

Схемы испытаний электрических аппаратов на коммутационную способность.

Основой подавляющего большинства лабораторий коммутационных испытаний высоковольтной аппаратуры являются ударные генераторы. Они представляют собой модификации синхронных турбогенераторов, предназначенные для выполнения большого числа (сотни тысяч) коротких замыканий. Во многих лабораториях установлено несколько генераторов, работающих параллельно. Вращение генераторов производится двигателями переменного (асинхронных) или постоянного тока. С двигателями переменного тока частота напряжения ударного генератора близка к частоте питающей сети двигателя, например, 50 Гц. С двигателями постоянного тока частота напряжения ударных генераторов может меняться, что дает возможность испытывать аппараты, предназначенные для работы в сетях с частотой 50 и 60 Гц.

В некоторых лабораториях вместо ударных генераторов, или наряду с ними, используется энергосистема с трансформаторами, чаще всего понижающими. Трансформаторы применяются и в лабораториях с ударными генераторами. Их отличительная особенность – малая индуктивность короткого замыкания. Подробные описания лабораторий коммутационных испытаний приведены, например, в [1].

С х е м ы п р я м ы х и с п ы т а н и й

Принципиальная схема однополюсных испытаний от ударного генератора приведена на рисунке 1.

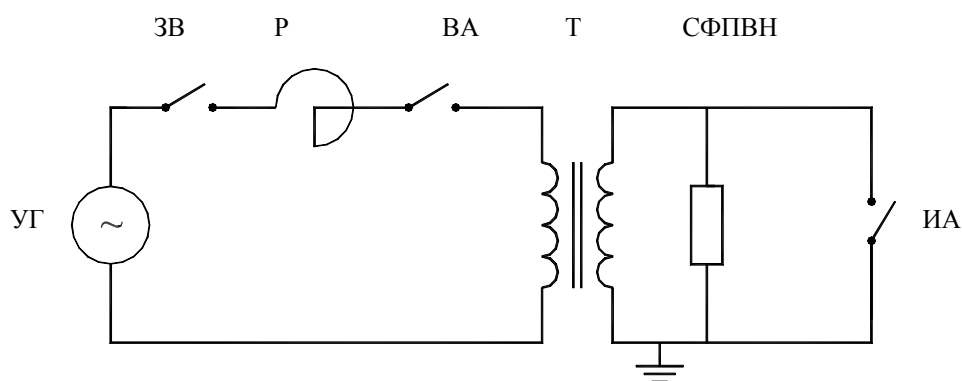


Рисунок 1.

УГ- ударный генератор; ЗВ- защитный выключатель; Р – регулируемый реактор; ВА- включающий аппарат; Т- трансформатор; СФПВН- схема формирования ПВН; ИА- испытуемый аппарат

При испытаниях на отключающую способность перед началом опытов ИА и ЗВ включены, ВА разомкнут. Ударный генератор возбуждается до требуемого напряжения, включается ВА и начинает проходить ток короткого замыкания. Испытуемый аппарат отключается, и через некоторое время отключается ЗВ.

При испытаниях на включающую способность испытуемый аппарат включается после включения ВА.

В НИИВА непосредственно от ударного генератора испытываются аппараты с номинальным напряжением 6 кВ и 10 кВ, с повышающими трансформаторами – 35 кВ. Отключение наведенных индуктивных и емкостных токов заземлителями на все классы напряжений проводятся по схемам с трансформаторами. При испытаниях разъединителей на отключение токов переключения шин, учитывая очень низкие (десятки и сотни вольт) напряжения, используются понижающие трансформаторы.

Синтетические схемы испытаний на отключающую способность.

В течение длительного времени синтетические методы признаны в международной практике в качестве эквивалентных прямым методам испытаний выключателей высокого напряжения на коммутационную способность. Целью синтетических испытаний является наибольшая экономичность установок для коммутационных испытаний выключателей при соблюдении требований эквивалентности.

Классические синтетические методы, принятые в качестве стандартных и в стандартах МЭК, и в ГОСТ, основаны на применении испытательных схем, состоящих из двух контуров. В одном из контуров имеется источник большого тока, но пониженного напряжения, во втором наоборот – источник меньшего тока, но повышенного напряжения.

Принцип действия основан на следующем.

Процесс коммутации выключателем токов, в том числе токов короткого замыкания, принято разбивать на три этапа. При отключении последовательность этапов во времени имеет вид:

- *этап большого тока*;
- *этап взаимодействия*, который длится, начиная от момента значительного нарастания напряжения на дуге вблизи нуля тока до момента прекращения остаточного тока;
- *этап высокого напряжения*, т.е. этап нарастания напряжения между контактами выключателя.

Основная идея синтетических испытаний состоит в том, чтобы при протекании тока через испытуемый выключатель обеспечивать его питание от контура с пониженным напряжением, но с большим током, а при восстановлении напряжения между контактами – от контура с большим напряжением. Этим и достигается экономичность по сравнению с прямой схемой, в которой на всех этапах испытуемый выключатель подключен к

источнику полной мощности, обеспечивающему как наибольшее значение тока, так и наибольшее значение напряжения.

В синтетических схемах с наложением напряжения испытуемый выключатель подключен к контуру большого тока на первом и втором этапах, а на третьем – к контуру большого напряжения. Эквивалентность в таких схемах несколько снижена, так как напряжение на дуге в испытуемом выключателе в течение второго этапа составляет значительную часть по отношению к напряжению источника контура тока, что усиливает искажающее влияние на форму отключаемого тока, особенно вблизи его нуля. Кроме того, точность синхронизации работы двух контуров в этих схемах должна быть очень высокой. Если в схемах с наложением тока – это сотни микросекунд, то в схемах с наложением напряжения – это единицы микросекунд. Основным преимуществом таких схем является экономичность.

Потребная энергия источника напряжения более чем на порядок меньше в схемах с наложением напряжения, чем в схемах с наложением тока, т.е. меньше габариты и стоимость установки, источников питания, помещений и т.п.

В синтетических схемах с наложением тока в течение второго и третьего этапов испытуемый выключатель подключен к контуру большого напряжения, в котором напряжение, по существу, соответствует напряжению прямой схемы, следовательно, искажения тока близки к тем, которые имеют место в прямой схеме. Поэтому общепризнанно, что данные схемы наиболее эквивалентно воспроизводят воздействия на испытуемый выключатель по сравнению с прямыми схемами, хотя для их реализации требуются источники большого напряжения значительно большей энергии, чем в схемах с наложением напряжения.

1 . С х е м ы с н а л о ж е н и е м т о к а .

Как и все синтетические схемы, схемы с наложением тока имеют отдельные источники тока и напряжения. Источником тока служат, как правило, ударные синхронные генераторы, источником напряжения – колебательный контур. На рисунке 2 приведена схема с параллельным наложением тока.

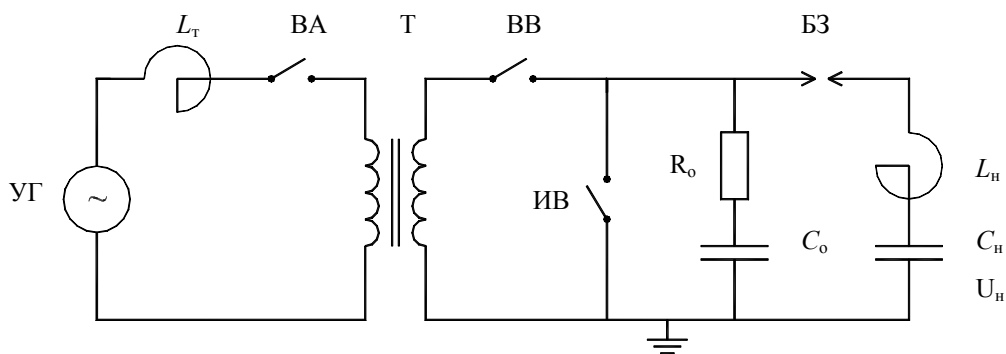


Рисунок 2.

УГ – ударный генератор; $L_{т}$ – индуктивность контура тока; ВА – включающий аппарат; Т – повышающие или изолирующие трансформаторы; ВВ – вспомогательный выключатель; ИВ – испытуемый выключатель; БЗ – быстродействующий замыкатель; $L_{н}$, $C_{н}$ – индуктивность и емкость контура высокого напряжения; R_o , C_o – элементы схемы формирования ПВН; $U_{н}$ – зарядное напряжение конденсатора $C_{н}$

В качестве источника тока используется ударный синхронный генератор УГ с трансформатором Т. Трансформатор служит для повышения генераторного напряжения, а иногда и просто как изолирующий генераторную цепь от цепи высокого напряжения. Зарядное напряжение $U_{н}$ конденсатора $C_{н}$ должно быть таким, чтобы, с учетом затухания и уменьшения напряжения за счет схемы формирования ПВН обеспечить приложение требуемого напряжения к испытуемому выключателю после гашения дуги. Значение индуктивности $L_{н}$ должно быть равно или близко к значению индуктивности прямой схемы испытаний. Значение емкости $C_{н}$ выбирается таким, чтобы частота колебаний контура $C_{н}$ - $L_{н}$ была порядка (300÷500) Гц.

Схема работает следующим образом.

При включении ВА через замкнутые выключатели ВВ и ИВ начинает проходить отключаемый ток I_o . За определенное время до последнего перед гашением перехода тока через нулевое значение, равное, например, трем четвертям времени полупериода колебаний собственной частоты контура высокого напряжения, замыкается БЗ и в контуре $C_{н}$ - $L_{н}$ начинает проходить ток $I_{н}$ повышенной частоты $\omega_{н}$, величина которого

$$I_{н} = \frac{I_o \cdot \omega}{\omega_{н}},$$

где ω – круговая промышленная частота источника тока, т.е. ток $I_{н}$ меньше I_o в $\frac{\omega_{н}}{\omega}$ раз.

Теперь через вспомогательный выключатель ВВ протекает ток I_o , а через испытуемый $I_o + I_{н}$ (см. рисунок 3). При прохождении тока I_o через нулевое значение ВВ гасит дугу и в течение времени $t_{н}$ испытуемый выключатель оказывается включенным

только в контур высокого напряжения с индуктивностью и напряжением, близкими к таковым при прямых испытаниях.

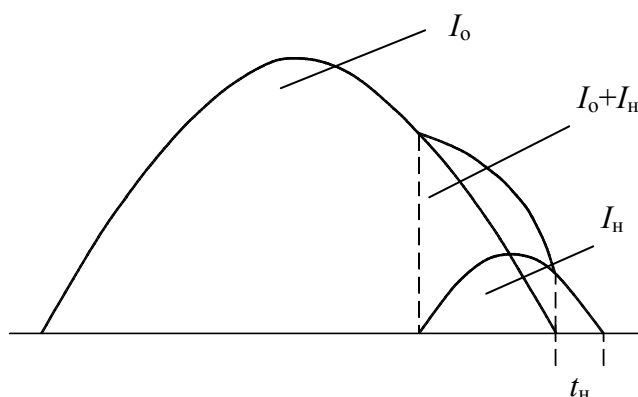


Рисунок 3.

Производная тока $\frac{di_n}{dt}$ при его подходе к нулевому значению равна

$$\frac{di_n}{dt} = \frac{U_n(t)}{L_n},$$

т.е. близка к реальной. После гашения дуги на испытуемом выключателе ИВ восстанавливается напряжение, форма которого определяется схемой формирования ПВН.

Длительность t_n нахождения выключателя в контуре высокого напряжения должна находиться в пределах

$$150 \text{ мкс} \leq t_n \leq \frac{T_n}{4},$$

где T_n – период колебаний контура высокого напряжения.

Схема с последовательным наложением тока отличается от схемы с параллельным наложением тем, что контур высокого напряжения подключается не к испытуемому, а к вспомогательному выключателю и после гашения дуги в нем испытуемый выключатель оказывается в цепи, где последовательно включены контура тока и высокого напряжения. Поэтому восстанавливающееся напряжение на ИВ будет определяться суммой напряжений этих контуров, а индуктивность – суммой индуктивностей.

Обе схемы позволяют испытывать выключатели в условиях неудаленного короткого замыкания (н.к.з). Для этого электрическая схема, воспроизводящая ПВН со стороны линии (т.н. искусственная линия) включается в контур высокого напряжения последовательно с индуктивностью L_n . Разработаны методы испытаний выключателей, имеющих низкоомные шунтирующие резисторы.

Преимуществом схемы с последовательным наложением тока является меньшее искажение формы тока после подключения контура высокого напряжения и меньшее требуемое напряжение U_n этого контура. Преимуществом схемы с параллельным

наложением тока является большее удобство в эксплуатации, что и предопределило ее более широкое применение. Такая схема применена, например, в лаборатории КЕМА (Голландия).

Синтетические схемы с наложением тока подробно рассмотрены в [2].

2. С х е м ы с н а л о ж е н и е м н а п р я ж е н и я .

В схемах с последовательным наложением напряжения после гашения дуги в испытуемом и вспомогательном выключателях к ним прикладывается напряжение контура тока (см. рисунок 4). Вспомогательный выключатель должен, по рекомендации МЭК 62271-101 [3], шунтироваться емкостью $C_{ш}$ не менее 10 нф. В этом случае не только все напряжение контура тока U_T будет приложено к испытуемому выключателю, но и будут созданы условия, не препятствующие его пробою. Через определенное время t_l параллельно вспомогательному выключателю подключается контур высокого напряжения и на испытуемый выключатель воздействует сумма напряжений двух контуров U_B (см. рисунок 5).

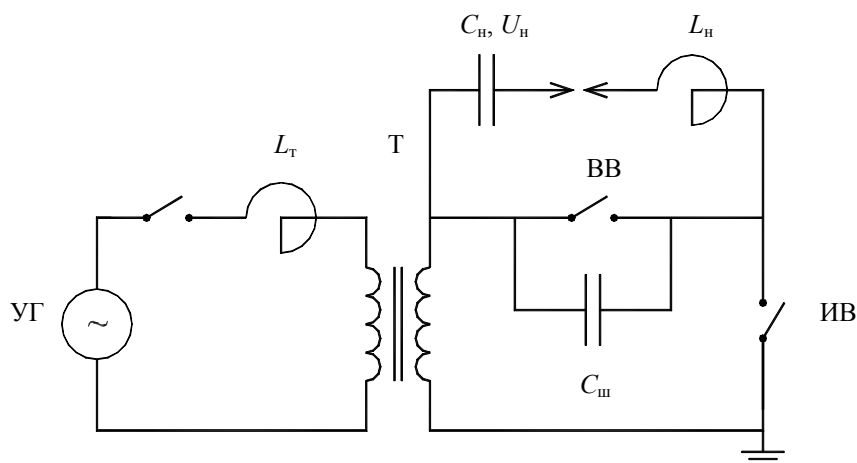


Рисунок 4.

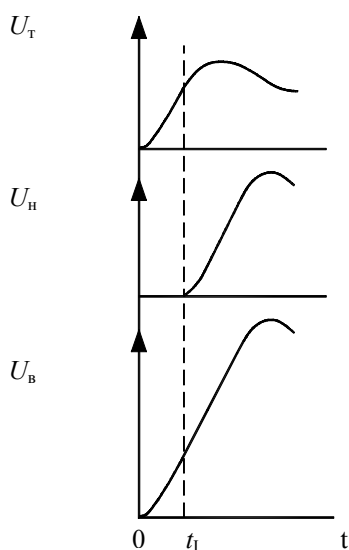


Рисунок 5.

Следует иметь в виду, что в схемах с наложением напряжения источник тока должен иметь достаточно большое напряжение для уменьшения искажающего влияния напряжения на дугах вспомогательного и испытуемого выключателей и для возможности получения большего t_1 . В таких схемах имеются трудности при испытаниях в условиях н.к.з.

Схема с последовательным наложением напряжения применяется, например, в испытательном центре KERI (Корея).

Схемы с параллельным наложением напряжения, в которых источник высокого напряжения подключается параллельно испытуемому выключателю, не нашли практического применения.

3. Трехконтурные схемы.

Значительный рост отключающей способности элегазовых выключателей, приходящейся на один разрыв, привел ко все возрастающим трудностям в большинстве испытательных центров, уже оснащенных классическими синтетическими установками. Одним из направлений совершенствования синтетических схем явилось создание так называемых трехконтурных схем, в которых предпринята попытка совместить преимущества двух типов классических синтетических схем, т.е. добиться и эквивалентности и экономичности. Для этого в испытательную схему с наложением тока (см. рисунок 6), состоящую из контуров K_1 и K_2 и выключателей ИВ и ВВ₁ вводится третий контур сверхвысокого напряжения K_3 и ещё один вспомогательный коммутационный аппарат ВВ₂, который обеспечивает расшунтирование этого контура на третьем этапе после подключения первого контура высокого напряжения K_2 .

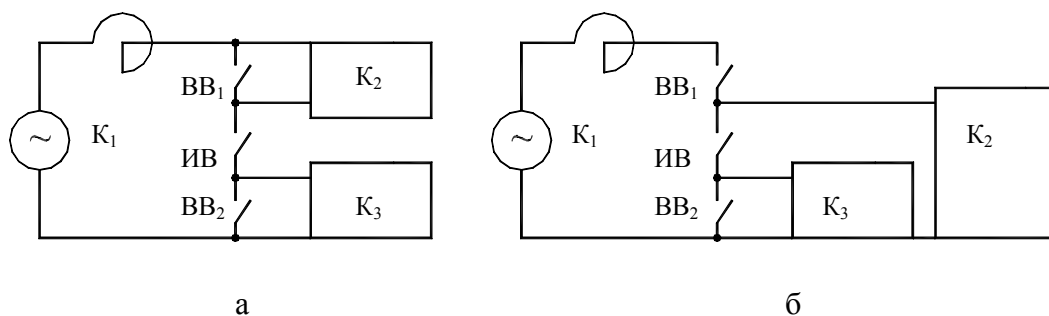


Рисунок 6. Структурная схема трехконтурных синтетических схем.

а — на основе схемы с последовательным наложением тока; б — на основе схемы с параллельным наложением тока.

В большинстве существующих трехконтурных схемах подключение второго контура напряжения должно осуществляться в течение долей миллисекунды, т.е. дополнительный коммутационный аппарат третьего контура в течение этого времени должен перейти из замкнутого в разомкнутое состояние при условии, что напряжение на его зажимах после перехода в разомкнутое состояние будет равняться полному напряжению третьего контура. Это означает, что характеристики такого аппарата должны значительно превосходить характеристики испытуемого выключателя. В других вариантах трехконтурных схем слишком высоки требования к точности синхронизации работы контуров. Не останавливаясь на подробном анализе, приведем библиографию [4]. Отметим, что начало в области трехконтурных схем положила работа [5].

Как нам представляется, сверхмощные модули выключателей с параметрами до 500 кВ на разрыв и токами до 63 кА могут быть испытаны только в трехконтурных синтетических установках. Единственный центр в мире, обладающий необходимыми параметрами синтетической установки с наложением тока для таких испытаний – это КЕМА (Голландия), но для всего мира этого явно недостаточно. Большинство других центров, что следует из краткого обзора, разработали и оснастились трехконтурными установками различных модификаций. Можно ожидать, что в ближайшее время вопрос узаконивания трехконтурных схем станет предметом рассмотрения в МЭК.

В ОАО «НИИВА» совместно с Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом разработана и реализована трехконтурная схема, которая по мнению авторов при сохранении всех преимуществ трехконтурных схем свободна от указанных недостатков. В данной схеме подключение третьего контура начинается на втором этапе, т.е. оперирование коммутационного аппарата $ВВ_2$ (см. рисунок 6), подключающего третий контур, начинается одновременно с испытуемым аппаратом. Это означает, что в качестве такого вспомогательного коммутационного аппарата, может использоваться один из разрывов двухразрывного выключателя, второй разрыв которого является испытуемым выключателем. Такой способ является общей практикой при синтетических испытаниях, но впервые используется в трехконтурных схемах.

По существу предлагаемая трехконтурная схема является схемой с наложением напряжения, в которой в качестве контура тока используется синтетическая схема с наложением тока, состоящая из контуров K_1 и K_2 (см. рисунок 6). Это позволяет поднять напряжение источника тока на порядок по сравнению с генераторными схемами и тем самым устранить недостатки схем с наложением напряжения, отмечавшиеся ранее.

Использование третьего контура для формирования переходного восстанавливающегося напряжения позволяет значительно уменьшить требуемую емкость

источника напряжения. Так, если сравнивать схему с наложением тока и трехконтурную, то применительно к выключателю 330 кВ/63 кА в трехконтурной схеме ОАО «НИИВА» емкость источника напряжения снижена более чем на порядок.

Ниже приведено описание трехконтурной схемы, реализованной в испытательном центре (см. рисунок 7).

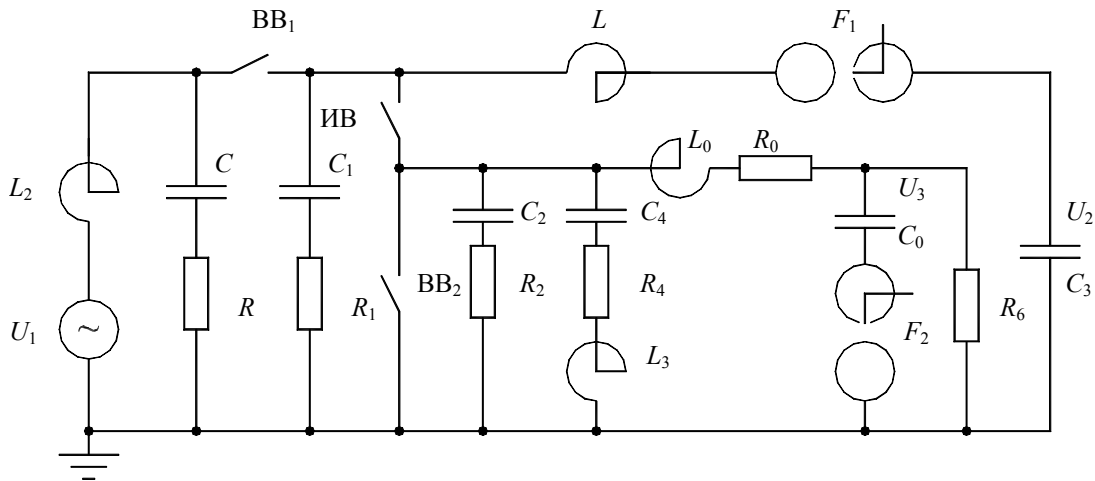


Рисунок 7. Трехконтурная синтетическая схема испытаний.

Схема состоит из контура основного тока U_1-L_2 , контура наложения тока $L-C_3$ и контура наложения напряжения C_0-L_0 . В контуре основного тока в качестве источника тока используется ударный генератор ТИ-75 (U_1): ток до 65 кА, напряжение в зависимости от значения тока лежит в пределах от 6 до 30 кВ.

Контур наложения тока $L-C_3$ – традиционная установка для синтетических испытаний с наложением тока. Элементы C_1 , R_1 – регулируют форму восстанавливающегося напряжения со стороны контура наложения тока.

Контур наложения напряжения C_0-L_0 создан на базе модифицированного генератора импульсных напряжений (ГИН) с ударной емкостью C_0 .

Элементы C_2 , R_2 , C_4 , R_4 , L_3 , L_0 обеспечивают четырех параметрическую форму кривой ПВН со стороны ГИН.

Контура основного тока и наложения тока при проведении опыта работают точно также, как и в традиционной схеме с параллельным наложением тока.

После гашения дуги испытуемым выключателем ИВ и вспомогательным выключателем ВВ₁ начинается восстановление напряжения со стороны контура наложение тока $L-C_3$. При этом практически все напряжение приложено к контактам ИВ, так как ВВ₂ шунтирован схемой формирования ПВН контура наложения напряжения. Нарастающее напряжение на ИВ прикладывается к управляемому разряднику ГИН F_2 , и при достижении заданного уровня (обычно около 80 % от напряжения батареи C_3 контура

наложения тока) разрядник F_2 срабатывает. В результате на восстанавливающееся напряжение от контура наложение тока последовательно накладывается напряжение от ГИН.

Данная трехконтурная схема успешно применялась при разработке двухразрывного элегазового выключателя на 800 кВ.

В качестве иллюстрации на рисунке 8 представлена осциллограмма токов и напряжений одного из опытов, в котором выключатель отключил ток 50 кА при пике восстанавливающегося напряжения 610 кВ.

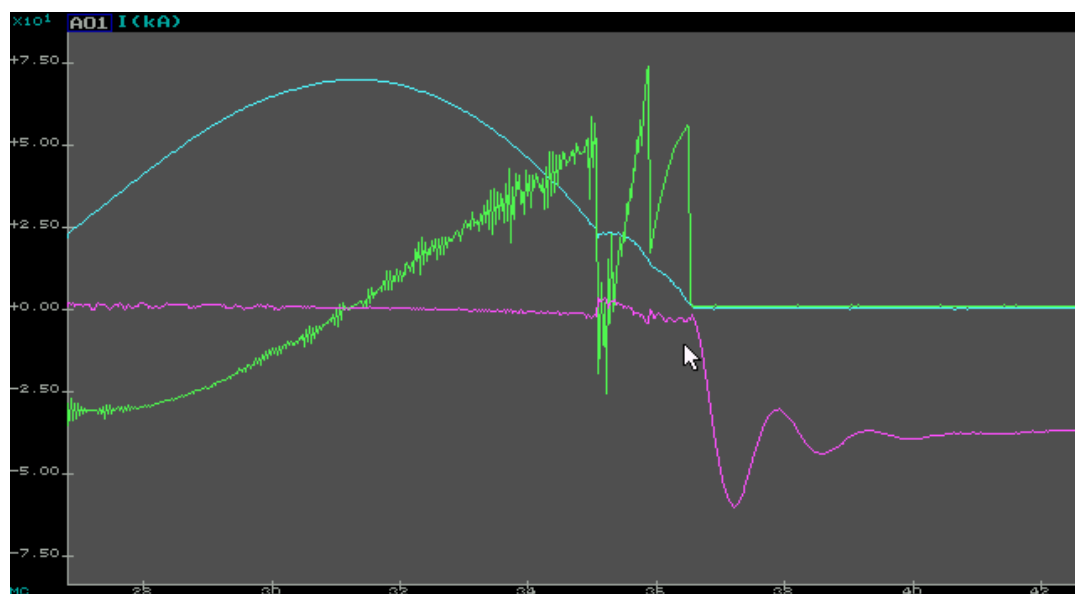


Рисунок 8.

Литература:

1. «Техника высоких напряжений». Федченко И. К. Вища школа, Киев, 1969.
2. «Синтетические испытания высоковольтных выключателей». Каплан В. В., Нашатырь В. М. Л.: Энергия, 1980.
3. IEC 62271-203. 2000. «Gas-insulated metal enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV».
4. « A new synthetic test circuit for high voltage circuit breaker testing». E. von Bonin, Bogger W., Hinterthur K. H., Kirchesch P.
5. «Novy svoustup novy synteticky obvod pro zkonsky vypinaen vun a zvn». Moranova H. Elektrotechnicky obzor.-sv.65-6-176, p. 332-336.
6. «Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией». Под ред. Ю. И. Вишневого- СПб.: Энергоатомиздат. 2002.-728с.