

N. I. Kuskova, S. I. Tkachenko, S. V. Koval. Journ. Phys.: Condens. Matter. 1997. Vol. 9. 6175-6184 Print. 7. Rahe'l' A. D. Ob isparenii metalla elektricheskim tokom vysokoj plotnosti. A. D. Rahe'l'. Zhurnal tehnichejskoj fiziki. 1995. Vol. 65, vyp. 12. 27-38 Print. 8. Kovavl' S. V. Issledovanie vysokotemperaturnyh svojstv metallov metodom podvodnogo elektricheskogo vzryva provodnikov. S. V. Kovavl', E. V. Krivickij, G. B. Rakovskij. Nikolaev, 1989 Print. 9. Tkachenko S. I. Modelirovanie rannej stadii elektricheskogo vzryva provodnika. S. I. Tkachenko. Zhurnal tehnichejskoj fiziki. 2000. Vol. 70, vyp. 7. 138-140 Print. 10. Krivickij E. V. Dinamika elektrovzryva v zhidkosti. Kyiv: Naukova dumka, 1986 Print. 11. Kloss A. Eksperimental'nye rezultaty vzryva

vol'framovogo provodnika v vozduhe pri atmosfernom davlenii. – sravnenie s odnomernoj chislovoj model'ju. A. Kloss, A. D. Rahe'l', G. Gess. Mezhdunarodnyj zhurnal termofiziki. 1998. Vol. 19, No 3. 1-9 Print. 12. Hajnackij S. A. Uslovija realizacii optimal'nogo rezhima elektricheskogo vzryva provodnikov v vode. S. A. Hajnackij. Pis'ma v zhurnal tehnichejskoj fiziki. 2009. Vol. 35, vyp. 7. 15-20 Print. 13. Krivickij E. V. Perehodnye processy pri vysokovol'tnom razrjadje v vode. E. V. Krivickij, V. V. Shamko. Kyiv: Naukova dumka, 1979 Print. 14. Naugol'nyh K. A. Elektricheskie razrjadje v vode. K. A. Naugol'nyh, N. A. Roj. Moscow: Nauka, 1971 Print.

Поступила (received) 11.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Бакларь Виктор Юрьевич, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, младший научный сотрудник; тел.: (050) 864-26-23; email: baklarv@gmail.com.

Baklar Viktor Yurjevich, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Research Assistant; tel.: (050) 864-26-23; email: baklarv@gmail.com.

Кускова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

Челпанов Дмитрий Ильич, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, аспирант; тел.: (067) 514-77-78; email: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Ilych, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Postgraduate Student; tel.: (067) 514-77-78; email: chelpanoffdimitri@gmail.com.

УДК 621.3.022 : 537.311.8

М. И. БАРАНОВ, С. В. РУДАКОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ГЕНЕРАТОРА ГИТМ-10/350 ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ ПРОВОДОВ И КАБЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Приведены результаты опытной оценки стойкости образцов ряда проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами, полиэтиленовой (ПЭТ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией электрических цепей объектов промышленной электроэнергетики к воздействию апериодического импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными по требованиям международных и национальных стандартов амплитудно-временными параметрами (АВП) и допусками на них. Определены максимальные численные значения предельно допустимых и критических плотностей указанного импульса тока искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них в рассматриваемых проводах (кабелях) силовых электрических цепей энергообъектов с ПЭТ и ПВХ изоляцией.

Ключевые слова: мощный высоковольтный генератор тока искусственной молнии; провода и кабели электрических цепей объектов электроэнергетики; молниестойкость кабельно-проводниковой продукции энергообъектов; предельно допустимые и критические плотности импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии в проводах и кабелях энергообъектов.

Введение. В 2014 году в отделе электромагнитных исследований и испытаний НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (НИО № 4) был создан уникальный мощный высоковольтный генератор типа ГИТМ-10/350 [1], воспроизводящий в низкоомной (до 0,1 Ом) и малоиндуктивной (до 1,5 мкГн) электрической нагрузке апериодические импульсы тока $\tau_f / \tau_p = 10/350$ мкс искусственной молнии обеих полярностей с нормированными согласно требованиям ряда действующих международных и национальных стандартов [2-7] амплитудно-временными параметрами (АВП) и допусками на них. Данный генератор способен обеспечить формирование на указанной RL -нагрузке испытатель-

ных импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с АВП, удовлетворяющими I-IV уровням защиты от молнии объектов электроэнергетики (ОЭЭ) и их инженерных коммуникаций, включающих силовые электрические цепи. Известно, что данные цепи ОЭЭ могут содержать широкую номенклатуру проводов и кабелей с медными (алюминиевыми) жилами (экранами), полиэтиленовой (ПЭТ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией [8]. Следует отметить, что по требованиям стандартов [2-6] для I уровня молниезащиты ОЭЭ испытательный импульс тока искусственной молнии положительной полярности должен характеризоваться следующими АВП: амплитудой

$I_{mL} = (200 \pm 20)$ кА; временем $t_m \approx 1,6\tau_p$, соответствующим I_{mL} , не более 25 мкс; длительностью импульса τ_p на уровне $0,5I_{mL}$ не менее (350 ± 35) мкс; интегралом действия J_L тока молнии не менее $(10 \pm 3,5) \cdot 10^6$ А²·с; протекшим через нагрузку электрическим зарядом q_L не менее (100 ± 20) Кл. Для IV уровня молниезащиты ОЭЭ АВП подобного импульса тока должны составлять [2-6]: $I_{mL} = (100 \pm 10)$ кА; $t_m \leq 25$ мкс; $\tau_p = (350 \pm 35)$ мкс; $J_L = (2,5 \pm 0,875) \cdot 10^6$ А²·с; $q_L = (50 \pm 10)$ Кл. В настоящее время практически отсутствуют как методические, так и инженерно-технические рекомендации по выбору рассматриваемой кабельно-проводниковой продукции в первичных (вторичных) электрических цепях ОЭЭ, которая бы удовлетворяла требованиям молниестойкости согласно стандартов [2-7]. В этой связи проведение экспериментальных исследований по определению максимальных численных значений предельно допустимых δ_{m1d} и критических δ_{m1k} плотностей импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии с указанными выше АВП и допусками на них в рассматриваемых проводах и кабелях ОЭЭ с медными (алюминиевыми) токоведущими частями, ПЭТ и ПВХ изоляцией является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное прикладное значение как для отечественной промышленной электроэнергетики, так и сильноточной высоковольтной импульсной техники.

1. Постановка задачи экспериментального исследования электротермической стойкости образцов проводов (кабелей) к импульсу тока 10/350 мкс искусственной молнии. В рамках данного исследования проведем с использованием сильноточных разрядных цепей высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 [1] испытания на электротермическую стойкость [9] коротких опытных образцов (ОО) длиной 0,5 м ряда проводов (кабелей) с круглыми сплошными медными и алюминиевыми жилами сечением S_1 , ПЭТ и ПВХ изоляцией, размещенных в воздушной среде с температурой $\theta_0 = 20$ °С. ОО испытываемых проводов (кабелей) цепей ОЭЭ перед подачей на них от указанного мощного генератора испытательного аperiодического импульса тока 10/350 мкс с АВП согласно требованиям [2-7] из-за действующих на них больших электродинамических усилий необходимо жестко закреплять в разрядной цепи указанного генератора, электрическая схема которого приведена на рис. 1. С этой целью используем рабочий стол генератора типа ГИТМ-10/350, показанный на рис. 2. На данный стол выходят массивные стальные электроды сильноточной разрядной цепи используемого генератора импульсного тока, между которыми и будут размещаться ОО испытываемых проводов и кабелей электрических цепей ОЭЭ. Считаем, что указанный выше импульс тока искусственной молнии практически равномерно распределяется по поперечному сечению S_1 медной или алюминиевой жилы ОО испытываемого провода (кабеля). Расчетная оценка глубины проникновения Δ_1 в медную или алюминиевую жилу провода (кабеля) используемого при проводимых электротермических испытаниях токового импульса

($t_m \approx 24$ мкс) показывает, что в стационарном режиме минимальное значение ее величины $\Delta_1 \approx 2[t_m/(\pi\mu_1\gamma_1)]^{1/2}$ [9], где $\mu_1 = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и γ_1 – соответственно магнитная проницаемость и удельная электропроводность меди или алюминия при $\theta_0 = 20$ °С, составляет примерно 1 мм. Этому значению глубины Δ_1 соответствует поперечное сечение S_1 их круглых жил, равное около 3 мм².

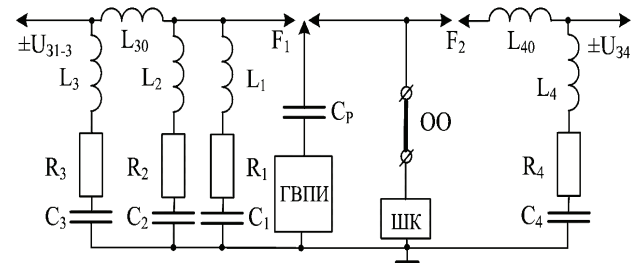


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема разрядных цепей генератора типа ГИТМ-10/350 для формирования в ОО проводов и кабелей ОЭЭ аperiодических импульсов тока 10/350 мкс искусственной молнии с нормированными АВП и допусками на них (ГВПИ – генератор высоковольтных поджигающих микросекундных импульсов напряжения амплитудой до ± 100 кВ; F_1, F_2 – трех- и двух-электродный высоковольтные воздушные искровые коммутаторы ГИТ-1 – ГИТ-4; $C_p \approx 180$ пФ – разделительная емкость на импульсное напряжение до ± 120 кВ в цепи ГВПИ, управляющего срабатыванием коммутаторов F_1 и F_2 ; ОО – опытный образец провода (кабеля); ШК – шунт коаксиальный типа ШК-300 для измерения импульсных токов искусственной молнии амплитудой до ± 300 кА; $\pm U_{31-3}, \pm U_{34}$ – зарядные напряжения соответственно для ГИТ-1 – ГИТ-3 и ГИТ-4; $L_1 - L_4, R_1 - R_4$ и $C_1 - C_4$ – собственные индуктивности, активные сопротивления и емкости разрядных цепей ГИТ-1 – ГИТ-4; L_{30}, L_{40} – формирующие индуктивности разрядных цепей ГИТ-3 и ГИТ-4) [1]

Из данных рис. 1 видно, что генератор типа ГИТМ-10/350 в своем составе содержит четыре параллельно работающих генератора импульсных токов (ГИТ): ГИТ-1 – ГИТ-3, импульсные конденсаторы которых заряжаются до постоянного напряжения $\pm U_{31-3}$, и ГИТ-4, конденсаторная батарея которого заряжается до постоянного напряжения $\pm U_{34}$. Полярность зарядки ГИТ-1 – ГИТ-4 одинаковая. Она определяется требуемой полярностью испытательного импульса тока 10/350 мкс искусственной молнии по [2-7]. Электрические параметры элементов, приведенных на рис. 1, были ранее описаны в [1]. Требуется при принятых допущениях в приближенном виде найти опытным путем максимальные численные значения предельно допустимых δ_{m1d} и критических δ_{m1k} плотностей рассматриваемого импульсного тока искусственной молнии в ОО указанных проводов и кабелей применительно к электрическим цепям ОЭЭ.

2. Результаты опытной оценки электротермической стойкости образцов проводов (кабелей) к импульсу тока 10/350 мкс искусственной молнии. На рис. 2 показан внешний вид рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350, на массивных стальных электродах которого жестко закреплена сплошная круглая

медная жила сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 [8] с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и предварительно снятыми нами защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до прямого воздействия на нее испытательного аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой I_{mL} до 100 кА (случай, практически соответствующий по требованиям действующих стандартов [2-6] IV уровня молниезащиты кабельно-проводниковой продукции электрических цепей ОЭЭ).

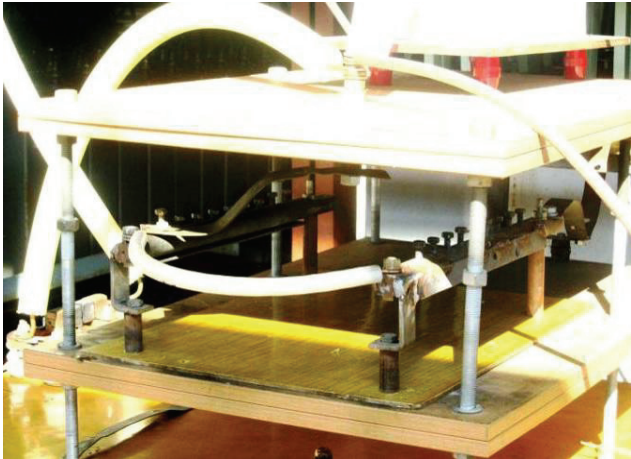


Рисунок 2 – Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и снятыми его защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$ ($U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$)

На рис. 3 приведена осциллограмма аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии, протекающего в данном случае через медную жилу диаметром 3,5 мм ($S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$) испытываемого ОО радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9. Эта осциллограмма была зафиксирована с помощью поверенных государственной метрологической службой измерительного коаксиального шунта типа ШК-300 [10] и цифрового запоминающего осциллографа типа Tektronix TDS 1012. Амплитудное значение плотности импульса тока 15/335 мкс ($I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$), удовлетворяющего требованиям [2-7], при этом в медной токоведущей части ОО испытываемого кабеля составило примерно $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$. Визуальный осмотр исследуемого ОО кабеля марки РК Д2-3,5/9 показал, что после протекания по нему импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии с указанной плотностью δ_{m1} его медная жила и ПЭТ изоляция остались практически не поврежденными. Найденное расчетным путем в круглой медной жиле ОО радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией для данного случая ($I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$; $J_L \approx 2 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$) максимальное значение предельно допустимой плотности δ_{m1d} импульса тока 15/335 мкс

искусственной молнии из приближенного соотношения $\delta_{m1d} \approx 1,353 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] оказывается равным около $\delta_{m1d} \approx 8,2 \text{ кА/мм}^2$. Из сравнения приведенных значений δ_{m1} и δ_{m1d} в медной жиле рассматриваемого кабеля следует, что расчетное значение плотности тока $\delta_{m1d} \approx 8,2 \text{ кА/мм}^2$ в ней отличается от ее опытного значения $\delta_{m1} \approx \delta_{m1d} \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$ примерно на 8 %.

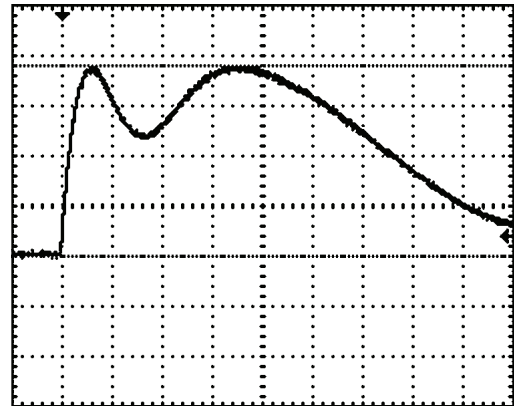


Рисунок 3 – Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде конденсаторов его ГИТ-1 – ГИТ-4 на сплошную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 9,6 \text{ мм}^2$ радиочастотного кабеля марки РК Д2-3,5/9 с полувоздушной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и снятыми его защитной ПЭТ оболочкой и витым медным экраном ($I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 8,9 \text{ кА/мм}^2$; $\tau_f \approx 15 \text{ мкс}$; $t_m \approx 25 \text{ мкс}$; $\tau_p \approx 335 \text{ мкс}$; $J_L \approx 2 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}$; $q_L \approx 42 \text{ Кл}$; $U_{31-3} \approx 16,5 \text{ кВ}$; $U_{34} \approx 4,2 \text{ кВ}$; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

На рис. 4 приведен общий вид закрепленного на электродах сильноточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350 отрезка длиной 0,5 м радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией [8], содержащего расщепленную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$, до воздействия на него испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой до $I_{mL} \approx 85,6 \text{ кА}$.

На рис. 5 представлена осциллограмма аperiodического импульса тока, протекающего через медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2 \text{ мм}^2$ испытываемого ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11, которая подвергается электрическому взрыву (ЭВ) [12].

Из данных рис. 5 следует, что сублимация меди при ЭВ токоведущей жилы ОО радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11 вызывает определенную деформацию испытательного аperiodического импульса тока в разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350. Происходит незначительное возрастание времени t_m (до 28 мкс) и более заметное уменьшение длительности τ_p (до 310 мкс) для испытательного импульса тока. Амплитудное значение плотности импульса тока в электрически взрывающейся медной жиле исследуемого ОО радиочастотного кабеля марки РК 50-7-11 при этом достигает около $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9 \text{ кА/мм}^2$. Расчетное максимальное значение критической плот-

ности импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии, найденное по приближенному соотношению $\delta_{m1k} \approx 4,416 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] для данного электротермического случая ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6$ А²·с), составляет в медной жиле указанного кабеля около $\delta_{m1k} \approx 27,6$ кА/мм². Отметим, что определение значений интеграла тока искусственной молнии J_L и протекшего при испытаниях через ОО проводов (кабелей) заряда q_L осуществлялось нами по приближенным расчетным соотношениям, рекомендуемым в [11]. Видно, что опытное амплитудное значение $\delta_{m1} \approx \delta_{m1k} \approx 25,9$ кА/мм² критической плотности импульса тока 17/310 мкс искусственной молнии для медной жилы исследуемого ОО кабеля с ПЭТ изоляцией отличается от найденного соответствующего расчетного значения подобной плотности тока $\delta_{m1k} \approx 27,6$ кА/мм² примерно на 6 %.

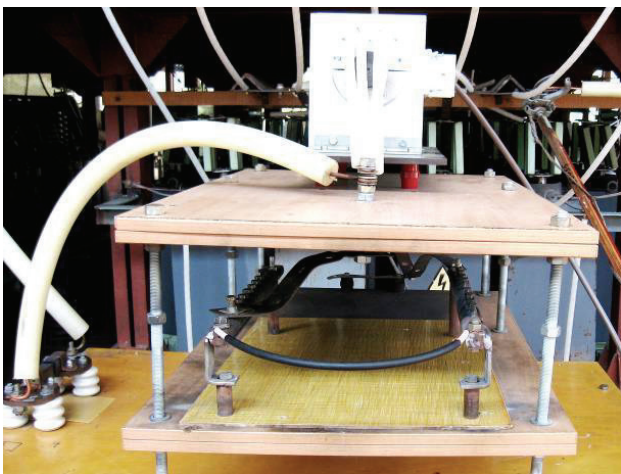


Рисунок 4 – Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его массивных стальных электродах расщепленной круглой медной жилой сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и «заглушенным» при испытаниях его медным экраном-оплеткой до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

На рис. 6 показан общий вид ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией [8] длиной 0,5 м, сплошная круглая алюминиевая жила которого сечением $S_1 \approx 6$ мм² жестко закреплена на массивных стальных электродах рабочего стола генератора типа ГИТМ-10/350, до воздействия на него испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой до $I_{mL} \approx 85,6$ кА. В этом случае электротермических испытаний вторая алюминиевая жила исследуемого провода была «заглушена» и выведена из силовоточной разрядной цепи используемого генератора импульсного тока. На рис. 7 приведена осциллограмма большого импульсного тока аperiodической временной формы, протекающего через указанную алюминиевую жилу провода марки АППВнг2х6 при ее ЭВ в силовоточной разрядной цепи генератора типа ГИТМ-10/350. Электрофизическое явление ЭВ алю-

миниевой жилы провода марки АППВнг2х6 [8], наступающее согласно изменению характера «хода» во времени кривой импульсного тока на рис. 7 относительно соответствующей токовой кривой на рис. 3 на спаде аperiodического импульса тока имитированной молнии, приводит к заметному укорочению данного токового импульса ($\tau_p \approx 265$ мкс). Плотность импульсного тока при этом виде испытаний ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $J_L \approx 1,58 \cdot 10^6$ А²·с) в алюминиевой жиле исследуемого ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией составила примерно $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14$ кА/мм². Выполненная расчетная оценка максимальной критической плотности импульса тока 17/265 мкс искусственной молнии в алюминиевой жиле провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией по соотношению $\delta_{m1k} \approx 2,863 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] показывает, что она будет равной примерно 19 кА/мм².

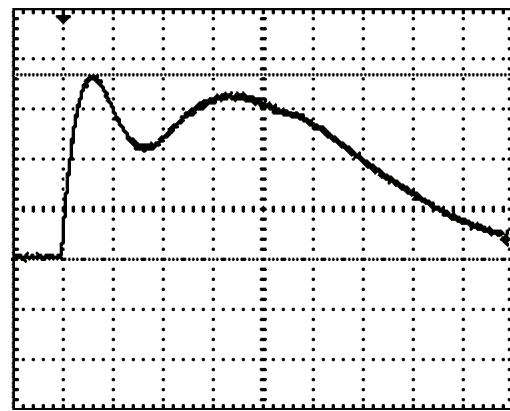


Рисунок 5 – Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в цепи генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде конденсаторов его ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся расщепленную круглую медную жилу сечением $S_1 \approx 3,2$ мм² ОО радиочастотного коаксиального кабеля марки РК 50-7-11 со сплошной ПЭТ изоляцией длиной 0,5 м и «заглушенным» при испытаниях его медным экраном-оплеткой ($I_{mL} \approx 82,9$ кА; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 25,9$ кА/мм²; $\tau_f \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $\tau_p \approx 310$ мкс; $J_L \approx 1,76 \cdot 10^6$ А²·с; $q_L \approx 37,9$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Таким образом, полученное опытное максимальное значение критической плотности импульса тока 17/265 мкс $\delta_{m1k} \approx 14$ кА/мм² имитированной молнии для алюминиевой жилы провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией отличается от ее расчетного значения $\delta_{m1k} \approx 19$ кА/мм² примерно на 26 %. Выполненные в дальнейшем на генераторе типа ГИТМ-10/350 эксперименты с применением ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м показали, что при параллельном включении его двух круглых алюминиевых жил общим сечением $S_1 \approx 12$ мм² в силовоточную разрядную цепь используемого генератора большого импульсного тока ОО провода выдерживает оказанное на него сильное электротермическое и электродинамическое воздействие ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $J_L \approx 1,91 \cdot 10^6$ А²·с). Осциллограмма испытательного импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой $I_{mL} \approx 83,8$ кА в этом случае практически повторяла осциллограмму, показанную на рис. 3. Ам-

плитуда плотности импульсного тока в алюминиевых жилах ОО указанного провода составляла в этом случае около $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 6,9$ кА/мм². Расчетное максимальное значение предельно допустимой в «спаренных» алюминиевых жилах ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией плотности импульса тока 15/335 мкс из оценочного соотношения $\delta_{m1d} \approx 0,975 \cdot 10^8 \cdot I_{mL}/(J_L)^{1/2}$ [11] в данном случае оказывается равным $\delta_{m1d} \approx 5,9$ кА/мм².



Рисунок 6 – Общий вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 с закрепленной на его массивных стальных электродах сплошной круглой алюминиевой жилой сечением $S_1 \approx 6$ мм² ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м до воздействия на нее аperiodического импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии амплитудой около $I_{mL} \approx 85,6$ кА ($U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ)

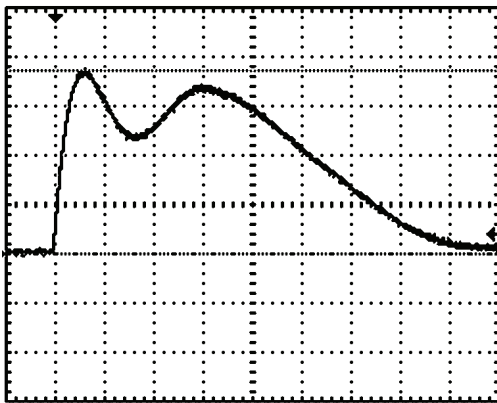


Рисунок 7 – Осциллограмма аperiodического импульса тока искусственной молнии в сильноточной разрядной цепи мощного высоковольтного генератора типа ГИТМ-10/350 при разряде конденсаторов его высоковольтных ГИТ-1 – ГИТ-4 на электрически взрывающуюся сплошную круглую алюминиевую жилу сечением $S_1 \approx 6$ мм² провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией длиной 0,5 м ($I_{mL} \approx 83,8$ кА; $\delta_{m1} \approx I_{mL}/S_1 \approx 14$ кА/мм²; $\tau_f \approx 17$ мкс; $t_m \approx 28$ мкс; $\tau_p \approx 265$ мкс; $J_L \approx 1,58 \cdot 10^6$ А²·с; $q_L \approx 33,3$ Кл; $U_{31-3} \approx 16,5$ кВ; $U_{34} \approx 4,2$ кВ; масштаб по вертикали – 22,52 кА/клетка; масштаб по горизонтали – 50 мкс/клетка)

Из приведенных выше для испытываемого ОО провода марки АППВнг2х6 с ПВХ изоляцией [8] и общим сечением $S_1 \approx 12$ мм² его двух алюминиевых жил количественных данных следует, что найденное

для него расчетное значение предельно допустимой плотности импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии $\delta_{m1d} \approx 5,9$ кА/мм² отличается от ее соответствующего опытного значения $\delta_{m1d} \approx 6,9$ кА/мм² примерно на 14 %.

Выводы. 1. Впервые экспериментально установлено, что для медных жил электрических проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией предельно допустимая плотность импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии численно составляет примерно $\delta_{m1d} \approx 9$ кА/мм², а для алюминиевых жил электрических проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – примерно $\delta_{m1d} \approx 6$ кА/мм².

2. Из выполненных на уникальном мощном высоковольтном генераторе типа ГИТМ-10/350 разработки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» сильноточных экспериментов следует, что критическая плотность импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии в медных жилах электрических проводов (кабелей) с ПЭТ и ПВХ изоляцией численно составляет около $\delta_{m1k} \approx 26$ кА/мм², а в алюминиевых жилах электрических проводов (кабелей) с ПВХ изоляцией – около $\delta_{m1k} \approx 14$ кА/мм².

3. Полученные приближенные численные значения для предельно допустимых δ_{m1d} и критических δ_{m1k} плотностей импульса тока 15/335 мкс искусственной молнии могут использоваться при выборе кабельно-проводниковой продукции для электрических цепей ОЭЭ, отвечающей согласно действующим международным и национальным стандартам требованиям функциональной и противопожарной безопасности энергообъектов к грозovým разрядам в воздушной атмосфере.

Список литературы: 1. Баранов М.И. Мощный высоковольтный генератор аperiodических импульсов тока искусственной молнии с нормированными по международному стандарту IEC 62305-1-2010 амплитудно-временными параметрами / М.И.Баранов, Г.М.Колушико, В.И.Кравченко, С.В.Рудаков // Электротехніка і електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 51–56. 2. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. – Part 1: General principles». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 3. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. – Part 2: Risk management». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 4. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. – Part 3: Physical damage to structures and life hazard». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 5. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. – Part 4: Electrical and electronic systems within structures». – Geneva, Publ. IEC, 2010. 6. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р МЭК 62305-1. – 2010. «Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы». – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с. 7. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbauteile. – Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile. – Berlin: Buchverlag DS, 2008. – 16 s. 8. Белоруссов Н.И. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И.Белоруссов, А.Е.Саакян, А.И.Яковлева. Под ред. Н.И.Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с. 9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач / М.И.Баранов. – Х.: Точка, 2010. – 407 с. 10. Баранов М.И. Генератор тока искусственной молнии для натуральных испытаний технических объектов / М.И.Баранов, Г.М.Колушико, В.И. Кравченко, О.С.Недзельский, В.Н.Дныщенко // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 3. – С. 81–85. 11. Баранов М.И. Электротермическая стойкость проводов и кабелей летательного аппарата к поражающему действию импульсного тока молнии / М.И.Баранов, В.И.Кравченко // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 7–13. 12. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Том 3: Теория и практика электрофизических задач / М.И.Баранов. – Х.: Точка, 2014. – 400 с.

Bibliography (transliterated): 1. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. Moshhnyj vysokovol'nyj generator aperiodicheskikh impul'sov toka iskusstvennoj molnii s normirovannymi po mezhdunarodnomu standartu IEC 62305-1-2010 amplitudno-vremennymi parametrami. Elektrotehnika i elektromehanika. 2015. No 1. 51–56 Print. 2. IEC 62305-1: 2010 «Protection against lightning. Part 1: General principles». Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 3. IEC 62305-2: 2010 «Protection against lightning. Part 2: Risk management». – Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 4. IEC 62305-3: 2010 «Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard». Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 5. IEC 62305-4: 2010 «Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures». Geneva, Publ. IEC, 2010 Print. 6. Nacional'nyj standart RF GOST R MEK 62305-1-2010. «Menedzhment riska. Zashhita ot molnii. Chast' 1: Obshhie principy». Moscow, Standartinform, 2011. 46 Print. 7. Deutsche Norm DIN EN 50164-1: 2008 (VDE 0185-2001). Blitzschutzbautei-

le.–Teil 1: Anforderungen an Verbindungsbauteile.– Berlin, Buchverlag DS, 2008, 16 Print. 8. Belorussov N.I., Saakyan A.E., Yakovleva A.I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury: Spravochnik. Pod red. N.I. Belorussova. Moscow, Energoatomizdat, 1988. 536 Print. 9. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 2, Kniga. 2: Teorija elektrofizicheskikh effektov i zadach.– Har'kov, Tochka, 2010, 407 Print. 10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzelskiy O.S., Dnyshchenko V.N. Generator toka iskusstvennoj molnii dlja naturnyh ispytaniy tehniceskikh ob'ektov. Pribory i tehnika eksperimenta. 2008. No 3. 81–85 Print. 11. Baranov M.I., Kravchenko V.I. Elektrotermicheskaja stojkost' provodov i kabelej letatel'nogo apparata k porazhajushhemu dejstviju impul'snogo toka molnii. Elektrichestvo. 2013. No 10. 7–13 Print. 12. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki. Tom 3: Teorija i praktika elektrofizicheskikh zadach. Kharkiv: Tochka, 2014. 400 Print.

Поступила (received) 20.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранов Михаил Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Baranov Michael Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher Research & Design Institute «Molniya» of National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkov; tel.: (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

Рудаков Сергей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет гражданской защиты Украины, доцент кафедры ППНП, г. Харьков; тел.: (057) 707-34-38; e-mail: serg_73@i.ua.

Rudakov Sergey Valer'evich – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, National University of Civil Protection of Ukraine, Associate professor of department of Fire Prophylaxis of Settlements, Kharkov; tel.: (057) 707-34-38; e-mail: serg_73@i.ua.

УДК 519.2

Р. К. БОРИСОВ, Д. И. КОВАЛЕВ, Г. М. КОЛИУШКО, О. С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, Е. Г. ПОНУЖДАЕВА

ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВАМ БЛОКИРОВКИ ОПЕРАТИВНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ИЗГОТОВЛЕНИИ НОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Рассмотрены требования к устройствам блокировки оперативных переключений коммутационных аппаратов высокого напряжения, используемых на энергообъектах. Описаны научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию блокирующего устройства нового комплекса электрооборудования для повышения надежности и электробезопасности персонала при производстве оперативных переключений в распределительных устройствах напряжением 6–750 кВ электрических станций и подстанций. Представлена схема электрическая, и описана конструкция опытного образца устройства, прошедшего приемочные испытания в составе комплекса электрооборудования.

Ключевые слова: устройство блокировки, оперативные переключения, коммутационные аппараты, электробезопасность, высокое напряжение, распределительные устройства, электрические станции.

Введение. Проблема повышения безопасности работы персонала, а также исключения им ошибочных действий при оперативных переключениях коммутирующих устройств высоковольтного оборудования энергообъектов определяет ряд требований, предъявляемых к разработке и изготовлению новых комплексов электротехнического оборудования (КЭО). Качественное электроснабжение невозможно без внедрения передовых проектных решений с использованием «интеллектуального» управления КЭО, повышающего надежность работы в целом.

В состав КЭО входит система оперативных блокировок безопасности (ОББ), элементом которой яв-

ляется устройство блокировки оперативных переключений (УБОП).

Анализ требований к устройствам блокировки нового поколения. Находящиеся в эксплуатации устройства блокировки, а именно замки ЗБ–1, имеют малые габариты, простую конструкцию, что определяет их надежность и выполнение основных требований к ним [1]. Однако при деблокировании используется дополнительный элемент – электромагнитный ключ КЭЗ–1, либо магнитный ключ КЗ–1 [2], что усложняет действия персонала. Использование оперативного напряжения 220 В увеличивает опасность поражения