

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 621.31:621.316.9:622.3

КЛЮШНИК В.Г., к.т.н, доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

ВИТОКИ СТРУМУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ
З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ СИЛОВИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ

Вступ. Експлуатація технологічних установок, що споживають постійний струм, отримуваний від силових напівпровідникових перетворювачів, породжує проблему електробезпеки таких установок. Проблема ускладнюється тим, що електроживлення постійним струмом здійснюється комбінованими електричними мережами [1], а кола живлення споживачів постійного струму часто мають нестабільний технологічний виток струму на землю. Цей струм, накладаючись на аварійні струми витоку на землю, суттєво ускладнює ідентифікацію останніх.

Постановка задачі. В цій роботі проведено дослідження електромагнітних процесів в комбінованих електричних мережах, що живлять технологічні установки зі споживачами постійного струму, задля виявлення аварійних витоків струму на землю в таких мережах при наявності нестабільних технологічних витоків струму на землю в електричних колах споживачів постійного струму.

Результати роботи. Електропостачання технологічних установок зі значними технологічними витоками струмів на землю здійснюється від трифазних джерел живлення за трипровідною схемою і від індивідуального трифазного трансформатора. Еквівалентну електричну схему такої системи представлено на рис. 1.

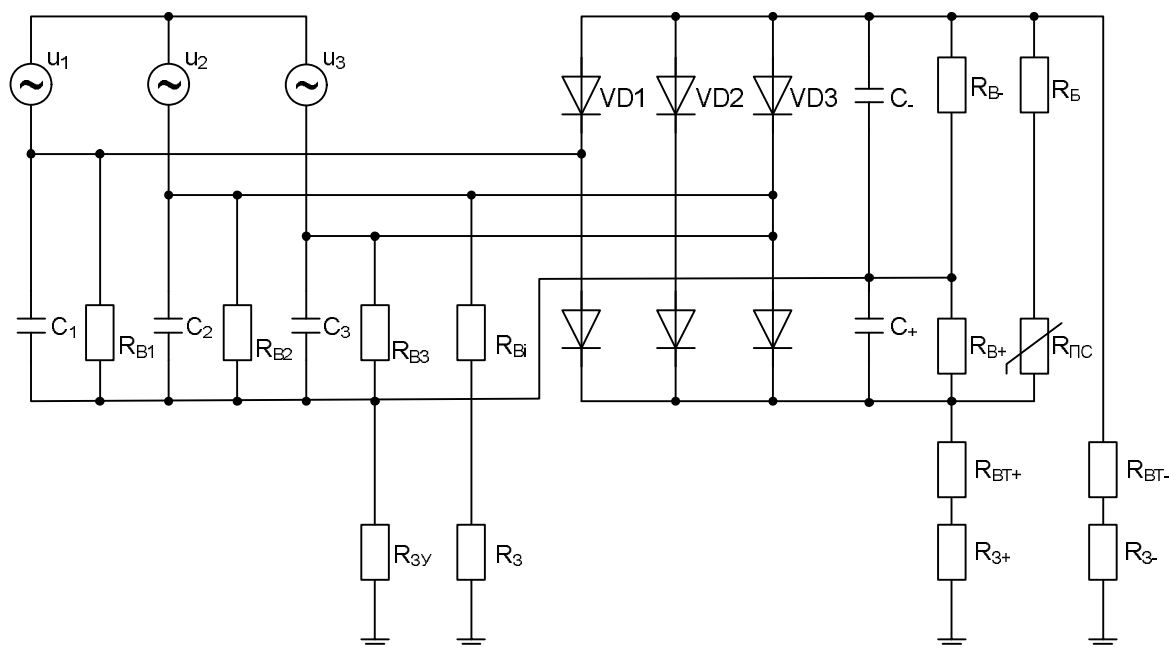


Рисунок 1 – Схема електрична еквівалентна установки технологічної зі споживачами постійного струму

На рис.1 індивідуальний трифазний трансформатор живлення установки змодельовано трьома джерелами синусоїдної напруги u_1 , u_2 , u_3 . Ємності відносно землі вторинних обмоток трансформатора та з'єднань між вторинною його обмоткою та напів-

провідниковим перетворювачем сумарно представлені конденсаторами C_1, C_2, C_3 . Активні опори ізоляції фаз відносно землі для кола вторинної обмотки трансформатора змодельовано резисторами R_{B1}, R_{B2}, R_{B3} . $VD1, VD2, VD3, VD4, VD5, VD6$ – силові напівпровідникові вентиля перетворювача. Ємності C_+, C_- – еквівалентні ємностям відносно землі (корпусу установки) позитивного та негативного полюсів відповідно, кіл постійного струму установки включно зі з'єднувальними елементами між напівпровідниковим перетворювачем та споживачем постійного струму. Резисторами R_{B+}, R_{B-} представлено активні опори ізоляції вищезгаданих полюсів (відповідно) відносно землі та включно з ізоляцією з'єднань кіл постійного струму. Споживача постійного струму представлено резистором $R_{СП}$, який загалом може бути нелінійним і отримувати живлення через баластний резистор R_B .

Якщо знехтувати внутрішнім опором трансформатора, що живить установку, та опорами з'єднань в установці, то внутрішній опір трифазної системи установки струмам однофазних витоків на землю (корпус установки) можна визначити співвідношення [2] у комплексній формі:

$$\dot{Z}_0 = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2} \cdot R_{B3} (R_{B1} \cdot R_{B2} + R_{B2} \cdot R_{B3} + R_{B3} \cdot R_{B1}) - j2\pi f (C_1 + C_2 + C_3) R_{B1}^2 \cdot R_{B2}^2 \cdot R_{B3}^2}{4\pi^2 f^2 (C_1 + C_2 + C_3)^2 \cdot R_{B1}^2 \cdot R_{B2}^2 \cdot R_{B3}^2 + (R_{B1} \cdot R_{B2} + R_{B2} \cdot R_{B3} + R_{B3} \cdot R_{B1})^2}, \quad (1)$$

де f – частота напруги трифазної мережі живлення установки, Гц.

Сила струму однофазного витoku на землю через опір R_{B1} (рис.1):

$$\dot{I}_{B\sim} = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{Z}_0 + R_{3y} + R_3 + R_{Bi}}, \quad (2)$$

де R_{3y}, R_3 – опори заземлень установки і другого виводу резистора витoku R_{Bi} (рис.1) відповідно;

\dot{U}_ϕ – комплекс фазної напруги фази, у якій має місце однофазний виток через опір R_{Bi} .

При однополюсному витoku струм тече під дією пульсуючої напруги, створюваної групою вентилів $VD1 \dots VD3$ (рис.1) для негативного полюса та групою вентилів $VD4 \dots VD6$ – для позитивного. Якщо величинами ємностей C_+, C_- на схемі рис.1 можна знехтувати, то подвійна амплітуда пульсацій напруги сягає $0,5 U_{\phi m}$, а частота – $3f$. Постійна складова такої напруги визначається відомим співвідношенням [2]

$$U_{cp} = \frac{m \cdot U_{\phi r}}{2\pi} \int_{\frac{\pi(m-2)}{2m}}^{\frac{\pi(m+2)}{2m}} \sin dx, \quad (3)$$

де $U_{\phi r}$ – амплітудне значення фазної напруги;

m – число фаз вторинної обмотки трансформатора установки, яка живить вентиля $VD1 \dots VD3$ або $VD4 \dots VD6$ перетворювача;

x – фазовий кут, який відлічується від точки переходу анодної напруги через нуль у позитивному напрямку.

Маючи на увазі, що в схемі рис.1 $m=3$, легко обчислити (3):

$$U_{c3} = 0,827 U_{\phi m}. \quad (4)$$

Якщо знехтувати впливом C_+, C_-, R_{B+}, R_{B-} на величини струмів витoku через опори R_{BT+}, R_{BT-} , то ці величини за аналогією з (2) для режиму неробочого ходу установки, коли $R_{СП} = \infty$, можуть бути визначені співвідношенням:

$$I_{Пср} = \frac{U_{cp}}{R_0 \cdot R_{3y} + R_{3S} + R_{BTS}}, \quad (5)$$

$$\text{де } R_0 = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2} \cdot R_{B3}}{R_{B1} \cdot R_{B2} + R_{B2} \cdot R_{B3} + R_{B3} \cdot R_{B1}} \quad (6)$$

– визначається з (1) при частоті $f=0$; індекс s для величин R_{3S} , R_{BTS} має значення «+» при обчисленні струму витoku з позитивного полюса і значення «-» – при обчисленні струму витoku з негативного полюса.

При великій (десятки метрів) протяжності з'єднань між перетворювачем установки та її споживачем постійного струму впливом опорів ізоляції R_{B+} , R_{B-} нехтувати не можна і середнє значення струму однополюсного витoku визначається співвідношенням:

$$I_{\text{ср}} = \frac{R_0 \cdot U_{\text{ср}}}{R_0 \cdot R_{BS} + (R_0 + R_{BS})(R_{3y} + R_{BS} + R_{BTS})}, \quad (7)$$

де складова індексів «s» береться аналогічно наведеному вище для співвідношення (5).

Ємності C_+ , C_- створюють електричні кола для змінних струмів однополюсного витoku на землю, які течуть під дією змінних напруг $u_+(t)$ та $u_-(t)$.

Для визначення змінних складових струмів однополюсних витоків розкладемо залежності $u_+(t)$ та $u_-(t)$ в ряд Фур'є [2]. Через симетрію графіків цих залежностей відносно осі ординат ряди Фур'є для них мають лише косинусоїдні складові з амплітудами:

$$U_{mv} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \cdot \frac{m}{v^2 m^2 - 1} U_{\phi m}. \quad (8)$$

Перша гармоніка розкладу має частоту $3f$ і амплітуду $U_{m1} = 0,2067 \cdot U_{\phi m}$ (для схеми перетворювача рис.1). Крім першої суттєві амплітуди мають друга $U_{m2} = 0,04726 \cdot U_{\phi m}$ та третя $U_{m3} = 0,02068 \cdot U_{\phi m}$. Решта гармонік вищих порядків мають порівняно невеликі амплітуди і при практичних розрахунках ними можна знехтувати.

Раптова зміна величин опорів однополюсних витоків R_{BT+} , R_{BT-} (рис.1) спричиняє зміну за експоненційним законом у часі постійних складових струмів однополюсних витоків на землю. Постійні часу таких змін визначаються величинами ємностей C_1 , C_2 , C_3 , а також C_+ , C_- і активними опорами кіл заряду-розряду цих ємностей. При великих опорах R_{3+} , R_{3-} , як це має місце, наприклад, в установках плазмового розширення свердловин при роботі цих установок на залізистих кварцитах Криворізького залізорудного басейна, постійні часу кіл заряду-розряду сягають одиниць секунд.

Співвідношення (1), (2), а також (5), (6) та (7) отримані для електричної системи із зосередженими параметрами, яка моделює реальні системи з розподіленими параметрами (кабельні з'єднання, ізоляція струмоведучих частин установок і т.ін.). Правомірність такого моделювання перевірена в лабораторних умовах на дослідно-промисловому зразку установки плазмового розширення свердловин в гірських породах великої міцності, який розроблено в інституті Геотехнічної механіки НАН України (ІГТМ НАНУ).

Прямі вимірювання струмів однофазних та однополюсних витоків на землю у поєднанні з прямими вимірюваннями опорів ізоляції фаз та ізоляції полюсів відносно землі, а також ємностей цих складових комбінованої електричної мережі на землю показали, що струми витоків на землю можуть відрізнятися від обчислених за наведеними вище співвідношеннями в межах 2-10% від виміряних величин, тобто в межах похибок вимірювань струмів витoku на землю.

Висновки. Аналіз струмів однофазних та однополюсних витоків на землю в електричних колах установок з комбінованими електричними мережами за допомогою співвідношень, наведених в цій роботі, створює підґрунтя до формулювання вихідних технічних вимог до апаратури контролю цих струмів, яка є основою системи захисного відключення таких установок задля електробезпеки їх експлуатації.

Експериментальні дослідження електромагнітних процесів в установках плазмового розширення свердловин в лабораторних умовах показали, що вихідні припущення, які було взято при виводі кількісних співвідношень, наведених в цій роботі, дають можливість обчислити величини струмів витоку на землю в комбінованих електричних мережах з достатньою для потреб розробки апаратури їх контролю точністю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П.Колосюк. – М.: Недра, 1980. – 334с.: ил.
2. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. Том 1 / Л.Р.Нейман, К.С.Демирчян. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 536с.: ил.

Надійшла до редколегії 17.03.2014.

УДК 621.371: 621.314.4

ДОРОШЕНКО О.І., к.т.н., доцент
ВОДІЧЕВ В.А., д.т.н., професор

Одеський національний політехнічний університет

ЩОДО ФІЗИЧНИХ ОСНОВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Вступ. Зважаючи на вимоги безпеки та технічні перешкоди доступу до діючого електрообладнання електроенергетичних систем (ЕЕС), у практиці досліджень їх режимів широко використовують математичне моделювання [1]. Для цього достатньо написати математичні рівняння, які зв'язують параметри елементів ЕЕС з параметрами її режиму, і віднайти алгоритм їх розв'язання із застосуванням сучасної обчислювальної техніки. Але для деяких сучасних дослідників створення математичної моделі стає самоціллю, а фізична сутність явища відходить на другий план [2]. Таке ставлення до моделювання призвело до того, що на сьогодні в електроенергетиці існують дві електромагнітні концепції [3].

Перша – електродинаміка Фарадея-Максвелла, що сформувала фундамент уявлення про електромагнетизм. Її основа – учення про електромагнітне поле як про реальну фізичну субстанцію – своєрідне середовище, динаміка якого визначає дію електричних сил між зарядженими частинками (їх електричними зарядами).

Друга – математична концепція. В ній поле – визначена у просторі математична функція і не більше того. Це значно спрощує розв'язання багатьох прикладних задач завдячуючи тому, що вплив великої кількості фізичних факторів, діючих на предмет дослідження, можна замінити тільки одним чисельним значенням напруженості поля у конкретній точці, яка визначає кінцеву силу, що діє у цій точці. Одночасно з цим, зникає і поняття фізичної природи електромагнетизму та прозорість дії його внутрішнього механізму.

Постановка задачі. *Аналіз відомих рішень.* За пропозицією [4] моделювання будь-якого електроенергетичного процесу ЕЕС необхідно проводити у два етапи:

1. Ідейно-теоретична модель, що дає відповіді на питання: Як? Чому так?
2. Реально-математична модель, що відповідає на питання: Скільки? Чому стільки?

Мета цієї роботи – не зменшуючи ролі та значення математичної складової моделювання в електроенергетиці, розробити ідейно-теоретичну основу моделювання, яка розкриває реально фізичну основу процесу електропередачі.

З приводу електропередачі в [5] стверджується: „...Электромагнитная энергия от места ее генерирования передается к месту потребления по диэлектрику (провода же в линиях передачи выполняют двойную роль: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике)...”.

Таким чином, носієм енергії в ЕЕС є загальне електромагнітне поле усіх її елементів-електроустановок, а електрична енергія, фізично, є енергією електромагнітного поля системи, яке є її робочим інструментом і може існувати лише в електропружному матеріальному середовищі.

На роль такого універсального будівельного матеріалу-матерії можуть претендувати найменші фізичні (матеріальні) частинки, які у нормальному становищі себе не проявляють ніяким чином і які автори [6] називають фітонами (від поняття фізичного вакууму). За їх версією густина фізичного вакууму дуже мала і не перебільшує величину 10^{-18} г/см³.

У відповідності до закону парності [7] фітони мають володіти одночасно однаковими позитивним і негативним елементарними зарядами, які у нормальному становищі такої частинки можуть обертатися (під дією Вселенського електромагнітного поля) у протилежних напрямках навколо загальної осі. При цьому загальний заряд і загальний момент обертання (спін) фітона дорівнюють нулю, тому у нормальному стані частинка себе ніяк не проявляє і може називатися нейтроном.

За припущенням [6] під дією зовнішніх чинників може відбуватися поляризація фітонів, за якої осі обертання їх зарядів зміщуються у поздовжньому і поперечному напрямках. При цьому фітони набувають властивості полярних частинок і їх спіни вже відрізняються від нуля. Таким чином, поляризація фітонів призводить до виходу їх внутрішньої енергії за їх межі і до створення енергії у фізичному просторі, якщо воно пружне. Можливо, що поляризовані фітони і створюють атоми простих речовин.

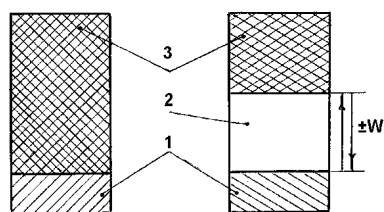
Цілком можливо, що за певних умов із атомів простих речовин (дякуючи електричним взаємодіям між ними) можуть створюватись і молекули складних хімічних речовин (як найменші їх частинки). І в першому, і у другому випадках атоми і молекули стабільно існують за рахунок електричних сил (закон парності), діючих між зарядами, які їх створили з фізичного вакууму. Очевидно, що для створення речовин з фізичного вакууму необхідною умовою є наявність достатнього обсягу сторонньої енергії.

Як відомо, електрообладнання ЕЕС створено з провідників та діелектриків. Їх атоми складаються із ядра, що має позитивний заряд, який урівноважений сумарним негативним зарядом електронів, що обертаються в нормальних умовах навколо ядра за круговими орбітами. Таким чином, атоми і молекули будь-якої речовини мають внутрішню енергію, яка за нормальних умов за їх межі не виходить.

Незважаючи на те, що атоми провідників і діелектриків мають однакову будову, сили, які утримують їх електрони на кругових орбітах, створюються по-різному. Провідники – це метали (зазвичай, мідь і алюміній), які мають кристалічну будову. У вузлах кристалічної решітки провідника розташовані позитивно заряджені ядра атомів речовини (протони), а в середовищі фізичного вакууму між ними обертаються електрони. Електричний зв'язок між протонами і електронами провідників одержав назву електронного зв'язку. Кожна одиниця заряду протона утримує на круговій орбіті тільки один (свій) електрон. Такий зв'язок вважається надто слабким, і під дією зовнішніх факторів електрони атомів провідника легко стають вільними, утворюючи в них струм провідності.

У більшості діелектриків кристалічної решітки нема і зв'язок між атомами молекули називають молекулярним. При цьому кожен електрон кожного атому молекули утримується на круговій орбіті кожним протоном кожного її атому.

Як показано на рис.1, у атомів діелектриків (на відміну від провідників) існують заборонені енергетичні зони 2 для електронів (орбіти, на яких вони не можуть розташо-



провідник діелектрик

Рисунок 1 – Енергетичні зони атомів

подібним до себе іншим зарядом.

Незважаючи на тверду монолітну структуру провідників, вузли їх кристалічної решітки, зберігаючи динамічну рівновагу, виконують коливання в зоні певних точок рівноваги, заважають при цьому рухові вільних електронів. Ступінь такої перешкоди оцінюють величиною активного опору (R , Ом).

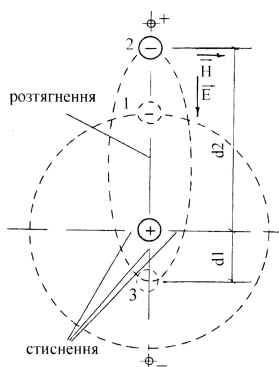


Рисунок 2 – Поляризація атому діелектрика

уватися) – енергетичні рівні. Зона 1 – щільно заповнена електронами, а зона 3 – зона вільних електронів.

Можна бачити, що електрони атомів провідника легко можуть стати вільними (зона вільних електронів розташується впритул до заповненої зони). При цьому у провідників за рахунок вільних електронів створюється струм провідності. Можна стверджувати, що окремий такий електрон не може бути окремою елементарною частинкою, а є лише властивістю фітону до силової взаємодії з

У атомів діелектрика між заповненою зоною і зоною вільних електронів існує заборонена зона, у якій електрони можуть знаходитись тільки тимчасово і тільки під дією зовнішніх факторів. При цьому їх кругові орбіти набувають овальної форми (рис.2), унаслідок чого внутрішня енергія фітонів, що створили атоми діелектрика, виходить за їх межі (відбувається їх поляризація), і в діелектрику появляються струми зміщення.

Відношення питомих об'ємних струмів зміщення і струмів провідності складають величину: у діелектриків – 278 в.о.; у провідників – $5,6 \cdot 10^{-6}$ в.о. [6]. Такі співвідношення можуть свідчити про те, що діелектричне середовище (на відміну від провідного) є електрично пружним середовищем і в ньому може існувати енергія [8].

Результати роботи. Очевидно, що ідейно-теоретична модель ЕЕС повинна базуватись на положенні про те, що на відміну від провідників діелектрики є речовинами, які мають електричну пружність. Саме тому в них (дякуючи спроможності до поляризації) можуть створюватись сили, які діють між електричними зарядами і створюють енергію електромагнітного поля.

Основним зовнішнім фактором, який, діючи на діелектричне середовище ЕЕС, сприяє появі у ньому електроенергії (ЕЕ), є напруга, яку створюють генератори електростанцій системи. При цьому в струмоведучих частинах створюється струм провідності за рахунок вільних електронів. Перед тим, як стати вільним, електрон спочатку обертається навколо вузла кристалічної решітки, де розташовано ядро атому, тому можливо, що струм провідності струмоведучих частин є рухом вільних електронів за спіральною траєкторією, що визначає наявність у таких частин індуктивності.

Кількість електронів на поверхні струмоведучих частин (їх заряд) залежить від величини напруги таких частин і їх конструктивного виконання, що визначає наявність у цих частин електричної ємності.

Очевидно, що наявність у струмоведучих частин ЕЕС ємності і індуктивності визначає вплив на оточуюче їх діелектричне середовище напруги і струму провідності згаданих частин, а оточуюче їх пружне діелектричне середовище можна розглядати як „пружину”, що діє одночасно у двох напрямках – вздовж і поперек напрямку електропередачі. При цьому напруга (за допомогою ємності) стискає таку „пружину”, а струм

провідності (за допомогою індуктивності) її розтягує.

Як відомо, потужність об'ємної поляризації діелектрика елементарної площинки, що спирається на елементарну довжину $\partial p / \partial \ell$ кола струму провідності його струмоведучих частин, за постійної напруги можна визначити за допомогою теореми Пойнтинга, ВА/м^2 :

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (1)$$

де \vec{E} – вектор напруженості електричного поля площинки, В/м ;

\vec{H} – вектор напруженості магнітного поля площинки, А/м .

Таким чином, вектор \vec{P} – це потужність, що передається споживачеві ЕЕ від джерела живлення через площину 1 м^2 .

Оскільки $E \equiv U$ та $H \equiv I$, то спираючись на рівняння (1), миттєву потужність кола з синусоїдальними напругою і струмом провідності можна представити у вигляді, кВА:

$$s = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi), \quad (2)$$

де U_m, U – амплітудне і діюче значення синусоїдальної напруги, що змінюється з кутовою частотою ωt , В;

I_m, I – амплітудне і діюче значення синусоїдального струму провідності, який відстає від напруги за фазою на кут φ .

Можна допустити, що рівняння (2) визначає загальну об'ємну потужність поляризації діелектричного середовища ЕЕС як „пружини”, що працює одночасно у двох згаданих раніше напрямках (рис.3).

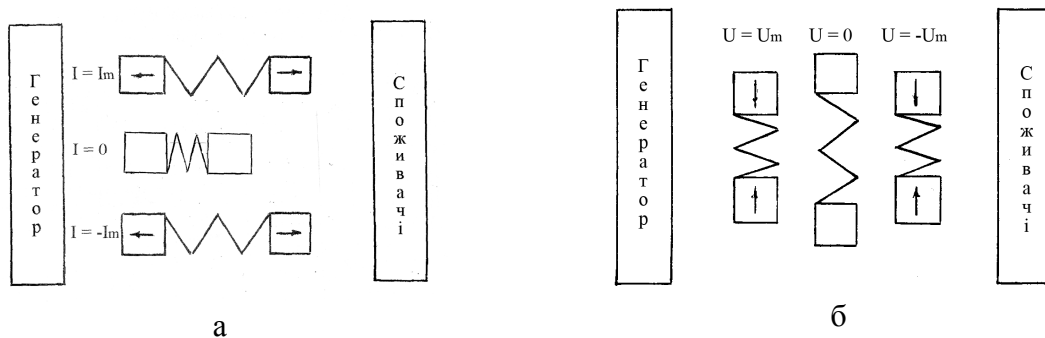


Рисунок 3 – Ідейно-теоретична модель електропередачі ЕЕС

При цьому за нормальних умов роботи ЕЕС у поперечному напрямі переважає дія напруги, а у поздовжньому – дія струму провідності струмоведучих частин системи. Тобто, електричну потужність електропередачі (потужність її електромагнітного поля) можна умовно розкласти у двох напрямках відносно до її напрямку (за основним напрямком дії на її діелектричне середовище напруги і струму провідності струмоведучих частин). При цьому можна допустити, що один кінець „пружини” діелектричного середовища у поздовжньому напрямку електропередачі надійно закріплюють генератори електростанцій ЕЕС (рис.3, а).

Цілком очевидно, що незалежно від стану такої „пружини” (розтягнуто чи стиснено) її енергія може передаватись тільки споживачам. Цю умовну частину потужності електропередачі називають її активною потужністю. Спираючись на рівняння (2), активну потужність електропередачі як потужність плоско-паралельного поля можна визначити за допомогою формули, кВт

$$P = UI \cos \varphi. \quad (3)$$

Обидва кінці „пружини” діелектричного середовища вільні (рис.3, б). Тому ця умовна частина енергії електромагнітного поля, фізично, може передаватись тільки у середину струмоведучих частин, де енергія існувати не може (за твердженням [8] відсутня електрична пружність). Але унаслідок електромагнітної індукції в них створюється ЕРС самоіндукції і струм самоіндукції (реакція ЕЕС на власне електромагнітне поле), який у будь-який момент часу має напрям, протилежний відносно струму, що надходить від генераторів ЕЕС.

Через таку дію самоіндукції цю умовну складову потужності ЕЕС називають реактивною потужністю. Очевидно, що це внутрішня частина ЕЕ системи, яка за її межі не виходить, ні до споживачів, ні від них передаватись не може. Але, на відміну від активної потужності, може мати дві ознаки: індуктивний і ємнісний характер.

Для плоско-паралельного поля електропередачі реактивна потужність змінюється за часом з подвійною частотою і визначає амплітуду хвилі енергії електромагнітного поля ЕЕС, що біжить від генераторів її електростанцій до споживачів ЕЕ.

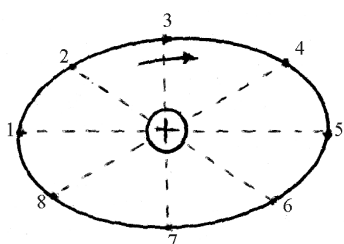


Рисунок 4 – Поляризація діелектрика поперек напрямку електропередачі

кут φ (діє її індуктивність), а за ємнісного характеру навантаження – випереджає його (діє її ємність).

Спираючись на рівняння (2), реактивну потужність електропередачі як потужність плоско-паралельного поля можна визначити за допомогою формули, кВАр

$$Q = -UI \cos(2\omega t \mp \varphi). \quad (4)$$

При цьому $-\varphi$ відповідає відстаючому від напруги струму провідності, а $+\varphi$ – струмові, що випереджає напругу.

Для плоско-паралельного загального електромагнітного поля електропередачі її повну потужність можна представити у вигляді, кВА

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5)$$

На рис.5 представлено можливий варіант співвідношення потужностей поляризації діелектричного середовища електропередачі, що працює з $\text{tg} \varphi = 0.25$, з відстаючим струмом провідності її струмоведучих частин.

Висновки. Виконане ідейно-теоретичне і реально-математичне моделювання електроенергетичного процесу електропередачі дозволяє зробити наступні висновки:

1. Електрична енергія електроенергетичної системи, фізично, є хвилею енергії поляризації електрично пружного діелектричного середовища, яке оточує усі її струмоведучі частини одночасною дією на нього їх напруги і струму провідності.

2. Електрична енергія як товарна продукція електроенергетичної системи – це робота, яку виконують генератори її електростанцій для створення напруги на своїх зати-скачах, під дією якої створюється струм провідності в її струмоведучих частинах і струм

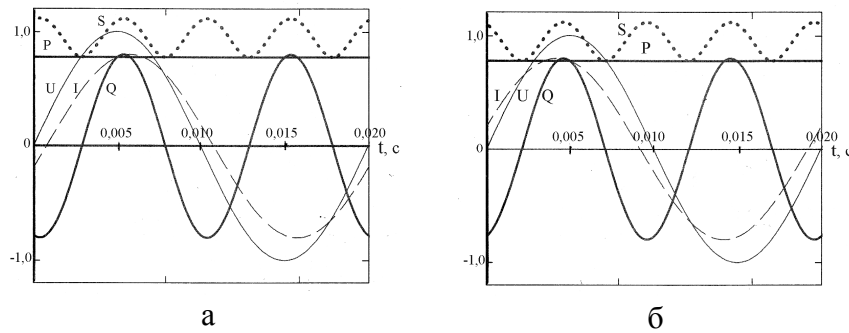


Рисунок 5 – Складові потужності електропередачі ЕЕС

зміщення – в діелектричному середовищі, що оточує згадані частини.

3. Реактивна потужність – змінна за часом (з подвійною частотою) поперечна (відносно напрямку електропередачі) складова частина потужності електромагнітного поля електроенергетичної системи, яка споживачам не передається (внутрішня енергія ЕЕС) і товарною продукцією бути не може.

ЛІТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики / В.А.Веников. – М.: Высшая школа, 1966. – 487с.
2. Физические явления внутреннего резонанса в электрооборудовании с обмотками высокого напряжения / [Бучковский И.Р. Молнар М.М., Никонец А.Л. и др.]; под ред. Л.А.Никонца. – Львов: НВФ “Українські технології”, 2012. – 167с.
3. Репченко О.Н. Полевая физика или как устроен мир ? / О.Н.Репченко // – М.: Галерея, 2005. – 320с.
4. Дорошенко О.І. Щодо питання матеріальності в фізиці електроенергетики / О.І.Дорошенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк. – 2011. – Випуск 11 (186). – С.120-124.
5. Копылов И.П. Великие законы природы / И.П.Копылов // Электричество. – 2011. – № 4. – С.63-66.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: учебник для студ. энергетич. и электротехнич. вузов / Л.А.Бессонов. – Изд. 6-е. – М.: Высшая школа, 1973. – 752с.
7. Акимов А.Е. Модели поляризованных состояний физического вакуума и торсионных полей / А.Е.Акимов, В.Я.Тарасенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1992. – №3. – С.13-23.
8. Ландау Л.Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л.Д.Ландау, А.И.Ахиезер, Е.М.Лифшиц. – М.: Изд. „Наука”, Главная редакция физико-математической литературы. – 1969. – 399с.
9. Дорошенко О.І. Про фізику електромагнітного поля електроенергетичної системи / О.І.Дорошенко // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів: XI міжнар. наук.-техн. конф., 2-4 листопада 2012 р.: матеріали конференції. – Кременчук, 2012. – С.33-35.

Надійшла до редколегії 27.06.2014.

Днепродзержинский государственный технический университет

АЛГОРИТМ САМОНАСТРОЙКИ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ПОДЧИНЁННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНО-АПЕРИОДИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Введение. К современным позиционным электроприводам предъявляется требование максимального при заданных ограничениях быстродействия. Вместе с тем, для систем управления положением обязательным является аperiodический характер переходного процесса. Совместная реализация данных свойств возможна в релейных системах подчинённого регулирования, синтезированных методом N-i переключений [1]. Однако, видоизменение формы оптимальной по быстродействию переходной траектории в зависимости от величины перемещения требует разработки алгоритмов адаптации настроек системы управления электроприводом к особенностям текущего режима позиционирования.

Постановка задачи. Система дифференциальных уравнений динамики позиционного электропривода постоянного тока имеет вид

$$\left. \begin{aligned} p\varphi &= \omega \\ p\omega &= \varepsilon = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot (i - i_c) \\ p\varepsilon &= a = \frac{k_p \cdot c}{J} \cdot \frac{u - R \cdot i - c \cdot \omega}{L} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\varphi, \omega, \varepsilon, a$ – соответственно угловые положение, скорость, ускорение и рывок исполнительного вала, u – напряжение преобразователя; $k_p, R, L, J, c = k\Phi$ – параметры электропривода.

Применение метода N-i переключений [1] позволяет выполнить для электро-механической системы (1) параметрический синтез каскада релейных регуляторов

$$\left. \begin{aligned} u_{p\varphi} &= \omega^* = \omega_{\max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{p\varepsilon} &= \varepsilon^* = \varepsilon_{\max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{pu} &= u^* = U_{\max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $K_{\varphi\omega}, K_{\varphi\varepsilon}, K_{\omega\varepsilon}$ – коэффициенты обратных связей; символом * отмечены заданные значения соответствующих переменных, как входное, так и формируемые регуляторами для подчиненных им контуров; индексами max отмечены уровни ограничения координат состояния.

На основании результатов статей [2-4] был разработан алгоритм адаптации настроек каскада (2) к изменению формы переходной траектории, изложенный в статье [5]. Однако, результаты работ [3, 6] указывают на колебательный характер скользящего режима регулятора положения, синтезированного методом N-i переключений, при по-

зиционировании в диапазоне малых перемещений и в части диапазона средних перемещений, удовлетворяющей неравенству

$$\varphi \leq \frac{10+6\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{\varepsilon_{\max}^3}{a_{\max}^2}. \quad (3)$$

Задача настоящей работы состоит в совершенствовании алгоритма самонастройки релейной системы подчинённого регулирования в направлении формирования предельно-апериодического переходного процесса, удовлетворяющего требованиям к позиционным электроприводам во всём диапазоне воспроизводимых перемещений.

Результаты работы. Коэффициенты обратных связей, в общем виде полученные в статье [1], являются функциями уровней ограничения канонических координат

$$K_{\varphi\omega} = \frac{\omega_{\max}}{2 \cdot \varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\omega_{\max}}{4 \cdot a_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}^2}{12 \cdot a_{\max}^2}, \quad K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}. \quad (4)$$

Выражения (4) актуальны для всех режимов позиционирования, устойчивость скользящих режимов регуляторов (2) с коэффициентами обратных связей (4) доказана в работе [6]. Наряду с величиной заданного перемещения φ^* уровни ограничений

$$\omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max}^*, a_{\max}^*, \quad (5)$$

продиктованные соображениями электрической и механической прочности ЭМС (1), служат исходными данными для параметрического синтеза регуляторов (2).

Следующим шагом настройки системы на воспроизведение φ^* должна стать предварительная проверка реализуемости траектории оптимального по быстродействию переходного процесса при заданных ограничениях (5). Обоснованная в статье [2] проверка реализуемости траектории по условию

$$\frac{\omega_{\max}}{\varepsilon_{\max}} > \frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}} \quad (6)$$

и последующее ограничение ускорения по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\omega_{\max} \cdot a_{\max}} \quad (7)$$

используются в работе [5] и приводят к формированию оптимального по быстродействию переходного процесса с треугольными диаграммами ускорения, характерными, в частности, для режима малых перемещений (рис.1, а).

Как показано в работе [7], во избежание возникновения колебательных движений рабочего органа после вхождения в скользящий режим регулятора положения следует отказаться от настроек по формулам (6), (7) каскада регуляторов (2) на воспроизведение расчётной траектории, представленной на рис.1,а. Из соображений формирования предельно-апериодического переходного процесса синтез релейной системы подчинённого регулирования методом N-i переключений следует осуществлять на основе траектории, представленной на рис.1, б. Данная траектория формально не является оптимальной по быстродействию, поскольку предполагает уменьшение максимальных ускорения и скорости относительно задаваемых (5), (7) значений согласно формулам

$$\varepsilon_{\max} = k_a \cdot \sqrt{\omega_{\max} \cdot a_{\max}}, \quad (8)$$

$$\omega_{\max} = 1,5 \sqrt{|\varphi^*| \cdot \sqrt{a_{\max}} \cdot \frac{k_a}{k_a^2 + 1}}, \quad (9)$$

где k_a – понижающий коэффициент, найденный в [7],

$$k_a \leq \sqrt{2\sqrt{3}-3}. \quad (10)$$

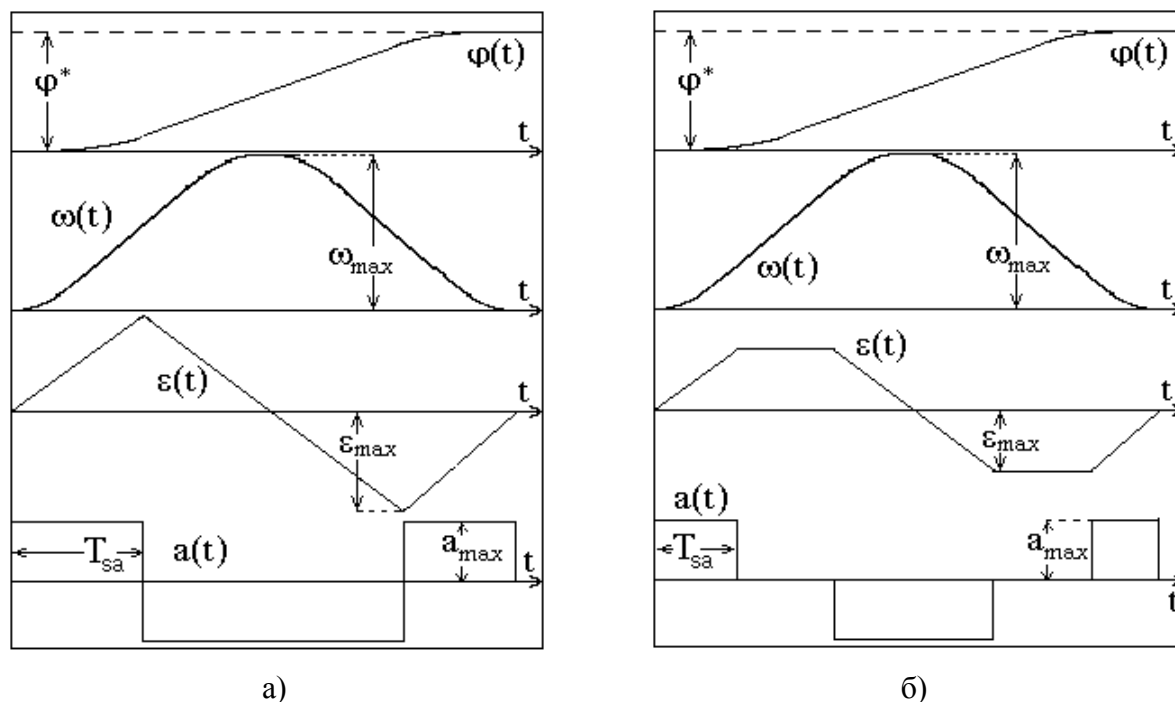


Рисунок 1 – Временные диаграммы переходного процесса позиционирования

Уровни ограничения скорости и ускорения, рассчитанные по выражениям (8), (9) как функции скачка задающего воздействия позволяют настроить релейную систему подчиненного регулирования положения на обработку малого перемещения по трапецидальной диаграмме ускорения. Увеличение длительности позиционирования при такой настройке (рис.1, б) не превышает 8% [7] по сравнению с оптимальной по быстродействию треугольной диаграммой (рис.1, а) и зависит от степени отклонения коэффициента k_a от правой части в неравенстве (10).

В развитие результатов работы [7] можно утверждать, что данный приём применим к режимам больших и средних перемещений при таких соотношениях ограничений (5), для которых диаграмма $\varepsilon(t)$ на тормозном отрезке траектории приобретает вид треугольника в результате коррекции ускорения по формуле (7). Основанием для данного утверждения в контексте метода N-i переключений служит синтез коэффициентов регулятора положения, определяющих характер скользящего режима, по координатам характерных точек тормозного отрезка расчётной траектории.

Построим алгоритм самонастройки (рис.2) релейной системы подчинённого регулирования на формирование предельно-апериодического переходного процесса с учётом распространения коррекции (8)-(10) уровней ограничения (5) на все режимы позиционирования. Присвоение исходных уровней ограничения ω_{\max}^* , ε_{\max}^* , a_{\max}^* текущим величинам максимумов канонических координат ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} представлено на блок-схеме разрабатываемого алгоритма блоком 1

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\max}^*, a_{\max} = a_{\max}^* \quad (11)$$

В блоке 2 выполняется проверка условия аperiodического вхождения регулятора положения в скользящий режим при исходных максимумах (11) согласно неравенству, отражающему соотношения величин в (8), (10)

$$\varepsilon_{\max} \leq k_a \cdot \sqrt{\omega_{\max} \cdot a_{\max}} \quad (12)$$

В случае невыполнения условия (12) в блоке 3 осуществляется коррекция уровня ограничения ускорения по формуле (8). Тем самым уже в режиме больших перемещений обеспечивается воспроизведение заданного положения при трапецеидальной тормозной траектории и действительных корнях уравнения скольжения регулятора положения.

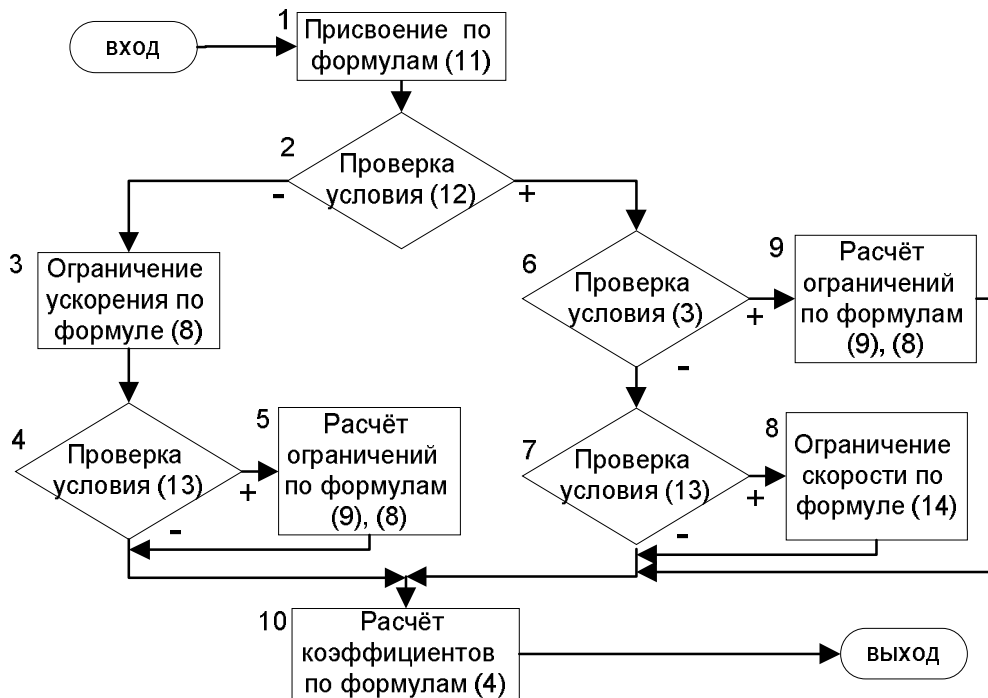


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма самонастройки

Условие перехода в режим среднего перемещения

$$|\varphi^*| < \omega_{\max}^2 / (2 \cdot \varepsilon_{\max}) + \omega_{\max} \cdot \varepsilon_{\max} / (2 \cdot a_{\max}), \quad (13)$$

проверяемое в блоке 4, получено в работе [4]. Принадлежность φ^* к данному диапазону требует расчёта уровней ограничения по формулам (9), (8), реализуемым в блоке 5 и гарантирующим аperiodический скользящий режим.

Правая ветвь блок-схемы реализует настройку максимумов канонических координат для более общего случая формы расчётной траектории, в котором исходные максимумы канонических координат (11) не требуют коррекции для диапазона перемещений, не удовлетворяющих неравенству (3). При неудовлетворительном результате проверки условия (3) в блоке 6 исходные ограничения сохраняются для режима больших перемещений. При переходе в режим средних перемещений согласно неравенству (13),

проверяемому в блоке (7), выполняется пересчёт уровня ограничения скорости в блоке 8 по результатам работы [4]:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}}\right)^2 + \varphi^* \cdot \varepsilon_{\max} - \frac{\varepsilon_{\max}^2}{2 \cdot a_{\max}}}. \quad (14)$$

Для диапазона заданных перемещений, попадающего под условие (3), согласно работе [7] необходима совместная коррекция максимумов скорости и ускорения по формулам (9), (8), реализуемым в блоке 9.

По завершении выбора формы траектории и перерасчёта максимумов канонических координат, являющихся уровнями ограничений регуляторов (2), в блоке 10 осуществляется вычисление коэффициентов обратных связей (4), завершающее настройку параметров каскада (2) на формирование квазиоптимального по быстродействию переходного процесса с аperiodическим вхождением в скользящий режим. Необходимо заметить, что отсутствующая в блок-схеме реализация формулы (10) должна выполняться при инициализации контролирующего алгоритма вне цикла самонастройки.

Эффективность разработанного алгоритма иллюстрирует рис.3, на котором представлены увеличенные фрагменты временной диаграммы $\varphi(t)$ при вхождении в скользящий режим регулятора положения. Рис.3, а представляет результат моделирования динамики позиционного электропривода для случая отсутствия коррекции исходных максимумов (5) в диапазоне φ^* , ограниченном неравенством (3), а рис.3, б демонстрирует диаграмму $\varphi(t)$ при применении коррекции по формулам (8)-(10).

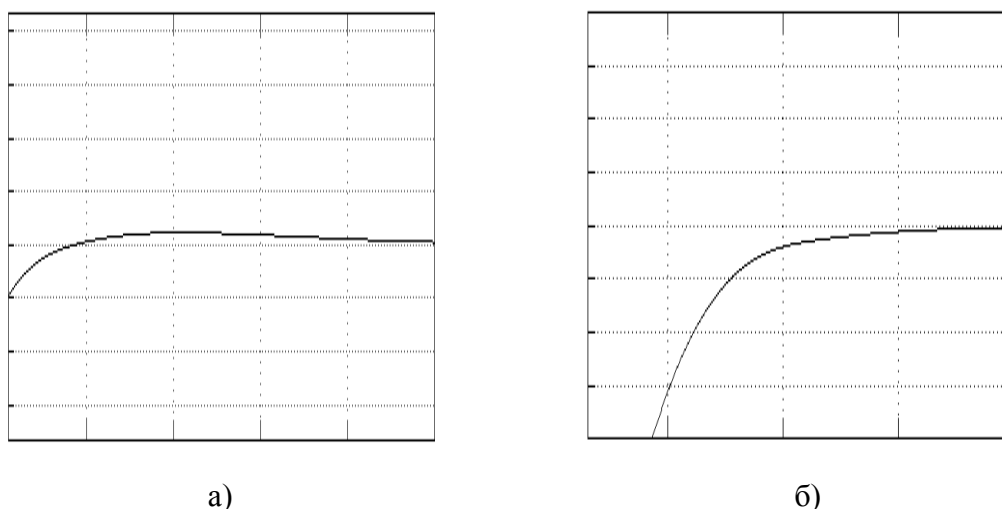


Рисунок 3 – К сравнению формы $\varphi(t)$ в скользящем режиме регулятора положения

Следует подчеркнуть, что в представленном на рис.2 алгоритме самонастройки системы управления в явном виде не выполняется выделение режима малых перемещений, поскольку специфичная для данного диапазона позиционирования форма траектории при синтезе регуляторов (2) методом N-i переключений неизбежно приводит к колебательному скользящему режиму и заменяется трапецеидальной согласно [7].

Выводы. Разработанный на основании результатов работ [1, 4-7] интегрированный алгоритм самонастройки системы управления положением рабочего органа обеспечивает адаптацию позиционного электропривода к изменению формы переходной траектории во всём диапазоне воспроизводимых перемещений. Реализуемая им кор-

рекция настроек гарантирует релейной системе подчинённого регулирования, синтезированной методом N-i переключений, предельно-апериодическое вхождение в скользящий режим при близком к оптимальному быстродействию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовой А.В. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N-i переключений / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Вестник НТУ ХПИ. Серия „Электротехника, электроника, электропривод”: тематический выпуск „Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – Харьков. – 2005. – №45. – С.71-73.
2. Садовой А.В. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N-i переключений / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Вестник КГПУ. – Кременчуг. – 2006. – Вып. 3/2006 (38). – С.21-22.
3. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию методом N-i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Вестник КГПУ.– Кременчуг. – 2007. – Вып. 3/2007 (44). – С.15-17.
4. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию режимов средних перемещений позиционных релейных СУЭП методом N-i переключений / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Сборник научных трудов ДГТУ: тематический выпуск „Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. – Днепродзержинск. – 2007. – С.420-422.
5. Дерез А.Л. Адаптация системы оптимального по быстродействию управления позиционным электроприводом к изменению формы переходной траектории / Дерез А.Л., Садовой А.В.// Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника. – 2014. – № 15 (91). – С.72-74.
6. Садовой А.В. Анализ характера скользящего режима оптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП / А.В.Садовой, А.Л.Дерец // Сборник научных трудов ДГТУ. – Днепродзержинск. – 2007. – Вып. 8. – С.140-144.
7. Дерез А.Л. Синтез квазиоптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП с апериодическим вхождением в скользящий режим / А.Л.Дерец // Научные труды Донецкого технического университета. Серия „Электротехника и энергетика”. – Донецк: ДонТУ.– 2007. – Вып. 7 (128). – С.72-75.

Поступила в редколлегию 30.06.2014.

УДК.62-83:612.313

БЕЛОХА Г.С., аспирант
САМЧЕЛЕЕВ Ю.П., к.т.н., доцент
ДРЮЧИН В.Г., к.т.н., доцент
БАКАЕВ О.В., ст. преподаватель

Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА БАЗЕ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА

Введение. Среди большого многообразия преобразователей параметров электрической энергии особое место занимают преобразователи частоты (ПЧ), область применения которых весьма значительна (индукционный нагрев металла, плавление металла, перемешивание жидких металлов, сушка древесины, электроприводы переменного тока).

В настоящее время все вопросы, связанные с разработкой ПЧ, приобретают все большее значение и актуальность с учетом все возрастающей тенденции замены электро-

приводов постійного току електроприводами переменного току по системі ПЧ-АД.

Основою на сучасній концепції універсалізації і уніфікації пристроїв перетворювальної техніки в статті розглядаються ПЧ, побудовані на базі систем стабілізації току (ССТ), дослідженню яких присвячено ряд робіт авторів [1, 2, 3]. В основу роботи ПЧ, так же, як і в ССТ, покладено принцип примусового формування токів синусоїдальної форми при відсутності фазового зсуву між мережевими токами і фазними напругами (розв'язується задача електромагнітної сумісності). Принцип управління ПЧ релейний при незалежному друг від друга управлінні вентилями активного випрямителя і входного комутатора.

Окремих схематехнічних рішеннях ПЧ присвячені роботи авторів [3, 4, 5]. Однак порівняльний їх аналіз по схематехніці входних і вихідних каскадів і основним параметрам, що визначають якість роботи, не проводився.

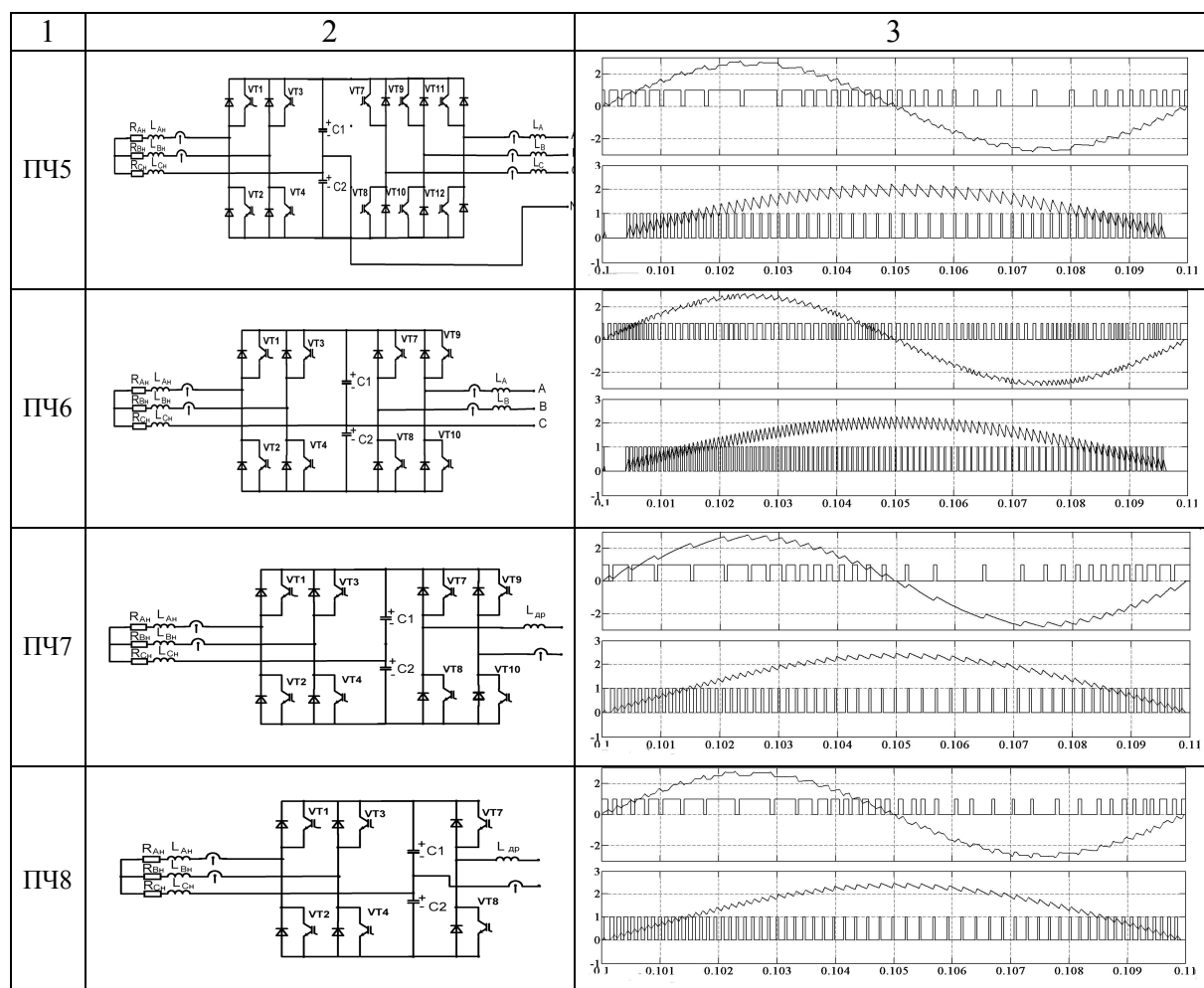
Постановка задачі. Провести порівняльний аналіз розроблених перетворювачів частоти, що полегчить користувачеві вибір відповідного схемного рішення ПЧ, найбільш повно відповідаючого вимогам конкретного застосування.

Результати роботи. Схематехніка силової частини перетворювачів частоти на базі систем стабілізації току і осцилограми, що показують принцип і якість формування синусоїдальних токів для однієї з фаз, представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Схематехніка силової частини перетворювачів частоти

	Схема	Осциллограмма работы
1	2	3
ПЧ1		
ПЧ2		
ПЧ3		
ПЧ4		

Продолжение таблицы 1



Для наглядности частота релейного режима была искусственно занижена путем увеличения ширины петли гистерезиса релейных регуляторов и индуктивностей дросселей.

Верхние осциллограммы соответствуют токам в нагрузке, нижние – токам, потребляемых из сети, там же приведены сигналы с выходов релейных регуляторов.

При исследовании электромагнитных процессов в преобразователях ПЧ1-ПЧ8 [5, 6] получены аналитические выражения для расчета основных параметров, характеризующих работу ПЧ, которые представлены в табл.2. В первой колонке приведены необходимые соотношения между напряжением сети и напряжением, до которого должны быть заряжены конденсаторы, во второй – максимальное значение частоты релейного режима при формировании токов нагрузки, в третьей – максимальное значение частоты релейного режима при формировании токов, потребляемых из сети, и в четвертой – выражения для расчета необходимых величин емкости конденсаторов.

В табл.2:

U_m – амплитудное значение фазного напряжения,

k – коэффициент превышения напряжения на конденсаторах над фазным напряжением сети,

U_C – общее напряжение на конденсаторах ($U_C = U_{C1} + U_{C2}$),

U_{C1} – напряжение на одном из конденсаторов,

$2b$ – ширина петли гистерезиса релейного элемента нагрузки,

$2a$ – ширина петли гистерезиса релейного элемента сети,

ΔU_C – пульсации общего напряжения на конденсаторах,

ΔU_{C1} – пульсации напряжения на одном конденсаторе,

ω, ω_H – частоты сети и нагрузки,

L_H – индуктивность нагрузки, $L_{др}$ – индуктивность фазного дросселя,

P_H – мощность нагрузки, $I_{мн}$ – амплитудное значение тока нагрузки.

Таблица 2 – Выражения для расчета основных параметров ПЧ

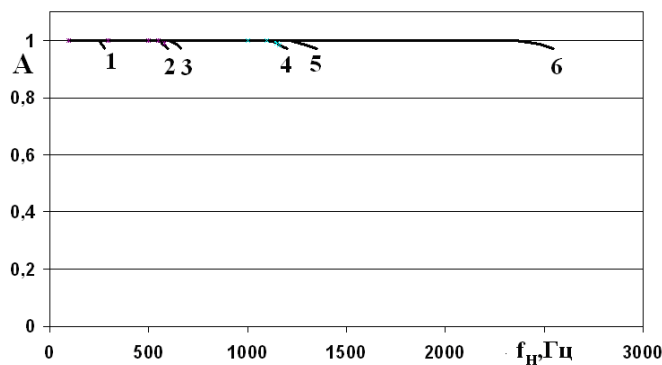
	Напряжения на конденсаторах	Максимальная частота релейного режима		Емкость конденсатора C, Φ
		при формировании тока нагрузки, Гц	при формировании потребляемого тока, Гц	
ПЧ1	$U_{C1} > U_m$	$f_{H \max} = \frac{kU_m}{4bL_H}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{P_H}{2\omega\Delta U_C U_C}$
ПЧ2	$U_{C1} > \sqrt{3}U_m$	$f_{H \max} = \frac{k\sqrt{3}U_m}{4bL_H}$	$f_{\max} = \frac{k\sqrt{3}U_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{P_H}{3\omega\Delta U_{C1} U_m}$
ПЧ3	$U_{C1} > \frac{U_m}{2}$	$f_{H \max} = \frac{kU_m}{8bL_H}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{P_H}{\omega\Delta U_C U_C}$
ПЧ4	$U_{C1} > U_m$	$f_{H \max} = \frac{kU_m}{4bL_H}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{P_H}{\omega\Delta U_C U_C}$
ПЧ5	$U_{C1} > U_m$	$f_{H \max} = \frac{kU_m}{8bL_H}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{I_{мн}}{2\omega_H\Delta U_{C1}}$
ПЧ6	$U_{C1} > \sqrt{3}U_m$	$f_{H \max} = \frac{k\sqrt{3}U_m}{8bL_H}$	$f_{\max} = \frac{k\sqrt{3}U_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{1}{2\Delta U_{C1}} \times$ $\times \left(\frac{2P_H}{3U_m\omega} + \frac{I_{мн}}{\omega_H} \right)$
ПЧ7	$U_{C1} > \frac{U_m}{2}$	$f_{H \max} = \frac{kU_m}{16bL_H}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{P_H}{\omega\Delta U_C U_C}$
ПЧ8	$U_{C1} > U_m$	$f_{H \max} = \frac{kU_m}{8bL_H}$	$f_{\max} = \frac{kU_m}{4aL_{др}}$	$C_1 = C_2 = \frac{P_H}{\omega\Delta U_C U_C}$

Проведем сравнительный анализ приведенных выше ПЧ по параметрам, определяющим качество работы (частоты релейного режима, величины емкости конденсаторов). Так преобразователи ПЧ1–ПЧ4 имеют одинаковые максимальные частоты релейного режима, но величина емкости в ПЧ1 в 2 раза меньше, чем в ПЧ4 при существенно более простом решении входного каскада.

ПЧ2 имеет частоты и напряжения, до которых заряжаются конденсаторы, в $\sqrt{3}$ раз больше по сравнению с ПЧ1 и ПЧ4, но более простую реализацию входного каскада по сравнению с ПЧ1.

ПЧ3 имеет одинаковую частоту потребляемого из сети тока с ПЧ1 и ПЧ4, но в 2 раза меньшую частоту тока в нагрузке. При этом величина емкости больше, чем в ПЧ1 и ПЧ4. Реализация входного каскада проще, чем у ПЧ1.

Если нет доступа к нейтральной точке нагрузки, то к рассмотрению принимаются преобразователи ПЧ5-ПЧ8. Преобразователи ПЧ5, ПЧ7, ПЧ8 имеют одинаковую частоту релейного режима при формировании тока, потребляемого из сети, а ПЧ6 – в $\sqrt{3}$ большую. Преобразователи ПЧ5 и ПЧ8 имеют одинаковую частоту релейного режима при формировании тока в нагрузке и в 2 раза большие частоты при формировании токов, потребляемых из сети. Наибольшую емкость конденсаторов имеют ПЧ5, наименьшую – ПЧ8. Схемная реализация входного каскада упрощается от ПЧ5 к ПЧ8.



1 – ПЧ7; 2 – ПЧ5, ПЧ8; 3 – ПЧ3;
4 – ПЧ1, ПЧ4; 5 – ПЧ6; 6 – ПЧ2

Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика преобразователей

В нашем случае максимальная частота пропускания фиксировалась в момент отклонения синусоиды выходного тока от синусоиды тока задания, т.е. в момент, когда нарушается электромагнитная совместимость ПЧ с нагрузкой.

Выводы.

1. Чем выше частота релейного режима, тем выше частота пропускания преобразователя.
2. Наибольшую частоту пропускания обеспечивает ПЧ2, наименьшую – ПЧ7.
3. Все рассмотренные ПЧ в рамках соответствующих диапазонов пропускания частот могут быть аппроксимированы как безинерционные силовые ключи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Однофазный высокоэффективный источник питания для электропривода постоянного тока / В.Г.Дрючин, Ю.П.Самчелев, Г.С.Белоха, И.С.Шевченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ. – 2013. – Вип. 2/2013(22). – С.109-117.
2. Высокоэффективные источники электропитания: монография / Ю.П.Самчелев, В.Г.Дрючин, Г.С.Белоха, Н.И.Андрева. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – 219с.
3. Система стабилизации тока, электромагнитно совместимая с сетью / Бекбаев А.Б., Самчелев Ю.П., Дрючин В.Г. [и др.] // Вестник КазНТУ. – Алматы. – 2014. – №1 (101). – С.93-100.
4. Пат. 94242 Україна, МПК Н02М 5/02. Перетворювач частоти струму / Самчелев Ю.П., Дрючин В.Г., Белоха Г.С., Бакаев О.В.: заявник та патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №u201403841; заявл.11.04.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21.

Динамические свойства преобразователя ПЧ1-ПЧ8 оценим, сравнивая их амплитудно-частотные характеристики $A=F(f)$ (рис.2). Коэффициент A есть отношение амплитуды тока на выходе ПЧ к амплитуде тока задания $A = \frac{I_{mn}}{I_{mz}}$.

С этой целью на вход ПЧ подавался синусоидальный ток задания и сравнивался с током на выходе (ток в нагрузке).

Известно, что максимальная частота пропускания фиксируется в момент, когда нарушается условие $A=const$.

5. Самчелеев Ю.П. Универсальный высокоэффективный источник питания для электроприводов постоянного и переменного тока / Ю.П.Самчелеев, В.Г.Дрючин, Г.С.Белоха // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”: збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Х.: НТУ „ХПІ”. – 2013. – №36(1009). – С.317-321.
6. Самчелеев Ю.П. Преобразователь частоты электромагнитно совместимый с сетью / Самчелеев Ю.П., Дрючин В.Г. Белоха Г.С. // Електротехнічні та комп’ютерні системи: науково-технічний журнал. – Одесса. – 2014. – №15(91). – С.340-343.

Поступила в редколлегию 30.06.2014.

УДК 669.187.004.18

ЯШИНА К.В., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Введение. Моделирование – это замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели. При разработке автоматизированной системы управления (АСУ) моделирование технологического процесса (ТП) может быть эффективно применимо для выдачи управляющей системой соответствующих команд на базе собранных измерений и оценки реакции системы на конкретные возмущающие воздействия. На сегодняшний день существует множество видов моделирования. Однако, большинство из них позволяет получать сложные модели систем с неоднозначной структурой. Такие модели нелегко использовать при разработке АСУ [1-5].

Постановка задачи. Задачей исследования является разработка новой методики построения моделей ТП, которые могут быть эффективно применимы при разработке АСУТП.

Результаты работы. Согласно разработанной методике моделируемый технологический процесс рассматривается как система. Под системой авторы понимают любой объект, который рассматривается, с одной стороны, как единое целое, а с другой – как совокупность связанных между собой компонентов. Такое определение системы позволяет:

- проще интерпретировать назначение любой сложной структуры, состоящей из взаимодействующих друг с другом частей;
- при описании системы по-разному разбить ее на составные части;
- предвидеть поведение системы, основываясь на принципе «черного ящика» - соотношении „вход/выход”.

Для описания систем и их элементов целесообразно применять различные математические методы. Динамика - важнейшая характеристика системы, знание которой позволяет предсказать поведение системы и выбрать правильное управляющее воздействие в соответствии с поставленной целью [5].

Авторы используют технологические схемы (ТС) процессов для создания их динамических моделей. При этом модель технологического процесса рассматривается как совокупность моделей технологических аппаратов (ТА). Модель каждого технологического аппарата строится по принципам математического моделирования с использова-

нием разностных уравнений. Характеристики, вычисленные при моделировании одного технологического аппарата, используются в других технологических аппаратах, что позволяет отследить динамику системы.

Рассмотрим ТС работы парового котла №9 ПАО „Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э.Дзержинского (ДМКД)” (рис.1), отличительной чертой которого является возможность использования нескольких видов топлива. Технологические аппараты, описывающие элементы этой схемы, приведены в табл.1 [6].

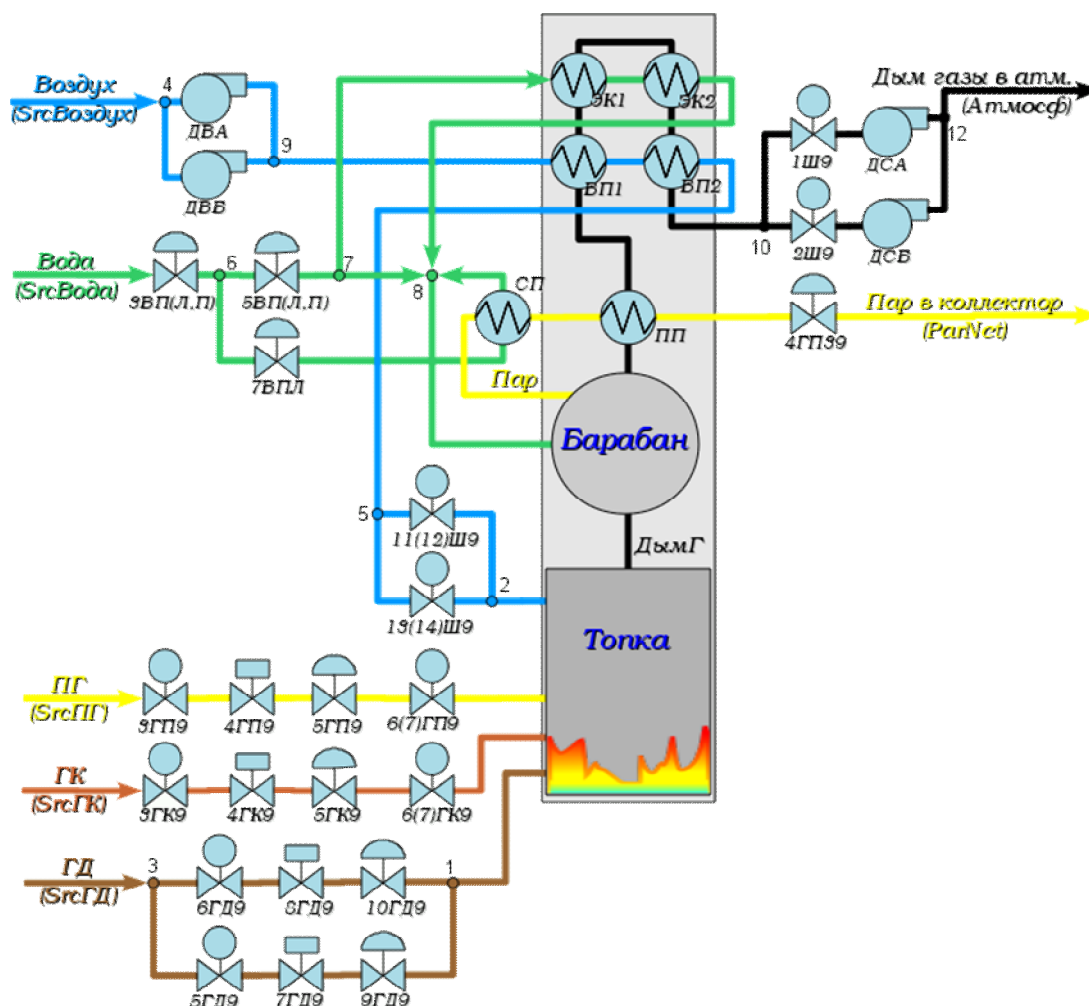


Рисунок 1– Технологическая схема парового котлоагрегата

Таблица 1 – Технологические аппараты, описывающие элементы ТС работы парового котла №9 ПАО „ДМКД”

Технологический аппарат	Элементы технологической схемы, описываемые с помощью этого аппарата
1	2
Задвижка	Природный газ: 3ГП9, 6(7) ГП9. Коксовый газ: 3ГК9, 6(7)ГК9. Доменный газ: 6ГД9, 5ГД9. Дымовые газы: 11(12)Ш9, 13(14)Ш9, 1Ш9, 2Ш9.
Клапан-отсекатель	Природный газ: 4ГП9. Коксовый газ: 4ГК9. Доменный газ: 8ГД9, 7ГД9.

Продолжение таблицы 1

1	2
Регулирующий клапан	Природный газ: 5ГП9. Коксовый газ: 5ГК9. Доменный газ: 10ГД9, 9ГД9. Вода: 3ВП, 5ВП, 7ВП. Пар: 4ГПЗ.
Теплообменник	Экономайзеры: ЭК1, ЭК2. Воздухоподогреватели: ВП1, ВП2. Сухопарник СП. Пароперегреватель ПП.
Барабан	Барабан
Топка	Топка
Компрессор	Дымососы: ДСА, ДСБ. Воздуходувки: ДВА, ДВБ.

Рассмотрим основные принципы моделирования каждого технологического аппарата.

При моделировании течения жидкостей и газов по трубам, через клапаны и задвижки используется уравнение Бернулли [7]. Пусть некоторый объем жидкости (газа) перемещается за некоторый интервал времени от участка трубы с сечением $S_1 (м^2)$ и давлением $p_1 (Па)$ до участка с сечением $S_2 (м^2)$ и давлением $p_2 (Па)$; $V_1 (\frac{М}{с})$ и $V_2 (\frac{М}{с})$ - скорости течения жидкости (газа) в рассматриваемых сечениях; $h_1 (м)$ и $h_2 (м)$ - высоты центра массы выделенного объема жидкости (газа) относительно некоторого нулевого горизонтального уровня. Уравнение Бернулли для жидкости имеет вид:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_{nom} = H = const, \quad (1)$$

где H - напор ($м$); h_{nom} - потерянный напор, который складывается из линейных потерь, вызванных силой трения между слоями жидкости, и потерь, вызванных местными сопротивлениями (изменениями конфигурации потока) ($м$); α_1 и α_2 - коэффициенты Кориолиса, которые равны 1 для турбулентного потока и 2 – для ламинарного.

Уравнение Бернулли для газа имеет вид:

$$h_1 \rho g + p_1 + \alpha_1 \frac{\rho V_1^2}{2} = h_2 \rho g + p_2 + \alpha_2 \frac{\rho V_2^2}{2} + \Delta p_{nom} = const, \quad (2)$$

где Δp_{nom} - потерянное давление ($Па$).

Если обозначить $F_1 (\frac{кг}{с})$ и $F_2 (\frac{кг}{с})$ - расход жидкости и газа через сечения S_1 и S_2 , то уравнение (1) примет вид (3), а уравнение (2) – вид (4):

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{F_1^2}{(S_1 \rho)^2 2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{F_2^2}{(S_2 \rho)^2 2g} + h_{nom} = H = const, \quad (3)$$

$$h_1 \rho g + p_1 + \alpha_1 \frac{\rho F_1^2}{2(S_1 \rho)^2} = h_2 \rho g + p_2 + \alpha_2 \frac{\rho F_2^2}{2(S_2 \rho)^2} + \Delta p_{nom} = const. \quad (4)$$

Таким образом, уравнения (3) и (4) описывают зависимости между входными и выходными значениями расходов и давлений жидкостей и газов для участка трубы, задвижки, клапана-отсекателя, регулирующего клапана.

При моделировании регулирующего клапана площадь сечения $S_{реал}$ ($м^2$) зависит от L (%) - положения клапана (степени открытия):

$$S_{реал} = S \left(\frac{L}{100} \right)^{k_L},$$

где k_L - коэффициент нелинейности, характеризующий скорость хода клапана (при малом проценте открытия ход быстрее, при большом - медленнее); S - площадь сечения при положении клапана 100% ($м^2$).

При моделировании задвижки и клапана-отсекателя площадь сечения $S_{реал} = 0$ в случае, если задвижка или отсекатель закрыты, и $S_{реал} = S$, если задвижка или отсекатель открыты.

Рассмотрим модель теплообмена между двумя потоками. Пусть F_1 ($\frac{кг}{с}$), T_1 ($К$) – расход и температура первого потока, F_2 ($\frac{кг}{с}$), T_2 ($К$) – второго. Тогда температуры потоков в результате теплообмена вычисляются по формулам:

$$T_1^{рез} = \frac{F_1 T_1 c_1 + k_{обмен} F_2 T_2 c_2}{F_1 c_1 + k_{обмен} F_2 c_2}, \quad T_2^{рез} = \frac{k_{обмен} F_1 T_1 c_1 + F_2 T_2 c_2}{k_{обмен} F_1 c_1 + F_2 c_2},$$

где $k_{обмен}$ - коэффициент теплообмена; c_1 и c_2 - удельные теплоемкости потоков ($\frac{Дж}{кгК}$).

Для описания зависимости между входными и выходными значениями расходов и давлений целесообразно использовать уравнения (3) и (4).

Перейдем к рассмотрению модели топки парового многотопливного котлоагрегата. Пусть $F_{ГП}$ - расход природного газа, поступающего в топку ($\frac{кг}{с}$), $F_{ГД}$ - расход доменного газа, поступающего в топку ($\frac{кг}{с}$), $F_{ГК}$ - расход коксового газа, поступающего в топку ($\frac{кг}{с}$), $F_{воз}$ ($\frac{кг}{с}$), $T_{воз}$ ($К$) - расход и температура воздуха, поступающего в топку.

Тогда $F_{воз}^{необход}$ ($\frac{кг}{с}$) - расход воздуха, необходимый для полного сгорания топлива, поступающего в топку, вычисляется по формуле:

$$F_{воз}^{необход} = k_{ГП} F_{ГП} + k_{ГД} F_{ГД} + k_{ГК} F_{ГК},$$

где $k_{ГП}$ - коэффициент, характеризующий количество единиц воздуха, необходимых для сгорания единицы природного газа; $k_{ГД}$ - коэффициент, характеризующий количество единиц воздуха, необходимых для сгорания единицы доменного газа; $k_{ГК}$ - коэффициент, характеризующий количество единиц воздуха, необходимых для сгорания единицы коксового газа.

Расход дымовых газов, выделяющихся в результате сгорания топлива, вычисляется по формуле

$$F_{дг} = F_{воз} + F_{гп} + F_{гд} + F_{гк}.$$

Тогда процентное содержание остаточного кислорода в дымовых газах

$$O_2 = \frac{(F_{воз} - F_{воз}^{необход})}{F_{дг}} 100 \quad \text{при } F_{воз} > F_{воз}^{необход},$$

$$O_2 = 0 \quad \text{при } F_{воз} \leq F_{воз}^{необход}.$$

Количество тепла, выделяемое при сгорании топлива,

$$Q_{дг} = \int (q_{гп} F_{гп} + q_{гд} F_{гд} + q_{гк} F_{гк}) \frac{F_{воз}}{F_{воз}^{необход}} dt,$$

где $q_{гп}$ - удельная теплота сгорания природного газа ($\frac{Дж}{кг}$); $q_{гд}$ - удельная теплота сгорания доменного газа ($\frac{Дж}{кг}$); $q_{гк}$ - удельная теплота сгорания коксового газа ($\frac{Дж}{кг}$).

Температура дымовых газов

$$T_{дг} = \frac{Q_{дг}}{F_{дг} c_{дг} \Delta t} + T_{воз},$$

где $c_{дг}$ - удельная теплоемкость дымовых газов ($\frac{Дж}{кгК}$).

Рассмотрим модель работы барабана. Пусть $F_{воды}$ ($\frac{кг}{с}$), $T_{воды}$ ($К$) - расход и температура воды, поступающей в барабан. Для моделирования работы барабана составим тепловой баланс:

$$Q_{дг} = k_{потерь} (Q_{нагрев} + Q_{пар}),$$

где $k_{потерь}$ - коэффициент теплопотерь; $Q_{нагрев}$ - количество теплоты, которое идет на нагрев воды в барабане до температуры парообразования ($Дж$); $Q_{пар}$ - количество теплоты парообразования ($Дж$).

$$Q_{нагрев} = c_{воды} m_{воды} (T_{пар} - T_{воды}),$$

где $c_{воды}$ - удельная теплоемкость воды ($\frac{Дж}{кгК}$); $m_{воды}$ - масса воды, поступившей в барабан ($кг$); $T_{пар}$ - температура парообразования ($К$).

$$m_{воды} = \int F_{воды} dt, \quad Q_{пар} = L_{пара} m_{пара}.$$

Тогда

$$m_{пара} = \frac{Q_{дг} - k_{потерь} Q_{нагрев}}{k_{потерь} L_{пара}},$$

$L_{пара}$ - удельная теплота парообразования ($\frac{Дж}{кг}$).

$$F_{\text{пара}} = \frac{dm_{\text{пара}}}{dt},$$

где $m_{\text{пара}}$ (кг), $F_{\text{пара}}$ ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$) – масса и расход пара.

$l_{\text{воды}}$ (%) - уровень воды в барабане вычисляется по формуле

$$l_{\text{воды}} = \frac{m_{\text{воды}} - m_{\text{пара}}}{\rho_{\text{воды}} V_{\text{бар}}} 100,$$

где $\rho_{\text{воды}}$ - плотность воды ($\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$); $V_{\text{бар}}$ - объем барабана (м^3).

Основные принципы, используемые авторами при моделировании компрессора, описаны в работе [8].

Численная реализация разработанной авторами модели парового котла №9 ПАО „ДМКД” была выполнена с помощью открытого программного проекта OpenScada. При этом рассмотренные выше модели технологических аппаратов добавлены в „Библиотеку технологических аппаратов” OpenScada и могут быть использованы для построения моделей различных технологических процессов.

Для подтверждения адекватности разработанной модели сравним модельные данные с данными суточной ведомости парового котла №9 ПАО „ДМКД” (табл.2-4).

Таблица 2 – Данные суточной ведомости парового котла №9 ПАО „ДМКД”

Часы	Нагрузка котла паромер	Пар		Питательная вода			Расход топлива Доменный газ	Давление топлива (доменный газ)		Температура уходящих дымовых газов	Разрежение в топке	Воздух	
		Давление в барабане	Температура перегретого пара	Давление до экономайзера	Расход перед парохладителем	Температура после экономайзера		В коллекторе	Перед горелкой			Давление за воздухоподогревателем	Температура за воздухоподогревателем
	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	$\times 10^4$ Па	К	$\times 10^4$ Па	$\frac{\text{кг}}{\text{с}}$	К	$\frac{\text{М}^3}{\text{с}}$	$\times 10^6$ Па	$\times 10^6$ Па	К	Па	Па	К
1	26,39	345,19	698	411,88	5,61	516	20,27	39,23	7,85	468	26,48	284,39	578
5	27,22	347,15	698	411,88	6,11	516	21,39	44,13	10,79	470	26,48	284,39	578
10	22,78	354,02	698	431,49	2,58	515	17,78	34,32	5,88	464	26,48	284,39	571
15	20	353,03	698	411,88	4,89	517	16,11	93,16	2,94	461	26,48	313,81	563
20	25	351,08	693	431,68	5	518	21,94	53,94	9,8	468	29,42	274,58	578
24	25,84	341,27	693	402,07	4,39	516	21,11	53,94	9,8	469	24,52	274,58	578

Таблица 3 – Модельные данные

Часы	Нагрузка котла паромер	Пар		Питательная вода			Расход топлива	Давление топлива (доменный газ)		Температура уходящих дымовых газов	Разрежение в топке	Воздух	
		Давление в барабане	Температура перегретого пара	Давление до экономайзера	Расход перед парохладителем	Температура после экономайзера		Доменный газ	В коллекторе			Перед горелкой	Давление за воздухоподогревателем
	$\frac{кг}{с}$	$\times 10^4$ Па	К	$\times 10^4$ Па	$\frac{кг}{с}$	К	$\frac{м^3}{с}$	$\times 10^6$ Па	$\times 10^6$ Па	К	Па	Па	К
1	29,23	358,17	711	382,77	4,8	520	23,43	43,37	10,14	483	23,12	273,42	599
5	32,01	361,14	694	395,9	7,12	521	23,19	48,03	12,8	490	22,8	270,36	584
10	26,34	376,01	705	457,54	1,91	517	13,84	34,12	3,79	453	23,46	272,12	583
15	18,05	361,13	702	452,67	4,11	520	15,23	87,21	1,03	448	22,53	290,18	577
20	22,24	354,11	691	424,79	3,9	521	27,14	46,48	10,32	456	27,18	256,79	594
24	29,23	352,17	693	382,77	3,87	520	24,43	45,37	10,14	483	23,12	273,42	599

Таблица 4 – Коэффициенты корреляции между данными суточной ведомости парового котла №9 ПАО „ДМКД” и модельными данными

Нагрузка котла паромер	Пар		Питательная вода			Расход топлива	Давление топлива (доменный газ)		Температура уходящих дымовых газов	Разрежение в топке	Воздух	
	Давление в барабане	Температура перегретого пара	Давление до экономайзера	Расход перед парохладителем	Температура после экономайзера		Доменный газ	В коллекторе			Перед горелкой	Давление за воздухоподогревателем
0,861	0,665	0,718	0,642	0,915	0,702	0,934	0,967	0,964	0,837	0,835	0,864	0,796

Выводы. Таким образом, авторами разработана новая методика построения моделей технологических процессов, позволяющая осуществлять моделирование в динамическом режиме и объединять несколько видов моделирования для описания одного

технологического процесса. Эта методика позволяет определить значения необходимых параметров технологического процесса с вероятностью не менее 84%. При этом между модельными данными и данными, полученными с помощью измерительных приборов, наблюдается сильная линейная корреляция. Следовательно, разработанная методика моделирования позволяет получать данные, которые описывают моделируемый процесс адекватно как количественно, так и качественно, что позволит использовать эту методику при разработке современных автоматизированных систем управления с целью оптимизации нагрузки на контроллеры, отработки алгоритмов управления, обучения технического персонала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А. Математическое моделирование / Самарский А.А., Михайлов А.П. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 320с.
2. Ашихмин В.Н. Введение в математическое моделирование / Ашихмин В.Н. – М.: ЛогосГод, 2005. – 440с.
3. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем / Алиев Т.И. – СПб.: Питер, 2009. – 363с.
4. Шикин Е.В. Математические методы и модели в управлении / Шикин Е.В., Чхартшвили А.Г. – М.: „Дело”, 2000. – 431с.
5. Густав О. Цифровые системы автоматизации и управления / Густав О., Джангуидо П. – СПб.: „Невский Диалект”, 2001. – 557с.
6. Динамическая модель парового котла № 9 ПАО „ДМКД”. – Режим доступа: www.oscada.org.
7. Уравнение Бернулли. Часть V. Динамика жидкостей и газов. – Режим доступа: <http://www.fizportal.ru>
8. Моделирование работы многоступенчатого осевого компрессора с учетом отбора воздуха / Л.Г.Бойко, А.Е.Демин, Ю.П.Максимов [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4. – С.94-99. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/aktit_2005_4_22.pdf

Поступила в редколлегию 09.09.2014.