

М.И. Баранов

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ И ВЛИЯНИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

Приведений короткий огляд результатів відомих теоретичних досліджень електрофізичного явища лінійного нестационарного поверхневого ефекту (НПЕ) в немагнітних однорідних масивних плоских і циліндричних металевих провідниках з імпульсним аксіальним (азимутним) струмом, що формується в розрядному колі високовольтної електрофізичної установки (ЕФУ). У загальному і систематизованому вигляді представлені основні особливості прояву лінійного НПЕ у вказаних провідниках і впливу даного скін-ефекту на електромагнітні процеси, що протікають в провідниках і розрядному колі ЕФУ з імпульсним струмом, що змінюється в часі за законом затухаючої синусоїди. Описаний вплив лінійного НПЕ на тривалість перехідного процесу в розрядному колі ЕФУ, глибину проникнення електромагнітного поля в матеріал провідників, власні електричні параметри провідників і їх добротність в розрядному колі ЕФУ. Бібл. 28, рис. 2.

Ключові слова: металеві провідники, імпульсний струм, лінійний нестационарний поверхневий ефект, особливості прояву лінійного скін-ефекту в провідниках і його впливу на електромагнітні процеси.

Приведен краткий обзор результатов известных теоретических исследований электрофизического явления линейного нестационарного поверхностного эффекта (НПЭ) в немагнитных однородных массивных плоских и цилиндрических металлических проводниках с импульсным аксиальным (азимутальным) током, формируемым в разрядной цепи высоковольтной электрофизической установки (ЭФУ). В обобщенном и систематизированном виде представлены основные особенности проявления линейного НПЭ в указанных проводниках и влияния рассматриваемого скин-эффекта на электромагнитные процессы, протекающие в проводниках и разрядной цепи ЭФУ с импульсным током, изменяющимся во времени по закону затухающей синусоиды. Описано влияние линейного НПЭ на длительность переходного процесса в разрядной цепи ЭФУ, глубину проникновения электромагнитного поля в материал проводников, собственные электрические параметры проводников и их добротность в разрядной цепи ЭФУ. Библ. 28, рис. 2.

Ключевые слова: металлические проводники, импульсный ток, линейный нестационарный поверхностный эффект, особенности проявления линейного скин-эффекта в проводниках и его влияния на электромагнитные процессы.

Введение. В высоковольтной силовоточной импульсной технике достаточно широкое применение нашли электрофизические установки (ЭФУ), предназначенные для достижения на практике с их помощью различных научных и электротехнологических целей [1-6]. При этом в силовых электрических цепях таких ЭФУ обычно используются металлические не- и изолированные токопроводы, токонесущие части которых содержат немагнитные проводники из материалов с высокой удельной электропроводностью γ_C (например, меди и алюминия) и по которым протекают импульсные токи $i_p(t)$ с различными амплитудно-временными параметрами (АВП). Источником генерирования в цепях ЭФУ импульсных аксиальных (продольных) и азимутальных (круговых) токов $i_p(t)$, как правило, являются мощные емкостные (ЕНЭ) или индуктивные (ИНЭ) накопители энергии [1-3]. Учитывая физическую природу формирования и протекания импульсного тока $i_p(t)$ в проводящих средах, в указанных материалах проводников разрядных цепей ЭФУ с ЕНЭ (ИНЭ) проявляется нестационарный поверхностный эффект (НПЭ), изучению которого было уделено достаточно много внимания [2, 7-19]. Тем не менее, на сегодня в научном мире практически отсутствуют публикации, посвященные обобщению и систематизации полученных отечественными и зарубежными учеными-электротехниками за многолетний период результатов теоретических исследований явления НПЭ в металлических проводниках с импульсным током $i_p(t)$ различных АВП. Поэтому подготовка на первом этапе даже краткого обзора основных пуб-

ликаций по НПЭ в проводниках представляет научно-практический интерес. Укажем и то, что имеющиеся иностранные публикации (например, [20-22]), посвящены главным образом исследованию стационарного скин-эффекта в металлических проводниках. В этой связи выполнение краткого обзора известных работ по проблематике явления НПЭ в проводниках цепей ЭФУ с импульсным током $i_p(t)$, содержащего основные результаты его проявления и влияния на протекающие в них и разрядных цепях ЭФУ электромагнитные процессы, является актуальной задачей.

Целью статьи является выполнение краткого научного обзора основных результатов известных теоретических исследований электрофизического явления линейного НПЭ в немагнитных однородных массивных проводниках плоской и цилиндрической конфигураций, по которым в разрядных электрических цепях высоковольтных силовоточных ЭФУ протекают импульсные токи $i_p(t)$ с заданными АВП.

1. Постановка задачи. Рассмотрим широко используемые в высоковольтных ЭФУ не- и изолированные сплошные немагнитные однородные проводники, имеющие плоскую (рис. 1) или цилиндрическую конфигурацию (рис. 2) [2,13]. Принимаем, что для рассматриваемых проводников толщиной h или b (см. рис. 1 и 2) выполняются неравенства вида $h/\Delta_C \gg 1$ и $b/\Delta_C \gg 1$, где $\Delta_C = [2/(\omega_p \mu_0 \gamma_C)]^{1/2}$ – глубина проникновения в стационарном (установившемся) режиме внешнего электромагнитного поля с круговой частотой изменения ω_p во времени t в материал про-

© М.И. Баранов

водника с удельной электропроводностью γ_c , а $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная [2]. В этой связи в указанных проводниках разрядной цепи ЭФУ будет иметь место резкое проявление поверхностного эффекта (скин-эффекта) и проводники могут считаться массивными [2, 9, 13]. Случаи, когда $h/\Delta_c \leq 1$ и $b/\Delta_c \leq 1$, являются нетипичными для токопроводов, используемых в силовых разрядных цепях ЭФУ, и поэтому они не представляют особого интереса.

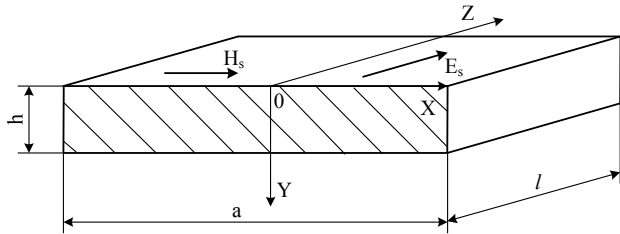


Рис. 1. Плоский массивный неизолированный металлический проводник с импульсным аксиальным электрическим током проводимости $i_p(t)$, протекающим вдоль его продольной оси OZ (E_s, H_s – соответственно напряженности импульсного электрического и магнитного полей на наружной плоской поверхности проводника) [13]

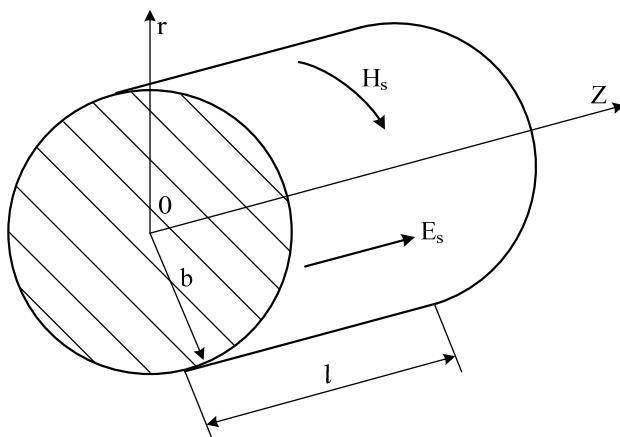


Рис. 2. Цилиндрический массивный неизолированный металлический проводник с импульсным аксиальным электрическим током проводимости $i_p(t)$, протекающим вдоль его продольной оси OZ (E_s, H_s – соответственно напряженности импульсного электрического и магнитного полей на наружной цилиндрической поверхности проводника) [13]

Считаем, что удельная электропроводность γ_c материала проводников является практически неизменной во времени t величиной, а линейные габаритные размеры проводников (их длина l и ширина a) значительно превышают их толщину h или радиус b . Токами смещения в уравнениях Максвелла для исследуемых проводников пренебрегаем [2, 12]. Пусть в рассматриваемых проводниках вдоль их продольных осей OZ протекают лишь импульсные токи проводимости $i_p(t)$ с произвольными АВП. Требуется на основании опубликованных результатов исследований линейного НПЭ в рассматриваемых немагнитных однородных массивных металлических проводниках разрядной цепи ЭФУ с импульсным током $i_p(t)$ заданных АВП сформулировать в обобщенном и систематизированном виде основные особенности проявления указанного скин-эффекта и его влияния на электромагнитные процессы, протекаю-

щие в материале проводников и разрядной электрической цепи ЭФУ.

2. Основные особенности проявления линейного НПЭ в массивных проводниках с импульсным током. Ограничимся рассмотрением типичного для мощных высоковольтных ЭФУ случая, когда импульсный ток $i_p(t)$ в исследуемых проводниках изменяется во времени t по закону затухающей синусоиды и описывается известным соотношением вида [9, 13]:

$$i_p(t) = k_p I_{mp1} \exp(-\delta_p t) \sin(\omega_p t), \quad (1)$$

где I_{mp1} , δ_p , ω_p – соответственно первая амплитуда, коэффициент затухания и круговая частота колебаний импульсного тока в разрядной электрической цепи ЭФУ; $k_p = [\exp(-\delta_p/\omega_p \cdot \text{arccotg} \delta_p/\omega_p) \cdot \sin(\text{arccotg} \delta_p/\omega_p)]^{-1}$ – нормирующий коэффициент ($k_p \geq 1$).

Временная зависимость (1) для тока $i_p(t)$ позволяет установить основные и характерные особенности пространственно-временных распределений напряженностей импульсного электромагнитного поля в материалах исследуемых массивных проводников и их влияния на электрические параметры проводников, а также на протекание переходных электромагнитных процессов в разрядных цепях высоковольтных ЭФУ.

2.1. Особенности распределения напряженности импульсного электрического поля в материале проводников. Приведенные в [14, 15] данные аналитических решений линейных диффузионных задач по проникновению в цилиндрический трубчатый металлический проводник, часто используемый в разрядной цепи ЭФУ с импульсным током $i_p(t)$ временного вида (1), напряженностей импульсных аксиального E_z и азимутального E_θ электрических полей позволяют сформулировать следующие основные особенности проявления линейного НПЭ в указанном проводнике:

- первая амплитуда напряженности E_z импульсно-аксиального электрического поля во внешних слоях массивной стенки проводника значительно меньше соответствующей напряженности, характерной для установившегося (стационарного) электромагнитного процесса в материале проводника. Для наружной поверхности массивного проводника это расхождение между не- и стационарным режимами проникновения этого поля составляет примерно 33 %;
- амплитуда первой полуволны напряженности E_θ импульсного азимутального электрического поля на наружной поверхности стенки массивного проводника примерно на 31 % меньше, чем в стационарном режиме проникновения в нее подобного поля;
- напряженности E_z и E_θ импульсного электрического поля на наружной поверхности стенки массивного проводника характеризуются повышенной скоростью нарастания на фронтальных частях своих первых полуволн, длительность которых оказывается существенно меньше (от 30 до 35 %) длительностей последующих полуволн изменения этого поля;
- напряженности E_z и E_θ импульсного электрического поля быстрее устанавливаются во внутренних слоях стенки немагнитного массивного проводника с импульсным аксиальным или азимутальным током;
- полное затухание в материале массивного проводника указанных напряженностей E_z и E_θ импульс-

ного электрического поля происходит практически на глубине его стенки, примерно равной $5\Delta_C$.

2.2. Особенности распределения напряженности импульсного магнитного поля в материале проводников. Результаты исследования линейного НПЭ в указанном массивном цилиндрическом проводнике, изложенные в [14, 15], указывают на то, что:

- первая амплитуда напряженности H_θ импульсного азимутального магнитного поля по всей толщине стенки массивного проводника в нестационарном режиме проникновения значительно больше, чем в стационарном. Данное расхождение в значениях напряженности H_θ для внутренних слоев стенки рассматриваемого проводника достигает до 35 %;

- первые полуволны напряженностей H_θ и H_z импульсного магнитного поля по мере проникновения во внутренние слои стенки немагнитного массивного проводника подвергается значительному затуханию по амплитуде и изменению по своей форме. Происходит сглаживание их фронтальных частей и смещение их амплитудных значений в сторону больших времен;

- первая амплитуда напряженности H_z импульсного аксиального поля во внутренних слоях стенки проводника примерно на 32 % превышает ее соответствующие значения, определяемые из условия установившегося (стационарного) электромагнитного режима его проникновения в материал проводника;

- напряженности H_θ и H_z импульсного магнитного поля быстрее устанавливаются во внешних слоях стенки массивного проводника с импульсным током;

- полное затухание в немагнитном материале массивного проводника указанных напряженностей H_θ и H_z импульсного магнитного поля практически происходит на глубине его стенки, равной около $5\Delta_C$.

3. Основные особенности влияния линейного НПЭ в массивных проводниках с импульсным током на электромагнитные процессы в них и разрядной электрической цепи ЭФУ. Исходя из представленных в [2, 8-10, 12-19] результатов исследований линейного НПЭ в плоских и цилиндрических проводниках с импульсным током $i_p(t)$, изменяющимся во времени t по (1), можно заключить, что его (скин-эффекта) основные влияния сводятся к следующему.

3.1. Влияние на длительность переходного процесса в разрядной электрической цепи ЭФУ. Анализ полученных данных для линейного НПЭ в массивных проводниках с импульсным аксиальным (азимутальным) током $i_p(t)$ вида (1) свидетельствует о том, что переходный процесс установления напряженностей импульсного электромагнитного поля в их немагнитном однородном (изотропном) материале продолжается практически полтора периода T_p (не более $3\pi/\omega_p$) изменения внешнего поля, формируемого рассматриваемым разрядным током ЭФУ вблизи их наружных поверхностей. На это обстоятельство однозначно указывают как результаты исследований в [9, 16] импульсного проникновения плоских электромагнитных волн в плоскую немагнитную массивную стенку трубчатого проводника неограниченных радиальных размеров, так и теоретические данные из [14, 15] по изу-

чению линейного НПЭ в немагнитном цилиндрическом трубчатом проводнике произвольной толщины стенки с импульсным аксиальным или азимутальным током $i_p(t)$ временной формы вида (1). Поэтому длительность переходного электромагнитного процесса в разрядной цепи высоковольтной ЭФУ с массивными металлическими проводниками (шинами), обусловленного нестационарной диффузией в их стенки напряженностей внешнего импульсного электромагнитного поля с периодом колебаний T_p , практически не превышает значения, равного $1,5T_p=3\pi/\omega_p$.

3.2. Влияние на глубину проникновения электромагнитного поля в материал проводников. Как известно, для расчета глубины Δ_N проникновения в нестационарном (неустановившемся) режиме внешнего импульсного электромагнитного поля в рассматриваемые немагнитные массивные однородные проводники разрядной цепи ЭФУ можно воспользоваться следующим аналитическим соотношением [13, 23]:

$$\Delta_N = H_S / (\gamma_C E_S), \quad (2)$$

где E_S, H_S – соответственно напряженности импульсного электрического и магнитного полей на наружной поверхности плоского (цилиндрического) проводника (см. рис. 1 и 2), немагнитный материал которого имеет постоянную удельную электропроводность γ_C .

Зная в (2) временные зависимости поверхностных напряженностей E_S и H_S импульсного электрического и магнитного полей для рассматриваемых плоских и цилиндрических проводников, включенных в разрядную цепь ЭФУ с изменяющимся во времени t по закону (1) импульсным аксиальным (азимутальным) током $i_p(t)$, может быть сравнительно легко определена искомая величина глубины проникновения Δ_N для нестационарного процесса диффузии внешнего импульсного электромагнитного поля в их стенки и сопоставлена с известной классической величиной глубины проникновения Δ_C , характерной для установившегося (стационарного) режима диффузии поля.

Из анализа полученных в [13, 23] результатов следует, что на участке первой полуволны импульсного затухающего синусоидального аксиального тока $i_p(t)$ по (1) ($\delta_p/\omega_p=0,3$; $\omega_p=666,58$ кГц; $T_p=9,42$ мкс), протекающего по круглой сплошной массивной медной жиле ($b=2,5$ мм; $\gamma_C=5,81 \cdot 10^7$ См/м; $\Delta_C=0,202$ мм; $b/\Delta_C=12,37$) радиочастотного кабеля марки РК 75-33-17 [24], значение глубины проникновения Δ_N поля в эту жилу для нестационарного режима, по сравнению со значением глубины проникновения Δ_C в нее подобного поля для стационарного режима, оказывается примерно на 37 % больше. Для участка второй полуволны проникающего в цилиндрическую жилу импульсного электромагнитного поля значение Δ_N становится на 19 % меньше значения Δ_C , характерного для стационарного режима проникновения внешнего электромагнитного поля в указанный массивный проводник. На участке третьей полуволны исследуемого вида электромагнитного поля соотношение Δ_N/Δ_C приближается практически к единице. Поэтому для анализируемого случая величина глубины проникновения Δ_N импульсного электромагнитного поля в массивный цилиндрический проводник наиболее заметно

изменяется в интервале двух первых полувольт этого поля или импульсного тока $i_p(t)$, описываемого (1).

Указанная выше особенность для временного распределения величины Δ_N позволяет объяснить с электрофизических позиций характер изменения при переходном процессе в разрядной цепи ЭФУ величины напряженности E_{ZS} импульсного аксиального электрического поля на наружной поверхности массивного цилиндрического проводника (см. подраздел 2.1). Именно отмеченное увеличение величины Δ_N (примерно на 37 %) на участке первой полувольты проникающего импульсного электромагнитного поля вызывает в нестационарном режиме за счет уменьшения мгновенного значения активного сопротивления R_N токового скин-слоя в массивном цилиндрическом проводнике соответствующее уменьшение (примерно на 33 %) амплитуды первой полувольты поверхностной напряженности E_{ZS} импульсного аксиального электрического поля (соответственно и падения импульсного электрического напряжения на этом проводнике [25]) по сравнению с ее значением в стационарном режиме диффузии подобного переменного поля в рассматриваемый проводник. На участке второй полувольты разрядного тока $i_p(t)$ вида (1) уменьшение величины Δ_N (примерно на 19 %) приводит за счет увеличения при этом мгновенного значения активного сопротивления R_N токового скин-слоя в массивном цилиндрическом проводнике к соответствующему увеличению в нестационарном режиме проникновения в него анализируемого поля указанной амплитуды напряженности E_{ZS} аксиального электрического поля на наружной поверхности проводника.

Поэтому можно констатировать то, что характер режима проникновения (нестационарный или установившийся в электродинамическом смысле) в указанные массивные плоские и цилиндрические проводники разрядной цепи ЭФУ внешнего электромагнитного поля существенно влияет на расчет величины его глубины проникновения в их немагнитные материалы.

3.3. Влияние на собственные электрические параметры проводников разрядной цепи ЭФУ. Усредненные на произвольном временном интервале $[t_s, t_e]$ величины активных сопротивлений R_{Na} и внутренних индуктивностей L_{Na} (внешние индуктивности, определяемые геометрией проводников и не зависящие от электродинамического режима распространения тока в них, здесь не рассматриваются) для не-и массивных плоских и цилиндрических проводников, применяемых в разрядных цепях высоковольтных ЭФУ с импульсным током $i_p(t)$, могут быть представлены в обобщенном электротехническом виде [26, 27]:

$$R_{Na} = k_R R_0; \quad (3)$$

$$L_{Na} = k_L L_0, \quad (4)$$

где R_{Na} , L_{Na} – соответственно активное сопротивление и внутренняя индуктивность проводника с учетом влияния проявляющегося в нем НПЭ; R_0 , L_0 – соответственно известные величины активного сопротивления и внутренней индуктивности проводника при протекании по нему постоянного электрического тока [2, 28]; k_R , k_L – безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние нестационарного режима проникно-

вения в материал проводника внешнего электромагнитного поля соответственно на величины его активного сопротивления и внутренней индуктивности.

Интересно отметить то, что согласно данным из [26, 27] для немассивного сплошного цилиндрического проводника радиусом b с импульсным аксиальным током $i_p(t)$ вида (1) при $b/\Delta_C \leq 1$ коэффициенты k_R и k_L в (3) и (4) становятся равными единице и его импульсные электрические параметры R_{Na} и L_{Na} принимают значения, характерные для постоянного тока в нем. Это обстоятельство, соответствующее известным положениям теоретической электрофизики [2, 6], может дополнительно указывать на достоверность как используемого в [26, 27] подхода, так и полученных на его основе результатов для электрических параметров исследуемых проводников с импульсным током $i_p(t)$.

В (3) и (4) под электрическими параметрами R_{Na} и L_{Na} следует понимать постоянные на временном интервале $[t_s, t_e]$ величины активного сопротивления и внутренней индуктивности рассматриваемого проводника, которые к моменту времени $t_e > t_s$ вызывают в его материале такие же изменения энергии тепловых (джоулевых) потерь и энергии магнитного поля, что и переменные во времени t величины активного сопротивления R_N и внутренней индуктивности L_N проводника. Отметим, что в [28] для случая резкого проявления стационарного поверхностного эффекта в немагнитном массивном сплошном цилиндрическом проводе радиусом b (см. рис. 2) с переменным синусоидальным аксиальным током частотой f были получены следующие классические расчетные соотношения для его усредненных на участке полупериода колебаний тока длительностью $0,5f^{-1}$ величин активного сопротивления R_C и внутренней индуктивности L_C :

$$R_C = 0,5l(\pi b \gamma_C \Delta_C)^{-1}; \quad (5)$$

$$L_C = 0,25\mu_0 l \Delta_C (\pi b)^{-1}. \quad (6)$$

Для сравнения при $\delta_p/\omega_p=0$ величин активного сопротивления R_{Na} и внутренней индуктивности L_{Na} рассматриваемого массивного сплошного цилиндрического проводника радиусом b с импульсным аксиальным током $i_p(t)$, найденных с учетом влияния НПЭ, с соответствующими величинами его активного сопротивления R_C и внутренней индуктивности L_C , рассчитанными в стационарном режиме, при $b/\Delta_C \gg 1$ могут использоваться следующие соотношения [26]:

$$R_{Na} / R_C = 2\Delta_C k_R / b; \quad (7)$$

$$L_{Na} / L_C = 0,5bk_L / \Delta_C. \quad (8)$$

Аналитические и графические зависимости для коэффициентов $k_R > 1$ и $k_L < 1$ применительно к протеканию по рассматриваемому массивному цилиндрическому проводнику импульсного аксиального тока $i_p(t)$ вида (1) были представлены в [12, 26]. Теперь перейдем к анализу влияния НПЭ на величины активного сопротивления R_{Na} и внутренней индуктивности L_{Na} немагнитного массивного цилиндрического проводника с импульсным аксиальным током $i_p(t)$ по (1).

Полученные в [12, 26] результаты для рассматриваемого проводника указывают на то, что усредненные на участке первой полувольты ($t_s=0$; $t_e=\pi/\omega_p$) затухающего синусоидального тока $i_p(t)$ вида (1) ве-

личины активного сопротивления R_{Na} при учете линейного НПЭ значительно меньше, а усредненные там же величины внутренней индуктивности L_{Na} больше, чем при стационарном поверхностном эффекте в материале такого проводника. Так, при $b/\Delta_C=10$ и $\delta_p/\omega_p=0$ для немагнитного сплошного цилиндрического проводника с импульсным аксиальным током $i_p(t)$ соотношение R_{Na}/R_C по (7) численно составляет примерно 0,75, а соотношение L_{Na}/L_C по (8) принимает значение, численно равное около 1,14. Видно, что для массивного цилиндрического проводника учет влияния линейного НПЭ приводит к уменьшению (примерно на 25 %) его усредненной величины активного сопротивления R_{Na} и увеличению (примерно на 14 %) его усредненной внутренней индуктивности L_{Na} . Важно указать то, что согласно расчетным данным из [12,26] для относительно тонких (немассивных) цилиндрических проводников ($b/\Delta_C \leq 1$) с импульсным аксиальным затухающим синусоидальным током $i_p(t)$ в разрядной цепи высоковольтной ЭФУ переходный электромагнитный процесс в их немагнитном однородном материале практически не оказывает влияния на величины их таких интегральных электрических параметров как активное сопротивление и внутренняя индуктивность.

3.4. Влияние на добротность проводников разрядной цепи ЭФУ. Под добротностью Q_N рассматриваемых плоских и цилиндрических проводников с импульсным током $i_p(t)$ вида (1) в разрядной цепи ЭФУ будем понимать физическую величину, определяемую отношением их внутренних реактивных сопротивлений к их активным сопротивлениям и рассчитываемую по следующему выражению [12]:

$$Q_N = \omega_p L_N / R_N. \quad (9)$$

Для немагнитного массивного сплошного цилиндрического проводника с импульсным аксиальным током $i_p(t)$ вида (1) выражение (9) согласно данным [12] может быть записано следующим образом:

$$Q_N = 0,25b^2 k_L / (\Delta_C^2 k_R). \quad (10)$$

Исходя из (9) и принимая во внимание (5) и (6), для указанного массивного ($b/\Delta_C \gg 1$) цилиндрического проводника при стационарном режиме проявления в его немагнитном материале поверхностного эффекта величина добротности принимает численное значение, равное $Q_N=1$. Этот результат соответствует известным классическим положениям теоретической электротехники [28]. А как влияет на величину добротности Q_N рассматриваемых проводников линейный НПЭ, проявляющийся в их материалах? Из (10) и анализа результатов теоретических исследований данного скин-эффекта в немагнитных массивных проводниках с импульсным аксиальным током $i_p(t)$ временного вида (1), представленных в [12, 26], следует, что для массивного сплошного цилиндрического проводника при $b/\Delta_C=10$ (в случае $\delta_p/\omega_p=0$) его добротность в переходном режиме становится численно равной около $Q_N=1,52$. Видно, что линейный НПЭ по сравнению с установившимся (стационарным) скин-эффектом приводит к значительному повышению (примерно на 52 %) величины добротности Q_N указанного массивного проводника с импульсным током

$i_p(t)$, включенного в сильноточную разрядную цепь ЭФУ. Отметим, что аналогичный результат для величины добротности Q_N был получен и при расчете в неустановившемся режиме интегральных электрических параметров для бесконечно толстого плоского проводника с импульсным синусоидальным током [8]. Отсюда можно заключить, что для достижения в разрядной цепи мощной высоковольтной ЭФУ, генерирующей на электрической нагрузке большие импульсные токи и сильные импульсные магнитные поля, высоких показателей добротности Q_N ее токонесущей ошиновки в ней (этой ошиновке) должны применяться немагнитные массивные токопроводы.

Выводы.

1. Из приведенных данных выполненного обзора следует, что линейный нестационарный скин-эффект в рассматриваемых металлических проводниках, по сравнению со стационарным поверхностным эффектом в них, на участке первой полуволны затухающего синусоидального импульсного тока $i_p(t)$ приводит к значительному уменьшению (до 33 %) на наружной поверхности проводников величины напряженности импульсного электрического поля, существенному увеличению (до 35 %) во внутренних слоях проводников величины напряженности импульсного магнитного поля, заметному увеличению (до 37 %) величины глубины проникновения внешнего электромагнитного поля в материал проводников, уменьшению (до 25 %) усредненных величин активных сопротивлений проводников, увеличению (до 14 %) усредненных величин внутренних индуктивностей проводников и увеличению (до 52 %) величин добротностей проводников, а также к протеканию в разрядной цепи высоковольтной сильноточной электроустановки переходного электромагнитного процесса длительностью до полутора периода изменения ее импульсного тока $i_p(t)$ указанного временного вида.

2. Описанные выше особенности проявления и влияния линейного нестационарного скин-эффекта в указанных немагнитных однородных массивных проводниках разрядных электрических цепей высоковольтных сильноточных электроустановок требуется учитывать при проектировании и выборе конструкции плоской (цилиндрической) ошиновки разрядных цепей подобных электрофизических установок, а также при решении прикладных задач получения на тех или иных электрических нагрузках указанных импульсов тока (напряжения) с заданными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашук П.Н., Зайнец С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкурпат П.И., Шнеерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
3. Накопление и коммутация энергии больших плотностей / Под ред. У. Бостика., В. Нарди, О. Цукера: Пер. с англ. Э.И. Асиновского, В.С. Комелькова. – М.: Мир, 1979. – 474 с.
4. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
5. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

6. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3-х томах. Том 3: Теория и практика электрофизических задач. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

7. Тимофеев Б.Б. Специальные задачи теории поверхностного эффекта. – Киев: Наукова думка, 1966. – 192 с.

8. Бондалетов В.Н. Эквивалентные параметры при нестационарном распространении импульсного электромагнитного поля в проводнике // Электричество. – 1975. – №8. – С. 55-58.

9. Михайлов В.М. Импульсные электромагнитные поля. – Харьков: Вища школа, Изд-во при Харьков. ун-те, 1979. – 140 с.

10. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 200 с.

11. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.

12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.

13. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3 томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.

14. Баранов М.И., Белый И.В., Хименко Л.Т. Поверхностный эффект и распределение электродинамических усилий в цилиндрических токопроводах коаксиальной системы с импульсным током // Электричество. – 1976. – №10. – С. 1-8.

15. Баранов М.И. Поверхностный эффект в полой проводящем изотропном цилиндре с аксиальным импульсным магнитным полем // Технічна електродинаміка. – 1999. – №2. – С. 3-6.

16. Михайлов В.М. О распространении импульсного электромагнитного поля в системе «индуктор – обрабатываемая деталь» // Вестник «Харьковского политехнического института». Серия «Магнитно-импульсная обработка металлов». – Х.: Изд-во «ХГУ», 1971. – Вып. 1. – №53. – С. 15-23.

17. Михайлов В.М. Расчет индуктивности и распределения тока при резком скин-эффекте // Электричество. – 1978. – №8. – С. 27-33.

18. Витков М.Г. Проникновение импульсного магнитного поля внутрь цилиндрического экрана // Журнал технической физики. – 1965. – Т. 35. – Вып. 3. – С. 410-413.

19. Подольцев А.Д., Пигнастый С.С. Влияние скин-эффекта на энергетические показатели импульсного безжелезного трансформатора // Электричество. – 1985. – №7. – С. 56-59.

20. Wheeler H.A. Formulas for the skin-effect // Proceedings of the IRE. – 1942. – vol.30. – pp. 412-424.

21. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 327 с.

22. Waldow P., Wolff I. The Skin-Effect at High Frequencies // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1985. – vol.33. – no.10. – pp. 1076-1082. doi: 10.1109/tmtt.1985.1133172.

23. Баранов М.И., Кравченко В.И., Медведева В.А. Расчет глубины проникновения импульсного электромагнитного поля в массивный проводник // Технічна електродинаміка. – 2001. – №3. – С. 13-16.

24. Белоруссов Н.И., Саакян А.Е., Яковлева А.И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.

25. Баранов М.И. Приближенные граничные условия для импульсного электромагнитного поля на поверхности изотропных проводящих тел // Технічна електродинаміка. – 1996. – №6. – С. 3-10.

26. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Расчет активного сопротивления и индуктивности цилиндрического проводника с импульсным током // Электричество. – 1990. – №1. – С. 81-87.

27. Баранов М.И., Бондина Н.Н. Импульсное сопротивление цилиндрического провода с током молнии // Технічна електродинаміка. – 1996. – №3. – С. 3-9.

28. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов в 2-х томах. Том 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

REFERENCES

1. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
2. Knopfel' G. *Sverksil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
3. Bostic W., Nardi V., Zucker O. *Nakoplenie i kommutacija energii bol'shih plotnostej* [Accumulation and commutation of energy of high densities]. Moscow, Mir Publ., 1979. 474 p. (Rus).
4. Gulyi G.A. *Nauchnye osnovy razriadno-impul'snykh tekhnologii* [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
5. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
6. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3-h tomah. Tom 3: Teoriya i praktika elektrofizicheskikh zadach* [Selected topics of electrophysics. Monograph in 3th vols. Vol. 3. Theory and practice of electrophysics tasks]. Kharkiv, Point Publ., 2014. 400 p. (Rus).
7. Timofeev B.B. *Spetsial'nye zadachi teorii poverhnostnogo effekta* [Special tasks of theory of superficial effect]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1966. 192 p. (Rus).
8. Bondaletov V.N. Equivalent parameters at non-stationary distribution of the impulsive electromagnetic field in an explorer. *Electricity*, 1975, no.8, pp. 55-58. (Rus).
9. Mihaylov V.M. *Impul'snye elektromagnitnye polya* [Impulsive electromagnetic fields]. Kharkiv, Higher School Publ., 1979. 140 p. (Rus).
10. Shneerson G.A. *Polya i perehodnye processy v apparature sverhsilnykh tokov* [Fields and transients in equipment ultra strong currents]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 200 p. (Rus).
11. Batygin Yu.V., Lavinskyi V.I., Khimenko L.T. *Impul'snye magnitnye polya dlya progressivnykh tekhnologiy* [Impulsive magnetic fields for progressive technology]. Kharkiv, MOST-Tornado Publ., 2003. 288 p. (Rus).
12. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).
13. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3kh tomakh. Tom 2, Kn. 2: Teoriia elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 Vols. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
14. Baranov M.I., Belyi I.V., Khimenko L.T. Superficial effect and distributing of electrodynamic efforts in cylindrical current-wires of the coaxial system with an impulsive current. *Electricity*, 1976, no.10, pp.1-8. (Rus).
15. Baranov M.I. Superficial effect in a hollow conducting homogeneous cylinder with the axial-flow impulsive magnetic field. *Technical electrodynamics*, 1999, no.2, pp. 3-6. (Rus).
16. Mihaylov V.M. About distribution of the impulsive electromagnetic field in the system «inductor – workpart». *Bulletin of «KhPI». Series: «Magnetic-impulsive metal forming»*, 1971, iss.1, no.53, pp. 15-23. (Rus).

17. Mihaylov V.M. Calculation of inductance and distributing of current at a sharp skin-effect. *Electricity*, 1978, no.8, pp. 27-33. (Rus).
18. Vitkov M.G. Penetration of impulsive magnetic field into a cylindrical screen. *Technical physics*, 1965, vol.35, iss.3, pp. 410-413. (Rus).
19. Podoltsev A.D., Pignastiy S.S. Influence of skin-effect on the power indexes of impulsive without ferum-transformer. *Electricity*, 1985, no.7, pp. 56-59. (Rus).
20. Wheeler H.A. Formulas for the skin-effect. *Proceedings of the IRE*, 1942, vol.30, pp. 412-424.
21. Kaden G. *Elektromagnitnyie ekrany v vyisokochastotnoy tehnike i tehnike elektrosyazi* [Electromagnetic shields in high-frequency technology and communication technology]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1957. 327 p. (Rus).
22. Waldow P., Wolff I. The Skin-Effect at High Frequencies. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1985, vol.33, no.10, pp. 1076-1082. doi: 10.1109/tmtt.1985.1133172.
23. Baranov M.I., Kravchenko V.I., Medvedeva V.A. Calculation of depth of penetration of the impulsive electromagnetic field in massive explorer. *Technical electrodynamics*, 2001, no.3, pp.13-16. (Rus).
24. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shnury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).
25. Baranov M.I. Close scope terms for the impulsive electromagnetic field on-the-spot homogeneous conducting bodies. *Technical electrodynamics*, 1996, no.6, pp. 3-10. (Rus).
26. Baranov M.I., Bondina N.N. Calculation of active resistance and inductance of cylindrical explorer with an impulsive current. *Electricity*, 1990, no.1, pp. 81-87. (Rus).
27. Baranov M.I., Bondina N.N. Impulsive resistance of cylindrical wire with the current of lightning. *Technical electrodynamics*, 1996, no.3, pp. 3-9. (Rus).
28. Neyman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2-h tomah. Tom 2* [Theoretical bases of the Electrical Engineering. In 2 vols. Vol.2]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (Rus).

Поступила (received) 09.01.2019

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., гл.н.с.,
НИПКИ «Молния»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +38 057 7076841,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov

Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

Peculiarities of the manifestation and influence on the electromagnetic processes of the transient skin effect in metal conductors with pulsed current.

Purpose. Preparation of brief scientific review of basic results of the known theoretical researches of the electrophysics phenomenon of linear transient skin effect (TSE) in the non-magnetic homogeneous massive conductors of flat and cylindrical configurations on which in the discharge electric circuits of high-voltage electrophysical installations (EPHI) the pulsed currents $i_p(t)$ flow with given amplitude-temporal parameters (ATPs). **Methodology.** Theoretical bases of electrical engineering, bases of theoretical electrophysics, electrophysics bases of technique of high-voltage and high pulsed currents. **Results.** The brief scientific review of results of the known theoretical researches of the electrophysical phenomenon of linear TSE in non-magnetic homogeneous massive flat and cylindrical metal conductors with pulsed axial (azimuthal) current $i_p(t)$, formed in the discharge circuit of powerful high-voltage EPHI. In the generalized and systematized form the basic features of manifestation of linear TSE in the indicated conductors and influence of the considered skin effect on electromagnetic processes are presented at flow in conductors and discharge circuit of a high-voltage EPHI with the pulsed current $i_p(t)$ time-varying by law of attenuated sinewave. Influence of linear TSE is described in non-magnetic massive conductors during transient in a discharge circuit of EPHI with the pulsed current $i_p(t)$ of given ATP, depth of penetration of the electromagnetic field in materials of the indicated conductors, own integral electric parameters of the considered conductors and their good quality in the high-current discharge circuit of high-voltage EPHI. It is shown that at the analysis of electromagnetic transients in high-current discharge electric circuits of powerful high-voltage EPHI it is necessary to take into account flowing in materials of the examined massive conductors of such known electrophysical phenomenon as linear TSE. **Originality.** Generalization and systematization is first executed regarding domestic and foreign scientists-electrical engineers' results of theoretical researches for long-term period of the electrophysics phenomenon of linear TSE in the flat and cylindrical metallic conductors of different thickness with the pulsed current $i_p(t)$ of given ATP. **Practical value.** The results presented in the generalized and systematized form will be useful for electrical engineers in deepening of understanding of basic features of manifestation in non-magnetic massive homogeneous conductors with the pulsed current $i_p(t)$ of given ATP of such widely widespread in area of high-voltage high-current pulsed technique electrophysics phenomenon as linear TSE and its influences on electromagnetic transients in similar metallic conductors and high-current discharge circuits of high-voltage EPHI. References 28, figures 2.

Key words: metal conductors, pulsed current, linear transient skin effect, features of the manifestation of linear skin effect in conductors and its influence on electromagnetic processes.