УДК: 621.3.045.1:621.314.222.6

КҮЧ МАЙ ТРАНСФОРМАТОРЛОРУНУН КЕЛЕМТЕСИНИН ОРОМОСУНДАГЫ ЧАБЫЛУУСУНА ДИАГНОС ЖҮРГҮЗҮҮ ҮЧҮН ТЕХНИКАЛЫК КАРАЖАТТАРДЫ ЖАНА ЫКМАЛАРДЫ ИШТЕП ЧЫГУУ

Калматов У.А., т.и.к., доцент, ukalmatov@bk.ru.
Борукеев Т.С., т.и.к., доцент, tuigun_ktu@rambler.ru
И. Раззакков атындагы Кыргыз мамлекеттик техникалык университети

Бул макалада трансформаторлордун оромдорундагы түрмөктөр аралык чабылуусун аныктоо максатында күч май трансформаторлоруна (КМТ) диагнос коюунун жаңы ыкмасы сунуш кылынат, аны термикалык башкаруу ыкмаларына таандык кылуу мүмкүн. Сунуш кылынган ыкма, мониторинг процессинде алынган негизги элементтердин температурасынын өзгөрүшүнүн чыныгы динамикасынын көрсөткүчүн симуляциялоонун натыйжасында температуранын өзгөрүшүнүн осциллограммасы менен салыштырууга негизделген. Трансформаторлордун оромдорунун түрмөктөр аралык чабылуусун (ТАЧ) табуу максатында КМТ диагностоонун арзан так ыкмасына карата жөнөкөй ыкманы иштеп чыгуу актуалдуу бойдон калууда. Жогоруда көрсөтүлгөн талаптарга кыйла толук жооп берүүчү ыкмалардын бири болуп көзөмөлдөөчү жылуулук усулу кызмат кылышы мүмкүн, ал КМТ температурасын өлчөөгө, баалоого жана талдоого (термографиялык изилдөөгө) негизделген. Трансформатордо ТАЧ болуусун көрсөтүүчү белги майдын учурдагы оордукка таандык эмес температурасы жана анын иштөөсүнө мүнөздүү эмес дүрүлдөөсү болушу мүмкүн

Ачкыч сөздөр: күч май трансформаторлору, диагностика, мониторинг жүргүзүү, трансформатор майы, жылуулук датчиги, оромдор, түрмөктөр аралык чабылуу.

Бүгүнкү күндө күч трансформаторлорунун аралыктан диагнос жүргүзүү усулдары начар өнүккөн. Күч май трансформаторлору диагностоонун колдонулуп жаткан усулдары жеткиликсиз ыкчам болуп саналат, анткени КМТ текшерүү оңдоо бригадасынын объектге чыгуусун талап кылат. Андан тышкары бир катар усулдар талдоо же болбосо кымбат баалуу жабдуулар (мисалы, жылуулук чагылуусун контролдоо усулу) үчүн көп убакытты талап кылат [1-3].

Трансформаторлордун оромдорундагы түрмөктөр аралык чабылуусу оромдордун ар түрдүү участокторунда, башкача айтканда, бири-бирине тийишкен түрмөктөрдө болушу мүмкүн:

трансформатор майы менен;

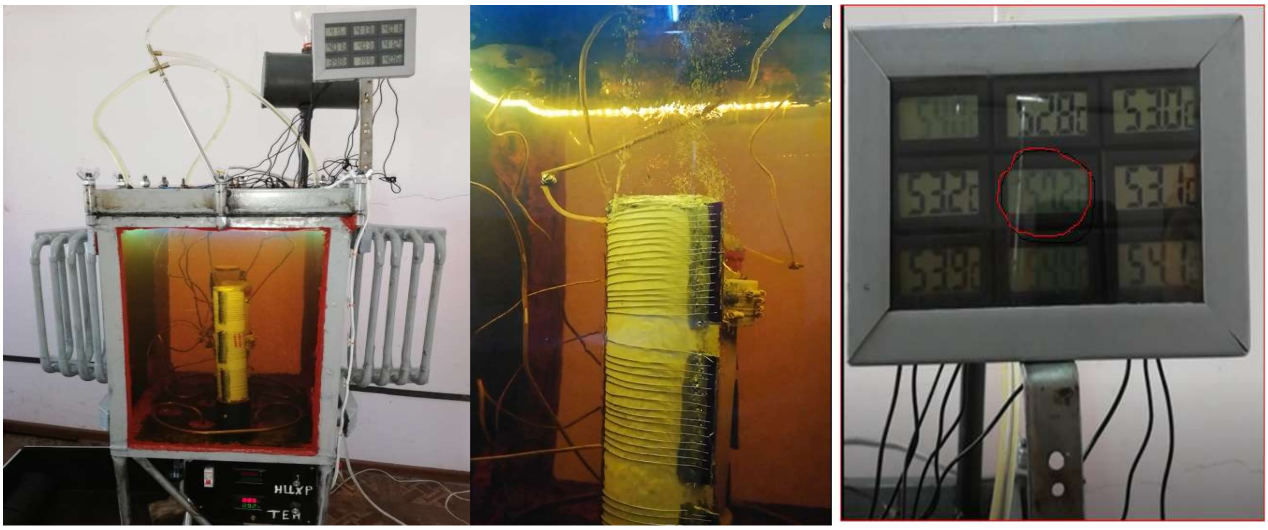
жанаша түрмөктөр менен.

Биринчи вариантта, жабыша калууларда ысыган май өйдө карай агылат, майдын термпературасынын мааниси, анын жогорку катмарында бузулган оромдун үстүндө жайгашкан, ысыкты билдиргичте катталат.

Экинчи вариантта, бардык бузулган ором ысыйт, бул өз артынан оромдун үстүндөгү майдын температурасынын жогорулашына алып келет (2,3-сүрөттөр).

Айтылган божомолдорду текшерүү үчүн:

- Үч оромдуу бир катмарлуу түрмөк менен аткарылган күч май трансформаторунун эксперименталдык стенди иштеп чыгарылган жана түзүлгөн (1-сүрөт).

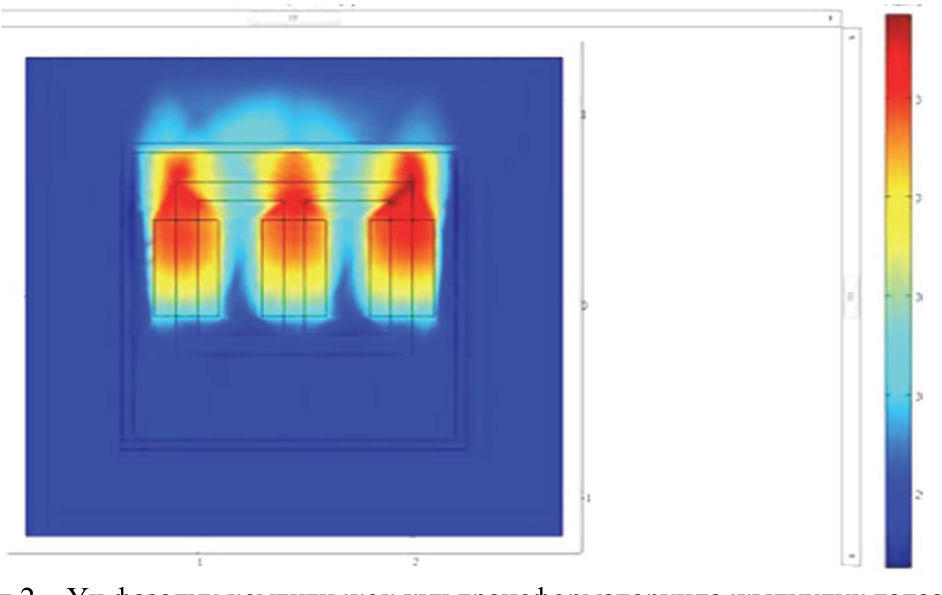


а) б) в)

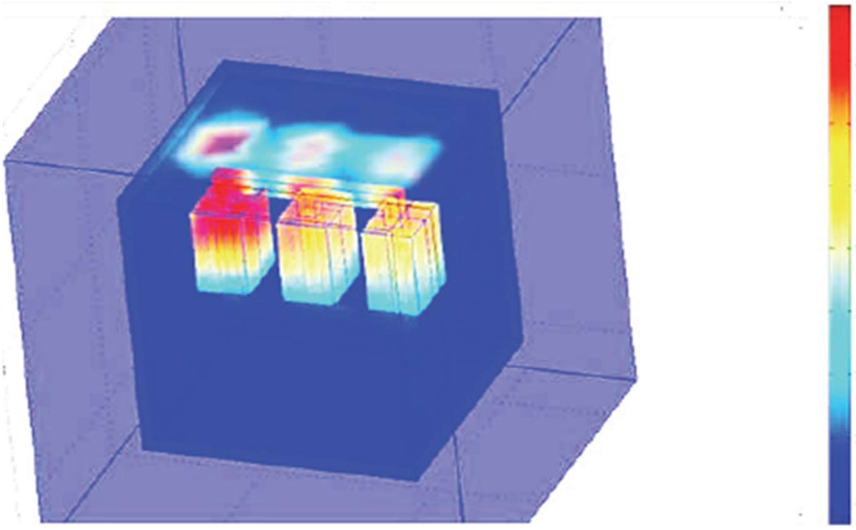
Сүрөт 1 – Күч май трансформаторунун эксперименталдык стенди

- COMSOL Multiphysics программалык пакетин пайдалануу менен трансформатордун жылуулук шарттамдарын моделдөөнүн натыйжалары пайдаланылган [4].

COMSOL Multiphysics – бул өзү кубаттуу интерактивдүү чөйрө болуп саналат, ал дифференциалдуу теңдемелерге, алып айтканда туунду жана интегралдык теңдемелерге негизделген, көпчүлүк илимий жана инженердик маселелерди моделдөө жана акыркы элементтерин эсептөө үчүн кызмат кылат [4].



Сүрөт 2 – Үч фазалуу кемтиги жок күч трансформаторунда жылуулук талаасын бөлүштүрүү [5]



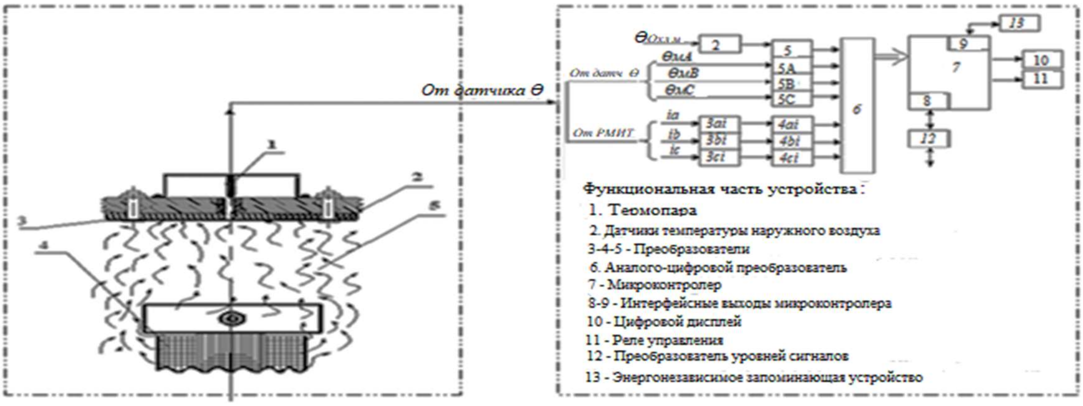
Сүрөт 3 – Үч фазалуу А фазасында (биринчи сол ором) кемтиги бар күч трансформаторунда жылуулук талаасын бөлүштүрүү [5]

Эксперименттин жана моделдештирүүнүн (2,3-сүрөттөр) натыйжалары биз киргизген болжомолдоолордун адилеттүүлүгүн ырастады.

Сүрөт 4 – Маалымат жеткирүүчү курулманын КМТга жайгашуусу: 1 – МЖК; 2 – трансформатордун багынын капкагы; 3 – ысытылган трансформатор майынын агымы

Анын негизинде КМТ түрмөктөр аралык чабылуусун диагностоо үчүн маалыматты жеткирүүчү курулма (МЖК) сунуш кылынган 1 (4,5-сүрөттөр). Диагностоо курулмасынын иштөөсүн түшүндүрүү үчүн, ошондой эле билдиргичтерден курулмага белги берилүүчү агын өткөргүчтүн конструкциясын тактоо үчүн, анын оромдорунун үстүндөгү жогорку катмарларындагы майдын температурасын өлчөө үчүн зарыл болгон элементтери менен үч фазалуу КМТ конструкциясы көрсөтүлгөн (4,5-сүрөттөр).

Биздин сунушубузга ылайык, бактын капкагында 2 (5-сүрттөр а) күч трансформаторунун оромдорунун үстүндө жайгашкан сайлуу үч көзөнөк каралган, аларга майдын температурасын билдиргичтерден маалыматтарды алуу үчүн 2, атайын агын

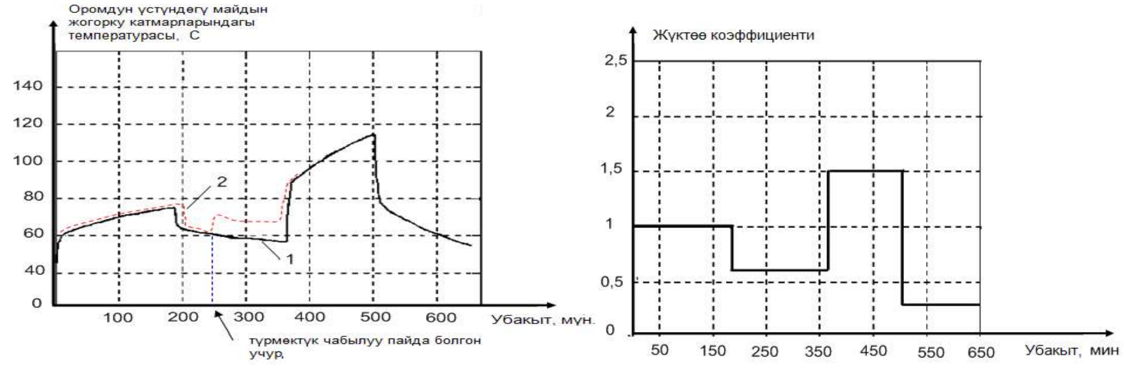


а) б)

Сүрөт 5 – а) Жылуулук датчиги (термопара) схематикалык сүрөттөлүшү: 1-термопара; 2-стеклотекстолит; 3-жез фольгасы; 4-ысыган майдын агымы; 5-трансформатордун орому; б) термодатчиктин функционалдык схемасы

өткөргүчтөр 3, буралат, алардан маалыматтар температуралардын билдиргичтеринин калыптарына 10 (3_A, 3_B, 3_C,) 5 (сүрөт б), келип түшөт, алардын кирмелери күч трансформаторунун майынын температурасын билдиргичтер менен бириктирилген, ал эми чыкмалары аналогдук-сандык кайра түзүүчүнүн экинчи кирмелери менен бириктирилген.

Күч трансформаторунун оромдорунун үстүндө жайгашкан май температурасынын билдиргичтери менен үч атайын агын өткөргүчтөрүн киргизүү, күч трансформаторун тарамдан убактылуу ажыратууну талап кылбастан, оромдордун жылуулук абалын түздөн-түз көзөмөлдөөгө мүмкүнчүлүк берет, анткени оромдор менен көзөмөлдөнүүчү суутуучу чөйрө алардан ысуу жана өйдө жылуу менен көтөрүүчү күчтөрдүн эсебинен алардын үстүндө жайгашкан температура билдиргичтерине жетип 2, алардын абалы жөнүндө маалыматтарды берет.



а) б)

Сүрөт 6 – а) Жүк графиги; б) Оромдун үстүндөгү майдын жогорку катмарларындагы температуранын графиги $^{\circ}C$; 1– график менен дал келтирилген оромдун үстүндөгү майдын жогорку катмарларындагы майдын өзгөрүүсүнүн жүгү; 2 – дал келбеген өзгөрүү.

Оромдордун жылуулук абалдарынын кыйчалыштыгы ар бир оромдун (6-сүрөт) электр жүктөрүнүн графикасынын өзгөрүү динамикасын, оромдун үстүндөгү майдын жогорку катмарынын температурасы боюнча бааланууучу, ар бир оромдун жылуулук абалынын өзгөрүү динамикасы менен салыштыруунун натыйжалары боюнча бааланат. Эгерде салыштырылып жаткан процесстер дал келишсе 1, (6-сүрөт, а), оромдордун жылуулук абалы андан ары эксплуатациялоого уруксат берет, эгерде андай болбосо 2, (6-сүрөттөр, б) – мүмкүн болуучу түрмөктүк чабылуудан качуу чараларын көрүү зарыл.

5-сүрөттө келтирилген функционалдык схемага ылайык, сунуш кылынган курулма төмөнкүлөрдү камтыйт:

- тышкы абанын температурасынын билдиргичи 9, биринчи өлчөгүч кайра түзүүчүнүн кирмесине кошулган чыңалуу-каршылыгы;

- чыңалуу-каршылыгынын экинчи өлчөгүч кайра түзүүчүсүнүн кирмесине кошулган (4_A, 4_B, 4_C) трансформатордун майынын температурасынын үч билдиргичи 3_A, 3_B, 3_C ;

- агындын үч билдиргичи 3_{ai}, 3_{bi}, 3_{ci}, трансформатордун төмөнкү чыңалуусу тарабынан жандырылган, агын-чыңалуунун 4_{ai}, 4_{bi}, 4_{ci}. тиешелүү өлчөм кайра түзүүчүлөрүнө киргизүү менен бириктирилген.

Каршылык-чыңалуунун биринчи, экинчи өлчөм кайра түзүүчүлөрүнүн чыкмалары жана үчүнчү агын-чыңалуунун өлчөм кайра түзүүчүсү тийиштүүлүгүнө жараша аналогдук-сандык кайра түзүүчүнүн 6 биринчи, экинчи жана үчүнчү чыкмалары менен бириктирилген, алардын сандык чыкмалары микрокөзөмөлчүнүн 7 тиешелүү кирмелерине кошулган. Микрокөзөмөлчүнүн 7 сандык чыкмалары дисплей 8 жана башкаруу релеси 9 менен бириктирилген. Микрокөзөмөлчүнүн интерфейстик чыкмалары микрокөзөмөлчү 7 менен бириктирилген, демек тийиштүүлүгүнө жараша кайра түзүүчүнүн белгилеринин деңгээлдери 13 жана энергияга көз каранды эске тутуучу 12 курулма менен кошулган.

Мониторингдин курулмасы төмөнкүдөй иштейт. Микрокөзөмөлчү 12 маалыматтарды жыйноо тутумунун жана эсептеп чыгаруучу модулдун иш-милдетин аткарат. Изгилегичтүү (регулируемый) көп функционалдуу өлчөөчү трансформаторунун жардамы менен ар бир фазанын i_a, i_b, i_c агындарын өлчөө жүзөгө ашырылат. Δt барабар убакыт интервалы аркылуу тиешелүү билдиргичтердин жардамы менен тышкы абанын температурасын, оромдордун үстүндөгү θ_A, θ_B, θ_C майдын, күч трансформаторунун *A, B, C* фазаларынын температурасын өлчөө жүзөгө ашырылат. Маани Δt КМТ өлчөм тибине көз каранды болот жана фазалардын жүктөрүнүн агындарынын маанилери өзгөргөндөн жана андан ары оромдордун температурасы турукташкандан кийин, а демек, θ_A, θ_B, θ_C маанилер турукташкан маанилерге ээ болгондон кийин тууралап тандалып алынат.

Өлчөнгөн чоңдуктар 10 (3_A, 3_B, 3_C) жана (4_{ai}, 4_{bi}, 4_{ci}) өлчөөчү кайра түзүүчүлөр аркылуу текшерилип жаткан чоңдуктардын маанилеринин кайра түзүүчү пропорционалдуу экилтик коду жана бул кодду микрокөзөмөлдөөчүгө 7 өткөрүп берүүчү анологдук-сандык кайра түзүүчүнүн 6 кирмелерине келип түшөт. Өлчөнгөн чоңдуктардын маанилерин микрокөзөмөлдөөчү дисплейде 8 чагылдырат, энергияга көз каранды эстеп калуучу курулмада 13 сактайт, жана зарыл болгондо, белгилердин деңгээлдерин кайра түзүүчү 12 аркылуу компьютерге берет.

Микрокөзөмөлдөөчүнү программалык кымсыз кылуу төмөнкү алгоритм менен иштейт:

– тышкы абанын $\theta_{охл.}$, айкын убакыт шарттамында өлчөнгөн температурасынын маанилеринин, КМТ оромдорунун үстүндөгү майдын температураларынын (θ_A, θ_B, θ_C) жана ар бир фазанын жол берилген агындарынын жүктөрүнүн негизинде убакыттан көз карандылыктардын ($\theta_A(t)$), ($\theta_B(t)$), ($\theta_C(t)$), математикалык моделдери түзүлөт;

– көз карандылыктарды θ_A *(t)*, θ_B *(t)*, θ_C *(t)* жуптар боюнча салыштыруу менен төмөнкүдөй корутундуга келүүгө болот:

– эгерде, Δt маанисин эсепке алганда, бул көз карандылыктар окшош болушса 1 (6-сүрөт, а, б,) анда түрмөктөр аралык жабыша калуулар жок деп эсептөөгө болот;

– тескерисинче болгон учурда, кайда салыштырылып жаткан көз карандылыктар бузулса, ошол фазада түрмөктөр аралык жабыша калуулардын пайда болушу мүмкүн 2 (6-сүрөт, а, б,).

Салыштырылып жаткан көз карандылыктардын окшоштурктарынын бузулушунун себебин карайбыз.

Айталы, кандайдыр-бир убакта фазалардын номиналдуу жүктөлүшүндө туруктуу түрмөктөр аралык, мисалы фазалардын оромдорунда жабыша калмайлар пайда болду дейли. Оромдун ушул участогу менен тийишкен май, бул учурда, түрмөктүк чабылууга чейинкиге караганда катуу ысыйт, жана кошумча пайда болгон көтөрүүчү күчтүн эсебинен ысып чыккан май жогору көтөрүлөт, натыйжада оромдун үстү жагындагы майдын температурасы жогорулайт – анан ушул жогорулоо ысыктын билдиргичинде каттоого алынат [6].

Ошентип, аналог-курулма айтылып жаткан курулмадан айырмалуу, ушул курулманы орнотуу үчүн күч трансформаторун убактылуу өчүрүүнү талап кылбастан, КМТ оромдорунун түрмөктөр аралык жабыша калмайларынын мониторингин жүзөгө ашырат жана табат. Жогоруда сыпаттамаланган алгоритм боюнча иштөөчү микрокөзөмөлчүнүн программалык камсыз кылуусунда күч май трансформаторунун негизги элементтеринин (оромдору, май жана магнит өткөргүчтөр) ысуусунун жана муздоосунун математикалык модели салынган. Алар мониторинг процессинде алынган негизги элементтердин температураларынын өзгөрүүлөрүнүн айкын динамикасын моделдөөнүн натыйжалары менен салыштыруу үчүн керек. Мындай салыштыруу түрмөктүк чабылуусун табуунун ишенимдүүлүгүн жогорулатат. [7,8].

КМТ негизги элементтеринин ысуусунун жана муздоосунун математикалык моделдерин карайбыз.

Оромдордун ысуусун дифференциалдык теңдемесин интегрирлөө үчүн Matlab/Simulink чөйрөдө түзүмдүк схема курулган.

Түзүмдүк схема дифференциалдык теңдемени интегрирлөөгө жана өткөөл процесстин убактысынын ар түрдүү учурлары үчүн оромдордун өткөөл мезгилин визуалдаштырууга мүмкүнчүлүк берет [10,11].

Өчүргөндөн кийинки убакыт учурунда трансформатордо болуп жаткан айкын физикалык процесс x_1, x_2, x_3 көз карандысыз үч өзгөрүлмө менен биринчи ирээттеги үч дифференциалдык теңдемелердин төмөнкүдөй тутуму менен сыпатталат [12]:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{b_1}{a_1}(x_1 - x_3); \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{b_2}{a_2}(x_2 - x_3); \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{b_1}{a_3}x_1 + \frac{b_2}{a_3}x_2 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3}x_3. \end{aligned}\right\} . \qquad (1)$$

Теңдемелердин бул тутумунда (1) төмөнкүдөй белгилөөлөр киргизилген:

$$\left.\begin{aligned} & m_1c_1 = a_1; m_2c_2 = a_2; m_3c_3 = a_3; \\ & F_1a_1 = b_1; F_2a_2 = b_2; F_3a_3 = b_3; \\ & d(\Delta\vartheta_1) = dx_1; d(\Delta\vartheta_2) = dx_2; d(\Delta\vartheta_3) = dx_3; \\ & \Delta\vartheta_1 = x_1; \Delta\vartheta_2 = x_2; \Delta\vartheta_3 = x_3, \end{aligned}\right\}$$

Мында $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$, $\Delta\vartheta_3$ - Оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын орточо температурасынын муздатуучу чөйрөнүн температурасынан жогорулашы; m_1, m_2, m_3 жана c_1, c_2, c_3 – оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын массасы жана салыштырма жылуулугу; F_1, F_2, F_3 – оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын аянтынын үстүңкү катмары; a_1, a_2, a_3 -оромдун, магниттик өткөргүчтүн жана майдын үстүңкү катмарынын жылуулук берүү коэффициенти [7,8,9].

Биринчи ирээттеги үч дифференциалдык теңдемелердин тутуму (1) болуп саналган интегрирленген математикалык моделдер, түзүмдүк схеманын жардамы менен ишке ашырылган. Мындай схеманы түзүү үчүн (1) көрүнүш төмөнкүдөй түргө кайра түзүлгөн:

$$\dddot{x}_1 = \frac{b_2}{a_3}\frac{b_1}{a_1}\left(\frac{a_3}{b_2} + K_1\frac{a_1}{b_1}\right)\ddot{x}_1 - \frac{b_2}{a_3}\frac{b_1}{a_1}\left(K_1 + K_2\frac{a_1}{b_1} - \frac{b_1}{b_2}\right)\dot{x}_1 - \frac{b_2}{a_3}\frac{b_1}{a_1}\left(K_2 - \frac{b_1}{a_2}\right)x_1. \qquad (2)$$

Мында:

$$K_1 = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} + \frac{a_3}{a_2}\right), K_2 = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} - \frac{b_2}{a_2}\right)$$

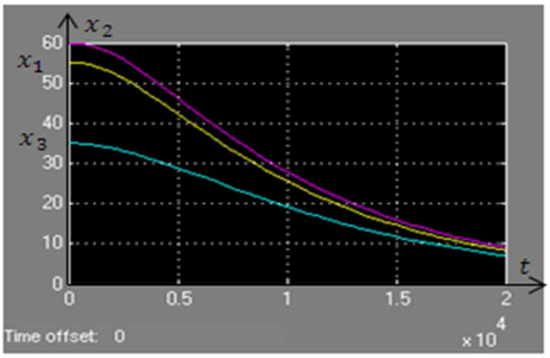
K_1, K_2 - жылуулук агымынын орточо тыгыздыгы.

Көрүнүш (2) үчүнчү даражадагы дифференциалдык теңдеме болуп саналат, ошондуктан x_1 белгисин алуу үчүн интегрирлөөнүн (Integrator) үч блогун пайдалануу менен, үч ирээт интегрирлөө керек [7].

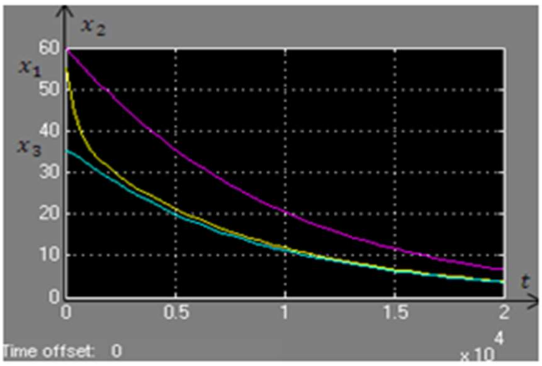
7-сүрөттө *а)*, трансформатордун негизги элементтеринин (оромдор, магнит өткөргүч жана май) x_1, x_2, x_3, муздоо процессинин компьютердик моделде сандык усул менен моделдөөнүн натыйжалары берилген, ал эми 7-сүрөттө *б),* салыштыруу үчүн аналитикалык усул менен алынган ушул эле процесстер көрсөтүлгөн.

x_1, x_2, x_3, көз карандылыктарынын натыйжаларын талдоо, оромдордун муздоосунун алгачкы этабында, айкын күч трансформаторлорунун жылуулук процесстеринин чоң инерттүүлүгүнө карабастан, оромдордун температурасынын муздоо этабы абдан тез жүрөт деген корутунду чыгарууга мүмкүнчүлүк берет, демек муздоонун алгачкы этабында муздоону эсептөөнүн аналитикалык усулунун тактыгы жөнүндө суроо келип чыгат [7].

Ушуга байланыштуу моделдин компьютердик аналогунун (1) жардамы менен маселени талдоонун сандык ыкмасы сынуш кылынган, анткени бул усул зарыл болгондо сандык ыкманы айкындуулукка жакындатуу менен, ага жаңы блоктордун киргизилишине жараша моделдин математикалык сыпаттамасын тез алмаштырууга мүмкүнчүлүк берет.



а)



б)

Сүрөт 7 – Компьютердик моделде алынган x_1, x_2, x_3 көз карандылыктардын графикалык берилиши – *а*) жана аналитикалык метод менен – *б*);

x_1 – ором (сары); x_2 – магнит өткөргүч (күлгүн); x_3 – май (көгүлтүр).

Жыйынтык

Көрсөтүлгөн божомолдун жана анын адилеттүүлүгүн тастыктоонун негизинде күч май трансформаторлорунун оромдорунун түрмөктөр аралык чабылуусуна диагноc жүргүзүүнүн жаңы ыкмасы сунушталды жана Simulink/SimPowerSystems чөйрөсүндө КМТ иштөө процессинде анын табынын жогорулашын өзгөртүү процессин сүрөттөөчү моделдердин түзүмдүк схемасы иштелип чыкты.

Сунуш кылынган тутумдун иштеп жаткандардан айырмасы, кемчиликтерди иштеп чыгуунун алгачкы этабында бузулууларды аныктоого болот.

Колдонулган адабияттар

1. Мельникова О. С. Диагностика главной изоляции силовых маслонаполненных электроэнергетических трансформаторов по статистическому критерию электрической прочности масла: автореферат дис....канд. техн. наук.– Иваново, 2015.– 20 с.
2. Макарова Н. Л. Разработка метода и технических средств диагностики изоляции силовых трансформаторов сельских электрических сетей: Автореферат. дис. канд. техн. наук. – Чебоксары, 2012. –. 20 с.
3. Системы мониторинга трансформаторов
4. URL:http://www.pergam.ru/catalog/electrical_equipment/monitoring_transformers/Hydran.htm – (Дата обращения 01.05.2017).
5. Руководство COMSOL Основы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics®. – https://www.comsol.ru/sc/resources/pdf-of-fers/COMSOL_HANDBOOK_SERIES_Essentials_of_Postprocessing_and_Visualization-50_RUS_high.pdf . дата обращения (28.08.2019 г).

6. Гнидюк, А. Ф. Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора //Дальневосточный ГУ. – 2013.– № 6. – С. 86-89.
7. Калматов, У. А. Диагностирование силовых трансформаторов по характеру распределения температурного поля в верхних слоях масла // Проблемы автоматики и управления. – 2019.– №1 (36). – С. 53-58.
8. Сатаркулов, К.А., Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методом // Проблемы автоматики и управления.– 2018. – №2 (35). – С. 42–50.
9. Калматов У.А., Арфан А.Х., и др. Устройство контроля теплового состояния силового масляного трансформатора. №285. 2019. 20190020.2, Бюл. №4.
10. КИШ Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. – Москва: «Энергия», 1980. - 180 с.
11. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. – Москва: Горячая линия, 2009. – 816 с.
12. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Sim. - Москва: ДМК Пресс, 2008. –288 с.
13. Джендубаев, А.-З. MATLAB, Simulink и SimPowerSystems в электроэнергетике: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению "Электроэнергетика и электротехника". - Чебоксары: БИЦ СевКавГГ-ТА, 2014. –136 с.