

Л.З.БОГУСЛАВСКИЙ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;
Я.П.СТРУК, ст. инж., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;
А.Д.БЛАЩЕНКО, науч. сотр., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;
Н.С.ЯРОШИНСКИЙ, инж., Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТЕКАНИЯ ТОКА В КОНТУРЕ ЗАЕМЛЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.

Описано дослідження розтікання струму в контурі заземлення та необхідності наявності окремого контуру для генератора імпульсних токів. Видано рекомендації для побудови захисного заземлення генераторів.

Research of spreading of current is described in the grounding mat and necessity of presence separate a grounding mat for the generator of impulse currents. It is given out the recommendation for the construction of the protective grounding of generators.

В настоящее время широкое применение в практике физических исследований, а также в промышленности получили электрогидроимпульсные (ЭГ) установки, способные формировать импульсы тока и высокого напряжения большой мощности.

Таковыми установками являются генераторы импульсных токов (ГИТ) медленного накопления энергии конденсаторной батареи и быстрого ее выделения в нагрузку в форме импульса; его амплитуда, длительность зависят от параметров разрядной цепи, т.е. емкости конденсаторной батареи, сопротивления нагрузки, индуктивности разрядного контура и рабочего напряжения.

Конструктивно такие генераторы состоят из силового блока (зарядного устройства, конденсаторной батареи, коммутационной аппаратуры, блокировки, ошиновки разрядной цепи и др.), силового низковольтного щита, пульта управления и технологического узла (нагрузки), которые согласно требованиям «Правил устройства электроустановок» (ПУЭ) [1] должны быть заземлены. Контур заземления для электроустановок с напряжением свыше 1000V должен иметь сопротивление менее 0,5 Ом для электрических сетей с глухозаземленной нейтралью.

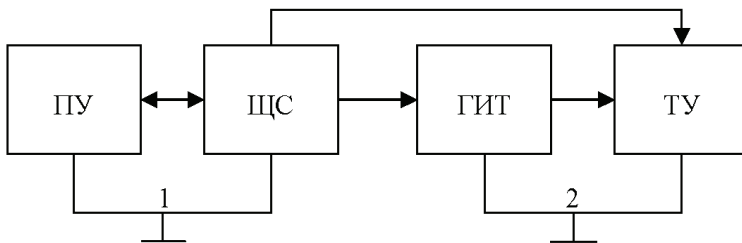
Между разрядным контуром и конструкциями силового блока имеются емкостные связи, что приводит в момент разряда на корпусе конденсаторной батареи к повышению потенциала относительно низковольтной питающей

сети. Контур заземления здания (цеха) является замкнутым и при заземлении разрядной цепи (конструкций силового блока и технологического узла) в двух точках и более возможен подъем потенциала на всем контуре заземления.

Опыт эксплуатации ЭГ установок, разрабатываемых в ИИПТ НАН Украины, с рабочим напряжением (5 – 50) кВ и импульсами разрядного тока ($1 - 10^3$) кА показал, что в аварийных режимах (короткое замыкание на нагрузку, пробой на корпус установки, пробой блокировок и т.п.) имеют место выходы из строя низковольтного электрооборудования установки (электродвигатели, силовые клеммы, разъемы, катушки питания электромагнитных устройств и т.д.), а также электрооборудования, аппаратов и устройств, не связанных с установкой, но находящихся вблизи.

Вопросы заземления оборудования установок больших импульсных токов (напряжений) недостаточно описаны в известных публикациях. Ввиду отсутствия нормативных документов, определяющих требования к заземлению электрогидроимпульсных устройств, работающих при напряжениях выше 1000 В, в настоящей работе проведен анализ возможных токов растекания через заземлитель при работе таких установок и средств уменьшения наведенных токов на низковольтном оборудовании.

ЭГ установки, разрабатываемые в ИИПТ НАН Украины, подключаются, как правило, к трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 380 В и, в соответствии с ПУЭ, относятся к электроустановкам потребителей с напряжением до 1000 В, а, следовательно, блоки и узлы ЭГ установки должны быть заземлены, величина сопротивления заземляющего устройства должна быть не более 4 Ом. Блок-схема ЭГ установки приведена на рис. 1.



ПУ – пульт управления; ЩС – щит силовой; ТУ – технологический узел,
1 – цеховой контур заземления; 2 – индивидуальный контур заземления

Рисунок 1 – Блок-схема ЭГ установки

Технической документацией на ЭГ установки предусматриваются требования:

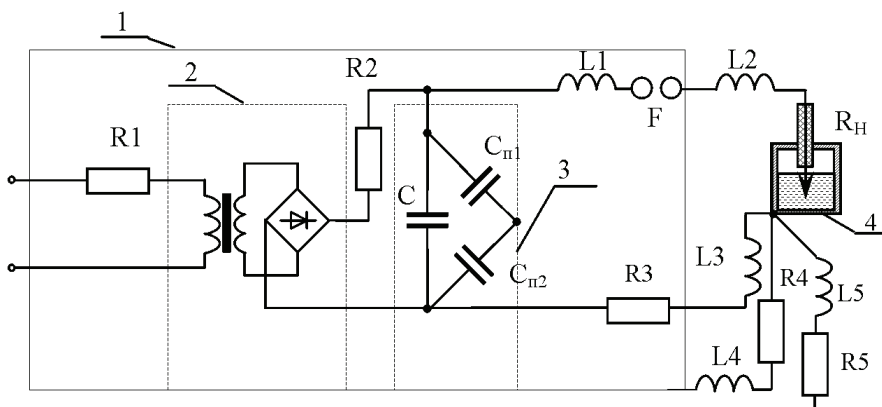
- для разрядного контура установки наличие индивидуального контура заземления с сопротивлением не более 0,5 Ом;

- низковольтное оборудование ЭГ установки заземляется на внутрицеховой контур с $R_3 \leq 4 \text{ Ом}$;
- отсутствие электрической связи внутрицехового контура с индивидуальным контуром заземления.

Как правило, между контурами 1 и 2 имеется связь по земле, но в случае идеальной изоляции между ними возникает угроза поражения человека электрическим током из-за случайного прикосновения к двум предметам, заземленным на разные контуры, которые при аварии обладают разным потенциалом.

Так, при глухозаземленной нейтрали источника питающей сети путь прохождения тока будет: фаза питающей сети – корпус установки потребителя, заземляющее устройство потребителя – земля - заземляющее устройство нейтрали - нейтраль источника питающей сети.

Генератор импульсных токов ЭГ установки является автономным источником высокого напряжения и в аварийном режиме (пробой на корпус, режим короткого замыкания на нагрузку) путь прохождения больших импульсных токов будет от плюса к минусу конденсаторной батареи через ошиновку разрядной цепи или корпус генератора, минуя заземляющее устройство.



1 – корпус ГИТ; 2 – корпус высоковольтного трансформатора-выпрямителя (ВТВ); 3 – корпус высоковольтного импульсного конденсатора (конденсаторной батареи); 4 – разрядная камера (техузел); R1 – токоограничение на входе ВТВ; R2 – зарядный резистор; C – рабочая емкость конденсаторной батареи; $C_{п1}$ и $C_{п2}$ – паразитные емкости выводов конденсаторной батареи относительно корпуса; F – высоковольтный коммутатор; R_H – сопротивление водного промежутка; L1, L2, L3, L4 – индуктивности проводов; R3, R4, R5 – активные сопротивления проводов.

Рисунок 2 – Схема генератора импульсных токов ЭГ установки

Генераторы импульсных токов ЭГ установок конструктивно выполняются отдельным блоком (рис. 2), в котором размещено высоковольтное за-

рядное устройство с токоограничением на входе, конденсаторная батарея, высоковольтный коммутатор и электроблокировки (с разрядом через сопротивление и с выдержкой во времени, замыкающие выводы «+» и «-» конденсаторной батареи накоротко)

Как видно из схемы ГИТ, протекание больших импульсных токов возможно только по разрядной цепи, то есть «+» С – L1 – F – L2 – R_H – L3 – R3 – «-» С.

Кроме емкости конденсаторной батареи С имеет место разряд паразитной емкости С_П по цепи: «+» С_П – L1 – F – L2 – R_H – L4 – R4 – корпус ГИТ – корпус конденсаторной батареи 3 («-» С_П).

При проектировании ГИТ влиянием паразитных емкостей конденсаторной батареи С_{П1} и С_{П2} на растекание тока по корпусу генератора нельзя пренебрегать. Так, паразитная емкость на металлический корпус конденсатора ИКГ 50/1 (U = 50 кВ, С = 1 мкФ) составляет $2,8 \cdot 10^{-3}$ мкФ, а в конденсаторной батарее на 5 кДж паразитная емкость уже составит $11,2 \cdot 10^{-3}$ мкФ, а следовательно, и энергия разряда паразитной емкости через корпус ГИТ в случае зарядного напряжения 50 кВ составляет 14 Дж.

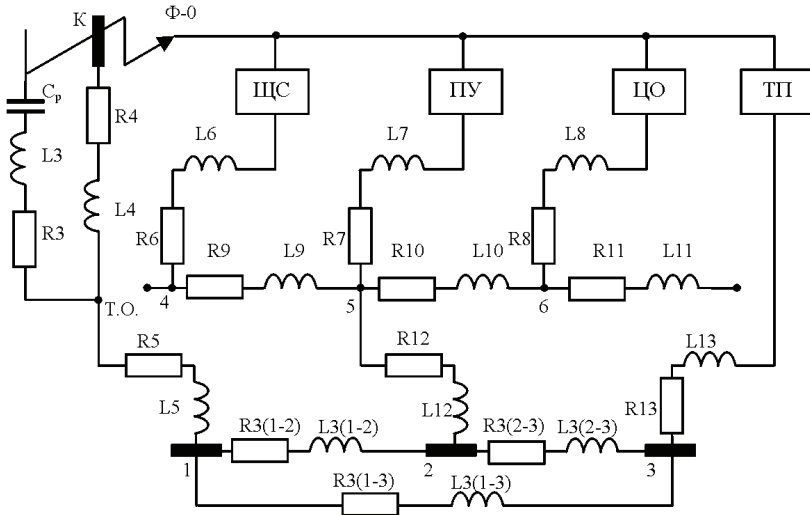
При работе ЭГ установки основное падение напряжения в разрядной цепи ГИТ определяется сопротивлением промежутка (R_H > 0).

В режиме короткого замыкания на нагрузке (R_H = 0) падение напряжения при разряде емкости С определяется индуктивностями ошиновки разрядной цепи L1, L2, L3, а для паразитной емкости С_П – индуктивностями ошиновки L1, L2 и индуктивностью заземления L4.

Повышение потенциала на корпусе ГИТ, в котором заземление разрядной цепи и корпуса выполнены по схеме, приведенной на рис. 1 зависит от величины индуктивности заземлителя L4 и является опасным для изоляции фаза-ноль питающей сети, а следовательно, и низковольтной аппаратуры. Аналогично имеем при пробое с «+» С на элементы конструкции корпуса ГИТ цепь: «+» С – корпус ГИТ – L4 – R4 – L3 – R3 – «-» С. При этом имеет место повышение потенциала на корпусе ГИТ до рабочего напряжения установки, что может привести к аварийному режиму.

По схеме, приведенной на рис. 3, возможно провести анализ растекания тока в контуре заземления при пробое конденсаторной батареи на корпус ГИТ. В этом случае следует учитывать, что активные сопротивления ошиновки R3 и заземляющего проводника R4 являются очень малыми и будут влиять лишь на затухание импульса разрядного тока. Амплитуду и частоту импульса разрядного тока определяют U, С и L3 + L4.

Имея ввиду, что частота импульса разрядного тока при пробое является высокой (10-100 кГц), определяющим при рассмотрении падения напряжения в разрядной цепи, заземляющих проводниках, магистрали заземления и земли являются их индуктивности. В табл. 1 приведены значения активного и индуктивного сопротивления медного проводника сечением 10 мм² и длиной 1 м на разных частотах, рассчитанные по формулам [4, 5].



К – корпус ГИТ; $\Phi-0$ – фаза – нуль питающей сети; С – конденсаторная батарея ГИТ; L3, R3 – индуктивность и активное сопротивление ошиновки разрядной цепи от «–» С до технологического узла (разрядной камеры); L4, R4 – индуктивность и активное сопротивление заземляющего проводника корпуса ГИТ; L5, R5 – индуктивность и активное сопротивление заземляющего проводника техузла к контуру заземления с $R3 \leq 0,5$ Ом; L9, L10, L11 – индуктивность магистрали заземления здания (цеха); R9, R10, R11 – активное сопротивление магистрали заземления здания (цеха); 1 – заземлитель индивидуального контура ЭГ установки, $R3 \leq 0,5$ Ом; 2 – заземлитель контура заземления здания (цеха), $R3 \leq 4$ Ом; 3 – заземлитель контура заземления трансформаторной подстанции питающей сети, $R3 \leq 0,5$ Ом; 4 – 5 – 6 – 7 – точки подключения заземляющих проводников к магистрали заземления; L6, L7, L8 – индуктивность заземляющих проводников щита силового, пульта управления и цехового оборудования; R6, R7, R8 – активное сопротивление заземляющих проводников щита, пульта управления и цехового оборудования; L12, R12 – индуктивность и активное сопротивление заземляющего проводника между магистралью заземления и заземлителем 2; L13, R13 – индуктивность и активное сопротивление заземляющего проводника трансформаторной подстанции к заземлителю 3; L3(1-2), R3(1-2) – индуктивность и активное сопротивление земли между заземлителями 1 и 2; L3(2-3), R3(2-3) – индуктивность и активное сопротивление земли между заземлителями 2 и 3; L3(1-3), R3(1-3) – индуктивность и активное сопротивление земли между заземлителями 1 и 3.

Рисунок 3 – Схема высоковольтного пробоя конденсаторной батареи на корпус ГИТ – фазу (нуль) питающей сети

Кроме вышеизложенного, следует учитывать, что трансформаторные подстанции, как правило, оборудованы понижающими трехфазными трансформаторами 6300/380 вольт и по ПУЭ оборудованы заземлителем с сопротивлением $R3 \leq 0,5$ Ом, между заземлителями 1, 2 и 3 существуют электриче-

ские связи по земле с преобладанием индуктивных сопротивлений при высоковольтном пробое на корпус ГИТ.

Таблица 1 – Зависимость от частоты активного и индуктивного сопротивления медного проводника сечением 10 мм^2 , длиной 1 м

f, кГц	0,05	1	10	40	60	100
R, Ом	0,00162	0,00162	0,00194	0,00235	0,00242	0,00254
ωL , Ом	0,0034	0,007874	0,0779	0,3071	0,4594	0,7636

При пробое С на корпус ГИТ мгновенно увеличится потенциал корпуса относительно фаза - нуль питающей сети, что приведет к пробоею на фазу с корпуса. При этом фаза питающей сети будет закорочена накоротко по цепи : ТП – Ф – К – R4 – L4 – R5 – R3 (1-3) – L3 (1-3) – ТП, что вызовет резкое увеличение тока фазы и дальнейшее срабатывание защиты в силовом щите.

Приемники электроэнергии - трансформаторы, реле, электромагниты, электродвигатели для импульса разрядного тока являются большим сопротивлением и пробой у них происходит на клеммах подвода питания, при этом, как правило, клеммы, разъемы, тумблера включения приборов подвергаются тепловому разрушению током фазы питающей сети.

Следует иметь ввиду, что длительность импульса разрядного тока мала во времени (10 - 1000 мкс), а амплитуда его быстро затухает, и при пробое на фазу - нуль питающей сети такое же время он будет воздействовать на изоляцию всего низковольтного оборудования, питающегося от данной сети (силового щита, пульта управления и др. цехового оборудования), и может вызвать у них пробой с фазы на корпус прибора. Рассмотрим случай пробоя с фазы питающей сети на корпус силового щита (рис. 3).

При этом параллельно цепи К - R4 - L4 будет подключена цепь: Ф – корпус ЩС – L6 – R6 – R9 – L9 – L12 – R12 – L3 (1-2) – R5(1-2) – L5 – K5 и по ней будет протекать импульсный ток, который создает падение напряжения на элементах цепи пропорционально их индуктивностям и активным сопротивлениям. То есть по рис. 3 легко убедиться, что заземление низковольтного оборудования на заземлитель 2, а высоковольтного оборудования – на заземлитель I при высоковольтном пробое на корпус ГИТ и дальнейшем пробое на фазу - нуль питающей сети создает растекание тока по земле между заземлителями I и 2. При этом возникающее импульсное шаговое напряжение на земле будет тем больше, чем больше сопротивление R3 (1-2) и $\omega L3$ (1-2), где ω – круговая частота разрядного тока, Гц.

Из вышесказанного следует, что для обеспечения безопасности людей, находящихся в зоне растекания тока между заземлителями I и 2, необходимо как можно меньшее сопротивление земли, т.е. прямая электрическая связь между ними.

Из рис. 3 можно заметить, что чем больше сопротивление заземляющего проводника L5, R5, тем меньше величина импульсного тока в момент пробоя

на фазу - нуль питающей сети будет протекать между заземлителями 1 и 2, а при $L5, R5 \rightarrow \infty$ импульсный ток растекания по земле будет равен нулю.

То есть идеальным вариантом ГИТа является такая конструкция, в которой разрядная цепь изолирована от земли или имеет связь с ней через большое сопротивление. Но изолировать разрядную цепь ГИТ от земли в ЭГ установках практически невозможно из-за громоздкости технологического узла, использования корпуса разрядной камеры в качестве отрицательного электрода, электрической связи корпуса камеры с корпусами электроприемников механизма перемещения электрода, заземление которых оговорено требованиями ПУЭ, ПТЭ и ПТБ [1,4,5].

Возникает вопрос – нужен ли на ЭГ установку индивидуальный контур с сопротивлением заземления 0,5 Ом? Доказано выше, что при высоковольтном пробое на фазу - нуль питающей сети, наличие такого заземлителя 1 создает растекание импульсного тока в зоне обслуживания установки и небезопасно для обслуживающего персонала.

При пробое с корпуса ГИТ на фазу импульсное напряжение с заземляющего проводника корпуса ГИТ ($R4, L4$) будет приложено через магистраль заземления здания и фазу - нуль питающей сети ко всем потребителям электроэнергии (рис. 4). Последующий пробой с фазы - нуль в любом из электроприемников резко снижает потенциал импульса разрядного напряжения на других электроприборах.

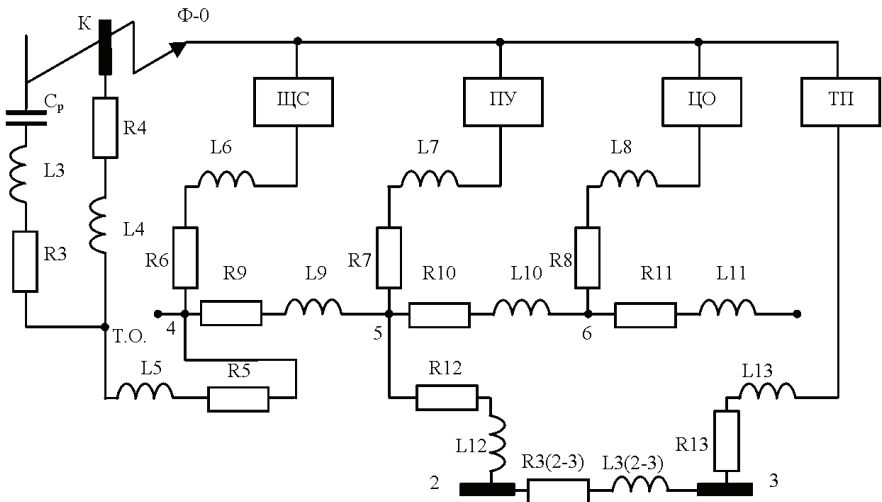


Рисунок 4 – Схема высоковольтного пробоя конденсаторной батареи на корпус ГИТ – фазу (нуль) питающей сети при электрическом соединении контуров заземления. Обозначения соответствуют рис.3.

Рассмотрим пробой в силовом щите с фазы на корпус импульсным на-

пряжением. При пробое параллельно R4, L 4 будет подключена цепь: фазный провод - корпус ЩС, L6, R6, L5, R5 и по ней будет протекать импульсный ток. При этом потенциал импульсного напряжения на фазе остальных потребителей электроэнергии будет определяться падением напряжения на сопротивлении L6, R6.

При пробое импульсным напряжением в любом другом электроприемнике с фазы на его корпус, который находится на значительном расстоянии от ГИТ, будет иметь место протекание импульсного тока по магистрали заземления здания: R9, L9, R10, L10, что вызовет повышение потенциала на магистрали. При этом опасности поражения импульсным током обслуживающего персонала не будет, так как корпуса электроприемников, магистраль заземления в месте их соединения и человек, прикоснувшийся к прибору, будут иметь одинаковый потенциал. Безопасным является и отсутствие в данном случае растекания импульсного тока по земле.

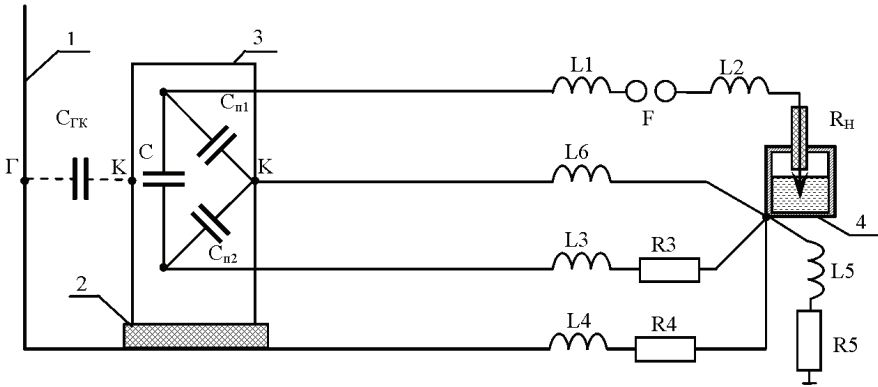
Анализ схемы рис. 3 и рис. 4 показывает, что определяющим в повышении потенциала между корпусом ГИТ и фазой–ноль питающей сети при пробое с «+» С на корпус ГИТ, является падение напряжения на заземляющем проводнике. Как правило, заземление корпуса ГИТ осуществляется медным неизолированным проводом сечением не менее 16 мм^2 , длиной до нескольких метров, который может иметь случайные прикосновения к другим приборам и металлоконструкциям и вызывать на них повышенный потенциал при пробое на корпус ГИТ. На практике корпус ГИТ не всегда изолирован от пола (земли) и кроме точки заземления может иметь случайное соприкосновение с металлоконструкциями, что может вызвать растекание тока и по другим цепям пробоев на корпус. Поэтому для заземления корпуса ГИТ целесообразно использовать специально изолированный проводник.

Как выше было сказано, импульсные высоковольтные конденсаторы в металлическом корпусе обладают достаточно большой емкостью $C_{П1}$ и $C_{П2}$ между высоковольтными выводами и корпусом. Соединение корпуса ГИТ с корпусом конденсаторной батареи, как показано на рис. 2, является нежелательным, т.к. при разряде $C_{П1}$ падение напряжения на заземляющем проводнике корпуса ГИТ – L4 в режиме короткого замыкания на нагрузку и в аварийном пробое на корпус конденсатора будет достаточно большим, что вызовет повышенный потенциал корпуса ГИТ относительно фазы – нуль питающей сети. Рассмотрим вариант конструкции ГИТ, в котором конденсаторы емкостного накопителя изолированы от корпуса ГИТ.

Хорошие результаты получены в схеме с изолированными корпусами конденсаторов емкостного накопителя энергии от корпуса ГИТ и с дальнейшим их заземлением в общую точку «0» через электрическое соединение заземления разрядной цепи ГИТ (рис. 5).

Как видно из рисунка, разряд паразитной емкости $C_{П1}$ будет происходить по цепи : «+» $C_{П1}$ – L1 – F – L2 – R_н – L6 – R6 – «–» $C_{П1}$. При этом повышения потенциала в импульсе на корпусе ГИТ из-за разряда $C_{П1}$ не будет.

Изолятор 2 выбирается из условия действия импульсного напряжения на него. Соединение корпусов конденсаторов в батарее должно быть надежным, соединение корпуса батареи с точкой «0» заземления разрядной цепи выполняется заземляющим проводником в изоляции.



1 – корпус ГИТ; 2 – изолятор; 3 – корпус конденсатора; $C_{ГК}$ – емкость между корпусом ГИТ и батареей накопителя. Остальные обозначения см. пояснения к рис. 2.

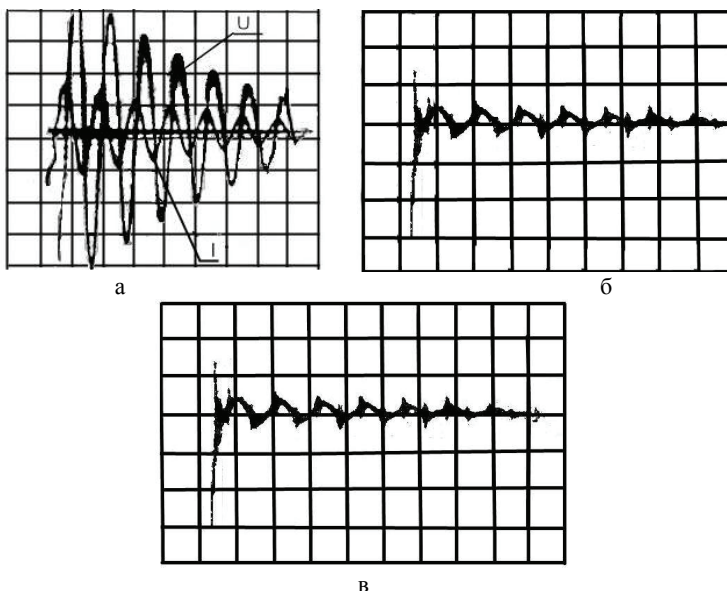
Рисунок 5 – Схема разрядной цепи ГИТ с изолированным корпусом емкостного накопителя от корпуса

Недопустимым является наличие 2-х и более точек заземления разрядной цепи, так как падение напряжения на отрезке ошиновки между ними создает повышенный потенциал и на заземляющих проводниках.

Применение в ЭГ установках электронных приборов в цепях автоматики, пуска, контроля и регистрации импульсов разрядного тока, напряжения, давления и т.д. требует их экранирования из-за наличия электромагнитного поля вблизи разрядного контура. Кроме указанного, рекомендуется такие приборы подключать к питающей сети через разделяющие трансформаторы, так как в питающую сеть возможно проникновение импульсной помехи через емкостные связи между разрядной цепью, элементами корпуса ГИТ и фазой – нуль питающей сети. Следует иметь ввиду, что сам трансформатор не является препятствием для высокочастотной помехи, так как трансформация сигнала помехи происходит не по виткам, а по емкости между обмотками, поэтому в разделяющем трансформаторе между рабочими обмотками должна быть экранирующая обмотка или экран. Экранирующая обмотка соединяется с корпусом трансформатора и заземляющим проводником с магистралью заземления в месте его размещения.

Хорошие результаты получены при использовании в качестве разделяющего трансформатора 2-х промышленных одинаковой мощности и напряжениями на входе – выходе.

Исследования проводились на лабораторной ЭГ установке, собранной по схеме рис. 5 и оборудованной индивидуальным контуром заземления с сопротивлением заземлителя менее 0,5 Ом. Накопителем энергии являлся конденсатор типа ИК50/1,35 с рабочим напряжением до 50 кВ и емкостью 1,35 мкФ. В опытах водный промежуток в разрядной камере был закорочен, то есть установка работала в режиме короткого замыкания на нагрузку. Опыты проведены при рабочем напряжении 24 кВ. Осциллографирование напряжений осуществлялось с помощью двух активных делителей с коэффициентом деления 600 каждый путем подключения их высоковольтных вводов на нагрузку, а низковольтных выводов на – входы дифференциального усилителя осциллографа С8-14. Измерение токов осуществлено с использованием шунта.



а – напряжение на электроде разрядной камеры и ток в разрядной цепи, б – ток в цепи проводника L5, заземляющего разрядный контур ГИТ с индивидуальным контуром заземления, в – ток в цепи проводника L5 при присоединении индивидуального контура заземления к цеховому контуру. Развертка 20 мкс/дел.

Рисунок 6 – Характерные разрядные осциллограммы

На рис. 6 приведены характерные осциллограммы разрядных процессов. При этом на рис.6,а приведены напряжение на электроде разрядной камеры и тока в разрядной цепи при $R_n = 0$. Частота разрядного тока составляет 43,4 кГц, амплитуда первой полуволны разрядного тока - 8,16 кА. На рис.6,б приведена осциллограмма тока в цепи проводника L5, заземляющего разрядную цепь ГИТ на индивидуальный контур заземления с $R_3 < 0,5$ Ом и контур заземления лаборатории. На рис.6,в приведена осциллограмма тока в цепи про-

водника, заземляющего разрядный контур ГИТ с индивидуальным контуром заземления установки с $R_3 < 0,5$ Ом и магистралью заземления цехового контура с $R_3 < 4$ Ом. В эксперименте индивидуальный и цеховой контур соединены вместе в одну общую точку.

Сравнивая осциллограммы рис. 6, можно убедиться, что растекание тока в контур заземления не наблюдается, а следовательно, применение на ЭГ - установках индивидуального контура заземления не оправдано как с технической стороны, то есть обеспечения безопасности обслуживания и защиты низковольтного оборудования при высоковольтном разряде, так и со стороны материальных затрат на его изготовление.

Полученные результаты позволяют высказать ряд предложений по заземлению электрогидроимпульсных установок, направленных на безопасность их эксплуатации и исключение влияния токов растекания на аппаратуру управления:

При наличии на ЭГ установке индивидуального заземлителя с $R_3 \leq 0,5$ Ом и магистрали заземления здания (цеха) с сопротивлением $R_3 \leq 4,0$ Ом рекомендуется их электрически соединить в одной точке.

Для заземления высоковольтного и низковольтного оборудования ЭГ установок достаточным является использование цеховой магистрали контура заземления.

Конденсаторы высоковольтного накопителя энергии рекомендуется изолировать от корпуса ГИТ и изолированным проводником соединить с точкой заземления разрядной цепи ГИТ.

Электронные приборы, находящиеся в цепях автоматики, пуска, контроля и измерения параметров импульсов разрядного тока, напряжения и давления, рекомендуется подключать к питающей сети через разделяющие трансформаторы.

Список литературы: 1. Правила устройства электроустановок. – Харьков: Индустрия, 2007. – 416 с. 2. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. – К.: Наукова думка, 1986. – 557с. 3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отделение, 1986. – 488 с. 4. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. – Харків: Індустрія, 2007. – 272 с. 5. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. – М.: Энергия, 1979. – 473 с.

Поступила в редколлегию 12.03.2010