

- нс, организованных как 65536 слов 16 разрядов каждое;
- разрядность интерфейсов: – 16-ти разрядная шина данных и 20 разрядная шина адреса;
 - USB-UART преобразователь FT232BM или MAX232 для организации интерфейса между ПК и устройством.

Выводы. Разработана архитектура автоматизированной измерительной системы для разрядноимпульсных технологий в установках с подвижным электродом, которая позволяет эффективно контролировать состояние объекта управления.

Список литературы: 1. *Вовк И.Т., Овчинникова Л.Э., Назарова Н.С.* Синтез модели управления режимом высоковольтного разряда в жидкости // Сборник научных работ УДМТУ, Николаев. – 2000. – № 1 (366). – С. 128-135. 2. *Назарова Н.С.* Анализ статистической эффективности координат выходного вектора объекта управления // Сборник научных работ УДМТУ, Николаев. – 2001. – 1 (373). – С. 130-137. 3. *Назарова Н.С., Овчинникова Л.Е., Винниченко Д.В.* Разработка информационно-управляющего комплекса для разрядноимпульсных технологий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг, – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – № 37. – С. 156-164. 4. *Вовк И.Т., Вовченко А.И., Назарова Н.С.* Управление электрогидроимпульсными установками // Техническая электродинамика. Тематический вып. «Проблемы современной электротехники», Киев. – 2002. – Ч. 9. – С. 28-31.

Поступила в редакцию 22.06.2007.

УДК 621.317.32.027

Ю.С.НЕМЧЕНКО, НТУ «ХПИ»

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

У статті наведені підсумки розробки в НДПКІ «Молнія» нестандартизованих засобів виміру імпульсних магнітних полів електророзрядних установок (ЕРУ), використовуваних для випробувань технічних засобів (ТЗ) на молнієстійкість. За період з 1972 по 2004 роки проводилася теоретична розробка різних типів засобів вимірювальної техніки, їх створення та метрологічна атестація. У результаті цієї роботи було створено більш ніж 30 типів цих ЗВТ, у тому числі кілька типів широкополосних ЗВТ.

The results of the development are brought in article in RDDI «Molniya» NTU «KPI» not standard facilities of the measurement by pulsed electromagnetic flap electroradiation installation, used for test the technical facilities on lightning resistance. For period with 1972 to 2004 was conducted theoretical development of the different types of the facilities of the measuring technology, their creation and metrological qualification. As a result of this work was created more than 40 types of the facilities of the measuring technology, including several types broadband.

Введение. На Объекте национального достояния Украины – Экспериментальной базе (ЭБ) Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» (НИПКИ «Молния») Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ») эксплуатируется более 10 высоковольтных электроразрядных установок (ЭРУ), моделирующих мощные электромагнитные помехи (МЭП) естественного и искусственного происхождения, например, молниевые разряды, разряды статического электричества и др.

Эти ЭРУ предназначены для испытания технических средств (ТС), содержащих электрическое, электронное и радиотехническое оборудование и блоки, на стойкость к МЭП и выработки методов и средств защиты ТС от МЭП в рамках решения нашей основной задачи – проверки и обеспечения электромагнитной совместимости ТС.

АВД магнитных полей молниевых разрядов. Одним из поражающих факторов МЭП являются импульсные магнитные поля, имеющие чрезвычайно широкий амплитудно-временной диапазон (АВД). Рассмотрим это на примере одного из наиболее тяжелых поражающих факторов, а именно, на молниевом разряде. В соответствии с международно принятой в высоковольтной импульсной технике методикой молниевый разряд аппроксимируется униполярным импульсом биэкспоненциальной формы, рис. 1.

Такой импульс характеризуется тремя параметрами [1]:

- амплитудой A_m ;
 - длительностью фронта $T_\phi = T_{0,9} - T_{0,1}$;
 - длительностью полуспада $T_c = T_{0,5}$
- и записывается как импульс формы T_ϕ / T_c , мкс.

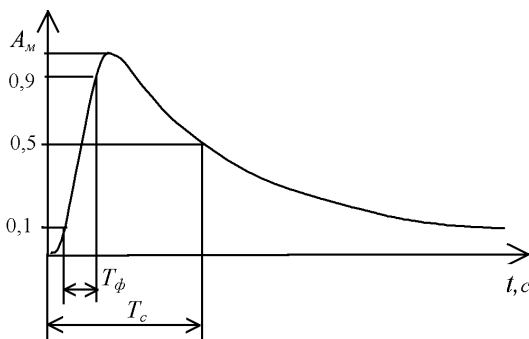


Рисунок 1 – Импульс молниевых разрядов

Исходя из этой информации, рассмотрим различные версии АВД молниевых разрядов, приводимые в ныне действующих нормативных документах

этой области, а именно:

- испытательный импульс магнитного поля формы 2/50 мкс по ГОСТ 30585-98 (ДСТУ 3681-98) [2], п.6.2.2;

- испытательный импульс электромагнитного поля (ГЭМИ) формы 0,1/1 мкс [2], п.6.2.3;

- испытательный импульс магнитного поля вдали от канала прямого удара молнии формы 6,4/16 мкс [3, 4];

- импульс прямого удара молнии амплитудой 200 кА по КТ–ВВФ/ДО–160D/ED–14D [5], применяемый при испытаниях на ЭМС самолетов (рис. 2). Он содержит четыре фрагмента (А, В, С и D), причем при испытаниях могут использоваться как отдельные фрагменты, так и их различные комбинации.

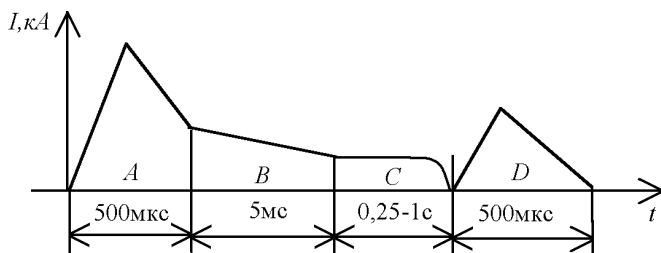


Рисунок 2 – Испытательный импульс для самолетов

Импульсы тока молнии генерируют импульсы магнитного поля с формой, идентичной форме тока, и убывающей амплитудой по мере удаления от канала молнии. В табл. 1 приведены АД магнитных полей молниевых разряда различных форм.

Таблица 1 – Амплитудно-временные диапазоны магнитных полей молниевых разряда

| Вид магнитного поля | Диапазон, амплитудное значение, H_m , А/м | Длительность фронта, T_{ϕ}^u , мкс | Длительность полуспада, T_c^u , мкс |
|--------------------------|---|---|---------------------------------------|
| по п.6.2.2 ГОСТ 30585 | 50 – 300 | $2 \pm 20 \%$ | $50 \pm 20 \%$ |
| по п.6.2.3 ГОСТ 30585 | 40 – 250 | $0,1 \pm 30 \%$ | $1,0 \pm 20 \%$ |
| по ДСТУ 2626 –94 | 100 – 1000 | $6,4 \pm 20 \%$ | $16 \pm 20 \%$ |
| по DO-160C (фрагмент А) | 100 – 10000 | до 50 | до 500 |
| по DO-160C (фр.А + фр.В) | 100 – 10000 | до 50 | до $5 \cdot 10^3$ |

Таким образом, суммарный АД всех видов испытательных импульсных магнитных полей (ИМП) лежит в пределах:

- по амплитуде H_m от 40 до 10000 А/м;
- по временным параметрам от 0,1 мкс до 5 мс.

Отдельной проблемой является измерение магнитных полей, проникающих при испытаниях ТС внутрь их корпусов (назовем их внутренние магнитные поля (ВМП)) и вызывающих сбои и даже отказы в работе ТС.

Формы ВМП зависят от экранирующих свойств корпуса ТС [6], а именно от габаритов, толщины и электрофизических свойств материала корпуса, а также наличия в корпусе ТС неоднородностей (дверей, люков, швов, неэкранированных вводов и т.д.).

Идеализированная форма ВМП приведена на рис.3, где фрагмент А – это импульс от ИМП, проникший внутрь корпуса ТС через неоднородности (по форме он повторяет импульс ИМП). Фрагмент В – это импульс ЭМП, проникший внутрь корпуса ТС через стенки корпуса (эта компонента обычно трансформирует ИМП в более низкочастотную область).

АВД импульсов внутри корпусов ТС могут иметь следующие значения:

- амплитуда, $H_m^{вн}$ – от 0,1 А/м до H_m (ИМП);
- длительность фронта, $T_{\phi}^{вн} = T_{\phi}^u$;
- длительность импульса, $T_c^{вн}$ – до 100 мс,

где $H_m^{вн}$ – напряженность магнитного поля внутри корпуса ТС;

$T_{\phi}^{вн}$ – длительность фронта импульса внутри корпуса ТС;

T_{ϕ}^u – длительность фронта исходного импульса (вне корпуса ТС);

$T_c^{вн}$ – длительность спада импульса внутри корпуса ТС.

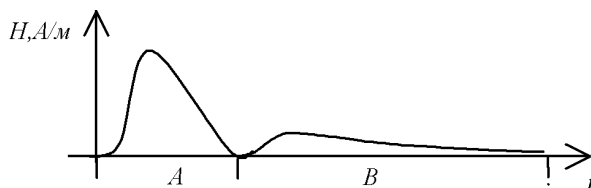


Рисунок 3 – Идеализированная форма ВМП

Таким образом, исходные требования к средствам измерительной техники (СИТ) импульсных магнитных полей молниевых разрядов как снаружи, так и внутри корпусов испытываемых ТС, можно сформулировать следующим образом:

- амплитудный диапазон измеряемых полей – от 0,1 до 10000 А/м;
- временной диапазон измеряемых полей – от 0,1 мкс до 100 мс.

Средства измерения импульсных магнитных полей. В семидесятые годы прошлого века в НИПКИ «Молния» начались интенсивные разработки, изготовление и поставки в различные организации СССР высоковольтных ЭРУ мощных электромагнитных помех. Все эти ЭРУ должны были комплек-

товаться штатным измерительным комплексом, обязательно имеющим в своем составе СИТ импульсных магнитных полей (ИНМП).

К сожалению, и тогда и сейчас отечественная промышленность не выпускала такого рода СИТ, а также отсутствовали серьезные теоретические работы по ИНМП. Поэтому мы начали самостоятельно вести всесторонние работы в этой области, которые завершились созданием более 40 видов ИНМП различного назначения, которыми и были оснащены не только ЭРУ нашей ЭБ, но и ЭРУ других организаций СССР. Это связано с тем, что разработанные нами ИНМП характеризуются следующим:

- суммарный амплитудный диапазон – от 0,1 А/м до 10^7 А/м;
- суммарный временной диапазон – от 1 нс до 100 мс;
- все разработанные ИНМП прошли метрологическую аттестацию в органах Госстандарта СССР и Украины.

Краткие сведения о наших разработках в этой области приведены в [7].

В НИПКИ «Молния» для измерения импульсных магнитных полей применяются ИНМП с индукционным измерительным преобразователем (ИП). Этот тип измерителей был отобран из других видов [8] по ряду существенных преимуществ, а именно:

- слабой зависимостью его метрологических характеристик (МХ) от климатических факторов, что особенно существенно для работы в составе ЭРУ, расположенных на открытом воздухе;
- простотой конструкции и легкостью в эксплуатации;
- широким АВД, полностью перекрывающим АВД практически любых измеряемых магнитных полей.

Для иллюстрации вышеизложенного на рис. 4 приведен общий вид одного из ИНМП, а именно ИНМП-2С микросекундного диапазона, на рис. 5 – блок-схема, поясняющая принцип работы ИНМП.

Теория работы ИНМП. Схематично ИНМП содержит индукционный измерительный преобразователь (ИП), соединяемый через интегратор (И) при помощи линии передачи информации (ЛПИ) с регистратором (Р). ИП – это рамочная антенна круглой формы, помещаемая в измеряемое магнитное поле $\vec{H}_u(t)$.

Э.д.с., наводимая при этом в ИП, определяется по закону электромагнитной индукции:

$$e_n = -\mu_o \mu_r s w \frac{dH_u(t)}{dt} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ_k – относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП;

s – площадь ИП, м²;

w – количество витков ИП;

φ – угол между направлением \vec{H}_u и нормалью к плоскости ИП.

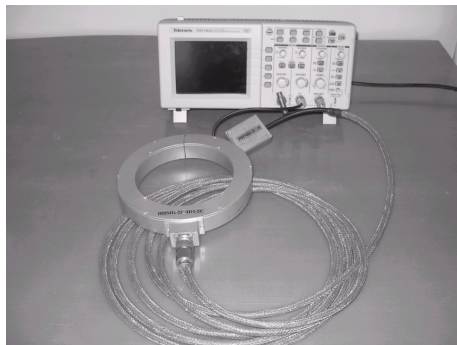


Рисунок 4 – Измеритель напряженности импульсных магнитных полей ИНМП-2С

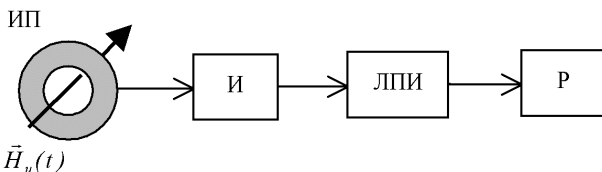


Рисунок 5 – Блок-схема ИНМП-2С: ИП – измерительный преобразователь; И – интегратор; ЛПИ – линия передачи информации; Р – регистратор; $\vec{H}_u(t)$ – измеряемое магнитное поле

Так как $\varepsilon_n \sim \frac{d\vec{H}_u(t)}{dt}$, то для получения истинной формы измеряемого магнитного поля сигнал с выхода ИП пропускают через интегратор И. На рис. 6 приведена схема замещения ИП, где L_n , R_n , C_n – собственные параметры ИП, а R_0 – входное сопротивление последующих цепей.

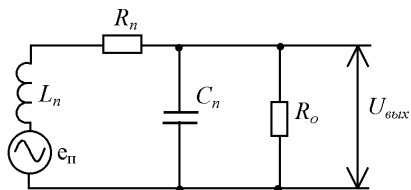


Рисунок 6 – Схема замещения измерительного преобразователя

Связь между э.д.с. e_n и напряжением на выходе ИП $U_{вых}$, описывается уравнением:

$$e_n = L_n C_n \frac{d^2 U_{\text{вых}}}{dt^2} + \left(\frac{L_n}{R_n} + R_n C_n \right) \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + \left(I + \frac{R_n}{R_o} \right) U_{\text{вых}}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что ИП является измерителем второго порядка и, вследствие этого, напряжение на его выходе содержит колебательные или апериодические составляющие, наложенные на основной импульс. Для того, чтобы сознательно использовать вытекающую из этого уравнения информацию, необходимо предъявить требования к метрологическим характеристикам (МХ) измерителя. В соответствии с ГОСТ 8.256-77 [9], к МХ, которые нас интересуют в первую очередь, относятся параметры переходной характеристики (ПХ) измерителя, а именно:

- форма ПХ;
- время нарастания ПХ – $T_n^{\text{ПХ}}$;
- постоянная времени спада ПХ – $T_c^{\text{ПХ}}$;
- коэффициент преобразования $K_n = \frac{U_{\text{вых}}}{H_u}$,

где $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе ИНМП при измерении магнитных полей с напряженностью H_u .

Из опыта эксплуатации ИНМП следует, что для получения максимальной точности измерений форма ПХ должна быть гладкой (то есть не содержать никаких аномалий) и математически простой.

Исходя из того, что поля, генерируемые ЭРУ, имеют форму биэкспоненциальных импульсов, ПХ ИНМП должна быть такой же формы, и в таком случае параметры ИНМП можно охарактеризовать простыми соотношениями:

$$T_\phi \geq (3 \div 5) T_n^{\text{ПХ}}; \quad (3)$$

$$T_u \geq (10 \div 50) T_c^{\text{ПХ}}; \quad (4)$$

$$m_y^{\min} \geq \frac{K_n H_u}{3}, \quad (5)$$

где T_ϕ , T_c – длительность фронта и спада измеряемых импульсов магнитного поля напряженностью H_u ;

m_y^{\min} – минимальная чувствительность регистратора, чаще всего электронного осциллографа.

Подставляя в (2) э.д.с. в виде одиночного скачка, то есть $e_n = 1(t)$, получим уравнения ПХ для ИП:

$$U'_{\text{вых}} = \frac{R_o}{R_o + R_n} \left[1 + \frac{1}{p_1 - p_2} (p_2 e^{-p_1 t} - p_1 e^{-p_2 t}) \right], \quad (6)$$

где p_1 и p_2 – корни характеристического уравнения:

$$p^2 + ap + b = 0; \quad (7)$$

$$a = \frac{1}{C_n R_o} + \frac{R_n}{L_n}; \quad (8)$$

$$b = \frac{R_o + R_n}{C_n L_n R_n}; \quad (9)$$

$$p_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}. \quad (10)$$

При $a^2/4 < b$ корни p_1 и p_2 будут комплексными, а ПХ – колебательной, при $a^2/4 > b$ корни p_1 и p_2 будут действительными, а ПХ – аperiodической. Минимальными по степени деформации измеряемого импульса будут ИП с критически согласованной ПХ (при $a^2/4 = b$ и $p_1 = p_2$), описываемой уравнением:

$$U'_{\text{выхк}} = \frac{R_o}{R_o + R_n} \left[1 - \left(1 + \frac{at}{2} \right) e^{-\frac{at}{2}} \right]. \quad (11)$$

Параметр $a = 2/\sqrt{L_n C_n}$ (при $R_o \gg R_n$) является одной из важнейших характеристик ИП, так как характеризует время нарастания ПХ, определяемое по формуле:

$$T_n^{\text{ПХ}} = 3,35 \sqrt{L_n C_n}. \quad (12)$$

Таким образом, из рассмотрения уравнений (6) ÷ (12) можно утверждать, что параметры ИП определяют, в первую очередь, $T_n^{\text{ПХ}}$ переходной характеристики, то есть возможность измерения высокоскоростной составляющей измеряемого импульса – его фронта T_f .

Для получения на выходе ИНМП сигнала, пропорционального H_u , необходимо сигнал с ИП проинтегрировать. Существуют два простых способа интегрирования:

- 1) с использованием элементов ИП (RL -интегрирование), рис. 7;
- 2) с внешним RC -интегратором, рис. 8.

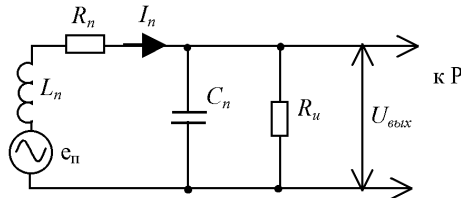


Рисунок 7 – Схема замещения ИНМП с RL -интегратором (самоинтегрирующий ИП)

В первом случае необходимо выполнить условия:

$$L_n \frac{di_n}{dt} \gg (R_n + R_u) i_n; \quad (13)$$

$$C_n \rightarrow 0.$$

При этом оказывается, что

$$e_n = K_{un} \frac{dH_u}{dt} = L_n \frac{di_n}{dt}, \quad (14)$$

где K_{un} – коэффициент пропорциональности, включающий в себя параметры по (1), то есть $i_n \sim H_u$, а, следовательно, $U_{\text{вых}} = i_n R_u \sim H_u$. Такого рода ИП называют самоинтегрирующими с постоянной интегрирования

$$T_{\text{инт}}^{RL-c} = \frac{L_n}{R_u + R_n}. \quad (15)$$

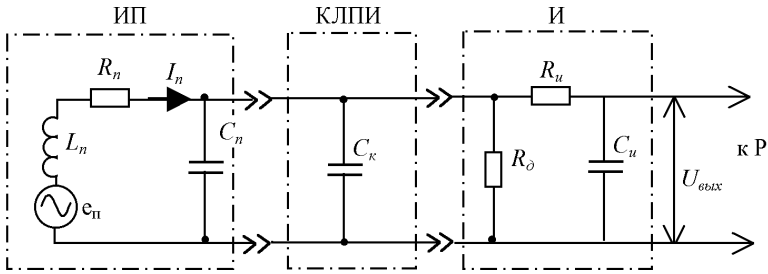


Рисунок 8 – Схема замещения ИНМП с внешним RC-интегратором (несамоинтегрирующий ИП)

Условия малоискаженного измерения формы биэкспоненциальных импульсов магнитного поля вида $H_u = H_{\text{max}}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, характерных для ЭРУ большой энергии, самоинтегрирующими ИП, можно выразить как:

$$R_u C_n \ll \frac{1}{\beta}; \quad (16)$$

$$T_{\text{инт}}^{RL-c} \ll \frac{1}{\alpha}.$$

У несомаинтегрирующих ИП на выход включают RC-цепочку, тогда при выполнении условий:

$$U_{R_u} \gg U_{C_u}; \quad U_{R_u} \gg U_{L_n}; \quad R_u \gg R_n; \quad C_n \rightarrow 0, \quad (17)$$

$$i_n = \frac{e_n}{R_n} = \frac{K_{un}}{R_u} \frac{dH_u}{dt}; \quad (18)$$

$$U_{C_u} = \frac{1}{C_u} \int i_n dt = \frac{K_{un}}{R_u C_u}, \quad (19)$$

где $R_u C_u = T_{\text{инт}}^{RC-n}$ – постоянная интегрирования RC-интегратора несомаинтегрирующего ИП.

Таким образом, способность ИНМП измерять низкоскоростную составляющую измеряемого импульса магнитного поля определяется постоянной времени спада ПХ $T_c^{ПХ}$, то есть постоянной интегрирования $T_{инт}^{RC-n}$.

Коэффициент преобразования ИП обоих видов определяется по формуле

$$K_n = \frac{U_{вых}}{H_{max}} = \frac{\mu_o \mu_r S w \cdot \cos \varphi}{T_{инт}}, \quad (20)$$

где $U_{вых}$ – напряжение на входе осциллографа (выходное напряжение ИП), В;

H_{max} – амплитуда напряженности измеряемого магнитного поля, А/м;

$T_{инт} = T_{инт}^{RL-c}$ для самоинтегрирующих ИП и $T_{инт} = T_{инт}^{RC-n}$ для несамоинтегрирующих ИП

Для определения области применения ИНМП с ИП обоих видов необходимо их сравнить по чувствительности и возможности удовлетворения условиям (16), (20) при измерениях магнитной полей с различными временными характеристиками:

При измерении полей с наносекундными фронтами несамоинтегрирующие ИП должны иметь малую индуктивность L_n , то есть малый параметр $S \cdot w$ и, значит, малую чувствительность. В то же время у самоинтегрирующих ИП время нарастания ПХ не зависит от L_n , а, следовательно, параметры $S \cdot w$ и K_n могут быть достаточно велики.

При измерении полей миллисекундной длительности у самоинтегрирующих ИП невозможно выполнить условие $T_u \gg T_c^{ПХ}$ (4), так как даже при сопротивлении внешней подключаемой цепи $R_o \rightarrow \infty$, постоянная интегрирования $T_{инт}^{RL-c}$ не может достигнуть большой величины (15). В то же время у ИНМП с RC-интегратором условие $T_u \gg T_c^{ПХ}$ легко выполнимо.

Исходя из приведенных предпосылок можно сделать вывод, что:

1) для измерения магнитных полей наносекундного диапазона предпочтительны ИНМП с самоинтегрирующими ИП, а для измерения магнитных полей микро- и миллисекундного диапазона – ИНМП с RC-интегратором;

2) применение ферритовых сердечников для повышения чувствительности самоинтегрирующих ИП (K_n^c) и несамоинтегрирующих ИП (K_n^H) за счет большого μ_r нежелательно, так как зависимость $\mu_r = f(H_u, w)$ может приводить к нелинейным искажениям выходного сигнала ИНМП, а, кроме того, магнитное поле в зоне измерения значительно искажается.

После изложенной преамбулы по теории ИНМП с ИП перейдем к рассмотрению конструктивных параметров ИНМП для измерения магнитных полей по табл. 1, а также ВМП.

Даже поверхностный анализ уравнения (20) показывает, что нереально создать образец ИНМП, пригодный для измерения вышеуказанных магнитных полей. Охватить весь АД магнитных помех молниевое разряда можно

только комплектом ИНМП, состоящим из ИНМП для измерения отдельных участков измеряемых полей. Наибольшую сложность в этом случае носит процесс «сшивания» результатов измерения отдельными ИНМП, а, следовательно, и погрешности такого измерения будут достаточно велики. Эта сложная задача была решена в нашем институте после создания широкополосного ИНМП-Ш, который позволил одним прибором измерять импульсы магнитного поля с очень широким АВД [6]. Пояснительная электрическая схема ИНМП-В приведена на рис. 9.

Принцип построения широкополосных ИНМП. Измеритель содержит два независимых канала: канал измерения фронта импульса – ИНМП-ВФ и канал измерения длительности импульса – ИНМП-ВС. Канал ИНМП-ВФ достоверно измеряет форму импульса в диапазоне времен от единиц наносекунд до 10 мкс, а канал ИНМП-ВС – в диапазоне времен от 10 мкс до нескольких десятков миллисекунд. Канал ИНМП-ВФ построен по схеме ИНМП с RL -интегратором (элементы $R1, L1$), а канал ИНМП-ВС – по схеме с RC -интегратором (элементы $L2, C1, R5$).

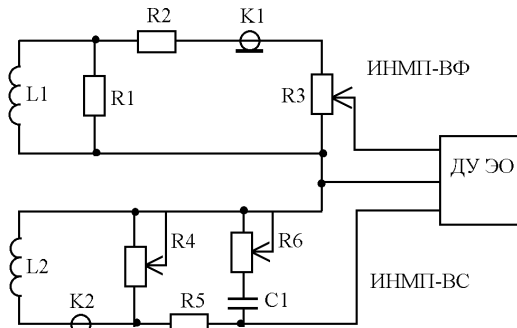


Рисунок 9 – Схема широкополосного ИНМП

Рассмотрим принцип работы ИНМП-Ш на примере измерения импульсов магнитного поля ЭРУ, у которых крутой фронт и очень большой спад, то есть $H(t) = K_m H_{\max} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, а $\beta / \alpha \geq 10^5 \div 10^6$. Напряжение на выходе каналов ИНМП-ВФ и ИНМП-ВС в этом случае можно записать как:

$$U_\phi = K_m^\phi (e^{-t/T_u^\phi} - e^{-\beta t}); \quad (21)$$

$$U_c = K_m^c (e^{-\alpha t} - e^{-t/T_n^c}), \quad (22)$$

где T_u^ϕ – постоянная интегрирования канала фронта;

T_n^c – постоянная времени нарастания переходной характеристики канала спада импульса;

K_M, K_M^ϕ, K_M^c – коэффициенты формы, позволяющие довести уровни импульсов до единицы при «сшивании» импульсов.

Сумма обоих сигналов

$$U_{\text{вых}} = K_M^\phi e^{t/T_n^\phi} - K_M^\phi e^{-\beta t} + K_M^c e^{-\alpha t} + K_M^c e^{t/T_n^c}. \quad (23)$$

При выполнении условий:

$$T_n^\phi = T_n^c; \quad (24)$$

$$K_M^\phi = K_M^c; \quad (25)$$

$$U_{\text{вых}} = K_M^\phi (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \sim H(t). \quad (26)$$

Таким образом, для реализации (26) необходимо, чтобы амплитуды сигналов с выходов обоих каналов были одинаковы (условие (25)), а формы сигналов на спаде импульса канала ИНМП-ВФ и фронта импульса канала ИНМП-ВС совпадали (условие (24)). Реализация условия (24) достигается путем плавного изменения T_n^c при $T_n^\phi = \text{const}$ переменным резистором $R4$, уменьшение величины которого приводит к «завалу» переходной характеристики ИНМП-ВС, то есть к росту T_n^c . Реализация условия (25) осуществляется изменением U_ϕ резистором $R3$ при $U_c = \text{const}$. Сложение сигналов U_ϕ и U_c производится в дифференциальном усилителе осциллографа (ДУ ЭО).

На рис. 10 приведены осциллограммы, иллюстрирующие работу ИНМП-Ш при измерениях импульсов магнитного поля прямоугольной формы (кривая 4). Кривая 2 представляет собой сигнал U_ϕ , кривая 1 – сигнал U_c , а кривая 3 – $U_\phi + U_c$.

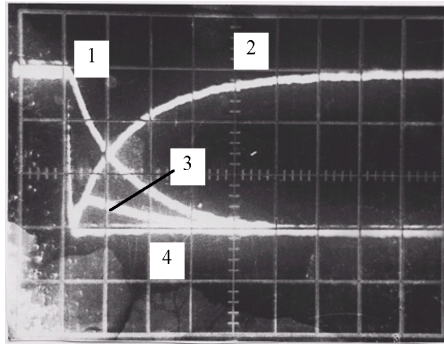


Рисунок 10 – Иллюстрация работы ИНМП-Ш

Из-за некоторого отличия формы реальных сигналов U_ϕ и U_c от описанных уравнениями (21) и (22), в месте их стыка наблюдается небольшой провал, который устраняется при настройке измерителя корректирующим резистором $R6$ (кривая 4).

Конструктивно блок измерительных преобразователей ИНМП-Ш пред-

ставляет собой два соосных и параллельных друг другу одинаковых по габаритам ИП (ИП-Ф и ИП-С), закрепленных на расстоянии d , где d – диаметр ИП. В разных конструкциях ИНМП-Ш его значение варьируется от 100 до 200 мм.

В первых конструкциях ИНМП-Ш передача информации от ИП к Р осуществлялась по триаксиальному измерительному кабелю марки РК с дополнительной оплеткой типа ПМЛ 10х16 длиной 10-50 м, что снижало помехозащищенность измерителя при измерениях магнитных полей ЭРУ, генерирующих мощные помехонесущие электрические поля: измерительный кабель в этом плане являлся наиболее слабым звеном измерительной цепи. Для устранения этого недостатка кабельная линия передачи информации в дальнейшем была заменена на волоконно-оптическую (ВОЛС) на световоде марки КП-1 с диаметром внутренней жилы 1 мм и длиной до 200 м. На рис. 11 приведена блок-схема ИНМП-Ш с ВОЛС.

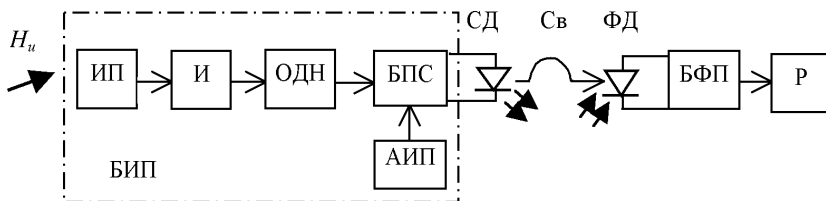


Рисунок 11 – Блок-схема ИНМП-Ш с ВОЛС

Схема работает следующим образом. Сигнал с ИП, помещенного в измеряемое магнитное поле H_u , через интегратор (И) и омический делитель напряжения (ОДН) поступает на вход блока преобразования электрического сигнала в световой (БПС). Все эти элементы, включая автономный источник питания (АИП), составляют блок индукционного преобразователя (БИП). Сигнал в БПС преобразуется в пропорциональный ему по интенсивности световой сигнал – на выходе БПС стоит излучающий светодиод АЛ-139. К окну светодиода подстыковывается гибкий моносветовод (Св) типа КП-1 длиной до 200 м. На выходе Св установлен фотоприемник (БФП) с фотодиодом типа ФД-227, в котором происходит обратное преобразование светового сигнала в пропорциональный ему электрический сигнал и дальнейшее усиление до уровня, достаточного для работы осциллографа любого типа. Элементы БПС+Св+БФП образуют волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС).

И в заключение необходимо сказать, что в НИПКИ «Молния» было разработано несколько типов ИНМП-Ш; характеристики некоторых из них приведены в табл. 2.

Общий вид измерителя с ВОЛС типа ИНМП-ЛГ показан на рис.12.

Таблица 2 – Характеристики ИНМП-Ш

| Тип ИНМП-Ш | Назначение | Амплитудный диапазон, А/м | Временной диапазон | Вид ЛПИ | Габариты БИП, мм |
|------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------------|------------------|
| ИНМП-В1Т | Измерение ИМП по трем координатам | 10 – 1000 | 40 нс – 10 мс | кабельная $\ell=50$ м | 250×250× ×250 |
| ИНМП-ЭТ | Измерение ВМП по трем координатам | 0,1 – 100 | 50 нс – 100 мс | кабельная $\ell=50$ м | 250×250× ×250 |
| ИНМП-ЛГ | Измерение ИМП по одной координате | 100 – 3000 | 20 нс – 100 мс | ВОЛС $\ell=100$ м | 120×120× ×250 |

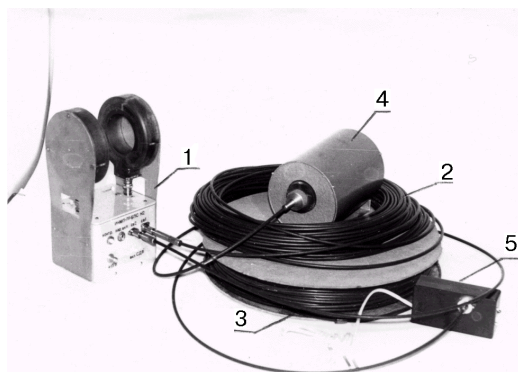


Рисунок 12 – Общий вид ИНМП-ЛГ с ВОЛС: 1 – БИП; 2 – волоконный световод Св канала измерения; 3 – волоконный световод Св канала дистанционного включения БИП; 4 – БФП; 5 – блок дистанционного включения БИП.

Список литературы: 1. Техника высоких напряжений // Под ред. *М.В.Костенко*. – М.: «Высшая школа», 1973. 2. ГОСТ 30585-98 (ДСТУ 3681-98). Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний. 3. IEC 61000-4-5. Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 4. – Testing and measurement techniques. Section 5: Surge immunity test. First edition 1. 4. ДСТУ 2626-94. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Стійкість до імпульсного магнітного поля. Технічні вимоги і методи випробувань. 5. Квалификационные требования КТ-ВВФ/DO-160D/ED-14D/. Условия эксплуатации окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. Раздел 23.0 Прямое воздействие молнии. 6. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике связи. – Пер. с немецкого В.М. Лаврова, ГЭИ, М.-Л.: 1957. – 327 с. 7. *Лантушко Б.Н., Лесной И.П., Немченко Ю.С.* Средства измерения напряженности импульсных электрических, магнитных полей, токов и напряжений // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника: Сб. научных трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – № 7. – С. 127-129. 8. *Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н., Князев В.В.* Метрологическое обеспечение

эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник НТУ «ХПИ». Электроэнергетика и преобразовательная техника: Сб. научных трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004, №35. – С. 29-54. 9. ГОСТ 8.256-77. Государственная система измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения.

Поступила в редколлегию 29.05.2007.

УДК 621.317.39

Ю.С.НЕМЧЕНКО; Л.М.БОЛОТОВА; Ю.Н.ГИРКА; НТУ «ХПИ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

У статті розглядаються особливості підбору полеутворюючих систем для метрологічної атестації засобів вимірювання магнітних полів розробки НДПКІ «Молнія». Особлива увага приділена питанню похибки вимірювання магнітного поля, яка пов'язана з вибором місця розташування вимірної перетворювача в робочому об'ємі полеутворюючої системи. Наведено приклад метрологічної атестації конкретного вимірника напруженості магнітного поля.

In this article, peculiarities of selection of field forming system for metrological certification of measuring means of magnetic fields developed in RDI «Molniya» are considered. Special attention is given to the question of measurement error of magnetic field connected with the choice of position of measuring transducer in the working volume of field-forming system. Example of metrological certification of particular magnetic field intensity meter is considered.

За время интенсивной эксплуатации высоковольтных электроразрядных установок (ЭРУ) НИПКИ «Молния» было создано большое количество уникальных средств измерения текущих и выходных параметров ЭРУ, в том числе более 40 типов средств измерения импульсных магнитных полей (ИНМП).

Такое большое количество ИНМП [1] необходимо было для суммарного перекрытия чрезвычайно широкого амплитудно-временного диапазона (АВД) ЭРУ, а так же АВД магнитных полей, проникающих извне в испытуемые технические средства (ТС).

В реальности этот АВД составляет по амплитудам от 0,1 А/м до 10^7 А/м, а по времени 1 нс – 0,1 с, то есть для измерения этих АВД необходимы ИНМП, перекрывающие 8 порядков как по амплитуде, так и по времени. Измеритель для перекрытия всего АВД практически сделать невозможно, поэтому и было разработано большое количество ИНМП, дискретно перекрывающих весь требуемый АВД ЭРУ. ИНМП, предназначенные для измерения