

УДК 622.026.01

ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ БОРОДУЛИН

аспирант Центра физико-технических проблем энергетики
Севера, Кольский научный центр РАН
student_noo@admksk.apatity.ru

АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ УСОВ

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
начальник научно-организационного отдела, Кольский на-
учный центр РАН
usov@admksk.apatity.ru

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ ДЕЗИНТЕГРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

В статье дан анализ проблемы улучшения технических характеристик установок электроимпульсной технологии. Приведено сравнение устройств дезинтеграции различными способами по удельным параметрам и сравнение электротехнического оборудования на различной элементной базе.

Ключевые слова: электроимпульсное разрушение материалов, высоковольтные генераторы импульсов, импульсные конденсаторы

Работами Кольского научного центра (КНЦ) РАН, Томского и Карагандинского политехнических институтов, института Механобр, выполнявшимися с 60-х годов прошлого века, созданы научно-технические основы технологий электроимпульсного разрушения материалов (ЭИТ) для бурения, дробления и резания горных пород, предназначенных для добычи и обогащения руд, горно-строительных работ, обработки камня и других целей [1], [4], [5], [9]. Технологии с положительным технологическим эффектом апробированы в опытно-промышленном масштабе. Технологическая эффективность способа обусловлена его высокой энергетической эффективностью, малой зависимостью электроимпульсной разрушаемости от крепости горных пород, высокой селективностью дезинтеграции полиминеральных сред, отсутствием влияния крепости и абразивности разрушаемого материала на стойкость и износ электроимпульсных породоразрушающих устройств.

При свойственной электроимпульсным технологиям высокой технологической эффективности их масштабному применению до последнего времени препятствовал ряд объективных технико-экономических факторов, и прежде всего – отставание в разработке электротехнического обеспечения способа. Под электротехническим обеспечением технологий ЭИ понимается оптимальный выбор схемных решений и элементной базы технических средств формирования и передачи к забою разрушения импульсов высокого напряжения с параметрами, обеспечивающими эффективный пробой и энергетически эффективное нагружение материала, и с техническими характеристиками оборудования (производительностью, стоимостью, ресурсом работы, массогабаритными параметрами), обеспечивающими экономическую эффективность процесса. По

удельным массогабаритным характеристикам установки отдельных ЭИ-технологий, прежде всего установки дезинтеграции руд, значительно уступают установкам механического дробления и измельчения. Все это, естественно, учитывается через экономические составляющие (затраты на строительство и эксплуатацию зданий), но является сдерживающим фактором при отсутствии необходимых площадей под размещение установки. Решение проблем повышения конкурентоспособности электроимпульсных технологий состоит в кардинальном совершенствовании электротехнического обеспечения электроимпульсных процессов, в разработке и освоении новых технических решений, в использовании источников импульсов с высокими удельными энергетическими характеристиками, например адаптацией технических решений в отношении зарядных устройств и генераторов импульсов, заимствованных из смежных отраслей электротехники и электроники, к условиям электроимпульсной технологии.

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭИТ

Электроимпульсные технологии реализуются на импульсном высоком напряжении с амплитудой импульса не ниже 200–250 кВ при длительности фронта не выше 10^{-6} с, если процесс разрушения материала осуществляется в диэлектрической среде, и не выше $(1-2) \cdot 10^{-7}$ с при осуществлении процесса в воде. Оптимальный выбор уровня напряжения – это предмет компромисса между электрической надежностью работы устройства и энергетической эффективностью процесса. С повышением амплитуды напряжения электрическая надежность снижается по причине увеличения вероятности пробоя

изоляции устройства, но за счет возможности увеличить разрядные промежутки может быть повышена энергетическая эффективность процесса, так как величина разрядного промежутка определяет потенциально возможный объем разрушения единичным импульсом, КПД передачи энергии в канал разряда, полноту использования энергии канала разряда на производительный процесс трещинообразования. В большинстве процессов разрядные промежутки составляют 20–30 мм и это часто определяется технологическими условиями (диаметром скважины, шириной щели). Однако при бурении скважин большого диаметра, дезинтеграции крупных фрагментов горных пород, руд, искусственных материалов разрядные промежутки могут достигать величины 0,1–0,3 м, а уровни напряжения, соответственно, повышаются до 600–800 кВ.

Мощность зарядных устройств определяется требуемой производительностью установки, исходя из учета энергоемкости процессов разрушения и того факта, что частота следования импульсов по условиям экономически обоснованной промывки забоя разрушения не превышает 25–30 Гц. Это соответствует десяткам киловатт при работе генератора на один породоразрушающий элемент и не более 100–150 кВт при параллельной работе нескольких генераторных блоков.

Принципиальная блок-схема и электрическая схема электроимпульсной установки представлены на рис. 1.

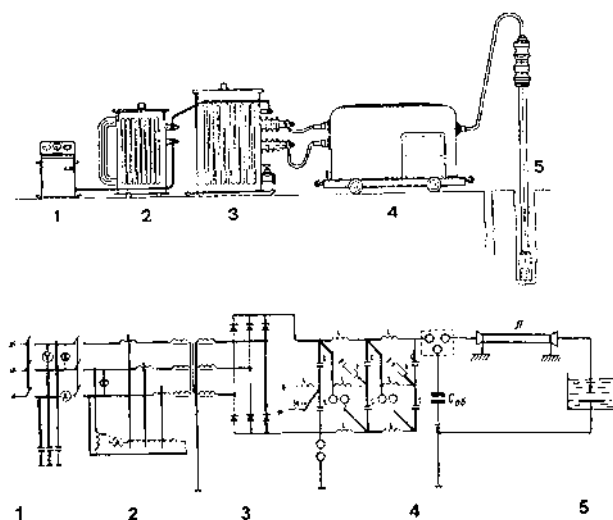


Рис. 1. Принципиальная блок-схема и электрическая схема электроимпульсной установки: 1 – пульт управления, 2 – регулирующий дроссель, 3 – повысительно-выпрямительное устройство, 4 – генератор импульсов, 5 – технологическое устройство с системой передачи импульса, $C_{об}$ – элемент коррекции фронта импульса, L – передающая линия

Электротехническая часть установок различного технологического назначения содержит одинаковые элементы и включает в себя два от-

носительно самостоятельных блока: зарядное повысительно-выпрямительное устройство с элементами, позволяющими управлять процессом заряда и частотой следования импульсов, и источник импульсов высокого напряжения. Определяющими параметрами установки являются уровень импульсного напряжения, энергия единичного импульса и номинальная мощность.

ЗАРЯДНЫЕ УСТРОЙСТВА

Начало работ по электроимпульсным технологиям относится ко времени, когда только начиналось освоение полупроводниковой техники. В исследовательских установках еще использовались кенотроны и селеновые вентили; к разработке выпрямительных устройств для технологических установок были привлечены организации электротехнической промышленности с ориентацией на использование все более совершенных полупроводников с более высоким КПД выпрямления. С учетом требуемого для ЭИТ-уровней импульсного напряжения (300 кВ и выше) предпочтительный уровень зарядного напряжения определялся в диапазоне 50–100 кВ, а максимальная мощность зарядных устройств в большинстве случаев могла быть ограничена величиной 100–250 кВт.

Отдельные вопросы – оптимизация величины заряда емкостного накопителя энергии и управление частотой срабатывания генератора импульсов. В разработку вопросов оптимизации процесса заряда емкостных накопителей существенный вклад внесла николаевская школа электрогидравлики (И. В. Пентегов и др.), и этот опыт учитывается при создании оборудования для электроимпульсных технологий. В исследовательской практике ЭИ-способа используется весь спектр установок одно- и трехфазного выпрямления с токоограничивающими и регулирующими скорость заряда элементами как по высокой, так и по низкой стороне.

Опыт эксплуатации установок с дросселями по высокой стороне показал, что создание высоковольтных дросселей для больших зарядных токов связано со значительными трудностями, требует больших размеров сердечников, изготовленных из специальных сталей, а по массогабаритным параметрам схема существенно уступает регулированию заряда дросселем насыщения с низкой стороны. Существенным недостатком является и то, что при использовании схемы зарядки через высоковольтный дроссель ограничены возможности плавного изменения частоты следования импульсов. Для ступенчатого изменения частоты следования импульсов используют дроссели с отпайками, плавная регулировка возможна лишь в режимах отбора мощности ниже номинальной (при зарядном напряжении генератора импульсов ниже номинального выходного напряжения выпрямителя частота регулируется изменением напряжения с низкой стороны

трансформатора). Например, в схеме с дросселями по высокой стороне и автотрансформатором АТМКТ 250/0,5 (мощность 250 кВА, класс изоляции обмоток 0,5 кВ) по низкой стороне для получения частоты следования импульсов от 10 до 20 Гц величина индуктивности зарядного дросселя с высокой стороны должна составлять от 880 до 220 Гн. Наш опыт работы с дросселем по высокой стороне индуктивностью в пределах 400–600 Гн показал, что кроме отмеченных выше особенностей может иметь место неустойчивая работа генераторов импульсных напряжений (ГИН), собранных по схеме Аркадьева – Маркса.

Нередки случаи, когда спустя несколько зарядных циклов происходило насыщение сердечника дросселя, индуктивность дросселя резко падала, вследствие чего происходило загорание дуги в искровых промежутках разрядников.

В промышленных установках предпочтение отдается зарядным устройствам (ЗУ) с дросселем насыщения по низкой стороне. Достоинствами такой схемы по сравнению с другими являются более полное использование мощности трансформатора, малые пульсации выходного напряжения, сравнительно низкие обратные напряжения вентилей. При регулировании напряжения и скорости заряда на низкой стороне трансформатора габариты и вес ЗУ получаются минимальными по сравнению с вариантами регулирования на стороне выпрямленного тока. Исследовательские и промышленные установки ограниченной мощности могут использовать промышленные типы зарядных устройств однофазного выпрямления. На рис. 2 представлена установка для раскрытия сростков слюды в процессе монтажа, зарядное устройство которой выполнено на базе трансформатора АИФ-400 с дросселем насыщения по низкой стороне (напряжение – 80 кВ, мощность – 38 кВА).

Трехфазный трансформатор (Тр) подключается к сети через управляемый подмагничиванием трехфазный дроссель насыщения (Др). На выходе трансформатора включен трехфазный мостовой выпрямитель (В). Конденсатная батарея генератора импульсов (С) подключена непосредственно к выпрямителю. Схема зарядного устройства с дросселем насыщения позволяет плавно изменять частоту следования импульсов путем подмагничивания дросселя постоянным током. Суммарная индуктивность зарядной цепи складывается из индуктивных сопротивлений дросселя насыщения и силового трансформатора и выполняет роль ограничителя тока в начальный период зарядки генератора и в период разряда генератора на нагрузку.

Для целей ЭИТ по заданиям КНЦ РАН Московским электрозаводом им. Куйбышева (МЭЗ) и Тольяттинским филиалом Всесоюзного энергетического института (ТФ ВЭИ) был разработан ряд зарядных устройств, испытанных на технологических установках КНЦ РАН.

Принципиальная схема зарядного устройства трехфазного выпрямления приведена на рис. 3.



Рис. 2. Установка для раскрытия сростков слюды (в процессе монтажа), на переднем плане – зарядное устройство АИФ-400

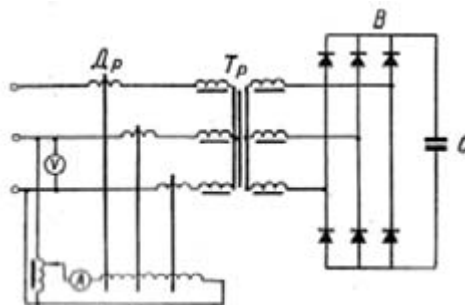


Рис. 3. Принципиальная схема зарядного устройства трехфазного выпрямления с дросселем насыщения по низкой стороне

БЛОК РНТМ 78/05-ВТМ 125/70 (ВТМ 27/45)

Для стандартного выпрямителя типа ВТМ 125/70 производства МЭЗ (полная мощность – 153 кВА, активная мощность – 125 кВт, номинальное выпрямленное вторичное напряжение – 70 кВ, номинальный выпрямленный ток – 1,8 А) и отдельно разработанного ВТМ 27/45 в качестве регулятора напряжения и скорости заряда емкостного накопителя разработан дроссель насыщения с подмагничиванием РНТМ 78/05 (номинальная мощность – 78 кВА, максимальный фазный ток – 120 А) с пределами изменения фазной индуктивности дросселя от 0,05 до 0,01 Гн при изменении тока подмагничивания от 0 до 5 А.

В технологической установке дробления руд зарядный блок РНТМ 78/05-ВТМ 125/70 (рис. 4) обеспечивал в режиме параллельного заряда работу 6 ГИН двух уровней напряжения и энергии (2 ГИН с зарядной емкостью по 0,47 мкФ и 4 ГИН по 0,33 мкФ) с регулируемой частотой срабатывания от 1 до 10 в секунду (при последовательном соединении катушек РНТМ) и до 20 в секунду (при параллельном соединении катушек РНТМ) при КПД = 0,74 и $\cos \phi = 0,84$.

Нестабильная работа ГИН с загоранием дуги в искровых разрядниках отмечалась в ряде случаев и в схеме с дросселем насыщения на низкой стороне. Вследствие наличия паразитных связей разрядного контура ГИН с цепью подмагничивания РНТМ и сравнительно большой постоянной времени последней при каждом срабатыва-

нии ГИН имеют место броски тока в цепи подмагничивания до 20 А, совпадающие по направлению с постоянным током. Это приводит к кратковременному (на 20–50 мксек) насыщению дросселя до значения 0,001 Гн и загоранию дуги с последующим ее самопогасанием по мере снижения фазного тока РНТМ. В данной схеме необходимы специальные меры по защите цепи подмагничивания, уменьшение ее постоянной времени на порядок или включение последовательно с РНТМ дополнительной нерегулируемой линейной индуктивности (0,01 Гн).

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ЗУ-400 (РАЗРАБОТКА ТФ ВЭИ)

Данное ЗУ собрано по трехфазной мостовой схеме при соединении обмоток трансформатора Y/Y_0 , имеет вторичное выпрямленное напряжение 40–60 кВ со ступенью регулирования 5 кВ, номинальный выпрямленный ток 0,6 А, номинальную мощность 58 КВА. Раздельное регулирование уровня напряжения и скорости заряда осуществлялось переключением числа витков обмотки низкого напряжения трансформатора и изменением числа витков линейной индуктивности, включенной в фазы трансформатора со стороны НН, в диапазоне от 0,05 до 0,005 Гн. Данное ЗУ, предназначенное для питания импульсного трансформатора установки бурения скважин, обеспечивало заряд емкостного накопителя 1 мкФ до напряжения 55 кВ с регулируемой частотой от 1 до 10 Гц. Устройство лишено отмеченного выше недостатка, свойственного дросселю насыщения, и работает стабильно, но однако не имеет возможности плавного изменения частоты срабатывания.

ЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО ТИПА КВТМ-75/2×50-76У2 (РАЗРАБОТКА МЭЗ)

В стандартных выпрямителях типа ВТМ и в ЗУ-400 используются селеновые столбы типа 15ГЕ, обладающие значительным сопротивлением в проводящем направлении. Это приводит к существенным потерям мощности и снижению КПД выпрямителя (на 15–16 %). В зарядном устройстве КВТМ-75/2×50 (номинальная активная мощность – 75 кВт, номинальное выпрямленное напряжение – ± 50 кВ, средний выпрямленный ток – 0,75 А), предназначенном для питания ГИН шахтного исполнения (ГИНШ), применены кремниевые диоды. Регулирование напряжения и скорости заряда осуществляется встроенным РНРМ-100/0,5 по низкой стороне трансформатора. Величина индуктивности дросселя при полном изменении тока подмагничивания лежит в пределах от 0,02 до 0,002 Гн, что позволяет регулировать скорость заряда емкостью накопителя 0,7 мкФ до 100 кВ в пределах от 1 до 20 Гц с КПД 0,9 и $\cos \phi$ 0,8.

Созданные ЗУ по номиналам напряжения и мощности удовлетворяли требованиям устано-

вок для электроимпульсных технологий, но революционный прорыв в выпрямительной технике, произошедший в последние два десятилетия, переносит эти достижения в область истории разработки ЭИ. Последние достижения в технологии изготовления источников питания обеспечили существенное уменьшение их габаритных размеров, массы и рост КПД энергопреобразования по сравнению с их аналогами, которые выпускались всего несколько лет назад. В этом плане представляют интерес разработки ВЭИ (РТГ2), Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, фирмы Spellman и др. В табл. 1 представлена оценка удельной мощности ЗУ различных фирм. Как видно, конструкции ЗУ на современной элементной базе уже сейчас позволяют на два порядка улучшить удельные мощностные характеристики оборудования. При равенстве удельных затрат энергии на дезинтеграцию различными аппаратами это соответствует соотношению удельных характеристик способов по производительности.

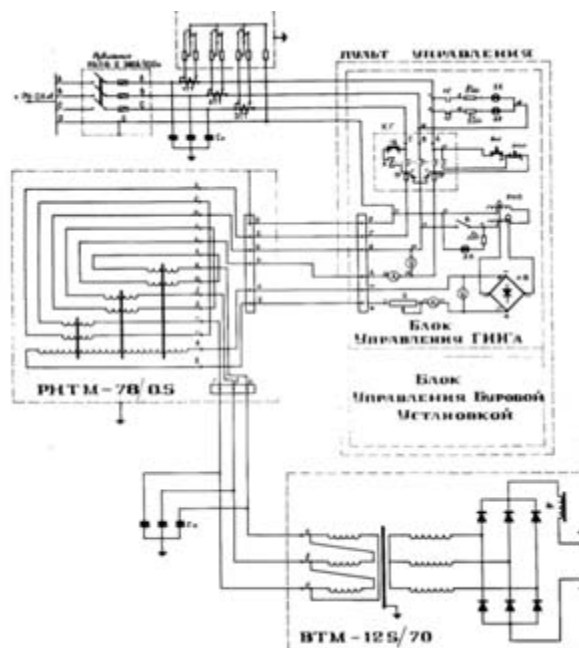


Рис. 4. Схема зарядного устройства РНТМ 78/05-ВТМ 125/70

Таблица 1
Удельная мощность зарядных устройств на различной элементной базе

Устройство	Мощность, кВт	Габариты, мм	Удельная мощность, кВт/м ³
УВН-1,2,3 (РТГ2 ВЭИ)	0,45–0,6	522 × 310 × 240	11,5 ... 15,4
УВН-4 (РТГ2 ВЭИ)	50	1405 × 1190 × 996	30
Spellman	0,6	89 × 483 × 508	27
ДИК (ВТМ)	20	5000 × 4000 × 2800	0,36

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

В исследовательских и технологических установках генерирование импульсов для процессов ЭИ в основном базируется на использовании относительно надежной, но большой по габаритам многоступенчатой (5–6 ступеней) схемы генератора Аркадьева – Маркса. Низкие удельные характеристики по габаритным параметрам генератора импульсов обусловлены очень высоким уровнем напряжения (сотни киловольт). При этом габариты установки определяются не только и не столько габаритами электротехнического оборудования, сколько большими изоляционными промежутками до ограждений, которые вынужденно выдерживаются в конструкции установки. Размещение генераторного блока в маслonaполненном баке решает проблему только частично; имеются технические сложности с компоновкой и обслуживанием блока разрядников и разделительных индуктивностей между ступенями генератора.

Оптимальным вариантом промышленного генератора импульсов для электроимпульсных технологий по схеме генератора Аркадьева – Маркса можно считать созданный по техническим условиям Кольского научного центра РАН Харьковским политехническим институтом генератор импульсных напряжений шахтного исполнения ГИНШ-300 (разработка выполнена под руководством профессора В. В. Конотопа) [7]. При разработке генератора сделана попытка в максимально возможной мере учесть требования, предъявляемые промышленной эксплуатацией к подобной установке. К числу основных требований относятся следующие.

- Энергетически эффективное формирование импульсов напряжения требуемых параметров на низкоомной нагрузке. ГИНШ рассчитан на напряжение 300 кВ с длительностью фронта $0,15 \cdot 10^{-6}$ с на нагрузке в 50 Ом. Практически это соответствует возможности использования генератора с водой в качестве рабочей жидкости для основных технологий ЭИ: бурения скважин 100–150 мм, крупного дробления и мелкого измельчения руд, резания и поверхностной обработки массива и блочного камня с длиной режущей части до 400–500 мм. В ГИНШ использована схема коррекции фронта высоковольтных импульсов компенсацией индуктивности разрядного контура обостряющей емкостью.
- Обеспечение плавного регулирования частоты импульсов, приспособляемого в соответствии с конкретными режимами работы установки. Электрическая схема ГИНШ предусматривает принудительный запуск ГИН поджигающим импульсом от дополнительного устройства. Испытания показали стабильную работу ГИНШ как в режиме управляемого запуска в интервале до 25 Гц, так и «на самоходе».

- Улучшение удельных энергетических и массогабаритных характеристик. В генераторе использованы конденсаторы с высоким уровнем рабочего напряжения (50 кВ), с работой в номинальном режиме и схема двухстороннего заряда, то есть напряжение ступени составило 100 кВ. Таким образом, в генераторе всего 3 ступени, что снижает потери и повышает стабильность срабатывания разрядников, а также компактность генератора.
- Обеспечение высокого ресурса работы элементов оборудования. ГИНШ собран на конденсаторах КБМЭГ-50-0,2 с гарантированным ресурсом работы 10^8 циклов. Обостритель на 300 кВ емкостью $2 \cdot 10^{-9}$ Ф выполнен из секций с тем же уровнем рабочей напряженности поля, что и конденсаторы ГИН. Коммутирующие разрядники тороидального типа на рабочее напряжение 100 кВ выполнены вентилируемыми воздухом в герметичном исполнении и при атмосферном давлении рассчитаны на токи до 20 кА с декрементом 1,2–1,5 на частоту импульсов до 25 Гц. Большая рабочая поверхность электродов обеспечивает повышенный ресурс работы разрядников. Герметичное исполнение разрядного блока позволяет снизить уровень шума до допустимых норм, оградить обслуживающий персонал от светового облучения и воздействия ионизированного газа.
- Соответствие конструктивного исполнения условиям эксплуатации. Конструкция генератора с прочным герметичным и ударостойким стеклопластиковым корпусом позволяет использовать его в рудниках и карьерах, на обогатительных фабриках в условиях повышенной влажности атмосферы, наличия агрессивных рудничных вод, запыленности и загазованности воздуха.

В ГИНШ-300 (рис. 5) обеспечены следующие удельные энергогабаритные характеристики: удельная энергия – $0,25$ кДж/м³ ($6,25$ кВт/м³ при частоте следования 25 импульсов в секунду) с коэффициентом заполнения объема установки энергонакопительными элементами 0,25. Это лучше по сравнению с другими экспериментальными электроимпульсными установками, но тем не менее недостаточно, чтобы быть сопоставимым с механическими преобразователями энергии в работу разрушения (дезинтеграторами).

Одним из путей улучшения удельных энергогабаритных характеристик источников импульсов в установках ЭИ является применение импульсных трансформаторов (ИТ). Оно главным образом преследует цель уменьшения габаритов установок за счет исключения многокаскадных ГИН, представляя накопитель энергии единичным элементом. Более того, практика показала, что в установках электроимпульсного бурения ИТ может быть размещен непосредственно в скважине перед забоем. В этом случае

решаются многие проблемы, связанные с передачей на забой импульсов высокого напряжения, причем не столько по причине деформации импульса, сколько из-за проблем с обеспечением электрической прочности передающей системы. Буровой став является одновременно и элементом технологической схемы, задающим направление буровому инструменту и используемым для промывки скважины с удалением с забоя продуктов разрушения, то есть он должен иметь соответствующие каналы для прокачки жидкости. В схеме с ИТ амплитуда канализируемого к забоя импульса напряжения снижается с 300–400 до 40–50 кВ.

Опробованы несколько вариантов ИТ, отличающиеся схемой и типом материала магнитопровода. Тольяттинским филиалом ВЭИ по заданию КНЦ РАН разработан макетный 4-каскадный ИТ погружного типа с магнитопроводом из трансформаторной стали, предназначенный для установки бурения скважин с промывкой водой при буровом наконечнике диаметром 400 мм (рис. 6). Однако подобная схема генератора обладает тем недостатком, что при разряде накопительной емкости НБ (накопительной батареи) в нагрузку (R_n - C_n) после ее пробоя через ИТ предельная мощность импульса невелика вследствие высокого волнового сопротивления цепи разряда. По той же причине сечение железа сердечника ИТ имеет значительные размеры.

В НИИ электрофизической аппаратуры (НИИ ЭФА) им. Ефремова, г. Санкт-Петербург, по заданию КНЦ РАН был разработан однокаскадный ИТ, нагружаемый на контур обострения фронта высоковольтных импульсов с обостряющим конденсатором на напряжение 400 кВ. Для гашения циклов перезаряда обострителя была применена схема с дополнительной формирующей линией, подключаемой параллельно накопительной емкости с первичной стороны ИТ.

В разработках ТФ ВЭИ и НИИ ЭФА (рис. 7) удалось существенно уменьшить размеры генераторов импульсов, но с точки зрения минимизации размера и веса не устраивает использование в этих разработках магнитопроводов на железе. Решением является переход к использованию материалов с высокой магнитной проницаемостью, например ферритов. Достижимость заявленных целей подтверждается результатами опробования ИТ, разработанного НИИ высоких напряжений (НИИ ВН) (г. Томск) для бурения скважин диаметром 200 мм [3]. В этом ИТ применен импульсный трансформатор на ферритовой основе, размещаемый на забое скважины (рис. 8); при этом ферритовый сердечник создавал линию с нелинейным элементом в первичной цепи, а также служил сердечником трансформатора. Такая схема трансформатора дает возможность как преобразования амплитуды импульса, так и увеличения крутизны его фронта.

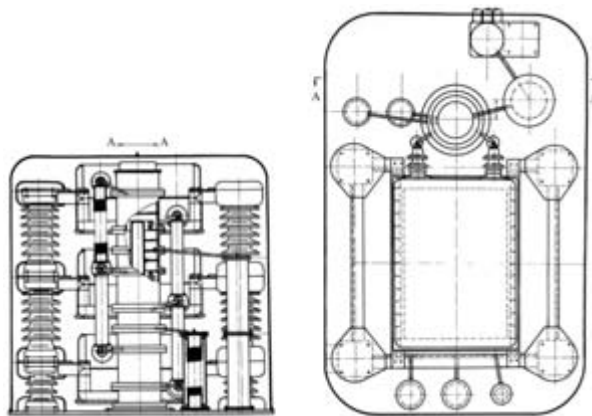


Рис. 5. Компоновка ГИНШ-300 (вид сбоку и вид сверху, электрическую схему см. на рис. 1)

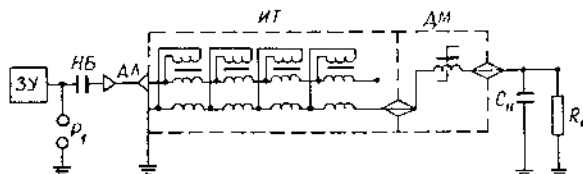


Рис. 6. Схема источника импульсов на основе каскадного импульсного трансформатора



Рис. 7. Источники импульсного напряжения по схеме ИТ, разработки ТФ ВЭИ (слева) и НИИ ЭФА (справа)

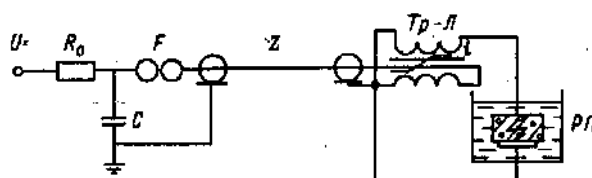


Рис. 8. Схема импульсного трансформатора на ферритовой основе

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭИ

В связи с оценкой перспектив промышленного использования электроимпульсных технологий наиболее острым вопросом был и частично остается ресурс работы конденсаторов и его удельные энергетические характеристики.

Экономическая эффективность ЭИ-технологий в определяющей степени зависит от ресурса работы конденсаторов. Стоимость конденсаторов составляет значительную, а в некоторых случаях и основную часть эксплуатационных

затрат. В первом приближении «ресурсный» критерий экономической целесообразности может быть определен следующими цифрами: измельчение рядовых руд и материалов, бурение и резание горных пород оправдывается при ресурсе работы конденсаторов порядка миллиарда (10^9) циклов «заряд – разряд»; бурение специальных скважин в крепких скальных породах, селективное измельчение и разупрочнение крупновкрапленных руд повышенной стоимости – при ресурсе в 100 миллионов (10^8) циклов; в специальных установках с ограниченной производительностью (геологические пробы, специальные материалы) – при ресурсе 10 миллионов (10^7) циклов [6].

В момент начала работ по электроимпульсным технологиям конденсаторов с требуемыми характеристиками не было. Выпускаемые конденсаторы были рассчитаны либо на режим работы при одиночных импульсах, либо на низкие разрядные токи при высоком декременте затухания в частотном режиме работы. При этом ресурс, не превышающий 10^6 – 10^7 импульсов (табл. 1), был явно недостаточен. Для проведения технологических исследований электроимпульсного разрушения с повышенной частотой следования (как правило, не более 25 в секунду) в генераторах импульсов конденсаторы приходилось использовать в режимах нагрузки по напряжению в 0,23–0,3 от номинального с соответствующим увеличением габаритов установок. За 40 лет исследований удалось на 3 порядка повысить ресурс работы конденсаторов. По техническим условиям Кольского научного центра РАН Серпуховским НПО «Конденсатор» были разработаны и изготовлены опытные партии конденсаторов ИМ-30×0,2, ИС-30×0,2 и ИМ-50×0,2. Техническим заданием предусматривался ресурс работы 10^8 импульсов при частоте следования импульсов 20 в секунду, разрядном токе 5 кА с декрементом затухания 2. В качестве пропиточного диэлектрика в конденсаторах ИМ-30×0,2, ИС-30×0,2 применены конденсаторное масло и дихлордифенил соответственно. Результаты испытаний и опыт эксплуатации опытной партии этих конденсаторов оказались неудовлетворительными (большей частью по причине качества пайки). Класс напряжения данных конденсаторов (30 кВ) не являлся оптимальным для ЭИТ, и дальнейшее участие КНЦ РАН в работе над этой серией конденсаторов по причине отсутствия финансового обеспечения было прекращено. Значительно более перспективной разработкой явился опытный конденсатор ИМ-50×0,2 (рис. 9). В ходе стендовых испытаний опытная партия конденсаторов в указанном номинальном режиме при непрерывной работе на частоте 20 имп./сек в течение 600 часов без каких-либо изменений успешно выдержала $4,3 \times 10^7$ импульсов. Однако массогабаритные параметры конденсатора невысоки, энергоемкость конденсаторов составляет 3,7 Дж/дм³.

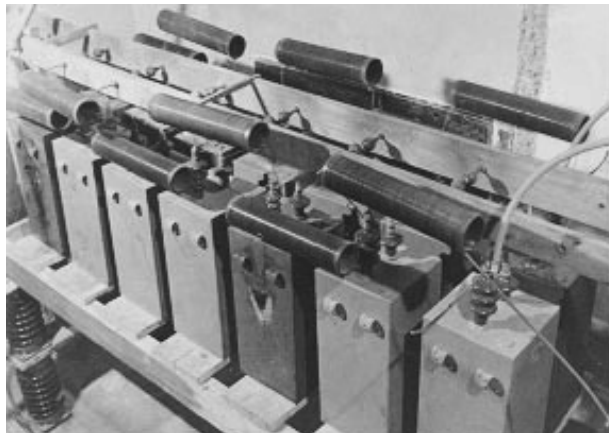


Рис. 9. Генератор импульсного напряжения на базе конденсаторов ИМ-50×0,2

Для существенного улучшения свойств конденсаторов необходимо снижение уровня потерь энергии в диэлектрике известным способом – применение комбинированной бумажно-плёночной изоляции. В проектных разработках ИИПТ НАН Украины унифицированных высоковольтных импульсных конденсаторов предусмотрен бумажно-пропиленовый диэлектрик с пропиткой касторовым маслом. Данные конденсаторы, спроектированные в габаритах конденсатора ИМН-100-0,1, что удобно для монтажа и обслуживания установки, имеют в 5–6 раз более высокую энергоемкость (табл. 2).

С учетом разработок других фирм современный уровень разработки конденсаторов для целей ЭИ-технологий по ресурсу оценивается как в высокой степени подготовленный к использованию для ресурса 10^7 циклов, как потенциально обеспеченный – для ресурса в 10^8 циклов и как принципиально возможный – для ресурса 10^9 циклов. Современная элементная база уже сейчас позволяет создать компактные установки ЭИ-технологий в спецприменениях с ограниченной производительностью. Дальнейшее совершенствование установок со стороны повышения их мощности последовательно вовлечет в производственное использование другие технологические направления способа.

ОБОСТРИТЕЛИ

При разработке ЭИ-технологий по условиям пожаробезопасности и по экономическим соображениям необходимо исходить из использования в качестве рабочей среды воды или растворов на нефтяной основе с высоким содержанием воды по типу эмульсий «вода в масле». В этом случае формирование импульсов напряжения с требуемыми для пробоя горной породы параметрами потребует использования генераторов по схеме обострения фронта высоковольтных импульсов, и обостряющую емкость необходимо рассчитывать на класс напряжения 300–500 кВ при величине емкости в интервале (1–5) мкФ

[8]. На экспериментальных установках ЭИТ различного назначения опробованы обострители $(1-10) \cdot 10^{-9}$ нФ на напряжение 400–600 кВ как специального исполнения (чаще в виде коаксиальной системы на глицерине), так и на основе промышленных типов компенсационных конденсаторов. Предпочтение следует отдать обострителям на основе жидкого диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной (глицерин, вода), причем регламент эксплуатации обострителей должен предусматривать периодическое кондиционирование жидкого диэлектрика. Можно рассчитывать на облегченный режим работы обострителя с зарядом и разрядом в микросекундном диапазоне, но при реализации мер принудительного разряда обострителя в случае нештатной работы обостряющего разрядника или породоразрушающего устройства.

РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНОСТИ ГИН

В качестве разделительных индуктивностей ГИН (величина 1–1,5 мкГн) можно ограничиться цилиндрическими катушками с однослойной намоткой на изоляционном каркасе с шагом и глубиной канавки не менее 5 мм и применением ферритовых стержней (для уменьшения размеров).

КОММУТИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

В настоящее время лучшим вариантом коммутаторов ГИН по эксплуатационным показателям являются вентилируемые разрядники с продувкой воздухом в герметичном, шумопоглощающем кожухе осесимметричного или коаксиального типа с синхронной регулируемой перестройкой величины промежутков. Для схем с импульсным трансформатором стадию опробования проходят газовые управляемые разрядники. В отдаленной перспективе рассматривается

твердотельная коммутация, уже апробированная в режимах высоковольтных (до 100 кВ) мало-мощных (порядка 1 Дж) импульсов [9].

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫХ УСТАНОВОК

Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к электроустановкам, электроимпульсные установки должны быть выполнены с учетом обеспечения снижения до безопасного уровня наведенных потенциалов и токов утечки.

Наведенные потенциалы и токи утечки вызываются разрядным процессом в контуре генератора импульсов при наличии паразитных емкостных и индуктивных связей между разрядным контуром и находящимися поблизости электрическими цепями и токопроводящими конструкциями, при наличии гальванических связей между контуром разряда и заземленными металлоконструкциями. Наведенные в окружающем пространстве напряжения создают токи утечки, которые растекаются как по металлоконструкциям, так и непосредственно по земле. Форма импульсов тока утечки аналогична форме тока в разрядном контуре, а величина их пропорциональна наведенным потенциалам и убывает с увеличением расстояния от установки.

Наведенные потенциалы могут быть, прежде всего, причиной нестабильной работы самой установки, особенно при наличии магнитонасыщающихся элементов. Наведенные потенциалы могут представлять опасность для работы обслуживающего персонала, а также для различных электрических и электронных устройств. При использовании ЭИ-установок на горном предприятии наведенные потенциалы могут представлять опасность для ведения взрывных работ, вызывая непроизвольное срабатывание детонаторов.

Таблица 2

Характеристики импульсных конденсаторов

Тип конденсатора	Напряжение, кВ	Емкость, мкФ	Частота импульсов, Гц	Разрядный ток, кА	Декремент	Средний ресурс, имп.	Энергоемкость, Дж/дм ³	Изготовитель
КЭМ-50-1	50	1	2,2	20	10	10^7	4,7	ОЗ ПКБЭ
ИК-50-2×0,5	50	1	2,2	40	10	2×10^8	4,9	ОЗ ПКБЭ
ИК-50-2×2,5	50	5	0,5	30	10	3×10^6	23,0	ОЗ ПКБЭ
ИКТ-50-1	50	1	2	20	50	$7,5 \times 10^7$	19	з-д «Конденсатор»
ИК-50-2	50	2	0,03	16	10	5×10^6	37,8	з-д «Конденсатор»
ИКМ-50-3	50	3	0,05	250	1,5	$3,5 \times 10^4$	58	з-д «Конденсатор»
ИМН-100-0,1	100	0,1	200	2	—	10^8	55	
ИМ-50-0,2 (проектная разработка)	50	0,2	20	10	3	10^8	3,7	
УВИК (проектная разработка)	50	0,1	100		10	10^9	3–10	ОЗ ПКБЭ
	50	0,5	10		10	10^8	10–20	
	50	1,0	2		10	10^7	20–30	

Способы снижения наведенных потенциалов известны и могут быть полностью перенесены на установки ЭИТ. Необходимо, прежде всего, ослаблять паразитные связи между генератором высоковольтных импульсов и приемниками наводок. Снижение паразитных связей может быть достигнуто путем разноканального монтажа установок, экранирования источников и приемников наводок, а также установкой в низковольтных цепях развязывающих фильтров (разделительных трансформаторов в цепи питания контрольно-измерительной аппаратуры). Для монтажа вторичных цепей необходимо применять кабели и провода с металлическим экраном, максимально удалять низковольтные цепи от высоковольтного разрядного контура генератора, применять по возможности радиальное расположение кабельных трасс и размещать прямой и обратный провод в общем экране, повышать эффект экранирования низковольтных цепей их намоткой на ферромагнитные сердечники. Оболочки кабелей необходимо заземлять как на концах трасс, так и в возможно большем числе промежуточных точек, при этом все кабели, расположенные в одном канале, должны заземляться в общих точках. При подключении фильтров провода подключения конденсаторов должны иметь минимальную длину.

Большое значение в вопросе снижения наводок до допустимых существующими правилами норм играет правильное устройство заземляющего контура и подключение к нему нулевой точки разрядного контура. Разрядный контур должен соединяться с землей в одной опорной точке. Предпочтительно иметь разрядный контур, изолированный от защитного контура заземления. В случае необходимости в ближней зоне к этой точке могут быть установлены до-

полнительные заземлители для эффективного выравнивания нулевой точки разрядного контура с потенциалом земли.

Опыт экспериментальных работ по ЭИТ в условиях действующих предприятий показал достаточность указанных мероприятий по снижению уровня наведенных потенциалов и средств защиты от них для обеспечения электробезопасной эксплуатации установок ЭИТ на промышленных предприятиях, в рудниках и карьерах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электрофизическая наука разработала энергетически эффективный способ разрушения горных пород, позволяющий создать новый класс машин широкого спектра технологического применения – бурения скважин в крепких скальных породах, резания и поверхностной обработки массива, селективной дезинтеграции минерального сырья и отходов производства. Для обеспечения возможности реализации разработок в промышленном масштабе необходимо специализированное электротехническое оборудование известных электротехнике типов (трансформаторы, выпрямители, конденсаторы, коммутаторы), но к которому предъявляются требования повышенного ресурса и повышенной надежности в жестком динамическом режиме работы «заряд – разряд». Высоковольтное электроаппаратостроение для электро-разрядных технологий – сравнительно молодая отрасль электротехники. Имеющийся багаж технических идей по совершенствованию оборудования значителен, но реализован далеко не в полной мере. Поэтому следует ожидать технологического прорыва в этой отрасли, что несомненно даст импульс для дальнейшей практической реализации способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Завадовская Е. К. и др. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Томск: Изд-во Томского ун-та, 1971. 225 с.
2. Котов Ю. А., Месяц Г. А., Филатов А. Л. Комплексная переработка пиритовых отходов горно-обогатительных комбинатов наносекундными импульсными воздействиями // ДАН. 2000. Т. 372. № 5. С. 654–656.
3. Кривоносенко А. В., Семкин Б. В. Генератор высоковольтных импульсов // ПТЭ. 1982. № 6. С. 73–75.
4. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 324 с.
5. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Апатиты: КНЦ РАН, 1995. 276 с.
6. Усов А. Ф. Перспективы технологий электроимпульсного разрушения горных пород и руд // Известия РАН, Энергетика. 2001. № 1. С. 54–62.
7. Усов А. Ф., Гладков В. С. Вопросы электротехнического обеспечения технологий электроимпульсного разрушения материалов источниками высоковольтных импульсов // Вестник НТУ ХПИ. 2004. Вып. 35. С. 143–154.
8. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука. Ленинградское отд-ние, 1987. 189 с.
9. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные (электрические) процессы в установках электроимпульсной технологии. Л.: Наука, 1987. 179 с.