении трансформатора Тесла (ТТ) в качестве высоковольтного трансформатора. Детальные исследования электромагнитных процессов в таких устройствах предполагают анализ переходных процессов в длинных линиях с распределенными параметрами электроэнергии и учет потерь, которые возникают при ее перераспределении между линейными и нелинейными емкостными накопителями [6, 8].

В этой статье не ставилась задача исследования механизмов прямого и емкостного влияния внешнего электромагнитного поля на жизнедеятельность человека и надежность электронных устройств различного назначения [1, 2], а также анализа физических причин появления электрического заряда на обкладках конденсатора в "разомкнутой" сети, поскольку они подробно излагались в работах [4, 5]. Не учитывались также потери электроэнергии при применении указанных трансформаторов в цепях заряда емкостных накопителей. Основное внимание обращалось на условия, влияющие на скорость передачи электроэнергии от ТТ к емкостному накопителю, и получение необходимой величины напряжения заряда собственным накопительного конденсатора.

**Описание экспериментальной установки.** Для проведения исследований была создана экспериментальная установка, соответствующая схеме, представленной на рис. 1, где обозначено: ИП – регулируемый источник питания с выходным напряжением 5...30 В, 50 Вт; ГИВЧ – генератор импульсов высокой частоты, собранный по схеме Бровина (600 кГц ... 1,0 МГц); ТТ – трансформатор Тесла; 1 – штырь, подсоединенный к свободному концу вторичной обмотки ТТ; 2 – зарядный проводник, подсоединенный к общей точке двух высоковольтных диодов  $V_1$  и  $V_2$ , включенных согласно и последовательно с заряжаемым конденсатором (или батареей конденсаторов)  $C$ , который шунтируется разрядником. Через этот разрядник осу-

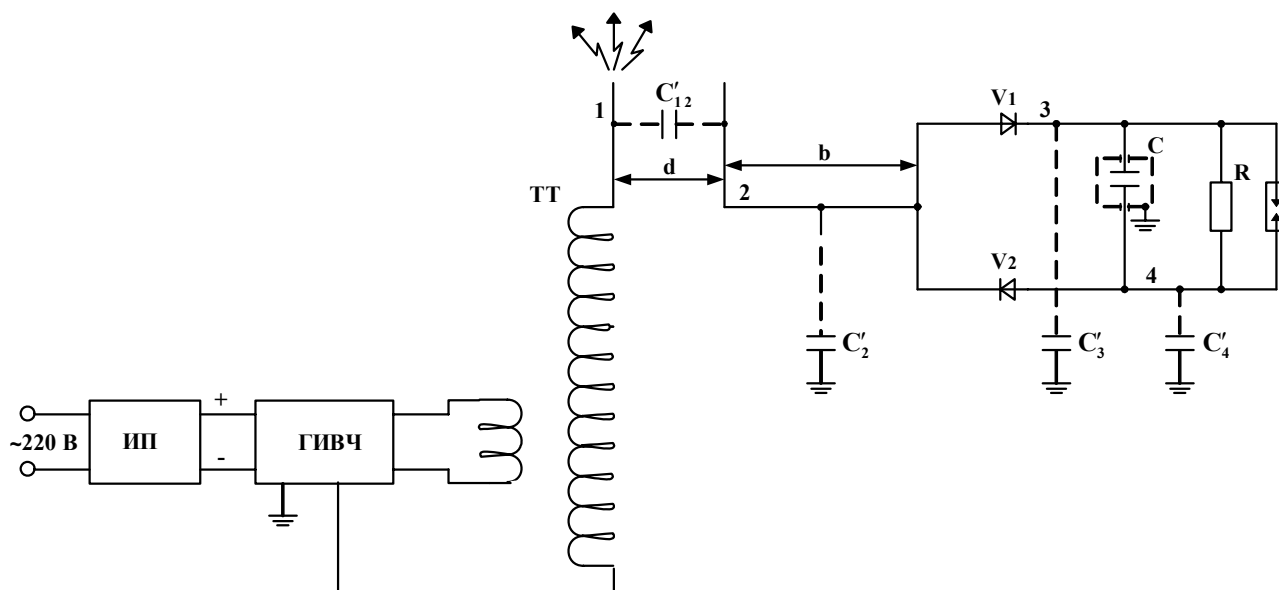


Рис. 1

ществляется разряд конденсатора в случае превышения на нем допустимого напряжения. Параллельно конденсатору  $C$  подключен резистор  $R$ , который может быть как сопротивлением утечки конденсатора, так и сопротивлением подключаемого прибора (вольтметра) либо нагрузки. Штриховыми линиями показано подключение частичных емкостей и емкостей утечки на землю. Несмотря на малую величину этих емкостей, их проводимости в достаточной степени проявляются на высоких частотах, так как они образуют цепь заряда конденсатора  $C$ . Авторами исследовано влияние этих емкостей на время заряда конденсатора (или батареи конденсаторов)  $C$ .

**Анализ полученных результатов.** На рис. 2 представлены осциллограммы напряжения на клеммах первичной обмотки ТТ и протекающего в ней тока для случая, когда отсутствует разряд на свободном конце вторичной обмотки ТТ. Форма напряжения и тока близка к синусоиде с частотой немногим более 1 МГц.

При появлении разряда на свободном конце вторичной обмотки ТТ сказывается влияние вторичной обмотки на первичную и форма напряжения на ней искажается, о чем свидетельствует осциллограмма, представленная на рис. 3.

Для проведения эксперимента выбран режим работы ТТ при устойчивом стримере, протекающем с острого конца штыря 1 высоковольтной катушки ТТ в воздух. В этом режиме выходное напряжение источника +18 В, потребляемый ток 1,0 А.

В отличие от исследований [3–5] здесь рассматривается вариант бесконтактного заряда емкости с помощью зарядного проводника 2 определенной длины ( $b$ ), один конец которого в виде штыря располагается на некотором удалении ( $d$ ) от штыря 1 высоковольтной обмотки ТТ, а второй – подсое-

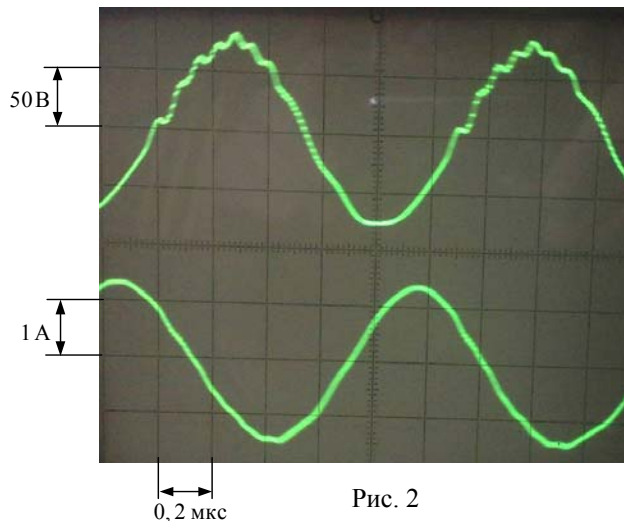


Рис. 2

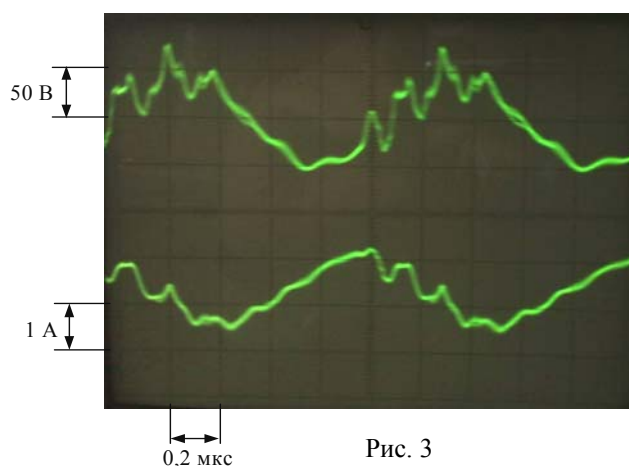


Рис. 3

диняється к общей точке двух высоковольтных диодов  $V1$  и  $V2$ .

На рис. 1 емкость между проводниками 1 и 2 представлена в виде частичной емкости  $C'_{12}$ . Распределенная емкость утечки с зарядного проводника 2 на землю представлена в виде сосредоточенной емкости  $C'_2$ . Емкости утечки на землю с клемм 3 и 4 соединения высоковольтных диодов  $V1$  и  $V2$  с заряжаемым конденсатором  $C$  на рис. 1 представлены соответственно емкостями  $C'_3$  и  $C'_4$ . Они зависят от расположения заряжаемого конденсатора относительно земли и заземленных предметов.

Далее рассмотрим влияние емкостей  $C'_{12}, C'_2, C'_3$  и  $C'_4$  на процесс заряда конденсатора  $C$ .

А). Влияние частичной емкости  $C'_{12}$ . Частичная емкость  $C'_{12}$  в эксперименте рассматривается как емкость между двумя параллельно расположенными проводниками (штырь 1,

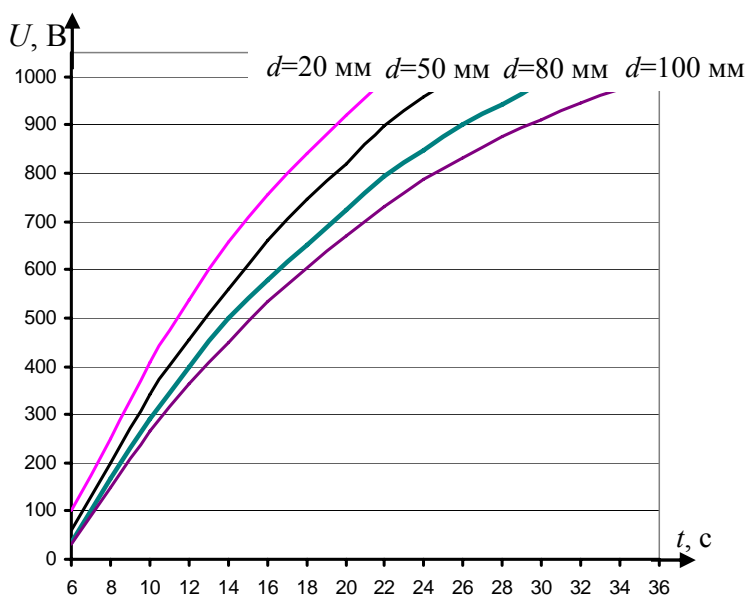


Рис. 4

присоединенный к свободному концу вторичной обмотки ТТ, и конец зарядного проводника 2 в виде штыря, расположенный параллельно штырю 1 на расстоянии  $d$ ). На рис. 4 представлены полученные экспериментально зависимости величины напряжения заряда емкости  $C=80$  мкФ от времени заряда в зависимости от расстояния  $d$  между штырем 1 и параллельно расположенным концом проводника 2. В этом эксперименте используется зарядный проводник 2 длиной  $b=100$  см.

Величина частичной емкости  $C'_{12}$  зависит не только от расстояния между проводником 1 и расположенным параллельно ему концом

проводника 2, а и от наличия между ними каких-либо предметов. Если в пространстве между проводниками  $d=100$  мм расположить лист текстолита толщиной 20 мм, то емкость уменьшится  $C'_{12}$ , а время заряда конденсатора  $C$  до напряжения 1000 В увеличится на 25 %, если же расположить лист двустороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 3 мм, то время заряда увеличится в четыре раза. Зависимость величины напряжения заряда емкости  $C$  от времени заряда в зависимости от предметов, располагаемых между штырями вторичной обмотки ТТ и конца зарядного проводника 2 при  $b=200$  см и при заземленном металлическом корпусе конденсатора  $C$  (значение заземления рассмотрим далее) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Бесконтактный заряд емкости $C=80$ мкФ. Параметры зарядного проводника $b=200$ см; $S=0,35$ мм <sup>2</sup>										
$U, V$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$d=100$ мм; $t, c$	2,52	3,26	4,38	5,61	7,14	8,91	11,15	14,00	17,70	23,76
+ текстолит $d_1=20$ мм; $t, c$	2,52	3,46	4,71	6,31	8,05	10,19	12,90	16,45	21,22	29,75
+ двусторонний фольг. текстолит $d_1=3$ мм; $t, c$	2,60	3,77	5,32	7,24	9,67	12,79	17,08	24,28	41,62	98,9

Конфигурация терминала, подключаемого к свободному концу вторичной обмотки ТТ, может иметь различную форму (штырь, плоская пластина, диск, шар, тор и т.д.), что естественным образом будет влиять на величину частичной емкости  $C'_{12}$ , как, впрочем, влияет

и конфигурация конца зарядного проводника 2, расположенного вблизи ТТ, либо конфигурация предмета, подключенного к концу зарядного проводника 2.

Б). *Влияние емкости утечки на землю  $C'_2$* . Распределенная емкость утечки с зарядного проводника 2 на землю, зависящая от длины проводника, его сечения и расположения относительно земли и заземленных предметов, представлена в виде сосредоточенной емкости  $C'_2$ . На рис. 5 представлены зависимости величины напряжения заряда конденсатора  $C$  от времени заряда при  $d=100$  мм в зависимости от длины зарядного проводника 2, с помощью которого производится однопроводный заряд конденсатора  $C$ . Чем больше длина зарядного проводника 2, тем больше емкость утечки  $C'_2$ , тем медленней происходит заряд конденсатора  $C$ .

Величина емкости  $C'_2$  существенно зависит от расположения зарядного проводника 2 относительно заземленных предметов. Так, наличие заземленного провода, проложенного на расстоянии 1 м, от зарядного проводника 2 увеличивает емкость  $C'_2$  и замедляет заряд конденсатора  $C$ . Если же в качестве зарядного проводника 2 взять коаксиальный провод с заземленным экраном, то  $C'_2$  возрастет настолько, что зашунтирует конденсатор  $C$ .

Изменение сечения зарядного проводника 2 также влияет на величину емкости  $C'_2$ . На рис. 6 представлены зависимости величины напряжения заряда конденсатора  $C$  от времени заряда при  $d=50$  мм (кривые 1 и 2) и  $d=100$  мм (кривые 3 и 4) в зависимости от двух размеров сечения ( $S_1=0,35$  мм<sup>2</sup> и  $S_2=6,36 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>2</sup>) зарядного проводника 2 длиной  $b=200$  см. Несмотря на уменьшение сечения проводника в 55 раз, а следовательно, увеличения его активного сопротивления, время заряда конденсатора  $C$  существенно снижается, так как в связи с уменьшением сечения проводника 2, уменьшается величина емкости  $C'_2$ , а следовательно, снижается утечка на землю.

Учет приведенных выше факторов позволяет уменьшить емкость утечки  $C'_2$ , а следовательно, сократить время заряда конденсатора  $C$ .

В). *Влияние емкостей утечки на землю  $C'_3$  и  $C'_4$* . Емкости утечки на землю с клемм 3 и 4 соединения высоковольтных диодов  $V1$  и  $V2$  с заряжаемым конденсатором  $C$  представлены в виде емкостей  $C'_3$  и  $C'_4$ . Схема заряда конденсатора  $C$  представляет собой известную схему Латура. Ток, протекающий по проводнику 2, на каждом из полупериодов разделяется на две части, одна из которых является током заряда конденсатора  $C$  и протекает через одну из

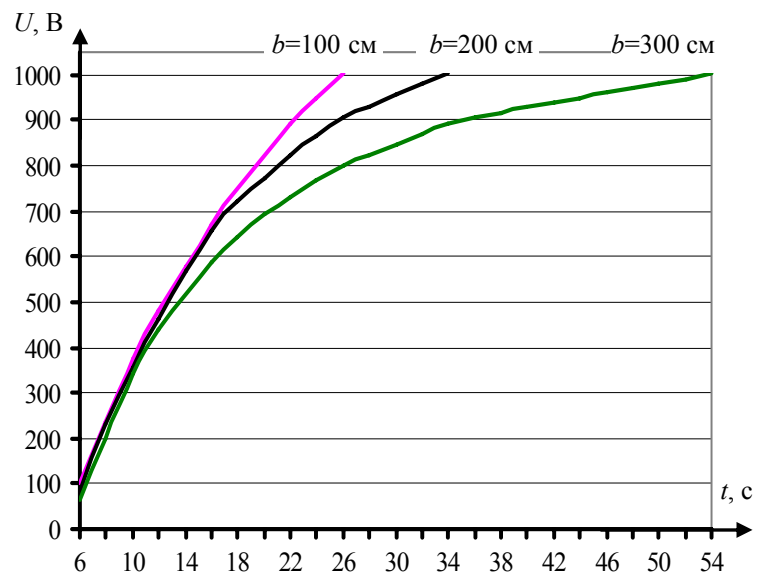


Рис. 5

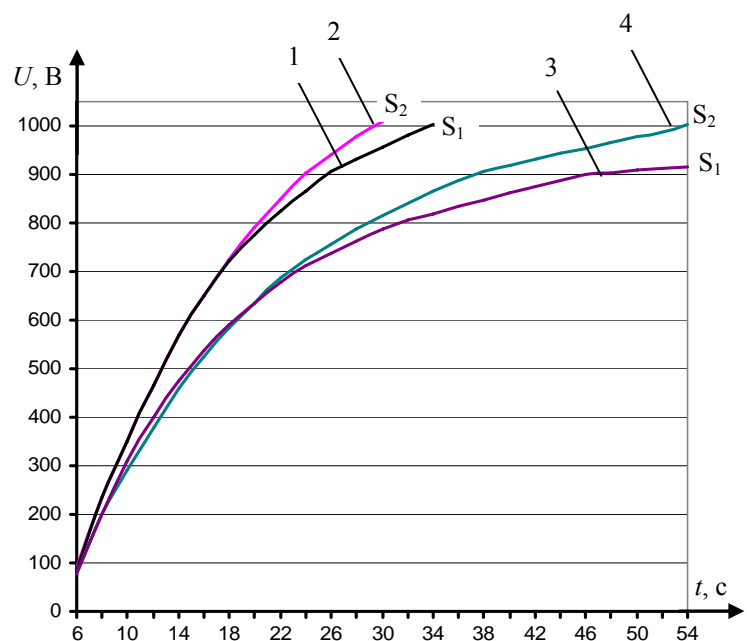


Рис. 6

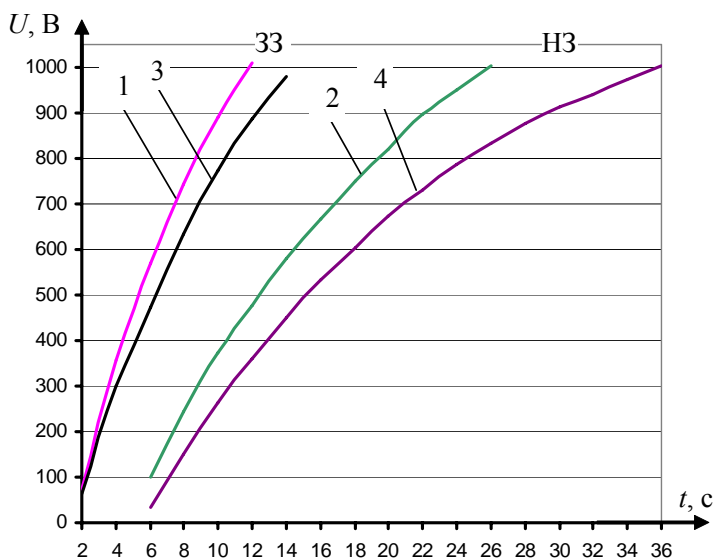


Рис. 7

На рис. 7 представлены зависимости величины напряжения заряда конденсатора  $C$  от времени заряда при  $d=50$  мм (кривые 1 и 2) и  $d=100$  мм (кривые 3 и 4) и длине зарядного проводника 2, равной  $b=100$  см, при заземленном (33) и незаземленном (НЗ) металлическом корпусе конденсатора. Из рисунка следует, что заземление металлического корпуса конденсатора  $C$  существенно сокращает время его заряда.

Следует отметить, что время заряда конденсаторов, которые не имеют металлических корпусов, можно существенно сократить, расположив их на заземленной металлической пластине, покрытой тонким слоем диэлектрика.

*Влияние взаимного расположения зарядных проводников двух независимо заряжаемых емкостей на процесс их заряда.* Для эксперимента взяты две емкости по 100 мкФ. Каждая из емкостей имеет свою цепь заряда в виде зарядного проводника 2 длиной  $b=200$  см, один конец которого подключается к общей точке двух высоковольтных диодов  $V1$  и  $V2$ , а второй – в виде штыря располагается параллельно штырю 1 на расстоянии  $d=50$  мм. На рис. 8 представлены зависимости величины напряжения заряда конденсаторов от времени заряда: кривая 1 – заряд одного конденсатора емкостью 100 мкФ; кривая 2 – одновременный заряд двух конденсаторов емкостью по 100 мкФ, зарядные проводники 2 которых расположены параллельно; кривая 3 – одновременный заряд двух конденсаторов емкостью по 100 мкФ, зарядные проводники 2 которых расположены под углом  $90^\circ$ ; кривая 4 – одновременный заряд двух конденсаторов емкостью по 100 мкФ, зарядные проводники 2 которых расположены под углом  $180^\circ$ . Из рисунка следует,

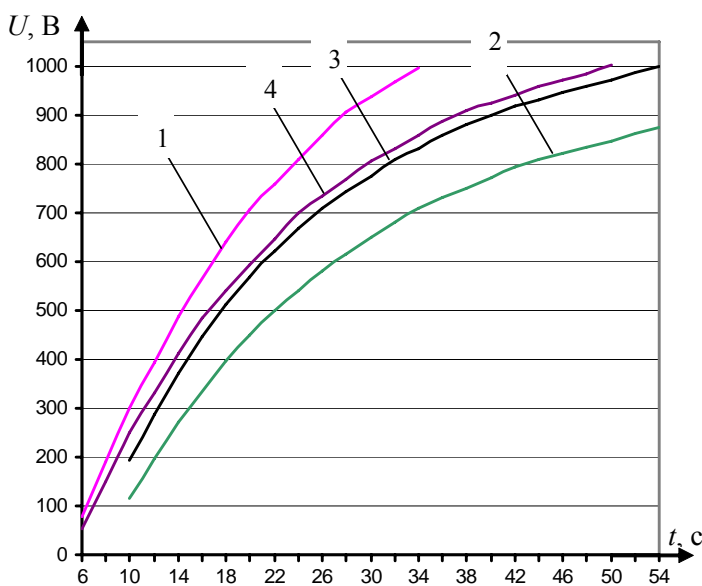


Рис. 8

токоограничивающих емкостей (например  $C'_3$ ), а другая – перезаряжает вторую токоограничивающую емкость  $C'_4$ , подготавливая ее к следующему полупериоду зарядки. Емкости  $C'_3$  и  $C'_4$  меняются ролями после каждого полупериода зарядного тока. Для улучшения процесса заряда емкости  $C$  желательно увеличить токоограничивающие емкости  $C'_3$  и  $C'_4$ , что позволит увеличить ток заряда, а следовательно, уменьшить время заряда. Одним из способов, позволяющих это сделать, является заземление металлического корпуса конденсатора  $C$ .

что при одновременном заряде нескольких конденсаторов от одного ТТ, следует дополнительно учитывать частичные емкости между проводниками, с помощью которых осуществляется заряд конденсаторов. Приведенные зависимости показывают, что одновременный заряд двух конденсаторов от одного ТТ наиболее эффективен при расположении их зарядных проводников под углом  $180^\circ$  относительно ТТ, а наименее эффективен при параллельном их расположении.

Описанные эксперименты были проведены с высоковольтными конденсаторами типа К75-406, учитывая их

относительно большую единичную емкость. Например, батарея таких конденсаторов общей емкостью 600 мкФ заряжается до напряжения 1000 В по приведенной на рис. 1 схеме от маломощного источника (18 В, 1 А) менее чем за 80 с. Однако необходимо учитывать, что на высоких частотах такие конденсаторы имеют большие потери. Следует отметить, что более эффективно использовать полипропиленовые фольговые пленочные металлизированные конденсаторы типа К78-2. В табл. 2 приведены сравнительные характеристики величины напряжения заряда от времени заряда для двух типов конденсаторов при различном расстоянии ( $d$ ) между штырями вторичной обмотки ТТ и конца проводника 2. Ввиду малой единичной емкости конденсаторов типа К78-2 они представлены в виде батареи общей емкостью 20 мкФ. Снять характеристики при меньшем  $d$  проблематично, так как время заряда емкости до напряжения 1000 В при  $d=50$  мм для конденсатора К75-40б составляет 5 с, а для К78-2 – 3,8 с. Если расположить К78-2 на заземленной металлической пластине, покрытой тонким слоем диэлектрика, то время заряда сократится до 3 с.

Таблица 2

Бесконтактный заряд емкости $C=20$ мкФ. Параметры зарядного проводника $b=100$ см; $S=0,35$ мм <sup>2</sup>										
$U$ , Вольт	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
К78-2, $d=150$ мм; $t, c$	2,75	3,4	3,84	4,45	5,08	5,91	6,93	8,01	9,55	12,25
К75-40б, $d=150$ мм; $t, c$	3,27	3,82	4,51	5,23	6,14	7,27	8,43	10,38	12,81	17,84
К78-2, $d=200$ мм; $t, c$	2,8	3,43	4,09	4,86	5,78	6,91	8,44	10,59	13,85	22,55
К75-40б, $d=200$ мм; $t, c$	3,38	4,05	4,83	5,74	7,05	8,65	10,76	14,35	21,72	112,0

**Выводы:** 1. Исследованы процесс заряда емкостного накопителя бесконтактным способом с помощью трансформатора Тесла, а также основные факторы, влияющие на этот процесс. Приведены экспериментальные данные, анализ которых позволяет оптимизировать энергетические процессы заряда.

2. Показано, что с помощью маломощного источника питания (например, аккумуляторной или солнечной батареи), ГИВЧ (на одном транзисторе) и трансформатора Тесла, а также частичных емкостей и емкостей утечки на землю, можно производить заряд конденсатора зарядным током, который в виде тока смещения протекает в пространстве, окружающем цепь заряда.

3. По рассмотренной технологии могут быть заряжены конденсаторы (батареи емкостей) в сотни микрофард до напряжений в десятки киловольт. Накопленная энергия может быть преобразована и использована в различных электротехнологиях, в частности в труднодоступных районах, где нет линий электропередачи.

1. *Ермуратский П.В.* Крах нового "сверхпроводника" или конденсаторы вокруг нас // Наука и жизнь. – 1992. – № 5–6. – С. 88–91.
2. *Кравченко В.И.* Электромагнитный терроризм. – Харьков: НТМТ, 2011. – 392 с.
3. *Пентегов И.В.* К теории тесловских процессов зарядки емкостных накопителей энергии // Электричество. – 1996. – № 6. – С. 42–47.
4. *Пентегов И.В., Волков И.В., Пристуна А.Л.* Никола Тесла и системы однопроводной и беспроводной передачи энергии // Техн. электродинамика. – 2006. – № 4. – С. 72–80.
5. *Пентегов И.В., Волков И.В., Пристуна А.Л.* Применение тесловских процессов для бесконтактного заряда аккумуляторов бытовых электрических устройств // Техн. электродинамика. – 2006. – Ч. 2. – С. 16–21.
6. *Супруновская Н.И., Щерба А.А.* Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами // Техн. электродинамика. – 2015. – № 4. – С. 3–11.
7. *Kim J., Kong S., Kim H., Suh I.-S., Suh N.P., Cho D.-H., Kim J., Ahn S.* Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System // Proc. IEEE. – 2013. – Vol. 101. No 6. – P. 1332–1342.
8. *Suprunovska N.I., Shcherba A.A.* Methods for Optimization of Energy Exchange Modes between Linear and Nonlinear Capacitors // Proc. 16<sup>th</sup> International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE'2015), September 2-5, 2015, Lviv, Ukraine. – P. 4–6.

УДК 621.3.011

**А. А. Щерба**, чл.-кор. НАН України, **М.О. Ломко**, канд. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Безконтактний заряд ємнісного накопичувача з використанням трансформатора Тесла**

Досліджено процеси, що забезпечують безконтактний заряд ємності по одному проволу, частково розташованому в полі трансформатора Тесла (ТТ). Отримано залежності величини напруги на ємності та часу її заряду від взаємного розташування ТТ і проволу, що забезпечує заряд, а також його довжини і перерізу. Досліджено особливості одночасного заряду кількох ємностей, залежність часу їх заряду від взаємного положення частково розташованих в полі ТТ зарядних проводів, а також досліджено умови заряду батареї конденсаторів від малопотужного джерела енергії. Бібл. 8, рис. 8, табл. 2.

**Ключові слова:** трансформатор Тесла, конденсатор, напруга заряду, часткова ємність, струм зміщення.

**A.A. Shcherba, M.O. Lomko**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Non-contact charge of storage capacitor using a Tesla's transformer**

The processes that provide a non-contact charge of capacitor over a single wire, partially located in the Tesla's transformer (TT) field are studied. The dependences of the voltage of capacitor and its charging time on the mutual arrangement of the TT and wire, providing the charge, as well as length and cross section of the wire are found. Features of a simultaneous charging of several capacitors, dependence of their charging time on mutual position of charge conductors that partially located in the TT field are investigated, and also conditions of a charge of the capacitor bank from a low-power energy source are studied. References 8, figures 8, tables 2.

**Key words:** Tesla's transformer, capacitor, charge voltage, partial capacitance, displacement current.

Надійшла 22.06.2016

Received 22.06.2016

УДК 621.365.51

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В КАБЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**В.М. Золотарев<sup>1</sup>**, докт. техн. наук, **Р.В. Беянин<sup>2</sup>**, **А.Д. Подольцев<sup>3</sup>**, докт. техн. наук

1, 2 – ПАТ "Завод "Южкабель",

ул. Автогенная, 7, Харьков, 61099, Украина

3 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

e-mail: podol@ied.org.ua

Предложена методика расчета электромагнитных процессов и энергетических характеристик индукционной канальной печи для получения медной катанки в режиме медленного нагревания исходного шаблона от комнатной температуры до температуры плавления. В ее основу положена эквивалентная электрическая цепь печи с медленно изменяющимся сопротивлением нагрузки, обусловленным повышением температуры шаблона. Из результатов проведенных расчетов реактивной мощности, потребляемой печью при различной температуре шаблона, следует, что значение этой мощности в конце процесса нагрева уменьшается приблизительно на 10 % от начального, поэтому значение компенсирующей емкости в конце процесса следует уменьшать на эту же величину. Библ. 7, рис. 6.

**Ключевые слова:** индукционная канальная печь, электромагнитные процессы, реактивная мощность, конденсаторная батарея.

В настоящее время потребителями продукции металлургических предприятий предъявляются высокие требования к качеству выплавляемой медной катанки (однородность, химическая чистота, стоимость и др.). Самым жестким требованиям, как правило, удовлетворяет медная катанка, изготовленная в индукционных канальных печах. В силу этого обстоятельства именно индукционные установки такого типа используются в кабельной промышленности при изготовлении медной катанки для производства жил силовых кабелей.

Общий вид исследуемой индукционной канальной печи мощностью 500 кВт показан на рис. 1. Принцип ее действия подобен принципу действия однофазного силового трансформатора, работающего в режиме короткого замыкания [1, 2, 4, 7]. Однако электрические