Төсөл



МОНГОЛ УЛСЫН СТАНДАРТ

**Хүчний трансформаторууд – Хэсэг 4: Хүчний трансформаторууд ба реакторуудыг аянгын ба коммутацийн сэлгэн залгалтын/долгионуудаар турших удирдамж**

**MNS IEC 60076-4: 2019**

**Албан хэвлэл**

**СТАНДАРТ, ХЭМЖИЛ ЗҮЙН ГАЗАР**

**Улаанбаатар хот**

**2019 он**

Энэ стандартыг “Маам-Уул” ХХК орчуулан, Эрчим хүчний эдийн засгийн хүрээлэнгийн ЭША С.Насанжаргал хэлбэржүүлэн, Шинжлэх ухаан технологийн сургууль Эрчим хүчний сургуулийн эрдэмтэн нарийн бичгийн дарга Г.Бэхбат шүүмж, редакц хийсэн.

Анхны үзлэгийг 2024 онд, дараа нь 5 жил тутамд хийнэ.

**Стандарт, хэмжил зүйн газар (СХЗГ)**

Энхтайваны өргөн чөлөө 46А

Шуудангийн хаяг

Улаанбаатар-13343, Ш/Х - 48

Утас: 976-51-263860 Факс: 976-11-458032

E-mail: [masm@mongol.net](mailto:masm@mongol.net); [standardinform@masm.gov.mn](mailto:standardinform@masm.gov.mn)

[www.estandard.mn](http://www.estandard.mn); [www.masm.gov.mn](http://www.masm.gov.mn)

**© СХЗГ, 2019**

“Стандартчилал, тохирлын үнэлгээний тухай” Монгол Улсын хуулийн дагуу энэхүү стандартыг бүрэн, эсвэл хэсэгчлэн хэвлэх, олшруулах эрх нь гагцхүү СХЗГ (Стандартчиллын төв байгууллага)-т байна.

**Хэвлэлтийн дугаарлалт**

1997 оны 1-р сарын 01-нээс эхлэн ОУЦТК-ийн стандартууд нь 60000 гэсэн серийн дугаартайгаар хэвлэгдэх болсон. Тухайлбал, ОУЦТК 43-1 стандарт одоо ОЦУТК 60034-1 гэсэн дугаартай болсон байгаа.

**Нэгтгэсэн хэвлэлтүүд**

ОУЦТК нь өөрийн стандартуудын хэвлэлтүүдийг нэгтгэсэн хэлбэрээр гаргаж байна. Тухайлбал, хэвлэлтийн дугаар 1.0, 1.1 ба 1.2 гэ сэн нь үндсэн хэвлэлтийг нэмэлт өөрчлөлтүүдтэй нь харгалзан үндсэн хэвлэлт 1 болон түүний нэмэлт 1 ба түүний нэмэлт 2 гэх мэтчилэн зааж байна.

**ОУЦТК-ийн тухай**

Олон Улсын Цахилгаан Техникийн Комисс (ОУЦТК) нь цахилгааны, электроникийн болон тэдгээртэй холбоотой технологиудад зориулсан Олон улсын стандартуудыг боловсруулан хэвлэн гаргадаг дэлхийн хэмжээний тэргүүлэгч байгууллага юм.

**ОУЦТК-ийн хэвлэлүүдийн тухай**

ОУЦТК-ийн хэвлэлүүдийн техникийн агуулгууд нь ОУЦТК-ийн байнгын эргэн хянах ажиллагаатай уялдуулан хадгалагддаг. Таны гар дээр хянаж засварласан, нэмж баяжулсан сүүлчийн хэвлэлт байна гэдэгт итгэлтэй байхыг хүсье.

* ОУЦТК-ийн хэвлэлүүдийн каталог: www.iec.ch/searchpub

ОУЦТК-ийн Онлайн Каталог нь танд олон тооны шалгууруудаар (ишлэлийн дугаар, текст, техникийн хороо) хайлт хийх боломж олгоно. Түүнчлэн төсөл байдлаар байгаа, нэмж засварласан болон хассан хэвэллтүүдийн талаарх мэдээлэлийг өгнө.

* ОУЦТК-ийн сүүлчийн хэвлэлтүүд: www.iec.ch/online\_news/justpub

ОУЦТК-ийн бүх шинэ хэвлэлтүүдийн талаарх мэдээлэл. Сүүлчийн хэвлэлтүүд нь сард хоёр удаа гарах ба онлайн болон электрон шуудан хэлбэрээр олж авах боломжтой.

* Electropedia: www.electropedia.org

Англи болон Франц хэл дээр, түүнчлэн бусад хэлнүүд дээр ижил утгыг нь тайлбарласан цахилгааны ба электроникийн 20000 гаруй үг хэллэг багтаасан дэлхийд тэргүүлэх онлайн толь бичиг. Түүнчлэн Олон улсын Цахилгаантехникийн үгсийн сан (Олон улсын

Цахилгаантехникийн Толь бичиг) гэж нэрлэгддэг.

* Хэрэглэгчдэд үйлчлэх Төв: www.iec.ch/webstore/custserv.

Хэрэв та энэ хэвлэлтийн талаар өөрийн санал бодлоо хэлэх болон цаашид тусламж хэрэгтэй бол энэ Төвийн БТА (Байнга Тавигддаг Асуултууд)-аар зочилох, эсвэл дараах хаягаар бдэнтэй холбогдоорой:

И-майл: csc@iec.ch

Утас.: +41 22 919 02 11

Факс: +41 22 919 03 00

**Publication numbering**

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series. For example, IEC 34-1 is now referred to as IEC 60034-1.

**Consolidated editions**

The IEC is now publishing consolidated versions of its publications. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

**Further information on IEC publications**

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology. Information relating to this publication, including its validity, is available in the IEC Catalogue of publications (see below) in addition to new editions, amendments and corrigenda. Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is also available from the following:

* **IEC Web Site (www.iec.ch)**
* **Catalogue of IEC publications**

The on-line catalogue on the IEC web site (www.iec.ch/catlg-e.htm) enables you to search by a variety of criteria including text searches, technical committees and date of publication. Online information is also available on recently issued publications, withdrawn and replaced publications, as well as corrigenda.

* **IEC Just Published**

This summary of recently issued publications (www.iec.ch/JP.htm) is also available by email.

Please contact the Customer Service Centre (see below) for further information.

* **Customer Service Centre**

If you have any questions regarding this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre:

Email: custserv@iec.ch

Tel: +41 22 919 02 11

Fax: +41 22 919 03 00

### ГАРЧИГ

Өмнөх үг 10

1. Зорилго 14
2. Норматив баримт бичгүүд 14
3. Ерөнхий зүйл 15
4. Нормчлогдсон /стандарт/ долгионы хэлбэр дүрсүүд 16
5. Туршилтын хэлхээ 17
6. Тохируулга 20
7. Аянгын долгионы /импульсын/ туршилтууд 21

7.1 Долгионы хэлбэр дүрсүүд 21

7.2 Сүүл хэсэгтээ хэрчигдсэн долгионууд 23

7.3 Үзүүр-гаргалгуудын холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх боломжит аргууд 25

7.4 Туршилт явуулах дэс дараалал 27

7.5 Туршилтын үр дүнг бичиж авах 29

8. Коммутацийн долгионы туршилтууд 38

8.1 Тусгай шаардлагууд 38

8.2 Трансформаторууд 38

8.3 Реакторууд 48

9. Осциллограммууд ба тоон бичлэгүүдийг тайлж унших 51

9.1 Аянгын долгион 51

9.2 Коммутацийн долгион 57

10. Хувиргалтын функцийн шинжилгээ /анализ/ бүхий тоон боловсруулалт 59

11 Импульсийн туршилтын тайлангууд 64

Хавсралт А (мэдээлэлийн чанартай) Долгионы хэлбэр дүрсийг удирдан хянах зарчмууд 69

Хавсралт Б (мэдэлэлийн чанартай) Хэвийн осциллограммууд ба тоон бичлэгүүд 80

Зураг 1 – Импульсын туршилтын /ердийн/ хэлхээ 66

Зураг 2 – Аянгын импульсын туршилтын үед дэх орлуулгуудын холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх боломжит аргууд 67

Зураг 3 – Трансформатор ба реакторын коммутацийн импульсын долгионы хэлбэр дүрсүүд 68

Зураг 4 – Коммутацийн долгионы туршилтын үеийн орлуулгуудын холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх аргууд 68

Зураг A.1 – Өндөр эсэргүүцэлтэй ороомгуудын туршилтанд зориулсан долгионы хэлбэр дүрсүүдийг удирдан хянах 70

Зураг A.2 – Бага эсэргүүцэлтэй ороомгуудын туршилтанд зориулсан долгионы хэлбэр дүрсүүдийг удирдан хянах 71

Зураг A.3 – Замхрах хэлбэлзлэл 72

Зураг A.4 – Долгионы сүүлний хэсэг богино байснаас үүсэх нөлөөлөл 76

Зураг A.5 – Идэвхитэй эсэргүүцлээр дамжин газардуулагдсан ороомог 78

Зураг A.6 – Бүрэн эсэргүүцэлтэй багатай ороомгуудыг эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах 79

Зураг Б.1 – Аянгын долгион, бүрэн долгионы гэмтэл - 400 кВ-ын генератор трансформаторын өндөр хүчдлийн ороомгоор дамжин шугам нейтралийн хооронд ниргэх 83

Зураг Б.2 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх – 115 кВ-ын трансформаторын өндөр хүчдлийн ороомгийн эхний хэсэг дэх дискэн ороомгуудын хооронд ниргэх 83

Зураг Б.3 – Аянгын долгион, 400 \220 кВ-ын трансформаторын их шатлалтай хүчдэл тохируулгын ороомог дахь үе хоорондын ниргэлэг 84

Зураг Б.4 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх - 400 кВ-ын генератор трансформаторын гадна талын хүчдэл тохируулгын ороомгын 1.1%-ын хоёр секцийн үзүүрүүд хооронд ниргэх 84

Зураг Б.5 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх - 220 кВ-ын трансформаторын нарийн шатлалтай хүчдэл тохируулгын ороомгын нэг секцийг богино залгаа үүсгэж ниргэх 85

Зураг Б.6 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх - 220\110 кВ-ын трансформаторын олон дамжуулагч бүхий өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн зэрэгцээ дамжуулагчуудын хооронд ниргэх 86

Зураг Б.7 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх -туршиж байгаа ороомгын 66 кВ-ын оруулга тусгаарлагын хүчдэл жигдрүүлэх ялтасуудын хооронд ниргэх 86

Зураг Б.8 – Аянгын долгион, хэрчигдсэн долгионоор гэмтэх - 115 кВ-ын трансформаторын өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн ороодос хооронд ниргэх 87

Зураг Б.9 – Аянгын долгион, хэрчигдсэн долгионоор гэмтэх - 220 кВ-ын трансформаторын нарийн шатлалтай хүчдэл тохируулгын ороомгийн ороодос хооронд ниргэх 87

Зураг Б.10 – Аянгын хэрчигдсэн долгион - 115 кВ-ын трансформаторыг туршиж байх үеийн янз бүрийн хүчдлийн түвшингүүдэд ижил хугацаагаар хэрчигдсэн долгионууд 88

Зураг Б.11 – Аянгын хэрчигдсэн долгион - 220 кВ-ын трансформаторыг туршиж байх үед хэрчигдэх хугацаа өөр өөр байснаас үүсэх нөлөөөлөл 88

Зураг Б.12 – Аянгын бүрэн долгион - Салангид ороомгуудтай трансформаторын ачаалалтай үед хүчдэл тохируулах ороомог дээрх нейтралын төгсгөлд шугаман бус эсэргүүцэл холбосноос үүсэх нөлөөлөл 90

Зураг Б.13 – Аянгын бүрэн долгион - 400 кВ-ын трансформаторыг туршиж байх үед хүчдлийн янз бүрийн түвшингүүд дээр импульсын үүсгүүрийн цахилах хугацааны ялгаануудаас үүсэх нөлөөлөл 91

Зураг Б.14 – Коммутацийн долгион - 400 кВ-ын гурван фазын генератор трансформаторт хийгдсэн амжилттай туршилт 91

Зураг Б.15 – Коммутацийн долгион - 525 кВ-ын нэг фазын генератор - трансформаторын өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн тэнхлэгийн дагуу эхлэл төгсгөлийг нь холбосын ниргэлэг /перекрытие/ 92

Зураг Б.16 – Коммутацийн долгион - 525 кВ, 33 МВАр-ын нэг фазын шунтын реакторт хийгдсэн амжилттай туршилт 92

Зураг Б.17 – Аянгын долгион - Бүрэн ба хэрчигдсэн долгионуудын хувиргалтын функцийн харьцуулалт 94

Зураг Б.18 – Аянгын бүрэн долгион - Стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсийг үнэлэх- Тоон хувиргууруудад суулгасан тэгшитгэх алгоритмуудын нөлөөлөл 94

Зураг Б.19 – Аянгын бүрэн долгион - Долгионы стандарт бус хэлбэр дүрсүүд, 0.5 МГц-ээс бага давтамжтай, 50% -амплитудаас их нэмэгдсэн хэлбэлзлэлүүд 94

Зураг Б.20 – Аянгын хэрчигдсэн долгион - Олон үет ороомог дээрх стандарт бус хэрчигдсэн долгион 95

Зураг Б.21 – Аянгын бүрэн долгион - Стандарт б ус долгионы хэлбэр дүрс, ижилхэн бичлэг бүхий янз бүрийн маркийн тоон хувиргууруудаар стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүдийг харьцуулах 95

Зураг Б.22 – Аянгын бүрэн долгион - Хэмжүүрийн кабелиас газар руу очит цахилалт үүсгэснээс туршилтын хэлхээнд үүсэх хүндрэл 96

Зураг Б.23 – Аянгын бүрэн долгион - Хүчдэл тохируулгын салаалгуудын үзүүрүүдэд үүссэн очит цахилалт ба ойролцоо болон нарийн тохируулгын ороомгуудын хооронд үссэн очит цахилалтын гэмтлийн тоон бичлэгүүд 97

Хүснэгт Б.1 – Осциллограф болон тоон бичлэгүүдэд харуулсан жишээнүүдийн нэгдсэн товчоон 81-82

**CONTENTS**

FOREWORD 10

1. Scope 14

2. Normative references 14

3. General 15

4. Specified waveshapes 16

5. Test circuit 17

6. Calibration 20

7. Lightning impulse tests 21

7.1 Waveshapes 21

7.2 Impulses chopped on the tail 23

7.3 Terminal connections and applicable methods of failure detection 25

7.4 Test procedures 27

7.5 Recording of tests 29

8. Switching impulse tests 38

8.1 Special requirements 38

8.2 Transformers 38

8.3 Reactors 48

9. Interpretation of oscillograms or digital recordings 51

9.1 Lightning impulse 51

9.2 Switching impulse 57

10. Digital processing, including transfer function analysis 59

11. Impulse test reports 64

Annex A (informative) Principles of waveshape control 69

Annex B (informative) Typical oscillograms and digital recordings 80

Figure 1 – Typical impulse test circuit 66

Figure 2 – Lightning impulse test terminal connections and applicable methods of failure detection 67

Figure 3 – Transformer and reactor switching impulse waveshapes 68

Figure 4 – Switching impulse test terminal connections and methods of failure detection 68

Figure A.1 – Waveshape control for high-impedance windings 70

Figure A.2 – Wavetail control for low impedance windings 71

Figure A.3 – Damped oscillation 72

Figure A.4 – Effects due to short length of wavetail 76

Figure A.5 – Winding earthed through a resistor 78

Figure A.6 – Resistance earthing of low-impedance windings 79

Figure B.1 – Lightning impulse, full-wave failure – Line-to-neutral breakdown across high-voltage winding of 400 kV generator transformer 83

Figure B.2 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between discs at entrance to high-voltage winding of 115 kV transformer 83

Figure B.3 – Lightning impulse, interlayer breakdown in coarse-step tapping winding of a 400/220 kV transformer 84

Figure B.4 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between leads of two 1,1 % sections of outside tapping winding of 400 kV generator transformer 84

Figure B.5 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown short-circuiting one section of the fine-step tapping winding of a 220 kV transformer 85

Figure B.6 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between parallel conductors in a multi-conductor main high-voltage winding of a 220/110 kV transformer 86

Figure B.7 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between foils of 66 kV bushing on tested winding 86

Figure B.8 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in the main high-voltage winding of a 115 kV transformer 87

Figure B.9 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in a fine-step tapping winding of a 220 kV transformer 87

Figure B.10 – Chopped lightning impulse – Impulses at different voltage levels with identical times to chopping when testing a 115 kV transformer 88

Figure B.11 – Chopped lightning impulse – Effects of differences in times to chopping when testing a 220 kV transformer 88

Figure B.12 – Full lightning impulse – Effect of non-linear resistors embodied in neutral end on-load tap-changer of a transformer with separate windings 90

Figure B.13 – Full lightning impulse – Effect of generator firing differences at different voltage levels when testing a 400 kV transformer 91

Figure B.14 – Switching impulse – Satisfactory test on a 400 kV three-phase generator transformer 91

Figure B.15 – Switching impulse – Breakdown by axial flashover of the main highvoltage winding of a 525 kV single-phase, generator transformer 92

Figure B.16 – Switching impulse – Satisfactory test on a 33 Mvar, 525 kV single-phase shunt reactor 92

Figure B.17 – Lightning impulse – Comparison of the transfer function of a full wave and a chopped wave 94

Figure B.18 – Full lightning impulse – Evaluation of a non-standard waveshape – Influence of in-built smoothing algorithms in digitizers 94

Figure B.19 – Full lightning impulse – Non-standard waveshape, superimposed oscillations with >50% amplitude and frequency <0,5 MHz 94

Figure B.20 – Chopped lightning impulse – Non-standard chopped wave on a layer type winding 95

Figure B.21 – Full lightning impulse – Non-standard waveshape, comparison of non-standard waveshapes by digitizers of different make from the same recording 95

Figure B.22 – Full lightning impulse – Test-circuit problem caused by a sparkover to earth from a measuring cable 96

Figure B.23 – Full lightning impulse – Failure digital recordings of a flashover between tap leads of a tap changer and of a flashover between coarse and fine tapping winding 97

Table B.1 – Summary of examples illustrated in oscillograms and digital recordings 81-82

ОЛОН УЛСЫН ЦАХИЛГААН ТЕХНИКИЙН КОМИСС

**ХҮЧНИЙ ТРАНСФОРМАТОРУУД**

**Хэсэг 4: Хүчний трансформаторууд ба реакторуудыг аянгын болон коммутацийн /сэлгэн залгалтын/ долгионуудаар турших удирдамж**

ӨМНӨХ ҮГ

1) ОУЦТК (Олон улсын Цахилгаан техникийн Комисс) нь цахилгаан техникийн бүх үндэсний хороонуудыг (ҮНЦТК–ийн Үндэсний Хороонууд) багтаасан дэлхийн хэмжээний стандарчлалын байгууллага болно. ОУЦТК-ийн зорилго нь цахилгааны болон электроникийн салбаруудын стандартчлалтай холбоотой асуудлуудаар олон улсын хамтын ажиллагааг дэмжин хөгжүүлэх явдал юм. Энэ чиглэлээр болон нэмэлт бусад үйл ажиллагаагаараа ОУЦТК нь Олон улсын Стандартуудыг хэвлэн гаргадаг. Эдгээрийг бэлтгэх ажлыг техникийн хороонуудад даалгах бөгөөд тухайн авч үзэж байгаа сэдвээр сонирхогч ОУЦТК-ийн Үндэсний аливаа хороо нь уг стандартыг бэлтгэх ажилд оролцож болно. Түүнчлэн ОУЦТК-тай уялдаа холбоотой ажилладаг олон улсын, төрийн болон төрийн бус байгууллагуд ч гэсэн энэ бэлтгэл ажилд оролцох боломжтой. ОУЦТК нь хоёр байгууллагын хооронд байгуулсан гэрээгээр тодорхойлсон нөхцлүүдийн дагуу Олон улсын Стандартчлалын Байгууллага (ISO-ОУСБ)-тай ойр дотно хамтран ажилладаг.

2) Техникийн хороо бүр бүх сонирхож байгаа ОУЦТК –ийн Үндэсний Хороонуудаас төлөөлөлтэй байдаг учраас техникийн асуудлаар гаргасан ОУЦТК-ийн албан шийдвэр болон гэрaээнүүд нь тухайн холбогдох асуудлаар олон улсын хэмжээний нэгдмэл санал ба санаануудыг нэлээд боломжтой байдлаар илэрхийлж чаддаг.

3) Боловсруулан гаргаж байгаа бичиг баримтууд нь олон улсын хэрэглээнд зориулагдсан зөвлөмжүүд хэлбэрээр хийгдэж, стандартууд, техникийн шаардлагууд /спецификаци/, техникийн тайлангууд буюу удирдамжууд хэлбэрээр хэвлэгдэн гарах бөгөөд Үндэсний Хороонуудад ижил утга агуулга, ач холбогдолтойгоор хүлээн зөвшөөрөгддөг.

4) Олон улсын техникийн нэгдмэл бодлогыг дэмжин хөгжүүлэхийн тулд ОУЦТК –ийн Үндэсний Хороонууд нь ОУЦТК-ийн Олон улсын стандартуудыг өөрсдийн үндэсний болон бүс нутгийн стандаотуудад аль болохоор өргөн цар хүрээтэйгээр ил тодоор нэвтрүүлэх ажлыг хариуцан явуулдаг. ОУЦТК-ийн Стандарт болон харгалзах үндэсний ба бүс нутгийн стандартын хоорондын аливаа ялгаа зөрүү нь сүүлчийн стандартад тодорхой заагдсан байдаг.

5) ОУЦТК нь стандарт батлах асуудлыг заахдаа дугаарлаж эрэмблэх арга барилыг баримталдаггүй ба өөрийн стандартуудын аль нэгтэй тохирч байгаа аливаа тоноглолыг зарлан мэдэгдэх хариуцлагыг урьдчилан тооцож чаддаггүй.

6) Энэхүү Олон улсын Стандартын зарим хэсгүүд нь патентын эрхтэй зүйлс байх боломжтой гэдэгт анхаарлаа хандуулах хэрэгтэй. ОУЦТК нь иймэрхүү патентын эрхүүдийн талаар хариуцлага хүлээхгүй.

ОУЦТК 60076-4 Олон улсын стандарт нь ОУЦТК-ийн Хүчний Трансформаторууд хэмээх 14-р техникийн хороогоор боловсруулагдан бэлтгэгдсэн болно.

Энэ Олон улсын Стандарт нь 1982 онд хэвлэгдсэн ОУЦТК 60722 стандартын хүчингүй болгон сольж байгаа ба тэр бичиг баримтын техникийн хянан засварлалтыг агуулсан болно.

Энэ стандартын эх бичвэр нь дараах бичиг баримтуудад үндэслэсэн болно:

|  |  |
| --- | --- |
| FDIS | Санал хураалтын тайлан |
| 14/413/FDIS | 14/446/RVD |

Энэ стандартыг батлах асуудлаар явуулсан санал хураалтын бүрэн мэдээлэлийг дээрх хүснэгтэнд заасан санал хураалтын тайлангаас олж болно.

Энэ хэвлэлт нь ОУСБ\ ОУЦТК –ын Хэсэг 3 Удирдамжийн дагуу бэлтгэгдсэн. Хавсралт А ба Б нь зөвхөн мэдээлэлийн чанартай болно.

ОУЦТК 60076 нь Хүчний трансформаторууд гэдэг ерөнхий нэрийн дор дараах хэсгүүдээс тогтоно:

Хэсэг 1: Ерөнхий зүйл

Хэсэг 2: Tемпературын ихсэлт

Хэсэг 3: Тусгаарлагын түвшингүүд, хөндийрүүлгийн туршилтууд болон агаар дахь гадаад тусгаарлагын зайнууд

Хэсэг 4: Хүчний трансформаторуул ба реакторуудыг аянгын болон коммутацийн долгионуудаар турших удирдамж

Хэсэг 5: Богино залгаа тэсвэрлэх чадвар

Хэсэг 8: Хэрэглэх заавар

Хэсэг 10: Дууны түвшингүүдийн тодорхойлох

Энэ хэвлэлтйн агуулгыг 2007 он хүртэл өөрчлөхгүй байхаар Хороо шийдвэрлэсэн болно.

Тэр үед энэхүү хэвлэлт нь:

• дахин баталгаажуулсан;

• хэрэглээнээс гарсан;

• хянан засварласан хэвлэлтээр солигдсон, буюу

• нэмж сайжруулагдсан байх ёстой.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**POWER TRANSFORMERS – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors**

FOREWORD

1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, the IEC publishes International Standards. Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. The IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.

2) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested National Committees.

3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.

4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.

5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.

6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60076-4 has been prepared by IEC technical committee 14: Power transformers.

This International Standard cancels and replaces IEC 60722 published in 1982 and constitutes a technical revision of that document.

The text of this standard is based on the following documents:

|  |  |
| --- | --- |
| FDIS | Report on voting |
| 14/413/FDIS | 14/446/RVD |

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

Annexes A and B are for information only.

IEC 60076 consists of the following parts, under the general title Power transformers:

Part 1: General

Part 2: Temperature rise

Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air

Part 4: Guide to lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors

Part 5: Ability to withstand short-circuit

Part 8: Application guide

Part 10: Determination of sound levels

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2007.

At this date, the publication will be

• reconfirmed;

• withdrawn;

• replaced by a revised edition, or

• amended.

.

МОНГОЛ УЛСЫН СТАНДАРТ

Ангилалтын код

|  |  |
| --- | --- |
| **Хүчний трансформаторууд: Хэсэг 4: Хүчний трансформаторууд ба реакторуудыг аянгын ба коммутацийн /сэлгэн залгалтын/ долгионуудаар турших удирдамж** | MNS IEC 60076-4 : 2019 |
| **Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing Power transformers and reactors** | IEC 60076-4 : 2018 |

Стандартчиллын үндэсний зөвлөлийн 2019 оны … дугаар сарын ... -ны өдрийн ... дугаар тогтоолоор батлав.

Энэ стандартыг 2019 оны ... дүгээр сарын ...-ний өдрөөс эхлэн дагаж мөрдөнө.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. Зорилго ОУЦТК 60076 стандартын энэ хэсэг нь ОУЦТК 60076-3-ын шаардлагуудын нэмэлт болж хүчний трансформаторуудыг аянгын болон коммутацийн долгионуудаар туршихад зориулагдсан одоо мөрдөж байгаа журам дараалалд тайлбар санаануудыг болон удирдамжийг өгнө. Энэ нь мөн ерөнхийдөө реакторуудыг турших (ОУЦТК 60289-ыг үз), хүчний трансформаторын шаардлагатай гэж үзсэн үйл ажиллагааг сайжруулахад ашиглах боломтой.  Долгионы хэлбэр дүрсүүд, туршилтын хэлхээ түүний холболтууд, газардуулга, гэмтэл илрүүлэх аргууд, туршилт явуулах дэс дараалал, хэмжилтийн техник болон үр дүнг тайлж унших талаар мэдээллүүдийг өгнө.  Боломжтой тохиолдолд туршилтын техникүүд нь ОУЦТК 60060-1 болон ОУЦТК 60060-2-д зөвлөмж болгосны дагуу байна.  **2. Норматив баримт бичгүүд**  Дараах лавлагаа ба ишлэлүүд нь энэ бичиг баримтыг ашиглахад зайлшгүй шаардлагай.  Огноо бүхий лавлагаа баримтуудын хувьд зөвхөн тухайн заасан хэвлэлт ашиглагдана. Огноогүй лавлагаануудад хамгийн сүүлчийн хэвлэлт (хийгдсэн ямарваа засварыг оруулан) ашиглагдана.  *ОУЦТК 60060-1, Өндөр хүчдлийн туршилтын техникүүд– Хэсэг 1: Ерөнхий*  *тодорхойлолтууд ба туршилтын шаардлагууд*  ОУЦТК 60060-2, Өндөр хүчдлийн туршилтын техникүүд - Хэсэг 2: Хэмжүүрийн системүүд  ОУЦТК 60076-3, Хүчний трансформаторууд - Хэсэг 3: Тусгаарлагын түвшингүүд, хөндийрүүлгийн туршилтууд болон агаар дахь гадаад тусгаарлагын зайнууд  ОУЦТК 60289, Реакторууд  ОУЦТК 61083-1, Өндөр хүчдлийн импульсын /долгионы/ туршилтын хэмжилтэнд хэрэглэгдэх багаж тоноглол ба програм хангамж - Хэсэг 1: Багаж тоноглолд тавигдах шаардлагууд  ОУЦТК 61083-2, Өндөр хүчдлийн импульсын /долгионы/ туршилтын хэмжилтэнд зориулсан тоон системт бичих төхөөрөмжүүд - Хэсэг 2: Импульсын долгионы хэлбэр дүрсийг тодорхойлоход зориулан ашигладаг програм хангамжийн үнэлгээ  **3. Ерөнхий зүйл**  Энэ стандарт нь трансформатор ба реакторуудыг аянгын болон коммутацийн импульсээр туршихад зориулагдсан ердийн уламжлалт импульсын генераторын ашиглахад үндсэндээ тулгуурласан болно. Түүнчлэн дунд болон нам хүчдлийн ороомогт холбосон тусдаа конденсаторын үүсгэх цахилалтаар коммутацийн импульс үүсгэдэг практикийг ашигалах боломжтой. Гэхдээ дээрх конденсатортай цуваа холбосон нэмэлт нөлөөмж элементээр дамжуулан өндөр хүчдлийн ороомогт сулхан замхрах долгион өгөх аргыг хэрэглэх боломжгүй.  Дунд болон нам хүчдлийн ороомог дээр тогтмол гүйдлийн таслалт хийх, эсвэл үйлдвэрийн давтамжтай хагас үеийн хүчдэл хэрэглэх зэрэг коммутацийн импульс үүсгэх болон симуляци хийх хувилбарууд нь өргөн хэрэглэгддэггүй аргууд учраас энэ стандартад оруулаагүй.  Трансформаторууд ба реакторуудыг аянгын болон коммутацийн долгионоор туршихад хэрэглэгдэх туршилтын хэлхээ (үзүүр-гаргалгын холболтууд)-г сонгох нь харилцан адилгүй байна. Трансформаторын хувьд бүх гаргалгууд болон ороомгууд нь туршилтын хүчдлийн тодорхой заагдсан болон үл хамаарах түвшинд аянгын долгиониор туршигдана.  Коммутацийн долгионоор турших үед соронзон холбоогоор дамжих хүчдлийн улмаас тодорхой заагдсан түвшинг зөвхөн нэг ороомог дээр өгч туршина. (ОУЦТК 60076-3-ыг үз).  Түүнчлэн реакторуудын хувьд аянгын долгионы туршилт нь трансформатортай адил төстэй, өөрөөр хэлбэл бүх гаргалгууд нь тусдаа туршигдаж болдог бол коммутацийн долгионоор туршихад янз бүрийн хүндрэлүүд үүсдэг тул туршилт өөрөөр хийгдэх ёстой.  Иймд энэ стандартад аянгын долгионы туршилт нь трансформатор ба реакторт ерөнхий нэг удирдамжаар хийгдэх бол коммутацийн долгионы туршилт нь энэ хоёр төхөөрөмжид тус тусдаа хийгдэхээр тусгагдсан болно.  **4. Долгионы нормчлогдсон /заагдсан/ дүрс хэлбэр**  Трансформатор болон реакторуудыг аянгын ба коммутацийн долгионоор турших явцад хэрэглэх хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрсийг ОУЦТК 60076-3-д, тэдгээрийг тодорхойлох аргуудыг ОУЦТК 60060-1-д тус тус зааж өгсөн байдаг.  **5. Tуршилтын хэлхээ**  Туршилтын төхөөрөмж, туршилтын обьет болон хэмжүүрийн хэлхээнээс тогтох иж бүрдэл гурван үндсэн хэлхээнд хуваагдана:  - Импульсын генератор, долгионы нэмэлт хэлбэр дүрс үүсгэх бүрдэл хэсэг, туршилтын обьектоос бүрдэх үндсэн хэлхээ;  - хүчдэл хэмжих хэлхээ;  - Шаардлага үед хэрчигдсэн долгион үүсгэх хэлхээ  Энэ үндсэн иж бүрдлийг зураг 1-д үзүүлэв.  Дараах үзүүлэлтүүд /параметрүүд/ импульсын долгионы хэлбэр дүрсэд нөлөөлнө;  a) идэвхит /эффектив/ багтаамж эсэргүүцэл Ct, ба туршилтын обьектын нөлөөмж эсэргүүцэл, Lt; Ct нь тухайн дизайн- загварт болон долгионы тухайн хэлбэр дүрсийн хувьд тогтмол байна, Lt нь мөн тухайн дизайн- загварт тогтмол байна. Гэхдээ, идэвхит нөлөөмж Lt нь гаргалгуудын холболтоос болж өөрчлөгдөж болно. Энэ өөрчлөлтийн хэмжээ нь богино холбогдсон гаргалгуудын хувьд үүсэх сарнилын нөлөөмж Ls болон гаргалгууд холбогдоогүй задгай байх үеийн нөлөөмж Lo-ын утгуудын хооронд байна. Үүнтэй холбоотой дэлгэрэнгүй зүйлсийг 7.1 ба 7.3 болон Хавсралт А - д өгсөн болно.  б) импульсын үүсгүүрийн багтаамж Cg;  в) долгионы хэлбэр дүрс үүсгэх бүрдлүүд, генераторын дотоод ба гадаад , Rsi, Rse, Rp, CL (хүчдэл хуваагчтай бол түүний бүрэн эсэргүүцэл нэмэгдэнэ Z1);  г) импульсын үүсгүүр ба туршилтын бүрэн хэлхээний паразит багтаамж болон нөлөөмж эсэргүүцлүүд;  д) долгион хэрчих төхөөрөмж, /байгаа бол/  Нүүрний долгионы урт T1 нь туршилтын обьектын идэвхитэй багтаамж, түүнчлэн CL, болон импульсын үүсгүүрийн дотоод ба гадаад цуваа эсэргүүцлүүдийн нийлбэр үйлчлэлээс үндсэндээ хамаарна.  Аянгын импульсын үеийн долгионы урт буюу долгионы амплитудын 50%-даа хүрэх хугацаа T2 нь үндсэндээ импульсын үүсгүүрийн багтаамж, туршигдаж байгаа обьектын нөлөөмж болон үүсгүүрийн цахилалтанд бэлтгэх (цуваа) эсэргүүцэл, эсвэл бусад зэрэгцээ эсэргүүцлээр тодорхойлогдоно. Гэхдээ, тухайлбал ороомгууд хэт бага нөлөөмж эсэргүүцэлтэй байхад цуваа эсэргүүцэл нь түүнчлэн долгионы сүүл хэсэгт тодорхой нөлөө үзүүлэх тохиолдлууд байдаг. Коммутацийн импульсуудын хувьд өөр үзүүлэлтүүдийг ашиглах ба тэдгээрийг 8-р хэсэгт авч үзсэн болно.  Аянгын ба коммутацийн долгионуудын туршилтын төхөөрөмжүүд нь үндсэндээ адилхан.  Ялгаа нь зөвхөн идэвхитэй эсэргүүцэл ба багтаамж элементүүдийн утгууд (мөн туршилтын обьектын гаргалгуудын холболтууд)-д байдаг.  Аянгын ба коммутацийн долгионы хэлбэр дүрсүүдийн ялгаатай шаардлагуудыг хангахын тулд импульсын генераторын үзүүлэлтүүд, тухайлбал, цуваа ба зэрэгцээ /цахилалтанд бэлтгэх/ эсэргүүцлүүдийг сонгоход анхаарах шаардлагатай. Коммутацийн долгионы хувьд цуваа эсэргүүцлүүд ба ачаалалын конденсаторын утгууд өндөр байх шаардлагатай байдаг боловч туршилтын ашигт үйлийг мэдэгдэхүйц бууруулдаг талтай.  Туршиж байгаа объект болох тоноглолын хамгийн их хүчдэл Um-аас хамааруулан сонгох ороомгуудыг турших хүчдлийн түвшингээр импульсын генераторын гаралтын хүчдлийг тодорхойлдог учраас шаардлагатай эрчим хүчийг хуримтлуулах чадамж нь туршилтын объектын бүрэн эсэргүүцлээс үндсэндээ хамаарна.  Долгионы хэлбэр дүрсийг тохируулан удирдах талаар товч тайлбарыг хавсралт А-д өгсөн болно.  Туршилтын агрегат \иж бүрдэл\, туршилтын объект, холболтын кабелиуд, газардуулгын тууз-утаснууд болон бусад төхөөрөмжүүдийг байршуулах байдал нь туршилтын өрөөний зай хэмжээс болон, ялангуяа хийц бүрийн хоорондын зайн нөлөөлөлөөр хязгаарлагдана. Импульсын туршилтын явцад импульсын гүйдэл ба хүчдлийн өөрчлөлтийн хурд ба хэмжээ өндөр байдаг хийгээд бүрэн эсэргүүцэл тодорхой хязгаар утгатай зэргээс болж газардуулгын системд тэг потенциаль үүснэ гэж үзэж болохгүй. Иймд учраас найдвартай жишиг “газар” /**хорвоогийн тэг потенциаль**/-ыг олох нь чухал.  Туршилтын объект ба импульсын генераторын хоорондох гүйдэл буцах зам нь маш бага бүрэн эсэргүүцэлтэй байх ёстой. Энэ гүйдэл буцах замыг туршилтын объектод аль болохоор ойрхон туршилтын өрөөний ерөнхий газардуулгын системд бат бөх холбох нь илүү сайн болно. Холболтын энэ цэгийг жишиг газар мэтээр ашиглах бөгөөд туршилтын объектыг маш сайн газардуулахын тулд түүнийг жишиг газартай нэг буюу хэд хэдэн бага эсэргүүцэл бүхий утсаар холбох ёстой. (ОУЦТК 60060-2-ыг үз).  Хүчдэл хэмжих хэлхээ нь туршигдаж байгаа ороомгоор гүйж байгаа импульсын гүйдлийг бус, зөвхөн хэмжилтын гүйдлийг дамжуулдаг туршилтын объектын салангид хүрээ учраас түүнийг дээрх жишиг газартай сайтар холбож өгөх хэрэгтэй.  Коммутацийн долгионоор турших явцад импульсын хүчдэл ба гүйдлийн өөрчлөгдөх хурд аянгын долгионоор турших үеийнхтэй харьцуулбал ихээхэн буурдаг, хэрчих гүйдэл үүсдэггүй зэргээс болж жишиг газартай харьцангуйгаар туршилтын хэлхээний эргэн тойрон дахь цахилгаан орон жигдрүүлэх явдал хүндрэл багатай байдаг. Гэсэн хэдий ч урьдчилан сэргийлэх арга хэмжээний үүднээс аянгын долгионы туршилтын үеийнхтэй адилхан газардуулгын арга хэмжээг дагаж мөрдөхийг санал болгож байна.  **6. Тохируулга**  Хэмжүүрийн системүүд болон тэдгээрийн тохируулгын талаар зөвлөмж өгөх нь энэ стандартын зорилт биш ч гэсэн туршилтанд хэрэглэж байгаа тоног төхөөрөмжүүд ОУЦТК 60060-ын дагуу зөвшөөрөгдсөн байх ёстой. Туршилтыг эхлэхийн өмнө туршилтын хэлхээ болон хэмжүүрийн ситемийг иж бүрэн шалгалтыг багасгасан хүчдлийн түвшингээс бага хүчдэлд хийх шаардлагатай. Энэ шалгалтын үед хүчдлийн утгыг бөмбөлөг цахилуурын оч үүсгэх завсар, эсвэл өөр зөвшөөрөгдсөн багажаар харьцуулсан хэмжилт хийх замаар тодорхойлж болно. Бөмбөлөг цахилуурыг ашиглах үед энэ нь зөвхөн хяналт шалгалт хийх зорилготой болохоос зөвшөөрөгдсөн хэмжүүрийн системийн тодорхой хугацаанд хийгддэг тохируулгыг орлох боломжгүй гэдгийг хүлээн зөвшөөрөх хэрэгтэй. Ямарваа хяналт шалгалтыг хийсний дараа шалгалтанд зориулсан багаж төхөрөмжүүдийн салгаж авснаас өөр ямар нэгэн өөрчлөлт хэмжүүрийн ба туршилтын хэлхээнд гараагүй байх ёстой.  Хүчдэл хуваагуурын төрөл, хэрэглээ, нарийвчлал, тохируулга болон хяналт шалгалтын талаарх мэдээлэлийг ОУЦТК 60060-2 –д өгсөн болно.  **7. Аянгын долгионы туршилтууд**  **7.1 Долгионы хэлбэр дүрсүүд**  Стандарт \нормчлогдсон\ хэлбэр дүрс бүхий долгионы утгууд байнга гаргаж авах боломжгүй. Их чадлын хүчний трансформаторууд ба реакторуудыг, нөлөөмж багатай буюу, эсвэл их хэмжээний аянгын багтаамжтай ороомгийг импульсын туршилтанд оруулах үед долгионы өргөн хязгаартай зөвшөөрөгдөх утгуудыг хэрэглэж шаардлагатай болно.  Туршигдаж байгаа трансформаторын газартай харьцангуй аянгын багтаамж тогтмол байдаг тул яг таарсан долгионы нүүрний урт T1 болон долгионы өсөлтийн хурдыг гаргаж авахын тулд цуваа эсэргүүцлийг бууруулах шаардлагатай болдог боловч ингэж бууруулснаар хүчдлийн долгионы оргил утгын хэлбэлзлэлийн далайц оссциллограм хязгаараасаа хэтэрч болохгүй. Долгионы нүүрний урт богино байх зайлшгүй шаардлага тавигдсан тохиолдолд (аль болохоор стандарт нормчлогдсон хязгаар дотор байхаар) ОУЦТК 60060-1-д зөвшөөрсөн хүчдлийн оргил утгаас ±5 % их импулсын үсрэлт ба хэлбэлзлэлүүдийг хэрэглэж болно. Ийм тохиолдолд гаргаж авч болох долгионы нүүрний урт ба долгионы хэлбэлзлэлийн зөвшөөрөгдөх далайц утга хоорондоо тохирч байх ёстой. Ерөнхийдөө бол долгионы нүүрний уртыг ихэсгэх зайлшгүй шаардлагатай, түүнчлэн үйлдвэрлэгч ба худалдан авагч хоёр тохирсон байвал ±10%-иас ихгүй долгионы хэлбэлзлэлийн утгуудыг сонгож болно. Туршилтын хүчдлийн утгыг ОУЦТК 60060-1-ийн зарчмуудын дагуу тодорхойлно.  Их чадлын трансформаторууд болон ялангуяа тэдгээрийн дунд ба нам хүчдлийн ороомгуудын хувьд хүчдлийн амплитуд 50 % -даа хүрэх хугацаа буюу долгионы уртын бодит хугацааг зөвшөөрөгдөх хязгаарын дотор гаргаж авах боломжгүй байх явдал гардаг.  Эдгээр ороомгуудын нөлөөмж эсэргүүцлийн хэмжээ нь долгионы хэлбэр дүрсийг өөрийн хэлбэлзэлд оруулж савлахад хүргэхүйц хэт бага байдаг талтай. Энэ хүндрэлийг импульсын хүчдлийн үүсгүүр-генераторын дотор ихээхэн багтаамж үүсгэх, зэрэгцээ шатлалтай үүсгүүрийн зарчмыг хэрэглэх, цуваа эсэргүүцлийг тохируулах болон туршигдаагүй байгаа ороомгуудын оруулга-үзүүрүүд ба түүнчлэн, туршигдаж байгаа ороомгийн туршигдаагүй үзүүр-гаргалгуудыг туршилтын тусгай схемээр холбох зэргээр шийдвэрлэж болно.  Туршигдаагүй байгаа ороомгуудын оруулга-үзүүрүүдийг шууд газардуулснаас тодорхой нөлөөмж элементээр дамжуулан газардуулах нь идэвхитэй нөлөөмжийн хэмжээг илэрхий нэмэгдүүлдэг сайн талтай. Шууд газардуулсан оруулга-үзүүрүүдийн хувьд зөвхөн сарнилын (богино залгааны үеийн бүрэн эсэргүүцлээр тодорхойлогдох) нөлөөмж үүсдэг.  Харин эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулсан оруулга-үзүүрүүдийн хувьд хэлхээний өөрийн үндсэн нөлөөмж эсэргүүцэл давамгайлах шинж чанартай байдаг. Энэ нь идэвхитэй нөлөөмжийн хэмжээг шууд газардуулсан үеийнхээс 100-200 дахин их болгож чаддаг.  Туршигдаагүй байгаа аль нэг оруулга-үзүүрийг бүрэн эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулж байгаа үед түүний газартай харьцангуй хүчдлийн хэмжээ нь дараах утгуудаас хэтэрч болохгүй. Үүнд:  - Одон холбоотой ороомгуудын оруулга- үзүүрүүдийн хувьд аянгын тэсвэрлэх хэвийн хүчдлийн 75 %;  - Гурвалжин холбоотой ороомгуудын оруулга-үзүүрүүдийг хувьд аянгын тэсвэрлэх хэвийн хүчдлийн 50 % (гурвалжин холбоотой оруулга- үзүүрүүдэд дээр газартай харьцангуй эсрэг туйлтай хүчдлүүд үүсдэг тул түүнчлэн 7.4-ийг үз).  Нөлөөмж эсэргүүцлийн хэмжээ хэтэрхий бага болон импульсийн хүчдлийн үүсгүүрийн /генераторын/ багтаамжийн хэмжээ бага байснаас болж долгионы хэлбэр дүрс хэлбэлзэн савлаж байгаа бол эсрэг туйлтай үеийн хүчдлийн амплитуд /оргил/ утга нь долгионы анхны оргил утгын 50%-иас хэтрэхгүй байх ёстой. Энэ хязгаар нөхцлөөр импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн багатаамжийг сонгох болон долгионы хэлбэр дүрсийг тохируулах талаархи зааврыг хавсралт А-д өгсөн болно.  **7.2 Сүүл хэсэгтээ хэрчигдсэн долгионууд**  **7.2.1 Долгионыг хэрчих хугацаа**  Долгионы хэрчигдэх хугацаа Tc (ОУЦТК 60060-2-д тодорхойлсон) өөр өөр байх нь ороомгийн хийц болон байршуулалтаас хамааран ороомгийн янз бүрийн хэсгүүд дэх орны хүчлэгийн хэмжээг (хүчдэл ба үргэлжлэх хугацаа) харилцан адилгүй болгодог. Иймд аливаа тухайлсан трансформатор болон реакторын хувьд төдийгүй ерөнхийд нь хамгийн аюултай хүчлэг үүсгэж болох долгионы хэрчигдэх хугацааг шууд заах боломжгүй юм. Ийм учраас долгионы хэрчигдэх хугацаа нь туршилтын үзүүлэлт болж чадахгүй бөгөөд энэ нь ОУЦТК 60076-3-д зааснаар 2 мкс-6 мкс-ийн хязгаарт байна.  Гэхдээ хэрчигдсэн долгионы осциллограм болон тоон бичлэгүүд нь зөвхөн нэг тодорхой хэрчилтын хугацааны хувьд харьцуулж болохуйц байдаг.  **7.2.2 Хэрчигдсэн долгионы эсрэг туйлын амплитуд ба унах хурдны хэмжээ**  Долгион хэрчигдэх үеийн үзүүлэлтүүд нь хэрчих хэлхээний геометр байршил, хэрчих хэлхээний болон туршигдаж байгаа обьектын бүрэн эсэргүүцэл зэргээс маш хүчтэй хамаарах бөгөөд эдгээр нь хэрчигдсэн долгионы эсрэг туйлын оргил утга амплитуд болон хэрчигдсэн долгионы унах хурдын хэмжээг тодорхойлно.  ОУЦТК 60076-3 стандаартаар эсрэг туйл руугаа савалж хүрэх дээд утгыг хэрчигдсэн долгионы оргил утгын 30%-аар хязгаарлаж байхаар тогтоосон. Энэ нь хэрчих хэлхээний бүтэц байршил гаргах заавар болж улмаар дээрх хязгаар утгыг гаргахын тулд нэмэлт бүрэн эсэргүүцэл Zc-ийг уг хэлхээнд байрлуулах зайлшгүй шалтгаан болно (зураг 1-ийг үз).  Долгионы унах хурдыг өндөр байлгахын тулд хэрчих хэлхээ нь аль болохоор бага овортой байх шаардлагатай ба харин эсрэг туйл руугаа савалж хүрэх дээд утга нь дээр өгүүлсэн 30%-тай тэнцүү буюу бага байх ёстой. Олон үет ороомгуудад нэг үеийн үүсгэх бүрэн эсэргүүцэл нь хэрчигдээд унаж байгаа долгионыг тэг утгын эргэн тойронд хэлбэлзүүлэхгүйгээр тайвшруулдаг талтай (зураг Б.20-ийг үз).  ОУЦТК 60076-3-д асаах очлуур бүхий хэрчих цахилуурыг ашиглахыг зөвлөмж болгосон явдал нь энэ систем хэрчилтын хугацааг тууштай байлгах давуу талтай учраас хэрчилтын өмнө төдийгүй дараах осциллограммуд ба тоон бичлэгүүдийг харьцуулахад дөхөм болдог сайн талтай.  Хэрчилтын дараах хэсэг нь хэрчилтын бодитой нэг ижил хугацаанд л зөвхөн харьцуулах боломжтой.  **7.3 Оруулга-үзүүрүүдийн холболтууд ба гэмтэл илруулэх боломжит аргууд**  **7.3.1 Оруулга- үзүүрүүдийн холболтууд**  Туршилтын объектын оруулга- үзүүрүүдийн холболт ба газардуулгын практик шийдэл нь сонгож авсан гэмтлийг илрүүлэх аргатайгаа уялдаатай байх нь тодорхой.  ОУЦТК 60076-3 стандартад трансформаторуудын, ОУЦТК 60289 стандартад реакторуудын импульсын туршилтын үеийн холболтуудын талаар тус тус нарийвчлан заасан болно.  Ихэвчлэн туршигдаж байгаа фазын ороомгийн туршигдаагүй оруулга-үзүүрүүдийг газардуулахын зэрэгцээ туршигдаагүй байгаа фазуудын ороомгуудыг богионо холбоод газардуулсан байх ёстой. Гэхдээ долгионы уртыг T2 буюу долгионы сүүл хэсгийн дүрсийг сайжруулахын тулд туршигдаагүй байгаа ороомгуудыг эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах нь илүү давуу талтай (5 ба 7.1 зүйлүүдийг үз) байж болох бөгөөд үүнээс гадна туршигдаж байгаа ороомгийн туршигдаагүй шугамын оруулгуудыг мөн эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах хэрэгтэй.  Түүнчлэн 7.1 зүйл дэх долгионы хэлбэр дүрсийг тохируулах аргууд дээр нэмж дараах хүчин зүйлүүдийг тооцох шаардлагатай. Үүнд:  a) Хэрвээ оруулга-үзүүр шууд газардуулахаар заагдсан буюу ашиглалтанд байгаа бага эсэргүүцэлтэй кабельд холбогдсон бол уг оруулга-үзүүр нь туршилтын явцад шууд газардуулагдсан байх, эсвэл, дээрх кабелийн аянгын бүрэн эсэргүүцлээс хэтрээгүй Омын утгатай идэвхитэй эсэргүүцлээр газардуулагдсан байх ёстой.  б) Импульсын гүйдлийг хэмжих зорилгоор хэрэглэж байгаа бага эсэргүүцэлтэй шунтаар дамжуулан газардуулсан бол үүнийг шууд газардуулгатай ижил /экквивалент/ гэж тооцох хэрэгтэй.  Шилжилтын процессийн үеийн хэт хүчдлийг хязгаарлах зорилгоор трансформаторт өөрт нь болон гадна талд нь шугаман бус элементүүд болон аянгын хүчдэл хуваагчуудыг суурилуулсан бол импульсын хүчдлийн туршилтын журам дараалалыг тухайн тохиолдол болгонд урьдчилан ярилцаж тогтоох ёстой. Түүнчлэн ОУЦТК 60076-3 стандартыг үз.  **7.3.2 Гэмтэл илрүүлэх боломжит аргууд**  Гэмтэл илрүүлэх ажиллагаа нь үндсэндээ туршилтын хүчдлийн болон импульсын гүйдлийн анхдагч өгөгдлүүдийн тоон бичлэгүүд ба осциллографуудыг шинжлэн судлах байдлаар гүйцэтгэгдэнэ.  Туршилтын явцад Зураг 2 –д үзүүлсний дагуу янз бүрийн шилжилтийн процессууд бичигдэж болох бөгөөд эдгээр нь дангаараа болон хосолсон байдлаар ашиглагдана. Эдгээрийг доор a)-аас e) хүртэл жагсаасан ба тоноглолыг анх хүлээн авах туршилтанд оруулахад туршилтын хүчдлийн хэмжилт дээр эдгээр шилжилтийн процессуудын аль нэгийг бичиж авсан байхад хангалттай гэж үзнэ. Үүнд:  a) саармаг цэг /нейтраль/-ийн гүйдэл (од болон холимог холболттой ороомгуудын хувьд туршилтын туршид саармаг цэг /нейтраль/-ийг нь газардуулсан байж болно);  б) ороомгийн гүйдэл (бусад бүх ороомгууд болон од ба холимог холболттой ороомгуудын хувьд саармаг цэг нь туршилтын туршид газардуулаагүй байж болно);  в) зэргэлдээх богино холбогдсон болон туршигдаагүй байгаа ороомогт дамжин орсон гүйдэл, үүнийг заримдаа паразит багтаамжжар дамжин ирэх гүйдэл гэж нэрлэдэг;  г) эх бие-гэрний газардлагын гүйдэл;  д) туршигдаагүй байгаа ороомгод дамжин ирэх хүчдэл.  Эдгээрээс a), в) болон г), эсвэл б), в) болон г)-ийн нийлбэрүүдийг заримдаа шугамын гүйдэл гэж нэрлэдэг.  Реакторуудыг туршиж байх явцад шунтын болон цуваа аль ч төрлийн хувьд c) болон e) төрлийн шилжилтийн процессын үзүүлэлтүүдийг ашигладаггүй, харин d) төрлийг хэмжиж хэрэглэх боловч трансформаторын туршилтанд ашиглах үеийнхээс бага мэдрэмжтэй байдаг учраас зөвхөн шилжилтын процессыг бичих нэмэлт арга болгон ашиглана.  **7.4 Туршилтын журам дараалал**  Бүрэн долгионы болон бүрэн ба хэрчигдсэн долгионы туршилтуудын харгалзах дэс дараалалыг ОУЦТК 60076-3 стандартад заасан байдаг.  Туршилтын шалгарсан арга нь трансформаторт аянгын долгион шууд өгөх ядвал боловч ашиглалтанд байгаа трансформаторуудын дунд ба нам хүчдлийн ороомгууд систем талаас ирж байгаа аянгын хэт хүчдэлд өртөх боломжгүй байдаг тусгай тохиолдлуудад "дамжин орж ирсэн хэт хүчдэл"-ын аргыг ашиглах хувилбар боломжтой. Энэ үед нам хүчдлийн ороомгийн импульсын туршилтыг өндөр хүчдлийн ороомгийн туршилттай нэгэн зэрэг явуулна. Эдгээр нөхлүүдэд соронзон хобоогоор дамжин ирсэн хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрс нь ОУЦТК 60076-3 стандартад заасантай тохирохгүй байх талтай. Хамгийн гол нь энэ үед хангалттай өндөр утгатай төгсгөлийн эсэргүүцлүүдийн ашиглах замаар туршилтанд шаардлагатай хүчдлийн түвшинг гаргаж авахыг зорих хэрэгтэй болно. Гэвч, энэ нь хэдийгээр эсэргүүцлүүдийн утга өндөр байлаач үргэлж боломжтой байдаггүй. Энэ туршилтын үед гурвалжин холболттой ороомгууд дээрх фаз хоорондын хүчдлийн хэмжээ ихэсч, фаз хоорондын дотоод ба гадаад тусгаарлагуудад хэт хүчлэг /хэт хүчдэл/ үүсэх аюултай байдаг учраас нам хүчдлийн ороомогт өгч байгаа хүчдэл хязгаарлагдмал утгатай болдог. Хүчдлийн тохирох хязгаар утгуудыг нам хүчдлийн давтагдах гүйдлийн импульсын генератороор үүсгэсэн шилжилтын процессыг шинжлэх замаар тогтооно.  Ороомгуудын дээд талд холбогдсон шугаман бус хамгаалах тоноглолууд нь өөрсдийн үндсэн онцлог шинж чанарын улмаас багасгасан бүрэн долгион болон бүрэн долгионы импульсын осциллограмм ба тоон бичлэгүдийн хооронд зөрүү үүсгэж магадгүй. Тэдгээр төхөөрөмжүүдийн ажиллах явцад эдгээр зөрүүнүүд үнэхээр үүссэн гэдгийг нотолж, тэдгээрийн ажиллагааны цаашдын чиг хандлагыг харуулах зорилгоор хүчдлийн янз бүрийн түвшингүүдэд хоёр буюу түүнээс олон тооны амплитудыг нь багасгасан бүрэн долгионы туршилтуудыг явуулах ёстой. Аливаа шугаман бус үзэгдлийн эргэж буцах чанарыг харуулахын тулд туршилтын хэлхээний гэдрэг чиглэлд бүрэн долгионы туршилтын хүчдлийн араас яг ижил багасгасан амплитудтай бүрэн долгионы импульсуудыг өгөх хэрэгтэй.  Жишээлбэл: 60%, 80%, 100%, 80%, 60%.  Трансформаторын саармаг цэгийг турших аргуудыг ОУЦТК 60076-3 стандартад зааж өгсөн байдаг. Шууд бус аргыг хэрэглэж байгаа үед, өөрөөр хэлбэл нэг буюу түүнээс дээш тооны шугамын оруулгаас саармаг /нейтраль/ цэгт дамжигдаж ирсэн импульсээр турших явцад долгионы хэлбэр дүрс үндсэндээ трансформаторын үзүүлэлтүүдээр удирдагддаг учраас түүнийг нормчилдоггүй.  Харин, бүх шугамын оруулгуудыг газардуулаад саармаг цэгт импульсын хүчдэл өгч гүйцэтгэдэг шууд арга нь долгионы нүүрний уртыг 13 мкс хүртэл ихэсгэх боломж олгоно. Энэ тохиолдолд, импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн нөлөөмж /индуктив/ ачаалал нэмэгдснээс зөвшөөрөгдөх хязгаарт заагдсан 50%-ын хүчдлийн утгатаа хүрэх хугацаа буюу долгионы уртыг гаргаж авахад хүндрэлтэй болно. Ийм үед туршигдаж байгаа ороомгийн туршигдаагүй байгаа оруулга-үзүүрүүдийг бүрэн эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах хувилбарыг ашиглаж болно.  **7.5 Туршилтуудыг бичих**  **7.5.1 Ерөнхий зүйл**  Аянгын импульсын хүчдэл болон гүйдлийн хэлбэр дүрсийг бичиж авахын тулд аналог болон тоон бичлэгийн системүүдийг ашиглаж болно.  **7.5.2 Aналог ба тоон бичлэгийн системүүд**  Аналог осциллограф болон тоон бичигчүүдийн шаардлагууд ОУЦТК 61083-1-д өгөгдсөн байдаг.  Тоон бичлэг нь үр дүнгүүдийг математик байдлаар тайлан унших болон нэмэлт математик боловсруулалт хийхэд ашиглах, тухайлбал, бичлэгүүд дээрх гэмтлийн шинжилгээ хийх гэх мэт боломжуудыг олгодог. Эдгээр техникууд нь итгэл найдвар төрүүлдэг ч гэсэн, харин үр дүнгүүдийг тайлан унших явдлыг бүрэн баталгаажуулж, тодорхой болгоогүй.  Туршилтын осциллограммын муруйнуудын /trace/ харьцуулалтаар зөвшөөрч болох үр дүнг үзүүлэх зорилгыг хангахын тулд тоон хэмжилтүүдээр олж авсан долгионы хэлбэр дүрсүүд нь анхны өгөгдлүүдээс гаргасан бөгөөд ямар нэгэн математик боловсруулалтанд ороогүй, шүүгдээгүй мөн толийлгож тэгшлээгүй байх ёстой гэдгийг онцгойлон тэмдэглэх хэрэгтэй.  Анхны өгөгдлүүдийг стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсийг үнэлэхэд ашиглах нь мөн адил ач холбогдолтой. (Зураг Б.18, Б.19 болон Б.21-д хүчдлийн амплитут утга, нүүрний урт T1 болон долгионы урт T2-ын үнэлэх үеийн илт ялгаануудыг харуулав.)  Бичигдсэн өгөгдлүүдийг математик боловсруулалтанд (зүйл 10-ыг үз) оруулах зорилт тавилгүйгээр тоон бичигчүүдийг хүчдэл ба гүйдлийн хэлбэр дүрсүүдийг шууд бичих хэмжүүрийн багаж болгон хэрэглэж байгаа үед тэдгээрийг техникийн хувьд боловсронгуй болсон аналог хэмжүүрүүд гэж үзэж болно.  ОУЦТК 60076-3 стандарт нь a) туршилтын обьектод өгсөн хүчдэл ба б) 7.3.2-д жагсаасан шилжилтийн процессуудын ядаж аль нэгийг нэгэн зэрэг хэмжихийг шаарддаг учир наад зах нь хоёр үл хамаарах бичлэгийн сувгуудтай байх зайлшгүй шаардлагатай.  Туршилтын объектод өгөх хүчдэл найдвартай тодорхойлогдсон бол бичигдэх шаардлагатай бусад үзүүлэлтүүдийг сонгох явдал нь гэмтэл илрүүлэх аргыг хэрхэн сонгосноос хамаарна.  **7.5.3 Долгионы хэлбэр дүрсүүдийг аналогоор бичих**  Туршилтын хүчдлийн багасгасан болон бүрэн утгуудын түвшинд хийгдсэн бичлэгүүдийг харьцуулах явдалд тулгуурлан туршилтын үр дүнгүүдийг үнэлэх ажиллагааг гүйцэтгэхийн тулд осциллоскопууд дээр тохирсон долгион сулруулагчууд /аттенюаторууд/-ыг хэрэглэх замаар тэнцүү хэмжээтэй /нэг ижил/ амплитудыг бичих нөхцлийг бүрдүүлэх нь давуу тал олгоно.  **7.5.3.1 Импульсын хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрсийн аналог бичлэг хийх**  a) Импульсын хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрсийг тодорхойлох  Туршилтын хэлхээний үзүүлэлтүүдийг урьдчилан тохируулах явцад долгионы хэлбэр дүрсийг тодорхойлоход зориулан хийсэн бичлэгүүдийн дүрс дэлгэлт /развёртка/-ийн тохиромжтой хугацаа нь нүүрний долгионы хувьд 10 мкс (трансформаторын саармаг цэгийг турших үед дүрс нээгдэх /развёртка–ийн/ хугацаа үүнээс урт байх шаардлагатай байж болно) байна. Долгионы уртын бичлэг нь туршилтын хучдлийн 50%-ийн утгаа авах хугацааг болон боломж байвал эсрэг туйлтай үеийн хүчдлийн импульсын амплитудыг тодорхойлох боломж олгоно.  б) Туршилтын объектод өгсөн импульсын хүчдлийн бичлэг хийх  Туршилтын долгионы амплитуд\оргил\ утгыг тодорхойлох болон туршилтын үед үүсч болох аливаа гэмтлийг илрүүлэх боломж олгохын тулд:  – бүрэн долгионы хувьд дүрс дэлгэлтийн хугацааг 100 мкс-ээс багагүй байхаар;  – хэрчигдсэн долгионы хувьд дүрс дэлгэлтийн хугацааг 10 мкс – ээс 25 мкс хооронд байхаар тус тус сонгох нь ихэвчлэн илүү үр дүнтэй байдаг.  Тоноглолыг ашиглалтанд хүлээн авах үеийн туршилтын хувьд туршилтын тайланд (зүйл 11-ийг үз) зориулж нэг удаагийн тохиромжтой бичлэг ерөнхийдөө хангалттай байдаг бол оношлогоо хийх туршилтын хувьд янз бүрийн дүрс дэлгэлтийн хугацаатайгаар хийгдсэн хэд хэдэн бичлэг шаардлагатай.  **7.5.3.2 Импульсын гүйдлийн аналог бичлэг хийх**  Импульсын гүйдэл нь гэмтлийг илрүүлэх хамгийн нарийн үзүүлэлтүүдийн нэг учраас бичлэг хийж авсан импульсын гүйдлийн долгионууд нь туршилтын үр дүнгийн үндсэн шалгуур /критери/ болдог.  Гүйдлийн осциллограммын хэлбэр болон шугаман ба экспоненциаль дүрс дэлгэлтийн алиныг нь ашиглаж байгаа зэргээс хамааруулан өөр өөр дүрс дэлгэлтийн хугацаа бүхий нэгээс илүү тооны бичлэгүүдийг ашиглах шаардлагатай болно. Гаргаж авсан дүрсний нягтрал нь дараах баталгаатай нөхцлүүдийг хангах ёстой. Үүнд:  a) долгионы нүүрний хэсэг орчим дахь өндөр давтамжтай импульсын байгуулагчуудын багтаасан осциллограммаас гаргаж авсан дүрсүүд аль болохоор цэвэрхэн тод байх;  б) импульсын гүйдлийн бичлэг нь хугацааны хоцролт үүсгэж байгаа аливаа зөрөө - гажилтуудыг илрүүлэх боломж олгохуйц хангалттай удаан хугацаатай хийгдсэн байх; Импульсын долгионд тухайн трансформатор болгоны үзүүлэх хариу үйлдэл өөр байдаг, дүрс дэлгэлтийн хурд хэрэглэж байгаа ороомгийн хийцийн төрлөөс ямар нэг байдлаар хамаардаг зэрэг шалтгаануудын улмаас хугацааны хоцролт гэдэгт юуг ойлгох болон дүрс дэлгэлтийн хугацааны талаар шалгарсан дүрэм гаргахад хүндрэлтэй. Трансформаторын нейтралийн болон ороомгийн гүйдлийн бичлэгийг нөлөөмжийн /индуктив/ гүйдэл оргил утгандаа хүрэх хүртэл үргэлждүүлэх шаардлагатай бөгөөд ингэснээр тусгаарлага гэмтснээс ороодос хоорондын богино залгаа үүсч, нөлөөмж эсэргүүцлийн хэмжээнд гарсан ямар нэг өөрчлөлтийг тодорхойлон үнэлэх боломжтой болно.  **7.5.4 Долгионуудын хэлбэр дүрсийн тоон бичлэг хийх**  Тоон бичлэг хийх зарчим нь туршилтын явцад хугацааны тогтмол интервалуудтайгаар сорьц болгон хэмжиж авсан хүчдэл ба гүйдлийн хэмжилтүүдийг бичих явдал юм.  Туршилтын хүчдлийн багасгасан болон бүрэн утгуудын түвшинд хийгдсэн бичлэгүүдийг харьцуулах явдалд тулгуурлан туршилтын үр дүнгүүдийг үнэлэх ажиллагааг гүйцэтгэх (7.5.3.2-ийг үз) болон долгионы хэлбэр дүрсийн үзүүлэлтүүдийг дүгнэхэд эдгээр сорьц бичлэгүүд нь анхдагч өгөгдлүүд байдлаар (7.5.3.1-ийг үз) шууд илэрхийлэгдэх ёстой.  Түүнчлэн, бичигдсэн өгөгдлүүд нь долгион шинжлэх алгоритмуудаар боловсруулагдаж, жишээлбэл, бичлэгүүдэд гэмтлийн шинжилгээ хийхэд ашиглагдах боломжтой (зүйл 10-ыг үз).  Импульсын туршилтын явцад туршилтын иж бүрдлийн ойролцоо хүчтэй цахилгаан соронзон оронгууд үүсдэг. Иймд тоон бичлэгийн системд байгаа өндөр мэдрэмжтэй электроникийн багажууд, өгөгдөл боловсруулах иж бүрдэл- тоноглол болон түүний цахилгаан хангамжийг эдгээр оронгуудаас хамгаалах шаардлагатай.  Тоон хувиргууруудын дэлгэцийн нягтрал нь 768х1024 пиксельтэй тэнцүү буюу их, хэвлэгч төхөөрөмжүүд нь нэгж инчэд 300 –аас дээш цэгтэй байх ёстой.  **7.5.4.1 Импульсын хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрсийн тоон бичлэг хийх**  a) Импульсын хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрсийг тодорхойлох  Туршилтын хэлхээний үзүүлэлтүүдийг урьдчилан тохируулах явцад долгионы хэлбэр дүрсийг тодорхойлоход зориулан хийсэн бичлэгүүдийн дүрс дэлгэлт \развёртка\-ийн тохиромжтой хугацаа нь нүүрний долгионы хувьд 10 мкс (трансформаторын саармаг цэгийг турших үед дүрс дэлгэлтийн хугацаа үүнээс урт байх шаардлагатай байж болно)-ээс бага буюу тэнцүү байна. Долгионы уртын бичлэг нь туршилтын хучдлийн 50%-ийн утгаа авах хугацааг болон боломж байвал эсрэг туйлтай үеийн хүчдлийн импульсын амплитудыг тодорхойлох боломж олгоно.  ОУЦТК 61083-1 стандартад импульсын хүчдэл ба гүйдлийн долгионы хэлбэр дүрсийг бүртгэхэд зориулсан хамгийн бага нягтралтай тоон хувиргуурыг 60 Мгц-ын давтамжтай 9 байтын байхаар заасан байдаг. Харин 10 мкс буюу түүнээс бага хугацааны улиралуудыг өсгөж долгионы хэлбэр дүрсийг үнэлэх болон хэрчигдсэн долгионы импульсүүдийг үнэлэж байгаа бол 100 МГц-ын сорьцын давтамж бүхий 10 байтын тоон хувиргуур ашиглах ёстой гэдгийг анхаарах шаардлагатай.  Уламжлалт ёсоор бол долгионы хэлбэр дүрсийг үнэлж дүгнэх ажиллагаа нь хэлбэр дүрсийн үзүүлэлтүүдийг харж үнэлэх болон осциллоскопын бичлэгүүд, инженерийн дурэм журамд үндэслэгдэж ирсэн. Хүчний трансформаторуудын өндөр хүчдлийн туршилтанд тоон бичигч төхөөрөмжүүдийг нэвтрүүлснээр амплитуд утга болон хугацааны үзүүлэлтүүдийг авч үзэхдээ стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүдийг үнэлэх асуудлыг анхааралдаа авах шаардлагатай. Тухайлбал, хэвийн чадал өндөртэй нам хүчдлийн ороомгуудийг турших үед 0.5 МГц-ээс бага давтамжтай нэг туйлтай савлалтууд үүсдэг бөгөөд иймэрхүү стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүдийн амплитудыг үнэлэхэд ОУЦТК 61083-2 стандартыг хэрэглэх боломжгүй. Тоон хувиргууруудад суулгасан муруйг тэгшитгэх алгоритмуудын ачаар 10%-аас давсан алдаанууд ажиглалтаар илэрнэ (Зураг Б.18, Б.19 болон Б.21-ыг үз).  Ийм тохиолдлуудад инженерийн шүүн тунгааж шийдвэрлэх зарчмуудыг баримтлан анхны өгөгдлүүдийг болгоомжтой үнэлэх шаардлагатай. ОУЦТК 61083-1-ын дагуу хүчдлийн оргил утгыг оргил хүчдлийн вольтметрээр нэгэн зэрэг хэмжихийг онцгойлон зөвлөмж болгож байна.  б) Туршилтын объектод өгсөн импульсын хүчдлийн бичлэг хийх  Туршилтын долгионы амплитуд\оргил\ утгыг тодорхойлох болон туршилтын үед үүсч болох аливаа гэмтлийг илрүүлэх боломж олгохын тулд:  – бүрэн долгионы хувьд сорьц өгөгдлүүдийг харуулах хугацаа 100 мкс-ээс багагүй байхаар;  – хэрчигдсэн долгионы хувьд энэ хугацаа 10 мкс – ээс 25 мкс хооронд байхаар тус тус сонгох нь ихэвчлэн илүү үр дүнтэй байдаг.  Ороомгийн хэсэгчилсэн резонансын хамгийн их давтамжууд нь ихэвчлэн 1 МГц -2 МГц-ээс хэтэрдэггүй тул тоон хувиргуурын нэг сувгын сорьцлох давтамжууд нь 10 МГц-ээс 20 МГц байхад ер нь хангалттай. Хэрвээ хүчдэл болон гүйдлийн осциллограммуудад өндөр давтамжууд илэрвэл энэ нь газардуулгын систем дэх шуугиан \помех\ болон хэмжүүрийн хэлхээний паразит багтаамжийн резонансаас үүдэлтэй. Иймд туршилтын обьектын бодитой нөхцөл байдлын улмаас хэмжүүрийн хэлхээнд үүссэн шуугианыг дарахын тулд сорьцлох өндөр давтамжуудыг ашиглахыг (өмнө дурдсан) зөвлөмж болгож байна.  Долгионы шинжилгээ хийхийн тулд боломжтой хамгийн их санах ой бүхий тоон хувиргуурыг ашиглан долгион бүрэн замхарч дуусталх хугацааны туршид бүтэн долгионы хэлбэр дүрсүүдийг сорьцлон авах нь чухал байдаг. Долгионы бодитой эхлэлийн цэгийг тодорхойлохын тулд хангалттай тооны сорьцуудыг авсан байхаар тоон хувиргуурыг программчлах хэрэгтэй.  Түүнчлэн, боломжтой өндөр нягтрал бүхий тоон хувиргуурын оролтын өсгөгчүүдийг хэрэглэх нь чухал ач холбогдолтой. Энэ шалтгааны улмаас хүчдлийн долгионы амплитудад зориулсан оновчтой хязгаар болон суваг тус бүрийн өсгөгчийн нойлын шилжилтийг тодорхойлохын тулд 50 %-ын олон тооны бичлэгүүд шаардлагатай болно.  Аянгын импульсуудын эсрэг туйлруугаа хэт савалсан тоонд онцгой анхаарал хандуулах ёстой. Иймэрхүү хэт савлалтын хэмжих явцад сонгосон хязгаар дахь тоон хувиргуурын оролтын өсгөгч ханалтанд орсноос болж бичиж авсан долгионы хэлбэр дүрсүүдэд хязгаарлалт үүсэх боломжтой.  Тоноглолыг ашиглалтанд хүлээн авах туршилтуудын хувьд (зүйл 11-ийг үз) нэг тохирсон бичлэг ерөнхийдөө хангалттай байдаг. Оношлох зорилгоор явуулж байгаа туршилтын хувьд, системийн программ хангамж нь компютерын санах ойд хадгалагдсан бүх мэдээлэлүүд болох долгионы зарим хэсгийг буюу сорьцлох хугацааны туршид хийгдсэн долгионыг шалгах боломжийг санал болгодог онцлогтой. Программ хангамж нь бүрэн долгион болон багасгасан амплитудтай долгионуудыг ялгаж, тохируулах боломжтой томруулсан хуваарь дээр харуулж чадна. Гэвч хоёр муруйн хугацааны найдвартай тохируулга хийхэд хүндрэлтэй, долгионы дүрсийн хурдтай өсөлтийн хэсэгт хүндрэл үүсэх магадлалтай.  **7.5.4.2 Импульсын гүйдлийн тоон бичлэг хийх**  Импульсын гүйдэл нь гэмтлийг илрүүлэх хамгийн нарийн үзүүлэлтүүдийн нэг учраас бичлэг хийж авсан импульсын гүйдлийн долгионууд нь туршилтын үр дүнгийн үндсэн шалгуур \ критери\ болдог.  Тоноглолыг ашиглалтанд оруулахад зориулсан туршилтын бичлэгүүдийн харагдах байдал нь 7.5.2.2 дахь осциллограммуудтай адилхан.  Гэхдээ тоон хувиргуурын санах ойд хадгалагдсан өгөгдлүүд нь нэг бичлэгийг хугацааны янз бүрийн хуваариудад томруулж, багасгаж өөр өөрөөр харуулах боломж олгодог. Тоон хувиргуурын оролтын сувгуудын нягтрал болон сорьцлох давтамжуудад тавигдах шаардлагууд нь 7.5.3.1-д заасантай адилхан.  Туршилтын үр дүнгүүдийг шалгахад зориулж хувиргалтын функцийн шинжилгээ мэтийн (зүйл 10-ыг үз) нэмэлт математик шинжилгээний арга хэрэгслүүдийг ашиглахын тулд импульсын хүчдэл ба гүйдлийн бичлэгт зориулан бичлэгийн адилхан хугацаа хэрэглэх нь чухал.  **8. Коммутацийн долгионы туршилтууд**  **8.1 Тусгай шаардлагууд**  Трансформаторууд ба реакторууд нь коммутацийн долгионд харилцан адилгүй хариу үйлчлэл үзүүлдэг явдал нь трансформатор өөрөө битүү соронзон хэлхээг үүсгэдэг болон коммутацийн долгионы үйлчлэх хугацаа харьцангүй урт байдгаас трансформаторын зүрхэвчинд тодорхой хэмжээний соронзон урсгал үүсгэдэгтэй тус тус холбоотой (ОУЦТК 60076-3-ыг үз). Эдгээр тохиолдлууд реакторуудын хувьд үүсдэггүй төдийгүй долгионы хэлбэр дүрсүүдтэй холбоотой хүндрэлүүд болон туршилт явуулах журам дараалал нь өөр байдаг. Иймд энэ хоёр төрлийн тоноглолуудын хувьд тус тусад нь авч үзэх шаардлагатай.  **8.2 Tрансформаторууд**  **8.2.1 Долгионы хэлбэр дүрсүүд**  ОУЦТК IEC 60076-3 стандартад зааснаар бол коммутацийн импульсын долгионы нүүрний уртад хатуу тогтоосон бодитой утга нормчлогдохгүй. Гэхдээ хүчдлийн долгионы жигд тархалтыг хангахын тулд энэ хугацаа хүрэлцэхүйц удаан үргэлжлэх ёстой. Ингэхийн тулд хүчдлийн долгионы нүүрний урт нь ерөнхийдөө 100 мкс-тэй тэнцүү буюу их байхыг шаарддаг ба энэ нь ороомгийн идэвхитэй багтаамж, ачаалалын багтаамж болон цуваа эсэргүүцлүүдээр тодорхойлогдоно.  Харин коммутацийн импульсын долгионы уртад туршилтын хэлхээний долгионы хэлбэр дүрс үүсгэх элементүүд төдийгүй зүрхэвчний соронзон ханалтанд орох магадлал нөлөөлнө.  Ихэнх трансформаторуудын хувьд туршилтын бүрэн хүчдлийн түвшинд зүрхэвчний соронзон ханалтын улмаас долгионы сүүл хэсэг оргил утгаасаа өнгөрсний дараа экспоненциалиар буурч байснаа гэнэт тэгийг дайран огцом унадаг. Иймд туршилтын хүчдлийн 50%-даа хүрэх хугацаа буюу долгионы уртыг туршилтын объектод өгөх коммутацийн долгионы сүүлний хэсэг болгон нормчилж хэрэглэдэггүй.Үүний оронд долгионы хэлбэр дүрсийг хүчдлийн утга 90%-аас дээш байх хугацаа Td болон долгионы тэг утгыг эхэлж дайрах хугацаа Tz-ээр тодорхойлдог. ОУЦТК 60076-3 стандартаар Td ≥ 200 мкс ба Tz ≥ 500 мкс байхаар тус тус заасан боловч 1000 мкс-ийг илүүд үзсэн байдаг. Эдгээр хэмжигдэхүүнүүдийг зураг 3а-д харуулсан болно.  Зүрхэвчний соронзон ханалтанд орох хугацаа нь зүрхэвчний хэмжээс, соронзлолын анхны төлөв ба түвшин хийгээд өгч байгаа туршилтын хүчдлийн хэлбэр дүрсээс хамаарна.  Туршилтын хүчдлийн өгөгдсөн утганд коммутацийн импульс бүрийг өгөхөөс өмнө зүрхэвчний соронзлол ижил утгатай байдаггүй учраас яг тохирсон нэгэн хэвийн долгионы хэлбэр дүрсийг гарган авах боломжгүй. 8.2.3-аас зүрхэвчний соронзон ханалтыг бууруулахад зориулагдсан туршилтын журам дараалалыг үз.  Зүрхэвчний соронзон ханалт нь туршилтын хүчдлийн багасгасан түвшинд ер нь үүсэхгүй, мөн хүчдлийн бүрэн утгын түвшинд ч тэр болгон үүсдэггүй. Үүсэх үедээ түүний хүчдлийн хэлбэр дүрсэнд үзүүлэх нөлөөлөл нь бий болсон соронзон ханалтын хэмжээнээс их бага ямар нэг байдлаар хамаарна. Энэ шалгаааны улмаас трансформаторын өндөр хүчдлийн талаас коммутацийн хүчлийн импцльсууд өгөгдөж байгаа үед багасгасан хүчдлийн утгуудад үүсэх долгионы дүрсийн муруйнуудаа T1 болон Td хугацаануудыг байгуулан харж болно. Харин Tz хугацааг хүчдлийн бүрэн түвшингийн туршилтын анхны муруй үүсэх хүртэл байгуулж харах боломжгүй. Коммутацийн хүчдлийн импульс трансформаторын нам хүчдлийн талаас өгөгдөж байгаа бол багасгасан хүчдлийн туршилтаар зөвхөн T1 хугацааг тодорхойлж чадна. Энэ тохиолдолд Td болон Tz хугацаануудыг зөвхөн туршилтын бүрэн хүчдлийн түвшинд хийгдсэн бичлэг- зурагнуудаар тодорхойлж болно.  Трансформаторын соронзон хэлхээний соронзон эсэргүүцлийн хэмжээ харилцан адилгүй байдаг учраас түүний зүрхэвчний соронзон дамжуулагчийн босоо шилбэ \стержень\-ууд дээрхи долгионы сүүл хэсгийн хэлбэр дүрс илэрхий өөр байдгийг тэмдэглэх ёстой.  **8.2.2 Оруулга-үзүүрүүдийн холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх боломжит аргууд**  **8.2.2.1 Оруулгуудын холболт**  ОУЦТК 60076-3 стандартын шаардлагуудыг хангахын тулд гурван фазын трансформаторуудын туршилтын хүлээн зөвшөөрөгдсөн зөвхөн нэг холболт байдаг. Энэ холболтыг зураг 4-д үзүүлсэн бөгөөд трансформаторын саармаг цэг нь дандаа газардуулагдсан, туршигдаагүй байгаа фазуудын оруулгууд нь хоорондоо заавал холбогдсон байдлаар туршихыг харж болно. (Гурвалжин холбоотой ороомгууд бүхий трансформаторуудын хувьд туршигдаагүй байгаа фазуудыг заавал хооронд нь холбох шаардлагагүй.)  Энэ хэлхээ нь гурав болон таван соронзон дамжуулагч босоо шилбэ - стержень бүхий зүрхэвчтэй гурван фазын трансформаторуудад зориулан фаз-газар болон фаз-фазын хоорондох тусгаарлагыг туршилтын хүчдлийн 1.0 ба 1.5 харьцангуй нэгж (p.u-per unit буюу харьцангуй нэгж гэдгийг туршилтын хүчдлийн ампдлитуд утга U гэж ойлгоно. Орчуулагч) харгалзсан утгуудад нэгэн зэрэг туршихаар сонгосон болно.  Туршилтын хүчдлийг шууд өгөх ороомог болон туршилтын хүчдлийн түвшинг тусгаарлагын коммутацийн импульсыг тэсвэрлэх хэвийн утга нь хамгийн их хэвийн хүчдэлтэй ороомогт үүсч байх шаардлагатай дүйцүүлэн сонгохыг үйлдвэрлэгчид ихэвчлэн даалгадаг.  Туршигдаагүй байгаа ороомгуудыг богино холбох практик ач холбогдолгүй байдаг явдал нь коммутацийн долгионы туршилтын явцад энэ богино холболтоос үүсэх нөлөөлөл нь индукцлэгдсэн хүчдлээр туршихтай үндсэндээ адилхан байдагтай холбоотой.  Коммутацийн импульсын үндсэн долгион индукцилэгдэн дамжих зуур фаз хоорондын багтаамжийн холбоо, фазын өөрийн багтаамж ба нөлөөмж эсэргүүцлүүд нь дамжин орж ирсэн хүчдлүүдийн хэмжээг нэмэгдүүлдэг нэмэлт хэлбэлзлэлүүдийг үүсгэнэ. Зураг Б.14-д энэ үзэгдлийг тодорхой харуулсан. Гэхдээ ОУЦТК 60076-3 стандарт дахь фаз-фазын хоорондох 1.5U хэмжээний хүчдэл нь U хэмжээний хүчдэл аль нэг оруулга- үзүүрт өгөгдсөн үед үүснэ гэсэн шаардлага нь зөвхөн зарчмын хуьд хүчинтэй. Иймд, хэрвээ өндөр Омын бүрэн эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах замаар хэлбэлзлэлтэй хүчдлүүдийг дарах арга хэмжээ авахгүй бол туршилтын явцад фаз хоорондын хүчдэл 1.5U-аас их болж болзошгүй.  Мөн фаз-газар хоорондын хүчдэл туршигдаагүй байгаа оруулгууд дээр 0,5U-аас хавьгүй их болж магадгүй.  Туршигдаж байгаа ороомгийн системийн туршигдаагүй байгаа фазын оруулга- үзүүрт болон, эсвэл туршигдаагүй байгаа фазуудын оруулга–үзүүрүүдэд өндөр Омын эсэргүүцэл /ачаалал/ залгах нь хэлбэлзлэлийн зохистой замхрал үүсгэх тохиромжтой арга юм. Гэхдээ, идэвхитэй эсэргүүцлэн ачаалал нь туршигдаагүй байгаа оруулгууд дээрх долгионы нүүрний уртыг тодорхой хэмжээгээр уртасгаснаар фаз-фазын хоорондох хүчдлийг 1,5U–аас бага болгодог талтай. Энэ нь туршилтын өгөгдсөн хүчдэл (U) болон индукцлэгдсэн хүчдэл (0,5U) нь ялимгүй өөр хугацаануудад хамгийн их утгаа авдгаас үүдэлтэй. Маш бага эсэргүүцэлтэй буюу маш хүнд нөхцлөөр ачаалагдсан тохиолдолд туршилтанд өгөгдсөн коммутацийн импульсын долгионы сүүл хэсгийн хугацаа зүрхэвчний соронзон ханалт үүсэхгүй байхуйцаар богиносдог.  Ороомгууд нь гурвалжин холбоогүй гурав /Ш-маягийн/ болон таван соронзон босоо шилбэ бүхий зүрхэвчтэй трансформаторуудад туршигдаагүй байгаа босоо шилбэнүүд дээр суусан ороомгуудаар соронзон урсгал чиглүүлэгдэн урсаж чадахгүй учраас фазын (фаз ба газар хоорондын) хүчдлээс 1.5 дахин их хүчдэл фазуудын хооронд үүсч байх ёсой гэсэн шаардлага биелэгдэхгүй. Хэрэв ороомгуудыг гурвалжин холбох боломжгүй бол туршигдаагүй байгаа фазуудын ороомгийн оруулга-үзүүрүүдийг газардуулах болон богино холбох замаар зөвхөн 1.0 харьцангуй нэгж хүчдлээр фаз-газар туршилтуудыг явуулах боломжтой.  Нэмэлт долгионы хэлбэлзлэлүүд үүсдэгтэй холбоотой иймэрхүү анхаарал хандуулах шаардлагатай асуудлууд нэг фазын автотрансформаторуудад мөн хамаарна.  **8.2.2.2 Гэмтэл илрүүлэх аргууд**  Ер нь гэмтдийг илрүүлэхэд зөвхөн туршилтыгн өгөгдөж байгаа хүчдлийн хэмжилт хангалттай боловч трансформаторын дунд болон нам хүчдлийн оруулгад импульсын хүчдэл өгч туршиж байгаа бол тоноглолын хамгийн их Um хүчдэлтэй оруудга дээр хүчдлийн утгыг хэмжиж авах шаардлагатай.  Түүнчлэн туршид байгаа ороомгоор дамжин газардаж байгаа гүйдлийн гэмтэл илрүүлэхэд ашиглаж болно.  **8.2.3 Tуршилтын журам дараалал**  Туршилт явуулах журам дараалалыг ОУЦТХ-ны 60076-3 стандартад тоймлож гаргасан бөгөөд уг дараалалд зүрхэвчний соронзон ханалт эхлэх боломжтой мөчийг хойшлуулах замаар импульсын үргэлжлэх хугацааг ихэсгэхэд чиглэгдсэн арга хэмжээнүүдэд зориулагдсан зөвлөмж заалтуудыг оруулсан байдаг.  Энэ удирдамжид голлон заасан өндөр хүчдлийн ороомог шууд хэрэглэх аргад зориулж трансформаторын фаз тус бүрийн оруулганд дараах туршилтуудыг хийх дараалалыг баримтална. Үүнд:  – сөрөг туйлтай, туршилтын багасгасан түвшинтэй нэг импульс (коммутацийн импульс тэсвэрлэх хүчдлийн утгын 50%-70% хооронд);  – Амплитуд утгын 50%-тай ойролцоогоор тэнцүү эерэг туйлтэй импульсууд, эсвэл тогтмол гүйдлийн аль нэгийг хэрэглэх замаар эсрэг туйлтай үлдэгдэл соронзонг өгөх  – Туршилтын импульс болгоны өмнө коммутацийн импульс тэсвэрлэх хүчдлийн түвшинд сөрөг туйлтай гурван импульс явуулж эсрэг туйлтай үлдэгдэл соронзонг өгөх.  Үлдэгдэл соронзонг өгөх шалгарсан арга нь туршилтын хүчдлийн 50% хувьтай ойролцоогоор тэнцүү амплитудтай эсрэг (өөрөөр хэлбэл, эерэг) импульсуудыг өгөх явдал юм. Бодитой нэгэн ижил осциллограммууд болон тоон бичлэгүүдийг туршилтын хүчдлийн түвшин бүрт гаргаж авахын тулд аль болохоор соронзон ханалтын шинж чанартай ижилхэн үлдэгдэл соронзонгийн цэг долгионы муруй дээр байнга үүсч байхыг зөвлөмж болгож байна. Энэ цэг нь туршилтын дараалсан импульсуудын тэг утгыг эхлэн дайрах хугацаа тогтмол хадгалагдаж байвал олдоно. Шаардлагатай урьдчилсан соронзлолын импульсын тоо болон тэдгээрийн амплитудын утгууд нь төлөвлөсөн туршилтын хүчдлийн түвшингээс хамаарна. Энэ журам дараалалыг баримтлан туршилт явцад гадаад тусгаарлагын аливаа ниргэлэгээс үүсэх хүндрэлүүдээс зайлсхийхийн тулд дээрх эсрэг туйлтай урьдчилсан соронзлолын импульсуудын утгыг туршилтын хүчдлийн 50%-60%-аас хэтрүүлж болохгүй.  **8.2.4 Туршилтын үр дүнгүүдийг бичиж авах**  **8.2.4.1 Ерөнхий зүйл**  Коммутацийн импульсын туршилтын явцад өндөр хүчдлийн оруулгын хүчдлийг бичиж авах шаардлагатай. Гэхдээ, 8.2.2-д тайлбарласан туршигдаагүй байгаа оруулгуудын газартай харьцангуй болон фазууд хоорондын хүчдлийн утгууд хэт ихэсч болох шалтгааны улмаас эдгээр хүчдлүүдийг ядаж хянаж байхыг зөвлөж байна.  Хүчдлийн бичлэг нь ерөнхийдөө коммутацийн импульс шууд өгөгдөөгүй байгаа соронзон холбллтой ороомгууд дээр үүссэн аливаа гэмтлүүдийг хангалттай харуулах болно.  Импульсын гүйдлийг бичиж авч болох ба энэ нь олон тохиолдолд гэмтлийн талаарх нэмэлт мэдээлэлийг өгдөг.  Коммутацийн импульсын хүчдлийг бичиж авахад багтаамжийн хүчдэл хуваагчуудийг ашиглах нь илүү зохимжтой бөгөөд идэвхитэжй эсэргүүцлийн хүчдэл хуваагчууд нь долгионы хэлбэр дүрсэд нөлөөлөхөөс гадна дулааны хэт ачаалал үүсгэж мэдэх дутагдалтай талтай. Харин туршигдаагүй байгаа оруулгуудын хүчдлийг хянаж шалгахдаа идэвхитэй эсэргүүцлийн хүчдэл хуваагчуудыг ашиглаж байгаа бол эдгээр нь хэлхээнд тодорхой хэмжээний ачаалал үүсгэдэг учраас хэлхээнээс салгалгүй үлдээх ёстой. Сайтар тохируулсан багтаамжид оруулга маягийн салбарлагыг туршилтын хүчдэл хуваагч болгон ашиглана.  **8.2.4.2 Импульсын хүчдлийн хэлбэр дүрсийн аналог бичлэг хийх**  a) Импульсын хүчдлийн дүрс хэлбэрийг тодорхойлох  Туршилтын хэлхээний үзүүлэлтүүдийг урьдчилан тохируулах явцад долгионы хэлбэр дүрсийг тодорхойлох зорилгоор хийгдсэн долгионы хэлбэр дүрсийн хувьд долгионы оргил утгыг хамруулсан дүрс дэлгэлт зайлшгүй хэрэгтэй бөгөөп энэ нь ерөнхийдөө 100 мкс -300 мкс хязгаарт байдаг. Td хугацааны 90%-аас дээшхи хугацааг зөвхөн тодорхойлоход ашиглагддаг долгионы сүүл хэсгийн бичлэгийг хийхэд дүрс дэлгэлтийн хугацааг 500 мкс – 1000 мкс хязгаарт байлгахыг зөвлөмж болгодог.  б) Туршилтын обьектод өгөгдөж байгаа импульсын хүчдлийн долгионы бичлэг хийх  Туршилтын долгионы амплитудыг тодорхойлох болон үүсч болох гэмтлийг илрүүлэх боломж олгохын тулд дүрс дэлгэлтийн хугацаа долгионы муруй анхны тэг утгаа дайрах хүрээг хамрахуйц хангалттай урт байх шаардлагатай. Энэ хугацаа нь Tz–ийн хүлээгдэж байгаа хугацаанаас урт буюу ихэвчлэн 1000 мкс- ээс 2000 мкс хэмжээнд байдаг. Онцгой тохиолдлуудад, 2000 мкс –ээс 3000 мкс-ын хэмжээний нэлээд урт дүрс дэлгэлтийн хугацаа шаардлагатай байдаг.  **8.2.4.3 Импульсын хүчдлийн хэлбэр дүрсийн тоон бичлэг хийх**  a) Импульсын хүчдлийн хэлбэр дүрсийг тодорхойлох  Боломжтой хамгийн их санах ой бүхий тоон хувиргуурыг ашиглан долгион эхэлснээс бүрэн замхарч дуусах хүртэлх нийт хугацааны туршид импульсын хүчдлийн хэлбэр дүрсүүдийн сорьцуудыг авах шаардлагатай. Тоон хувиргуурыг долгионы бодитой эхлэлийн цэгийг тодорхойлж чадахуйц сорьцуудын тохиромтой тоо үүсч байхаар программчлах нь чухал.  Коммутацийн импульсыг бичихийн тулд сорьцлох давтамж 10 МГц байхад тохиромжтой байдаг. 7.5.3-д дурдсан аянгын импульсын тоон бичлэгт тавигдах шаардлагууд коммутацийн импульсын бичлэгт тохирно.  Тоон хувиргууруудын оролтын өсгөгчүүдийн хамгийн их боломжит дэлгэцийн нягтралыг ашиглах нь чухал ач холбогдолтой. 50%-ын багасгасан хүчдлийн түвшинтэй импульсуудыг олон тоотой өгөх нь хүчдлийн оновчтой хязгаар болон бичигчийн суваг тус бүрийн хазайлтуудыг тодорхойлоход шаардагдана.  Тоон хувиргуурын оролтын өсгөгчүүд соронзон ханалтанд орсны улмаас хүчдэл ба гүйдлийн бичлэгүүд тасарч болзошгүй байдал болон трансформаторын зүрхэвчний соронзон ханалт зэрэгт онцгой анхаарал хандуулах шаардлагатай.  б) Туршилтын обьъктод өгөгдсөн импульсын хүчдлийн долгионы бичлэг хийх  Туршилтын долгионы амплитудыг тодорхойлох болон үүсч болох гэмтлийг илрүүлэх боломж олгохын тулд дүрс дэлгэлтийн хугацаа долгионы муруй анхны тэг утгаа дайрах хүрээг хамрахуйц хангалттай урт байх шаардлагатай. Энэ хугацаа нь Tz–ийн хүлээгдэж байгаа хугацаанаас урт буюу ихэвчлэн 1000 мкс- ээс 2000 мкс хэмжээнд, онцгой тохиолдлуудад 2000 мкс –ээс 3000 мкс байдаг.  **8.2.4.4 Импульсын гүйдлийн аналог ба тоон бичлэг хийх**  8.2.2 –д дурдсанчлан импульсын гүйдлийн бичлэгийг туршилтын үед үүссэн бяцхан цахилалтуудын дүрслэлийг гаргах боломж олох зорилгоор хийдэг. Энэ гүйдэл нь импульсын хүчдэл шууд өгөгдсөн, эсвэл хүчдэл нь туршилтын нормчлогдсон хүчдлийн түвшинд хүрэх ёстой ороомгуудын аль нь дээр нь ч хэмжигдсэн гэсэн гурван хэсгээс бүрдэнэ:  – лугшилт эхэлж байгаа багтаамжийн гүйдэл;  – туршилтын хүчдлийн сүүл хэсэгтэй давхцаж байгаа багаар буюу аажим өсөж буй нөлөөмж / индукц / -ийн гүйдэл ;  – ямарваа ханалттай давхцаж байгаа гүйдлийн оргил утга. Хэрвээ энэ нь соронзон ханалтын үзэгдлээс үүдэлтэй байгаа бол гүйдлийн оргил утгаа авах хугацаа хүчдлийн муруйн уналт, эсвэл бууралттай давхцах болно.  Ороомгийн ороодос хоорондын болон нэгээхэн хэсэгт аливаа богино залгааны гэмтэл үүсэх нь гүйдлийн эгшин зуурын оргил утгыг бий болгох боловч энэ үед соронзон урсгал хаагдсныг илтгэсэн хүчдлийн маш огцом уналт гарч ирдэг.  Импульсын гүйдлийн осциллограммууд болон тоон бичлэгүүдийн сорьцлох болон дүрс дэлгэлтийн хугацаануудыг хүчдлийн бичлэг хийх үеийнхтэй адилхнаар авах нь илүүд тооцогдоно.  **8.3 Реакторууд**  **8.3.1 Долгионы хэлбэр дүрсүүд**  Реакторын ороомгууд нь ферро-соронзон битүү хэлхээ үүсгэдэггүй учраас долгионы сүүл хэсэгтээ ямарваа соронзон ханалтын нөлөөлөлгүй замхарсан косинуслаг долгионы хэлбэр дүрсийг гарган авах боломжтой. Долгионы хэлбэр дүрс нь үндсэндээ реакторын нөлөөмж/ индукц/-ийн эсэргүүцэл болон импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн багтаамж, түүнчлэн замхралын коэффициент зэргээр тодорхойлогддог давтамжаар илэрхийлэгддэг. Гэхдээ практик дээр реакторын долгионы хэлбэр дүрсүүдийг T1, Td болон Tz гэсэн трансформаторт хэрэглэгддэг хугацаануудаар нормчилдог (зураг 3б ба Б.16-ыг үз).  Нүүрний долгионы бодит урт нь трансформатортой нэгэн адил ороомгийн идэвхитэй багтаамж, нэмэлт ачаалалын багтаамж болон цуваа эсэргүүцлийн хэмжээгээр үндсэндээ тодорхойлогдоно. Энэ нь туршигдаж байгаа ороомгийн дагуух долгионы ойролцоолсон жигд тархалтыг хангаж байхуйц аль болохоор урт байх ёстой. T1-ын ихээхэн утгуудад замхралын коэффициентын өндөр утгууд харгалзах бөгөөд ингэснээр Tz хугацааг харьцангуй богино болгодог. T1-ын бага утгуудад Td богиносох бөгөөд эсрэг туйлтай хүчдлийн оргил утга нь туршилтын хүчдлийн түвшингийн 75%-д дөхөж ирснээр фаз-фазын хооронд болон фаз- газар хооронд ниргэлэг болох эрсдлийг бий болгодог талтай. Эдгээр нөхцөл байдлуудын улмаас трансформаторт үүсэх тохиолдолтой нэгэн адилаар эсрэг туйлтай оргил утгын дээд хэмжээг аюулгүй түвшинд хязгаарлан барихын тулд туршилтын хүчдлийн 50%-аас хэтрүүлэхгүй байлгаж энэ үед харгалзах T1, Td болон Tz-ын утгуудыг гаргаж авах хэрэгтэй.  Ер нь бол Td ≥ 200 мкс байх трансформаторын үзүүлэлт нь бага чадлын реакторуудад (<100 MВар-аас бага чадалтай, харьцангуй өндөр бүрэн эсэргүүцэл бүхий гурван фазын реакторуудын хувьд) хүндрэлгүйгээр тохирно. Харин их чадлын реакторуудын хувьд трансформаторт зориулагдан нормчлогдсон Td болон Tz–ын утгуудыг хангахын тулд импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн чадлын эрс нэмэгдүүлэхийг шаарддаг. Ийм тохиолдолд, таарсан хүчдэл-хугацааны градиент /өөрчлөлт/-ыг гаргаж авахын тулд Td болон Tz–ын хамгийн бага утгууд нь харгалзан 120 мкс ба 500 мкс байх ёстой.  **8.3.2 Оруулга-үзүүрүүдын холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх боломжит аргууд**  **8.3.2.1 Оруулга-үзүүрүүдийн холболтууд**  Реакторын фаз бүрт зөвхөн нэг ороомог харгалзах учраас турших гэж байгаа фазын ороомгийн шугамын оруулга нь туршилтын хүчдлийг өгөх цэг болдог. Фазын энэ ороомгийн нөгөө үзүүрийг газардуулсан байх ёстой.  Гурван фазын реакторуудын хувьд, зураг 4- д заасан фазуудын хоорондох хүчдэл нь фаз-нейтраль /саармаг цэг/-ийн хоорондох хүчлээс 1.5 дахин их байх шаардлага биелэгдэхгүй. Эдгээр реакторуудаар гүйх соронзон урсгал нь зүрхэвчний туршигдаагүй байгаа босоо шилбэ/ стержень/-нүүдээр урсахгүй. Иймд, импульсын хүчдлийн хэвийн туршилтын журам дараалал нь аянгын импульсын туршилтуудынхтай адилхан байхыг шаардана.  **8.3.2.2 Гэмтэл илрүүлэх аргууд**  Гэмтэл илрүүлэхэд трансформатортай адилаар ерөнхийдөө зөвхөн туршилтын хүчдлийн хэмжилт хангалттай боловч туршигдаж байгаа ороомгоор дамжин газардаж байгаа гүйдллийг ашиглах хэрэгтэй.  **8.3.3 Tуршилтын журам дараалал**  Зүрхэвчний соронзон ханалтын үзэгдэл нэгэнт үүсдэггүй учраас реакторуудыг турших журам дараалалууд нь аянгын импульсын туршилтын үеийнхтэй адилхан байх ба дараах зүйлсээс бүрдэнэ. Үүнд:  – Импульсын хүчдлийн хэлбэр дүрсийг тодорхойлох;  – Багасгасан туршилтын хүчдлийн нэг сөрөг туйлтай импульс өгөх;  – Урьдчилсан соронзлол хийхгүйгээр коммутацийн импульс тэсвэрлэх хүчдлээр гурван сөрөг туйлтай импульс өгөх.  **8.3.4 Импульсын хүчдлийн хэлбэр дүрс ба импульсын гүйдлийн аналог болон тоон бичлэгүүдийг хийх**  8.3.1-д тайлбарласан долгионы хэлбэр дүрсүүдийн ялгаануудыг үндэслэн реакторууд дээрх хүчдэл ба гүйдлийг бичихэд баримтлах ерөнхий зарчмууд нь трансформаторынхтай адилхан байна. Гэхдээ туршилтын хүчдлийн долгионы муруйн хоёрдахь хагас үеийг багтаасан хүчдэл ба гүйдлийн дүрс дэлгэлтийн хугацаануудыг ашиглахыг зөвөлөмж болгож байна.  Түүнчлэн, анхдагч багтаамжийн гүйдлийн байгуулагчийг нэлээд нарийвчлан хянах боломжтой болгохын тулд гүйдлийн бичлэгийг хийхдээ богиновтор дүрс дэлгэлтийн хугацааг ашиглах нь давуу талтай байх болно. Хүчдлийн косинуслаг долгионд харгалзах гүйдлийн үндсэн долгионы хэлбэр нь синуслэг байна (зураг 3б ба Б.16- ааг үз).\*  **9. Осциллограммууд ба тоон бичлэгүүдийг тайлж унших**  Туршилтын үр дүнгүүдийг шүүн тунгааж дүгнэх үндсэн арга бол тухайн туршилтын өгөгдсөн дараалалын дагуу олж авсан туршилтын өгөгдлүүд болох долгионы хэлбэр дүрсүүдийг хооронд нь харьцуулах явдал юм. Ерөнхийдөө хэлбэл, нэг ижил сувгаас, туршилтын нэг ижил нөхцөлд, нэг ижил тогтмол үзүүлэлтүүд бүхий туршилтын хэлхээ ашиглан бичигдсэн долгионы муруйн дүрсүүд шугаман бус төхөөрөмжүүдгүй тохиолдолд нэгэн ижил байх ёстой. Бүрс бичлэгийн нэг ижил түвшинг бий болгохын тулд туршилтын хүчдлийн өөр өөр түвшингүүдийг тохирсон долгион сулруулалтууд хийх замаар тэгшитгэнэ.  Хавсралт Б-д гэмтэлтэй болон гэмтэлгүй нөхцлүүдийг үзүүлсэн реактор ба трансформаторуудын бодит туршилтуудын үед хийгдсэн олон тооны осциллограмууд болон тоон бичлэгүүдийг оруулсан болно. Гэхдээ төхөөрөмжийн тухайн хийц бүрт үүсэх гэмтлүүд хоорондоо ялгаатай учраас өөр өөр төхөөрөмжүүд дээрх долгионы хэлбэр дүрсийн ижил төстэй хэв гажилтуудыг нэг ижил шалтгааанаар үүссэн гэж заавал авч үзэх шаардлагагүй гэдгийг онцлон тэмдэглэх хэрэгтэй.  **9.1 Аянгын долгион**  **9.1.1 Ерөнхий зүйл**  Осциллограммууд болон тоон бичлэгүүдийг тайлж унших нь туршилтын хэвийн болон багасгасан хүчдлүүдийн үед хийгдсэн хүчдэл ба гүйдлийн бичлэгүүдийг, эсвэл дан ганц туршилтын хэвийн хүчдлийн үед хийгдсэн шаардлага хангасан бичлэгүүдийг хооронд нь харьцуулах явдал дээр үндэслэнэ. Энэ нь ур чадвар шаардсан ажил бөгөөд туршилтын явцад олон тооны зайлшгүй саад тотгор үүсгэх эх үүсвэрүүд нөлөөлдөг учраас хэдийгээр хангалттай туршлагатай байсан ч гэсэн бичлэгүүдэд үүсч байгаа дүрс гажилтуудын талаар шийдвэр гаргахад хүндрэлтэй байдаг. Иймд бичлэгт үүссэн дүрсийн ямарваа хэв гажилт болон зөрүүтэй байдлыг анхааралдаа авч, судалж шийдвэрлэх ёстой.  Хэв гажилтуудыг шинжлэн судлахын тулд юуны өмнө туршилтын ба хэмжүүрийн хэлхээнүүдэд болон газардуулгын аргуудаас шуугиан саатал үүсэхгүй байгааг нягталж шалгахыг зөвлөмж болгодог. Хэрэв шуугиан /помех / саатал үүсгэгч эх үүсвэр нь туршилтын хэлхээнд байгаа бол түүнийг арилгах бүхий л арга хэмжээг авч, ядаж нөлөөлөлийг нь хамгийн бага байлгах ёстой. Олон шатлалтай импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн шат бүрийн цахилалт болох хугацаа харилцан адилгүй байдгаас болж өндөр давтамжтай анхдагч хэлбэлзлэлүүд (үндсэн давтамжийг өөрчлөхгүйгээр) бүхий гүйдлийн бичлэгүүд дээр амплитуд утганд ялимгүй ихсэлт үүсч болохыг санаж байх хэрэгтэй. Зураг Б.13-ыг үз. Гэхдээ ихэнх тохиолдолд энэ өрчлөлт нь туршилтын өгөгдсөн хүчдлийн нүүрний долгионы уртын 50%-д харгалзах хугацаагаар хязгаарлагддаг.  Заримдаа олон тооны зэрэгцээ шатлалтай ажиллагаа бүхий импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн цахилалтын хэлхээнүүд нь ниргэх хугацааны хувьд таарч тохироогүйгээс үүдэлтэй туршилтын импульсын оргил утгын дараа долгионы хэв гажилт үүсэх явдал байдаг. Энэ нь импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн цуваа ба зэрэгцээ оч үүсгэх завсруудыг шинээр тохируулахыг шаарддаг.  Дараагийн ээлжинд, соронзон зүрхэвчний газардуулга болон туршилтын объектын дотор байгаа ямарваа шугаман бус элементүүдээс үүдэлтэй долгионы шуугиан- саатлын голомтууд байгаа эсэхийг нягтлан шалгах хэрэгтэй. Оч үүсгэх завсаргүй, шугам бус эсэргүүцлүүд нь хүчдлийн түвшинг ихэсгэх бодитой аажим өсөлт буюу өөрчлөлтийг үүсгэх боломжтой (зураг Б.12-ыг үз).  Хэв гажилтын дээр тайлбарласан эх үүсвэрүүдийн арилгааад байхад туршилтын хэлхээнд эсвэл туршигдаж байгаа объектын дотор байгаа шугаман бус эсэргүүцлүүдэд үүсссэн нь нотлогдохгүй долгионы хэлбэр дүрсийн өөрчлөлт – зөрөөнүүд туршилтын хэвийн ба багасгасан хүчдлийн үед хийгдсэн хүчдэл болон гүйдлийн бичлэгүүдийн хооронд болон туршилтын хэвийн хүчдлийн утганд амжилттай хийгдсэн бичлэгүүдийн хооронд гарч байгаа бол эдгээр нь туршилтын улмаас тусгаарлага гэмтсэний нотолгоо болно.  **9.1.2 Хүчдлийн бичлэгүүд - Бүрэн долгионы туршилтууд**  Туршилтын өгөгдсөн хүчдлийн осциллограммудд ба тоон бичлэгүүд нь гэмтлийг илрүүлэх харьцангүй мэдрэмж муутай хэрэгслүүд болно. Иймээс илрүүлэх боломжтой хэв гажилтууд нь туршилтын хэлхээн дэх болон тусгаарлага дахь ихэнх гэмтлийг харуулна.  – Хугацааны няграл хангалттай өндөр байх үед хэв гажилтуудын нэлээд нарийвчилсан дүн шинжилгээг хийх боломжтой.  – Туршигдаж байгаа оруулгын ойролцоо шууд газардлага үүсэх гэмтэл нь хүчдлийн долгионы огцом болон бүрэн уналтаараар илэрнэ. Туршигдаж байгаа ороомгийн дундуур аажим гэхдээ бүтэн ниргэлэг /перекрытие/ болсон нь хүчдлийн бага зэргийн алгуур уналт, ихэнхдээ шаталсан байдлаар явагдаснаар илэрнэ (зураг Б.1-ийг үз).  – Ороомгийн нэг хэсэг дундуур ниргэлэг болоход ороомгийн бүрэн эсэргүүцэл багасан бөгөөд энэ нь импульсын амплитуд 50%-ийн утгаа авах хугацаа буюу долгионы урт богиносноор илэрнэ. Түүнчлэн, ниргэлэг болох тэр агшинд хүчдлийн долгион дээр илт тодорхой хэлбэлзлэлүүд үүсэх болно (зураг Б.1 - Б.5-ыг үз).  – Ороодос хоорондын болон ороомог хоорондын тусгаарлага нэвт цохигдох зэрэг цар хүрээ багатай гэмтлүүд нь хүчдлийн бичлэгүүд дээр ихэнхдээ танигдах боломжгүй боловч заримдаа өндөр давтамжтай хэлбэлзлэлүүд байдлаар илрэх талтай. Эдгээр гэмтлүүдийг ихэвчлэн гүйдлийн бичлэгүүдээс илрүүлэх боломжтой. Зураг Б.6-г үз.  Түүнчлэн, туршигдаж байгаа оруулга дээр болон түүний ойролцоо дөнгөж шинээр үүсч байгаа гэмтлүүд нь осциллограммуд ба тоон бичлэгүүдэд зөвхөн бага зэргийн өөрчлөлтөөр илрнэ.  Дээр дурдсан гэмтлүүд индукцлэгдсэн хүчдлийн бичлэгүүдээр мөн илрэх боломжтой. Энэ үед хийгдсэн хэмжилтийн мэдрэх чадвар нь туршилтын өгөгдсөн хүчдлийн үед хийгдснээс өндөр байдаг.  **9.1.3 Гүйдлийн бичлэгүүд – Бүрэн долгионы туршилтууд**  ИМпульсын гүйдлийн осциллограммуд болон тоон бичлэгүүд нь гэмтэл илрүүлэх хамгийн өндөр мэдрэмжтэй арга хэрэгслүүд болдог. Гэхдээ мэдрэмжтэй гэдэг нь гэмтэлтэй шууд холбогдоогүй олон тооны нөлөөлөл- эффектүүдийг харуулсан бичлэгүүдийг гаргаж авах боломжийг олгодгоор тайлбарлагдана. Зарим боломжуудийг 9.1-д дурдсан бөгөөд эдгээр нь гүйдлийн долгионы дүрсийн нүүрний долгионы хэсэгт өөрчлөлт гарах болон осциллограммуд дээр маш тогтворгүй тэсрэлттэй үсрэлтүүд үүссэн зэргийг харуулж чадах учраас эдгээрийг нягтлан судлах ёстой.  Гуйдлийн бичлэгүүд дээрх амплитудын ба давтамжийн зэрэг ихэнх өөрчлөлтүүд нь үндсэндээ туршигдаж байгаа ороомгийн дотор хэсэгчилсэн ниргэлэг, ороомгуудын хооронд болон ороомгууд газрын хооронд нэвт цохилт болсныг илтгэнэ (зураг Б.1-ийг үз). Эдгээр өөрчлөлтийн хэлбэр нь хэрэглэж байгаа гэмтэл илрүүлэх аргаас хамаарч өөр өөр байна.  Гүйдлийн утгууд ихэсч болон багасч болох ба өөрчлөлтийн чиг хандлага нь гэмтэл илрүүлэх аргатайгаа холбоотойгоор гэмтлийн байрлал хийгээд шинж чанарын талаар баримжаа зөвлөмж өгч чадна (зураг Б.3-ыг үз).  Саармаг цэгийн гүйдлийн нэмэгдсэн амплитудтай давтамжийн өөрчлөлттэй хосолсон илэрхий ихсэлт нь туршигдаж байгаа ороомгийн дотор гэмтэл үүссэнийг заадаг бол харин багасалт нь гэмтэл туршигдаж байгаа ороомгоос зэргэлдээ ороомог руу, эсвэл газар руу ниргэлэг байдлаар үүссэнийг харуулна. Түүнчлэн, энэ үед гүйдлийн үндсэн давтамж өөрчлөгдөх болон амплитуд нь буурах явдал ажиглагдана.  Туршигдаж байгаа ороомгоос зэргэлдээх ороомог руугаа ниргэсэн гэмтэл нь нэг ижил туйлтай байх үед амплитуд нь эгшин зуур өөрчлөгдөх болон үндсэн давтамжид өөрчлөлт гарах зэргээр илэрнэ.  2 мкс- 3 мкс хугацаанд тархах бага зэргийн, хэсэгчилсэн, олон шүдтэй шуугиан саатлууд нь ороодос хоорондын болон ороомгийн катушка хоорондын, мөн катушкийн холболтууд хоорондын тусгаарлагад хэсэгчилсэн нэвт цохилт буюу хүчтэй цахилалт болсныг илтгэх боломжтой. Гүйгч долгионы шинж чанарыг гол төлөв үзүүлдэг бага хэмжээний цуваа холбогдсон багтаамж элементийн хувьд багтаамжийн саармаг цэг дээр ирж байгаа болон гүйгч долгионы шуугиан саатлын хоорондох хугацааны зөрүүг үнэлэх замаар шуугиан саатлыг эх үүсвэрийг олж таних боломжтой.  **9.1.4 Хүчдэл ба гүйдлийн бичлэгүүд – Хэрчигдсэн долгионы туршилтууд**  Хэрчилт хийгдэх агшинууд нэгэн зэрэг байж чадахгүй бол хэрчилтийн дараах хэрчигдсэн долгионы бичлэгүүдийг ихэвчлэн харьцуулах боломжгүй байдаг. Хоорондоо гарцаагүй ижилхэн биш хэдий ч төсөөтэй хэрчилтийн агшингуудыг хэрчилт хийх удирдлагатай оч үүсгэх завсруудыг хэрэглэн гаргаж авч болно (зураг Б.10-ыг үз). Зарим трансформаторуудын хувьд, хэрчилтын агшингийн бага зэргийн зөрүүнүүд нь хэрчилтийн дараах хэлбэлзлэлүүдийн жишиг загвар дээрх тэмдэглэгдсэн зөрөөнүүдийг ихэсгэх (энэ жишиг загвар нь аянгын долгионы жинхэнэ \оргиналь\ болон хэрчигдсэн долгионы нүүрний хэсгийн улмаас үүсэх шилжилтийн процессийн давхцалын загвар болдог) бөгөөд эдгээр зөрөөнүүд нь хэвийн амжилттай туршилтын болон гэмтэлтэй байх үеийн туршилтын бичлэгүүдийг харьцуулах ажлыг будилуулж болзошгүй (зураг Б.11-ийг үз).  Тоон бичлэгийн техник ашиглаж байгаа үед Зүйл 10-д тайлбарласан хувиргалтын функцийн анализ \шинжилгээ\ ашиглах нь энэ андуурал будлианыг арилгахад дөхөмтэй болно (зураг Б.17-г үз).  Долгионыг хэрчигдсний дараах хүчдэл ба гүйдлийн бичлэгүүд дээрх давтамжийн аливаа өөрчлөлтийг судалж үзэх ёстой. Эдгээр өөрчлөлтүүд нь нэг бол лабораторийн газардуулгын буцах хүрээнд ниргэлэг болсон, эсвэл туршигдаж байгаа объектын дотор талд гэмтэл үүссэн зэргээс шалтгаалсан байж болно.  Хэрчигдсэн долгионоор туршилт явуулж байх үед хүчдлийн бичлэг хэдийгээр хэрчигдсэн долгионыг үзүүлж байвч хэрчилт хийх оч үүсгэр завсар ажиллахгүй байх, эсвэл тоноглолын ямарваа гадна хэсэгт ниргэлэг \перекрытие\ болох зэрэг нь туршигдаж байгаа объектын дотор, эсвэл туршилтын хэлхээнд гэмтэл байгааг тодорхой илтгэнэ.  Хүчдлийн нэг түвшингээс нөгөөд шилжиж турших үед долгион хэрчих хугацааг бодитойгоор ижилхэн байлгадаг тул тухайн туршилтын явцад үүссэн гэмтлүүд нь хэрчилтийн дараах хэлбэлзлэлүүд дэх зөрөөгөөр хүчдэл ба гүйдлийн аль алиных нь бичлэгүүд дээрээс илрэх боломжтой. Зураг Б.8 болон Б.9-ийг үз. Гэхдээ гэмтэл долгион хэрчигдэх агшнаас өмнө үүсэх тохиолдол байдаг тул ийм үед бүрэн долгионоор турших үеийн анхаарах шаардлагатай зүйлсийг мөн адил тооцох хэрэгтэй (зураг Б.2 болон Б.7-г үз).  **9.2 Коммутацийн импульс**  **9.2.1 Хүчдлийн бичлэгүүд**  Коммутацийн импульсын туршилтуудад ороомгийн дагуух хүчдлийн тархалтыг жигд байлгах ба гэмтэл ихэнхдээ тусгаарлага ихээхэн хуучирсантай холбоотойгоор секц хоорондын, ороомгийн хэсгүүд хоорондын, бүр ороодос хоорондын, эсвэл газардлагатай богино залгаа хэлбэрээр үүснэ. Гэмтлийн эдгээр төрлүүд нь долгион бүрэн унах, эсвэл сүүл хэсэг нь богиносох, заримдаа долгионы дүрс түр зуур доошлох зэргээр хүчдлийн долгионы илэрхий өөрчлөлтийг үүсгэнэ. Ийм болохоор коммутацийн импульсын туршилтын үеийн хүчдлийн бичлэгүүд нь ихэнх гэмтлүүдийг илрүүлэх хангалттай мэдрэмжтэй арга хэрэгслүүд болдог (зураг Б.15-ыг үз).  Трансформаторын хувьд, ороомгийн хэсгийн ямарваа гэмтэл согог (ороодос хоорондын гэмтэл, диск хоорондын тусгаарлагын нэвт цохилт, эсвэл хүчдэл тохируулгын ороомгууд дахь тусгаарлагын нэвт цохилт) соронзон урсгалыг хаадаг тул хүчдэл ба гүйдлийн бичлэгүүдээр амархан илэрдэг.  Агаарын завсар бүхий зүрхэвчтэй реакторуудын хувьд, фаз тус бүртээ зөвхөн нэг ороомогтой, битүү биш соронзон хүрээтэй байдаг учраас ороодос хоорондын богино залгааны гэмтлийг илрүүлэхэд туйлын бэрх бөгөөд бараг илрэхгүй үлддэг талтай. Иймд газар руу урсаж байгаа багтаамжийн гүйдлийн өндөр нягтрал, эсвэл хоёрдахь гүйдэл (эх бие- гэрний гүйдэл) нэмэр болж чадна. Энэ тохиолдлуудад, оргил утга хүртэлх болон туршилтын өгөгдсөн хүчдлийн косинуслаг долгионы эсрэг туйл хүртэлх хугацааг хамарсан өндөр нягтралтай бичлэгийг зөвлөмж болгодог.  Трансформаторын туршилтын үед долгионы сүүл хэсгийн ямар нэгэн богиносолт нь амжилттай хийгдсэн туршилтууд дахь зүрхэвчний соронзлолын эхний төлөвүүдийн ялгаатай байдлаар бий болсон долгионы сүүл хэсгийн уртад гарсан өөрчлөлтүүдээс ихэвчлэн илт ялггагдахуйц байдаг ба хэдийгээр эхний төлөвүүд нь хоорондоо нэлээд ойрхон нягт байдаг ч гэмтэлтэй болон гэмтэлгүй нөхцлүүдийг ялгахад хялбар болдог.  **9.2.2 Импульсын гүйдлийн бичлэгүүд**  Трансформаторуудын хувьд гүйдлийн бичлэгийн долгионы ерөнхий дүрс хэлбэрийг 8.2.4.4-д, реакторуудын хувьд 8.3.4-д тус тус тайлбарласан болно. Долгионы эхлэл дээр, эсвэл трансформаторын тухайд зүрхэвчний соронзон ханалтын орчмоос бусад долгионы хэсэгт хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрс гажих яг тэр агшинд үүсч байгаа гүйдлийн огцом өөрчлөлтүүд нь гэмтэл гарсныг илтгэнэ. Гэмтлүүдийн үндсэн шинж чанарыг олж мэдэхэд гүйдлийн бичлэгүүд нь хүчдлийн бичлэгүүдийн адил мэдрэмжтэй хэмжигдэхүүн болдог.  **10. Хувиргалтын функцийн шинжилгээ / анализ/ бүхий тоон боловсруулалт**  Аянгын импульсын болон коммутацийн импульсын туршилтуудад тоон бичлэгийн техникийг хэрэглэх болсноор орчин үед гэмтлийн шинжилгээг явуулах нэмэлт арга хэрэгслүүдийг ашиглах боломжтой болсон.  Хувиргалтын функцийн шинжилгээнд туршилтын өгөгдсөн хүчдэл U(t) ба түүнд харгалзах трансформаторын саармаг цэг дээрхи, эсвэл газартай богино холбогдсон туршигдаагүй ороомог дээрх (багтаамжаар дамжих гүйдэл) импульсын гүйдлийн бодит хугацааны бичлэгүүд нь Фурьен сайжруулсан хувиргалтын (FFT-Fast Fourier Transformation) алгоритмуудаар харгалзан U(ω) болон I(ω) гэсэн давтамжийн мужлалууд (домен)-ад хувирч чаддаг.  Энэ үед хүчдэл ба гүйдлийн (U(ω) ба I(ω) гэсэн спектрүүд нь дараах байдлаар математик боловсруулалтанд орно:  a) хувиргалтын дамжууламжийн функцийг үүсгэхийн тулд I(ω)/U(ω) харьцаагаар, эсвэл  б) хувиргалтын бүрэн эсэргүүцлийн функцийг үүсгэхийн тулд ω)/I(ω) харьцаагаар  Трансформаторын идэвхигүй сүлжээний хувьд, дамжууламжийн болон эсэргүүцлийн функцүүд аль аль нь давтамжийн мужлал дахь үл хамаарах үзүүлэлт /характеристик/-ийн функц мэтээр тооцогдох ба эдгээр нь долгионы хэлбэр дүрсээс үл хамаардаг байх ёстой.  Гэхдээ, хүчдлийн спектр U(ω) ямарваа тэг цэгийг үзүүлэхгүй учраас I(ω)/U(ω) гэсэн дамжууламжийн хувиргалтын функцийг хувиргалтын функцийн шинжилгээнд аль болохоор илүү ашиглана..  Иймэрхүү хувиргалтын функцийн жишээг зураг Б.17-д өгсөн болно.  Дөрвөн туйлтын онолоор 1) дамжууламжийн функцид харгалзах гэмтлийн шинж тэмдэгүүдийг дараах байдлаар гаргаж авдаг:  1) Дамжууламжийн функцид туйлуудын ямарваа илэрхий шилжилт үүссэн байвал ороомгийн тусгаарлаганд хэсэгчилсэн нэвт цохилт болсныг илтгэнэ.  2) Туйлууд ямар нэгэн байдлаар тэгширч шулуутгагдсан байвал тусгаарлаганд бяцхан цахилалт үүссэн гэсэн үг.  1) Дөрвөн туйлтын онол нь хугацаа ба давтамжийн мужлал дахь шугаман цахилгаан хэлхээний оролт ба гаралтын тоон хэмжигдэхүүнүүдийн хоородох хамаарлыг тайлбарладаг математик арга хэрэгсэл болно.  Гэхдээ туршилтын өгөгдсөн хүчдэл болон импульсын гүйдэлд гарсан өөрчлөлтүүд нь хувиргалтын дамжууламжийн функцид өөрчлөлт үзүүлэхгүй бөгөөд туршигдаж байгаа обьектын хүндрэл согогоос илүүтэйгээр туршилтын хэлхээний хүндрэл согогийн илтгэнэ.  Ингэснээр тоноглолын дотоод ба гадаад тусгаарлагын гэмтлүүдийг хооронд нь ялгах арга хэрэгсэл болдог. Энэхүү арга техник нь бүх тохиолдлуудад бүрэн баталгаажиж нотлогдоогүй учраас өнөөдрийн байдлаар туршилтын үр дүнгүүдийг тайлан унших нэмэлт арга хэрэгсэл болгохыг зөвхөн зөвлөмж болгодог.  Туршилтын үр дүнгүүдийг эцэслэн хүлээж авах ажиллагаа нь 7.5-д заасан долгионы хэлбэр дүрсүүдийг харьцуулах явдал дээр үндэслэгддэг.  Тоон хувиргууруудыг аянгын импульсын тодорхой туршилтуудад 1980-аад оноос хойш ашиглаж байна. Гэвч хувиргалтын функцийн шинжилгээг ашигласан туршлага болон холбогдох ном зохиолууд нь олон жилийн турш зөрчил маргаантай явсаар ирсэн. Эдгээр зөрчил маргаанууд нь хэд хэдэн шалтгаантай байдаг. Тухайлбал:  a) трансформаторууд нь тухайлсан аянгын долгионы туршилтын хэлхээнүүдэд дөрвөн  туйлтын онолыг бүрэн хэрэглэхүйц нэгдсэн шугаман хэлхээний элемент байдлаар илэрхийлэгдэж чаддаггүй;  б) тоон хувиргуурууд нь туршилтын сигналаас ирж байгаа шуугианыг шүүх стандарт бус шүүлтүүр /фильтр/ дотроо угсарсан байдгаас болж:  – эхлэлийн шатандаа байгаа гэмтлийн шинж тэмдгүүд шүүгдэж арилах болон танигдахгүй байх;  – дамжууламжийн функцийн долгионы хэлбэр дүрсийн үл хамаарах байдалд нөлөөлөх;  в) гэмтлийн янз бүрийн нөхцлүүд дэх үр дүнгийн хазайлтуудын сайн/ муу байх шалгуурууд нь хангалттай түвшинд хараахан тогтоогдоогүй.  Энэ шинэ технологи нь ирээдүйд маш хүнд богино залгаануудын дараа тусгаарлагын болон механик гэмтэл согогуудыг ашиглалтын явцад нь /он-лайн/ хянахад ашиглагддаг нэлээд хүчирхэг арга хэрэгсэл болох нь тодорхой.  Бодит хугацааны болон хувиргалтын функцийн шинжилгээний цөөн тооны жишээ бичлэгүүдийг доор үзүүлэв.  **Тохиолдол 1: Тоон үнэлгээ хийгдсэн стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсийн жишээ бичлэгүүд**  – 19%-ын амплитудын хэтрэлттэй, 1,44/46 мкс-ын стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсийг ОУЦТК 60060-1–ын дагуу сүүл хэсэгт нь шүргэгчээр татсан шулууныг ашиглан үнэлсэн. Зураг Б.18-ыг үз. Энд тоон хувиргууруудад суулгасан муруйг тэгшитгэн шулуутгах үл танигдах алгоритмуудаас болж амплитуд утгыг үнэлэх явцад 10%-аас их алдаа гарсан байх талтай.  – 0.5 МГц-ээс бага давтамжтай, амплитудын 50%-иас утгатай их нэмэгдсэн хэлбэлзлэлүүд бүхий 2,48/50 мкс-ын стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүд, зураг Б.19-ийг үз. Энд ОУЦТК 60060-1–ын дагуу хийсэн үнэлгээгээр 50%-ын амплитуд утгаа авах хугацааг 50 мкс гэж үзүүлсэн байдаг бол тоон хувиргуур нэмэгдсэн хэлбэлзлэлийн анхны тэг утгаа дайрах хугацаанд тулгуурлан хийсэн үнэлгээгээр энэ хугацаа 5 мкс гарсан байна.  – Олон үет ороомог дээрх стандарт бус хэрчигдсэн долгион, зураг Б.20-ийг үз. Энд ороомгийн үеүүдийн бүрэн эсэргүүцэл газардаж байгаа хэрчигдсэн долгионы тэг утгийг ойролцоох хэлбэлзлэлүүд болон огцом уналтыг арилгаж / зайлуулж/ чадсан байна. (Зураг Б.8-Б.11 дэх тоон бичлэгүүд болон осциллограммуудыг зураг Б.20-той харьцуул.)  – Зураг Б.21–д дэх жишээнд янз бүрийн загвар / брэнд/-ын тоон хувиргууруудаар хийсэн яг ижил бичлэгүүдийг харьцуулсан ба амплитуд нь 7% -иар (109,9 кВ ба 102,3 кВ), долгионы нүүрний урт- T1 үзүүлэлт нь 9%-иар (2,55 мкс ба 2,34 мкс) тус тус зөрүүтэй байгааг тогтоосон байна.  Долгионы урт-T2 үзүүлэлтийн зөрүүг тайлбарлах боломжгүй. Харин зэрэгцээ холбогдсон оргил утгын тохируулагдсан вольтметрын заалт 110 кВ байжээ.  **Тохиолдол 2: Туршилтын хэлхээний гэмтэл согогоос үүссэн хариу үйлдлүүд**  – Хэмжилтын кабелиас газар руу очит цахилалтын ниргэлэг явагдснаас үүдэлтэй туршилтын хэлхээний гэмтлийг зураг Б.22 а-аас үз. Багасгасан түвшинтэй бүрэн долгионоор хийсэн туршилттай харьцуулж үзэхэд:  a) хүчдлийн муруйд гэмтэл илрээгүй;  б) гүйдлийн муруйд гэмтэл тод илэрсэн;  в) хувиргалтын функцийн шинжилгээгээр гэмтэл тод илэрсэн зэрэг нь тогтоогдсон бөгөөд нам хүчдлийн ороомгийн газартай харьцангуй багтаамжаар дамжсан гүйдэл импульсын үүсгүүрийн газардуулга болон эх бие-гэрнээс өөр газраар цахилсан байна.  – Хувиргалтын функцэд туйлууд тэгширч шулуутгагдсан боловч давтамж өөрчлөгдөөгүй байгаа нь цахилалтууд болсныг илтгэнэ.  – Хэмжилтийн кабелийн гэмтлийг арилгасны дараа импульсын туршилтыг давтан явуулсан ба зураг Б.22б нь багасгасан ба бүрэн долгионы импульсын туршилтуудын хувиргалтын функцүүд хоорондоо маш сайн тохирч байгааг харуулав.  **Тохиолдол 3: Туршилтын объектын гэмтлээс үүссэн хариу үйлдлүүд**  – Хүчдэл тохируулгын салбарлагуудын хооронд болсон ниргэлэг/ перекрытие/-ээс үүссэн гэмтлийн тоон бичлэгийг зураг Б.23a–д үзүүлэв. Бүрэн долгионы импульсын хүчдэл ба гүйдлийн бодит хугацааны бичлэгүүд болон хувиргалтын функц зэрэг нь багасгасан түвшинтэй бүрэн долгионы импульсын туршилттай харьцуулахад илэрхий өөрчлөлтүүд гарсныг харуулж байна.  – Ойролцоолсон болон нарийн хүчдэл тохируулгын ороомгийн хоорондох гэмтлийн тоон бичлэгийг зураг Б.23б-аас үз. Илэрхий өөрчлөлтүүд бүх бодит хугацааны болон хувиргалтын функцийн бичлэгүүд дээр гарсан байна.  Өмнө үзүүлсэн бүх бичлэгүүдээс харахад бүх гэмтэл согогууд бодит хугацааны бичлэгүүдээр мөн тогтоогдон илэрч байна.  **11. Импульсын туршилтын тайлангууд**  Туршилтын объект дээр хийгдсэн импульсын туршилтуудын тайланд наад зах нь дараах мэдээлэлүүдийг багтаах ёстой.  a) Ерөнхий мэдээлэлүүд:  – туршигдаж байгаа тоноглолын төрөл, хэвийн чадал ба хүчдэл;  – серийн дугаар;  – туршилт хийгдсэн хүчдэл тохируулгын байрлал;  – туршилт явуулсан газар ба огноо;  – үйлдвэрлэгчийн туршилтын инженер;  – худалдан авагчийн гэрчлэгч инженер;  – тоноглолыг туршсан стандарт;  – туршилтын хэвийн /нормчилсон/ түвштнгүүд ба долгионы дүрс хэлбэрүүд.  б) Оруулга тус бүр дээр хийгдсэн импульсын туршилтыг харуулсан хүснэгтүүд:  – туршилтын долгионуудын төрөл ба амдлитудын хэмжээ;  – багана-мөрөөр амархан олох ба танихад зориулсан бичлэгүүдийн дугаар;  – аянгын импульсын, хэрчигдсэн ба бүрэн долгионуудын болон коммутацийн импульсын туршилтын хүчдлийн бодит утга;  – импульсын үүсгүүрийн тохируулгын бодит үзүүлэлтүүд / параметрүүд/ (дотоод ба гадаад);  – Аянгын импульсын (T1, T2, Tc) болон коммутацийн импульсын (T1, Td, Tz) долгионы хэлбэр дүрсийн бодит үзүүлэлтүүд;  – оруулгын тэмдэглээ  – аль оруулганд туршилтын импульс өгөгдсөн;  – туршиж байгаа фазын туршигдаагүй оруулгуудыг болон туршигдаагүй фазуудыг газардуулсан байдал, газардуулгын идэвхитэй ба бүрэн эсэргүүцлийн утгууд;  – туршилтын хэлхээний иж бүрдлүүд;  – хүчдэл ба гүйдлийн хэмжилтийн байршил ба зохион байгуулалт зэргийг багтаасан туршилт бүрийн холболтын схемүүд  в) Туршилтуудын явцад чанартай сайн бичлэгүүдийг хийх нь туршилтын тайлангийн нэг чухал хэсэг болно. Тодорхой заасан тохиолдолд эдгээр бичлэгүүд нь сайтар хаяглагдсан хийгээд бүрэн ба хэрчигдсэн долгионуудын хооронд хийгдэх шаардлагатай харьцуулалтууд хялбархан хийхдэх боломжтой байдлаар цэгцлэгдсэн байх ёстой. Тэнхлэг бүрийн хуваарь (амплитуд утга ба хугацааны) осциллограмм болон тоон бичлэгүүд дээр дүрслэгдсэн байх ёстой.    **Тэмдэглээ**  1. импульсын үүсгүүр Cg үүсгүүрийн багтаамж  2. хэрчих завсар CL ачаалалын багтаамж  3. үндсэн хэлхээ C туршилтын обьектын идэвхитэй багтаамж  4. хэрчих хэлхээ Lt туршилтын обьектын идэвхитэй бүрэн эсэргүү цэл  5. туршигдах объект Rsi дотоод цуваа эсэргүүцэл  6. хүчдэл хэмжих хэлхээ Rse гадаад цуваа эсэргүүцэл  7. жишиг газар Rp зэрэгцээ эсэргүүцэл  8. гүйдлийн шунт эсэргүүцэл Zc хэрчих хэлхээний нэмэлт бүрэн эсэргүүцэл  9. хүчдэл хуваагуур Z1 (C1 ) хүчдэл хуваагуурын өндөр хүчдлийн мөрний бүрэн эсэргүүцэл (багтаамж)  Z2 (C2 ) хүчдэл хуваагуурын нам хүчдлийн мөрний бүрэн эсэргүүцэл (багтаамж)  **Зураг 1 – Импульсын туршилтын ердийн хэлхээ**    **Тэмдэглээ**  1. хүчдэл хэмжих хэлхээ 4 багтаамжжар дамжих гүйдэл  2. эх бие- гэрний гүйдэл 5 гүйдлийн шунтууд  3. нейтралийн буюу ороомгийн гүйдэл 6 хүчдэл хэмжих хэлхээ ба дамжигдах хүчдэл  Z1 (C1), Z2 (C2) хүчдэл хуваагуурын бүрэн эсэргүүцлүүд (багтаамжууд) (зураг 1–ийг мөн үз)  **Зураг 2 – Аянгын импульсын туршилтын үед дэх оруулгуудын холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх боломжит аргууд**  **Зураг 3a –Трансформаторын коммутацийн импульсын долгионы хэлбэр дүрсүүд**  **Зураг 3б – Реакторын коммутацийн импульсын хэлбэр дүрсүүд**  **Тэмдэглээ:**  1. хүчдлийн долгионы хэлбэр дүрс T импульс оргил утгынхаа 90 % ба 30 %-ыг авах  2. гүйдлийн долгионы хэлбэр дүрс агшингуудын хоорондох хугацаа  T1 нүүрний долгионы урт  Tz тэг утгаа анхлан дайрах хугацаа  Td нормчилсон амплитудын 90%-аас давсан утганд  харгалзах хугацаа  **Зураг 3-Трансформатор ба реакторын коммутацийн импульсын долгионы хэлбэр**  **дүрсүүд**  **Тэмдэглээ:**  1. хүчдэл хэмжих хэлхээ Z1(C1), Z2(C2) хүчдэл хуваагуурын бүрэн эсэргүүцлүүд (багтаамжууд) (зураг 1-ийг мөн үз)  2. гүйдэл хэмжих хэлхээ  3. ачаалалын эсэргүүцэл, 8.2.2.1-ийг үз.  ТАЙЛБАР: Гурвалжин холбоотой ороомгуудад импульс өгөх өөр хувилбарыг тасархай зураасаар үзүүлэв.  **Зураг 4 – Коммутацийн импульсын туршилтын үеийн оруулгуудын холболтууд ба гэмтэл илрүүлэх аргууд**  **Хавсралт А**  (мэдээллийн чанартай)  **Долгионы хэлбэр дүрсийг хянаж удирдах зарчмууд**  **A.1 Ерөнхий зүйл**  Импульсын долгионууд нь олон тооны зэрэгцээ холбогдсон коденсаторуудыг цэнэглээд тэдгээрийг цуваа холболтонд шилжүүлэн цэнэг шавхах /цахилалт явуулах/ байдлаар үүсгэгддэг. Хүчдлийн утга нь анхдагч цэнэглэх хүчдэл, цахилалт хийж байгаа цуваа холбогдсон конденсаторуудын тоо болон хэлхээний тохируулга зэргээр тодорхойлогдоно.  Долгионы хэлбэр дүрс нь импульсын хүчдлийн үүсгүүрийн багтаамжууд ба идэвхитэй эсэргүүцлүүд болон ачаалалын бүрэн эсэргүүцлийн хэмжээгээр үндсэндээ тодорхойлогдоно.  Трансформаторуудыг аянгын импульсээр турших үеийн долгионы хэлбэр дүрсүүдийг хэрхэн удирдаж хянах зарчмуудыг зураг А.1 болон А.2-д дахь хялбарчилсан схемүүдээр үзүүлсэн болно. Эдгээр нь дахаах хоёр үндсэн чиглэлд хуваагдана:  – бүрэн эсэргүүцэл өндөртэй ороомгуудын хувьд;  – бүрэн эсэргүүцэл багатай ороомгуудын хувьд.  **A.2 Бүрэн эсэргүүцэл өндөртэй ороомгууд (Lt > 100 мГн)**    **Зураг A.1a Зураг A.1б**  **Тэмдэглээ:**  Cg үүсгүүрийн багтаамж Rs = Rsi + Rse, нийлбэр цуваа эсэргүүцэл (зураг 1-ийг үз)  C = Ct + CL + C1 (зураг 1-ийг үз) Rp зэрэгцээ эсэргүүцэл (зураг 1-ийг үз)  **Зураг A.1 – Бүрэн эсэргүүцэл өндөртэй ороомогт зориулсан долгионы хэлбэр дүрсийг хянаж удирдах**  Долгионы нүүрний уртыг олбол:  𝑇1 = 3 x + (зураг А,1а) (A.1)  буюу  == 𝑇1 = 3𝑅𝑠 x (зураг A.1б ) (A.2)  50 % -ын утгаа авах хугацаа буюу долгионы уртыг олбол:  *T*2 ≈ 0,7(*R*s + *R*p)(*C*g + *C*) (зураг A.1a) (A.3)  буюу  *T*2 ≈ 0,7*R*p (*C*g + *C*) (зураг A.1б) (A.4)  For *R*p >> *R*s ба *C*g >> *C*:  *T*1 ≈ 3*R*s × *C* ба *T*2 ≈ 0,7*R*p × *C*g (A.5)  Ер нь бол долгионы нүүрний болон сүүл хэсгийн үзүүлэлтүүд нь цэвэр багтаамжийн ачаалалтай байх үед эдгээр зармчмуудаар тохируулагддаг. Гэхдээ С гэсэн ерөнхий багтаамжид орж байгаа трансформаторын идэвхитэй багтаамж *C*t нь долгионы нүүрний болон сүүл хэсгүүдын хувьд харилцан адилгүй байдаг физик хэмжигдэхүүн гэдгийг тэмдэглэх нь зүйтэй.  Нүүрний уртын хувьд *C*t нь *C*t ≈ *C*B + √ (*C*s*C*e) байдлаар тооцоологдох ба энд *C*B нь оруулгын багтаамж, *C*s нь ороомгийн цуваа /дагуу/ багтаамж, *C*e нь ороомгийн газартай харьцангуй багтаамж тус тус болно.  Долгионы сүүл хэсгийн хувьд *C*t нь *C*B дээр *C*e–ийн тодорхой хэсгийн анхдагч хүчдлийн тархалтаас хамааруулан нэмж тооцоологддог. Ихэнх практик тохиолдлуудад *C*t–ийн утга нь долгионы сүүл хэсгийг авч үзүэхэд ач холбогдол багатай гэдэг нь илэрхий байна (илэрхийлэл (A.5)-ыг үз).  20 мГн–100 мГн хязгаарт байгаа идэвхитэй нөлөөмж / индуктив/ эсэргүүцэл *L*t бүхий ороомгуудын хувьд ороомгийн бүрэн эсэргүүцэл нь цэнэг шавхах / цахилалт болох/ хугацааны тогтмол (ז = *R*p*C*g)–ыг нэлээд хэмжээгээр бууруулдаг. Ийм тохиолдлуудад *T*2 хугацааны утгыг (A.5) илэрхийлэлийн дагуу шууд тохируулж чадахгүй. Энэ нөлөөлөлийг тооцсон туршлага *R*p–ийг (A.5) тэгшитгэлээс гаргаж авсан утгаас нь хоёроос арав дахин нэмэгдүүлэх шаардлагатайг харуулсан байна.  **A.3 Бүрэн эсэргүүцэл багатай ороомгууд (*L*t < 20 мГн)**  Нүүрний уртыг тохируулахын тулд бүрэн эсэргүүцэл өндөртэй ороомгуудтай адилхан тооцоо ба зарчмыг хэрэглэнэ.  Долгионы сүүл хэсгийг тохируулахын тулд туршигдаж байгаа обьект зураг А.2-д үзүүлсэн өөрийн идэвхитэй нөлөөмж эсэргүүцлээр илэрхийлэгдэх ёстой.    **Зураг A.2 – Бага эсэргүүцэлтэй ороомгуудад зориулсан долгионы хэлбэр дүрсийг хянаж удирдах**  Туршилтын хүчдэл *U*t нь хэлхээний замхралын коэффициент *k–*ийн утгаас хамааран экспоненциаль эсвэл хэлбэлзсэн долгионы хэлбэртэй байна. Критик утгатай (*k* = 1) эсвэл критик утгаас давсан (*k* > 1) замх ралтай хэлхээнүүд экспоненциаль муруйнуудаар дүрслэгдэнэ. Гэвч харгалзах идэвхитэй эсэргүүцлийн утгууд зөвшөөрөх боломжгүй их нүүрний уртыг үүсгэх тул эдгээр муруйнууд үндсэндээ хэрэглэх боломжгүй юм.  *k* < 1 байх үед туршилтын хүчдлийг дараах байдлаар олно:  𝑈𝑡 = 𝑈𝑒−(cos 𝜔𝑡 −sin 𝜔𝑡) = e –at cos (𝜔𝑡+ 𝜑) (A.6)    Энд:  𝜔2 = 𝜔02 − 𝛼2 𝜔02=  𝛼 = tan 𝜑 = =  Замхралын коэффициент нь:  𝑘 = =    болно.  Энэ хүчдэл нь зураг А.3-д үзүүлсэн замхран хэлбэлзэх долгионыг үүсгэнэ.    **Зураг A.3 – Замхрах хэлбэлзлэл**  T2 –ыг эхлэн тооцохдоо Rs–ыг тэг гэж үзнэ. Тэгвэл (A.6) илэрхийлэл Ut = Ucosω0t  байдалтай болох ба импульсын амплитуд 50 %-ийн утгандаа хүрэх хугацаа / долгионы урт/  нь:  байдлаар тооцоологдох боловч энэ онолын нөхцөл нь эсрэг туйлтай 100%-ийн оргил утга бүхий үл замхрах хэлбэлзлэлийг илэрхийлнэ.  Ийм эсрэг туйлтай, өндөр амплитудтай хэлбэлзлэл нь бяцхан цахилалт эхлүүлэх хэмжээний аюултай хэлбэлзэх хүчлэгийг бий болгосноор ороодос хоорондын болон ороомог хоорондын хэт хүчдлийг үүсгэх бөгөөд үүнийг зөвхөн туршилтын үзүүлэлтийн хязгаарлалтаар зохицуулах боломжтой. Иймд эсрэг туйлтай хүчдлийн оргил утга Ur–ыг хүчдлийн анхны оргил утгын 50% хүртэл хязгаарлаж өгөх хэрэгтэй.  Эсрэг туйлтай хүчдлийн оргил утг Ur–ыг 50 %-иар хязгаарласнаар долгионы уртыг (A.7) тэгшитгэлээр тооцож гаргаснаас богино болгох нөлөөлөл үзүүлэх замхралын өндөр зэрэг үүснэ. Энэ тохиолдолд замхралын коэффициент k=0.25 байх ба долгионы урт дараах байдалтай тодорхойлогдоно:  𝑇2 = √0.5𝐿𝑡𝐶𝑔 (A.8)  (A.7) болон (A.8) илэрхийлэлүүд нь туршигдаж байгаа обьектын нөлөөмж эсэргүүцэл Lt эсвэл импульсын үүсгүүрийн багтаамж Cg–г тохируулах замаар долгионы сүүл хэсгийг хянаж удирлах заавар болж чадна.  Lt нь туршигдаагүй байгаа ороомгуудын холболтоос хамаарна. Туршигдаагүй байгаа ороомгуудыг богино холбоод газардуулсан (ердийн холболт) үед Lt нь трансформаторын сарнилын нөлөөмж эсэргүүцэл болно. Ийм холболттой туршилт нь хэдийгээр долгионы сүүл хэсэг хэдий богино байсан ч ороомгийн тодорхой хэсгийн болон ороомгууд хоорондын тусгаарлаганд маш их хэмжээний хүчлэгийг үүсгэнэ. Гэхдээ долгионы сүүл хэсэг богино байх нь хүчдлийг удаан барьж чадахгүй тул бусад боломжтой холболтын хувилбаруудын адил газардаж байгаа ороомгийн дунд хэсэгт тийм их хэмжээний хүчдлийг үүсгэхгүй.  Идэвхитэй нөлөөмж эсэргүүцлийг одон холболттой ороомгуудын хувьд туршигдаагүй байгаа оруулгууд дээрх хүчдлийг аянгын импульс тэсвэрлэх хүчдлийн түвшингийн 75%-иас, гурвалжин холболттой ороомгуудын хувьд 50%-иас тус тус хэтрүүлэхгүй байх ёстой гэсэн хязгаарлалтайгаар туршигдаагүй ороомгуудад идэвхитэй эсэргүүцлэн ачаалал холбож өгснөөр ихэсгэж чадна.  Cg-ийг импульсын үүсгүүрийн шатлалуудын цуваа буюу зэрэгцээ холболтуудаар өөрчилж болно. (A.9) илэрхийлэлээр үүсгүүрийн шаардагдах хамгийн бага багтаамжийг олбол:  𝐶𝑔 =  Гэхдээ заримдаа Lt–ийн хэтэрхий бага утгууд, эсвэл хүчдлийн дээрх хязгаарлалтуудын улмаас туршигдаагүй байгаа ороомгийн газардуулгын эсэргүүцлээр Lt-ийг цаашид нэмэгдүүлж чадахгүй учраас (A.9) илэрхийлэлийн нөхцөл дандаа биелэгдэх боломжгүй юм. Эдгээр тохиолдлуудад хэлхээний цэнэг алдах хугацааны тогтмолыг олбол:  𝜏 =  Энэ илэрхийлэл долгионы сүүл хэсгийг тохируулах өөр арга зам байгааг илтгэж байна. Гэхдээ, Rs эсэргүүцлийг хэт бууруулах нь хэмжээнээс давсан амплитудын хэтрэлт эсвэл импульсын долгионы дээд цэг дээр нэмэгдэл хэлбэлзлэлүүдийг бий болгохын зэрэгцээ өмнө тайлбарласан эсрэг туйлтай хэт их оргил утгыг үүсгэнэ. Ийм тохиолдолд, долгионы нүүрний уртыг удирдахад нэмэлт багтаамжийн ачаалал CL–ийг ашиглахыг зөвлөмж болгодог. Ингэснээр ачаалалын багтаамж нь бага утгатай цуваа идэвхитэй эсэргүүцэл Rs–ийн таагүй нөлөөлөлийг багасгана.  Хэрэв дээр дурдсан долгионы сүүл хэсгийг удирдах аргууд долгионы уртын тохирсон хугацааг бариулж чадахгүй бол богино хугацаатай долгионы уртыг хүлээн зөвшөөрөх, эсвэл зураг А.6-ийн дагуу туршигдаж байгаа ороомгийн туршигдаагүй байгаа оруулга дээрх эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах холболтыг дахин ангилах хоёрын дундачийг барих шаардлагатай. Энэ үед, ороомгуудын аянгын импульс тэсвэрлэх хүчдлийн түвшингийн 75%-иар одон холболттой ороомгуудын туршигдаагүй байгаа оруулгуудад дээрх хүчдлийг, харин 50%-иар гурвалжин холболттой ороомгууд дээрх хүчдлийг тус тус хязгаарлах шаардлагыг баримтална. Гэхдээ, долгионы уртыг богино байлгахыг илүү эрхэмлэх ёстой.  Зураг А.4-ийн 3 гэсэн хэсэгт ороомгийн нэг төгсгөлийг гүн газардуулсан трансформаторын орлуулгын /эквивалент/ схемийг харуулав. Хэрэв C1 болон C2 дагуу багтаамжууд газардуулагдсан багтаамж C3–тай харьцуулахад хавьгүй их байвал ороомгийн дагуух хүчдлийн тархалт нь график дүрслэлийн М гэсэн муруйтай төсөөтэй байна.  Төгсгөлийн тархалт нь N шулуунаар дүрслэгдэх ба энэ нь хэлбэлзлэлийн хязгаарууд M болон M’ муруйнуудын завсарт байна. Харин дагуу багтаамжууд газардуулагдсан багтаамжтай харьцуулахад хэтэрхий бага байвал хүчдлийн тархалт нь О туруйтай төстэй болж, хэлбэлзлэлийн хязгаарууд O болон O’ муруйнуудын завсарт байна. Ийм хэв маягтай байснаар ороомгийн тодорхой хэсгүүдэд шугамын оруулгуудад өгөгдсөн хүчдлээс давсан хүчдэл үүсч болох боловч, ерөнхийдөө эдгээр ороомгууд нь хугацааны тогтмолууд өндөртэй, мөн Т цэгийн хувьд дээд /максимум/ цэгтээ хүртэл хэлбэлзэх хугацаа нь ихэвчлэн оруулгууд дээрх өгөгдсөн хүчдэл дээд утгынхаа 50%-д хүртэл буурах хүртэл үргэлжлэхүйц хангалттай урт байдаг. Энэ схем нь ороомгоос газар хүртэл тархсан хүчлэг үүсгэхгүй, харин ороомгийн доторх тусгаарлаганд нөлөөлөхүйц хүчлэг үүсгэнэ.  Хэлхээний идэвхитэй эсэргүүцэл нэмэгддэггүй, ийм болохоор уг хэлхээ өндөр давтамжтай шуугиан–саадыг сайн мэдэрдэг тул энэ схем нь гүйдлийг хэмжихэд маш тохиромжтой байдаг.    **Тэмдэглээ:**  1. Импульсын үүсгүүр C1, C2 дагуу багтаамжууд  2. оч үүсгэх завсар C3 газартай харьцангуй багтаамж  3. трансформатор Cg, Rs, Rp (зураг 1-ийг үз)  X газар L1, L2 нөлөөмж эсэргүүцлууд  A ороомгийн оруулга-үзүүр  B ороомгийн нейтраль төгсгөл  E ороомгийн оруулга дээрх хүчдлийн амплитуд  **Зураг A.4 – Долгионы богино сүүл хэсгийн нөлөөллүүд**  Өөр нэг боломжтой схем бол туршигдаж байгааа ороомгийн газардуулагдсан төгсгөлд идэвхитэй эсэргүүцэл оруулж өгөх юм. Энэ схем бүрдүүлэлт нь ороодос хоорондын болон ороомог хоорондын хүчлэгийг өөрчлөх бөгөөд өөрчлөлтийн хэмжээ нь ороомгийн хугацааны тогтмолуудаас хамаарна. Зураг А.5–ын 3 хэсэг нь ердийн трансформаторын эквивалент-орлуулгын схемийг харуулсан ба ороомгийн туршигдаагүй байгаа төгсгөл нь идэвхитэй эсэргүүцлээр дамжин газардуулагдсан байна. Хэрэв дагуу багтаамжууд C1 ба C2 нь газардуулагдсан багтаамж C3-тай харьцуулахад маш их байвал хүчдлийн тархалт нь графикийн Р муруйтай адилхан байна. Төгсгөлийн тархалт нь Q муруйтай адилхан болж, бүх, эсвэл бараг бүх хүчдэл идэвхитэй эсэргүүцэл дээр бий болно. Энэ үед хэлбэлзлэлийн хязгаарууд P болон P’ муруйнуудын хооронд байх болно. Харин газардуулагдсан багтаамж дагуу багтаамжуудтай харьцуулахад их байвал хүчдлийн эхний тархалт нь S муруйтай ижилхэн үүсэх ба харин төгсгөлийн тархалт нь дахин Q муруйтай ижилхэн гэж тооцогдоно.  Ингэснээр хэлбэлзлэлийн хязгаарууд нь S болон S’-ийн хооронд байна. Тохирсон урттай сүүл үүсгэхэд зөвхөн хүрэлцэхүйц хэмжээтэй идэвхитэй эсэргүүцлийг холбож өгөх нь хамгийн түгээмэл практик бөгөөд энэ эсэргүүцэл дээр үүсэх хүчдлэл нь харгалзах аянгын импульс тэсвэрлэх хүчдлийн түвшингийн 75%-иас ихгүй байхаар хязгаарлагдана.  Хэрэв энэ сүүлчийн жишээн дээр сүүлний хэсгийн тохирох уртыг бий болгоход шаардагдах эсэргүүцлийн хэмжээ бага байвал төгсгөлийн хүчдлийн тархалтын шугам Q’ хүртэл доошилж ирэх ба хэлбэлзлэлийн хязгаарууд S болон S’’-ийн хооронд байна. Хэрэглэх эсэргүүцлийн утгыг тодорхойлохын тулд сүүлний хэсгийн урт ба эсэргүүцэл дээр унах хүчдлийг хэмжих ёстой.  Туршилтын энэ схем нь шугамын төгсгөлийн тусгаарлаганд тохирсон долгионы хэлбэр дүрсийг гаргаж өгөх ба хэдийгээр энэ идэвхитэй эсэргүүцэл гэмтэл илрүүлэх мэдрэх чадварыг үл ялиг бууруулж магадгүй ч газардлагын гүйдлийг хэмжихэд тохиромжтой.  Эхэндээ, бурэн импульсын хүчдэл ороомог болон цуваа эсэргүүцэл дээр өгөгдөх ба ингэснээр ороомгийн дагуух хүчлэгийн хэмжээ буурах болно.    **Тэмдэглээ:**  1 импульсын үүсгүүр  2 оч үүсгэх завсар  3 трансформатор  X газар  **Зураг A.5 – Идэвхитэй эсэргүүцлээр дамжин газардуулагдсан ороомог**  Импульсын үүсгүүр болон туршигдаж байгаа ороомгийн хооронд нөлөөмж эсрэгүүцэл, заримдаа Rs эсэргүүцэлтэй (зураг A.6-г үз) зэрэгцээгээр холбож өгөх нь дан ганц импульсын үүсгүүр байснаас илүүтэйгээр хэлхээний нийт нөлөөмж эсэргүүцэл болон долгионы сүүл хэсгийн үргэлжлэх хугацаа /долгионы урт/-г уртасгадаг. Энэ схем холболт нь долгионы нүүрний хэсгийн үед импульсын үүсгүүрээс нөлөмж эсэргүүцэл рүү энерги дамжуулах, харин долгионы сүүл хэсгийн үед нөлөөмж эсэргүүцлээс ороомогт энерги дамжуулах нөхцлийг хангаж өгнө. Энэ схемийг хэрэглэснээр долгионы сүүл хэсгийн үргэлжлэх хугацаа хэдий хэмжээтэй өсөн нэмэгдэх нь ороомгийн үзүүлэлт болон нөлөөмж эсэргүүцлийн боломжтит хэмжээнээс хамаарна.  Бараг адилхан байдлаар коммутацийн импульсын нүүрний уртыг тохируулна.  Гэхдээ энэ тохиолдолд нүүрний уртыг их байлгахын тулд трансформаторын идэвхитэй багтаамж Ct нь ороомгийн идэвхитэй газардуулгын багтаамж Ce –тэй тэнцүү байна.    **Тэмдэглээ:**  1. Долгионы уртыг ихэсгэхэд зориулан боловсруулагдсан ирээдүйтэй арга нь Rs идэвхитэй эсэргүүцэлтэй зэрэгцээгээр нэмэлт нөлөөмж эсэргүүцэл ашиглах явдал бөгөөд ингэснээр хэлхээний нийт нөлөөмж эсэргүүцэл нэмэгдэнэ.  2. туршигдаж байгаа оруулга-үзүүр  3. туршигдаагүй байгаа үзүүр  **Зураг A.6 – Бүрэн эсэргүүцэл багатай ороомгуудыг эсэргүүцлээр дамжуулан газардуулах**  **Хавсралт Б**  (мэдээллийн чанартай)  **Хэвийн /стандарт/ осциллограммуд ба тоон бичлэгүүд**  Дараах хуудаснуудад оруулсан гэмтэлгүй болон гэмтэлтэй нөхцлүүдийн осциллограммууд ба тоон бичлэгүүд нь нэг төвтэй бортогон /цилиндр/ ороомгуудтай зүрхэвчтэй хүчний трансформаторууд болон шунт реакторууд дээр хийгдсэн бодит туршилтуудын бичлэгүүдээс гарган авсан болно. Эдгээр осциллограммууд нь импульсын долгионы өргөн тохиолддог ердийн хэлбэр дүрсүүдийг харуулж байгаа учраас өөр өөр хүчдлийн түвшин, хийц болон үйлдвэрлэгчтэй бусад трансформаторууд ба реакторуудад илэрдэг хэв гажилтуудтай адилтгах боломжгүй ч гэсэн энд үзүүлсэнтэй илт ижил дүрсүүд нь нэг ижилхэн гэмтэл согогоос үүдэлтэй гэдгийг анхааралдаа авах хэрэгтэй. Тодорхой гэмтлүүдийг үзүүлж байгаа зорилго нь зөвхөн ерөнхий чиг удирдамж өгөх явдал болно.  **Хүснэгт Б.1 – Осциллограммуд ба тоон бичлэгүүдэд үзүүлсэн жишээнүүдийн нэгдсэн товчоон**   |  |  |  | | --- | --- | --- | | Зураг | Жишээ | Зүйл хэсэг | | Аянгын импулсын туршилт | | | | Бүрэн долгионы гэмтлүүд | | | | Б.1 | Туршигдаж байгаа өндөр хүчдэлийн ороомгоор дамжин шугам ба саармаг цэгийн хооронд ниргэлэг болох | 9.1.2;  9.1.3 | | Б.2 | Туршигдаж байгаа өндөр хүчдлийн ороомгийн эхлэл дээрх дискэн ороомгуудын хооронд ниргэлэг болох | 9.1.2;  9.1.4 | | Б.3 | Хүчдэл ойролцоо тохируулах шатлалын ороомгийн үе хооронд ниргэлэг болох | 9.1.2;  9.1.3 | | Б.4 | Хүчдэл тохируулгын гадна талын ороомгийн салбарлагын утаснуудын хооронд ниргэлэг болох | 9.1.2 | | Б.5 | Хүчдэл нарийвчлан тохируулах шатлалын ороомогт нэг  секцийн дагуу ниргэлэг болох | 9.1.2 | | Б.6 | Өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн зэрэгцээ  дамужулагчуудын хооронд нтргэлэг болох | 9.1.2 | | Б.7 | Оруулгын хүчдэл жигдрүүлэх металл ялтаснуудын  хооронд нтргэлэг болох | 9.1.4 | | Хэрчигдсэн долгионы гэмтлүүд | | | | Б.8 | Туршигдаж байгаа өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн  ороодос хооронд ниргэлэг болох | 9.1.4; 10 | | Б.9 | Хүчдэл нарийвчлан тохируулах шатлалын ороомгийн ороодос хооронд ниргэлэг болох | 9.1.4; 10 | | Хэрчиглсэн долгионууд- Хэрчих хугацааны зөрүүнээс үүсэх нөлөөлөл | | | | Б.10 | Хэрчилтийн ижил хугацаатай туршилтууд | 9.1.4; 10 | | Б.11 | Хэрчих хугацааны бага болон их зөрөөтэй туршилтууд | 9.1.4; 10 | | Гэмтэл үүсгэхгүй хэв гажилтууд | | | | Б.12 | Хүчдэл тохируулга /РПН/ дахь шугаман бус эсэргүүцлийн нөлөөлөл / эффект/ | 9.1.1 | | Б.13 | Импульсын үүсгүүрийн цахилах хугацааны ялгаанаас бий болох нөлөөлөл /эффект/ | 9.1.1 | | Коммутацийн долгионы туршилтууд | | | | Б.14 | Трансформаторт амжилттай хийгдсэн туршилт | 8.2.2.1 |  |  |  |  | | --- | --- | --- | | Figure | Example | Clause | | Lightning impulse test | | | | Full-wave faults | | | | В.1 | Breakdown, line to neutral, across tested high-voltage winding | 9.1.2;  9.1.3 | | В.2 | Breakdown, between discs, at entrance to tested high-voltage winding | 9.1.2;  9.1.4 | | В.3 | Breakdown, interlayer, in course-step tapping winding | 9.1.2;  9.1.3 | | В.4 | Breakdown between tapping leads of outside tapping winding | 9.1.2 | | В.5 | Breakdown across one section in a fine-step tapping winding | 9.1.2 | | В.6 | Breakdown between parallel conductors of a main high-voltage winding | 9.1.2 | | В.7 | Breakdown between bushing foils | 9.1.4 | | Chopped-wave faults | | | | В.8 | Breakdown between turns in tested main high-voltage winding | 9.1.4; 10 | | В.9 | Breakdown between turns in a fine-step tapping winding | 9.1.4; 10 | | Chopped waves – Effects of differences to chopping | | | | В.10 | Tests with identical times to chopping | 9.1.4; 10 | | В.11 | Tests with large and small differences in times to chopping | 9.1.4; 10 | | Non-faults causing discrepancies | | | | В.12 | Effect of non-linear resistors in tap-changer | 9.1.1 | | В.13 | Effect of generator firing differences | 9.1.1 | | Switching impulse tests | | | | В.14 | Satisfactory test on a transformer | 8.2.2.1 | | В.15 | Breakdown of tested main high-voltage winding of a transformer | 9.2.1 | | В.16 | Satisfactory test on a reactor | 8.3.1; 8.3.4 | | Transfer function analysis | | | | В.17 | Comparison of the transfer function of a full wave and a chopped wave | 9.1.4; 10 | | Evaluation of non-standard waveshapes | | | | В.18 | Influence of curve smoothing algorithms of digitizers | 7.5.2; 7.5.4.1;10 |  |  |  |  | | --- | --- | --- | | Б.15 | Трансформаторын туршигдаж байгаа өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн ниргэлэг | 9.2.1 | | Б.16 | Реакторт амжилттай хийгдсэн туршилт | 8.3.1; 8.3.4 | | Хувиргалтын функцийн шинжилгээ | | | | Б.17 | Бүрэн ба хэрчигдсэн долгионуудын хувиргалтын функцийн харьцуулалт | 9.1.4; 10 | | Стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүдийг  үнэлэх | | | | Б.18 | Тоон хувиргууруудын муруй тэгшитгэх алгоритмуудын нөлөөлөл | 7.5.2; 7.5.4.1;10 | | Б.19 | Нэмэгдсэн хэлбэлзлэлүүдээр үнэлэх | 7.5.2; 7.5.4.1;10 | | Б.20 | Олон үед ороомог дээрх стандарт бус хэрчигдсэн долгион | 7.2.2; 10 | | Б.21 | Янз бүрийн тоон хувиргууруудаар стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүдийг харьцуулах | 7.5.2; 10;  7.5.4.1 | | Туршилтын хэлхээний согогоос үүсэх хариу  үйлдлүүд | | | | В.22 | Хэмжүүрийн кабель газартай очит цахилалт үүсгэснээс  туршилтын хэлхээнд согог үүсэх | 10 | | В.23 | Аянгын бүрэн импульс, хүчдэл тохируулгын салбарлага хоорондын болон ойролцоо ба нарийвчилсан тохируулгын салбарлага ороомгуудын хоорондох гэмтлүүд | 10 |       **Зураг Б.1 a – Багасгасан бүрэн долгион (75%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.1 б – Бүрэн долгион (100%) гэмтэлтэй**  **(Амплитудууд нь нэг ижил болоогүй)**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нам хүчдлийн ороомог дамжин ирсэн хүчдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. нейтралын гүйдэл, 25 мкс дүрс дэлгэлттэй  **Зураг Б.1 – Аянгын долгион, бүрэн долгионы гэмтэл – 400 кВ-ын генератор трансформаторын өндөр хүчдлийн ороомгоор дамжин шугам – нейтралийн хооронд ниргэх**    **Зураг Б.2a – Хэрчигдсэн долгион (100%) гэмтэлгүй (Тайлбар 1)**  **Зураг Б.2б – Хэрчигдсэн долгион (100%) гэмтэлтэй (Тайлбар 1б а 2)**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 10 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нейтралийн гүйдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР 1 Гэмтэл нэгэнт бодитой хэрчилтээс өмнө үүссэн тул бүрэн долгионы гэмтэл гэж үзнэ.  ТАЙЛБАР 2 Ойролцоогоор 2 мкс-ийн дараа гэмтэл хүчдэл ба гүйдлийн осциллограммуд дээр тод илэрсэн.  **Зураг Б.2 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх – 115 кВ-ын трансформаторын өндөр хүчдлийн ороомгийн эхний хэсэг дэх дискэн ороомгуудын хооронд ниргэх**    **Зураг Б.3a – Багасгасан бүрэн долгион (62,5%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.3б – Багасгасан бүрэн долгион (75%) гэмтэлтэй**  (Амплитудууд нь нэг ижил болоогүй)  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. газартай богино холбогдсон зэргэлдээх ороомгоос багтаамжаар дамжсан гүйдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. нейтралийн гүйдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР: 30 мкс-ийн дараах гэмтэл хүчдлийн, багтаамжжар дамжсан гүйдлийн, нейтралийн гүйдлийн осциллограммуд дээр тод илэрсэн.  **Зураг Б.3 – Аянгын долгион, 400 \220 кВ-ын трансформаторын их шатлалтай хүчдэл тохируулгын ороомог дахь үе хоорондын ниргэлэг**    Зураг Б.4a – Бүрэн долгион (100%) гэмтэлгүй  Зураг Б.4б – Бүрэн долгион (100%) гэмтэлтэй  **Тэмдэглэгээ**  1. өгөгдсөн импульс, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нейтралийн гүйдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. нейтралийн гүйдэл, 25 мкс дүрс дэлгэлттэй  4. нейтралийн гүйдэл, 250 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР Хоёрдогч бүрэн долгионы хүчдлийн бүх бичлэгүүд дээрх бага зэргийн өөрчлөлтүүдээр гэмтэл илэрсэн.  **Зураг Б.4 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх-400 кВ-ын генератор трансформаторын гадна талын хүчдэл тохируулгын ороомгын 1.1%-ын хоёр секцийн үзүүрүүд хооронд ниргэх**    **Зураг Б.5a – Багасгасан бүрэн долгион (62,5%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.5б – Бүрэн долгион (100%) гэмтэлтэй**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, бүрэн долгион, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. газартай богино холбогдсон зэргэлдээх ороомгоос багтаамжаар дамжсан гүйдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР: Гэмтэл хүчдлийн болон багтаамжаар дамжсан гүйдлийн осциллограммууд дээр зэрэг илэрсэн.  **Зураг Б.5 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх - 220 кВ-ын трансформаторын нарийн шатлалтай хүчдэл тохируулгын ороомгын нэг секцийг богино залгаа үүсгэж ниргэх**    **Зураг Б.6a – Багасгсан бүрэн долгион (62,5%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.6б – Бүрэн долгион (100%) гэмтэлтэй**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нейтралийн гүйдэл, 100 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. газартай богино холбогдсон зэргэлдээх ороомгоос багтаамжаар дамжсан гүйдэл , 100 мкс дүрс дэлгэлттэй.  ТАЙЛБАР: Гэмтэл 30 мкс-35 мкс-ийн дараа нейтралийн болон багтаамжаар дамжсан гүйдлийн осциллограммууд дээр илэрсэн боловч, өгөгдсөн хүчдлийн осциллограмм дээр илрээгүй.  **Зураг Б.6 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх - 220\110 кВ-ын трансформаторын олон дамжуулагч бүхий өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн зэрэгцээ дамжуулагчуудын хооронд ниргэх**    **Зураг Б.7a – Бүрэн долгион (100%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.7б – Хэрчигдсэн долгион (115%) гэмтэлтэй (Тайлбар 1)**  (Амплитудууд нь нэг ижил болоогүй)  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 10 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нейтралийн гүйдэл, 15 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР 1: Гэмтэл нэгэнт бодитой хэрчилтээс өмнө үүссэн тул бүрэн долгионы гэмтэл гэж үзнэ.  ТАЙЛБАР 2: Оргил утгын яг дараа болон бодит хэрчилтийн өмнө үүссэн гэмтэл 10%-ийн уналттай хүчдлийн долгион болон нейтралийн гүйдлийн осциллограммаар илэрсэн.  **Зураг B.7 – Аянгын долгион, бүрэн долгионоор гэмтэх-туршиж байгаа ороомгын 66кВ-ын оруулга тусгаарлагын хүчдэл жигдрүүлэх ялтасуудын хооронд ниргэх**    **Зураг Б.8a – Багасгасан хэрчигдсэн долгион (60%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.8б– Хэрчигдсэн долгион (100 %)**  **Гэмтэлтэй**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 10 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. газартай богино холбогдсон зэргэлдээх ороомгоос багтаамжаар дамжсан гүйдэл, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. нейтралийн гүйдэл, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР: Гэмтэл 10мкс - 15 мкс-ийн дараа багтаамжаар дамжсан гүйдэл болон нейтралийн гүйдлийн осциллограммуд дээр тод илэрсэн.  **Зураг B.8 – Аянгын долгион, хэрчигдсэн долгионоор гэмтэх - 115кВ-ын трансформаторын өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн ороодос хооронд ниргэх**    **Зураг Б.9a – Багасгасан хэрчигдсэн долгион (70%) гэмтэлгүй**  **Зураг Б.9б – Хэрчигдсэн долгион (115%) гэмтэлтэй**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, chopped wave, 50 мкс дүрс дэ лгэлттэй.  2. газартай богино холбогдсон зэргэлдээх ороомгоос багтаамжаар дамжсан гүйдэл, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй.  ТАЙЛБАР: Гэмтэл яг хэрчилт хийгдсний дараа хүчдлийн болон багтаамжаар дамжсан гүйдлийн осциллограммуд дээр илэрсэн.  **Зураг Б.9 – Аянгын долгион, хэрчигдсэн долгионоор гэмтэх-220 кВ-ын трансформаторын нарийн шатлалтай хүчдэл тохируулгын ороомгийн ороодос хооронд ниргэх**    **Зураг Б.10a – Багасгасан хэрчигдсэн долгион (75%)**  **Зураг Б.10б – Хэрчигдсэн долгион (100%)**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 10 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нейтралийн гүйдэл, 100 мкс дүрс дэ лгэ лттэ й  ТАЙЛБАР: Хэрчилтийн хугацаанл зөрөөгүй байхад хүчдлийн ба нейтралийн гүйдлийн ижилхэн бичлэг хийгдсэн.  **Зураг Б.10 – Аянгын хэрчигдсэн долгион - 115 кВ-ын трансформаторыг туршиж байх үеийн янз бүрийн хүчдлийн түвшингүүдэд ижил хугацаагаар хэрчигдсэн долгионууд**  **Зураг Б.11a – Багасгасан хэрчигдсэн долгион (62,5%)**  **Зураг Б.11b – Хэрчигдсэн долгион (100%)**  ТАЙЛБАР Хэрчилтийн хугацааны ихээхэн зөрөөтэй туршилтууд (өндөр хүчдлийн ороомог). Багтаамжаар дамжсан гүйдэл дээрх нэмэгдсэн өндөр давтамжтай хэлбэлзлэлүүдэд өөрчлөлт гараагүй, хэрчилтийн дараа хүчдлийн долгион дээр өөрчлөлтүүд гарсан.    **Зураг Б.11в – Багасгасан хэрчигдсэн долгион (62,5%)**  **Зураг Б.11г – Хэрчигдсэн долгион (100%)**  ТАЙЛБАР: Хэрчилтийн хугацааны ихээхэн бага зөрөөтэй туршилтууд (өндөр хүчдлийн ороомог). Багтаамжаар дамжсан гүйдэл дээрх нэмэгдсэн өндөр давтамжтай хэлбэлзлэлүүдэд өөрчлөлт гараагүй, харин хүчдлийн долгионууд дээр харагдах өөрчлөлтүүд байхгүй.  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 25 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. багтаамжаар дамжсан гүйдэл, 25 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. өгөгдсөн импульс, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй  4. багтаамжаар дамжсан гүйдэл, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй  **Зураг Б.11 – Аянгын хэрчигдсэн долгион - 220 кВ-ын трансформаторыг туршиж байх үед хэрчигдэх хугацаа өөрөөр байснаас үүсэх нөлөөлөл**    **Зураг Б.12а – Багасгасан бүрэн долгион (50%)**    **Зураг Б.12б – Багасгасан бүрэн долгион (75%)**    **Зураг B.12c – Бүрэн долгион (100 %)**  ТАЙЛБАР 1: Гурван осциллограмм бүгд нейтралийн гүйдлийг харуулж байна, 75 мкс дүрс дэлгэлттэй.  ТАЙЛБАР 2: Дээр үзүүлсэн долгионы хэлбэр дүрсийн өөрчлөлтүүд нь шугаман бус эсэргүүцлүүдээс ерөнхийдөө үүсдэг өөрчлөлтүүдээс илүү тэмдэглэгдсэн.  **Зураг Б.12 - Аянгын бүрэн долгион - Салангид ороомгуудтай трансформаторын ачаалалтай үед хүчдэл тохируулах ороомог дээрх нейтралын төгсгөлд шугаман бус эсэргүүцэл холбосноос үүсэх нөлөөлөл**  **Зураг B.13a – Багасгасан бүрэн долгион (62,5%)**    **Зураг Б.13б – Анхдагч бүрэн долгион (100 %) Зураг Б.13в – Хоёрдогч бүрэн долгион (100 %)**    **Зураг Б.13г – Сүүлчийн багасгсан бүрэн долгион (62,5 %)**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. багтаамжжар дамжсан гүйдэл, 50 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР: 100%-ийн хүчдлийн түшинд харгалзах багтаамжаар дамжсан гүйдлийн бичлэгүүдийг 62.5%-ийн хүчдлийн түвшинтэй үеийнхтэй харьцуулахад анхдагч өндөр давтамж өөрчлөгдсөн нь харагдаж байна.  **Зураг Б.13 – Аянгын бүрэн долгион - 400 кВ-ын трансформаторыг туршиж байх үед хүчдлийн янз бүрийн түвшингүүд дээр импульсын үүсгүүрийн цахилах хугацааны ялгаануудаас үүсэх нөлөөлөл**    **Зураг Б.14a–62,5% туршилтыг хүчдлийн түвшин**    **Зураг Б.14б – Анхдагч 100% хүчдлийн түвшин**  **Зураг Б.14в –Хоёрдогч 100% хүчдлийн түвшин**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн коммутацийн импульс, 5 000 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. туршигдаагүй байгаа фазын ороомгийн хоорондоо холбогдсон оруулгууд ба газар хоорондох индукцлэгдсэн коммутацийн импульсын хүчдэл (52%-ийн, эерэг туйлтай хүчдэл өгсөн), 5000 мкс дүрс дэлгэлттэй  3 нейтралийн гүйдэл, 5 000 мкс дүрс дэлгэлттэй  **Зураг Б.14 – Коммутацийн долгион - 400 кВ-ын гурван фазын генератор – трансформаторт хийгдсэн амжилттай туршилт**    **Зураг Б.15a – 90% туршилтын хүчдлийн түвшинтэй гэмтэлгүй**  **Зураг Б.15б – 100 % туршилтын хүчдэлтэй**  **гэмтэлтэй**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн коммутацийн импульс, 5000 мкс дүрс дэлгэлттэй  2. нейтралийн гүйдэл, 5 000 мкс дүрс дэлгэлттэй  3. нейтралийн гүйдэл, 500 мкс дүрс дэлгэлттэй  ТАЙЛБАР: Гэмтэл 100%-ийн туршилтын хүчдэлтэй үед ойролцоогоор 300 мкс дээр илэрсэн.  **Зураг Б.15 – Коммутацийн долгион - 525 кВ-ын нэг фазын генератор - трансформаторын өндөр хүчдлийн үндсэн ороомгийн тэнхлэгийн дагуу эхлэл төгсгөлийг нь холбосон ниргэлэг /перекрытие/**  **Зураг Б.16a-Багасгасан туршилтын хүчдэл (60%)**  **Зураг Б.16б – Tуршилтын хүчдэл (100%)**  **Тэмдэглээ**  1. өгөгдсөн импульс, 5 000 мкс дүрс дэлгэлттэй (*T*1 200 мкс, *T*d 225 мкс, *T*z 1 000 мкс)  2. нейтралийн гүйдэл, 5 000 мкс дүрс дэлгэлттэй  **Зураг Б.16 – Коммутацийн долгион - 525 кВ, 33 МВАр-ын нэг фазын шунтын реакторт хийгдсэн амжилттай туршилт**        ТАЙЛБАР: Нэг трансформаторын нэг оруулга дээрх аянгын багасгасан бүрэн долгион (ББД) ба бүрэн хэрчигдсэн долгион (БХД)-ны харьцуулалт. Хэрчигдсэн долгион нь дамжууламжийн хувир галтын функцийн илүү өндөр давтамжтай оролтыг агуулсан байдаг учраас ББД ба ХБД–ны хувиргалтын функцуудын хоорондох хазайлтууд өндөр давтамжууд дээр үүсдэг.  **Тэмдэглээ**  1. Багасгасан бүрэн долгион-ББД 4 БХД-ны үе дэх нейтралийн гүйдэл  2. Бүрэн хэрчигдсэн долгион - БХД 5 ББД-ны үе дэх хувиргалтын (дамжууламжийн) функц  3. ББД-ны үе дэх нейтралийн гүйдэл 6 БХД-ны үе дэх хувиргалтын (дамжууламжийн) функц  **Зураг Б.17 – Аянгын долгион - Бүрэн ба хэрчигдсэн долгионуудын хувиргалтын функцийн харьцуулалт**    **Зураг 18a – Өгөгдсөн хүчдэл Зураг 18b – Нейтралийн гүйдэл**  ТАЙЛБАР ОУЦТК 60060-1 стандартын дагуу долгионы сүүл хэсэгт татсан шүргэгчээр 19 % - ийн амплитудын хэтрэлттэй долгионыг үнэлсэн ба амплитудын үнэлгээнд 10%-аас дээш алдаа гарсан байна.  **Зураг Б.18 – Аянгын бүрэн долгион - Стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсийг үнэлэх - Тоон хувиргууруудад суулгасан тэгшитгэх алгоритмуудын нөлөөлөл**    **Зураг 19a – Өгөгдсөн хүчдэл Зураг 19б – Нейтралийн гүйдэл**  ТАЙЛБАР: ОУЦТК 60060-1 стандартаар хүчдлийн амплитуд 50%-даа хүрэх хугацааг 50 мкс гэж үзүүлсэн байдаг бол нэмэгдсэн хэлбэлзлэлүүдийн анхны удаа тэг утгаа дайрахад тулгуурласан тоон хувиргуур долгионы уртыг 5 мкс гэж үнэлсэн байна.  **Зураг Б.19 – Аянгын бүрэн долгион - Долгионы стандарт бус хэлбэр дүрсүүд, 0.5 МГц-ээс бага давтамжтай, 50% амплитудаас их нэмэгдсэн хэлбэлзлэлүүд**    **Зураг 20a – Өгөгдсөн хүчдэл Зураг 20б – Нейтралийн гүйдэл**  ТАЙЛБАР: Олон үет ороомог дээрх стандарт б ус хэрчигдсэн долгион. Ороомгийн нэг үеийн бүрэн эсэргүүцэл газардаж байгаа хэрчигдсэн долгионы тэгийн ойролцоох хэлбэлзлэлүүд ба огцом уналтаас сэргийлж байна.  **Зураг Б.20 – Аянгын хэрчигдсэн долгион - Олон үет ороомог дээрх стандарт бус хэрчигдсэн долгион**      **Зураг 21a – Өгөгдсөн хүчдэл Зураг 21b – Нейтралийн гүйдэл**  **Зураг Б.21 – Аянгын бүрэн долгион - Стандарт бус долгионы хэлбэр дүрс, ижилхэн бичлэг бүхий янз бүрийн маркийн тоон хувиргууруудаар стандарт бус долгионы хэлбэр дүрсүүдийг харьцуулах**    ТАЙЛБАР: Өндөр хүчдлийн туршилтанд орж байгаа 400 МВА чадалтай, 220/21 кВ-ын трансформатор. Нам хүчдлийн ороомгоос хэмжүүрийн кабелиар дамжин импульсын үүсгүүрийн газар ба эх биений газраас өөр цэгт газар руу үүсч байгаа очит цахилалт.  **Зураг Б.22a – Хүчдэлд гэмтэл илрээгүй, харин гүйдлийн болон хувиргалтын функцийн муруйнуудад тод илэрсэн**  **Зураг Б.22б – Засвар оруулсний дараа бодит хугацааны болон хувиргалтын функцийн бүх дүрсүүд хоорондоо маш сайн тохирч байна.**  **Зураг Б.22 – Аянгын бүрэн долгион - Хэмжүүрийн кабелиас газар руу очит цахилалт үүсгэснээс туршилтын хэлхээнд үүсэх хүндрэл**    **Зураг 23a – 300 MВА чадалтай , 400/110/30 кВ-ын трансформаторын салбарлага хоорондын хүчдэл тохируулгын утаснуудын очит цахилалт**    **Зураг 23б – Ойролцоо болон нарийн тохируулгын ороомгуудын хооронд үүссэн очит цахилалт**  ТАЙЛБАР: Бодит хугацааны болон хувиргалтын функцийн дүрсүүдэд тодорхой өөрчлөлт үүссэн байна.  **Зураг Б.23 – Аянгын бүрэн долгион - Хүчдэл тохируулгын салаалгуудын үзүүрүүдэд үүссэн очит цахилалт ба ойролцоо болон нарийн тохируулгын ороомгуудын хооронд үүссэн очит цахилалтын гэмтлийн тоон бичлэгүүд** |  | **1. SCOPE**  This part of IEC 60076 gives guidance and explanatory comments on the existing procedures for lightning and switching impulse testing of power transformers to supplement the requirements of IEC 60076-3. It is also generally applicable to the testing of reactors (see IEC 60289), modifications to power transformer procedures being indicated where required.  Information is given on waveshapes, test circuits including test connections, earthing practices, failure detection methods, test procedures, measuring techniques and interpretation of results.  Where applicable, the test techniques are as recommended in IEC 60060-1 and IEC 60060-2.  **2. Normative references**  The following referenced documents are indispensable for the application of this document.  For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.  IEC 60060-1, *High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements*  IEC 60060-2, *High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems*  IEC 60076-3, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*  IEC 60289, *Reactors*  IEC 61083-1, *Instruments and software used for measurement in high-voltage impulse tests – Part 1: Requirements for instruments*  IEC 61083-2, *Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests – Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveforms*  **3. General**  This standard is primarily based on the use of conventional impulse generators for both lightning and switching impulse testing of transformers and reactors. The practice of switching impulse generation with discharge of a separate capacitor into an intermediate or low-voltage winding is also applicable. However, the method which employs an additional inductance in series with the capacitor to provide slightly damped oscillations transferred into the highvoltage winding is not applicable.  Alternative means of switching impulse generation or simulation such as d.c. current interruption on an intermediate or low-voltage winding or the application of a part-period of power frequency voltage are not discussed since these methods are not as generally applicable.  Different considerations in the choice of test circuits (terminal connections) for lightning and switching impulse tests apply for transformers and reactors. On transformers, all terminals and windings can be lightning impulse tested to specific and independent levels. In switching impulse testing, however, because of the magnetically transferred voltage, a specified test level may only be obtained on one winding (see IEC 60076-3).  Whilst, on reactors, lightning impulse testing is similar to that on transformers, i.e., all terminals can be tested separately, different considerations apply and different problems arise in switching impulse testing. Hence, in this standard, lightning impulse testing is covered by a common text for both transformers and reactors whilst switching impulse testing is dealt with separately for the two types of equipment.  **4. Specified waveshapes**  The voltage waveshapes to be used normally during lightning and switching impulse testing of transformers and reactors are given in IEC 60076-3 and the methods for their determination are given in IEC 60060-1.  **5. Test circuit**  The physical arrangement of test equipment, test object and measuring circuits can be divided into three major circuits:  – the main circuit including the impulse generator, additional waveshaping components and the test object;  – the voltage measuring circuit;  – the chopping circuit where applicable.  This basic arrangement is shown in figure 1.  The following parameters influence the impulse waveshape;  a) the effective capacitance *C*t, and inductance of the test object, *L*t; *C*t is constant for any given design and any given waveshape, *L*t is also a constant for any given design.  The effective *L*t, however, may be influenced by the terminal treatment. It varies between the leakage inductance *L*s for short-circuited terminals and *L*o for open-circuited terminals. More details in this respect are given in 7.1 and 7.3 and in annex A;  b) the generator capacitance *C*g;  c) waveshaping components, both internal and external to the generator, *R*si, *R*se, *R*p, *C*L (plus, where applicable, the impedance of a voltage divider *Z*1);  d) the stray inductance and capacitance of the generator and the complete test circuit;  e) chopping equipment, where applicable.  The front time *T*1 is determined mainly by combination of the effective surge capacitance of the test object, including *C*L, and the generator internal and external series resistances.  The time to half-value *T*2 is, for lightning impulses, primarily determined by the generator capacitance, the inductance of the test object and the generator discharge resistance or any other parallel resistance. However, there are cases, for example, windings of extremely low inductance, where the series resistance will have a significant effect also on the wavetail.  For switching impulses, other parameters apply; these are dealt with in clause 8.  The test equipment used in lightning and switching impulse applications is basically the same.  Differences are in details only, such as values of resistors and capacitors (and the terminal connections of the test object).  To meet the different requirements of the waveshape for lightning and switching impulses, due consideration has to be given to the selection of the impulse generator parameters, such as capacitance and series and discharge (parallel) resistances. For switching impulses, large values of series resistors and/or load capacitors may be necessary, which will result in significant reduction of the efficiency.  While the output voltage of the impulse generator is determined by the test levels of the windings with respect to their highest voltage for equipment *U*m for the test object, the required energy storage capability is essentially dependent on the inherent impedances of the test object.  A brief explanation of the principles of waveshape control is given in annex A.  The arrangement of the test plant, test object and the interconnecting cables, earthing strips, and other equipment is limited by the space in the test room and, particularly, the proximity effect of any structures. During impulse testing, zero potential cannot be assumed throughout the earthing systems due to the high values and rates of change of impulse currents and voltages and the finite impedances involved. Therefore, the selection of a proper reference earth is important.  The current return path between the test object and the impulse generator should be of low impedance. It is good practice to firmly connect this current return path to the general earth system of the test room, preferably close to the test object. This point of connection should be used as reference earth and to attain good earthing of the test object it should be connected to the reference earth by one or several conductors of low impedance (see IEC 60060-2).  The voltage measuring circuit, which is a separate loop of the test object carrying only the measuring current and not any major portion of the impulse current flowing through the windings under test, should also be effectively connected to the same reference earth.  In switching impulse testing, since the rates of change of the impulse voltages and currents are much reduced compared with those in a lightning impulse test and no chopping circuit is involved, the problems of potential gradients around the test circuit and with respect to the reference earth are less critical. Nevertheless, it is suggested that, as a precaution, the same earthing practices should be followed as used for lightning impulse testing.  **6. Calibration**  It is not the intention of this standard to give any recommendation on measuring systems or their calibration but, of course, the apparatus which is used should be approved in accordance with IEC 60060. Before a test, an overall check of the test circuit and the measuring system may be performed at a voltage lower than the reduced voltage level. In this check, voltage may be determined by means of a sphere gap or by comparative measurement with another approved device. When using a sphere gap, it should be recognized that this is only a check and does not replace the periodically performed calibration of the approved measuring system. After any check has been made, it is essential that neither the measuring nor the test circuit is altered except for the removal of any devices for checking.  Information on types of voltage dividers, their applications, accuracy, calibration and checking is given in IEC 60060-2.  **7. Lightning impulse tests**  **7.1 Waveshapes**  The values of waveshape specified may not always be obtainable. In the impulse testing of large power transformers and reactors, of low winding inductance and/or high surge capacitance, wider tolerances may have to be accepted.  The surge capacitance of the transformer under test being constant, the series resistance may have to be reduced in an attempt to obtain the correct front time *T*1 or rate of rise, but the reduction should not be to the extent that oscillations on the crest of the voltage wave become excessive. If it is considered desirable to have a short front time (preferably within the specified limits) then oscillations and/or overshoots greater than ±5 % of the peak voltage, allowed in IEC 60060-1, may have to be accepted. In such an event, a compromise between the extent of allowable oscillations and the obtainable front time is necessary. In general, oscillations not greater than ±10 % should be aimed at, even with extensions to the front time as necessary and as agreed between manufacturer and purchaser. The value of the test voltage is determined according to the principles of IEC 60060-1.  For large power transformers and particularly the intermediate and low-voltage windings thereof, the virtual time to half-value *T*2 may not be achievable within the value set by the tolerance.  The inductance of such windings may be so low that the resulting waveshape is oscillatory. This problem may be solved to some extent by the use of large capacitance within the generator, by parallel stage operation, by adjustment of the series resistor or by specific test connections of the terminals of windings not under test or, in addition, of the non-tested terminals of windings under test.  Impedance earthing, rather than direct earthing, of the non-tested winding terminals results in a significant increase in the effective inductance. For directly earthed terminals, only the leakage inductance (determined by the short-circuit impedance) is involved.  For impedance earthed terminals, the main inductance becomes predominant. This can make the effective inductance 100 to 200 times greater than with direct earthing.  When impedance earthing of any non-tested terminal is employed, it is necessary to ensure that the voltage to earth appearing on any non-tested terminal does not exceed  – 75 % of the rated lightning withstand voltage of that terminal for star-connected windings;  – 50 % of the rated lightning withstand voltage of that terminal for delta-connected windings (because of opposite polarity voltages to earth on the delta terminals – see also 7.4).  When the waveshape is oscillatory due to extremely low inductance and/or small impulse generator capacitance, the amplitude of the opposite polarity should not exceed 50 % of the peak value of the first amplitude. With this limitation, guidance for selecting impulse generator capacitance and adjusting waveshapes is given in annex A.  **7.2 Impulses chopped on the tail**  **7.2.1 Time to chopping**  Different times to chopping *T*c (as defined in IEC 60060-2), will result in different stresses (voltage and duration) in different parts of the winding(s) depending on the winding construction and arrangement employed. Hence, it is not possible to state a time to chopping which is the most onerous either in general or for any particular transformer or reactor.  The time to chopping is therefore not regarded as a test parameter provided that it is within the limits of 2 μs and 6 μs as required by IEC 60076-3.  Oscillograms or digital recordings of chopped waves, however, are only comparable for almost identical times to chopping.  **7.2.2 Rate of collapse and amplitude of reversed polarity of the chopped impulse**  The characteristic events during chopping are largely dependent on the geometrical arrangement of the chopping circuit involved and on the impedance of the chopping circuit and of the test object, all of which determine both the rate of collapse and the amplitude of the opposite polarity peak.  In IEC 60076-3, the amount of overswing to opposite polarity has been limited to 30 % of the amplitude of the chopped impulse. This, in fact, represents a guideline for the arrangement of the chopping circuit and may entail the introduction of additional impedance *Z*c in this circuit to meet the limit (see figure 1).  The chopping loop, however, should be as small as possible to obtain the highest rate of collapse, but the overswing to opposite polarity should be limited to less than, or equal to 30 %. On multiple layer windings, the layer impedance may damp the collapse normally to the extent that it does not oscillate around zero (see figure B.20).  The recommendation in IEC 60076-3 to use a triggered-type chopping gap is made because of its advantage in obtaining consistency of the time to chopping, thereby facilitating the comparison of oscillographic or digital recordings not only before but also after chopping.  The latter part will only be comparable for reasonably identical times to chopping.  **7.3 Terminal connections and applicable methods of failure detection**  **7.3.1 Terminal connections**  It is essential that the terminal connections of the test object and the earthing practices employed relate to the method of failure detection adopted.  Connections for impulse testing are detailed in IEC 60076-3 for transformers and in IEC 60289 for reactors. Normally the non-tested terminals of the phase winding under test are earthed and the non-tested phase windings are shorted and earthed.  However, in order to improve the wavetail *T*2, resistance earthing of the non-tested windings may be advantageous (see clause 5 and 7.1) and, in addition, the non-tested line terminals of the winding under test may also be resistance earthed.  In addition to the methods of waveshape adjustment in 7.1, the following factors have to be considered:  a) if a terminal has been specified to be directly earthed or connected to a low-impedance cable in service, then that terminal should be directly earthed during the test or earthed through a resistor with an ohmic value not in excess of the surge impedance of the cable;  b) earthing through a low-impedance shunt for the purpose of impulse response current measurements may be considered the equivalent of direct earthing.  When non-linear elements or surge diverters – built into the transformer or external – are installed for the limitation of transferred overvoltage transients, the impulse test procedure should be discussed in advance for each particular case. Refer also to IEC 60076-3.  **7.3.2 Applicable methods of failure detection**  Failure detection is normally accomplished by examination of the oscillographic or raw data digital records of the applied test voltage and the impulse response current.  Different transients can be recorded and used separately or in combination, as shown in figure 2. These are listed a) to e) below. It is essential, in acceptance testing, to record at least one of these transients in addition to the applied test voltage:  a) the neutral current (for star and zigzag connected windings of which the neutral may be earthed during the test);  b) the winding current (for all other windings and star and zigzag connected windings of which the neutral may not be earthed during the test);  c) the current transferred to an adjacent shorted and non-tested winding, sometimes referred to as capacitively transferred current;  d) the tank current;  e) the voltage transferred to a non-tested winding.  The sum of items a), c) and d) or of items b), c) and d), is sometimes referred to as line current.  When testing reactors, both of the shunt and series types, items c) and e) are inapplicable; item d) may be applied but only as an additional means of transient recording since it is likely to be less sensitive than when used in transformer testing.  **7.4 Test procedures**  The relevant test sequences for full-wave tests or for full- and chopped-wave tests are given in IEC 60076-3.  The preferred method of test is that of direct application although in special cases where the intermediate or low-voltage winding cannot, in service, be subjected to lightning overvoltages from the system connected to it, the "transferred surge" method may alternatively be employed. The impulse test of the low-voltage winding is then carried out simultaneously with the test of the associated high-voltage winding. In these conditions, the waveform of the transferred voltage does not conform with that specified in IEC 60076-3. It is more important to try to obtain the required voltage level by means of termination resistors of sufficiently high value. However, this may not always be possible even with the highest values of resistors. In this test, high inter-phase voltages may occur on delta-connected windings and the danger of overstressing inter-phase insulation, internal or external, may limit the voltage that can be applied to the low-voltage winding. The appropriate limits may be established by transient analysis with a low-voltage recurrent surge generator.  By their very nature, non-linear protection devices connected across the windings may cause differences between the reduced full-wave and the full-wave impulse oscillograms or digital recordings. Proof that these differences are indeed caused by operation of these devices should be demonstrated by making two or more reduced full-wave impulse tests at different voltage levels to show the trend in their operation. To show the reversibility of any non-linear effects, the same reduced full-wave impulses should follow up the full-wave test voltage in a reversed way.  Example: 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.  Test methods for transformer neutrals are given in IEC 60076-3. When the indirect method is used, i.e. by an impulse transmitted to the neutral from one or more line terminals, the waveshape cannot be specified since it is controlled basically by the transformer parameters.  The direct method, involving an impulse voltage applied to the neutral with all line terminals earthed, permits a longer duration of wavefront, up to 13 μs. In this case, the inductive loading of the generator is significantly increased and it may be difficult to achieve times to half-value set by the tolerances. Impedance earthing of the non-tested terminals of the winding under test may then be applied.  **7.5 Recording of tests**  **7.5.1 General**  Either analogue or digital recording systems may be used for the recording of lightning impulse voltage and current response waveshapes.  **7.5.2 Analogue and digital recording systems**  The requirements for analogue oscilloscopes and digital recorders are given in IEC 61083-1.  Digital recording offers the potential for mathematical interpretation of the results and allows additional mathematical processing to be used, for example, for fault analysis in recordings.  These techniques show promise but interpretation of the results is not yet proven nor unambiguous.  It should be emphasized that for the purpose of presenting results for acceptance by comparison of traces, the waveforms obtained by digital measurements should be produced from the raw data and not subjected to any mathematical processing, filtering, smoothing, etc.  It is equally important to use the raw data for non-standard waveshape evaluation.  (Figures B.18, B.19 and B.21 show significant differences in amplitude and front time *T*1 and time to half value *T*2 evaluations.)  When digital recorders are used as straight-forward measuring instruments for recording of voltage and current waveshapes, without the purpose of mathematical processing (see clause 10) of the recorded data, they are to be regarded as technically advanced analogue instruments. IEC 60076-3 requires simultaneously the measurement of a) the applied voltage; b) at least one of the transients listed in 7.3.2; hence, at least two independent recording channels are necessary.  While the applied voltage is uniquely defined, the choice of the other characteristic to be recorded is dependent on the selection of the method of failure detection.  **7.5.3 Analogue recording of waveshapes**  To facilitate the assessment of the test results, which is primarily based on the comparison of recordings taken at reduced and full levels, it is advantageous to provide for recordings of equal amplitude by the use of appropriate attenuators at the oscilloscopes.  **7.5.3.1 Analogue recording of the impulse voltage waveshape**  a) Determination of the impulse voltage waveshape  The preferred sweep time for records taken for waveshape determination during preliminary adjustment of the test circuit parameters is ≤10 μs for the wavefront record (longer sweep times may be necessary when testing transformer neutrals). The wavetail record should permit the evaluation of the time to half-value and, on occasions, the amplitude of reversed polarity.  b) Applied impulse test voltage wave recording  In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault  which may be present:  – for full waves, the sweep time should not be less than 100 μs;  – for chopped waves, a sweep time of 10 μs to 25 μs is usually found sufficient.  For the test report (see clause 11) one pertinent recording is normally sufficient for acceptance tests; for diagnostic testing, however, several records with different sweep times may be required.  **7.5.3.2 Analogue recording of the impulse response current**  Impulse current is normally the most sensitive parameter in failure detection. Therefore, the recorded current waves are the main criteria of the test result.  Depending on the form of the current trace and on the use of linear or exponential sweeps, it may be necessary to use more than one record with different sweep times. The resolution achieved should ensure that  a) as clear a representation as possible is obtained from the oscillograms, including the higher frequency components near the front of the wave;  b) the current record is of sufficient duration to permit detection of any discrepancies occurring late in time. It is difficult to lay down preferred rules for sweep speeds and what is meant by late in time as the response of every transformer is different and the speed is to some extent dependent on the type of winding employed. When recording neutral or winding current, recording should continue at least until the inductive peak has been reached, thus permitting examination of the wave to determine if there has been any change in inductance caused by short-circuiting of turns as a result of insulation failure.  **7.5.4 Digital recording of waveshapes**  The principle of digital recording is the measurement of voltage or current waveshapes by taking samples during the test at regular time intervals. These samples should be presented directly as raw data for evaluating waveshape parameters (see 7.5.3.1) and also for the assessment of test results based on the comparison of recordings taken at reduced and full impulse voltage levels (see 7.5.3.2). Additionally, the recorded data may also be processed by wave analysing algorithms, for example, for fault analysis in recordings (see clause 10).  During impulse tests, high electromagnetic fields are produced in the vicinity of the test setup.  Protection of the sensitive electronic devices in the digital recording system, the entire processing equipment and its power supply against these fields is required.  The digitizer screens should have a resolution of ≥768 × 1 024 pixels and the printers should have ≥ 300 dots per inch.  **7.5.4.1 Digital recording of the impulse voltage waveshape**  a) Determination of the impulse voltage waveshape  The preferred period for the presentation of data for the records taken for waveshape determination during preliminary adjustment of test-circuit parameters is ≤10 μs for the wavefront record (longer presentation times may be necessary when testing transformer neutrals). The wavetail record should permit the evaluation of the time to half-value and, on occasions, the amplitude of reversed polarity.  IEC 61083-1 specifies a 9-bit, 60 MHz digitizer as the minimum resolution of the digitizer for the registration of impulse voltage and current waveshapes. When zooming in on 10 μs time-periods or less for the evaluation of the wavefront or for the evaluation of chopped impulses, the use of a 10-bit digitizer and 100 MHz sampling frequency should be considered.  Historically, waveshape evaluation is based on oscilloscopic records, engineering rules and eye evaluation of waveshape parameters. With the application of digital recorders in highvoltage testing of power transformers, a warning with respect to amplitude and time parameters should be given with respect to the evaluation of non-standard waveshapes.  In particular, when testing high-power-rated low-voltage windings with resulting unipolar overshoots with frequencies less than 0,5 MHz, IEC 61083-2 is not applicable for the amplitude evaluation of such non-standard waveshapes. Errors in excess of 10 % have been observed due to the built-in curve smoothing algorithms in the digitizers (see figures B.18, B.19 and B.21).  In such cases, careful evaluation of the raw data plots using engineering judgement is required. A parallel measurement of the peak voltage by a peak voltmeter according to IEC 61083-1 is highly recommended.  b) Applied impulse test voltage wave recording  In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present  – for full waves, the period for the presentation of sampled data should not be less than 100 μs;  – for chopped waves, a period for presentation of 10 μs to 25 μs is usually found sufficient.  Sampling frequencies of 10 MHz to 20 MHz per channel of the digitizer normally suffice because the maximum frequencies of part winding resonance normally do not exceed 1 MHz to 2 MHz. If high frequencies are observed in the voltage or current traces these are due to parasitic resonance in the measuring circuit or noise in the earthing system.  It is therefore recommended that higher sampling frequencies (as mentioned before) be used to discriminate noise in the measuring circuit from the actual behaviour of the test object.  For wave analysis, it is important to take samples over the complete waveshape until the wave is completely damped, using the maximum available memory of the digitizer. It is important to programme the digitizer in such a way that a sufficient number of samples is present to determine the virtual starting-point of the wave.  It is, furthermore, important to use the maximum available resolution of the input amplifiers of the digitizer. For that reason, a number of 50 % pre-shots may be needed to determine the optimum range for the amplitude of the voltage wave and/or the offset for each channel.  Special attention should be given to the amount of overswing to opposite polarity of lightning impulses. When measuring such overswing, clipping of the recorded waveshape may occur by saturation of the input amplifier in the digitizer in the chosen range.  One pertinent recording (see clause 11) is normally sufficient for acceptance tests.  For diagnostic purposes, however, the software of the system offers the possibility to examine the wave over the entire sampling time, or part of the wave as all information is stored in the computer memory. The software can subtract the full wave and the reduced wave and show differences on an adjustable magnified scale. However, problems might arise for the fast rising part of the waveshape where the proper time adjustment of the two curves can be difficult to accomplish.  **7.5.4.2 Digital recording of the impulse response current**  Impulse current is normally the most sensitive parameter in failure detection. Therefore, the recorded current waves are the main criteria of the test result. The presentation of the recordings for the acceptance test are the same as for the presentation of oscillograms in 7.5.2.2.  The stored data in the memory of the digitizer, however, allows for any other presentation of the same recording by zooming in or out at different time scales. Requirements with respect to sampling frequencies and resolution of the digitizers' input channels are the same as given in 7.5.3.1.  In order to benefit from additional mathematical investigation tools, such as transfer function analysis (see clause 10), for the examination of the test results, it is important that the same recording time for the recording of the impulse current and voltage is used.  **8. Switching impulse tests**  **8.1 Special requirements**  The response of transformers and reactors to switching impulses is very different because transformers have a complete magnetic circuit and the relatively long duration of the switching impulse therefore allows the establishment of a significant amount of core flux (see IEC 60076-3). This is not the case for reactors for which, in addition, waveshape problems and test procedures are different. Therefore, the two items of equipment are dealt with separately.  **8.2 Transformers**  **8.2.1 Waveshapes**  As indicated in IEC 60076-3, there are no strict values specified for the virtual front time of a switching impulse wave. It should, however, be sufficiently long to ensure essentially uniform distribution of voltage. This normally requires front times of ≥100 μs. It is determined by the effective winding capacitance, any load capacitance and the series resistances.  The wavetail is influenced not only by the usual waveshaping components but also by a probable saturation of the core. For most transformers, at full test level, the exponential decay of the wavetail is interrupted by a sudden fall through zero, at a variable time after the crest, due to core saturation. Therefore, the virtual time to half-value is not used to specify the wavetail of the applied switching impulse. Instead, the waveshape is defined by its time above 90 % *T*d and by the requirement of the time to first zero passage *T*z. *T*d ≥ 200 μs and *T*z ≥ 500 μs, but preferably 1 000 μs, are defined in IEC 60076-3. These quantities are illustrated in figure 3a.  The time taken to saturate the core is dependent on the core size, its initial state of magnetization and the level and waveshape of the applied voltage.  Unless the core magnetization state is identical before each switching impulse application at a given voltage level, identical waveshapes on successive applications will not be obtained. In addition, identical waveshapes at reduced and full test levels cannot be obtained. See 8.2.3 for test procedure which reduces the effects of core saturation.  Core saturation does not usually occur on reduced-level voltage applications and may not even occur on full-level applications. When it does occur, its effect on the voltage waveshape may be large or small depending on the amount of saturation involved. For this reason, when switching impulses are applied from the high-voltage side of the transformer, it is possible to establish *T*1 and *T*d from the reduced voltage applications. *T*z cannot be established until the first full-level voltage application is made. When switching impulses are performed from the low-voltage side of the transformer, only *T*1 can be established from reduced voltage applications. In this case, *T*d and *T*z can only be determined from full test-level shots.  It should be noted that there may be significant differences in the shape of the wavetail on different limbs of a transformer due to the different reluctances of the magnetic circuit involved.  **8.2.2 Terminal connections and applicable methods of failure detection**  **8.2.2.1 Terminal connections**  In order to comply with the requirements of IEC 60076-3, there is only one admissible test connection for three-phase transformers. This connection is shown in figure 4, which indicates that the neutral should always be earthed and the terminals of the non-tested phases preferably interconnected. (This interconnection of non-tested terminals is not necessary for transformers provided with a delta-connected winding.)  This circuit was selected for three-phase transformers with both three- and five-limb cores to perform simultaneously testing of the phase-to-earth and phase-to-phase insulation with 1,0 p.u. (per unit) and 1,5 p.u. respectively.  The choice of winding to which the test voltage is to be directly applied and the level of that test voltage may normally be left to the manufacturer, commensurate with the requirement that the rated switching impulse withstand level is achieved in the winding with the highest rated voltage.  Short-circuiting of windings not under test is not practicable since the effect of such shortcircuiting during the switching impulse test is basically the same as in an induced voltage test.  Whilst the basic switching impulse wave is inductively transferred, the interphase capacitive coupling and the inherent phase capacitances and inductances can cause additional oscillations which are superimposed on the transferred voltages. Figure B.14 gives a clear example of this effect. Hence, the requirement in IEC 60076-3 that a phase-to-phase voltage of 1,5 *U* will occur when a voltage *U* is applied to one terminal, is valid only in principle.  Therefore, during a test, the interphase voltages are likely to be higher than 1,5 *U* if no measures are taken at the non-tested terminals to suppress the oscillatory voltages by means of high ohmic impedance earthing.  The phase-to-earth voltages at the non-tested terminals can be much higher than 0,5 *U*.  High ohmic loading of the non-tested phase terminals of the winding system under test and/or at the non-tested winding phase terminals is a convenient means to achieve appropriate damping. However, resistive loading causes a significant lengthening of the wavefront at the non-tested terminals, resulting in a phase-to-phase voltage of less than 1,5 *U*. This results from the slightly different times at which the maxima of applied (*U*) and induced (0,5 *U*) voltages occur. When the loading is too severe (too low a resistance), the tail time of the applied switching impulse is significantly shortened to the extent that saturation effects may not occur.  The requirement that 1,5 times the voltage between phase and neutral shall be developed between phases cannot be met on shell-type and five-limb core-type transformers without delta-connected windings, as the flux cannot be directed through the windings on the nontested limbs. If no delta windings are available, only 1,0 p.u. phase-to-earth tests can be achieved by short-circuiting and earthing of the winding terminals of the non-tested phases.  Similar considerations with respect to superimposed oscillations are valid also for singlephase auto-transformers.  **8.2.2.2 Methods of failure detection**  For failure detection, normally only the measurement of the applied voltage is sufficient, but when the test is performed by applying the impulse to an intermediate or low-voltage terminal, the voltage should be measured at the terminal with the highest voltage for equipment *Um*.  The current flowing to earth through the tested winding can additionally be used.  **8.2.3 Test procedures**  The test procedure is outlined in IEC 60076-3. This procedure includes reference to measures which may be taken to increase the impulse duration by delaying the possible onset of core saturation.  For the method of direct application to the high-voltage winding, primarily referred to in this guide, the procedure involves the application, to each phase terminal, of  – one negative polarity, reduced test level impulse (between 50 % and 75 % of the switching impulse withstand level);  – introduction of opposite polarity remanence, either by means of positive polarity impulses  of approximately 50 % amplitude or direct current application;  – three negative polarity impulses at the switching impulse withstand level with introduction of opposite polarity remanence prior to each impulse.  The preferred method of introducing remanence is the application of opposite (i.e. positive) polarity impulses of approximately 50% test level. To achieve reasonably identical oscillograms or digital recordings at any test level, it is recommended that the same remanence point should always be established, preferably saturation remanence. This point is reached when the time to the first zero passage remains constant on consecutive impulse applications. The number of the required pre-magnetizing impulses and their level depend on the level of test voltage aimed for. To avoid any problems with external flashovers during this procedure, the level of such positive polarity pre-magnetizing impulses should not exceed 50 % to 60 % of the test voltage.  **8.2.4 Recording of tests**  **8.2.4.1 General**  Recording of the voltage of the high-voltage terminal is required during switching impulse testing. However, due to the possible excessive voltages to earth on the non-tested terminals or between phases, explained in 8.2.2, it is advisable to at least check these voltages.  The voltage record will normally also satisfactorily indicate any fault on magnetic coupled windings not directly subjected to the switching impulse.  Impulse currents may be recorded and will in many cases give additional information about a fault.  For switching impulse voltage recording, it is preferable to use capacitive types of voltage dividers, as resistive voltage dividers would have an influence on the waveshape and may be thermally overloaded. When resistive voltage dividers are used to check the voltage of the non-tested terminals, they should remain in the circuit because they represent a significant loading of the circuit. Properly calibrated capacitive bushing taps can be employed as voltage dividers.  **8.2.4.2 Analogue recording of the impulse voltage waveshape**  a) Determination of the impulse voltage waveshape  For the wavefront record taken for waveshape determination during preliminary adjustment of the test circuit parameters, a sweep which encompasses the peak of the wave is necessary, which normally means 100 μs to 300 μs. For the wavetail record, which is used only to determine the time above 90 % *T*d, a sweep time of 500 μs to 1,000 μs is recommended.  b) Applied impulse test voltage wave recording  In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present, the sweep time has to be long enough to encompass the first zero passage.  This time is longer than the expected time *T*z and is normally 1 000 μs to 2 000 μs.  In exceptional cases, even longer sweep times, for example, 2 000 μs to 3 000 μs may be necessary.  **8.2.4.3 Digital recording of the impulse voltage waveshape**  a) Determination of the impulse voltage waveshape  It is necessary to take samples over the complete waveshape, from the start to the time where the wave is completely damped, using the maximum available memory of the digitizer. It is important to programme the digitizer in such a way that a sufficient number of samples is present to determine the virtual starting-point of the wave. To record the switching impulse, a sampling frequency of 10 MHz is sufficient. The requirements for the digitizer as mentioned in 7.5.3 for the digital recording of lightning impulses are sufficient for the recording of switching impulses.  It is important to use the maximum available resolution of the input amplifiers of the digitizer. A number of 50 % reduced level impulses are needed to determine the optimum range of the voltage and/or the offset for each channel.  Special attention should be given to the effect of magnetic saturation of the core and the possibility of clipping of voltage and current recordings because of saturation of the input amplifiers of the digitizer.  b) Applied impulse test voltage wave recording  In order to determine the amplitude of the test wave and to permit detection of any fault which may be present, the recording has to be long enough to encompass the first zero passage, that is, longer than the expected time *T*z. This normally requires recording times of 1 000 μs to 2 000 μs or 2 000 μs to 3 000 μs in exceptional cases.  **8.2.4.4 Analogue and digital recording of the impulse response current**  As mentioned in 8.2.2, impulse current may be recorded to possibly trace partial discharges.  When this current is measured on the winding to which the impulse voltage is directly applied, whether or not this is the winding on which the specified test voltage level is to be achieved, the current comprises three parts:  – an initial capacitive current pulse;  – a low and gradually rising value of the inductive current component, coincident with the tail of the applied voltage;  – a peak of current coincident with any saturation. This current peak will be coincident with a voltage collapse or decay if it is due to the saturation effect.  Any turn-to-turn or part winding fault will also produce an instantaneous current peak, but with a much more rapid voltage collapse, indicating a flux blockage.  When oscillograms or digital recordings of the impulse response current are taken, it is preferable to employ the same sweep time or sampling time as used for the voltage record.  **8.3 Reactors**  **8.3.1 Waveshapes**  The waveshape obtainable on reactors will be of a damped cosine form, without any saturation effects on the tail, since there is no complete ferro-magnetic circuit through the windings. This waveshape should be characterized mainly by its frequency, determined by the reactor inductance and the generator capacitance, and the damping coefficient. However, practice has been to specify reactor waveshapes as for transformers, that is, by *T*1, *T*d and *T*z (see figures 3b and B.16).  The virtual front time is determined, as for transformers, primarily by the effective winding capacitance, additional load capacitance and the series resistance. It should be long enough to ensure approximately uniform distribution throughout the tested winding. For large values of *T*1, the damping coefficient will be large thus resulting in a relatively short time *T*z.  For small values of *T*1, *T*d will become short and the opposite polarity peak may well approach 75 % of the test voltage level with an ensuing risk of phase-to-earth or phase-to-phase flashover. Due to these implications, it appears logical, as in the case of transformers, to limit the maximum opposite polarity peak to a safe level, of not more than 50 %, and to accept the corresponding values of *T*1, *T*d and *T*z.  Normally the transformer characteristic of *T*d ≥ 200 μs is not a problem for small reactors (<100 Mvar for three-phase reactors with relatively high impedances). For large reactors, *T*d and *T*z as specified for transformers would require excessive impulse generator extension.  For such cases, a minimum value for *T*d and *T*z should be 120 μs and 500 μs respectively to assure adequate volt-time stress.  **8.3.2 Terminal connections and applicable methods of failure detection**  **8.3.2.1 Terminal connections**  Since there is only one winding per phase, the application point for the test voltage is the line terminal of the phase winding which is to be tested. The other terminal of this phase winding should be earthed.  For three-phase reactors, the requirement, as in figure 4, that 1,5 times the voltage between phase and neutral shall be developed between phases, cannot be met. The flux in these reactors cannot be directed through the windings on the non-tested limbs. Hence, the normal impulse test procedures as used for lightning impulse tests are required.  **8.3.2.2 Methods of failure detection**  For failure detection, as for transformers, normally only the measurement of the applied voltage is sufficient but the current flowing to earth through the tested winding should additionally be used.  **8.3.3 Test procedures**  Since there is no core saturation effect, the test procedures for reactors is the same as for lightning impulse tests. They comprise  – the determination of the impulse voltage waveshape;  – the application of one negative polarity reduced test level impulse;  – the application of three negative polarity impulses at the switching impulse withstand level without any pre-magnetization measures.  **8.3.4 Analogue and digital recording of impulse voltage waveshape and impulse response current**  Subject to the waveshape differences described in 8.3.1, the same general principles apply to voltage and current recordings on reactors as for transformers. It is, however, advisable to use sweep times for both voltage and current which cover the second half-cycle of the applied voltage.  For current recordings, it may be advantageous to use, in addition, a shorter sweep time so as to be able to monitor the initial capacitive current in more detail. The basic waveform of the current corresponding to the cosine voltage wave is sinusoidal (see figures 3b and B.16).  **9. Interpretation of oscillograms or digital recordings**  The basic method for judging the results of a test is by comparison between the test waveforms obtained in a given test sequence. Generally speaking, traces recorded from the same channel, under the same test conditions and using the same test circuit constants, should be identical except in the case of non-linear devices. Different test voltage levels should be compensated by appropriate attenuations to obtain the same recording level.  Annex B contains a number of oscillograms and digital recordings taken during actual tests on transformers and reactors demonstrating fault and non-fault conditions. It is, however, strongly emphasized that similar waveform discrepancies on another unit cannot necessarily be taken as arising from the same cause as the faults will present themselves differently from design to design.  **9.1 Lightning impulse**  **9.1.1 General**  Interpretation of oscillograms or digital recordings is based on comparison of the waveshapes of voltages and current records between reduced and rated test voltages or between successive records at rated test voltage. This is a skilled task and it is often difficult to decide the significance of discrepancies, even with considerable experience, because of the large number of possible disturbance sources. Discrepancies of any kind are of concern and should be investigated.  For such an investigation into discrepancies, it is recommended to check first that the test circuit, the measuring circuit and earthing methods are not causing the disturbances. If the disturbances originate in the test circuit, every effort should be made to eliminate them or at least to minimize their effect. It should be remembered that in multi-stage generators, differences in the firing times of the individual stages may give rise to minute changes in the amplitude of current records with high-frequency initial oscillations (without changing the basic frequency). See figure B.13. In the majority of cases, however, these changes are limited to a time period corresponding to 50 % of the wavefront of the applied impulse.  There are sometimes also discrepancies after the peak, which may also originate from the generator, with multiple parallel stage operation, if the discharge circuits are not coincident in time. This may require new setting of the discharge gaps on generators which have both series and parallel gaps.  Secondly, it should be checked that core earthing or any non-linear elements within the test object are not the source of the disturbances. Non-gapped, non-linear resistors may produce a logical and progressive development or change with increasing voltage levels (see figure B.12).  Having eliminated or explained the above sources of discrepancies, variations in the waveshape of voltage or current records between reduced and rated test voltage or between successive records at rated test voltage, which cannot be proved to originate in the test circuit or in non-linear resistors within the test object, are evidence of insulation failure from the test.  **9.1.2 Voltage recordings – Full-wave tests**  The oscillograms or digital recordings of the applied voltage are a relatively insensitive means for failure detection. Thus, the detectable discrepancies indicate major faults in the insulation or in the test circuit.  Provided that the time resolution is sufficiently high, a more detailed analysis of discrepancies is possible.  – Direct faults to earth near the terminal under test will result in a rapid and total collapse of the voltage. A progressive but nevertheless total flashover across the winding under test will result in a somewhat slower voltage collapse, normally occurring in a stepped manner (see figure B.1).  – A flashover across part of the winding will reduce the impedance of the winding, thus resulting in a decrease of the time to half-value. Characteristic oscillations will also occur on the voltage wave at the moment of flashover (see figures B.1 to B.5).  – Less extensive faults, such as breakdown of coil-to-coil or even turn-to-turn insulation are normally not recognizable on the voltage recordings but may sometimes be detected as high-frequency oscillations; current records will normally detect these faults. See figure B.6.  Likewise, incipient faults at or near the terminal under test may also give only small indications on the oscillograms or digital recordings.  Transferred voltage recordings will also indicate the above-mentioned faults. The sensitivity of this measurement is higher than that of the applied voltage.  **9.1.3 Current recordings – Full-wave tests**  Oscillograms or digital recordings of the impulse response current are the most sensitive means for failure detection. However, this sensitivity is accompanied by the possibility of the recordings indicating a number of effects not directly associated with failure. Some possibilities have been identified in 9.1, which may be responsible for erratic bursts of oscillations or wavefront changes on current traces and should be investigated.  Major changes in current records such as amplitude and frequency changes normally indicate part winding breakdowns within the tested winding, between windings or to earth (see figure B.1).  The form of the change will be different depending on the method of failure detection employed.  Currents may increase or decrease and the direction of the change together with the method of fault detection will give guidance on the nature and location of the fault (see figure B.3).  A significant increase, combined with a change in superimposed frequency in a neutral current is indicative of a fault within the tested winding whilst a decrease indicates a fault from the tested winding to an adjacent winding or to earth.  Capacitively transferred current will, for faults in the tested winding or to earth, show an instantaneous change in polarity. There will also be a change in basic frequency and there may be a decrease in amplitude. A fault from the tested winding to an adjacent winding will show an instantaneous increase in amplitude in the same polarity sense and a change in basic frequency.  Small, local, jagged disturbances, perhaps spread over 2 μs or 3 μs, are a possible indication of severe discharge or partial breakdown in the insulation between turns or coils or coil connections. For windings of small series capacitance, that is, exhibiting essentially travelling wave behaviour, it may be possible to identify the source of disturbances by evaluating the time difference between the arrival at the neutral of the capacitive and the travelling wave disturbances.  **9.1.4 Voltage and current recordings – Chopped-wave tests**  Comparison of the chopped-wave recordings after the instant of chopping is not normally possible unless the instants of chopping are almost identical. Similar but not necessarily identical instants of chopping are achieved by use of triggered-type chopping gaps (see figure B.10). Even small differences in the instant of chopping, can, for some transformers, give rise to marked differences in the oscillation pattern after the chop (this pattern being a superposition of the transient phenomena due to the front of the original impulse and the chopping) and these differences may confuse comparison between the records of successful applications and those where a fault exists (see figure B.11).  When using digital recording techniques, the transfer function analysis as described in clause 10 may be helpful to eliminate this confusion (see figure B.17).  Any changes in the frequency of the voltage and current recordings after the chopping should be investigated. These changes may be caused by either a flashover in the return loop to the laboratory earth or an internal failure in the test object.  When making the chopped wave test, failure of the chopping gap to chop, or any external part to spark over, although the voltage recording shows a chopped wave, gives a definite indication of a failure either within the test object or in the test circuit.  Provided that the time to chopping is reasonably identical from one voltage application to another, failures during this test will be detectable both in the voltage and current recordings by differences in the oscillations after chopping. See figures B.8 and B.9. There are, however, cases where the fault occurs before the instant of chopping and then the same considerations apply as for full-wave tests (see figures B.2 and B.7).  **9.2 Switching impulse**  **9.2.1 Voltage recordings**  In switching impulse tests, owing to the uniform distribution of voltage throughout the winding, the fault normally involves major deterioration in the form of a short circuit between sections, parts of a winding or even between windings or to earth. These types of fault cause a significant change in the voltage wave either as a complete collapse of the wave or a shortening of the tail or, sometimes, as a temporary dip in the trace. Hence, the voltage records on switching impulse tests are a sufficiently sensitive means for detection of most faults (see figure B.15).  For transformers, any part-winding defect (turn-to-turn failure, disc-to-disc breakdown, or breakdowns in tapping windings) will result in a flux blockage and will easily be detected by voltage and current records.  For gapped core reactors, which have only one winding per phase and no closed magnetic loop, the detection of turn-to-turn faults may be very difficult, or faults may be even left undetected. Here a higher resolution of the capacitive current flowing to earth, or a second current record (the tank current), may be helpful. In such cases, higher resolution recording to cover the time to peak and to the opposite polarity of the applied cosine wave is recommended.  Any wavetail shortening in transformer tests is usually quite distinguishable from variation in the length of the wavetail resulting from differing initial states of core magnetization on successive applications; nevertheless, the closer the initial states can be matched, the easier it becomes to distinguish between a fault and a non-fault condition.  **9.2.2 Recordings of the impulse response current**  The general waveform of the current record has been described in 8.2.4.4 for transformers and in 8.3.4 for reactors. Except at the start of the wave or, in the case of transformers, in the vicinity of core saturation, sharp changes of current occurring at the same time as any distortion of the voltage wave are indicative of failure. With the nature of faults to be expected, current records are as sensitive as voltage records.  **10. Digital processing, including transfer function analysis**  With the introduction of digital recording techniques in LI and SI impulse testing, there are now additional tools available for failure analysis.  In transfer function analysis, the real time records of both the applied voltage *U*(t) and the resulting impulse response current *I*(t), either at the transformer neutral or at the shorted nontested winding to earth (capacitively transferred current), can be transferred by Fast Fourier Transformation (FFT) algorithms to the frequency domain, respectively *U*(ω) and *I*(ω).  Then voltage and current spectra (*U*(ω) and *I*(ω)) are mathematically treated as follows:  a) by division of *I*(ω)/*U*(ω) to form the transfer admittance function,  or  b) by division of *U*(ω)/*I*(ω) to form the transfer impedance function.  For the passive network of a transformer, both the admittance function and the impedance function are considered as a characteristic function in the frequency domain and should be independent of the waveshape. However, since the voltage spectrum *U*(ω) does not exhibit any zero points, the transfer admittance function *I*(ω)/*U*(ω) is preferably used in transfer function analysis.  Examples of such transfer function are given in figure B.17.  From the quadrupol 1) theory the failure indications are derived as follows for the admittance function.  1) Any shift of significant poles in the transfer function is indicative of a part-winding breakdown.  2) Any flattening of the poles is said to be indicative of partial discharges.  1) The quadrupol theory is a mathematical tool to describe the relationship between input and output quantities in a linear electrical network in the time and frequency domain.  However, changes in the impulse current and/or the applied voltage which do not lead to a change in transfer admittance function, indicate a test circuit problem rather than a test object problem and hence is a tool to differentiate between internal and external failures.  It is emphasized that this technique is not fully proven for all cases and at present is only recommended as an additional aid to interpretation of results.  The final acceptance of test results is still based on comparison of waveforms as stated in 7.5.  Digitizers have been used in impulse testing since the 1980s. However, the literature and experience regarding transfer function analysis was for many years contradictory. There are several reasons for these contradictions, namely  a) transformers and in particular the lightning impulse test circuits cannot be represented by a lumped linear circuit element for which quadrupol theory is fully applicable;  b) digitizers may have non-standardized in-built filters to filter noise from the signal which may  – result in incipient fault indications being filtered out and not recognized;  – affect the waveshape independence of the admittance function;  c) the good/bad criteria for the deviations in the different fault conditions have not yet been established to an adequate degree.  This new technology represents a very powerful tool for the future, because it may also be used for on-line condition monitoring, both for dielectric defects and for mechanical defects after severe short-circuits.  In the following a few example recordings, both for real time and transfer function analysis, are presented.  **Case 1: Example recordings of digitally evaluated non-standard waveshapes**  – For non-standard waveshape 1,44/46 μs with 19 % overshoot, evaluated by tangent through tail decay according to IEC 60060-1, see figure B.18. Here the error in amplitude evaluation may be greater than 10 % due to the unknown in-built curve smoothing algorithms of digitizers.  – For non-standard waveshape 2,48/50 μs, having superimposed oscillations with >50 % amplitude and frequency less than 0,5 MHz, see figure B.19. Here the digitizer evaluated the time to half-value as 5 μs, based on the first passage of the superimposed oscillation, whereas evaluation according to IEC 60060-1 shows 50 μs.  – For non-standard chopped wave on a layer type winding, see figure B.20. Here the layer impedance avoids rapid collapse and oscillations around zero of the chopped wave to earth. (Compare oscillograms or digital recordings in figures B.8 to B.11 with figure B.20.)  – For comparison of non-standard waveshapes by digitizers of different make from the same recording: in the example in figure B.21, a difference of 7 % in amplitude (109,9 kV versus 102,3 kV) and of 9 % in the *T*1 parameter (2,55 μs versus 2,34 μs) is found. The difference in the *T*2 parameter is not explainable. The reading of the calibrated parallel peak voltmeter was 110 kV.  **Case 2: Responses from test-circuit problems**  – For test-circuit problems caused by a sparkover to earth from a measuring cable, see figure B.22a. The capacitively transferred current from the LV winding sparks to a different earth than the tank and generator earth, resulting, after comparing with the reduced fullwave test, in  a) no indication in the voltage;  b) clear indication in the current;  c) clear indication in the transfer function analysis.  – In the transfer function, flattening of poles is present, but no change in frequency.  This indicates discharges.  – After correction of the fault in the measuring cable, the impulse test was repeated. Figure B.22b shows a perfect match between the transfer functions at reduced- and full-wave impulse tests.  **Case 3: Responses from test object failures**  – A failure digital recording of a tap changer lead flashover between taps is shown in figure B.23a. The real time recordings of voltage and current at the full impulse and the transfer function show significant changes compared to the reduced full-wave impulse test.  – For failure digital recording between a coarse and a fine regulating winding, see figure B.23b. Significant changes occur in all real time and transfer function records.  As can be seen from the records in all previously shown examples, all defects were also detected by the real time records.  **11. Impulse test reports**  A report of the impulse tests conducted on the test object should include at least the following information.  a) General information, including  – type, rating and voltage of the equipment tested;  – serial number;  – tap position on which the test is carried out;  – place and date of the test;  – manufacturer’s test engineer;  – purchaser’s witnessing engineer;  – standard to which the equipment is tested;  – specified test levels and waveshapes.  b) A tabulation showing impulse tests conducted on each terminal including  – type and magnitude of test waves;  – numbering of recordings for identification and easy cross-referencing;  – actual test voltages for LI, full or chopped waves, and for SI;  – actual set-up parameters (internal and external) for the impulse generator;  – actual waveshape parameters for LI (*T*1, *T*2, *T*c) and for SI (*T*1, *T*d, *T*z);  – a diagram of the connections for each test, including  – terminal markings;  – which terminal the impulse is applied to;  – earthing arrangements of the non-tested terminals of the tested phase and of the non-tested phases, including values of any earthing resistances or impedances;  – test-circuit details;  – voltage and current measurement positions and arrangements.  c) Reproductions of the pertinent recordings taken during the tests are an important part of the test report. When specified, these recordings should be properly identified and arranged so that the necessary comparisons between full waves and chopped waves can be easily made. The scaling of each axis (that is, magnitude and time) should be shown on every oscillogram or digital recording.  **Key**  1. impulse generator Cg generator capacitance  2. chopping gap CL loading capacitance  3. main circuit *C* effective test object capacitance  4. chopping circuit I, effective test object impedance  5. test object *Rsi*  internal series resistance  6. voltage measuring circuit *Rse* external series resistance  7. reference earth Jtp parallel resistance  8. current shunt Zc additional impedance in the chopping circuit  9. voltage divider Zt (C|) impedance (capacitance) of the high-voltage arm of the voltage divider  *Z2* (C2) impedance (capacitanceK>f the low-voltage arm of the voltage divider  **Figure 1 - Typical impulse test circuit**  **Key**  1. voltage measuring circuit 4 capacitively transferred current  2. tank current 5 current shunts  3. neutral or winding current 6 voltage measuring circuit and transferred voltage  *Z*1 (*C*1), *Z*2 (*C*2) impedances (capacitances) in the voltage divider (see also figure 1)  **Figure 2 – Lightning impulse test terminal connections and applicable methods of failure detection**    **Figure 3a – Transformer switching impulse waveshapes**    **Figure 3b – Reactor switching impulse waveshapes**  **Key**  1. voltage waveshape *T* time between the instant when the impulse is 30 % and 90 % of the peak value  2. current waveshape    *T*1 virtual front time  *T*z time to first zero passage  *T*d time above 90 % of the specified amplitude  **Figure 3 – Transformer and reactor switching impulse waveshapes**    **Key**  1. voltage measuring circuit *Z*1 (*C*1), *Z*2 (*C*2) impedances (capacitances) in the voltage divider (see also figure 1)  2. current measuring circuit  3. loading resistor, see 8.2.2.1  NOTE: An alternative application of impulse to delta-connected winding is shown dotted.  **Figure 4 – Switching impulse test terminal connections and methods of failure detection**    **Annex A**  (informative)  **Principles of waveshape control**  **A.1 General**  Impulse waves are generated by an arrangement that charges a group of capacitors in parallel and then discharges them in series. The magnitude of the voltage is determined by the initial charging voltage, the number of capacitors in series at discharge, and the regulation of the circuit. The waveshape is determined largely by the capacitances and resistances of the generator and the impedance of the load.  The principles of how to control waveshapes in lightning impulse testing of transformers are indicated by means of the simplified diagrams given in figures A.1 and A.2. They need to be subdivided into two major aspects:  – for high-impedance windings;  – for low-impedance windings.  **A.2 High-impedance windings (*L*t > 100 mH)**  **Figure A.1a Figure A.1b**  **Key**  *C*g generator capacitance *R*s = *R*si + *R*se, total series resistance (see figure 1)  *C* = *C*t + *C*L + *C*1 (see figure 1) *R*p parallel resistance (see figure 1)  **Figure A.1 – Waveshape control for high-impedance windings**  The front time will be  𝑇1 = 3 x + (figure A.1a) (A.1)  or  == 𝑇1 = 3𝑅𝑠 × (figure A.1b ) (A.2)  And the time to half-value will be  *T*2 ≈ 0,7(*R*s + *R*p)(*C*g + *C*) (figure A.1a) (A.3)  or  *T*2 ≈ 0,7*R*p (*C*g + *C*) (figure A.1b) (A.4)  For *R*p >> *R*s and *C*g >> *C*:  *T*1 ≈ 3*R*s × *C* and *T*2 ≈ 0,7*R*p × *C*g (A.5)  In general, both front and tail parameters are adjusted according to these principles applicable for purely capacitive loads. It should, however, be pointed out that the effective transformer capacitance *C*t, included in the values of *C*, is a different physical quantity for front and tail considerations.  For the front time, *C*t can be calculated as *C*t ≈ *C*B + √(*C*s*C*e) where *C*B is the bushing capacitance, *C*s is the winding series capacitance and *C*e is the winding earth capacitance.  For the wavetail, *C*t can be estimated as *C*B plus part of *C*e, dependent on the initial voltage distribution. Evidently, the value of *C*t for tail considerations is of minor importance in most practical cases (see equation (A.5)).  For windings of effective inductances *L*t in the range 20 mH to 100 mH, the winding impedance considerably reduces the discharge time constant (ז = *R*p*C*g). In these cases, the value of *T*2 cannot directly be adjusted according to equation (A.5). To account for this effect, experience has shown that *R*p has to be increased to a value two to ten times greater than the value derived from equation (A.5).  **A.3 Low-impedance windings (*L*t < 20 mH)**  For the front adjustments, the same applies as for high-impedance windings.  For wavetail adjustments, the test object can be represented by its effective inductance as indicated in figure A.2.  **Figure A.2 – Wavetail control for low impedance windings**  The test voltage *U*t will be oscillatory or exponential, depending on the value of the damping coefficient *k* of the circuit. Critically (*k* = 1) or over-critically (*k* > 1) damped circuits result in exponential curves. However, these are normally not applicable since the corresponding resistance values give unacceptably long front times.  When *k* < 1, the test voltage is given by  where  and the damping coefficient  This voltage constitutes a damped oscillating wave (shown in figure A.3).  **Figure A.3 – Damped oscillation**  For a first estimation of *T*2, *R*s is assumed to be zero. Then equation (A.6) becomes:  *U*t = *U*cosω0*t* and the time to half-value is given by  𝑇2 = = √𝐿𝑡𝐶𝑔 (A.7)  but this theoretical condition would give an undamped oscillation with an opposite polarity peak of 100 %.  Such high opposite polarity oscillation may overstress inter-turn and inter-winding insulation due to high oscillatory stresses which can trigger partial discharges and enhanced electrode mechanisms only due to testing limitations. The opposite polarity peak *U*r should therefore be limited to 50 % of the initial peak voltage.  With the limitation of the 50 % opposite polarity peak *U*r, a considerable degree of damping has to be introduced, with the effect that the time to half-value will then be shorter than the value produced by equation (A.7). For this case, the damping factor *k* = 0,25 and the time to  half-value will be  Equations (A.7) and (A.8) give guidance for the control of the wavetail by adjustment of the inductance of the test object *L*t or of the generator capacitance *C*g.  *L*t is influenced by the connection of the non-tested windings. With the non-tested windings short-circuited and earthed (usual connection), *L*t is the leakage inductance of the transformer.  Testing in this configuration generally produces the greatest stress to the insulation between windings or portions of windings, even if a shorter tail results. However, the short tail will not stress the middle of the winding to earth so much as some other possible configurations since the short tail will not sustain the voltage for a long time.  The effective inductance can be increased by resistance loading of the non-tested windings, with the limitation, however, that the voltages at the non-tested winding terminals should not exceed 75% for star-connected windings or 50% for delta-connected windings of their associated lightning impulse withstand level(s).  *C*g can be altered by series or parallel connection of the stages of the impulse generator. According to equation (A.9), the required minimum generator capacitance will be  (A.9)  There are, however, cases where the condition of equation (A.9) cannot always be met because of extremely low values of *L*t or where *L*t can no longer be increased by resistance earthing of the non-tested winding terminals, because of the voltage limitation referred to above. In these cases, the discharge time constant of the circuit is given by  (A.10)  This equation indicates another way of adjusting the wavetail. However, severe reduction of *R*s will result in excessive overshoot or superimposed oscillations at the crest of the impulse wave and also, as described earlier, in an excessive opposite polarity peak. In such cases, it is recommended that additional load capacitance *C*L is used for wavefront control. The load capacitance will then reduce the adverse effects of a small series resistor *R*s.  If the above-mentioned methods of wavetail control are still not sufficient to attain the proper time to half-value, a compromise is necessary between either accepting a shorter time to halfvalue or resorting to resistance earthing at the non-tested terminal(s) of the winding(s) underm test, according to figure A.6. Here again, the 75 % voltage limitation on the non-tested terminal(s) for star-connected windings and 50 % for delta-connected windings of their associated lightning impulse withstand level(s) applies. Preference should be given, however, to a shorter time to half-value.  Item 3 in figure A.4 shows the equivalent transformer with one end of the winding solidly earthed. If the through capacitances *C*1 and *C*2 are large compared to the capacitance *C*3 to earth then a voltage distribution similar to curve M in the graph will result. The final distribution is shown by line N, which means that the envelope of oscillation will be between curves M and M’. When the through capacitances are extremely small compared to the capacitance to earth, then a voltage distribution similar to curve O will occur, which will result in an envelope of oscillation between curves O and O’. With this configuration, there are portions of the winding that may exceed the applied voltage to the line terminals, but generally these windings have long time constants, and the time for point T to oscillate to its maximum is usually long enough that the voltage applied at the terminals has decreased to 50 % of the crest value. This configuration does not produce a sustained stress from winding to earth, but it does stress the insulation within the winding.  This test configuration is very suitable for current measurements since there is no increase in the circuit resistance and the circuit therefore has good response to high-frequency disturbances.  **Key**  1. impulse generator *C*1, *C*2 through capacitances  2. spark gap *C*3 capacitance to earth  3. transformer *C*g, *R*s, *R*p (see figure 1)  X earth *L*1, *L*2 inductances  A winding terminal  B winding neutral end  *E* voltage amplitude on the winding terminal  **Figure A.4 – Effects due to short length of wavetail**  Another possible configuration is to insert a resistance in the earthed end of the winding under test. This configuration tends to change turn-to-turn and coil-to-coil stresses, the amount of change depending on the winding time constants. Item 3 in figure A.5 shows the typical equivalent network of a transformer with the untested end of the winding earthed through a resistor. If the through capacitances *C*1 and *C*2 are extremely large compared to the capacitance *C*3 to earth, a distribution similar to curve P in the graph will result. The final distribution will be similar to curve Q, where all, or almost all, of the voltage appears across the resistor. The envelope of oscillation will then be between curves P and P’. When the capacitance to earth is large compared to the through capacitance, an initial distribution similar to curve S in then graph will occur and the final distribution can again be assumed to curve Q. The envelope of oscillation is now between S and S’. Again it is possible to produce excessively high voltages to earth in parts of the winding. It is general practice to insert only enough resistance to produce an adequate length tail and the voltage appearing across the resistor is limited to not more than 75% of the associated lightning impulse withstand level.  If in the last example, the resistance required to produce an adequate length tail had been smaller, the final distribution line would be lowered to Q’, and the envelope of oscillation would then be between S and S’’. The tail length and the voltage across the resistance should be measured to determine the value of resistance to be used.  This test configuration applies the proper waveshape to the line-end insulation and is suitable for earth current measurements, although the resistance may reduce slightly failure detection sensitivity.  Initially, the full impulse voltage is applied across the winding and resistance in series; therefore, the stress across the winding will be reduced.  **Key**  1 impulse generator  2 spark gap  3 transformer  X earth  **Figure A.5 – Winding earthed through a resistor**  Inserting an inductance between the impulse generator and the winding being tested, sometimes in parallel with *R*s (see figure A.6) increases the total circuit inductance and can often increase the tail time beyond that available with the impulse generator alone.  This configuration relies on a transfer of energy to the inductor from the impulse generator during the front portion of the wave and a transfer of energy from the inductor to the winding during the tail portion of the wave. The amount of improvement in the tail time with this configuration is dependent on the characteristic of the winding and the values of inductance available.  Nearly the same considerations apply for the adjustment of the switching impulse front time.  However, in this case the effective transformer capacitance *C*t for the longer front time is equal to the effective winding earth capacitance *C*e.  **Key**  1. A further method of improving the time to half-value is being developed which uses an additional inductor in parallel with *R*s, thus increasing the total circuit inductance.  2. tested terminal  3. non-tested terminal  **Figure A.6 – Resistance earthing of low-impedance windings**  **Annex B**  (informative)  **Typical oscillograms and digital recordings**  The oscillograms and digital recordings of fault and non-fault conditions reproduced on the following pages are extracted from records of actual tests on core-type power transformers with concentric cylindrical windings and on shunt reactors. Attention is again drawn to the fact that whilst these oscillograms are typical, it cannot be assumed that a discrepancy found on another transformer or reactor of different voltage, design and manufacture, although apparently similar to one illustrated herein, is caused by an identical fault. The intention of illustrating particular faults is to give general guidance only.  **Table B.1 – Summary of examples illustrated in oscillograms and digital recordings**   |  |  |  | | --- | --- | --- | | В.19 | Evaluation with superimposed oscillations | 7.5.2; 7.5.4.1;10 | | В.20 | Non-standard chopped wave on a layer winding | 7.2.2; 10 | | В.21 | Comparison of non-standard waveshapes with different digitizers | 7.5.2; 10; 7.5.4.1 | | Responses from test-circuit problems | | | | В.22 | Test-circuit problem caused by sparkover to earth from a measuring cable | 10 | | Responses from test object failure | | | | В.23 | Full lightning impulse, failure between taps of tap changer and between coarse and fine tapping windings | 10 |   **Figure B.1 a – Reduced full wave (75%) without fault**  **Figure B.1 b – Full wave (100%) with fault**  **(Amplitudes not equalized)**  **Key**  1. applied impulse, 100 μs sweep  2. voltage transferred to low-voltage winding, 100 μs sweep  3. neutral current, 25 μs sweep  **Figure B.1 – Lightning impulse, full-wave failure – Line-to-neutral breakdown across high-voltage winding of 400 kV generator transformer**  **Figure B.2a – Chopped wave (100%) without fault (Note 1)**  **Figure B.2b – Chopped wave (100%) with fault (Notes 1 and 2)**  **Key**  1. applied impulse, 10 μs sweep  2. neutral current, 100 μs sweep  NOTE 1 Since failure occurred before the instant of chopping it is therefore regarded as a full-wave failure.  NOTE 2 Failure after approximately 2 μs clearly indicated in the voltage and neutral current oscillograms.  **Figure B.2 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between discs at entrance to high-voltage winding of 115 kV transformer**  **Figure B.3a – Reduced full wave (62,5 %) without fault**  **Figure B.3b – Reduced full wave (75 %) with fault**  (Amplitudes not equalized)  **Key**  1. applied impulse, 100 μs sweep  2. capacitively transferred current from the shorted, adjacent winding to earth, 100 μs sweep  3. neutral current, 100 μs sweep  NOTE Failure after 30 μs, clearly indicated in voltage, capacitively transferred current and neutral current oscillograms.  **Figure B.3 – Lightning impulse, interlayer breakdown in coarse-step tapping winding of a 400/220 kV transformer**  Figure B.4a – Full wave (100%) without fault  Figure B.4b – Full wave (100%) with fault  **Key**  1. applied impulse, 100 μs sweep  2. neutral current, 100 μs sweep  3. neutral current, 25 μs sweep  4. neutral current, 250 μs sweep  NOTE Failure indicated by minor variations on all records of second full-wave voltage application.  **Figure B.4 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between leads of two 1,1 % sections of outside tapping winding of 400 kV generator transformer**  **Figure B.5a – Reduced full wave (62,5%) without fault**  **Figure B.5b – Full wave (100%) with fault**  **Key**  1. applied impulse, full wave, 100 μs sweep  2. capacitively transferred current from shorted adjacent winding to earth, 100 μs sweep  NOTE Failure indicated in both voltage and capacitively transferred current oscillograms.  **Figure B.5 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown short-circuiting one section of the fine-step tapping winding of a 220 kV transformer**  **Figure B.6a – Reduced full wave (62,5%) without fault**  **Figure B.6b – Full wave (100%) with fault**  **Key**  1. applied impulse, 100 μs sweep  2. neutral current, 100 μs sweep  3. capacitively transferred current from shorted adjacent winding to earth, 100 μs sweep  NOTE Failure after 30 μs to 35 μs, clearly indicated in both neutral and capacitively transferred current oscillograms and no indication in the applied voltage oscillogram.  **Figure B.6 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between parallel conductors of a main high-voltage winding of a 220/110 kV transformer**  **Figure B.7a – Full wave (100%) without fault**  **Figure B.7b – Chopped wave (115%) With fault (Note 1)**  (Amplitudes not equalized)  **Key**  1. applied impulse, 10 μs sweep  2. neutral current, 15 μs sweep  NOTE 1 Since failure occurred before the instant of chopping it is therefore regarded as a full-wave failure.  NOTE 2 Failure just after the peak and before the instant of chop indicated by a 10 % drop in the voltage wave and by the neutral current oscillogram.  **Figure B.7 – Lightning impulse, full-wave failure – Breakdown between foils of 66 kV bushing on tested winding**  **Figure B.8a – Reduced chopped wave (60 %)**  **without fault**  **Figure B.8b – Chopped wave (100 %)**  **with fault**  **Key**  1. applied impulse, 10 μs sweep  2. capacitively transferred current from the shorted adjacent winding to earth, 50 μs sweep  3. neutral current, 50 μs sweep  NOTE Failure after 10 μs to 15 μs clearly indicated in transferred current and neutral current oscillograms.  **Figure B.8 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in the main high-voltage winding of a 115 kV transformer**  **Figure B.9a – Reduced chopped wave (70%)**  **without fault**  **Figure B.9b – Chopped wave (115%) with fault**  **Key**  1. applied impulse, chopped wave, 50 μs sweep  2. capacitively transferred current from the shorted adjacent winding to earth, 50 μs sweep  NOTE Failure indicated immediately after chopping in both the voltage and capacitively transferred current oscillograms.  **Figure B.9 – Lightning impulse, chopped-wave failure – Breakdown between turns in a fine-step tapping winding of a 220 kV transformer**  **Figure B.10a – Reduced chopped wave (75%)**  **Figure B.10b – Chopped wave (100 %)**  **Key**  1. applied impulse, 10 μs sweep  2. neutral current, 100 μs sweep  NOTE Identical voltage and neutral current records obtained when no difference in times to chopping.  **Figure B.10 – Chopped lightning impulse – Impulses at different voltage levels with identical times to chopping when testing a 115 kV transformer**    **Figure B.11a – Reduced chopped wave (62,5%)**  **Figure B.11b – Chopped wave (100 %)**  NOTE Tests with large differences in times to chopping (high-voltage winding). Note changes in the superimposed high-frequency oscillations on the capacitively transferred current and changes in the voltage wave after chop.  **Figure B.11c – Reduced chopped wave (62,5%)**  **Figure B.11d – Chopped wave (100%)**  NOTE Tests with small differences in times to chopping (low-voltage winding). Note changes in the superimposed high-frequency oscillations on the capacitively transferred current but virtually no difference in the voltage waves.  **Key**  1. applied impulse, 25 μs sweep  2. capacitively transferred current, 25 μs sweep  3. applied impulse, 50 μs sweep  4. capacitively transferred current, 50 μs sweep  **Figure B.11 – Chopped lightning impulse – Effects of differences in times to chopping when testing a 220 kV transformer**  **Figure B.12a –Reduced full wave (50 %)**  **Figure B.12b – Reduced full wave (75 %)**  **Figure B.12c – Full wave (100 %)**  NOTE 1 All three oscillograms show neutral current, 75 μs sweep.  NOTE 2 The changes in waveshape shown above are more marked than those which generally result from the presence of non-linear resistors.  **Figure B.12 – Full lightning impulse –**  **Effect of non-linear resistors embodied in neutral end on-load tap-changer**  **of a transformer with separate windings**    **Figure B.13a – Reduced full wave (62,5%)**  **Figure B.13b – First full wave (100 %)**  **Figure B.13c – Second full wave (100 %)**  **Figure B.13d – Final reduced full wave (62,5%)**  **Key**  1. applied impulse, 50 μs sweep  2. capacitively transferred current, 50 μs sweep  NOTE Comparison of the capacitively transferred current records for the 100 % voltage level with those for the 62,5 % voltage level shows initial high-frequency changes.  **Figure B.13 – Full lightning impulse – Effect of generator firing differences at different voltage levels when testing a 400 kV transformer**  **Figure B.14a – 62,5 % test level**  **Figure B.14b – First 100 % test level**  **Figure B.14c –Second 100 % test level**  **Key**  1. applied switching impulse, 5 000 μs sweep  2. induced switching impulse voltage between the inter-connected terminals of the non-tested phase winding and earth (52% of the applied voltage, positive polarity), 5 000 μs sweep  3. neutral current, 5 000 μs sweep  **Figure B.14 – Switching impulse – Satisfactory test on a 400 kV three-phase generator transformer**  **Figure B.15a – 90% test level without fault**  **Figure B.15b – 100% test level with fault**  **Key**  1. applied switching impulse, 5 000 μs sweep  2. neutral current, 5 000 μs sweep  3. neutral current, 500 μs sweep  NOTE Failure indicated at approximately 300 μs at 100 % test level.  **Figure B.15 – Switching impulse – Breakdown by axial flashover of the main high-voltage winding of a 525 kV single-phase, generator transformer**    **Figure B.16a – Reduced test level (60 %)**  **Figure B.16b – Test level (100%)**  **Key**  1. applied impulse, 5 000 μs sweep (*T*1 200 μs, *T*d 225 μs, *T*z 1 000 μs)  2. neutral current, 5 000 μs sweep  **Figure B.16 – Switching impulse – Satisfactory test on a 33 Mvar, 525 kV single-phase shunt reactor**  NOTE Comparison of a reduced full lightning impulse wave (RFW) and a full chopped wave (FCW) on the same terminal of the same transformer. Because the chopped wave contains more high-frequency input for the admittance transfer function, deviations between the RFW and FCW transfer functions only occur at high frequencies.  **Key**  1. reduced full-wave RFW 4 neutral current at FCW  2. full chopped-wave FCW 5 transfer (admittance) function at RFW  3 neutral current at RFW 6 transfer (admittance) function at FCW  **Figure B.17 – Lightning impulse – Comparison of the transfer function of a full wave and a chopped wave**  **Figure 18a – Applied voltage Figure 18b – Neutral current**  NOTE Wave with 19 % overshoot evaluated by tangent through tail decay according to IEC 60060-1, leading to an error of greater than 10 % in amplitude evaluation.  **Figure B.18 – Full lightning impulse – Evaluation of a non-standard waveshape – Influence of in-built smoothing algorithms in digitizers**  **Figure 19a – Applied voltage Figure 19b – Neutral current**  NOTE The digitizer evaluates the time to half-value as 5 μs based on the first passage of the super-imposed oscillations, whereas evaluation according to IEC 60060-1 shows 50 μs.  **Figure B.19 – Full lightning impulse – Non-standard waveshape, superimposed oscillations with >50% amplitude and frequency <0,5 MHz**  **Figure 20a – Applied voltage Figure 20b – Neutral current**  NOTE Non-standard chopped wave on a layer type winding. The layer impedance avoids rapid collapse and oscillations around zero of the chopped wave to earth.  **Figure B.20 – Chopped lightning impulse – Non-standard chopped wave on a layer type winding**  **Figure 21a – Applied voltage Figure 21b – Neutral current**  **Figure B.21 – Full lightning impulse – Non-standard waveshape, comparison of non-standard waveshapes by digitizers of different make from the same recording**  NOTE Measuring cable sparkover from LV winding to different earth than tank and generator earth. 400 MVA G.S.U. 220/21 kV at HV test.  **Figure B.22a – No indication in voltage; clear indication in current; clear indication in transfer function**    **Figure B.22b – After correction perfect match of all real time and transfer function traces**  **Figure B.22 – Full lightning impulse – Test-circuit problem caused by a sparkover to earth from a measuring cable**  **Figure 23a – Tap changer lead flashover between taps of a 300 MVA, 400/110/30 kV transformer**  **Figure 23b – Flashover between coarse and fine tapping windings**  NOTE Significant changes in both real time response and in transfer function.  **Figure B.23 – Full lightning impulse – Failure digital recordings of a flashover between tap leads of a tap changer and of a flashover between coarse and fine tapping windings** |