

УДК 621.317

В. В. Колобов, М. Б. Баранник, В. Н. Селиванов

Генератор импульсов с индуктивным накопителем энергии для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи

Импульсный метод применяется для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи, соединенных грозозащитным тросом. При импульсном воздействии могут использоваться измерительные комплексы, основанные на определении временной зависимости мгновенного сопротивления заземляющего устройства и содержащие генераторы импульсов тока прямоугольной формы. Генератор обеспечивает минимальный фронт импульса и постоянство его амплитуды на интервале измерений. В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что применение генераторов на основе индуктивного накопителя энергии обладает рядом преимуществ. Данные генераторы позволяют формировать в контуре с током импульс, форма которого на измерительном интервале практически не зависит от неравномерного распределения волнового сопротивления вдоль линии с током и наличия отраженных волн от ее конца. Генераторы с индуктивным накопителем обладают лучшими энергетическими характеристиками, что способствует успешному проведению измерений сопротивления заземляющих устройств, расположенных в районах с высоким удельным сопротивлением грунта. Измерительные комплексы с генератором импульсов тока на индуктивном накопителе, кроме выполнения прикладной задачи измерения стационарного сопротивления заземления опор линий электропередачи без отсоединения грозозащитного троса, могут быть использованы для решения более общих задач грозозащиты, в частности для определения параметров простейшей схемы замещения одиночного заземляющего устройства. Рассмотрены два варианта построения схемы выходного каскада генератора: 1) на основе импульсного трансформатора и IGBT-ключа; 2) накопительного дросселя и MOSFET-ключей. Приведены экспериментальные осциллограммы импульсов тока. Анализ данных осциллограмм свидетельствует о том, что схема генератора с накопительным дросселем обладает лучшими характеристиками для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: заземляющие устройства, стационарное сопротивление, опоры линий электропередачи, грозозащитный трос, генератор импульсов тока, индуктивный накопитель энергии, повышающий трансформатор, дроссель, размыкатель тока.

Введение

Импульсное воздействие является одним из методов, с помощью которого определяется сопротивление заземляющих устройств (ЗУ) опор воздушных линий электропередачи (ВЛ), соединенных грозозащитным тросом (без его отключения). Большинство существующих измерителей устанавливают так называемое импульсное сопротивление R_p заземляющих устройств, численно равное отношению максимума падения напряжения на ЗУ относительно удаленной земли к максимуму вводимого в ЗУ тока [1–3]. Как показывают теоретические и экспериментальные исследования [3; 4], измеренное значение R_p в общем случае не совпадает со стационарным сопротивлением ЗУ R_f , определенным с использованием низкочастотных методов. Соотношение между R_p и R_f зависит от многих факторов: формы испытательного импульса; конфигурации и размеров элементов ЗУ; удельного сопротивления грунта и т. д. Однако в существующих нормативных документах по грозозащите приводятся допустимые значения именно стационарного сопротивления ЗУ. Таким образом, разработка импульсных измерительных комплексов, позволяющих определять стационарное сопротивление ЗУ опор ВЛ, находящихся под грозотросом, является актуальной задачей по совершенствованию грозовой защиты воздушных линий электропередачи.

Эта задача может быть решена с помощью измерительных комплексов, определяющих на интервале измерения, ограниченном временем растекания токов в ближней зоне ЗУ, кривую мгновенного сопротивления (переходного импеданса ЗУ, transient grounding impedance) $Z_G(t)$ ¹ [1; 4], полученную на основе временных зависимостей падения напряжения на ЗУ относительно удаленной земли $U_G(t)$ и импульсного тока $I_G(t)$ через ЗУ: $Z_G(t) = U_G(t)/I_G(t)$. В различных источниках зависимость $Z_G(t)$ обозначается "surge impedance", "dynamic impulse impedance" и др. [2].

В измерительных устройствах, определяющих переходный импеданс ЗУ, могут использоваться генераторы импульсов напряжения (ГИН), аналогичные генераторам, применяемым в измерителях импульсного сопротивления ЗУ, которые формируют стандартные испытательные импульсы грозовой формы. Так, в прототипе портативного измерителя импеданса ЗУ [5] ГИН формирует импульсы двухэкспоненциальной формы с регулируемой амплитудой и временем нарастания и спада.

¹ IEEE 81-2012. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York, 2012. 86 p.

Более обоснованным является использование в измерителях переходного импеданса ЗУ импульсов тока и напряжения прямоугольной формы с короткими (первые сотни наносекунд) фронтами. Такие импульсы позволяют точнее моделировать воздействие на ЗУ токов молнии, которые имеют широкий частотный спектр (если для первичного разряда молнии время нарастания составляет от 1 до 10 мкс, то для повторных разрядов – 0,1–1 мкс² [6]). Квазипостоянная на интервале измерения амплитуда $U_G(t)$ [или $I_G(t)$] повышает точность определения переходного импеданса и стационарного сопротивления ЗУ.

Экспериментально полученная временная зависимость переходного импеданса ЗУ $Z_G(t)$ на интервале измерения может обрабатываться по различным алгоритмам. Так, в программно-измерительном комплексе ZED-Meter³, предназначенном для измерения сопротивлений ЗУ опор ВЛ без отсоединения грозотроса, устанавливается медианное значение $Z_G(t)$, полученное на измерительном интервале 500 нс < t < 1 000 нс. Начальный момент измерительного интервала определяется временем окончания переходных процессов и отражений волны тока от конструктивных элементов опоры и ее заземлителя, а конечный – приходом отражений от заземляющего электрода токового контура (1 000 нс при расстоянии от ЗУ до заземляющего электрода 100 м). ГИН комплекса формирует измерительный импульс прямоугольной формы с временем нарастания 100–150 нс и длительностью 1–1,5 мкс. Окончательное значение стационарного сопротивления опоры R_f определяется с учетом того, что на интервале измерения параллельно ЗУ опоры включены два волновых сопротивления линии "грозотрос – поверхность земли" Z_{OHGW} ⁴.

Для описания реакции отдельностоящих сосредоточенных ЗУ на импульсное воздействие используют простейшую $R-L-C$ -схему замещения [6]. Если форма импульса тока, формируемого измерительной системой, на достаточном временном интервале близка к единичному импульсу (единичной функции Хэвисайда), то, нормируя переходное сопротивление с учетом реальной амплитуды импульса тока, получают переходную характеристику ЗУ $z(t)$. Учитывая, что полученная переходная характеристика ЗУ не зависит от параметров импульса тока молнии, и используя интеграл Дюамеля, определяют напряжения, возникающие на ЗУ под воздействием грозовых импульсов тока различной формы и амплитуды. По передаточной характеристике с помощью различных алгоритмов синтезируют $R-L-C$ -схему замещения ЗУ и используют ее при проведении комплексных расчетов по грозозащите [7].

Таким образом, кроме прикладного применения (для определения стационарного сопротивления ЗУ опор ВЛ под грозотросом), комплексы, использующие измерительные импульсы тока прямоугольной формы и определяющие переходный импеданс ЗУ на интервале измерения, могут применяться при решении более общих задач грозозащиты.

Материалы и методы

В Центре физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН проводятся многолетние исследования по грозозащите, включающие разработку методик и алгоритмов, позволяющих на основе экспериментально полученных временных зависимостей тока через ЗУ $I_G(t)$, падения напряжения на ЗУ $U_G(t)$ и расчетной кривой переходного импеданса $Z_G(t)$ определять параметры элементов простейшей $R-L-C$ -схемы замещения сосредоточенного ЗУ при импульсном воздействии. В процессе изучения учитывается специфика грунтов Крайнего Севера, характеризующихся высоким удельным сопротивлением. В результате проведенных исследований были разработаны принцип действия, функциональная и принципиальная схемы генераторно-измерительного комплекса для экспериментального определения параметров ЗУ импульсным методом, испытаны несколько действующих макетов и создан опытный образец прибора для измерения сопротивления ЗУ опор ВЛ без отсоединения грозотроса (рис. 1). Методика измерений, этапы разработки схемы прибора, его устройство и принцип действия, а также результаты полевых испытаний были опубликованы ранее в ряде работ [1; 3; 4; 8].

Кроме требований к генератору импульсов тока измерительного комплекса, рассмотренных во введении (крутой фронт и постоянство амплитуды на интервале измерения), при выборе схемы генератора принимались во внимание следующие особенности определения сопротивления ЗУ импульсным методом:

– в процессе измерения необходимо учитывать волновые свойства всех проводников, по которым протекает ток генератора. Как отмечалось выше, волновое сопротивление линии "грозотрос – поверхность земли" составляет 400–500 Ом⁵ [3];

² IEEE 81-2012. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. New York, 2012. 86 p.

³ 1008734. The EPRI Zed-Meter: a new technique to evaluate transmission line grounds. URL: <https://ru.scribd.com/document/352745356/1008734-the-EPRI-Zed-Meter>.

⁴ См.: Там же; Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped with earth wires. URL: file:///C:/Users/frolovala/Downloads/ELT_220_6.pdf.

⁵ 1008734. The EPRI Zed-Meter: a new technique to evaluate transmission line grounds. URL: <https://ru.scribd.com/document/352745356/1008734-the-EPRI-Zed-Meter>.

– волновое сопротивление линии "проводник токового контура – поверхность земли" также близко к значению 400–500 Ом, но из-за различного расстояния от проводника до поверхности земли в действительности имеет значительную неравномерность вдоль линии⁶ [3];

– при несовпадении волнового сопротивления линии с сопротивлением заземляющего электрода возникает отраженная волна тока, время прихода которой к ЗУ зависит от длины линии и скорости распространения волны вдоль нее (обычно порядка 200 м/мкс). При длине проводника токовой линии 50 м через 500 нс на временной зависимости $I_G(t)$ появится отражение от заземляющего электрода. Обеспечить сопротивление заземляющего электрода 400–500 Ом, необходимое для согласования с линией, в условиях грунтов с высоким удельным сопротивлением практически невозможно;

– сопротивление ЗУ опор ВЛ лежит в широком диапазоне – от единиц до первых сотен омов (для регионов с плохо проводящими грунтами). Суммарное сопротивление контура с током с учетом сопротивления электрода может составлять несколько килоомов [4]. Соответственно, для проведения измерений в условиях плохо проводящих грунтов импульс тока должен обладать достаточной энергией. Схема генератора должна позволять изменять амплитуду импульса тока.

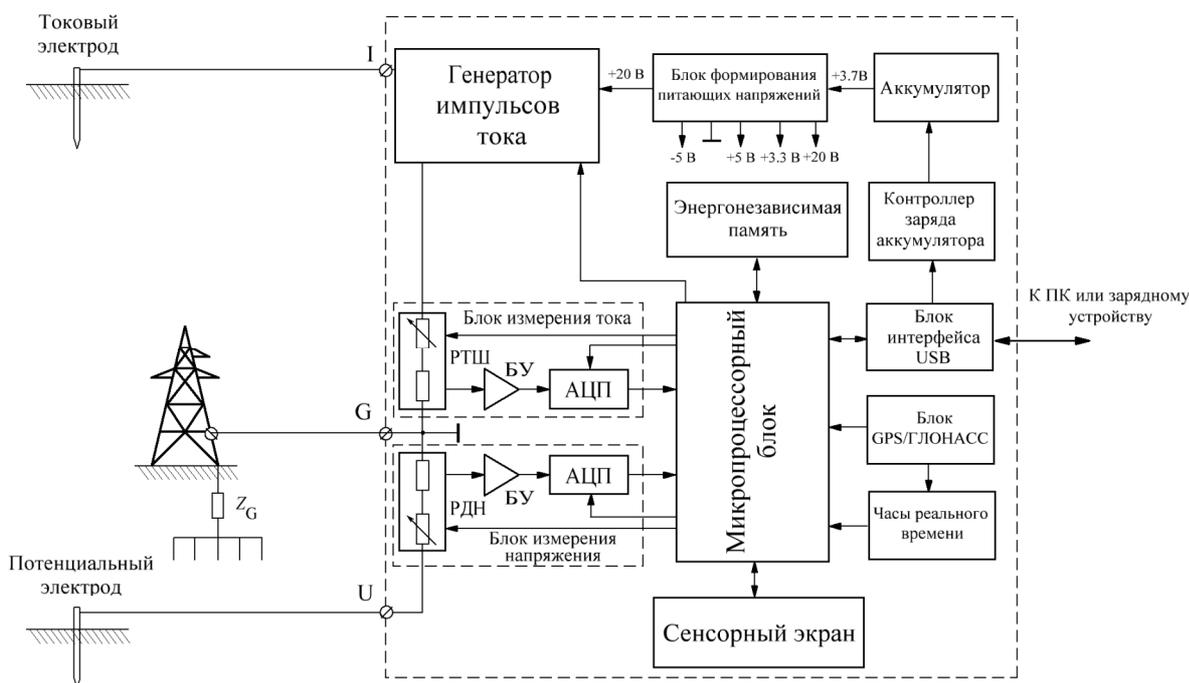


Рис. 1. Структурная схема измерителя сопротивления заземляющих устройств импульсным методом:

РТШ – регулируемый токовый шунт; РДН – регулируемый делитель напряжения;

БУ – буферный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Fig. 1. Block diagram of the device for measuring grounding resistance using the impulse method:

РТШ – the adjustable shunt-based current sensor; РДН – the adjustable voltage divider;

БУ – the buffer amplifier; АЦП – the analog-to-digital converter

В соответствии с приведенными требованиями в приборе для измерения сопротивления ЗУ импульсным методом был использован генератор импульсных токов (ГИТ) на основе индуктивного накопителя энергии (ИНЭ). ГИТ такого типа обладает рядом преимуществ перед генераторами на основе емкостного накопителя, применяемыми в существующих измерительных устройствах аналогичного назначения⁷ [3; 5].

Так как запас энергии магнитного поля в ИНЭ и ток через ИНЭ не могут меняться скачком, то ГИТ на основе ИНЭ способен (независимо от согласования волнового сопротивления линии с током Z_{WCL} с нагрузкой – сопротивлением заземляющего электрода R_{CE} – и распределения волнового сопротивления вдоль нее) обеспечить постоянство амплитуды импульса в токовом контуре на интервале времени, достаточном для проведения измерений.

⁶ 1008734. The EPRI Zed-Meter: a new technique to evaluate transmission line grounds. URL: <https://ru.scribd.com/document/352745356/1008734-the-EPRI-Zed-Meter>.

⁷ Methods for measuring the earth resistance of transmission towers equipped with earth wires. URL: file:///C:/Users/frolovala/Downloads/ELT_220_6.pdf.

Основными элементами схемы такого ГИТ являются индуктивный накопитель энергии и размыкатель тока [9]. В ходе исследований была разработана схема ГИТ [8], в которой в качестве ИНЭ используется повышающий трансформатор, а в качестве размыкающего ключа – IGBT-транзистор (рис. 2, а). Выходной каскад ГИТ выполнен по схеме повышающего обратного преобразователя (step-up flyback converter), в котором фаза накопления (накачки) энергии и фаза передачи ее в нагрузку разделены во времени, а повышающий трансформатор (обозначен T на рис. 2, а) является по сути двухобмоточным накопительным дросселем [10].

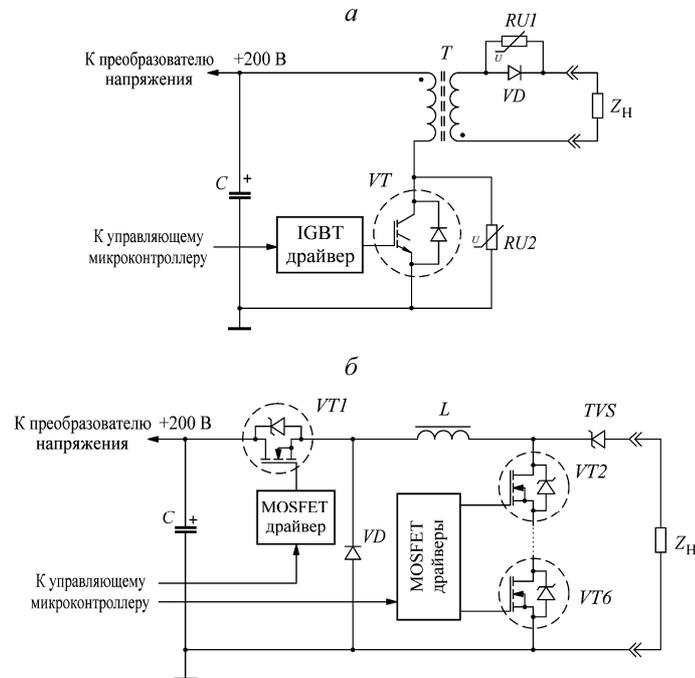


Рис. 2. Функциональная схема выходного каскада генератора импульсов тока:
 а – с трансформатором в роли индуктивного накопителя и IGBT-транзистором в качестве ключа;
 б – накопительным дросселем и MOSFET-транзисторами

Fig. 2. Circuit diagrams of the inductive pulse generator output stage: а – with the transformer based inductive energy storage and the IGBT switch; б – with the inductor and MOSFET switches

Изменением длительности фазы накачки $\Delta t_{нк}$ можно регулировать энергию, запасаемую в ИНЭ, и амплитуду импульса тока в нагрузке соответственно.

Как уже отмечалось, особенностью работы ГИТ в составе разработанного измерительного комплекса является наличие волновых процессов в нагрузке – линии с током. Сопротивление нагрузки генератора Z_H складывается из сопротивления ЗУ и сопротивления токовой линии, определяемого импульсными процессами за время пробега волны тока до конца линии и обратно (0,5–1 мкс). По истечении времени двойного пробега вторая составляющая Z_H в зависимости от степени согласования линии с заземляющим электродом может определяться относительно небольшим волновым сопротивлением линии (400–500 Ом) или стремиться к сопротивлению заземляющего электрода, которое может быть значительным (1–3 кОм в районах с высоким удельным сопротивлением грунта). В случае обрыва подводника токового контура при проведении измерений сопротивление нагрузки ГИТ будет бесконечно большим ($Z_H = \infty$). Так как фазе разряда ИНЭ амплитуда напряжения коллектор/эмиттер U_{CE} транзистора VT пропорциональна Z_H , то при большом значении Z_H напряжение U_{CE} может превысить предельно допустимую величину U_{CEmax} (даже при правильно выбранном по классу допустимого напряжения ключе). Для защиты транзистора от пробоя в схеме используется варистор $RU2$ [8].

Другой варистор $RU1$ используется для защиты диода (обозначен VD на рис. 2, а) от перенапряжения, возникающего на нем в том случае, если ток в нагрузке носит периодический характер. Характер тока (периодический или аperiodический) определяется соотношением Z_H и характеристического сопротивления колебательного контура, образованного емкостью проводника токовой линии относительно поверхности земли C_{CL} и индуктивностью намагничивания трансформатора ИНЭ L_{μ} [8].

На основе разработанной схемы был создан действующий макет ГИТ с ИНЭ, позволяющий формировать импульс тока амплитудой до 5 А и с длительностью фронта 200–300 нс. Принципиальная

схема ГИТ, эпюры напряжений и токов, поясняющие его работу, обоснование выбранной элементной базы подробно рассмотрены авторами в статье [8]. Здесь лишь приведем экспериментальные осциллограммы импульсов тока (рис. 3), полученные при измерении сопротивления одного и того же ЗУ с использованием ГИТ на основе емкостного и индуктивного накопителей энергии. В ходе испытаний исследовалась работа генераторов при неравномерном распределении волнового сопротивления вдоль линии с током и при наличии отраженных от конца линии волн. В обоих случаях форма импульса тока, формируемого генератором на основе ИНЭ (осциллограммы 2 на рис. 3), сохраняется неизменной.

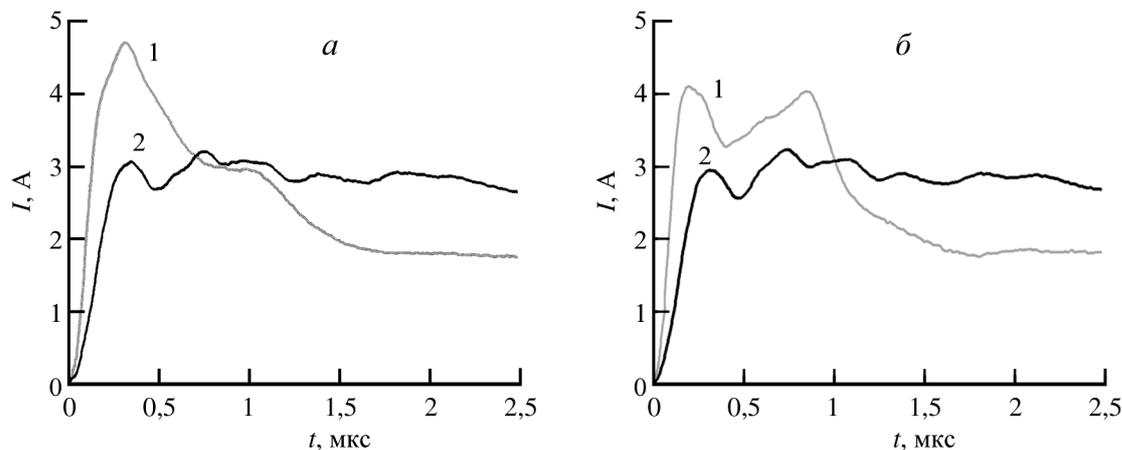


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы импульса тока через заземляющее устройство, полученные с использованием генераторов импульсных токов на основе емкостного (1) и индуктивного (2) накопителей энергии: *a* – в случае неравномерного распределения волнового сопротивления вдоль линии с током; *б* – при наличии отражений от заземляющего электрода линии с током

Fig. 3. Experimental waveforms of current pulse injected into the grounding system obtained by the pulse generator based on capacitive (1) and inductive (2) storage: *a* – in case of unevenly distributed surge impedance along the current lead; *б* – in case of reflections from the remote end of the current lead

На плато импульса тока, формируемого ГИТ с ИНЭ, наблюдаются паразитные колебания (осцилляции). Причиной возникновения осцилляций тока является колебательный контур, состоящий из индуктивности рассеяния трансформатора L_L и суммарной приведенной паразитной емкости C_{Σ} , образованной комбинацией межобмоточной емкости трансформатора $C_{\text{ш}}$, паразитных емкостей IGBT-транзистора и диода VD . Причины возникновения и способы подавления таких паразитных колебаний подробно рассматриваются в работах, посвященных разработке схем обратноходовых преобразователей [10, с. 268; 11].

Одним из способов уменьшения осцилляций является минимизация межобмоточной емкости и индуктивности рассеяния трансформатора. Отметим, что минимизация L_L необходима еще и потому, что значительная величина индуктивности рассеяния приводит к затягиванию фронтов импульсов тока. Для уменьшения L_L в трансформаторе разработанного ГИТ применено секционирование обмоток, а для минимизации $C_{\text{ш}}$ выдержаны зазоры между обмотками [8].

Другим способом подавления паразитных осцилляций является применение демпфирующих (снабберных) цепей [11]. Но такое решение, широко используемое в схемах обратноходовых преобразователей напряжения, не может быть применено в схеме ГИТ, так как установка указанных цепей приводит к затягиванию фронта импульса тока.

Исходя из вышеизложенных фактов, была разработана бестрансформаторная схема ГИТ (рис. 2, б), в которой в качестве ИНЭ используется катушка индуктивности (накопительный дроссель). Первичный емкостной накопитель C схемы питается от DC-DC-преобразователя с выходным напряжением 200 В. В качестве коммутаторов тока в контуре с индуктивным накопителем применяются MOSFET-транзисторы. Замыкающий коммутатор тока (в соответствии с терминологией, принятой при построении ГИТ с ИНЭ) выполнен на одном транзисторе $VT1$, а прерыватель тока состоит из пяти последовательно включенных транзисторов $VT2-VT6$. В разработанной схеме используются N-канальные Power-MOSFET-транзисторы STF9NK90Z фирмы STMicroelectronics с максимальным током стока I_D (8 А), напряжением лавинного пробоя сток/исток V_{DSS} (900 В) и типовым сопротивлением в проводящем состоянии R_{DSon} (1,2 Ом)⁸. Замыкающий

⁸ STB9NK90Z, STF9NK90Z, STP9NK90Z, STW9NK90Z. N-channel 900 V, 1.1 Ω, 8 A, TO-220, TO-220FP, D²PAK, TO-247 Zener-protected SuperMESH™ Power MOSFET. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp9nk90z.pdf>.

коммутатор и прерыватель тока работают синхронно. В режиме накачки (заряда) ИНЭ все транзисторы открыты, и нарастающий ток протекает по цепи $C - VT1 - L - (VT2-VT6)$. Максимальная амплитуда тока через ИНЭ определяется длительностью фазы накачки Δt_{HK} . В качестве порогового элемента, препятствующего протеканию тока через нагрузку в фазе накачки, используется несимметричный супрессор (обозначен TVS на рис. 2), напряжение лавинного пробоя которого U_{BR} должно быть больше падения напряжения на транзисторах $VT2-VT6$, определяемого суммарным сопротивлением транзисторов в проводящем состоянии, при максимальном токе накачки I_{HKmax} ($V_{BR} > I_{HKmax} \cdot 5R_{DSon}$). Максимальный выходной ток разработанного ГИТ составляет 5 А. Так как амплитуда импульса выходного тока ГИТ I_{OUT} равна амплитуде тока через ИНЭ I_{HK} в момент окончания фазы накачки, то $I_{HKmax} = I_{OUTmax}$ и, соответственно, напряжение U_{BR} должно быть больше 30 В. В описываемой схеме используется супрессор P6KE39A фирмы Littelfuse с минимальным пробивным напряжением 37 В⁹.

После окончания фазы накачки все ключи в схеме закрываются. Напряжение на индуктивности L , равное напряжению на транзисторах $VT2-VT6$, в момент коммутации скачкообразно возрастает. Супрессор открывается, и ИНЭ отдает запасенную энергию в нагрузку ГИТ. В фазе разряда ИНЭ спадающий выходной ток протекает по цепи $L - TVS - Z_H$ и замыкается через диод VD (рис. 2, б). Длительность выходного импульса тока определяется параметрами разрядного контура: индуктивностью ИНЭ и Z_H .

Разработанный ГИТ с ИНЭ имеет следующие технические характеристики: форма импульса фронт/полуспад – 0,15/50 мкс при сопротивлении нагрузки 1 кОм; амплитуда импульса тока – до 5 А; напряжение на нагрузке – до 4,5 кВ; энергия импульса – до 1 Дж; режим работы – повторяющиеся импульсы с интервалом 1–2 с.

По аналогии с исследованием, представленным в статье [8], рассмотрим работу схемы в случае высокоомной нагрузки и при возникновении периодического тока в разрядном контуре.

Как уже отмечалось выше, предельным случаем высокоомной нагрузки является работа ГИТ в режиме холостого хода (например, при обрыве проводника токового контура). Обычно в схему генератора добавляется защитный электронный компонент [8], который должен ограничивать возникающее перенапряжение на транзисторах $VT2-VT6$ и частично или полностью (в случае $Z_H = \infty$) рассеивать энергию, накопленную в ИНЭ. Очевидно, что предельным режимом, который должен выдерживать защитный элемент, является режим максимальной для ГИТ амплитуды тока через ИНЭ (при максимальном времени Δt_{HK}) и холостом ходе генератора.

В рассматриваемой схеме функцию защитного элемента выполняют MOSFET-транзисторы $VT2-VT6$, переходящие в режим лавинного пробоя (avalanche mode) [12]. Для MOSFET-транзисторов первых поколений работа в режиме лавинного пробоя считалась запрещенным (аварийным) режимом. Разработчики аппаратуры рассчитывали схемы устройств, в которых MOSFET-ключи коммутируют индуктивную нагрузку (преобразователи напряжения, приводы двигателей и т. п.), таким образом, чтобы транзистор не попадал в режим пробоя [13]. Усовершенствования в области теплового сопротивления кристалла и высокая прочность конструкции МОП-структуры современных MOSFET-транзисторов обеспечивают их повышенную устойчивость в режиме лавинного пробоя. Практически все производители современных силовых MOSFET-транзисторов испытывают их на лавинный пробой и не только гарантируют (при соблюдении определенных условий) их устойчивость к однократному или повторяющемуся лавинному пробую, но и предоставляют необходимую информацию для теплового расчета ключей в таком режиме работы¹⁰ [13].

Так как в рассматриваемом ГИТ длительность импульсов тока значительно меньше периода их повторения, то лавинный пробой можно считать однократным. Для предотвращения термического разрушения MOSFET-ключа при однократном лавинном пробое возникает необходимость выполнения трех условий:

- ток через транзистор не должен превышать максимальный ток пробоя $I_{Dmax} \leq I_{AR}$;
- энергия, рассеиваемая при пробое в ключе, не должна превышать максимально допустимую энергию пробоя для одиночного импульса $E_{AV} \leq E_{AS}$;
- температура канала транзистора во время пробоя не должна превысить предельно допустимую величину T_{jlim} .

Значения I_{AR} , T_{jlim} и кривая зависимости E_{AS} от температуры канала $E_{AS}(T_j)$ приводятся в документации по эксплуатации транзисторов¹¹.

Выполненный по методике производителя [13] расчет показал, что для используемых транзисторов STF9NK90Z при $I_{HKmax} = 5$ А и $Z_H = \infty$ указанные условия соблюдаются.

⁹ P6KE Series 600W Axial Leaded Transient Voltage Suppression (TVS) Diode. URL: https://www.littelfuse.com/~/media/electronics/datasheets/tvs_diodes/littelfuse_tvs_diode_p6ke_datasheet.pdf.

¹⁰ AN2344. Application note. Power MOSFET avalanche characteristics and ratings. URL: http://www.elenota.pl/datasheet_download/163035/AN2344.

¹¹ STB9NK90Z, STF9NK90Z, STP9NK90Z, STW9NK90Z. N-channel 900 V, 1.1 Ω , 8 A, TO-220, TO-220FP, D²PAK, TO-247 Zener-protected SuperMESH™ Power MOSFET. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stp9nk90z.pdf>.

Таким образом, в рассматриваемом режиме транзисторы $VT2-VT6$ закрываются при максимально возможном для ГИТ токе через индуктивность 5 А. Возникает режим лавинного пробоя, при котором падение напряжения на закрытых транзисторах за время Δt_{AV} , пока ток через индуктивность и каналы транзисторов уменьшается до нуля, будет ограничено суммарным напряжением лавинного пробоя ключей $VT2-VT6$: $5BV_{DSS} = 5 \cdot 900 = 4500$ В. Энергия, накопленная в индуктивности за время фазы накачки ИНЭ Δt_{HK} , будет рассеяна в ключах за время пробоя Δt_{AV} .

Таким образом, по окончании первой микросекунды после начала импульса тока разрядный контур можно рассматривать как цепь с сосредоточенными параметрами. Основными элементами контура являются индуктивность ИНЭ L , емкость проводника токовой линии относительно поверхности земли C_{CL} и сопротивление электрода R_{CE} [8]. Если $R_{CE} > 0,5\sqrt{L/C_{CL}}$, в контуре с током возникают периодические колебания. В этом случае ток в нагрузке ГИТ имеет емкостный характер: при уменьшении тока разряда ИНЭ до нуля напряжение на нагрузке растет. Затем ток, поменяв направление, протекает через диод супрессора TVS и индуктивность ИНЭ. Накопленная в емкости нагрузки энергия переходит в энергию магнитного поля ИНЭ. Когда напряжение на истоке закрытого транзистора $VT1$ станет равно напряжению на первичном емкостном накопителе (200 В), антипараллельный диод $VT1$ начинает проводить ток. При этом накопленная в индуктивности ИНЭ энергия поглощается первичным емкостным накопителем ГИТ (обозначен C на рис. 2, б).

Результаты и обсуждение

Экспериментальные осциллограммы тока через активную нагрузку, полученные с помощью генераторов, выполненных по двум рассмотренным схемам (ГИТ с использованием в качестве ИНЭ трансформатора и ГИТ на основе накопительного дросселя с непосредственной связью ИНЭ с нагрузкой), приведены на рис. 4. Сравнивая осциллограммы, можно сделать вывод о том, что импульс тока, формируемый ГИТ с накопительным дросселем, не только имеет форму, близкую к единичному импульсу на измерительном интервале, но и обладает более коротким фронтом (100–150 нс).

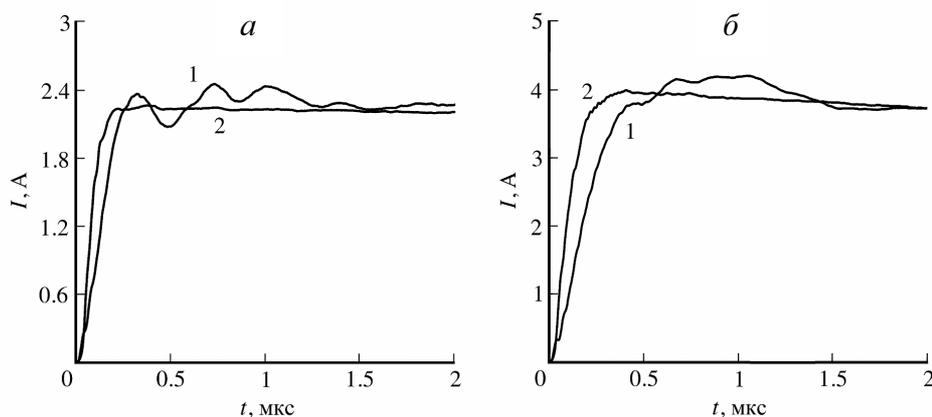


Рис. 4. Экспериментальные осциллограммы тока через активную нагрузку, полученные с использованием индуктивного генератора импульсных токов, выполненного на основе трансформатора (1) и дросселя (2) для нагрузки сопротивлением: а – 500 Ом; б – 1 000 Ом
 Fig. 4. Experimental waveforms of the resistive load current obtained by the inductive pulse generator based on the pulse transformer (1) and the inductor (2): for 500 Ohm load (a); for 1 000 Ohm load (b)

Схема ГИТ с ИНЭ на основе трансформатора более проста в реализации, так как требует включения меньшего количества силовых полупроводниковых ключей. Высокое напряжение, обуславливающее повышенные требования к электрической изоляции схемы, присутствует только на вторичной обмотке трансформатора.

Рассматривая особенности генераторов с накопителями энергии емкостного и индуктивного типа с точки зрения их использования в составе измерительного комплекса для экспериментального определения параметров заземляющих устройств, следует отметить, что ГИТ с ИНЭ обладает рядом преимуществ. Кроме формы импульса тока в измерительном контуре, можно выделить следующие характеристики:

- индуктивные накопители обладают значительно большей запасаемой удельной энергией, что позволяет при аналогичных массогабаритных параметрах ГИТ повысить энергию импульса тока через ЗУ и увеличить соотношение "полезный сигнал – помеха" на входе измерительной части комплекса. Это преимущество актуально прежде всего при проведении измерений параметров ЗУ в районах с высоким удельным сопротивлением грунтов;

- изменение времени накачки ИНЭ за счет изменения длительности управляющего импульса ключевых элементов схемы обеспечивает возможность простой регулировки энергетических параметров выходного импульса тока и их адаптивное изменение в процессе измерений;
- использование быстродействующих полупроводниковых ключей в схеме ГИТ с ИНЭ позволяет с точностью до единиц наносекунд синхронизировать моменты запуска генератора и измерительной части комплекса.

Рассмотренная схема ГИТ с ИНЭ на основе накопительного дросселя была использована при разработке измерителя сопротивлений ЗУ опор ВЛ импульсным методом [3]. Опытный образец прибора прошел успешные испытания на моделях заземлителей различной конфигурации и на ЗУ опор линий электропередачи (с грозозащитным тросом и без него), расположенных в грунтах с различным удельным сопротивлением [4].

Заключение

Проведенный анализ и экспериментальные исследования генераторов импульсов тока с индуктивным накопителем энергии, выполненных по двум рассмотренным схемам, показали, что ГИТ с импульсным трансформатором в качестве ИНЭ обладает определенными преимуществами с точки зрения схемотехнической и конструкционной реализации, но не обеспечивает требуемое постоянство амплитуды импульса тока на измерительном интервале. Основной причиной осцилляций в выходном токе генератора являются паразитные элементы трансформатора: индуктивность рассеяния и межобмоточная емкость. Использование при разработке конструкции трансформатора различных методов, способствующих минимизации его паразитных параметров, не дает необходимого эффекта, а применение демпфирующих цепей в выходном каскаде ГИТ приводит к затягиванию фронта импульса тока.

Бестрансформаторная схема ГИТ с непосредственной связью дросселя ИНЭ и выхода генератора обеспечивает требуемую форму импульса тока. Использование в выходном каскаде ГИТ с ИНЭ в качестве коммутаторов тока современных быстродействующих MOSFET-транзисторов способствует формированию импульса тока с длительностью фронта 100–200 нс. Для защиты выходного каскада данного ГИТ от перенапряжений, возникающих при работе генератора на высокоомную нагрузку, может использоваться лавинный режим MOSFET-ключей.

Разработанный опытный образец измерительного комплекса, генератор импульсов тока которого выполнен по схеме, включающей накопительный дроссель, позволяет определять стационарное сопротивление опор воздушных линий электропередачи без отсоединения грозозащитного троса. Этот комплекс может быть использован при решении задач анализа и разработки систем молниезащиты, таких как исследование характеристик заземлителей различной конфигурации; совершенствование методов определения переходных характеристик заземляющих устройств; синтез простейших $R-L-C$ -схем замещения одиночных заземлителей.

Библиографический список

1. Данилин А. Н., Колобов В. В., Селиванов В. Н., Прокопчук П. И. Методика импульсных измерений сопротивления растеканию заземлителей опор высоковольтных линий электропередачи под грозозащитным тросом // Технико-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера = Technical-economical and electrophysical problems of energy development in northern areas : сб. науч. тр. / отв. ред. Б. В. Ефимов. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. С. 79–85.
2. Harid N., Griffiths H., Mousa S., Clark D., Robson S. [et al.]. On the analysis of impulse test results on grounding systems // IEEE Transactions on Industry Application. 2015. V. 51, Iss. 6. P. 5324–5334. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2442517>.
3. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н. Новый прибор для измерения сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ импульсным методом // Труды Кольского научного центра РАН. 2016. № 5 (39), вып. 13. С. 39–55.
4. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н., Прокопчук П. И. Результаты полевых испытаний нового прибора для измерения сопротивления заземляющих устройств опор воздушных линий электропередачи импульсным методом // Труды Кольского научного центра РАН. 2017. № 1 (8), вып. 14. С. 13–31.
5. Rodrigues B. D., Visacro S. Portable grounding impedance meter based on DSP // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. V. 63, Iss. 8. P. 1916–1925. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.2014.2303532>.
6. Rudenberg R. Electrical shock waves in power systems. Traveling waves in lumped and distributed circuit elements. Cambridge : Harvard University Press, 1968. 336 p.
7. Коровкин Н. В., Нетреба К. И. Влияние активно-индуктивных свойств заземляющего устройства на уровни перенапряжений при ударе молнии в опору ЛЭП // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 4 (207). С. 100–103.

8. Колобов В. В., Баранник М. Б., Селиванов В. Н., Куклин Д. В. Источник тока с индуктивным накопителем энергии для измерения импульсных сопротивлений заземляющих устройств // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032816214040181>.
9. Lindblom A. Inductive pulse generation : Doctoral Thesis. Uppsala University, 2006. 94 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:167979/fulltext01.pdf>.
10. Dobkin B., Williams J. Analog circuit design. A tutorial guide to applications and solutions. Elsevier, 2011. 960 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2010-0-65807-x>.
11. Wooding G. N., De Beer A. S. The effect of leakage inductance and snubbing on electromagnetic interference generated by a flyback converter // IEEE AFRICON 2011 : Conference, Livingstone, Zambia, 13–15 Sept. 2011. IEEE. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/afcon.2011.6072057>.
12. Berry A. [et al.]. The power MOSFET application handbook. Design Engineer's Guide. Manchester, United Kingdom : NXP Semiconductors, 2016. 315 p.
13. Giuffrida V. The avalanche issue: comparing the impacts of the I_{AR} and E_{AS} parameters. AN4337 Application note. STMicroelectronics, 2014. 14 p. URL: <http://www.bdtic.com/download/st/AN4337.pdf>.

References

1. Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Prokopchuk P. I. Metodika impulsnykh izmereniy soprotivleniya rastekaniyu zazemliteley opor vyisokovoltnykh liniy elektroperedachi pod grozozaschitnyim trosom [The method of pulse measurement of grounding resistance of transmission towers of high-voltage power lines with a ground wire] // Tehniko-ekonomicheskie i elektrofizicheskie problemyi razvitiya energetiki Severa = Technical-economical and electrophysical problems of energy development in northern areas : sb. nauch. tr. / otv. red. B. V. Efimov. Apatityi: KNTs RAN, 2007. P. 79–85.
2. Harid N., Griffiths H., Mousa S., Clark D., Robson S. [et al.]. On the analysis of impulse test results on grounding systems // IEEE Transactions on Industry Application. 2015. V. 51, Iss. 6. P. 5324–5334. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2442517>.
3. Kolobov V. V., Barannik M. B., Selivanov V. N. Novyyiy pribor dlya izmereniya soprotivleniya zazemlyayuschih ustroystv opor VL impulsnyim metodom [A new device for measuring tower grounding resistance using the impulse method] // Trudyi Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2016. N 5 (39), vyip. 13. P. 39–55.
4. Kolobov V. V., Barannik M. B., Selivanov V. N., Prokopchuk P. I. Rezultatyi polevykh ispytaniy novogo pribora dlya izmereniya soprotivleniya zazemlyayuschih ustroystv opor vozduzhnykh liniy elektroperedachi impulsnyim metodom [Results of field test of a new device for measuring tower grounding resistance using the impulse method] // Trudyi Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2017. N 1 (8), vyip. 14. P. 13–31.
5. Rodrigues B. D., Visacro S. Portable grounding impedance meter based on DSP // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2014. V. 63, Iss. 8. P. 1916–1925. DOI: <https://doi.org/10.1109/tim.2014.2303532>.
6. Rudenberg R. Electrical shock waves in power systems. Traveling waves in lumped and distributed circuit elements. Cambridge : Harvard University Press, 1968. 336 p.
7. Korovkin N. V., Neteba K. I. Vliyaniye aktivno-induktivnykh svoystv zazemlyayuschego ustroystva na urovni perenapryazheniy pri udare molnii v oporu LEP [The effect of active-reactive characteristics of grounding system on overvoltage levels under lightning stroke to power transmission line support] // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. 2014. N 4 (207). P. 100–103.
8. Kolobov V. V., Barannik M. B., Selivanov V. N., Kuklin D. V. Istochnik toka s induktivnyim nakopitelem energii dlya izmereniya impulsnykh soprotivleniy zazemlyayuschih ustroystv [A current source with an inductive energy storage for measuring pulse impedances of grounding connections] // Priboryi i tehnika eksperimenta. 2014. N 5. P. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.7868/s0032816214040181>.
9. Lindblom A. Inductive pulse generation : Doctoral Thesis. Uppsala University, 2006. 94 p. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:167979/fulltext01.pdf>.
10. Dobkin B., Williams J. Analog circuit design. A tutorial guide to applications and solutions. Elsevier, 2011. 960 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/c2010-0-65807-x>.
11. Wooding G. N., De Beer A. S. The effect of leakage inductance and snubbing on electromagnetic interference generated by a flyback converter // IEEE AFRICON 2011 : Conference, Livingstone, Zambia, 13–15 Sept. 2011. IEEE. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/afcon.2011.6072057>.
12. Berry A. [et al.]. The power MOSFET application handbook. Design Engineer's Guide. Manchester, United Kingdom : NXP Semiconductors, 2016. 315 p.
13. Giuffrida V. The avalanche issue: comparing the impacts of the I_{AR} and E_{AS} parameters. AN4337 Application note. STMicroelectronics, 2014. 14 p. URL: <http://www.bdtic.com/download/st/AN4337.pdf>.

Сведения об авторах

Колобов Виталий Валентинович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: 1_i@mail.ru

Kolobov V. V. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: 1_i@mail.ru

Баранник Максим Борисович – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, науч. сотрудник; e-mail: maxbar@ien.kolasc.net.ru

Barannik M. B. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Researcher; e-mail: maxbar@ien.kolasc.net.ru

Селиванов Василий Николаевич – ул. Ферсмана, 14, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального исследовательского центра КНЦ РАН, канд. техн. наук; e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

Selivanov V. N. – 14, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Northern Energetics Research Centre – Branch of the Federal Research Centre KSC RAS, Cand. of Tech. Sci.; e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

V. V. Kolobov, M. B. Barannik, V. N. Selivanov

A pulse generator with inductive energy storage for measuring the grounding resistance of transmission line towers

The pulse method may be used to measure the footing resistance of transmission towers with overhead grounding wires. Measuring systems that obtain the time dependent transient impedance may be used to measure the low-frequency resistance of transmission tower grounding devices. Current pulse generators with rectangular pulse shape are used in the measuring systems. The current pulses must have short rising time and constant magnitude during a measurement interval. Experimental investigations have shown that a pulse generator with inductive energy storage may be used in the measuring system. Generators with inductive energy storage have a number of advantages over pulse generators with capacitive energy storage. Namely, in case of unevenly distributed surge impedance along the current lead or in case of reflections from the remote end of the current lead an inductive generator allows to form a current pulse with a constant shape. Inductive pulse generators have high pulse energy. So, they may be used to measure the grounding resistance in high soil resistivity areas. Measuring systems based on an inductive storage pulse generator may be used not only to measure the footing resistance of transmission towers; they can also be used for experimental investigation of the effectiveness of lightning protection systems, in particular to obtain the parameters of RLC equivalent circuit of a single grounding device. Two possible topologies of an inductive pulse generator output stage have been considered in the paper. In the first case a step-up transformer is used as energy storage and an IGBT is used as opening switch. In another case an inductor is used as energy storage and MOSFETs are used as opening and closing switches. The experimental current waveforms for both types of generators have been given. They show that an inductor based pulse generator has better characteristics. Therefore it is preferred for this application.

Key words: grounding systems, low-frequency resistance, transmission line towers, grounding wire, current pulse generator, inductive energy storage, step-up transformer, inductor, opening switch.