

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОДЕЙКО ПАВЛО ПЕТРОВИЧ

УДК 62-83: 681.587: 681.5.033

ДИСЕРТАЦІЯ

СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМИ
УСТАНОВКАМИ НА ОСНОВІ НЕЙРО - НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В УМОВАХ
НЕПОВНОЇ ВИЗНАЧЕНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Спеціальність 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів
і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Подейко П.П.

Науковий керівник

Стяжкін Віталій Павлович
канд. техн. наук, старший
науковий співробітник

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Подейко П.П. Система автоматичного керування електротермічними установками на основі нейро-нечіткої логіки в умовах неповної визначеності технологічних характеристик. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи». – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2019.

Розглянуті в роботі електротермічні установки (ЕТУ), що виробляють базальтове супертонке волокно (БСТВ) на більшості спеціалізованих діючих підприємствах, є характерними ЕТУ, які використовують в технологічному процесі струмові характеристики в силових колах живлення спеціальних технологічних трансформаторів, мають значну чутливість до змін, що вносяться в технологічний процес внутрішніми і зовнішніми чинниками і збуреннями, та потребують найкращу якість кінцевого продукту – БСТВ, як основи для теплоізолюючих матеріалів, що користуються великим попитом в громадському та промисловому будівництві.

Такі електротермічні установки є складними нелінійними системами з взаємопов'язаними та змінними у часі параметрами і тому, як об'єкти електроживлення та автоматичного керування, вимагають розробки спеціальних методів, схем та технічних засобів.

Якість волокна БСТВ залежить від великої кількості факторів. З усіх технологічних параметрів можна виділити два найбільш значущих для процесу роздування первинних ниток і формування якісного волокна: геометрична точність первинних ниток і швидкість газового потоку, що виходить з сопла роздування. Саме стабільність цих двох факторів має забезпечити система електроживлення та керування, що розробляється. Крім того, ця система має мати можливість гнучкого регулювання діаметра первинної нитки розплаву, що витягається з фільтрального живильника, як

впливового фактора утворення неволокнистих включень в базальтовому волокні, що отримується дуплекс-методом. Цьому питанню не приділено належної уваги (з точки зору керування технологічними параметрами) в літературних джерелах.

Проведений аналіз показав, що процесу виробництва БСТВ притаманний суттєвий негативний, з позиції теорії автоматичного керування, фактор - нестационарність опису об'єкта, взаємний вплив керованих змінних стану, задіяних в різних незалежних контурах регулювання (наприклад, контур нагріву фільєра і механізм витягування первинних волокон пов'язані з нагріванням базальтового розплаву і його рівнем в печі).

Найсуттєвішим фактором забезпечення якості БСТВ є вибір схеми, закону та режиму роботи струмового контуру для нагріву фільєрного живильника, оптимальність яких нівелює негативну дію змін опору фільєри внаслідок флуктуацій, що виникають при формуванні розплаву, і змін характеристик електричної мережі живлення.

Аналіз способів регулювання струму фільєрних живильників показав, що перспективним напрямком розробки та досліджень установки виробництва БСТВ є застосування плавно-ступінчастого регулювання струму (комбіноване керування напівпровідниковим регулятором струму і спеціальним трансформатором з відгалуженнями на первинній стороні), при якому регулювання виконується з найменшими енерговитратами і спотвореннями струму мережі живлення.

Розроблено математичні моделі двох основних структур спеціального трансформатора (з однією і двома первинними обмотками), які враховують нелінійні властивості осердя і нелінійну залежність опору навантаження від температури фільєр, які адекватно (за результатами експериментальних досліджень) відображають реальні електромагнітні процеси в трансформаторах такого типу.

Визначено, що головна координата установки БСТВ - температура фільєрного поля T в зоні вироблення розплаву - нелінійно залежить від

величини струму вторинної обмотки СТ. Побудовано апроксимовану залежність $T = f(I_2)$ для всього діапазону робочих струмів, яку доцільно використовувати при синтезі структурних схем системи.

Розроблено математичну модель системи тиристорний регулятор струму - спеціальний трансформатор ТРС-СТ, яка відображає процес регулювання струму фільтрних живильників. Проведено розрахунки і аналіз перехідних процесів системи в середовищі *MATLAB SIMULINK*, результати яких свідчать про адекватність запропонованої математичної моделі (розбіжність між змодельованими та реальними графіками перехідних процесів не більше 5%). Результати моделювання можуть бути використані для подальшої оптимізації багатоконтурної системи керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами.

Визначено, що автоматичне регулювання діаметра первинної нитки, яка витягується при виробництві БСТВ, вимагає зміни температури фільтрного поля і швидкості обертання витяжних валків (технологічних параметрів, складним чином пов'язаних між собою). За неможливості точного математичного опису процесу, врахування розкиду параметрів установки, варіації зовнішніх факторів і широкого діапазону зміни опору фільтрної пластини класичні методи керування з детермінованими зворотними зв'язками неефективні, найбільш прийнятним методом побудови високоефективної системи керування процесом отримання БСТВ є використання апарату нечіткої логіки.

Розроблено метод керування установкою з виробництва БСТВ, при якому в залежності від заданих технологічних параметрів (діаметр первинної нитки та час безперервної роботи установки) з використанням синтезованого нечіткого логічного контролера (НЛК) формуються величини сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і струму стабілізації первинної обмотки спеціального трансформатора системи ТРС-СТ.

Розроблено імітаційну модель системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки.

Проведено розрахунки та дослідження системи за моделю та зроблено порівняльний аналіз розрахункових та отриманих експериментальним шляхом даних за критерієм якості керування (стабільність формування діаметра первинної нитки). Відхилення в даних знаходяться в межах 15%. Це пояснюється неточністю математичного опису об'єкта керування та недовільною некоректністю бази правил НЛК, що певною мірою може впливати на діаметр отриманого первинного волокна.

Розвинуто метод керування установкою з виробництва БСТВ, при якому в залежності від заданих технологічних параметрів (діаметр первинної нитки та час безперервної роботи установки) з використанням синтезованого НЛК формуються величини сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і струму стабілізації первинної обмотки спеціального трансформатора системи ТРС-СТ.

Розроблено імітаційну модель системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки зі застосуванням гібридної мережі ANFIS моделей, розташованих в паралельній комбінації, які утворюють адаптивну систему нейро-нечіткого виводу з декількома виходами. Порівняльний аналіз розрахункових і отриманих експериментальним шляхом даних показав відсутність перерегулювання, а відхилення даних не перевищують 5%.

Визначено, що система ТРС-СТ є джерелом електромагнітних завад, які погіршують показники якості електромережі. Проведено промислові заводські випробування системи ТРС-СТ, які показали високий рівень гармонік струму, що генеруються в мережу живлення і перевищують всі допустимі норми (коефіцієнт гармонік струму доходить до 73% в діапазоні малих його значень і до 27% - 33% в діапазоні великих значень). Проведено дослідження системи за допомогою комп'ютерного моделювання, які показали аналогічні результати. Визначено, що застосування системи ТРС-СТ неможливо без спеціальних заходів і засобів, за яких рівень гармонік струму буде зменшено до допустимих значень, встановлених державними стандартами.

Доведено, що пасивні широкосмугові LMC-фільтри не ефективні для придушення гармонік струму, особливо в широкому діапазоні регулювання струму в системі ТРС-СТ з фазовим керуванням, яка живить потужні однофазні навантаження, виправдано застосування додаткових пристроїв паралельного підключення – активних коректорів форми вхідного струму (АКФС).

Проведено заводські випробування експериментального зразка АКФС та комп'ютерне моделювання його використання в системі ТРС-СТ. Визначено, що вхідний струм споживання системою з мережі має форму, близьку до синусоїдальної і збігається за фазою з напругою мережі. Крім того, з досить високою точністю формується струм коректора, зменшуючи при цьому діюче значення вхідного струму системи майже в 3 рази в режимі розігріву фільтрних пластин. Високочастотні пульсації з частотою 20 кГц, які присутні в струмі дроселя коректора, значно послаблюються високочастотним фільтром радіоперешкод.

Доведено, що АКФС дозволяють досягти малого коефіцієнта гармонік (THD_I) струму живлення, в тому числі при широкому діапазоні його регулювання, проте досягається це за рахунок не виправдано завищеного значення номінального струму силового інвертора та АКФС в цілому.

Доведено, що найбільш доцільними для використання з потужними однофазними навантаженнями є гібридні фільтри, що складаються з каскадного з'єднання паралельного активного і послідовно-паралельного пасивного LMC фільтра, що дозволяють суттєво зменшити загальну вартість фільтру в цілому при збереженні необхідного THD_I .

Доведено, що при наявності спеціального трансформатора з відгалудженнями достатньо хороші результати фільтрації гармонік струму дає запропоноване об'єднання АКФС з двоступеневим виконавчим органом тиристорно-трансформаторної структури (зменшився сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень THD_I із 74% до 5%).

Результати роботи знайшли практичне використання при розробці Інститутом електродинаміки НАН України і серійному виготовленні науково-технічною фірмою "ТЕМС" (м.Київ) напівпровідникових тиристорних регуляторів струму РЕНАП-1Т-100ДТ, як основних складових системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ, створенні високоефективних систем керування установками УБСТВ 22 з виробництва базальтового супертонкого волокна, які пройшли апробацію в умовах діючих виробництв ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» та ТОВ «Севєродонецький завод теплоізоляційних матеріалів» (підтверджено актами впровадження).

Ключові слова: електротермічна установка, тиристорний регулятор, спеціальний трансформатор, нечіткий логічний контролер, гібридний фільтр, електромагнітна сумісність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Тиристорные регуляторы тока в электротермических установках плавления и модификации материалов. *Праці ІЕД НАН України*. 2008. № 20. С. 59. (Особистий внесок – запропоновано застосування напівпровідникових регуляторів струму для електротермічних установок плавлення та модифікації матеріалів) .

2. Комаров М.С., Головки О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П. Энергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. № 6. С. 278–286. (Особистий внесок – розроблено активний коректор форми струму з релейним несинхронізованим способом керування силовими транзисторами).

3. Стяжкин В.П., Зайченко О.А., Подейко П.П., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. №19 (95). С.71–74. (Особистий внесок – розроблено автоматизовану систему керування електроприводами мостового крана-маніпулятора для установки дезактивації металів).

4. Стяжкін В.П., Комаров М.С., Подейко П.П. Підвищення енергетичних показників системи тиристорний регулятор струму – трансформатор живлення в електротермічних установках. *Електротехніка та зв'язок*. 2016. №5(94). С. 20–23. (Особистий внесок – визначено гармонійний склад вхідного струму джерел живлення електротермічними установками та розроблено імітаційну модель системи з активним коректором форми струму).

5. Комаров М.С., Спірін В.М., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В. Оптимізація електромагнітних вузлів – реакторів з різними матеріалами осердь для активних коректорів форми струму. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. №4 (2). С. 71–74. (Особистий внесок – проведено дослідження та розрахунки оптимального варіанту матеріалу осердь реакторів активних фільтрів).

6. Волков И.В., Стяжкин В.П., Зайченко О.А., Подейко П.П. Система с нечеткой логикой регулирования режимов работы установки по производству базальтового супертонкого волокна. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 379–383. (Особистий внесок – проведено аналіз основних факторів, що впливають на процес волокноутворення при виробництві базальтового супертонкого волокна та побудовано систему регулювання і стабілізації діаметру первинних ниток на базі нечіткої логіки).

7. Волков І.В., Стяжкін В.П., Подейко П.П. Топологія фільтро-компенсуючих пристроїв для покращення спектру вхідного струму джерел живлення в електротермічних установках з виробництва базальтового супертонкого волокна. *Технічна електродинаміка*. 2018. №6. С. 85-88.

(Особистий внесок – розроблено гібридні фільтро-компенсуючі пристрої для електротермічних джерел живлення, проведено математичне моделювання таких пристроїв і експериментальну перевірку їх ефективності).

Наукові праці апробаційного характеру:

8. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Адаптивная система регулирования тока трансформатора в электротермических установках плавления. *Технічна електродинаміка*: мат. Міжнародної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", Алушта, Крим, 21 – 26 вересня 2009. Ч. 5. С. 109–110.

9. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Повышение качества регулирования в системе регулируемый источник тока – установка электрошлакового переплава. *Технічна електродинаміка*: мат. Міжнародної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", Алушта, Крим, 19 – 26 вересня 2011. Ч. 2. С.287–292.

10. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна. *Вестник НТУ "ХПИ"*: мат. Об'єднаної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", Одеса, 7 вересня 2015. № 12 (1121). С. 124–127.

ABSTRACT

Podeiko P.P. The system of automatic control of electrothermal installations on the basis of neuro-fuzzy logic in conditions of incomplete certainty of technological characteristics. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for Candidate of Engineering Sciences degree by specialty 05.09.03 - electrotechnical complexes and systems. - Institute of electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

The electric-thermal installations (ETIs), which produce basalt ultra-thin fiber (BUTF) in the majority of specialized enterprises, are considered in the work. They are typical of ETIs, which use in the technological process current characteristics in the power circuits of special technological transformers that have a high sensitivity to the changes introduced. into the technological process by internal and external factors and disturbances, and they need the best quality of the final product - BUTF as the basis for the heat-insulating materials that are useful uyutsya great demand in public and industrial construction.

Such electrothermal installations are complex nonlinear systems with interconnected and time-varying parameters and because power supply and automatic control objects require the development of special methods, circuits and technical means.

The quality of the BUTF depends on a large number of factors. Of all the technological parameters one can distinguish two of the most significant for the process of dispensing primary threads and the formation of qualitative fibers: the geometric accuracy of the primary threads and the rate of gas flow coming from the blowout nozzle. It is precisely the stability of these two factors that must be ensured by the system of power supply and control being developed. In addition, this system should have the ability to flexibly adjust the diameter of the primary melt thread extracted from the filer feeder as an influential factor in the formation of non-fibrous inclusions in the basalt fiber obtained by the duplex method. This issue has not been

given sufficient attention (in terms of technological parameters management) in literary sources.

The analysis showed that the production process of BUTF has a significant negative, from the position of the theory of automatic control, the factor is the unsteady description of the object, the mutual influence of the controlled variables of the state involved in different independent control circuits (for example, the filament heating circuit and the mechanism for pulling the primary fibers connected with the heating of the basalt melt and its level in the furnace).

The most important factor in ensuring the quality of BUTF is the choice of the circuit, the law and operating conditions of the current circuit for the heating of the feeder feeder, the optimality of which alters the negative effect of changes in the resistance of the filer due to fluctuations that occur during the formation of the melt, and changes in the characteristics of the electrical power supply.

An analysis of the ways of regulating the current of filer feeders has shown that the perspective direction of the development and research of the BUTF plant is the use of smooth-stage current regulation (combined control of the semiconductor current regulator and a special transformer with branches on the primary side), in which regulation is performed with the least power consumption and current distortion power supply.

The mathematical models of two main structures of a special transformer (with one and two primary windings) that take into account the nonlinear properties of the core and the nonlinear dependence of the load resistance on the filer temperature, which adequately (according to the experimental results) reflect the real electromagnetic processes in transformers of this type, have been developed.

It is determined that the main coordinate of the BUTF installation is the temperature of the filer field T in the melt production zone - nonlinearly depends on the value of the current of the secondary winding CT . The approximated dependence $T = f(I_2)$ for the entire range of operating currents is constructed, which is expedient to use in the synthesis of structural schemes of the system.

The mathematical model of the thyristor current regulator system is developed - a special transformer TCR-ST, which reflects the process of regulating the current of filer feeders. The calculations and analysis of the transient processes of the system in the *MATLAB SIMULINK* environment are carried out, the results of which prove the adequacy of the proposed mathematical model (the difference between the simulated and real transient processes graphs is not more than 5%). The simulation results can be used for further optimization of the multi-contour control system with interconnected and nonlinear parameters.

It has been determined that the automatic adjustment of the diameter of the primary thread, which is extracted during the production of BUTF, requires the change in the temperature of the filer field and the speed of rotation of the exhaust rollers (technological parameters, which are complexly interconnected). Due to the impossibility of accurate mathematical description of the process, taking into account the distribution of the parameters of the installation, the variation of external factors and the wide range of the resistance of the filer plate, the classical methods of control with deterministic feedback are ineffective, the most suitable method for constructing a highly effective control system for the process of obtaining BUTF is the use of a fuzzy logic apparatus.

The method of control of the installation for the production of BUTF, in which, depending on the given technological parameters (the diameter of the primary thread and the time of the continuous operation of the installation), using the synthesized fuzzy logic controller of the FLC, the values of control signals are generated - the speed of pulling the primary fiber and the current of stabilizing the primary winding of the special transformer system TCR-ST.

The simulation model of the thyristor current regulator system is developed - a special transformer TCR-CT with FLC diameter of the primary thread. The calculations and system deviation of the model were made and a comparative analysis of the calculated and experimental data obtained by the control quality criterion (the stability of the formation of the diameter of the primary thread) was made. Deviations in data are within 15%. This is due to the inaccuracy of the

mathematical description of the control object and the lack of incorrectness of the base rules of the FLC, which to some extent can affect the diameter of the resulting primary fiber.

The method of control of the installation for the production of BUTF, in which, depending on the given technological parameters (the diameter of the primary thread and the time of continuous operation of the installation) using the synthesized neuro-fuzzy FLC logic controller, the values of the control signals are obtained - the speed of pulling the primary fiber and the current of the primary winding stabilization special transformer of the TCR-ST system.

The simulated model of the thyristor current regulator system is developed - a special transformer TCR-CT with FLC diameter of the primary thread using the hybrid network of ANFIS models, located in a parallel combination, which form an adaptive system of neuro-fuzzy output with several outputs. The comparative analysis of the calculated and experimental data obtained showed no overregulation, and the deviation of data does not exceed 5%.

It is determined that the system TCR-ST is a source of electromagnetic interference, which worsen the quality of the grid. Industrial factory tests of the TCR-ST system have been carried out, which showed a high level of harmonics of current generated in the power supply network and exceed all allowable norms (the current harmonic coefficient reaches 73% in the range of its small values and to 27% -33% in the range of large values) A system research was conducted using computer simulations that showed similar results. It is determined that the use of the TCR-ST system is impossible without special measures and means, in which the level of harmonics of the current will be reduced to the permissible values set by the state standards.

It is proved that passive wideband LMC filters are not effective for suppressing current harmonics, especially in a wide range of current regulation in the system of TCR-ST with phase control, which feeds powerful single-phase loads, the use of additional devices of parallel connection - active correction of input current forms (ACFC)

Factory tests of an experimental ACFC and a computer simulation of its use in the TCR-ST system were conducted. It is determined that the input current of consumption of the system from the network has the form close to sinusoidal and coincides with the phase with the voltage of the network. In addition, with a fairly high accuracy, the current of the corrector is formed, while reducing the current value of the input current of the system by almost 3 times in the heating mode of the filament plates. High-frequency pulses with a frequency of 20 kHz present in the torch current of the corrector are greatly weakened by high-frequency radio interference filter.

It is proved that ACFC allows to achieve a small harmonic (THD_I) current of a current, including at a wide range of its regulation, but this is achieved due to unreasonably overestimated value of the nominal current of the power inverter and ACFC as a whole.

It is proved that the most expedient for use with powerful single-phase loads are hybrid filters consisting of a cascade connection of a parallel active and sequential parallel passive LMC filter, which can significantly reduce the overall cost of the filter as a whole, with the preserved desired THD_I .

It is proved that in the presence of a special transformer with branches, good results of filtration of harmonics of current yields the proposed association of ACFC with a two-stage executive body of the thyristor-transformer structure (the total coefficient of harmonic distortions of THD_I from 74% to 9.5% in the filerheating mode has decreased, and in nominal thermal conditions from 31% to 19%).

The results of the work have been found to be practical in the development of the RENAP-1T-100DT semiconductor thyristor current regulators by the Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the serial production of the scientific and technical firm "TEMS" (Kiev), as the main components of the thyristor current regulator system - a special transformer TCR-ST, creation of high-performance control systems for IBUTF plants for the

production of basalt super-thin fibers, which have been tested under the conditions of the existing production facilities of LTD Commercial Industrial Enterprise «Chernivtsi factory of heat-insulating products» and LTD " Severodonetsk Plant of Thermal Insulation Materials " (confirmed by the acts of implementation).

Keywords: electrothermal installation, thyristor controller, special transformer, fuzzy logic controller, hybrid filter, electromagnetic compatibility.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	19
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ З ВИРОБНИЦТВА БАЗАЛЬНОГО СУПЕРТОНКОГО ВОЛОКНА	28
1.1 Установка з виробництва мінеральних волокнистих матеріалів як об'єкт керування. Особливості технологічного процесу виробництва базального супертонкого волокна БСТВ.	28
1.2. Фактори, які впливають на якість волокна в технологічному процесі волокноутворення	31
1.3. Формування первинних ниток волокна БСТВ, залежності між електричними та технологічними параметрами.....	35
1.4. Основні способи регулювання струму фільтрних живильників в установках з виробництва БСТВ	43
1.5. Імпульсно-фазове трансформаторно-тиристорне регулювання струму в установці з виробництва БСТВ	49
1.6. Висновки до розділу 1.....	52
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ - СПЕЦІАЛЬНИЙ ТРАНСФОРМАТОР УСТАНОВКИ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ	55
2.1 Структура системи тиристорний регулятор струму - спеціальний трансформатор.....	55
2.2. Математичні моделі спеціального трансформатора.....	58
2.2.1. Математична модель спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою.....	59

2.2.2 Математична модель спеціального трансформатора з двома первинними обмотками	63
2.3 Статичні характеристики фільтрального живильника	66
2.4 Дослідження математичної моделі системи ТРС-СТ	67
2.5 Аналіз перехідних процесів в системі ТРС-СТ	72
2.6. Висновки до розділу 2.....	73
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	
3.1 Вплив технологічних параметрів установки з виробництва БСТВ на діаметр первинної нитки.....	74
3.2 Синтез нечіткого логічного контролера діаметра первинної нитки при виробництві БСТВ.....	78
3.4 Синтез НЛК діаметра первинної нитки із застосуванням нейронних мереж	95
3.5 Висновки до розділу 3.....	104
РОЗДІЛ 4 ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ - СПЕЦІАЛЬНИЙ ТРАНСФОРМАТОР УСТАНОВКИ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ	
4.1. Дослідження і аналіз впливу на мережу живлення системи ТРС – СТ в технології отримання БСТВ.	106
4.1.1 Промислові дослідження впливу роботи системи ТРС-СТ на мережу живлення.....	111
4.1.2 Дослідження впливу роботи системи ТРС – СТ на мережу живлення за допомогою комп'ютерного моделювання.....	113
4.1.3 Аналіз впливу системи ТРТ - СТ на мережу живлення	117
4.2. Активний коректор форми вхідного струму системи ТРТ – СТ	117

4.3 Зменшення встановленої потужності активного коректора форми струму в складі гібридного фільтра	130
4.4 Зменшення встановленої потужності активного коректора форми струму за допомогою комбінованих перетворювачів змінного струму.....	136
4.5 Висновки до розділу 4.....	141
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ	
КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ З ГІБРИДНИМ	
ФІЛЬТРОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД	
143	
5.1 Комп’ютерна система нейрон-нечіткого логічного контролера.....	143
5.2 Опис експериментального зразка фільтро-компенсуючого пристрою ...	145
5.3 Промислова апробація використання гібридного фільтра вищих гармонік в системі ТРС-СТ.....	146
5.4 Висновки до розділу 5.....	153
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	157
ДОДАТОК А	167
Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	167
ДОДАТОК Б.....	170
Лабораторний макет АКФС та впровадження системи ТРС-СТ з ННЛК	170
ДОДАТОК В.....	176
Акти використання результатів дисертаційної роботи	176

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АКФС	– активний коректор форми струму;
АРМ	– автоматизоване робоче місце;
АФ	– активний фільтр;
БСТВ	– базальтове супертонке волокно;
ВО	– виконавчий орган;
ГФ	– гібридний фільтр;
ЕТУ	– електротермічна установа;
РО	– робочий орган;
СІФК	– система імпульсно-фазового керування;
НЛК	– нечіткий логічний контролер;
ПФ	– пасивний фільтр;
ТРС-СТ	– тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор;
ННЛК	– нейро- нечіткий логічний контролер;
ФКП	– фільтро-компенсуючий пристрій;
<i>PWTHDi</i>	– partial weighted harmonic distortion (частково зважений коефіцієнт гармонійних спотворень струму);
<i>THDi</i>	– total harmonic distortion (сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень струму);

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми досліджень. Розглянуті в роботі електротермічні установки (ЕТУ), що виробляють базальтове супертонке волокно (БСТВ) на спеціалізованих діючих підприємствах, дуже чутливі до змін, що вносяться в технологічний процес виробництва волокна внутрішніми і зовнішніми чинниками і збуреннями. В таких ЕТУ задіяні прості системи автоматичного керування, які не здатні компенсувати або нівелювати дію цих збурень. Це негативно впливає на якість кінцевого продукту – БСТВ, як основи для теплоізолюючих матеріалів, що мають великий попит в громадському та промисловому будівництві.

Якість вихідного продукту залежить від геометричної точності діаметру і механічних властивостей первинних ниток, які, в свою чергу, залежать від технологічних і електричних параметрів установки, що виробляє БСТВ. Питанню підтримки стабільності діаметра первинної нитки, що витягується з фільтрного живильника, як основного фактору утворення неволокнистих включень в базальтовому волокні, до цього часу не приділено належної уваги з точки зору керування технологічними параметрами.

Крім того, процесу виробництва БСТВ притаманний суттєвий негативний, з точки зору теорії керування, фактор – нестационарність опису об'єкта, взаємний вплив керованих змінних стану, задіяних в різних незалежних контурах регулювання (наприклад, контур нагріву фільтри і механізм витягування первинних волокон пов'язані з нагріванням базальтового розплаву і його рівнем в печі).

Ця проблема повинна вирішуватися із застосуванням нових методів та засобів керування установкою з виробництва БСТВ, які обмежать взаємовплив технологічних і електричних параметрів, підвищать якість вихідного продукту та ефективність роботи установки. Класичні методи керування із застосуванням типових регуляторів швидкості витягування первинних волокон та струму фільтрного живильника не ефективні для об'єктів керування, технологічні параметри яких нелінійно пов'язані між собою, як це

має місце при виробництві БСТВ. За неможливості точного математичного опису процесу, врахування розкиду параметрів установки, варіації зовнішніх факторів і широкого діапазону зміни опору фільтрної пластини найбільш прийнятним методом побудови високоефективного керування процесом отримання БСТВ вважається використання апарату нейро-нечіткої логіки. Розвиток систем нечіткої логіки і штучних нейроподібних (гібридних) мереж дозволяє синтезувати системи керування, які будуть ефективні саме в таких технологіях, оскільки орієнтовані на обробку великих масивів інформації, здатні до навчання та адаптації.

В технологічному процесі виробництва БСТВ необхідно регулювати струм фільтрних живильників за певним законом і стабілізувати його робоче значення. Перспективним напрямком оптимізації цього процесу є застосування плавно-ступінчастого регулювання струму у фільтрному живильнику. В такому разі спрощується вирішення проблем оптимального керування технологічною установкою з виробництва БСТВ, зниження питомих енерговитрат, підвищення електромагнітної сумісності системи з іншим обладнанням при використанні нових активних та гібридних фільтрів тощо. В своїй роботі автор спирався на досягнення в галузі розробки джерел живлення і керування різноманітних електроустановок таких відомих вітчизняних та зарубіжних вчених як А.К. Шидловський, І.В. Волков, А.Ф. Жаркін, А.А. Щерба, В.М. Михальський, К.О. Липківський, В.О. Новський, В.А. Халиков, В.В. Кирик, М.С. Комаров, В.І. Голошубов, В.А. Попов, Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, М. Levin, В.С. Smith, С. Roger та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів досліджень НАН України в рамках наступних науково-дослідних робіт: «Дослідити електромагнітні процеси та розробити алгоритми адаптивного керування системами з регуляторами напруги, струму, частоти, потужності, орієнтованими на застосування в нових електротехнологіях» (шифр «База-П4», виконувалась

згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 23.01.2007, протокол №1, №ДР0107U001690); «Розробити принципи та критерії оптимального керування джерелами живлення електромагнітних сепараторів, спеціальних трансформаторів, індукторів в технологіях термічної обробки матеріалів, створити на їх основі системи адаптивного керування» (шифр «База-П5», виконувалась згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 06.10.2009, протокол №13, №ДР0109U006889); «Розробити методи, засоби та алгоритми керування, що підвищують енергетичні показники регуляторів напруги, струму, частоти в електротехнологіях обробки матеріалів та покращують показники якості споживання електроенергії з мережі живлення» (шифр «База-П6», виконувалась згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 25.09.2012, протокол №14, №ДР0112U008325); «Визначити принципи побудови гібридних систем керування з нечіткою логікою та створити засоби і алгоритми керування регуляторами напруги, струму, частоти з покращеними характеристиками для систем електротехнологічної обробки матеріалів» (шифр «База-П7», виконувалась згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 07.07.2015, протокол №11, №ДР0115U005311); «Розробити засоби регулювання напруги, струму і частоти для електротехнологій та систем безредукторних електроприводів з застосуванням методів інтелектуального керування» (шифр «База-П8», виконується згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 12.06.2018, протокол №10, №ДР0119U001282).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертації є створення систем автоматичного керування електротермічними установками на основі нейро-нечіткої логіки в умовах неповної визначеності технологічних характеристик для підвищення енергоефективності виробництва і якості мінеральних волокнистих матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Провести аналіз існуючих систем автоматичного керування електротермічними установками в умовах неповної визначеності технологічних характеристик.

2. Визначити основні взаємозв'язки між електричними та технологічними параметрами електротермічної установки з виробництва базальтового супертонкого волокна, виявити закономірності керування параметрами установки, обґрунтувати доцільність розробки нових методів керування установкою.

3. Розробити математичні та імітаційні моделі системи “регулятор струму – спеціальний трансформатор – активне навантаження”, які враховують нелінійні властивості осердя трансформатора та нелінійну залежність температури нагрівального елемента установки в зоні утворення первинних волокон від величини первинного струму трансформатора.

4. Розробити методи керування установкою з виробництва базальтового супертонкого волокна з використанням нечіткої та нейро-нечіткої логіки, за яких в залежності від заданих технологічних параметрів (діаметр первинної нитки, час безперервної роботи установки) формуються необхідні величини сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і струму стабілізації первинної обмотки спеціального трансформатора.

5. Розробити нечіткий та нейро-нечіткий логічні контролери для формування необхідного діаметра первинної нитки та імітаційні моделі системи для аналізу якості керування.

6. Визначити вплив системи на показники якості споживаної електроенергії та розробити нові фільтро-компенсуючі пристрої і методику їх розрахунку.

Об’єкт дослідження – процеси керування параметрами електротермічних установок.

Предмет дослідження – взаємозв’язки електричних та технологічних параметрів електротермічних установок з виробництва базальтового

супертонкого волокна в умовах неповної визначеності технологічних характеристик.

Методи дослідження. При виконанні поставлених в дисертаційній роботі завдань використовувалися: методи теорії електричних кіл і електромагнітних полів; метод кусочно-лінійної апроксимації нелінійних систем; метод гармонійного аналізу і рядів Фур'є; теорія автоматичного керування; методи нечіткої логіки, в тому числі методи синтезу закону керування в нелінійних системах; математичне моделювання в середовищі MATLAB. Для реалізації комп'ютерної системи нечіткого логічного контролера (НЛК) і розроблених алгоритмів для вбудованих мікропроцесорних систем, включаючи програмування і відпрацювання в реальному часі, використовувалися пакети програм MATLAB, FuzzyTECH, OMEGA, TIA Portal.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Встановлено взаємозв'язки між електричними і технологічними параметрами електротермічних установок з виробництва базальтового супертонкого волокна, що формують нову систему правил нейро-нечіткої логіки, яка дозволяє забезпечити автоматичне керування установкою при неповній визначеності технологічних характеристик.

2. Вперше розроблено математичні та імітаційні моделі системи: “регулятор струму – спеціальний трансформатор – активне навантаження”, які враховують нелінійні властивості осердя трансформатора та нелінійну залежність температури нагрівального елементу установки в зоні утворення первинних волокон від величини первинного струму трансформатора, що дає змогу синтезувати багатоконтурну систему керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами.

3. Розроблено новий метод керування установкою для виробництва базальтового супертонкого волокна з використанням нечіткої та нейро-нечіткої логіки, який полягає у формуванні необхідних величин сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і первинного струму

стабілізації спеціального трансформатора, в залежності від заданих технологічних параметрів, що дає змогу підвищити ефективність установок з виробництва БСТВ.

4. Вперше встановлено закономірності впливу режимів роботи системи з регулятором струму електротермічної установки на показники якості електроенергії мережі живлення, що дає змогу розробити ефективні фільтро-компенсуючі пристрої для придушення вищих гармонік споживаного струму.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Розроблено і виготовлено в Інституті електродинаміки НАН України дослідно-експериментальну установку, що містить напівпровідниковий регулятор струму, спеціальний трансформатор з відгалуженнями і активним навантаженням, гібридний фільтро-компенсуючий пристрій, що формують основу силової частини електротермічної установки, автоматизовану систему керування, яка складається з промислового комп'ютера з програмним продуктом Siemens SIMATIC WinCC Runtime Professional та програмованого логічного контролера серії S7-1200 Siemens. Це дозволило провести дослідження електромагнітних процесів в системі, в тому числі для підвищення якості електроспоживання, відпрацювати розроблені алгоритми керування установкою.

2. Розроблено і досліджено перспективні схеми силової частини електротермічної установки та системи керування, а також структури та алгоритми нечіткого та нейро-нечіткого логічних контролерів. Означені результати роботи знайшли практичне використання при створенні високоефективних систем автоматичного керування установками УБ СТВ-22 з виробництва базальтового супертонкого волокна та пройшли апробацію в умовах діючих виробництв ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» та ТОВ «Севєродонецький завод теплоізоляційних матеріалів» (підтверджено актами впровадження).

3. Визначено підхід до формування фільтруючого пристрою, який дозволив зменшити сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень $THDi$ з 73%

до 5% в режимі розігріву, а в номінальному тепловому режимі із 31% до 5%, а застосування гібридної фільтрації також дозволило знизити вартість такого ФКП і стало прийнятним для подальшого використання в джерелах живлення установок з виробництва БСТВ.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення та результати, що викладені в дисертації, отримані здобувачем особисто.

У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: в [1] – запропоновано застосування напівпровідникових регуляторів струму для електротермічних установок плавлення та модифікації матеріалів; в [2] – наведено приклад та опис активного коректора форми струму з релейним несинхронізованим способом керування силовими транзисторами, який дозволив отримати синусоїдальну форму вхідного струму незалежно від характеру навантаження; в [3] – розроблено автоматизовану систему керування електроприводами мостового крана-маніпулятора для установки дезактивації металів; в [4] – визначено гармонійний склад вхідного струму джерел живлення електротермічними установками. Запропоновано схему та імітаційна модель системи з активним коректором форми струму; в [5] – проведено дослідження та розрахунки оптимального варіанту матеріалу осердь реакторів активного коректора форми струму; в [6] – розглянуто основні фактори, що впливають на процес волокноутворення при виробництві базальтового супертонкого волокна та побудовано систему регулювання і стабілізації діаметру первинних ниток на базі нечітко логічного контролера; в [7] – розроблено гібридні фільтро-компенсуючі пристрої для електротермічних джерел живлення, проведено математичне моделювання таких пристроїв і експериментальну перевірку їх ефективності; в [8] – показано підвищення ефективності електротермічних установок плавлення матеріалів в автоматизованій системі регулювання струму з адаптивним керуванням; в [9] – розглянуто специфіку роботи установки електрошлакового переплаву, обґрунтовано необхідність адаптивної системи керування та визначено методи підвищення якості керування джерелом змінного струму –

спеціальний трансформатор електротермічної установки; в [10] – виявлено, що процесу виробництва супертонких волокон притаманний суттєвий негативний, з точки зору теорії керування, фактор – нестационарність опису об'єкта, взаємний вплив керованих змінних стану, задіяних в різних незалежних контурах регулювання.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях (МНТК): МНТК «Силовая електроніка та енергоефективність» (м. Алушта, СЕЕ-2009, СЕЕ-2011, СЕЕ-2012, СЕЕ-2013); МНТК «Силовая електроніка та енергоефективність» (м. Харків, СЕЕ-2015, СЕЕ-2016); МНТК «Электротехнические и компьютерные системы: теория и практика» (м. Одеса, ETCS-2015); МНТК «SMART-ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЦІ ТА ЕЛЕКТРОНІЦІ – 2016» (сmt. Лазурне, Херсонської області STEE-2016); МНТК «Проблеми автоматизованого електропривода». «Силовая електроніка та енергоефективність» (м. Харків, ПАЕП - СЕЕ-2017); на наукових семінарах Інституту електродинаміки НАН України з проблеми «Наукові основи електроенергетики» (2009-2018).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, зокрема, 7 статей у наукових фахових виданнях і 3 праці у збірниках тез міжнародних науково-технічних конференцій. Всі праці опубліковано у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, одна з яких - до міжнародної бази SCOPUS.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 177 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 138 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 10 таблицями, 98 рисунками. Список використаних джерел містить 97 найменувань, з них 52 кирилицею та 55 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИМИ УСТАНОВКАМИ З ВИРОБНИЦТВА БАЗАЛЬНОГО СУПЕРТОНКОГО ВОЛОКНА

1.1 Установа з виробництва мінеральних волокнистих матеріалів як об'єкт керування. Особливості технологічного процесу виробництва базальтового супертонкого волокна БСТВ.

Розглянуті в роботі електротермічні установки (ЕТУ), що виробляють базальтове супертонке волокно (БСТВ) на більшості спеціалізованих діючих підприємствах, є характерними ЕТУ, які використовують в технологічному процесі струмові характеристики в силових колах живлення спеціальних технологічних трансформаторів, мають значну чутливість до змін, що вносяться в технологічний процес внутрішніми і зовнішніми чинниками і збуреннями, та потребують найкращу якість кінцевого продукту – БСТВ, як основи для теплоізолюючих матеріалів, що мають великий попит в громадському та промисловому будівництві.

Сучасна технологія виробництва виробів з мінеральних волокон змінилась за останній час, але в своєму розвитку ще не досягла досконалості. Відомості про таку технологію наведено в роботах[1-7]. Найбільш поширеним (близько 70% виробництв) способом отримання базального супертонкого волокна (БСТВ) є фільтрно-дутьовий спосіб одержання первинних ниток, або так званий дуплекс-спосіб. Таку назву цей спосіб отримав тому, що при його реалізації двічі відбувається плавлення базальту [8, 9].

Функціональну схему установки з виробництва БСТВ показано на рис. 1.1. При виробництві волокна таким способом необхідні природний газ, повітря для плавлення сировини в плавильній печі та електрична енергія - для підігріву фільтрного живильника і приведення в дію електродвигунів вузла витягування ниток при отриманні первинних базальтових ниток.

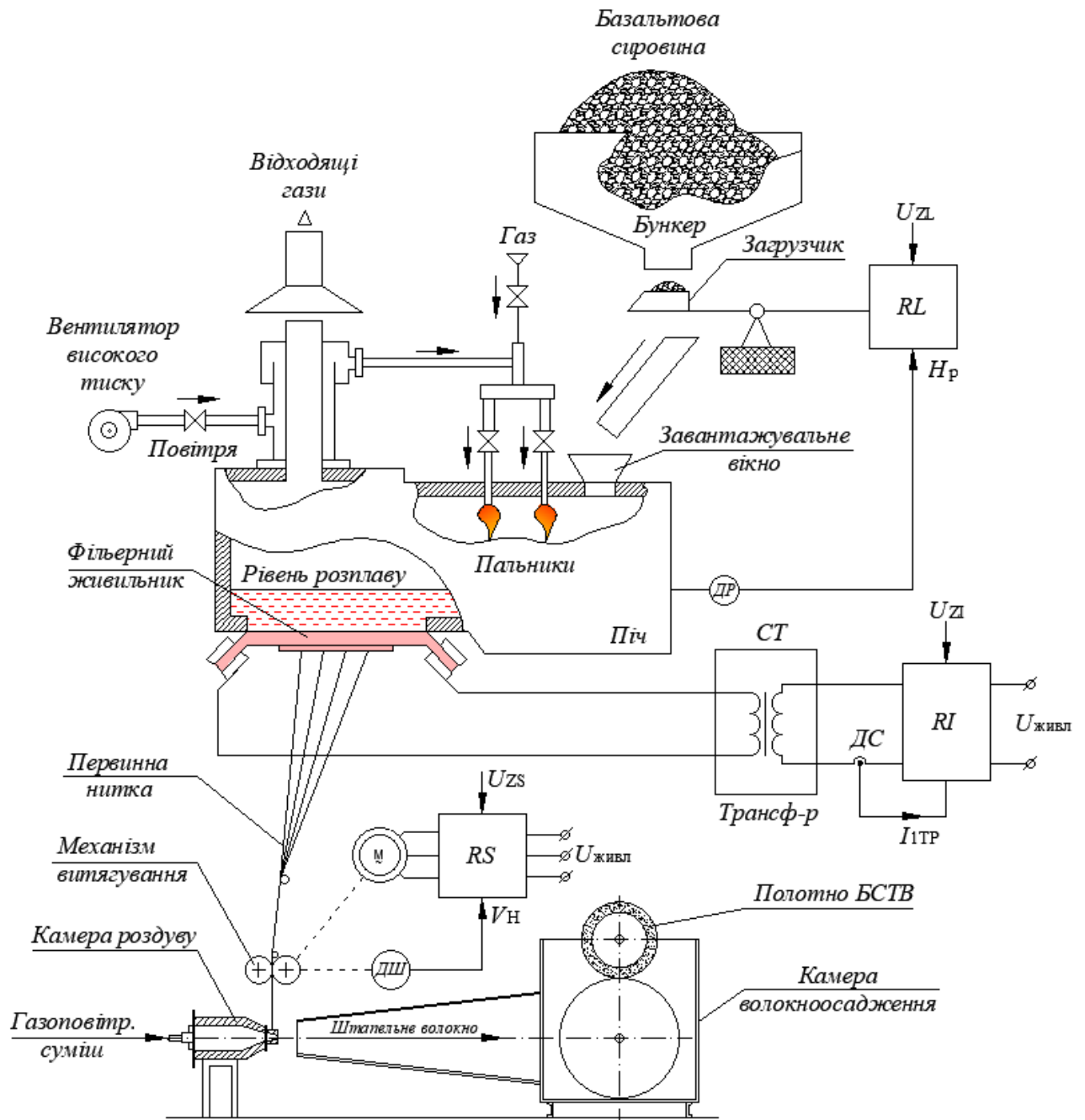


Рис. 1.1 Функціональна схема установки з виробництва БСТВ

У приймальний бункер (рис. 1.1) завантажується базальтова крихта, яка потім прокидається в коробок-скидач. Крихта базальту, що потрапила в плавильну частину рекуперативної плавильної печі, під дією вертикально-спрямованої газо-повітряної гарячої суміші плавиться і, пройшовши стадію

дегазації і гомогенізації, перетворюється в розплав. Отриманий розплав через фідер потрапляє на пластинчастий фільтрний живильник, що складається з пластини з 190 ... 220 отворами, діаметром 2,0 ... 2,2 мм. Температура розплаву підтримується в інтервалі 1300 ... 1390 °С в зоні вироблення первинних волокон за рахунок протікання струму в фільтрі, підключеної до спеціального трансформатора ТВК-75.

Властивості розплаву базальту роблять процес отримання первинних волокон дуже чутливим до змін важливих технологічних параметрів, один з яких є рівень розплаву. При малому рівні розплаву може виявитись недостатнім гідравлічний напір, що понижує дебіт розплаву через фільтри. При збільшенні рівня дебіт розплаву збільшується, але при цьому в товщині розплаву збільшується в'язкість, виникає температурна неоднорідність і кристалізація. Для того щоб вищезгадані негативні явища в розплаві не виникали, потрібно підтримувати рівень розплаву 15...30 мм [10].

Чим вища температура живильника, тим інтенсивніше витікання розплаву з фільтр. Рідкий, гомогенізований розплав, під дією власної ваги проходить через отвори фільтрного живильника і на їх зрізі утворює наплив, який називають «цибулиною», з якої безперервно витягується нитка – первинне волокно, товщиною 120...240 мкм.

Первинні волокна (нитки) захоплюються витяжними роликами витягуючого пристрою і зі швидкістю 3,5 ... 6,5 м/хв подаються до сопла вузла роздування, де потрапляють в високошвидкісний потік розпечених газів, що виходять з сопла камери згоряння зі швидкістю 300 ... 500 м/с. За рахунок високої температури газів - 1600 ° С і їх швидкості первинні нитки витягуються в супертонкі волокна товщиною 1...3мкм, довжиною 60...500 мм. Пряжа з супертонких базальтових волокон разом з продуктами згорання за рахунок розрідження, створюваного витяжним вентилятором, потрапляє по дифузору на сітку приймального барабана камери волокноосадження. Налипнув на сітку, пряжа утворює полотно з перемішаних між собою штапельних волокон. Полотно заправляється на формуючий барабан, де

ущільнюється, намотується і в міру накопичення до певної товщини розрізається і видаляється.

Розглянутий в роботі дуплексний спосіб виробництва супертонких волокнистих матеріалів і виробів забезпечує найкращу якість волокна в порівнянні з іншими відомими способами, але ще далекий від досконалості.

Недоліком дуплексного способу є чутливість до змін, що вносяться внутрішніми і зовнішніми факторами, щодо заданих значень рівня розплаву, температури фільтри і швидкості витягування первинних ниток [11].

Слід зазначити, що навіть невелике відхилення хімічного складу однокомпонентної сировини для отримання БСТВ погіршує його технологічні властивості (підвищується температура кристалізації, змочуємість по відношенню до матеріалу живильників, зменшується інтервал робочих температур) [10].

Наявність перерахованих факторів вказує на необхідність розгляду установки з виробництва БСТВ як об'єкт керування, який представляє складну нелінійну систему з взаємопов'язаними параметрами, і визначення спеціальних вимог, що пред'являються до формування системи керування установкою.

1.2 Фактори, які впливають на якість волокна в технологічному процесі волокноутворення

Для забезпечення високої якості виробів з базальтового волокна необхідно знати механізм самого процесу волокноутворення та вміти керувати процесом отримання волокон. Досвід виробництва виробів з базальтового волокна дуплекс-способом показує, що якість волокна визначається і залежить від великої кількості факторів: від якості первинного матеріалу (базальтової крихти), від якості природного газу та ступеня очищення стисненого повітря, від точності підтримки рівня розплаву в плавильній печі і стабільності параметрів мережі при розігріві фільтрного живильника, від кваліфікації обслуговуючого персоналу, від енергетичних параметрів технологічного

процесу, від однорідності суміші газ-повітря, атмосферних умов та інших чинників [12].

З усіх технологічних параметрів можна виділити два найбільш значущих для процесу роздування первинних ниток і формування якісного волокна: геометрична точність первинних ниток і швидкість газового потоку, що виходить з сопла роздування. Правильний вибір і підтримання в необхідних межах цих параметрів повинні забезпечуватися технологічним процесом.

Вхідним матеріалом для отримання первинних ниток є базальтова крихта. Від властивостей крихти (хімічного складу, щільності і розмірів) залежать властивості первинних ниток волокна. Обсяг і маса окремих елементів крихти впливають на динаміку розігріву плавильної печі, на миттєву однорідність розплаву в його верхніх шарах, а на умови витікання розплаву з фільтрного живильника впливати не будуть. Щільність ж крихти може істотно впливати не тільки на динаміку розігріву плавильної печі, але і на процес отримання первинних ниток і на процес їх роздування. Допустимі розміри елементів крихти повинні бути в межах від 3 до 10 мм.

У процесі плавлення крихти відбувається видалення з неї незначної кількості газоподібних і органічних речовин, ущільнення структури матеріалу, тому щільність первинних ниток розплаву стає на 5-10 відсотків більше, ніж щільність крихти.

При вимірюванні діаметру первинних ниток на інструментальному мікроскопі БМІ-1 встановлено, що діаметр ниток, що витягаються з отворів фільтер, змінюється в межах від 120 до 210 мкм, а діаметр окремо взятої нитки в різних перетинах по її довжині змінюється більш ніж в два рази.

Така велика варіація діаметра первинних ниток неминуче повинна приводити до виникнення великої кількості неволокнистих включень - корольків.

Основними елементами установки (рис.1.1), що формують і забезпечують якість первинних ниток, є: піч для розплаву базальтової крихти,

фільтрний живильник і вузол витягування первинних ниток. Дані, наведені в , наочно ілюструють основні зв'язки між параметрами елементів установки і властивостями проміжних робочих середовищ: базальтової крихти, розплаву базальту і крапель розплаву, які стікають з фільтрного живильника.

Основними параметрами, що впливають на утворення неволокнистих включень, є стабільність розмірів первинних ниток, рівномірність розміщення їх перед соплом роздування і геометрія сопла. Для отримання високої якості волокна необхідно забезпечувати відповідність параметрів газового потоку - його швидкості і температури від діаметра. Це завдання добре вивчено в роботах Б.А. Сентякова, Л.В. Тимофєєва, А.І. Шиляєва, Н.Г. Новицького та інших.

Однак питанню нестабільності діаметра первинної нитки розплаву, що витягається з фільтрного живильника, як однієї з причин утворення неволокнистих включень в базальтовому волокні, не приділено належної уваги з точки зору керування технологічними параметрами. Це питання недостатньо вивчено, незважаючи на те, що раніше було визначено: діаметр і механічні властивості первинної нитки залежать від фізико-механічних властивостей базальту, температури (в'язкості) і рівня базальтового розплаву в плавильної печі і від швидкості витягування первинних ниток.

Експериментальним шляхом на ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» було встановлено, що наявність в готовому полотні неволокнистих включень в основному впливає стабільність розмірів первинних ниток.

Стабільність процесу витяжки безперервного волокна залежить від ступеня термічної однорідності і від структури силікатного розплаву, що надходить в фільтри. При підвищенні в'язкості розплаву, виникає необхідність збільшення витягаючої сили, що може привести до обриву волокна. Якщо збільшувати температуру розплаву, в'язкість знижується і можливо досягнення її мінімальних значень, при яких формування волокна припиниться, а сили поверхневого натягу сприятимуть формуванню струменя

або крапель. Інтервал температур, при яких розплав має таку в'язкість, є інтервал вироблення, в межах якого існує стабільний процес волокнуутворення [13].

При низькій в'язкості розплаву відбувається затікання базальтової маси між фільєрними судинами, що тягне за собою необхідність очищення фільєрного поля, перезаправку ниток і короткочасну втрату продуктивності установки БСТВ.

Щоб забезпечити стійкий процес формування рівномірного за діаметром волокна, необхідно мати однакову швидкість витікання і однакову в'язкість розплаву на всіх фільєрах пластини. Виходячи з того, що з поверхні цибулини йде велика віддача тепла, температура розплаву на фільєрі повинна бути вище, тобто робочий інтервал температур зсувається в бік більших значень, що знижує обривність волокон і покращує рівномірність їх за діаметром. У зоні формування волокна малим діаметром різко зменшується градієнт температур через зменшення площі перетину цибулини в кілька сотень разів, і це обумовлює швидке охолодження розплаву. Температура сформованого волокна практично відразу стає рівною температурі навколишнього середовища.

Витягування безперервного волокна з розплаву здійснюється з швидкістю 3,5 ... 6,5 м/хв. Робоча в'язкість розплаву для вироблення первинних волокон встановлюється при температурі фільєрного поля 1300 ... 1390 °С. Середня продуктивність установки при виробленні волокна діаметром 120 ... 300 мкм становить 6,5 кг/год з однієї фільєри для 190-фільєрних отворів [10]. При зменшенні діаметра первинної нитки продуктивність установки БСТВ падає, а при збільшенні - якість отриманої продукції знижується.

1.3 Формування первинних ниток волокна БСТВ, залежності між електричними та технологічними параметрами

При отриманні безперервного волокна, основними параметрами, які характеризують нормальний перебіг процесу витяжки є сила витяжки P , створювана механізмом намотування, прискорення сили тяжіння g , площа поперечного перерізу фільєри S_ϕ , дебіт розплаву через фільєру Q_ϕ , швидкість витяжки нитки з цибулини V_n , товщина нитки d_n . При цьому якщо величина S_ϕ задається конструктивно, то сила витяжки P , швидкість витяжки V_n і товщина нитки d_n взаємопов'язані між собою і є величинами розрахунковими, які визначаються на основі розрахункової схеми, представленої на рис. 1.3.

Довжина цибулини L_n визначається з виразу [14]:

$$L_n = \frac{6,75\mu Q}{gP} \ln \alpha \quad (1.1)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості базальтового розплаву у фільєрі;

Q – дебіт розплаву через фільєру,

$$Q = V_\phi S_\phi \quad (1.2)$$

V_ϕ – швидкість проходження розплаву через фільєру при витяжці волокна;

α – ступінь витяжки,

$$\alpha = \frac{S_\phi}{S_n} = \frac{V_n}{V_\phi} = \frac{r_\phi^2}{r_n^2}, \quad (1.3)$$

S_ϕ – площа фільєри; r_ϕ – радіус фільєри; r_n – радіус нитки.

У сталому режимі з умови нерозривності потоку розплаву в фільєрі і на виході з неї справедливо рівняння [15]:

$$V_n d_n^2 = V_\phi d_\phi^2 \quad (1.4)$$

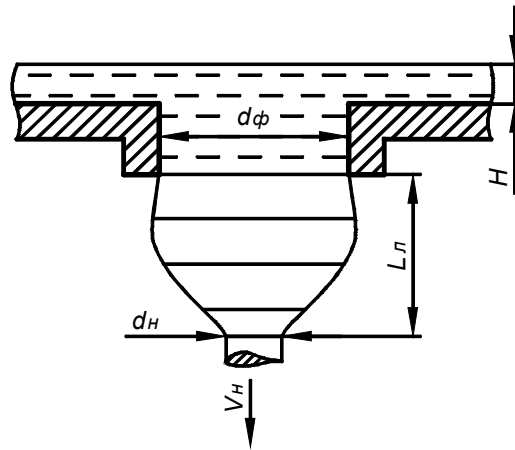


Рис. 1.3 Розрахункова схема визначення параметрів витяжки безперервного волокна.

де

d_ϕ - діаметр фільтри;

L_n - довжина цибулини;

V_n - швидкість витяжки нитки;

d_n - діаметр нитки;

Базальтова порода, з якої отримують волокно, має хімічні і мінералогічні складові, що визначають фізичні та реологічні властивості розплаву - перш за все в'язкість μ і щільність ρ . Формування волокон здійснюється в певному температурному інтервалі, який залежить від типу базальту і розмірів фільтри: внутрішнього діаметра d_ϕ і довжини L_ϕ [16].

Продуктивність установок БСТВ визначається дебітом базальтової маси, тобто кількістю маси, яка витікає з фільтри за одиницю часу. Величина дебіту і залежна від нього величина діаметра волокна, що витягається - найважливіші характеристики процесу формування безперервного первинного базальтового волокна.

Дебіт може бути визначено за формулою Пуазейля[15]:

$$Q_\phi = \frac{\pi \cdot r_\phi^4 \cdot \rho \cdot g \cdot H}{8\mu \cdot L_\phi}, \quad (1.5)$$

де $r_\phi = 1.1 \text{ мм}$ – радіус фільтри; $\rho g H$ – надлишковий тиск шару розплаву над фільтрою, що забезпечує витікання під дією сили тяжіння; $H = 15 \text{ мм}$ – висота

шару; $L_\phi = 7$ мм – довжина фільтри; $\mu = 14,6$ Па·с – коефіцієнт динамічної в'язкості базальтового розплаву [16].

На підставі рівняння нерозривності потоку розплаву в сталому режимі для перетинів, що проходять через фільтру і через первинну нитку в будь-якому місці по шляху її руху до сопла роздування, отримана розрахункова залежність для визначення діаметра первинної нитки від швидкості її витягування [15]:

$$d_n = 2(Q/\pi V_n)^{0,5} \quad (1.6)$$

З огляду на те, що величина V_n визначається через співвідношення (1.4)

$$V_n = \frac{d_\phi^2 V_\phi}{d_n^2}, \quad (1.7)$$

а швидкість подачі розплавленої маси або середня швидкість самочинного витікання розплаву мінералу через фільтру V_ϕ визначається як [16]:

$$V_\phi = \frac{Q_\phi}{S_\phi} = \frac{r_\phi^2 \cdot \rho \cdot g \cdot H}{8\mu \cdot L_\phi} \quad (1.8)$$

то, підставивши вирази (1.5) і (1.8) у вираз (1.7) отримано:

$$V_n = \frac{d_\phi^4 \cdot \rho \cdot g \cdot H}{16 \cdot d_n^2 \cdot \mu \cdot L_\phi}, \quad (1.9)$$

граничними умовами при вирішенні рівняння (1.9) будуть відповідно [10]:

$$2,0 \leq d_\phi \leq 3,6 \text{ мм},$$

$$120 \leq d_n \leq 240 \text{ мкм}.$$

Нехтуючи втратами готового волокна, що осідає на приймальному перфорованому барабані, які з практичних даних складають не більше 2%, продуктивність двосекційною установки УБ СТВ 22 становить 13 кг / добу [10] і визначається за формулою [17]:

$$G = 2\pi d_n^2 V_n \rho z / 4 \quad (1.10)$$

де ρ - щільність базальту ($\rho = 2300$ кг/м³); z - кількість фільтр живильника ($z = 190$).

З усіх параметрів, що вказані у формулі (1.10), під час роботи установки є можливість змінювати швидкість витягування первинних ниток шляхом зміни швидкості обертання електродвигуна витяжних валків і діаметра первинної нитки. Діаметр первинних ниток розплаву базальту залежить від діаметра отворів фільєр, рівнем розплаву над фільєрним живильником, в'язкості розплаву і швидкості витягування ниток (лінійної швидкістю обертання витяжних валиків).

На діючій установці з виробництва БСТВ було проведено цикл дослідів і за їх результатами побудовані залежності технологічних параметрів, що впливають на процес волокноутворення.

Процес виробництва супертонкого волокна протікає при підвищених температурах фільєрного живильника $1300 \dots 1390^\circ \text{C}$, який в свою чергу має підвищений знос (діаметр судин зростає). Живильники виготовляються з железохромних або железохромонікелевих сплавів, як альтернатива платинородієвих, але дані матеріали не мають властивості абсолютної хімічної стійкості до розплаву базальту [8]. Експлуатаційний термін служби живильника становить від 21 до 24 діб [10]. Незважаючи на те, що дані сплави мають високу жаростійкість і хімічну інертність, знос фільєрних отворів живильника за рахунок дифузійних процесів при високих температурах призводить до порушення технологічного процесу отримання безперервного волокна. Цей процес ілюструє рис. 1.4.

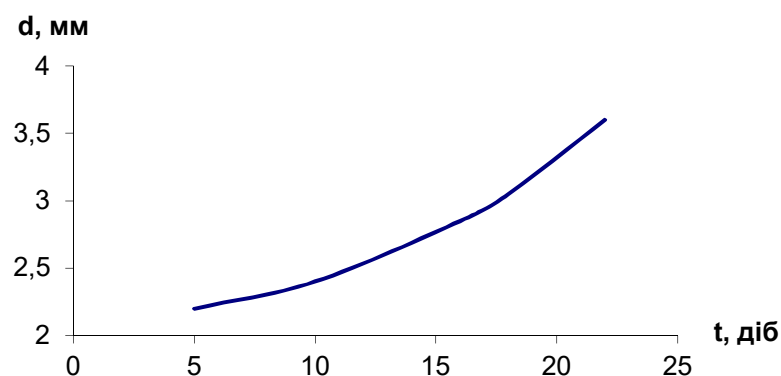


Рис. 1.4 Залежність діаметра фільтрального отвору від часу його експлуатації.

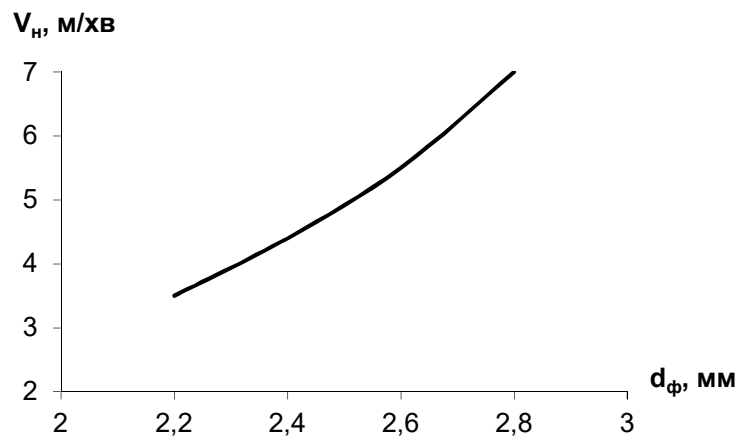


Рис. 1.5 Вплив швидкості витягування волокна діаметром $d_n = 180$ мкм на діаметр фільтрального отвору.

Як випливає з кривої залежності (рис.1.5), при збільшенні діаметра фільтрального отвору зростає швидкість витяжки. Це можна пояснити збільшенням дебіту розплаву через фільтру, а для збереження стабільності діаметра первинного волокна, необхідно збільшувати відбір розплаву. Швидкість витяжки первинної нитки може регулюватися діаметром самої нитки і діаметром фільтри (рис. 1.6)

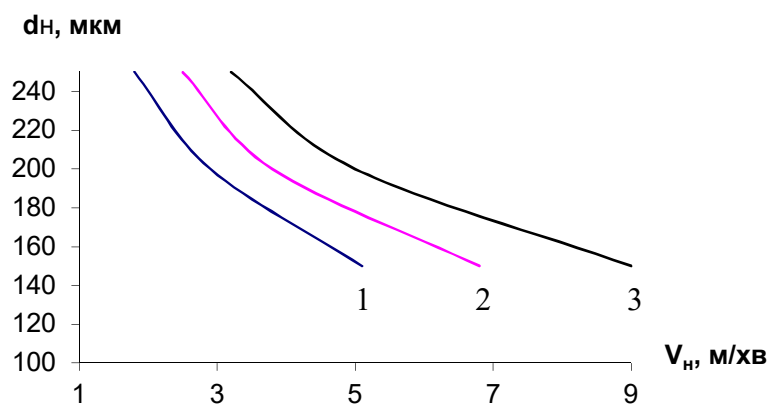


Рис. 1.6 Залежність діаметра первинної нитки від швидкості витяжки при різних діаметрах фільтрального отвору:

1- $d_\phi=2.2$ мм; 2- $d_\phi=2.4$ мм; 3- $d_\phi=2.6$ мм.

З форми кривих на рис 1.6 випливає, що варіюючи швидкістю витяжки первинного волокна, можливо отримання необхідного його діаметра, при діаметрах фільтр від $d_{\phi} = 2,2$ мм до $d_{\phi} = 2,6$ мм.

В цьому ж циклі дослідів одночасно з оцінкою впливу швидкості витягування ниток на продуктивність установки визначалося і зміст в зразках неволокнистих включень. Так найменшу кількість неволокнистих включень має зразок, отриманий при швидкості витягування 5,8 м/хв. Збільшення кількості неволокнистих включень при малих швидкостях витягування пояснюється великим діаметром первинних ниток, для повного роздування яких енергії газового потоку паливкового пристрою виявляється недостатньо, а збільшення кількості неволокнистих включень при великих швидкостях витягування первинних ниток пояснюється їх малим діаметром - при цьому нитки втрачають свою міцність, і в волокні збільшується вміст уламків ниток, які навіть не піддалися оплавленню.

Отримані вище результати показали, що існує оптимальна в'язкість розплаву і швидкість витягування ниток, при яких продуктивність установки має максимальне значення, а вміст неволокнистих включень мінімальний.

Розплав виходить з фільтрного живильника під дією власної ваги, тому ще одним фактором стабільності процесу отримання первинних волокон є рівень розплаву. Властивості розплаву базальту (висока температура кристалізації, малий інтервал робочих температур) роблять процес отримання первинних волокон дуже чутливим до змін параметрів режиму, і тому рівень розплаву має найважливіше значення. При малому рівні розплаву може бути недостатнім гідростатичний напір, і знижується дебіт розплаву через фільтри. При збільшенні рівня дебіт розплаву збільшується, але при цьому зростає в'язкість розплаву, виникає температурна неоднорідність і кристалізація. Для автоматичного вимірювання рівня розплаву і його підтримки в скловиробній промисловості застосовуються рівнеміри різних типів. У виробництві БСТВ до теперішнього часу рівнеміри часто не застосовуються, вимір рівня проводиться періодично замірним гачком. Рівень розплаву у фідері повинен

забезпечити шар розплаву над фільсним полем товщиною 15 ... 30 мм. Робоча в'язкість розплаву в плавильній печі досягається при температурі 1320 ... 1340 °С. Для періодичних вимірів температури застосовуються оптичні пірометри. Через підвищену агресивність базальтового розплаву контактні термопари в печах виробництва БСТВ не застосовуються [10].

Важливим фактором, що впливає на стабільність процесу отримання первинного волокна є температура фільсного поля і в'язкість розплаву в зоні формування нитки. Залежність в'язкості розплаву від температури показана на рис. 1.7, де відображено і основний технологічний параметр - інтервал вироблення волокна, при якому існує волокнуутворення.

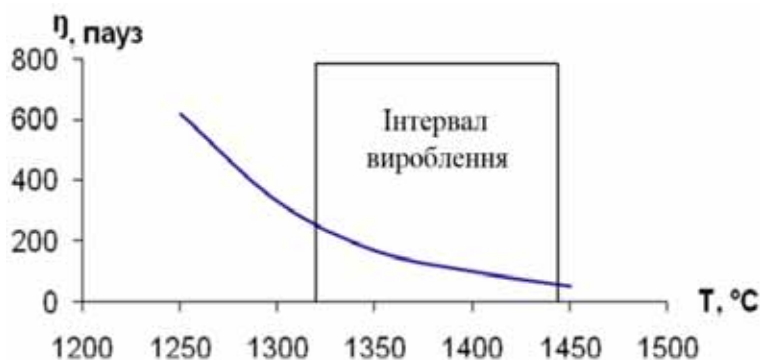


Рис. 1.7 Залежність в'язкості базальтового розплаву від температури.

В'язкість розплаву на периферії цибулини визначається головним чином температурою в зоні вироблення, яка коливається з різницею 50-100 °С. Все це призводить до зміни діаметра нитки, що одержується, і сприяє збільшенню обривності [8, 18].

Жаростійкий фільсний живильник формує безперервні первинні волокна з розплаву. Вторинний струм 2000А трансформатора ТВК-75, протікаючи в фільсному живильнику, розігріває фільсне поле до температури (1300-1390°С), необхідної для безперервного витікання розплаву. Активний опір жаростійкої пластини нелінійний (рис.1.8), що накладає певні обмеження при виході живильника на температурний режим.

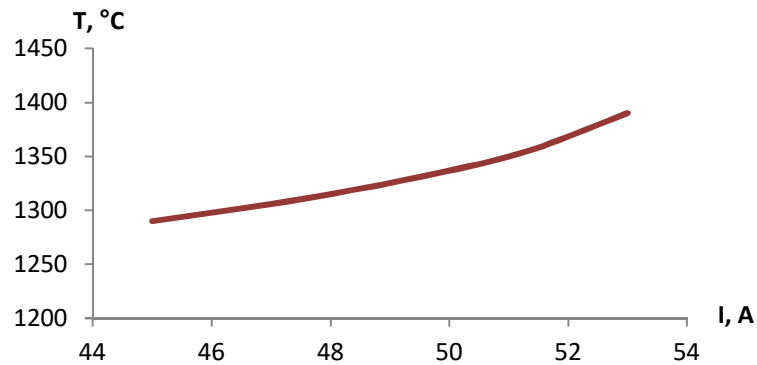


Рис. 1.8 Залежність температури фільєрної пластини від величини струму в первинній обмотці трансформатора для сталі 20Х23Н18.

Різке збільшення струму в фільєрному живильнику є причиною його деформації, тому виведення живильника на робочий режим потрібно виконувати плавно. При подачі живлення величина струму не повинна перевищувати 15А в первинній обмотці трансформатора, потім слід підвищувати його через кожні 2 ... 3 хвилини по 1 амперу до робочої величини в 46 - 53А. Чим вище температура живильника, тим інтенсивніше витікання розплаву з фільєр, але при цьому посилюється явище змочуваності розплавом поверхні фільєр, що робить неможливим процес утворення первинних волокон. Навіть при оптимальних температурах нагріву фільєр і розплаву відбувається поступове запливання його розплавом, що вимагає періодичного очищення [19].

Проведений аналіз вказує, що процесу виробництва БСТВ притаманний суттєвий негативний, з точки зору теорії керування, фактор - нестационарність опису об'єкта, взаємний вплив керованих змінних стану, задіяних в різних незалежних контурах регулювання (наприклад, контур нагріву фільєри і механізм витягування первинних волокон пов'язані з нагріванням базальтового розплаву і його рівнем в печі) [19].

Ця проблема вирішується як програмно-апаратними засобами АСУТП, так і застосуванням засобів обмеження взаємовпливу параметрів. Формування струмової системи живлення фільєрного живильника нівелює негативну дію

змін опору фільери внаслідок флуктуацій, що виникають при формуванні розплаву і змін характеристик електричної мережі [20, 21].

1.4 Основні способи регулювання струму фільєрних живильників в установках з виробництва БСТВ

В технологічному процесі виробництва БСТВ, як впливає з наведеного вище, необхідно регулювати струм фільєрних живильників за певним законом і стабілізувати його робоче значення. Відхилення струму від заданого значення істотно впливають на температуру фільери, тобто на техніко-економічні показники роботи установки. Регулювання струму фільєрних живильників дозволяє забезпечити наближення до оптимального режиму роботи установок, підвищити коефіцієнт потужності, знизити непродуктивні втрати енергії, а також виконати вимоги до норм показників якості споживаної електроенергії.

Регулювання струму фільєрних живильників в установках з виробництва БСТВ проводиться регулюванням напруги живлення наступними основними способами:

- плавне регулювання напруги живлення без зміни форми кривої напруги;
- ступінчасте регулювання напруги живлення без зміни форми кривої напруги;
- плавне регулювання напруги живлення з зміною форми кривої напруги.

Такі ж самі способи регулювання струму застосовуються в ряді інших електротермічних установках, таких як:

- установки електрошлакового переплаву;
- установки з вирощування монокристалів кремнію;
- установки з нанесення покриттів на полімерні плівки;
- високотемпературні печі опору (вакуумні печі);
- установки з виробництва базальтових штапельних супертонких волокон;
- гальванічні установки;

- електролізні установки в кольоровій металургії для отримання алюмінію, магнію, цинку, міді, нікелю;
- електролізні установки в хімічній промисловості для одержання хлору, водню, натрію, азотистих речовин.

Плавне регулювання напруги живлення без зміни форми кривої напруги проводиться за допомогою індукційних регуляторів (ІР). Вторинна напруга змінюється плавно шляхом повороту ротора щодо статора, в результаті чого змінюється різниця фаз ЕРС, індукованих в обмотках ротора і статора. ІР при своєму основному недоліку, який полягає в наявності поворотного механізму ротора щодо статора, продовжують використовуватися в електротермічних установках великої потужності. Такі ІР об'єднують функції силового понижуючого трансформатора і регулятора струму навантаження [22]. Однак масогабаритні показники і експлуатаційні характеристики таких ІР не задовольняють сучасним вимогам діючих електротехнічних установок.

Кращі експлуатаційні характеристики (більш висока точність температурного режиму) досягаються при використанні ступінчастого регулювання напруги живлення без зміни форми кривої напруги. Як регулятор напруги застосовується спеціальний трансформатор (СТ) з перемиканням ступенів напруги (рис. 1.9), кількість яких може доходити до 16 [23].

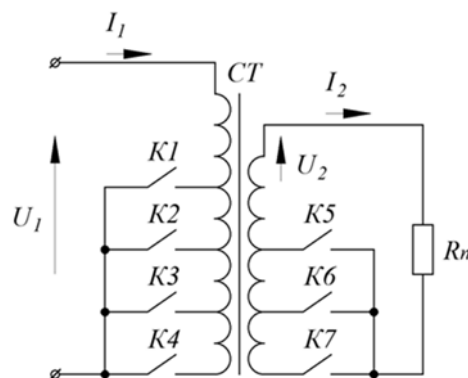


Рис. 1.9 Спеціальний трансформатор з ступінчастим регулюванням напруги

При регулюванні напруги живлення перемиканням контактів К1 - К4 відповідних контакторів в колі первинної обмотки трансформатора (рис.1.9)

забезпечується ступінчасте регулювання напруги [24]. Грубе регулювання напруги здійснюється перемиканням контактів К5 - К7 відповідних контактів в колі вторинної обмотки трансформатора. Потужність теплових процесів знижується пропорційно квадрату напруги, тому отримання малих кроків регулювання вимагає складної конструкції ступінчастого перемикача напруги [25].

У технологічному процесі виробництва БСТВ потрібна зміна струму (потужності), споживаної нагрівачем (фільєрою), в широких межах - від 0 до $P_{НОМ}$, причому необхідна плавна зміна потужності, інакше програмне регулювання температури неможливо.

Імпульсне регулювання струму (потужності) може вважатися квазібезперервним для установок БСТВ завдяки значній тепловій інерційності об'єкта керування. Широкий діапазон регулювання потужності і плавність регулювання при такому способі регулювання особливо важливі, тому що дозволяють задовольнити вимоги виведення об'єкта регулювання на температурний режим. Імпульсні регулятори змінної напруги (рис. 1.10) будуються на двох зустрічно паралельно з'єднаних тиристорах, підключених до первинної обмотки спеціального трансформатору СТ.

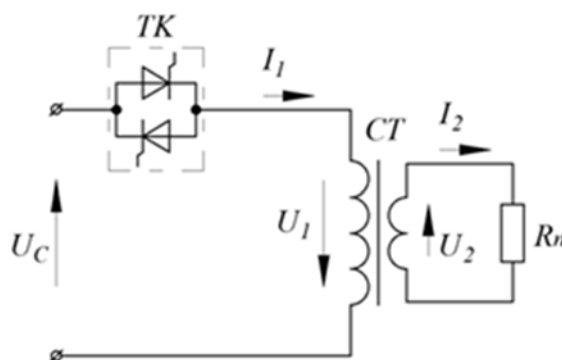


Рис. 1.10 Імпульсний регулятор напруги

Для керування тиристорними ключами (ТК) використовується блок керування і синхронізації, який будується на базі мікропроцесорних засобів

керування, які дозволяють реалізувати різні способи керування ТК. Найбільш поширені: широтно-імпульсний, імпульсно-фазовий (рис. 1.11).

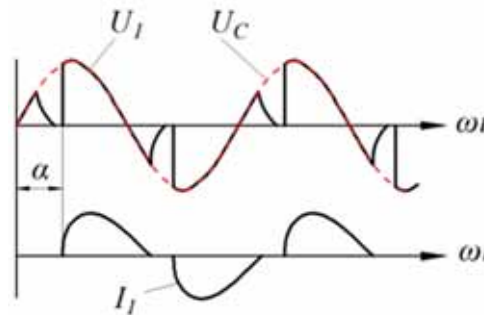


Рис. 1.11 Регулювання змінної напруги при трансформаторному навантаженні.

При широтно-імпульсному способі керування ТК напруга на навантаженні формується з напруги мережі пачками синусоїд, що періодично повторюються (як правило, не менше 100 періодів). Даний спосіб керування характеризується низькою швидкодією, а також наявністю в спектрах вихідної напруги і споживаного з мережі струму низькочастотних гармонійних складових, що важко придушуються. Крім того, застосування низькочастотної ШІМ на первинній стороні трансформатора вимагає спеціальних заходів щодо запобігання його намагнічування постійним струмом і, як наслідок, струмового перевантаження обмотки і тиристорних ключів [26, 27]. Тому такі регулятори не знаходять застосування в пристроях для живлення споживачів, що вимагають високої швидкодії.

Більш того, в високотемпературних печах з робочою температурою понад 1250 - 1300°C використовуються нагрівачі з тугоплавких металів (вольфрам, молібден) або неметалевих матеріалів (карбіди кремнію, ніобію, цирконію, танталу і ін.), вуглеграфітові матеріали, дисилицид молібдену, матеріали на основі оксидів лантану. Названі матеріали відрізняються сильною залежністю електричного опору від температури [28, 29]. Опір нагрівача в холодному стані може бути в 10 і більше разів нижче, ніж опір при робочій температурі. Тому живлення таких нагрівачів до температур порядку

850°C необхідно здійснювати зниженою напругою [28]. В установках БСТВ опір фільєрних пластин, виконаних з жароміцних марок сталі 20Х23Н18, в холодному стані близький до $45 \times 10^{-5} \dots 47 \times 10^{-5}$ Ом.

Таким чином, широтно-імпульсний спосіб регулювання не забезпечить плавний вихід нагрівальних елементів на тепловий робочий режим. При такому регулюванні нагрівач і мережа живлення будуть навантажені ударними струмами спеціального трансформатора. Різка зміна величини струму нагрівачів може бути причиною виходу їх з ладу [10].

Високочастотне імпульсне регулювання, при якому частота перемикачів перевищує подвійну частоту мережі, реалізується на базі повністю керованих тиристорів або транзисторів. Застосування фазового регулювання має на меті скорочення масогабаритних показників трансформаторного обладнання і підвищення швидкодії.

При імпульсно-фазовому способі регулювання керуючі імпульси синхронізовані по частоті з частотою джерела живлення. Напруга на навантаженні в цьому випадку формується з декількох відрізків синусоїд різної амплітуди [30, 31]. Найбільш прості імпульсні тиристорні регулятори електричної потужності містять в якості регулюючого органу один ТК в фазі, утворений двома зустрічно - паралельно включеними тиристорами, або одним симистором, або їх тиристорно-діодними аналогами. Найбільш поширена схема в однофазному виконанні наведена на рис. 1.10. Одно елементні тиристорні регулятори досить повно досліджені [32, 33] і знаходять широке застосування в промисловості. Поряд з такими перевагами як значний діапазон регулювання, плавність і швидкодія, високий ККД, одноелементні регулятори мають і значні недоліки: споживання з мережі живлення додаткової реактивної потужності, а також наявність в кривих вихідної напруги і споживаного струму високочастотних гармонійних складових в процесі регулювання.

Усунення безструмових пауз і зменшення спотворень кривої регульованого струму досягається в тиристорно-дросьельних регуляторах напруги (рис. 1.12) за рахунок послідовного включення тиристорного ключа і

дроселя [34, 35]. Однак таке рішення призводить до збільшення масогабаритних показників регулятора, скорочення діапазону регулювання і зниження коефіцієнта потужності при мінімальному значенні вихідного струму.

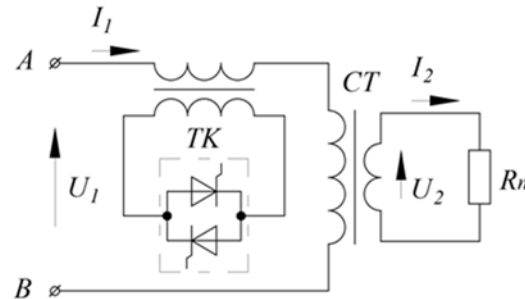


Рис.1.12 Тиристорно-дросельний регулятор напруги

Істотне поліпшення форми кривої вихідної напруги і, разом з цим, підвищення енергетичних показників регулювання досягається застосуванням більш складних схем багатоелементних трансформаторно - тиристорних регуляторів напруги (ТТРН), форма кривої регульованої напруги яких формується з декількох відрізків синусоїд різної амплітуди, в зв'язку з чим зменшуються коефіцієнти спотворення регульованої напруги і струму.

Розробці і дослідженню імпульсно-фазових трансформаторно-тиристорних схем регулювання струму присвячено значну кількість наукових матеріалів[36-39]. Однак кращими енергетичними характеристиками володіють трансформаторно-тиристорні регулятори з дискретним керуванням [40-42], в яких ТК використовується тільки як релейний елемент. У зв'язку з цим досягнення високої точності навіть при вузькодіапазонному регулюванні пов'язане з введенням в виконавчий орган великої кількості ТК. Безконтактні пристрої регулювання струму мають високу швидкодію, але їх недоліком є велика кількість ТК, що викликає значне подорожчання пристрою. Застосування таких пристроїв доцільно в потужних енергетичних установках при невеликій глибині регулювання.

Одним з перспективних напрямків розробки та досліджень багатоелементних ТТРН є їх застосування для плавно-ступінчастого

регулювання напруги на навантаженні. Регулювання всередині кожного ступеня забезпечується імпульсно-фазовим керуванням тиристорів сусідніх відводів, а перемикання з одного ступеня на іншу безконтактним перемиканням тиристорних груп.

Недоліком ТТРН з комутацією відгалуджень є недовикористання трансформатора в режимі регулювання вторинного струму навантаження. Дослідження показали, що недовикористання СТ значно зростає при збільшенні глибини регулювання [37].

1.5 Імпульсно-фазове трансформаторно-тиристорне регулювання струму в установці з виробництва БСТВ

В установках з виробництва БСТВ для розігріву жароміцної пластини широко використовуються трансформатори з нормальним магнітним розсіюванням і з секційними обмотками. Трансформатори мають практично жорстку зовнішню характеристику з нахилом диференціального опору не більше 0,01 В/А [23]. Це водоохолоджувані зварювальні трансформатори ТВК-75, які мають наступні технічні характеристики [24]:

- максимальна умовна потужність при ПВ = 50% - 75 кВ · А;
- номінальна первинна напруга - 365 В;
- номінальний тривалий первинний струм - 148 А;
- номінальний тривалий вторинний струм - 9000 А.

У робочому температурному режимі фільєри (R_n) вторинний струм трансформатора становить $i_n = 3600$ А, а первинний – $i_s = 58,5$ А. До цього часу при виробництві БСТВ використовується схема (рис. 1.13) трансформаторно-тиристорного перетворювача (ТТП) на базі трансформатора ТВК-75 з відгалудженнями.

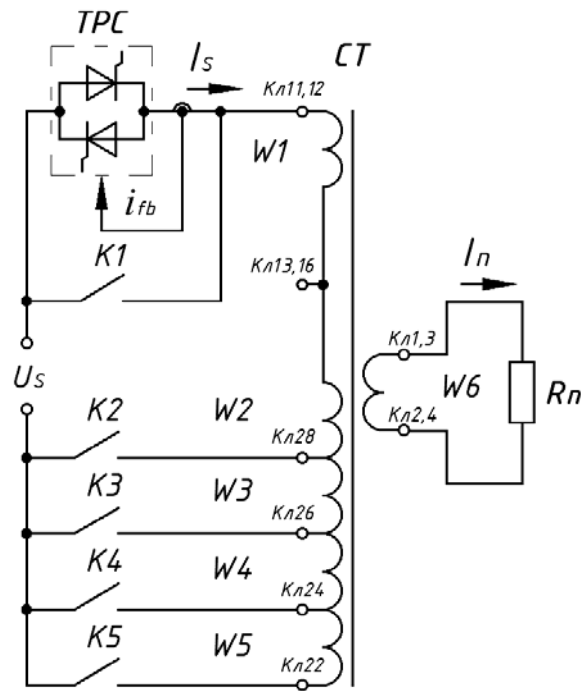


Рис. 1.13 Схема електрична трансформаторно-тиристорного перетворювача ТТП на базі трансформатора ТВК-75 з відпайками.

Застосування контакторів K2, K3, K4, K5 для перемикання відпайок первинної обмотки без використання тиристорного регулятора струму ТРС (K1 включений), забезпечує поетапне дискретне регулювання первинного струму спеціального трансформатора СТ в інтервалі 38 ... 64 А. Але точність такого регулювання струму не відповідає вимогам технологічного процесу, бо крок регулювання складає 4,7 ... 11,2 А. Для отримання безперервних первинних волокон товщиною 120 ... 240 мкм при виробництві БСТВ температура фільтрної пластини має бути в межах - 1300 ... 1350 °С, а точність регулювання - 1 А [25, 28]. Варто зазначити, що даний спосіб регулювання, в порівнянні з фазовим, має невисокі регульовальні властивості, але практично не впливає на мережу живлення. Саме цю перевагу СТ необхідно використовувати, об'єднавши його з регулюючими перевагами ТРС з фазовим керуванням.

При виключеному стані контактора K1 та включеному стані тиристорного регулятора струму ТРС є можливість плавно керувати первинним і вторинним струмами спеціального трансформатора СТ в

робочому діапазоні змін струму навантаження I_n . Наявність в кривій споживаного струму I_s високочастотних гармонійних складових в процесі такого регулювання, зменшує електромагнітну сумісність системи ТРС – СТ з іншими споживачами електроенергії.

Комбіновані ТТП, які об'єднують напівпровідникові ключові елементи і СТ з відгалуженнями на первинній стороні, при використанні імпульсно-фазових принципів керування зменшують спотворення струму, споживаного з мережі, забезпечуючи при цьому задану глибину регулювання струму навантаження I_n [29].

На рис. 1.14 представлено схему двоступеневого ТТП, для якої перший ступінь регулювання формується на базі мережевої обмотки $w_s = w_1 + w_2$ СТ, а другий ступінь СТ - на базі регулювальної обмотки w_2 . Така схема складається з двох тиристорних пар VS (силових зустрічно паралельно включених тиристорів), де VS1 підключено до мережевої обмотки w_1 ; а VS2 - до вольтододааткової обмотки w_2 .

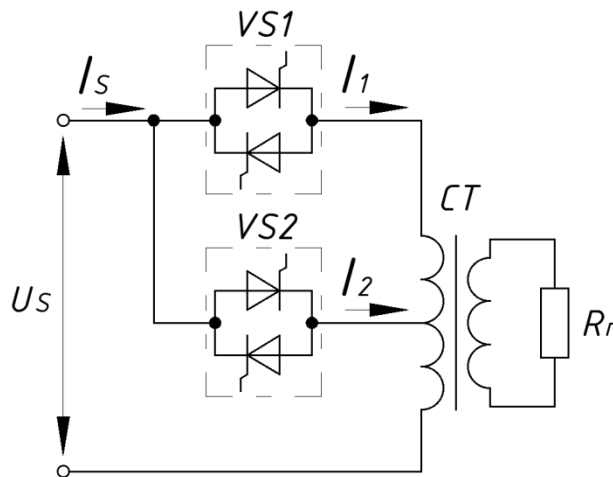


Рис. 1.14 Схема електрична двоступеневого трансформаторно-тиристорного перетворювача ТТП

Питанню синхронізації керуючих імпульсів VS1 та VS2 добре розкриті в роботах К.О. Липківського, В.А. Халикова, А.Г. Можаровського, Б.Ю. Алтунина. Принцип дії такого ТТП засновано на тому, що при подачі

керуючого імпульсу на $VS2$ (і одночасному знятті його з $VS1$), коли ще залишається відкритим $VS1$, через його неповну керованість, в замкнутому контурі $VS1$, w_1 , $VS2$ в заданий момент $t=\alpha/\omega$ напрямок струму буде таким, що призведе до закривання відповідного тиристора VS . Комутація струму з включеного $VS2$ на $VS1$ повинна бути жорстко синхронізована з перетином фази напруги U_s через нуль і відповідного струму I_s , інакше в проміжку $0 \leq \alpha \leq \pi$ буде розвиватися струм короткого замикання в контурі, в якому тиристори відповідної полярності $VS1$ і $VS2$ будуть знаходитися у провідному стані [41].

Для поліпшення спектральних характеристик струму I_s можливо піти шляхом збільшення кількості ступенів ТТП, що призведе до значного ускладнення схеми керування тиристорними парами VS через складність їх синхронізації.

З наведеного можна вивести, що перспективним напрямком розробки та досліджень є застосування плавно-ступінчастого регулювання струму у фільтрному живильнику, при якому робота системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор буде характеризуватися найменшими енерговитратами і спотвореннями мережі живлення.

1.6 Висновки до розділу 1

1. Розглянуто в роботі системи керування електротермічними установками з виробництва мінерального волокна для теплоізолюючих матеріалів, що мають великий попит в громадському та промисловому будівництві. Такі установки занадто чутливі до змін, що вносяться внутрішніми і зовнішніми чинниками, є складними нелінійними системами з взаємопов'язаними та змінними у часі параметрами і тому, як об'єкти електроживлення та автоматичного керування, вимагають розробки спеціальних методів та засобів керування для підвищення енергоефективності виробництва і якості волокна.

2. Встановлено, що основними елементами установок, які формують і забезпечують якість первинних ниток і мінерального волокна, та потребують

керування є піч для розплаву базальтової крихти, фільтрний живильник і вузол витягування первинних ниток. Якість волокна залежить від великої кількості факторів та технологічних параметрів, але можна виділити основну - геометричну точність первинних ниток, яку має забезпечити система керування, що розробляється. Крім того, система керування повинна мати можливість гнучкого регулювання діаметра первинної нитки розплаву, що витягається з фільтрного живильника, як впливового фактора утворення неволокнистих включень у волокні, і цьому питанню з точки зору керування технологічними параметрами не приділено належної уваги.

3. Проведено аналіз, який показав, що процесу виробництва мінерального волокна притаманний суттєвий негативний, з позиції теорії автоматичного керування, фактор - нестаціонарність опису об'єкта, взаємний вплив керованих змінних стану - технологічних параметрів, задіяних в різних незалежних контурах регулювання (наприклад, контури нагріву фільтри і витягування первинних волокон пов'язані з нагріванням базальтового розплаву і його рівнем в печі).

4. Встановлено, що суттєвим фактором забезпечення якості волокна є вибір схеми, закону та режиму роботи струмового контуру нагріву фільтрного живильника для нівелювання негативної дії зміни опору фільтри внаслідок флуктуацій, що виникають при формуванні розплаву, і змін характеристик електричної мережі живлення. Проведено аналіз способів і схем регулювання струму фільтрних живильників, який показав, що перспективним напрямком розробки та досліджень керування установкою з виробництва мінерального волокна є застосування плавно-ступінчастого регулювання струму (комбіноване керування напівпровідниковим регулятором струму і спеціальним трансформатором з відгалуженнями на первинній стороні), при якому регулювання виконується з найменшими енерговитратами і спотвореннями струму мережі живлення.

Посилання: [1-7], [8, 9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20, 21], [22], [23], [24], [25], [26, 27], [28, 29], [30, 31], [32, 33], [34, 35], [36-39], [40-42], див. список використаних джерел стор. 157-166.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ - СПЕЦІАЛЬНИЙ ТРАНСФОРМАТОР УСТАНОВКИ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ

2.1 Структура системи тиристорний регулятор струму - спеціальний трансформатор

Формування струмової системи живлення фільтрного живильника дозволяє забезпечити наближення до оптимальної роботи установки з виробництва БСТВ. Регулювання струму фільтрних живильників потребує використання системи тиристорний регулятор струму (ТРС) - спеціальний трансформатор (СТ). Найпростіша функціональна схема такої системи зображена на рис. 2.1.

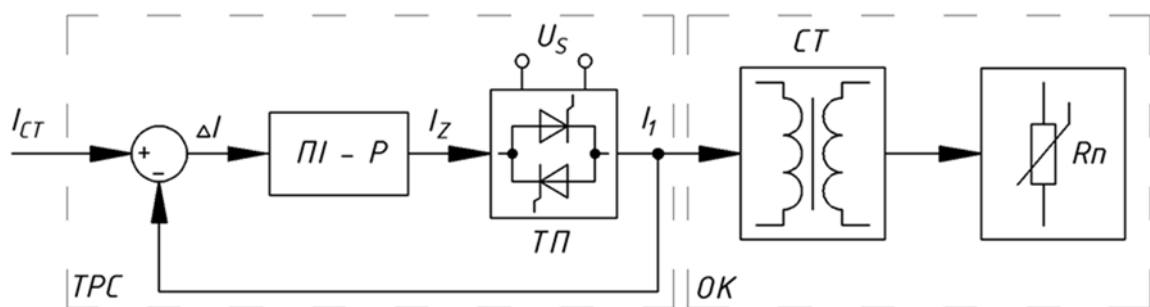


Рис.2.1 Функціональна схема системи ТРС-СТ

Згідно схеми тиристорний регулятор струму складається з ПІ-регулятора струму і тиристорного перетворювача (ТП) з імпульсно-фазовим керуванням, підключеного до первинної обмотки спеціального трансформатора, навантаженням вторинної обмотки якого є нелінійний активний опір R_n , який еквівалентує фільтрний живильник.

Для проведення аналізу електромагнітних перехідних і сталих процесів в системі ТРС-СТ необхідно розробити математичні моделі системи для основних електричних схем, які реалізують процес регулювання струму

фільтрних живильників в установках з виробництва БСТВ. Таке імітаційне моделювання проводиться за допомогою програми SIMULINK програмного пакету MATLAB [43, 44] .

Тиристорний перетворювач (ТП) складається з двох блоків - системи імпульсно-фазового керування (СІФК) і тиристорного комутатора (ТК). На рис.2.2 наведено функціональну схему ТП.

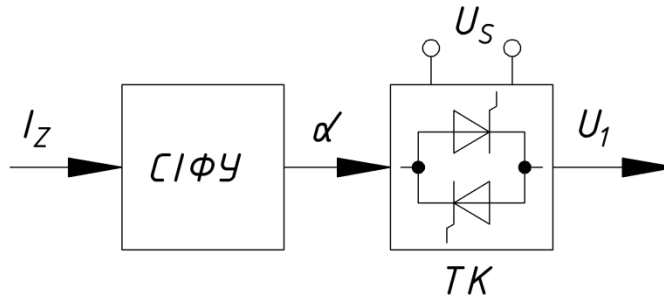


Рис.2.2 Функціональна схема ТП

Згідно схеми, сигнал керування I_z , який надходить з виходу ПП-регулятора (рис.2.1), після перетворення надходить на вхід СІФК. За допомогою СІФК сигнал перетворюється в послідовність 6 керуючих імпульсів, які мають відповідне відхилення по фазі α щодо моменту відмикання тиристорів. Змінюючи величину відхилення фази α керуючих імпульсів, регулятор виконує перетворення дискретних сигналів на кусочно-безперервний сигнал вихідної напруги, яка подається на первинну обмотку спеціального трансформатора.

Спрощена математична модель тиристорного перетворювача відповідно до методики, викладеної в [6], може бути представлена двома послідовно з'єднаними ланками: лінійною безінерційною ланкою з коефіцієнтом посилення $K_{ТП}$ і ланкою чистого запізнювання з величиною запізнювання $T_{ТП}$.

Передавальна функція ТП при цьому має вигляд:

$$W_{ТП} = \frac{U_{ВИХ}}{U'_3} = \frac{K_{ТП}}{1 + T_{ТП} \cdot p} . \quad (2.1)$$

Для розрахунку і моделювання силових електротехнічних комплексів створено широкий набір програм і алгоритмів, які суттєво розширюють можливості дослідження і аналізу електромагнітних процесів в системі ТРС-СТ. Але в своїй більшості стандартні програми і алгоритми не розглядають питання моделювання СТ, які входять в досліджуваний комплекс, або вони представлені у формі лінійної схеми [45].

З усієї множини схем заміщення і способів подання трансформатора варто виділити [46, 47]:

1. Лінійні схеми заміщення, що описують взаємоіндуктивні зв'язки обмоток без урахування магнітного стану осердя, розсіювання потоків і електричних втрат в обмотках.
2. Схеми заміщення, що описують взаємоіндуктивні зв'язки обмоток з урахуванням розсіювання потоків і втрат в обмотках при допущенні лінійності кривої намагнічування і сталості струму намагнічування. Такі схеми використовуються для розрахунків перехідних процесів, які пов'язані зі значними змінами магнітних потоків.
3. Моделі трансформаторів, які враховують нелінійні властивості осердя, використовують кусково-лінійну або аналітичну апроксимацію кривої намагнічування ділянок магнітопроводу. Слід зазначити, що тільки в цьому випадку виходить адекватна модель, що дозволяє з високим ступенем точності досліджувати перехідні, нестационарні і аварійні процеси, що супроводжуються насиченням трансформатора.

Основні допущення при розробці нелінійної математичної моделі спеціального трансформатора СТ [46, 47]:

- магнітна система СТ представлена схемою заміщення з нелінійними зосередженими магнітними опорами, які визначаються апроксимуванням основної кривої намагнічування;

- повні потокозчеплення фаз представлені як суми потокозчеплень від основного магнітного потоку і потокозчеплення розсіювання обмоток фази;
- потокозчеплення розсіювання обмоток СТ є лінійними функціями від струмів;
- не враховуються ємнісні зв'язки між елементами обмоток, між обмотками і заземленими частинами магнітопровода, а також струми витoku ізоляції.

2.2 Математичні моделі спеціального трансформатора

В процесі моделювання слід враховувати нелінійність характеристик матеріалу осердя трансформатора і нелінійність опору навантаження R_n для досягнення необхідної точності відображення електромагнітних процесів, тому модель трансформатора у вигляді блоку «Linear Transformer» з бібліотеки «SimPowerSystem» необхідно замінити новою моделлю, яка в реальному пристрої і в просторі математичних об'єктів наблизить адекватність відображення всіх процесів, що протікають. Розширимо набір стандартних елементів бібліотеки «SimPowerSystem», створивши структурну модель складного електричного кола трансформатора за допомогою програми *SIMULINK* [45].

Модель трансформатора (рис. 2.3) складається з двох структурних блоків, які охоплені зворотним зв'язком за магнітним потоком.

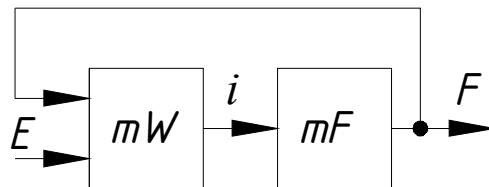


Рис. 2.3 Загальна структурна схема трансформатора

Блок mW представляє собою модель електричної схеми обмоток трансформатора, де вхідна змінна $E \in \text{ЕРС}$ джерела живлення, F - магнітний потік; вихідна змінна - струм I , що протікає в обмотках трансформатора.

Блок mF - модель магнітної схеми. В якості вхідної змінної виступає струм I , а магнітний потік F – вихідна змінна. Для визначення електрорушійних сил, що наводяться у відповідних обмотках, використовуються результати розрахунку магнітного ланцюга.

2.2.1 Математична модель спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою

Схему заміщення магнітного кола спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою показано на рис. 2.4. На схемі вказані $w_1 i_1$ і $w_2 i_2$ – магніторушійні сили первинної і вторинної обмоток, Hl - падіння магнітної напруги в нелінійному опорі на феромагнітній ділянці, H -напруженість магнітного поля, l - довжина середньої магнітної лінії осердя [48].

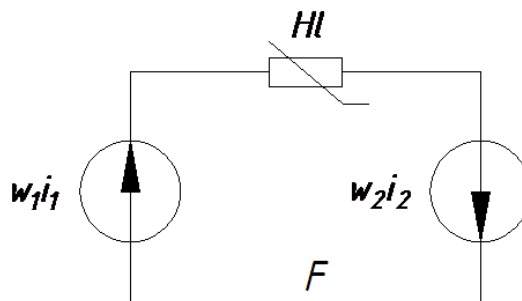


Рис. 2.4 Схеми заміщення магнітного кола спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою

Рівняння магнітного стану спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою має вигляд:

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 = Hl \quad (2.2)$$

Складемо систему рівнянь Кірхгофа для двох індуктивно пов'язаних обмоток і активного нелінійного навантаження:

$$\begin{cases} U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + L_{S1.2} \frac{di_2}{dt} + w_1 \frac{dF}{dt} + R_1 i_1; \\ -U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + L_{S2.1} \frac{di_1}{dt} + w_2 \frac{dF}{dt} + R_2 i_2; \\ U_2 = k_n R_n i_2. \end{cases} \quad (2.3)$$

де U_1, U_2 – напруги первинної і вторинної обмоток; $L_{S1.1}, L_{S2.2}$ – індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток; $L_{S1.2}, L_{S2.1}$ – індуктивності розсіювання пари обмоток; k_n – коефіцієнт, що враховує нелінійний характер активного опору навантаження, $k_n = f(R_n)$; R_1, R_2 – активний опір обмоток; w_1, w_2 – число витків обмоток трансформатора; F – магнітний потік.

У диференціальних рівняннях електромагнітних зв'язків трансформатора (2.2) і (2.3) нелінійним є магнітний потік F , що залежить від струму намагнічування. Представимо систему рівнянь (2.2) і (2.3) в операторній формі [49-51]:

$$\begin{cases} w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p) = H(p)l; \\ U_1(p) = pL_{S1.1} I_1(p) + pL_{S1.2} I_2(p) + pw_1 F(p) + R_1 I_1(p); \\ -U_2(p) = pL_{S2.2} I_2(p) + pL_{S2.1} I_1(p) + pw_2 F(p) + R_2 I_2(p); \\ U_2 = k_n R_n I_2(p). \end{cases} \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) представлено в наступному вигляді:

$$\begin{cases} H(p) = \frac{w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p)}{l}; \\ B = f(H), \quad F = B \cdot S; \\ F = f\left(\frac{w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p)}{l}\right) \cdot S; \\ I_1(p) = \frac{U_{LS1.1}(p)}{pL_{S1.1}}; \\ U_{LS1.1} = U_1(p) - pL_{S1.2} I_2(p) - pw_1 F(p) - R_1 I_1(p); \\ I_2(p) = \frac{U_2(p)}{k_n R_n}; \\ k_n = f(R_n); \\ -U_2(p) = pL_{S2.2} I_2(p) + pL_{S2.1} I_1(p) + pw_2 F(p) + R_2 I_2(p), \end{cases} \quad (2.5)$$

де p – оператор диференціювання; B – магнітна індукція; S – площа перетину осердя, а нелінійна функція $B = f(H)$, тобто основна крива намагнічування представлена на рис. 2.5 (для осердя з високолегованої холоднокатаної сталі 3413 [45]).

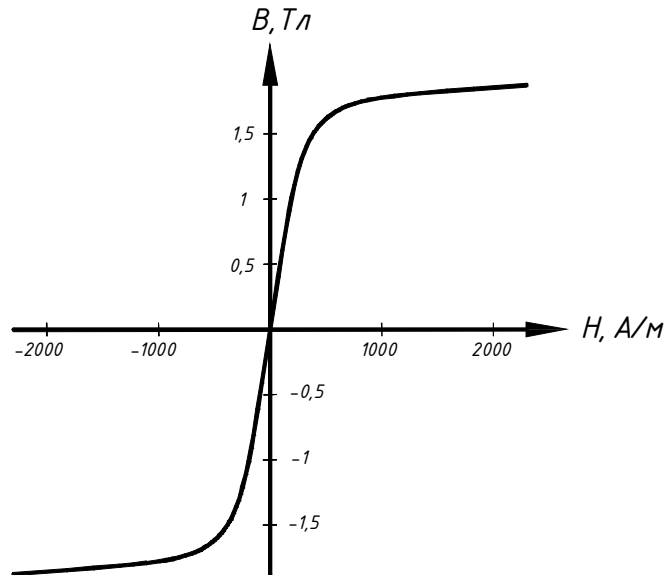


Рис. 2.5 Крива намагнічування холоднокатаної сталі 3413

Система рівнянь 2.5 є математичною моделлю трансформатора з однією первинною обмоткою при зазначених вище припущеннях, якій тотожна структурна схема рис. 2.6, створена за правилами теорії автоматичного керування [6], і яка дозволяє аналізувати систему досить простими методами.

Цю структурну схему доцільно модифікувати, скористувавшись методикою, викладеною в [52, 53]. Для цього перетворимо ланку R_n і перенесемо точки знімання вхідних сигналів ланок $L_{S12}p$, $L_{S21}p$ на входи відповідних інтеграторів, виключаючи при цьому операції диференціювання. Введемо також аперіодичні ланки з коефіцієнтом передачі рівним одиниці і малою постійною часу T в прямий канал обчислення потоку послідовно з блоком S . Отримана структурна схема (рис. 2.7) також відповідає рівнянням (2.5), але спрощує їх рішення, що буде видно з подальшого.

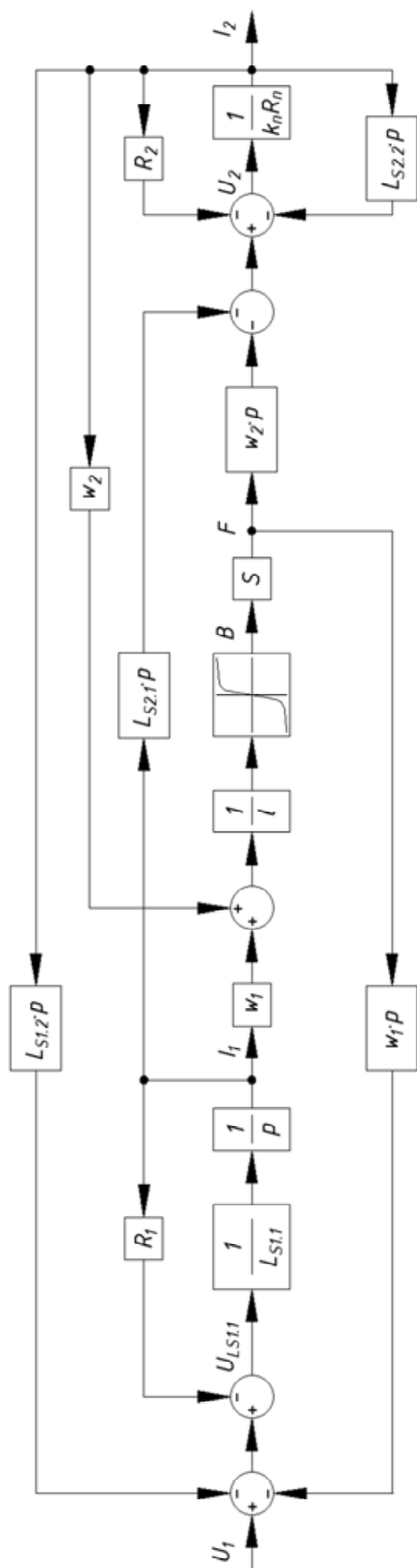


Рис. 2.6 Структурна схема математичної моделі трансформатора з однією первинною обмоткою і активним навантаженням

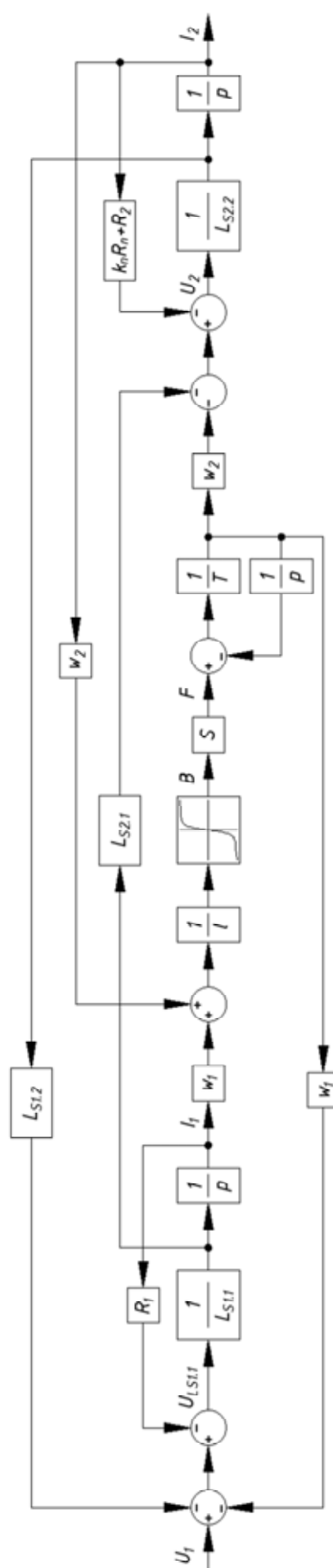


Рис. 2.7 Модифікована схема математичної моделі трансформатора з однією первинною обмоткою і активним навантаженням

2.2.2 Математична модель спеціального трансформатора з двома первинними обмотками

Рівняння магнітного стану для спеціального трансформатора з двома первинними обмотками має вигляд (враховуючи припущення, аналогічно рівнянню (2.2)):

$$w_1 i_1 + w_2 i_2 + w_3 i_3 = Hl, \quad (2.6)$$

де $w_1 i_1$ і $w_2 i_2$ – магнітні сили первинних обмоток, $w_3 i_3$ – магнітна сила вторинної обмотки, Hl – падіння магнітної напруги в нелінійному опорі на феромагнітній ділянці.

Складемо систему рівнянь Кірхгофа для трьох індуктивно пов'язаних обмоток і активного нелінійного навантаження:

$$\begin{cases} U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + L_{S1.2} \frac{di_2}{dt} + L_{S1.3} \frac{di_3}{dt} + w_1 \frac{dF}{dt} + R_1 i_1; \\ U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + L_{S2.1} \frac{di_1}{dt} + L_{S2.3} \frac{di_3}{dt} + w_2 \frac{dF}{dt} + R_2 i_2; \\ -U_3 = L_{S3.3} \frac{di_3}{dt} + L_{S3.1} \frac{di_1}{dt} + L_{S3.2} \frac{di_2}{dt} + w_3 \frac{dF}{dt} + R_3 i_3; \\ U_3 = k_n R_n i_3, \end{cases} \quad (2.7)$$

де U_1, U_2, U_3 – напруги відповідно первинних і вторинної обмоток; $L_{S1.1}, L_{S2.2}, L_{S3.3}$ – індуктивності розсіювання первинних і вторинної обмоток; $L_{S1.2}, L_{S1.3}, L_{S2.1}, L_{S2.3}, L_{S3.1}, L_{S3.2}$ – індуктивності розсіювання пар обмоток; k_n – коефіцієнт, що враховує нелінійний характер активного опору навантаження R_n ; R_1, R_2, R_3 – активні опори обмоток; w_1, w_2, w_3 – число витків обмоток трансформатора; F – магнітний потік.

Система рівнянь (2.6) і (2.7) в операторній формі матиме наступний вигляд [49, 50, 51]:

$$\begin{cases} w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p) + w_3 I_3(p) = H(p)l; \\ U_1(p) = pL_{S1.1} I_1(p) + pL_{S1.2} I_2(p) + pL_{S1.3} I_3(p) + pw_1 F(p) + R_1 I_1(p); \\ U_2(p) = pL_{S2.2} I_2(p) + pL_{S2.1} I_1(p) + pL_{S2.3} I_3(p) + pw_2 F(p) + R_2 I_2(p); \\ -U_3(p) = pL_{S3.3} I_3(p) + pL_{S3.1} I_1(p) + pL_{S3.2} I_2(p) + pw_3 F(p) + R_3 I_3(p); \\ U_3 = k_n R_n I_3(p). \end{cases} \quad (2.8)$$

Запишемо рівняння (2.8) в наступному вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} H(p) = \frac{w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p) + w_3 I_3(p)}{l}; \\ B = f(H), \quad F = B \cdot S; \\ F = f\left(\frac{w_1 I_1(p) + w_2 I_2(p) + w_3 I_3(p)}{l}\right) \cdot S; \\ I_1(p) = \frac{U_{LS1.1}(p)}{pL_{S1.1}}; \\ U_{LS1.1} = U_1(p) - pL_{S1.2}I_2(p) - pL_{S1.3}I_3(p) - pw_1F(p) - R_1I_1(p); \\ I_2(p) = \frac{U_{LS2.2}(p)}{pL_{S2.2}}; \\ U_{LS2.2} = U_2(p) - pL_{S2.1}I_1(p) - pL_{S2.3}I_3(p) - pw_2F(p) - R_2I_2(p); \\ I_3(p) = \frac{U_3(p)}{k_n R_n}; \\ k_n = f(R_n); \\ -U_3(p) = pL_{S3.3}I_3(p) + pL_{S3.1}I_1(p) + pL_{S3.2}I_2(p) + pw_3F(p) + R_3I_3(p), \end{array} \right. \quad (2.9)$$

де p – оператор диференціювання; B – магнітна індукція; S – площа перетину осердя.

Нелінійні властивості матеріалу осердя будемо враховувати за допомогою кусочно-лінійної інтерполяції, заданої в табличній формі основної кривої намагнічування.

Структурна схема математичної моделі трансформатора з двома первинними обмотками і активним навантаженням має вигляд, як на рис. 2.8.

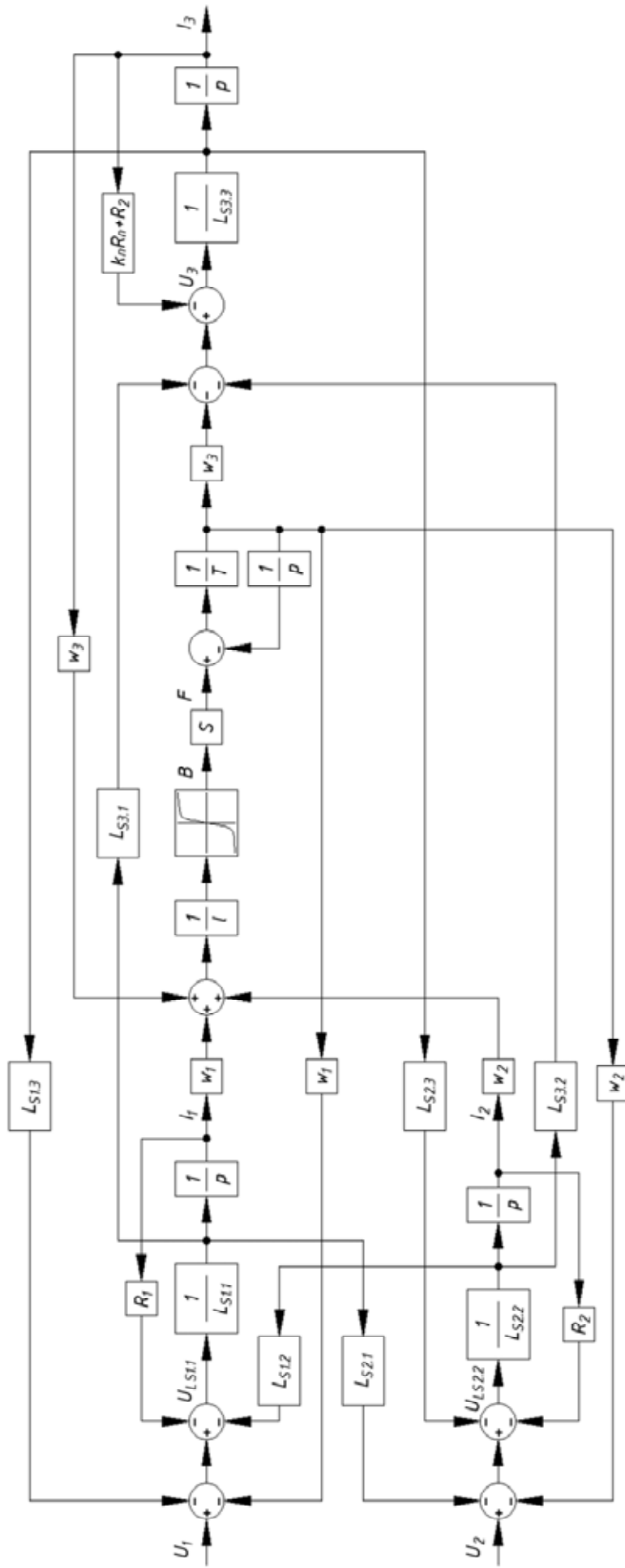


Рис. 2.8 Структурна схема математичної моделі трансформатора з двома первинними обмотками і активним навантаженням

2.3 Статичні характеристики фільєрного живильника

Зростання температури в локальній зоні металевого сплаву фільєрного живильника призводить до збільшення його питомого електричного опору, але цей процес носить нелінійний характер, завдяки нелінійному тепловому коефіцієнту жаростійкого сплаву. Аналітичне визначення цього коефіцієнту дуже складно.

Для створення оптимальної системи керування вузлом вироблення установки БСТВ можливо експериментальне визначення залежності активного опору фільєрного поля від вторинного струму трансформатора СТ.

Розбивши криву струму на три кусочно-лінійні ділянки, отримано апроксимовані залежності $T = f(I_2)$:

$$\begin{cases} T = 2.21 \cdot I_2 + 1.35, & I_2 \leq 1000 \\ T = 1.29 \cdot I_2 + 2, & 1000 \leq I_2 \leq 1365 \\ T = 0.99 \cdot I_2 + 1.65, & I_2 \geq 1365 \end{cases} \quad (2.10)$$

де коефіцієнти при струмі I_2 мають розмірність $[^{\circ}\text{C}/\text{A}]$.

На рис. 2.9 побудовано апроксимовану залежність $T = f(I_2)$ для всього діапазону робочих струмів.

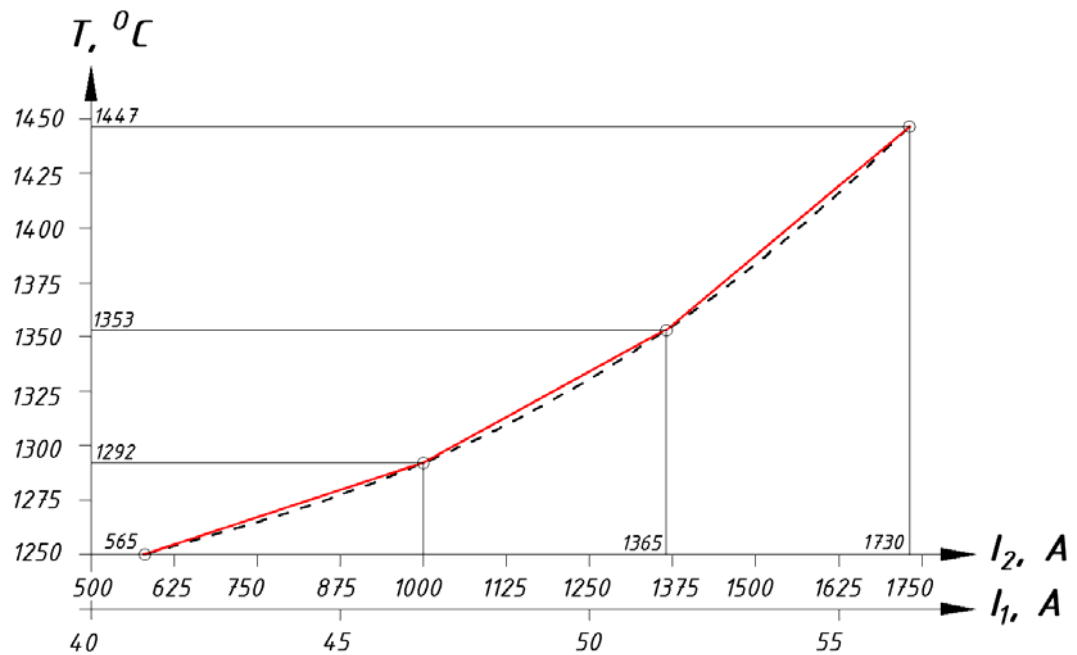


Рис.2.9 Криві $T = f(I_2)$ фільєри з сплаву 20Х23Н18:

- - - експериментальна; — апроксимована

2.4 Дослідження математичної моделі системи ТРС-СТ

Проведемо дослідження математичної моделі системи ТРС-СТ в середовищі MATLAB.

На рис. 2.10 наведено структурну схему математичної моделі системи ТРТ-СТ, або точніше фільєрного нагрівального вузла під час роботи від регулятора струму. На рис. 2.10 позначено: $W_{ТП}$ і $W_{СТ}$ - передавальні функції тиристорного перетворювача і трансформатора СТ. Позначено змінні: $I_{СТ}$ – сигнал завдання робочого струму, I_Z – сигнал завдання струму після ПІ-регулятора, U_1 – величина напруги первинної обмотки СТ, I_1 , I_2 – струми первинної і вторинної обмоток СТ, T - температура фільєри.

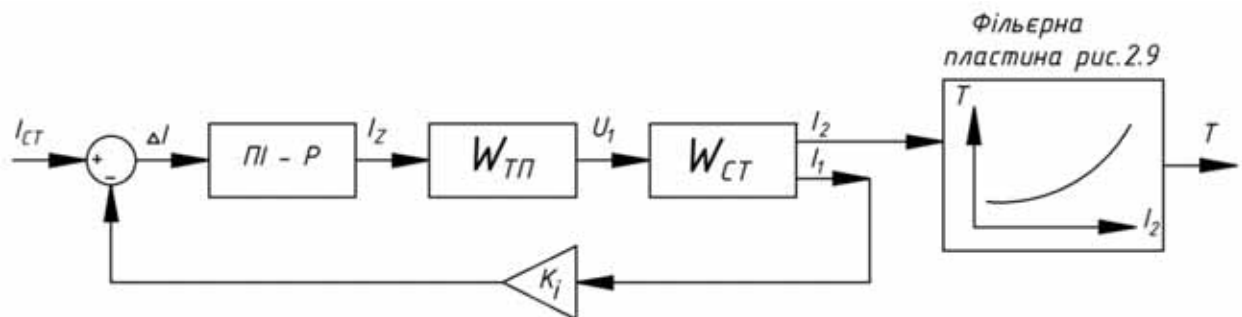


Рис. 2.10 Структурна схема математичної моделі системи ТРТ – СТ

Синтез отриманої структурної схеми системи ТРС - СТ (рис. 2.10) виконується за допомогою програми SIMULINK програмного пакету MATLAB (рис. 2.11).

Структурну схему спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою наведено на рис. 2.12.

На рис. 2.13 а наведено структурну схему блоку PI-regulator (пропорційно-інтегрального регулятора), а на рис. 2.13 б – структурну схему блоку Transformer.

Всі основні і додаткові блоки, а також внутрішня структура підсистем повністю відповідає структурній схемі, наведеній на рис. 2.10.

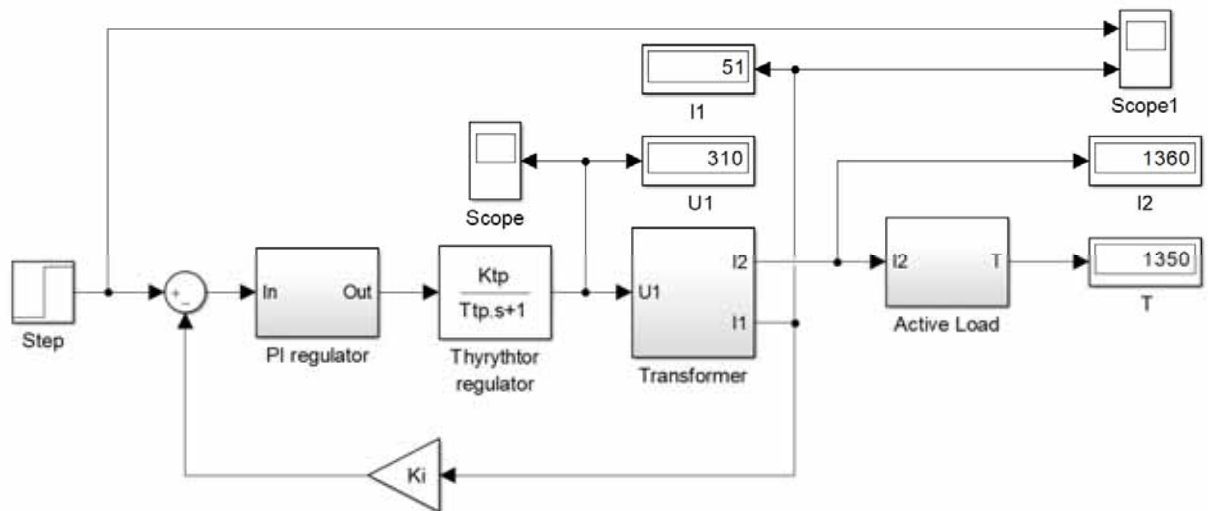


Рис.2.11 Блок-схема системи ТРС-СТ в середовищі *MATLAB SIMULINK*

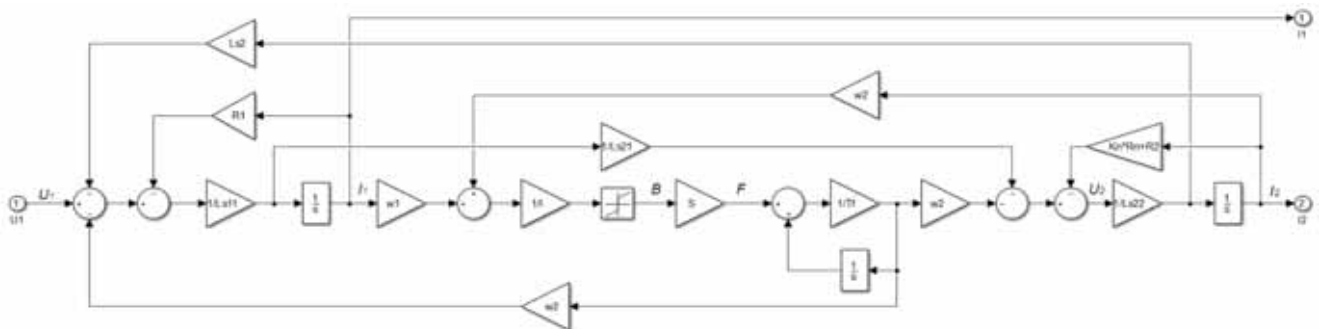
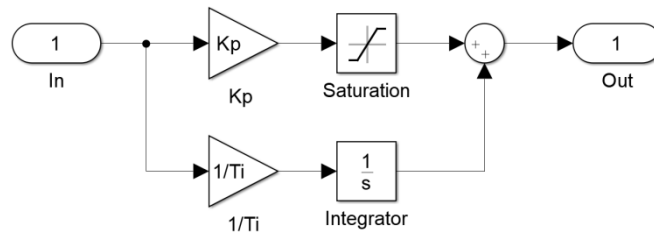
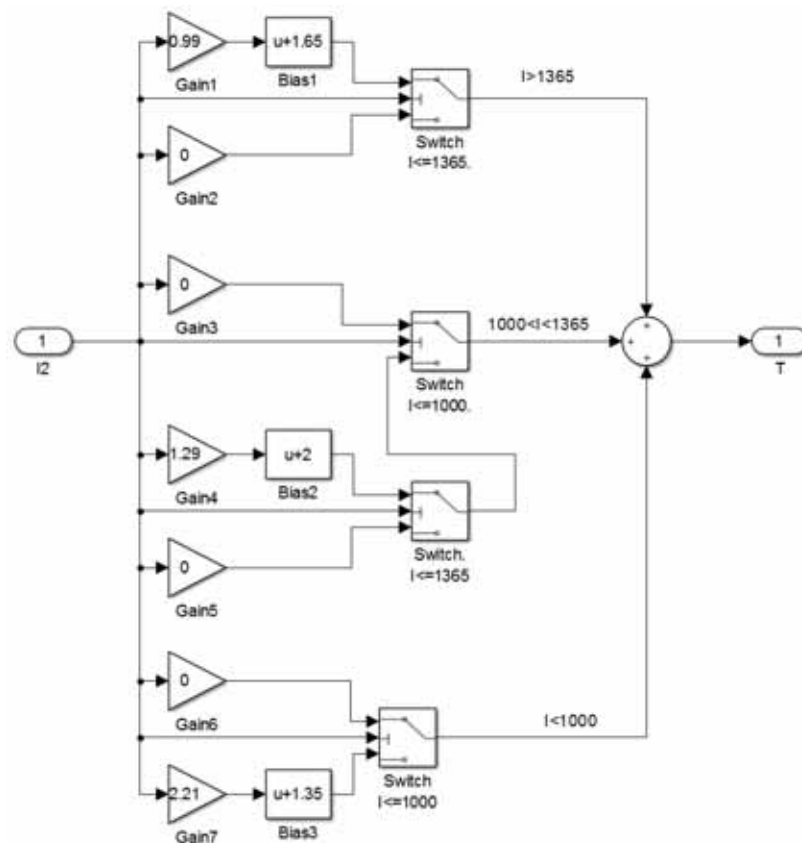


Рис. 2.12 Структурна схема блоку Transformer спеціального трансформатора з однією первинною обмоткою

**a****б**Рис. 2.13 Структурні схеми блоків: **a** PI-regulator; **б** Active Load

На рис. 2.14 і рис. 2.15 наведено графіки перехідних процесів напруг і струмів первинної обмотки трансформатора, отримані в результаті моделювання. Графіки сигналів завдання струму обмоток показані пунктирною лінією.

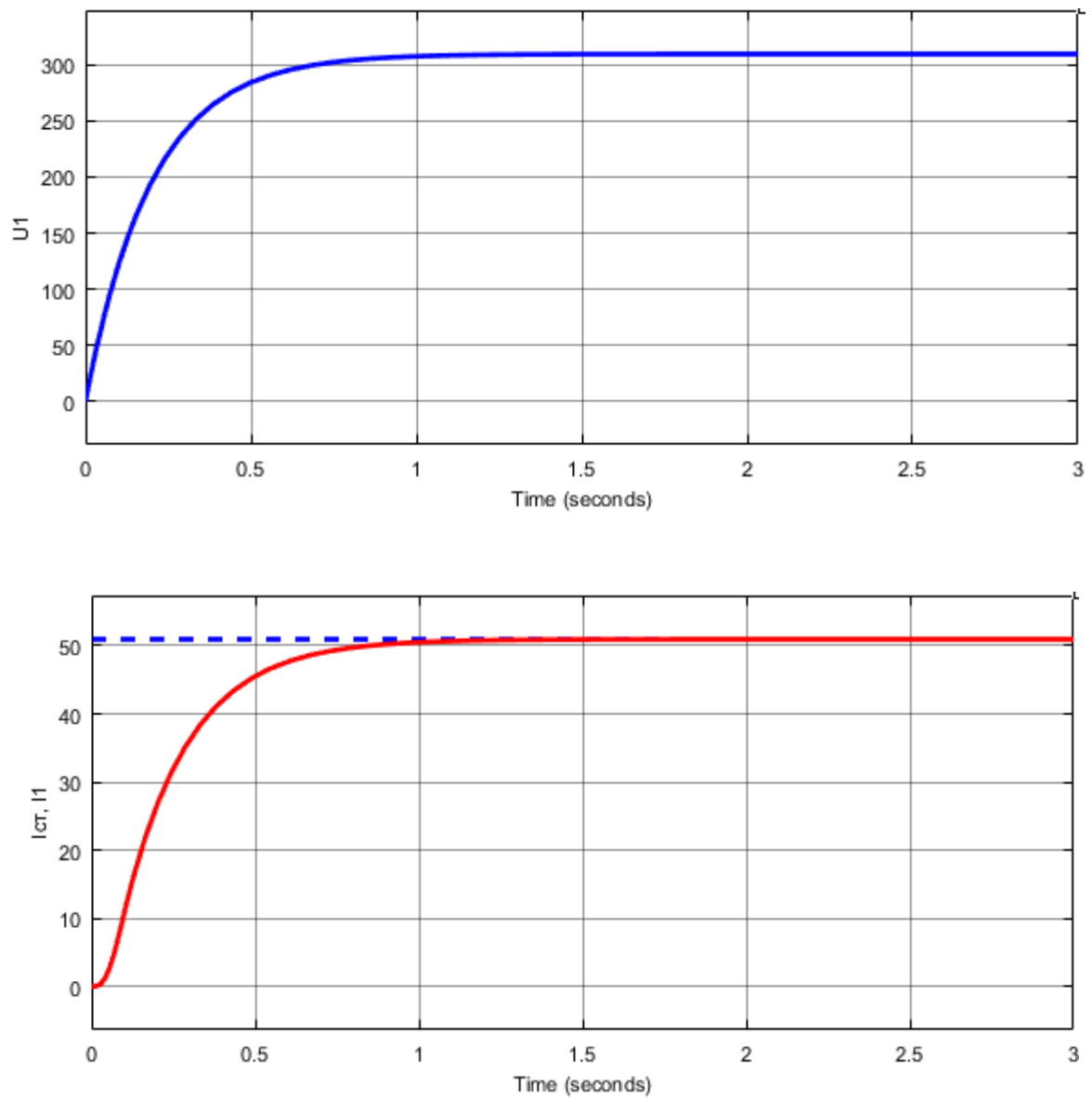


Рис. 2.14 Графіки перехідних процесів напруги і струму в первинних ланцюгах двохобмоткового трансформатора:

— напруга U_1 ; — — — струм I_{ct} ; — струм I_1 .

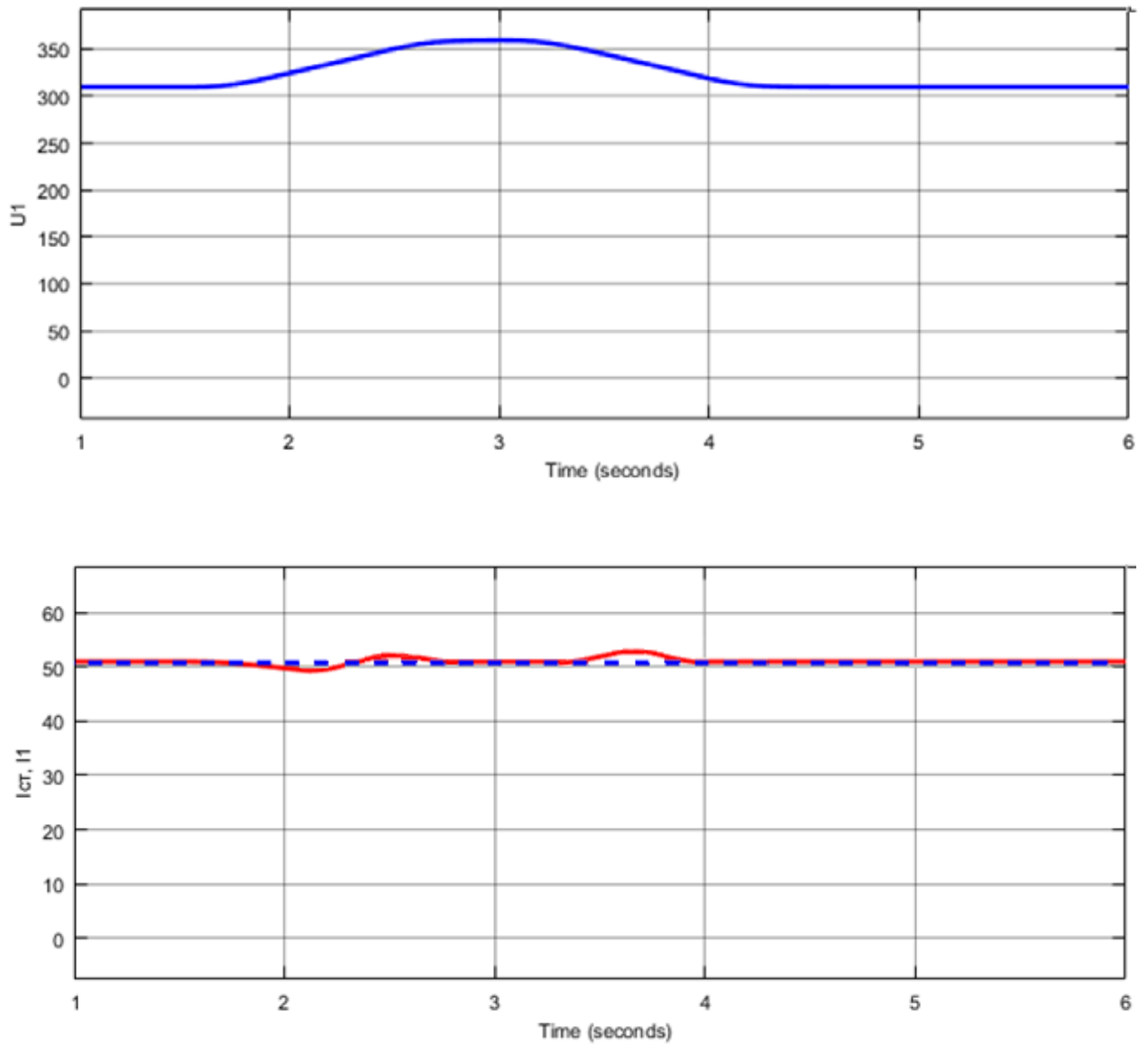


Рис. 2.15 Графіки перехідних процесів напруги і струму в первинному колі двообмоткового трансформатора при відпрацюванні збурення за струмом I_1

— напруга U_1 ; — — струм I_{ct} ; — струм I_1 .

2.5 Аналіз перехідних процесів в системі ТРС-СТ

Наведені графіки перехідних процесів струмів і напруг у первинній обмотці СТ демонструють, що система виходить на заданий робочий режим без перерегулювання і з необхідним часом $t_m = 1,5$ с, який задається при налаштуванні коефіцієнтів пропорційно-інтегрального регулятора. Як свідчить практичний досвід, такий час перехідних процесів цілком прийнятний, тому що теплові процеси інерційні, а головним завданням керування не є забезпечення швидкості, а плавність і точність виходу на тепловий режим.

Таким чином, отримані графіки перехідних процесів повністю задовольняють заданим вимогам. Система з пропорційно-інтегральними регуляторами струму спеціального трансформатора забезпечує задані плавність і точність регулювання температури фільєрного поля.

Розбіжність кривих перехідних процесів струмів і напруг, отриманих при моделюванні і реальних, знятих під час проведення заводських випробувань, становить не більше 5%. Це свідчить про адекватність розробленої математичної моделі системи її практичній реалізації.

Побудова оптимальної системи автоматичного керування вимагає врахування взаємовпливу технологічних параметрів, яке неможливе при використанні класичних систем керування, тобто одного контуру керування недостатньо. Для багатопараметричної оптимізації необхідна побудова багатоконтурної системи керування технологічними параметрами. В умовах неможливості побудови точного математичного опису в цілому всього процесу отримання первинної нитки з базальтового розплаву, синтез багатоконтурної системи керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами являє собою дуже складну задачу.

Разом з тим, використання систем нечіткої логіки і штучного інтелекту штучних нейроподібних (гібридних) мереж дозволяє синтезувати подібного роду системи керування, і вони мають бути ефективними саме на штучних нейроподібних мережах, оскільки нейромережі орієнтовані на обробку

великих масивів інформації, здатні до навчання та адаптації. Цьому питанню присвячено наступний розділ роботи.

2.6 Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичні моделі двох основних структур спеціального трансформатора (з однією і двома первинними обмотками), які враховують нелінійні властивості осердя і нелінійну залежність опору навантаження від температури фільер, які адекватно (за результатами експериментальних досліджень) відображають реальні електромагнітні процеси в трансформаторах такого типу.

2. Визначено, що головна координата установки БСТВ - температура фільєрного поля T в зоні вироблення розплаву - нелінійно залежить від величини струму вторинної обмотки СТ. Побудовано апроксимовану залежність $T = f(I_2)$ для всього діапазону робочих струмів, яку доцільно використовувати при синтезі структурних схем системи.

3. Розроблено математичну модель системи тиристорний регулятор струму - спеціальний трансформатор ТРС-СТ, яка відображає процес регулювання струму фільєрних живильників. Проведено розрахунки і аналіз перехідних процесів системи в середовищі *MATLAB SIMULINK*, результати яких свідчать про адекватність запропонованої математичної моделі (розбіжність між змодельованими та реальними графіками перехідних процесів не більше 5%). Результати моделювання можуть бути використані для подальшої оптимізації багатоконтурної системи керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами.

Посилання: [6], [43, 44], [45], [46, 47], [48], [49-51], [52, 53], див. список використаних джерел стор. 157-166.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

3.1 Вплив технологічних параметрів установки з виробництва БСТВ на діаметр первинної нитки

Розглянемо основні підходи до реалізації керування нелінійними об'єктами, що мають багато взаємозв'язків між своїми параметрами, яким є установка з виробництва БСТВ. На сьогоднішній день відомі успішні приклади реалізації систем керування, які навчаються і будуються на принципах пошукового адаптивного керування [54] з вибором конкретного алгоритму регулювання параметра в залежності від стадії технологічного процесу, на основі ретроспективного аналізу проведених випробувань і оцінок отриманого результату. Але для керування в режимі реального часу зазначені системи не ефективні і є, по своїй суті, так звані системи підтримки прийняття рішень. Очевидна необхідність переходу від керування технологічним процесом на основі класичних систем керування з детермінованими зворотними зв'язками, до методології побудови систем керування в умовах невизначеності і складності точного математичного опису стану об'єкта. З огляду на наведене вище, розглянемо найбільш перспективну інтелектуальну систему автоматичного керування нелінійним багатовимірним об'єктом (установка по виробництву БСТВ) на основі нечіткої логіки.

Автоматичне регулювання діаметра первинної нитки, що витягується при виробництві БСТВ, вимагає зміни температури фільєрного поля і швидкості обертання витяжних валків (рис. 3.1). Експериментальні дані, отримані для установки УБ СТВ 22 на ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів», що пов'язують технологічні параметри з показниками якості первинної нитки наведені нижче.

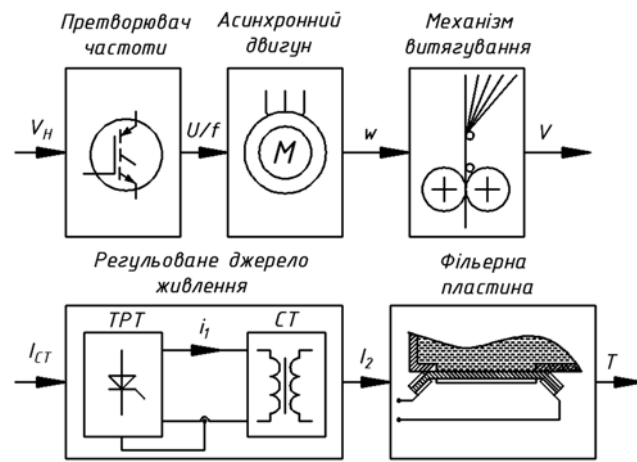


Рис. 3.1 Структурна схема отримання первинного волокна ТРС-СТ

У таблиці 3.1 наведено експериментальні дані, а на рис. 3.2 показано поверхню, що відображає вплив заданої швидкості витягування нитки V_H та інтервалу t_P роботи фільтери (при заданому первинному струмі I_{CT}) на діаметр отриманої первинної нитки d_H (діаметр фільтрного отвору $d_\phi = 2,2$ мм).

Таблиця 3.1

Експериментальні дані параметрів t_P , V_H та d_H при $I_{CT}=50$ А

$d_H, \text{мкм}$						
$t_P, \text{діб}$	$V_H, \text{м/хв.}$					
	3,5	4,1	4,7	5,3	5,9	6,5
0	187	173	160	157	150	146
6	200	185	172	165	160	152
12	210	196	183	178	170	160
18	228	208	195	182	175	170
24	250	225	207	197	190	182

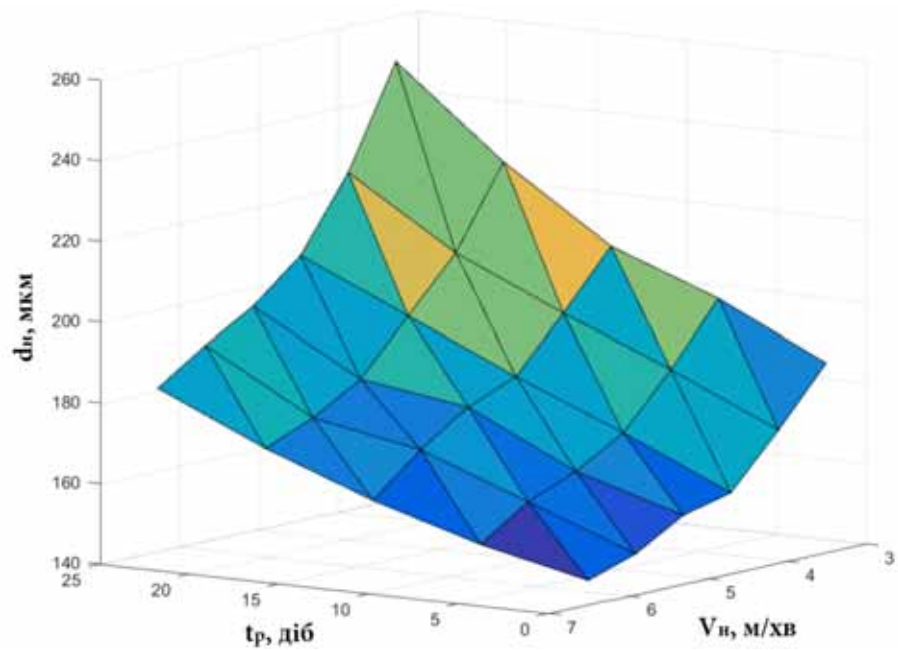


Рис.3.2 Поверхня, що відображає вплив параметрів t_p , V_H на d_H

У таблиці 3.2 наведено експериментальні дані, а на рис. 3.3 показано поверхню, що відображає вплив первинного струму I_{CT} та часового інтервалу t_p напрацювання фільтри (при заданій швидкості витягування нитки V_H) на діаметр отриманої первинної нитки d_H ($d_\phi = 2,2$ мм).

Таблиця 3.1

Експериментальні дані параметрів t_p , I_{CT} та d_H при $V_H = 5,3$ м/хв

$d_H, \text{мкм}$						
$t_p, \text{дїб}$	I_{CT}, A					
	44	45	47	49	51	53
0	212	205	186	178	158	140
6	230	210	196	183	178	160
12	235	228	208	195	182	175
18	258	250	225	207	194	180
24	267	265	252	220	205	190

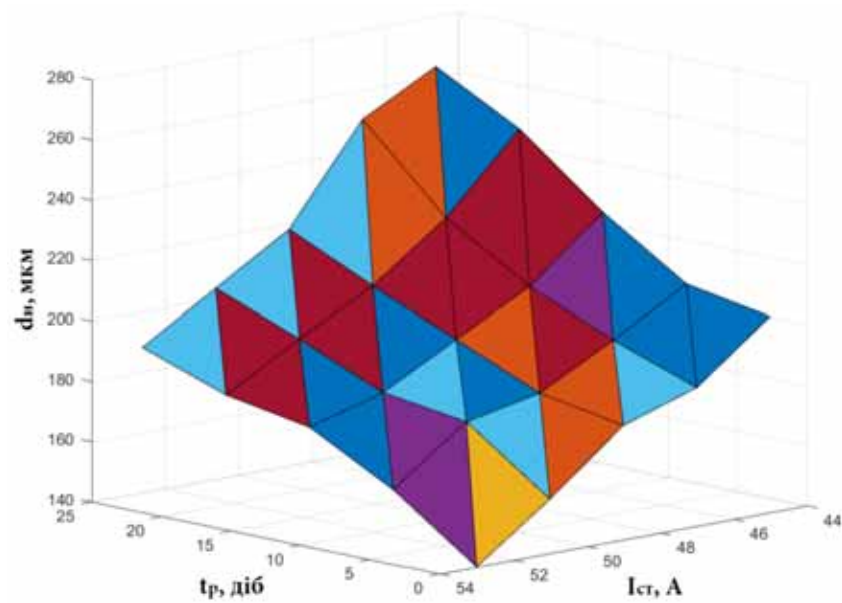


Рис.3.3 Поверхня, що відображає вплив параметрів t_p , $I_{ст}$ на d_n

Через складні взаємозв'язки нелінійних параметрів, що впливають на стабільність процесу витягування безперервного базальтового волокна, таких як залежності:

- діаметру первинної нитки від швидкості витяжки;
- діаметру фільєрного отвору живильника від часу його експлуатації;
- в'язкості базальтового розплаву від температури фільєри;
- температури фільєрного поля від прикладеної до неї сили струму,

в умовах невизначеності і складності точного математичного опису стану об'єкта, зовнішнього середовища та інших факторів, не представляється можливим реалізація керування технологічним процесом на основі класичних систем оптимального керування з детермінованими зворотними зв'язками.

У даній роботі побудову системи керування параметрами установки з виробництва БСТВ пропонується виконати на основі використання апарату нечіткої логіки [55], що дозволить забезпечити оптимальний (в обумовленому сенсі) режим роботи установки БСТВ в частині вироблення базальтового розплаву в безперервні тонкі волокна.

3.2 Синтез нечіткого логічного контролера діаметра первинної нитки при виробництві БСТВ

На даний час нечітка логіка (НЛ) - найбільш зручний спосіб побудови систем автоматичного керування складними технологічними процесами, бо має ряд позитивних властивостей: гнучкість і відносна простота в формуванні бази даних; допускає використання невизначених вхідних даних і обробку невизначеностей без використання складного апарату диференціального й інтегрального числення; об'єднує досвід експертних систем і може базуватися на відомих класичних законах регулювання (П, ПІ, ПД); є більш стійким методом керування до зміни системних параметрів на відміну від класичних законів регулювання.

Говорячи про НЛ, найчастіше за все мають на увазі системи нечіткого виведення, які широко використовуються для керування технічними пристроями і процесами. Процес нечіткого виведення являє собою деяку процедуру або алгоритм отримання нечітких висновків на основі нечітких умов або передумов з використанням понять НЛ [56].

Інформацією, яка надходить на вхід системи нечіткого виведення, тобто до нечіткого логічного контролера (НЛК), є виміряні певним чином вхідні змінні. Ці змінні відповідають реальним змінним процесу керування. Інформація, яка формується на виході системи нечіткого виведення, відповідає вихідним змінним процесу керування [57].

НЛК призначений для перетворення значень вхідних змінних процесу керування у вихідні змінні на основі використання бази нечітких правил і реалізує нечіткий висновок на основі посилок або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловлювань.

Однією із основних вимог до установки БСТВ є забезпечення заданої геометричної точності первинних ниток в умовах непередбачуваності зміни технологічних параметрів при відносно високій швидкодії і відсутності перерегулювання по температурі фільєри. Цю вимогу в даній роботі

пропонується задовольнити на основі використання програмного фаззі-керування з урахуванням взаємного впливу різних контурів регулювання.

Пристаюючи до реалізації алгоритму НЛК, визначимо для нього необхідну кількість змінних: дві вхідних - *Diametr* (діаметр первинних ниток), *Time* (час напрацювання фільтрального живильника), і дві вихідні - *Speed* (швидкість обертання витяжних валків), *Current* (струм в первинній обмотці СТ). Вхідна змінна *Diametr* описується п'ятьма фаззі-множинами (ФМ), *Time* - трьома, вихідні *Speed* і *Current* – теж п'ятьма. Функціональна схема запропонованого НЛК діаметра первинного волокна показана на рис.3.4.

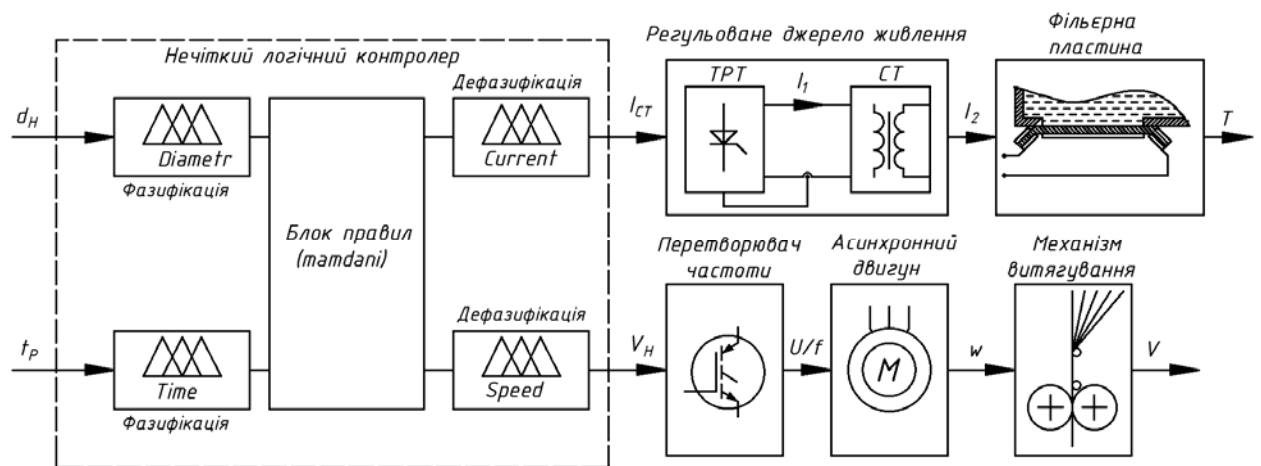


Рис.3.4 Функціональна схема НЛК діаметра первинного волокна

НЛК діаметра первинної нитки за двома критеріями містить базу знань, на основі якої контролер формує рішення керування. Задаючи необхідний діаметр первинної нитки, час безперервної роботи установки, контролер на основі бази знань приймає рішення і формує необхідні значення сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна V_H і величини струму стабілізації первинної обмотки трансформатора $I_{СТ}$.

Програмна реалізація стратегії НЛК повинна виконуватись наступним чином [58, 59]:

- 1) Складання бази правил.
- 2) Отримання значень вхідних змінних від відповідних датчиків.
- 3) Виконання процедури фаззифікації.
- 4) Виконання процедури логічного висновку.
- 5) Виконання процедури дефаззифікації (з урахуванням необхідного знака вихідної змінної).

Тому для кожної вхідної змінної будемо задавати кількість складових її ФМ і визначати вид функцій належності цієї змінної до даних ФМ. Кількість ФМ для кожної вхідної змінної виберемо згідно логіко-технічного міркування: збільшення кількості фаззі-множин, з одного боку, підвищує точність створеного закону регулювання, а з іншого боку, ускладнює процедуру синтезу алгоритму, тому що збільшує загальну кількість правил і необхідну для її зберігання пам'ять. Кожному ФМ присвоюється відповідний терм (терм – від англійського слова *term* - називати) [60, 61].

Вхідна або вихідна лінгвістична змінна вважається заданою або визначеною, якщо для неї встановлено базова терм-множина з відповідними функціями належності кожного терма. В якості функцій належності використовуються терми трикутної або гаусової форми [59, 62]. Для зручності, простоти і лаконічності записів при оцінці лінгвістичних змінних, їх терми представляються літерними символами, які несуть певну інформацію для якісної оцінки. При найменуванні окремих термів вхідних і вихідних лінгвістичних змінних приймемо спеціальні скорочення (табл. 3.3 - табл. 3.4).

Таблиця 3.3

**Терми вхідних *Diametr*, *T_basalt* та вихідних *Speed*, *Current*
лінгвістичних змінних**

Символьне позначення	Англоязычне позначення	Українське позначення
<i>NB</i>	Negative Big	Негативно велике
<i>NS</i>	Negative Small	Негативно мале
<i>S</i>	Specified	Заданий, близьке до заданого
<i>PS</i>	Positive Small	Позитивно мале
<i>PB</i>	Positive Big	Позитивно велике

Таблиця 3.4

Терми вхідної лінгвістичної змінної *Time*

Символьне позначення	Англоязычне позначення	Українське позначення
<i>LO</i>	Long	Довге
<i>M</i>	Middle	Середнє
<i>LI</i>	Little	Мале

Вхідні лінгвістичні змінні представимо як *Diametr* – A_1 та *Time* – A_2 , а вихідні лінгвістичні змінні як *Speed* – D_1 , *Current* – D_2 .

Для лінгвістичних змінних визначаються межі області на числовій осі, тобто межі базової фізичної змінної:

$$U_i = [\underline{u}_i, \bar{u}_i], Y_j = [\underline{y}_j, \bar{y}_j], i = \overline{1, 2}, j = \overline{1, 2}, \quad (3.1)$$

де $\underline{u}_i / \bar{u}_i$ – нижнє/верхнє значення вхідної змінної u_i , $\underline{y}_j / \bar{y}_j$ – нижнє/верхнє значення вихідної змінної y_j .

Визначимо межі області змінних базових фізичних змінних:
 d_n – 120 ... 240 мкм, t_p – 21 ... 24 діб, V_B – 3,5 ... 6,5 м/хв., температура

фільтрального поля $T_P - 1300...1390^\circ\text{C}$, що відповідає заданому первинному струму СТ $I_{CT} - 46...53\text{A}$.

Терм-множини вхідних лінгвістичних змінних запишемо в такій

$$\text{формі:} \begin{cases} \text{Diametr} = \{NB, NS, S, PS, PB\}, \\ \text{Time} = \{LI, M, LO\}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Або в загальному вигляді:

$$A_i = \{a_{ik_i}\}, i = \overline{1, 2}, k_1 = \overline{1, 5}, k_2 = \overline{1, 3}, \quad (3.3)$$

де $a_{ik_i} - ik_i$ - й нечіткий терм змінної u , числа 5, 3 - кількість членів відповідної множини (потужність множини).

Терм-множина вихідних лінгвістичних змінних запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \text{Speed} = \{NB, NS, S, PS, PB\}, \\ \text{Current} = \{NB, NS, S, PS, PB\}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Або в загальному вигляді:

$$D_j = \{d_{jk_j}\}, j = \overline{1, 2}, k_1 = \overline{1, 5}, k_2 = \overline{1, 5}, \quad (3.5)$$

де $d_{jk_j} - jk_j$ -й нечіткий терм змінної y , числа 5, 5 - кількість членів відповідної множини.

Нечіткі змінні, представлені термами a_{ik_i} и d_{jk_j} , на цифровій осі фізичної області змінних U_i и Y_j можна визначити наступним чином:

$$a_{ik_i} = \int_{\underline{u_i}}^{\overline{u_i}} \mu_{a_{ik_i}}(u_i) / u_i, d_{jk_j} = \int_{\underline{y_j}}^{\overline{y_j}} \mu_{d_{jk_j}}(y_j) / y_j, \quad (3.6)$$

де $\mu_{a_{ik_i}}(u_i)$ - функція належності значення вхідної змінної $u_i \in [\underline{u_i}, \overline{u_i}]$

терма $a_{ik_i} \in A_i$; $\mu_{d_{jk_j}}(y_j)$ - функція належності значення вихідної змінної

$y_j \in [\underline{y_j}, \overline{y_j}]$ терма $d_{jk_j} \in D_j$. Знак інтегралу або суми в нечітких множинах

означає об'єднання пар $\mu(u_i)/u_i$. Кожен нечіткий терм формалізується сукупністю цих пар.

Для всіх можливих значень вхідних або вихідних лінгвістичних змінних існує конкретне значення ступеня належності його до того чи іншого терму. Сукупність значень ступеня належності становить функцію належності, яка вводить обмеження ступеня належності відповідних значень нечіткої множини і надає нечіткій змінній форму, яку можливо обробляти засобами обчислювальної техніки.

Межі діапазонів вхідних і вихідних нечітких змінних і графічні форми їх функцій належності представлені на рис.3.5 - рис.3.8.

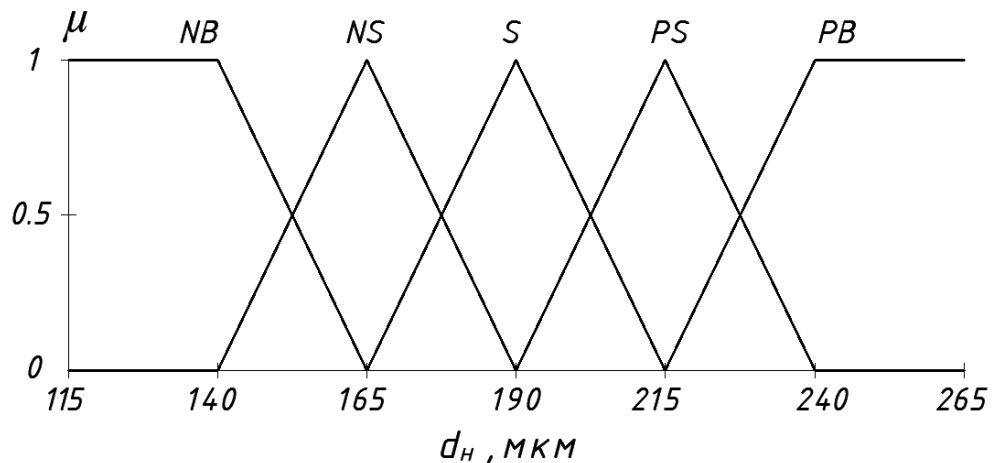


Рис.3.5 Функції належності лінгвістичної змінної *Diameter*

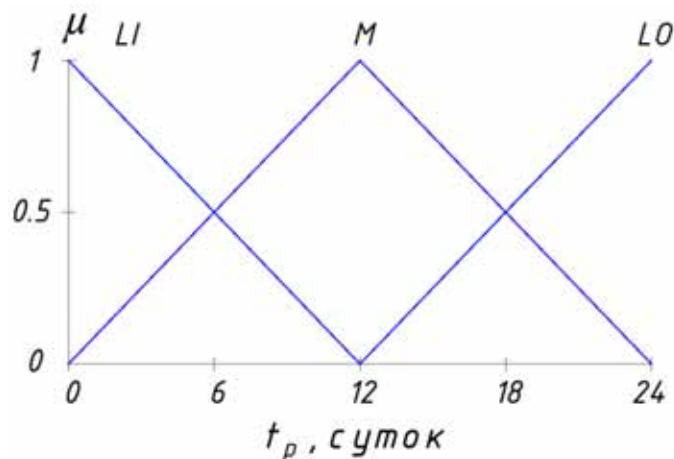
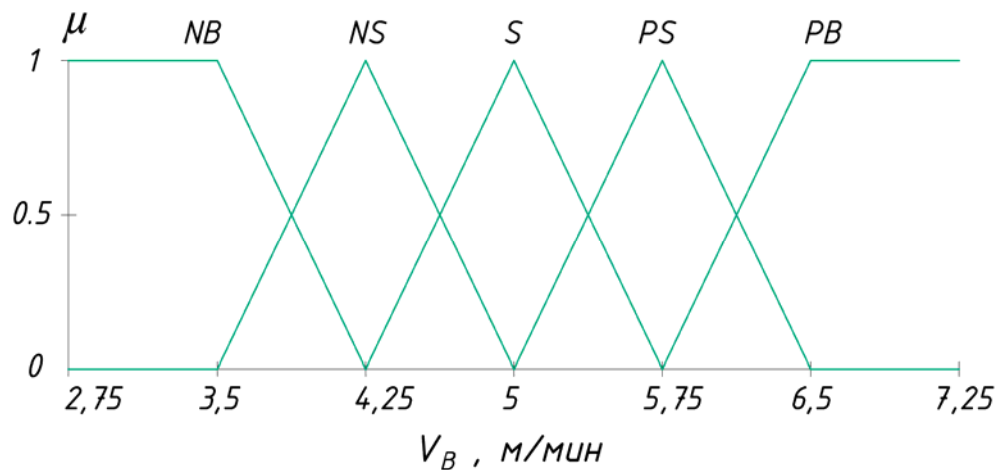
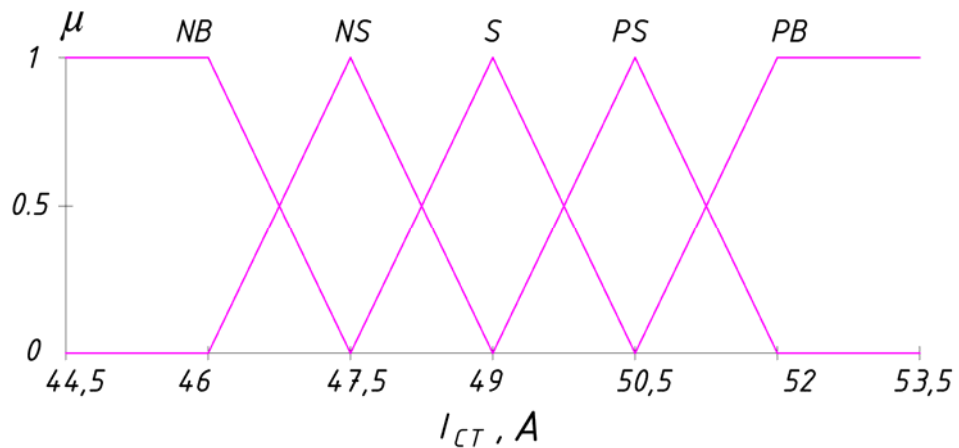


Рис.3.6 Функції належності лінгвістичної змінної *Time*

Рис.3.7 Функції належності лінгвістичної змінної *Speed*Рис.3.8 Функції належності лінгвістичної змінної *Current*

База правил систем нечіткого виводу призначена для формального подання емпіричних знань або знань експертів в тій чи іншій проблемній області. У нашому випадку база правил НЛК діаметра первинної нитки, яка реалізована 30-ма логічними правилами, складена на основі вхідних і вихідних змінних за критеріями забезпечення необхідного діаметра нитки при максимальній швидкості її витягування. Враховуючи всі правила, отримано таблиці правил для *Speed* (таб. 3.5) та для *Current* (таб. 3.6).

Таблиця 3.5

База правил для змінної *Speed*

d_H T_P	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>S</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>LI</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>
<i>M</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>
<i>LO</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>

Таблиця 3.6

База правил для змінної *Current*

d_H T_P	<i>NB</i>	<i>NS</i>	<i>S</i>	<i>PS</i>	<i>PB</i>
<i>LI</i>	<i>PB</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>
<i>M</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>S</i>	<i>NS</i>	<i>NB</i>
<i>LO</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>PB</i>	<i>S</i>	<i>NS</i>

Для знаходження функції належності нечіткого правила використовую "мінімаксий" (Max-Min Inference) метод логічного рішення, коли спочатку функція належності частини ТО кожного з правил об'єднуються з величиною істинності частини ЯКЩО (при цьому функція належності частини ТО обмежується величиною істинності частини ЯКЩО - це "міні" - операція), а потім з обмежених функцій належності частини ТО шляхом взаємного накладення вибирається результуюча функція належності з максимальною величиною істинності ("максі" - операція). Ця результуюча функція належності визначає собою поточний вплив бази правил. Процедура обробки бази правил з формуванням результуючої функції належності є логічне рішення для розрахунку вихідної величини НЛК [63].

$$\mu(y) = \max_{R_1, \dots, R_n} \{\mu_{R,k}(y)\} = \max_{k=1, \dots, n} \{\min[\mu_{E,k}, \mu_{T,k}(y)]\}, \quad (3.7)$$

де R – множина правил; n – число правил; $\mu_{R,k}$ – величина істинності частини “якщо” у k - ому правелі; $\mu_{T,k}(y)$ – функція належності частини “то” k – го правила [60].

В результаті, отримано таку кількість функцій належності, скільки лінгвістичних величин має вихідна змінна контролера. Результируюча функція належності відображає дію бази правил і представляє нечітку величину керування.

Для перетворення нечіткого виводу в реальне число (величина завдання фізичного параметра), в нашому випадку в величину завдання швидкості витягання первинної нитки і струму в первинній обмотці СТ, необхідно виконати процедуру дефазифікації. На цьому етапі отримана результируюча функція належності для керуючого впливу на керування об'єктом перетворюється в цифрову величину, як правило, за методом визначення "центру тяжіння" плоскої двовірної фігури, тобто в площині, яка обмежена графіком кривої результируючої функції належності. Тоді значення вихідного параметра керування визначається як:

$$y = \frac{\int_{\min}^{\max} u \cdot \mu(u) du}{\int_{\min}^{\max} \mu(u) du}, \quad (3.8)$$

Даний метод досить громіздкий з-за необхідності розрахунку інтегралів, але, на практиці, він спрощується завдяки тому, що на монотонних ділянках функції належності можуть стискатися і перетворюватися в n монотонні функції μ . Тоді реальний вихідний сигнал може бути отримано як:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i \mu_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i}. \quad (3.9)$$

Такий перехід параметрів керування регулятором від нечіткої змінної до чіткої забезпечує плавний характер зміни вихідного сигналу.

В якості алгоритму формування нечіткого логічного виводу використано метод Mamdani, який ще називають "мінімаксим" методом нечіткого виводу. Цей алгоритм найбільш широко використовується на практиці і в значній мірі

відображає всі тонкощі прийняття нечіткого логічного рішення в умовах нелінійності системи. Даний метод реалізує формування співвідношень вхідних та вихідних лінгвістичних змінних для отримання нечіткого логічного виведення та формування фізичного сигналу керування [63, 64].

Безпосередньо усі стадії розробки НЛК, включаючи синтез, дослідження, проектування, моделювання та впровадження в режимі реального часу дозволяє реалізувати прикладний пакет Fuzzy Logic Toolbox для обчислювальної системи MATLAB. Вбудовані GUI-модулі пакети створюють інтуїтивно зрозуміле середовище, що забезпечує легке відпрацювання всіх етапів проектування нечіткої системи. Функціонально пакет реалізує більшість сучасних нечітких технологій, включаючи нечіткий логічний висновок, нечітку кластеризацію та адаптивне нейро-нечітке налагодження. Fuzzy Logic Toolbox, як і всі пакети розширення системи MATLAB, відкрита для користувача, тобто видається можливим переглянути алгоритми, модифікувати вихідний код, додати свої власні функції належності або процедури дефазифікації.

На рис. 3.9 приведено загальний вигляд розробленого НЛК діаметра первинної нитки в редакторі FIS. В редакторі загальних властивостей системи нечіткого виводу встановлені вхідні та вихідні змінні контролера, вибрано алгоритм нечіткого виведення Mamdani, метод дефазифікації COG (центра тяжкості), метод прийняття логічного рішення MIN-MAX.

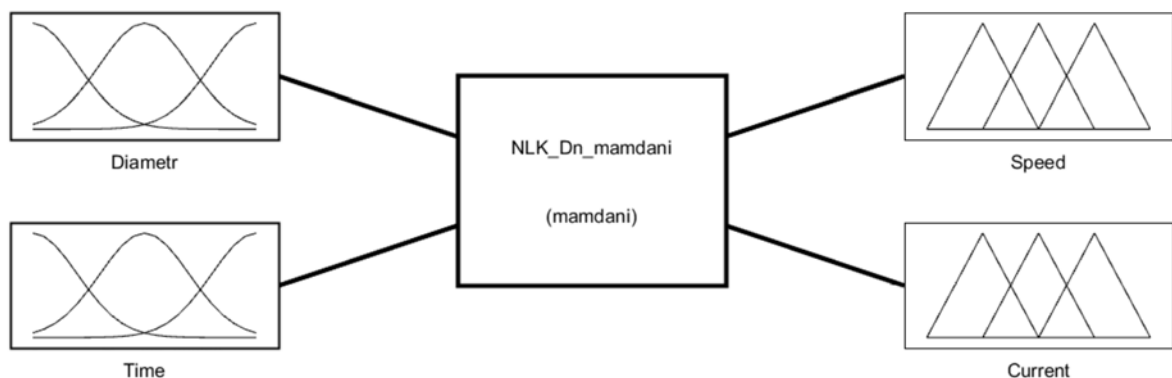


Рис. 3.9 Загальний вигляд НЛК діаметра первинної нитки в FIS Editor

В редакторі Membership Function Editor представлений загальний вид функцій належності вхідних та вихідних змінних (*Diametr*, *Time*, *T_basalt*, *Speed*, *Current*) НЛК діаметра первинної нитки (рис.3.10), вибрані терми, тип і параметри функцій належності кожного терму.

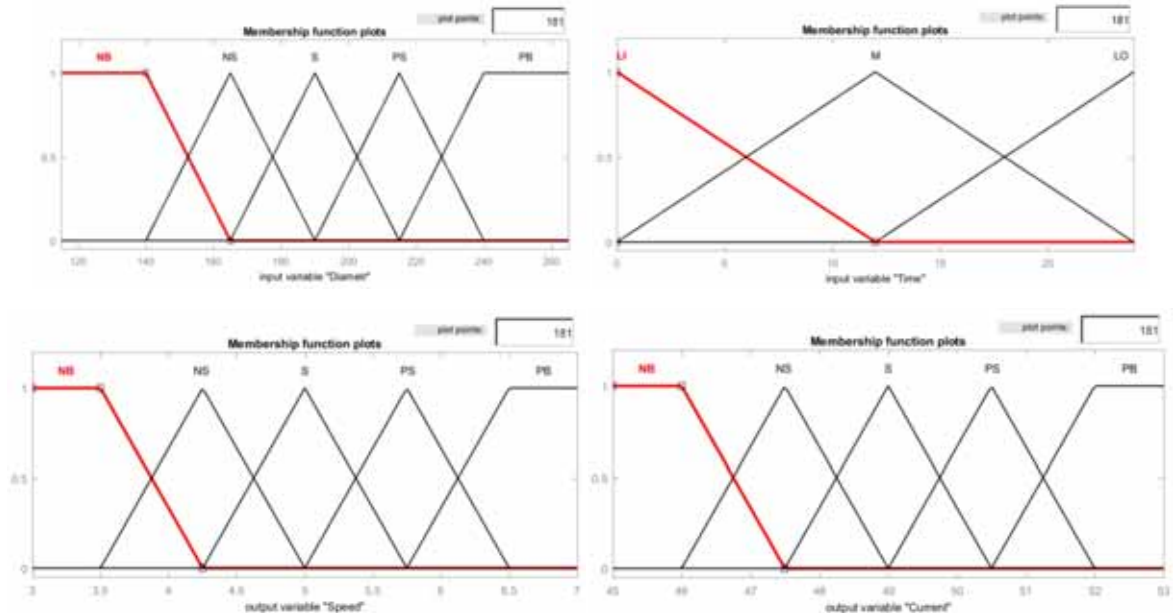


Рис. 3.10 Загальний вид функцій належності вхідних та вихідних змінних НЛК діаметра первинного нитки в Membership Function Editor

Рис. 3.11 відображає базу знань НЛК діаметру первинної нитки в редакторі правил Rule Editor, які складені відповідно до таблиць 3.5 - 3.6.

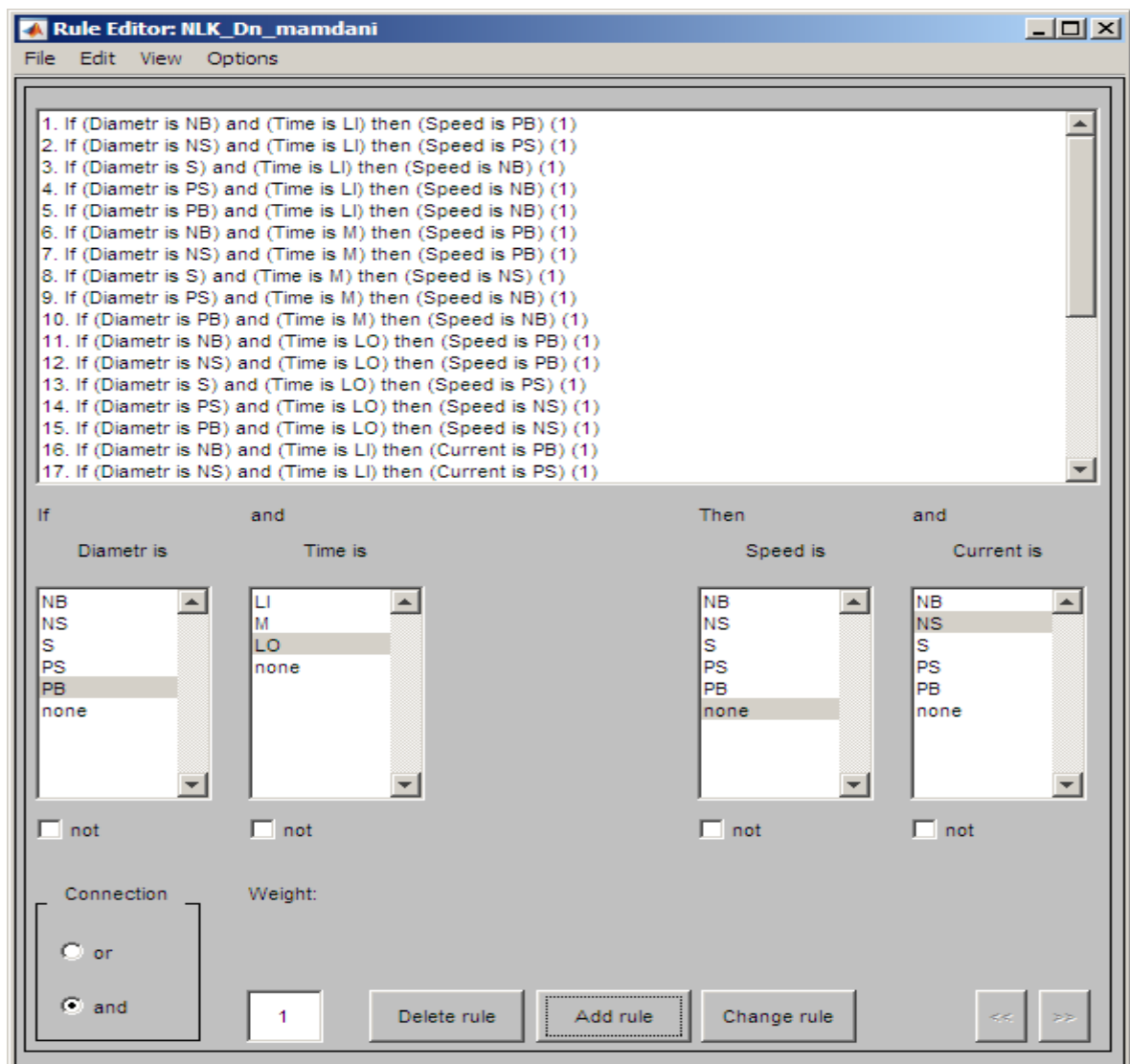


Рис. 3.11 База знань НЛК первинної нитки в редакторі Rule Editor

На рис. 3.12 показана візуалізація НЛК діаметра первинної нитки в браузері Rule Viewer. Браузер дозволяє простежити виконання нечіткого виводу по кожному правилу, отримання результуючої нечіткої множини його дефаззифікації. Змінюючи, таким чином, значення входних змінних, на екрані відображаються не тільки цифрові значення вихідних змінних, а й графічні зображення функцій належності всіх входних і вихідних змінних.

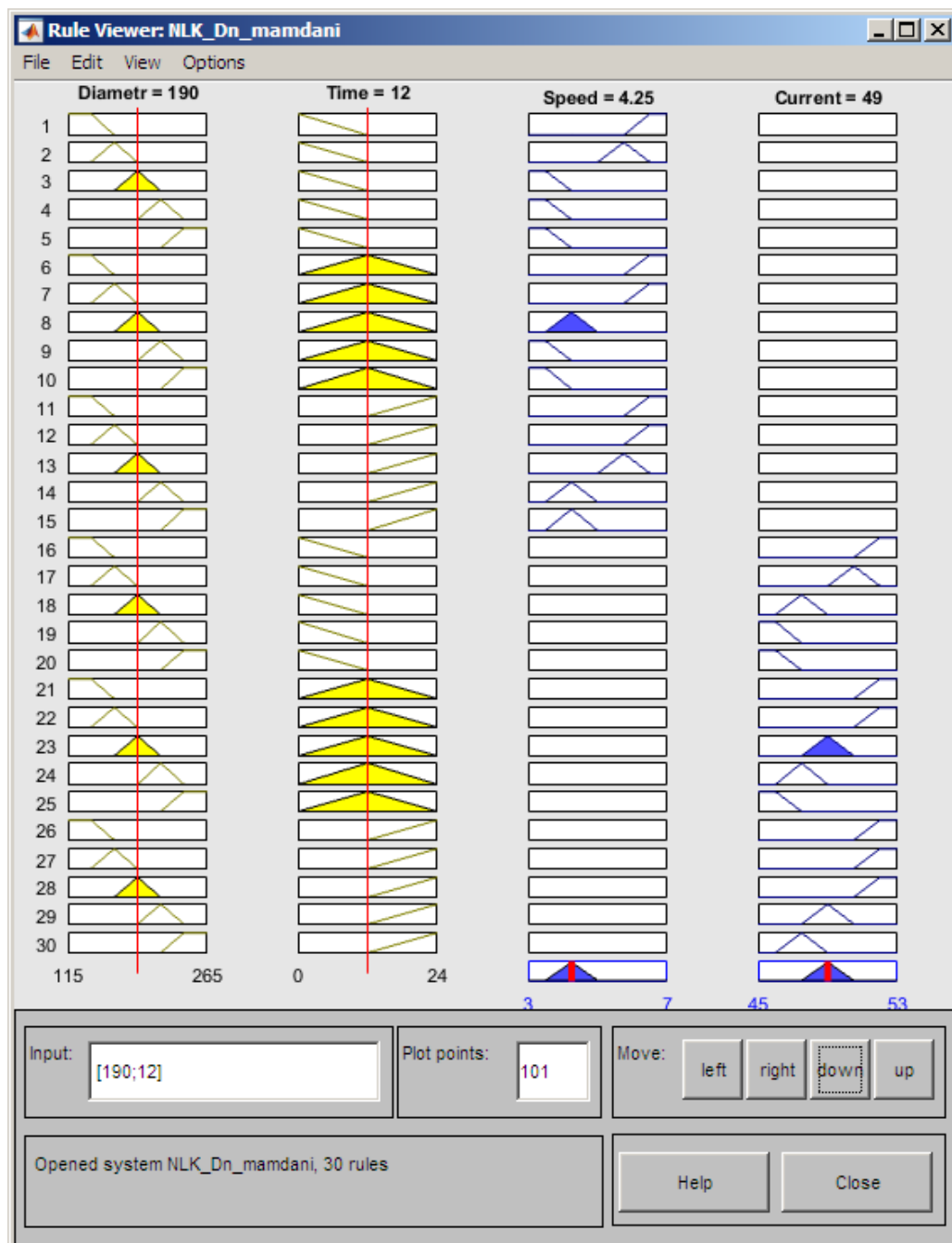


Рис. 3.12 Візуалізація НЛК діаметра первинної нитки в Rule Viewer

На рис. 3.13 наведено поверхню залежності вихідної змінної *Speed* від вхідних змінних *Diametr*, *Time* НЛК діаметра первинної нитки, а на рис. 3.14 -поверхню залежності вихідної змінної *Current* від тих же вхідних змінних *Diametr*, *Time*.

Поверхні наочно відображають реакцію НЛК на вхідні змінні, таким чином, можна зробити попередні висновки про правильну адекватну його поведінку.

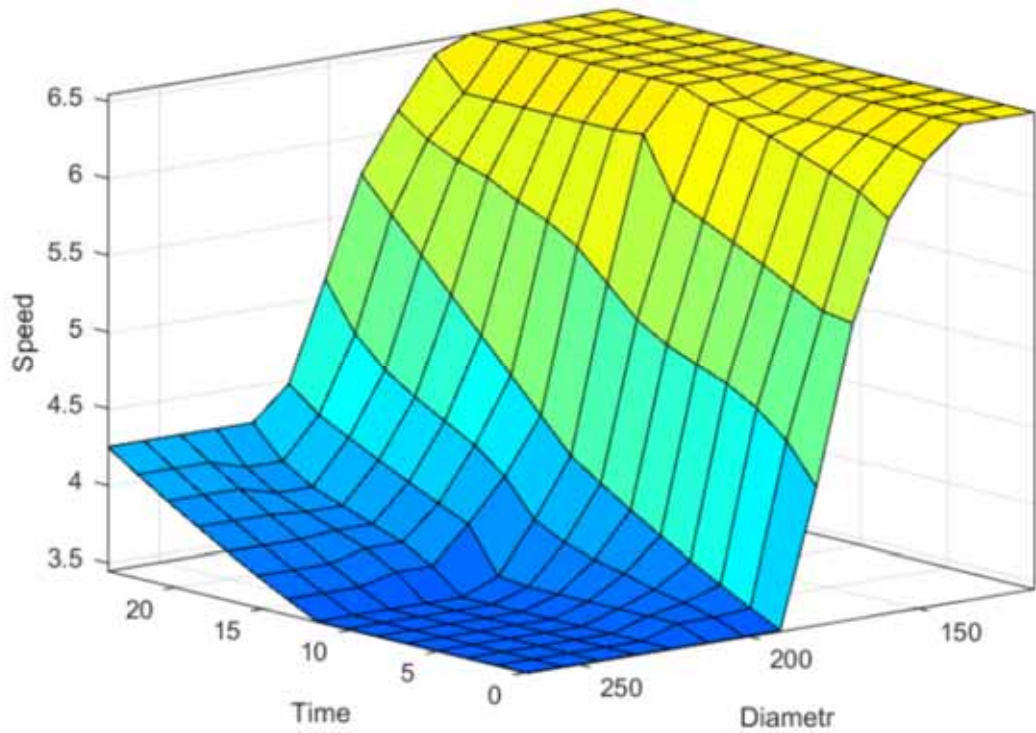


Рис. 3.13 Поверхня залежності вихідної змінної *Speed* від вхідних змінних *Diametr*, *Time* НЛК діаметра первинної нитки

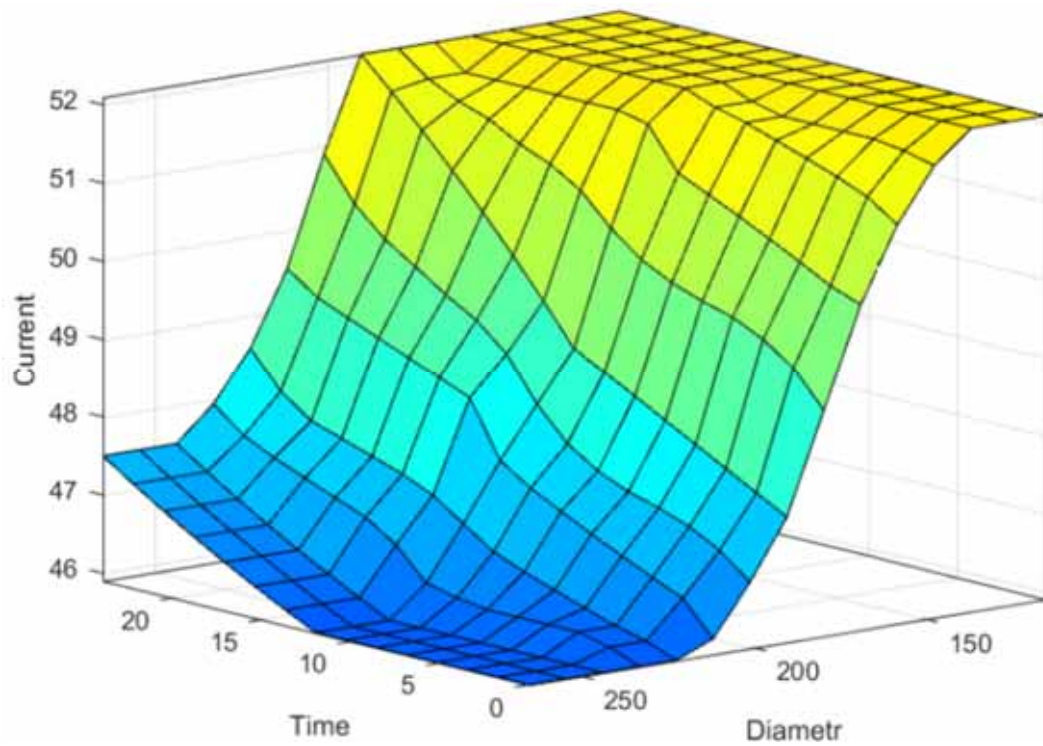


Рис. 3.14 Поверхня залежності вихідної змінної *Current* від вхідних змінних *Diametr*, *Time* НЛК діаметра первинної нитки

3.3 Дослідження системи ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки для установки з виробництва БСТВ

Систему тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки моделюю в середовищі MATLAB. На рис. 3.15 наведено блок-схему системи ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки для проведення моделювання. Всі позначення аналогічні схеми з класичним ПІ-регулятором. Для дослідження системи необхідно експортувати синтезований в попередньому розділі НЛК діаметра первинної нитки в блок “Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer”.

Для перевірки працездатності та ефективності запроєктованого НЛК на вході системи задаються значення діаметра первинного волокна d_H (120 – 240) мкм, час роботи установки t_P (0 – 24 діб), а на виході – завдання V_H для регулятора швидкості обертання валків (рис. 3.16) та I_{CT} для системи ТРС-СТ, модель якої (*PI regulator, Thyrythtor regulator, Transformer, Active Load*) аналогічна розглянутій у розділі 2.

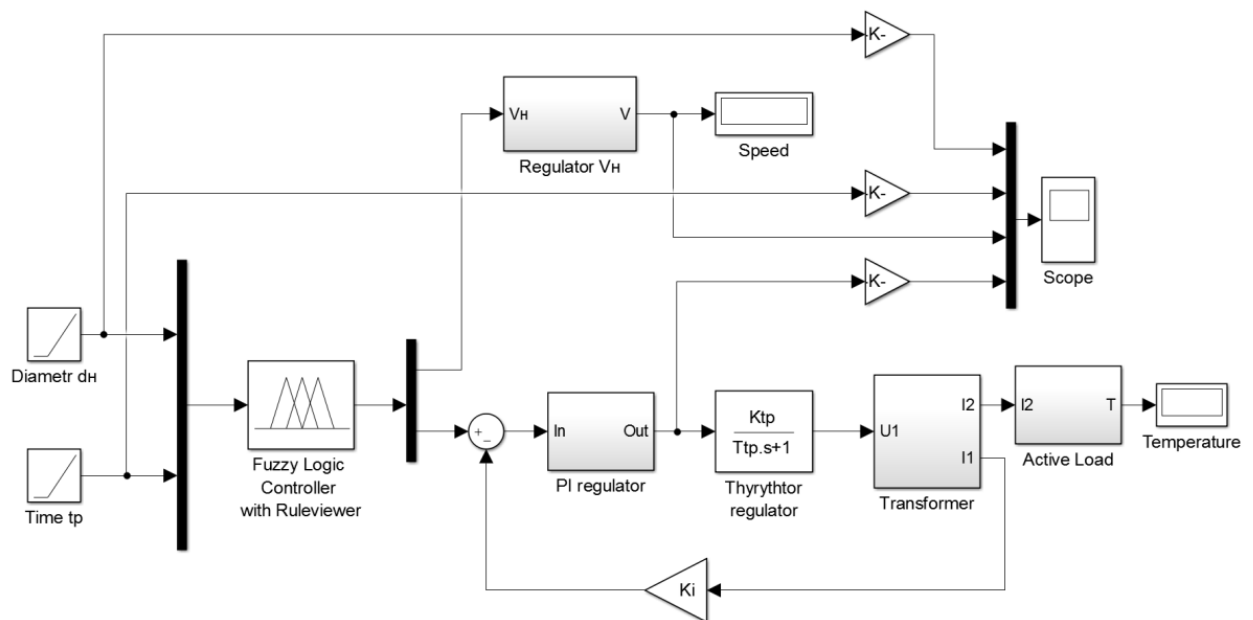


Рис. 3.15 Блок-схема системи ТРС- СТ з НЛК діаметра первинної нитки в середовищі MATLAB

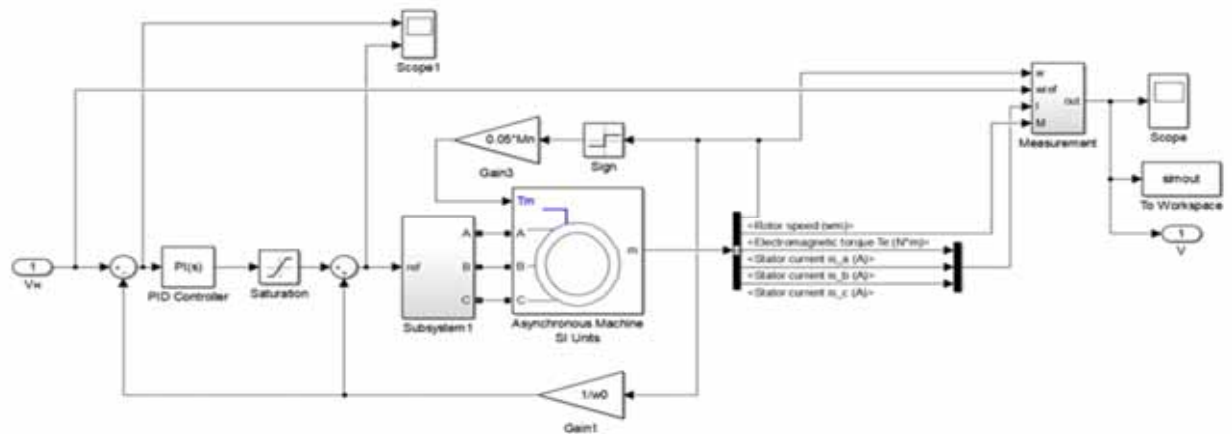


Рис. 3.16 Блок-схема блока *Regulator V_H* середовищі MATLAB

Результати дослідження роботи системи ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нити зведено в таблиці 3.7 та відображено на рис. 3.17.

Таблиця 3.7

Результати дослідження системи ТРТ-СТ

$V_H, \text{ м/хв}$						
$t_P, \text{ діб}$	$d_H, \text{ мкм}$					
	120	144	168	192	216	240
0	4,18	4,43	4,59	4,84	5,13	5,14
6	4,18	4,46	4,75	5,05	5,28	5,33
12	4,18	4,55	4,94	5,23	5,38	5,5
18	4,41	4,83	5,18	5,37	5,52	5,74
24	4,64	5,21	5,4	5,5	5,6	5,96
$I_{CT}, \text{ А}$						
$t_P, \text{ діб}$	$d_H, \text{ мкм}$					
	120	144	168	192	216	240
0	47,4	47,9	48,4	49,1	49,7	49,9
6	47,6	48,1	48,8	49,5	50,1	50,4
12	47,7	48,4	49,2	49,9	50,4	50,9
18	48,2	48,6	49,4	50,1	50,6	50,8
24	48,6	48,9	49,6	50,3	50,8	51,1

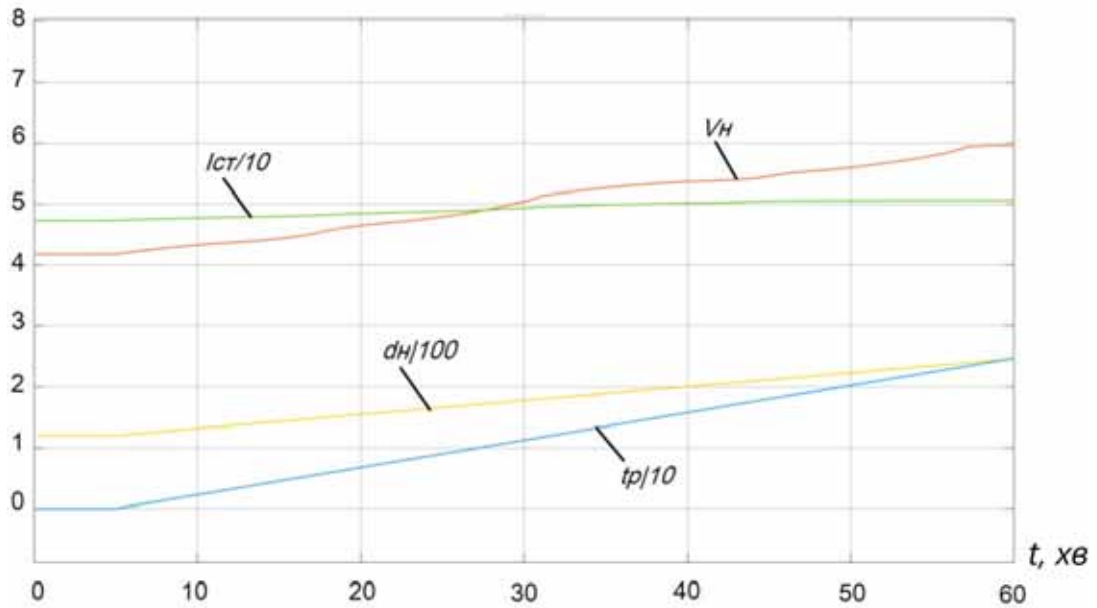


Рис. 3.17 Залежності технологічних параметрів системи ТРТ-СТ з НЛК.

Дані таблиці відображають адекватну логічну поведінку контролера, який, залежно від заданих вхідних технологічних параметрів, формує команди керування системою, що забезпечують задану якість безперервних волокон. Відслідковується, що контролер при зміні величини d_H формує різні значення параметрів швидкості витягування первинних ниток V_H і необхідне значення струму стабілізації первинної обмотки трансформатора I_{CT} , залежно від часу роботи фільтрної пластини t_P .

$$\begin{cases} V_H = f(d_H, t_P); \\ I_{CT} = f(d_H, t_P). \end{cases} \quad (3.10)$$

Порівнюючи значення діаметра грубих первинних волокон d_H з таблиць 3.1 – 3.2 з отриманими аналогічними значеннями таблиці 3.7 можна помітити значне відхилення в показах d_H на виході НЛК, в межах 15%. Це пояснюється неточністю математичного опису об'єкта керування та некоректністю бази правил НЛК, що певною мірою впливає на діаметр отриманого первинного волокна. Більш того, на практиці в силу наявності неврахованих параметричних збурень (зміна температури навколишнього середовища або температури теплоносія в системі охолодження фільтрної пластини, марки

сталі жаростійкої пластини та інших) похибка d_H стає істотною. В такому випадку виникає необхідність корегування бази правил НЛК діаметра первинної нитки, що відповідає новим умовам функціонування установки БСТВ.

Використання адаптивних підходів у теорії керування – штучних нейронних мереж, дозволило б автоматично корегувати алгоритм регулювання складними багатофункціональними об'єктами. Так, при впровадженні нейро-нечіткого контролера, який об'єднує в собі адаптивні підходи самонавчання та досвід експерта (наладчика АСУ ТП), дозволяє створювати моделі об'єкта на основі нейромереж і оперативно коригувати як параметри моделі, так і параметри регулятора відповідно до умовами, що змінюються. В умовах невизначеності, тобто впливу на об'єкт випадкових зовнішніх та параметричних збурень, НЛК не може здійснити їх компенсацію у зв'язку з відсутністю відповідних правил у його базі правил (табл. 3.5 - 3.6) та функцій належності нового виду. Функцію адаптера в системі нечіткого керування виконує адаптивна нейро-нечітка мережа (ANFIS) [65]. Таким чином, в подальшому виникає необхідність синтезувати НЛК діаметра первинної нитки з застосуванням штучних нейронних мереж.

3.4 Синтез НЛК діаметра первинної нитки із застосуванням нейронних мереж

Діапазон застосування апарату нечіткої логіки дуже широкий – від побутових приладів до керування складними промисловими процесами. Центральне місце в процедурах нечіткого виведення займає база правил нечітких продукцій. В якості природної мови розглянутих раніше нечітких систем є такі звороти, як «маленький», «тепло», «повільно», «добре», «довго», на яких заснована нечітка логіка і вона отримала широке застосування в керуванні складними промисловими технологічними процесами [66, 67].

Апарат нечіткої логіки і нечітких множин з успіхом застосовується для вирішення завдань, в яких вихідні дані є ненадійними і слабо формалізованими. Позитивні сторони такого підходу:

- опис умов і методу розв'язання задачі на мові, який близький до природної мови.
- універсальність: будь-яка математична система може бути апроксимована системою, заснованою на нечіткій логіці (згідно знаменитої теореми Fuzzy Approximation Theorem).
- ефективність (пов'язана з універсальністю), що пояснюється рядом теорем, аналогічних теоремам про повноту для штучних нейронних мереж [57].

Разом з тим існують прикладні завдання, в яких виявлення і побудова правил нечітких продукцій неможлива або пов'язана з труднощами концептуального характеру. До таких завдань відносяться завдання класифікації і прогнозування, нелінійного і ситуаційного керування, а також інтелектуального аналізу даних (Data Mining) [56]. Нечіткі експертні та керуючі системи характеризуються недоліками: вид і параметри функцій належності, що описують вхідні і вихідні змінні системи, вибираються суб'єктивно і може статися так, що не цілком відображають реальну дійсність, вихідний набір прийнятих нечітких правил формулюється експертом-людиною і може виявитися неповним або суперечливим. До того ж, існують деякі залежності або зв'язки, що пов'язують вхідні і вихідні змінні моделі системи, а виявлення і визначення таких залежностей в явному теоретико-множинному або аналітичному вигляді не можливе через брак інформації про проблемну область, що моделюється, або складності обліку різноманіття чинників, що впливають на характер цього взаємозв'язку [56].

Для конструктивного усунення зазначених недоліків, принаймні частково, рядом авторів було запропоновано виконувати нечіткі експертні та керуючі системи адаптивними, коригуючи по мірі роботи системи, правила і параметри функцій належності. Одним з найбільш вдалих варіантів такої

адаптації є *метод так званих гібридних нейронних мереж*. Перевагою моделей, побудованих на основі нейронних мереж, є можливість отримання нової інформації про проблемну область в формі деякого прогнозу. При цьому побудова та налаштування нейронних мереж здійснюється за допомогою їх навчання на основі наявної і доступної інформації [57, 56].

Нечіткі нейронні мережі (гібридні мережі), об'єднуючи в собі переваги нейронних мереж і систем нечіткого виводу, дозволяють розробляти і представляти моделі систем у формі правил нечітких продукцій, які володіють наочністю і простотою змістовної інтерпретації. З іншого боку, при використанні методики нейронних мереж для побудови правил нечітких продукцій є менш трудомістким і більш зручним процесом для опису прикладних проблем [56].

Останнім часом апарат гібридних мереж повсюдно визнається системними аналітиками як один з найбільш перспективних інструментів для вирішення слабо або погано структурованих задач прикладного аналізу [68].

При вирішенні задачі нечіткої логіки за допомогою нейронних мереж виявляється, що формально за структурою вона ідентична багат шаровій нейронній мережі з навчанням, наприклад, за алгоритмом зворотного поширення помилки, де стадія побудови нечіткої системи інтегрована в її прихованих шарах. Побудова такої гібридної системи реалізується у вигляді п'ятишарової нейронної (ANFIS) мережі прямого поширення сигналу.

Абревіатура ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) означає адаптивна нейро-нечітка система виводу, яка являє собою модель з декількома входами та одним виходом, що представляють собою нечіткі логічні змінні. [69]. Однак для синтезу НЛК діаметра первинної нитки зі застосуванням нейронних мереж необхідна ANFIS модель із двома виходами – *Speed та Current*. Тим не менше, модель із двома виходами може бути розроблена за допомогою підключення декількох гібридних мереж із одним виходом. Таким чином, кілька ANFIS моделей (рис. 3.18), розташованих в паралельній

комбінації, утворюють адаптивну систему нейрон-нечіткого виводу з декількома виходами.

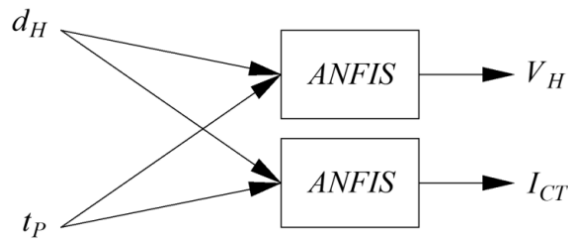


Рис. 3.18 Структура гібридної ANFIS мережі з двома входами та двома виходами

На рис. 3.19 зображено гібридну ANFIS мережу з двома входами і одним виходом кожна, які представляють собою систему нечіткого виводу FIS типу Сугено 0-го порядку, а кожне правило нечітких продукцій має постійну вагу, що дорівнює одиниці [70].

Для лінгвістичної оцінки вхідної змінної *Diametr* використовується чотири терма, для змінної *Time* – три терма, а для вихідних змінних *Speed* та *Current* – чотири. Рішення основного завдання при налаштуванні нейро-нечіткого контролера зводиться до формування поверхонь керування його вихідних змінних (*Speed* та *Current*), як задаюча дія для забезпечення заданої геометричної точності базальтових волокон. Такі поверхні і будуть оптимальними поверхнями керування.

На рис. 3.19 зображено: *FB* – блок фазифікації; *LCB* – блок логічних заключень; *DFB* – блок дефазифікації.

На виході першого шару, який реалізує блок фазифікації, з'являються значення ступенів належності вхідної змінної до лінгвістичного терму. Форму функції належності визначає активаційна функція нейрона. Далі значення ступенів належності подаються на наступний шар нейронної мережі, який реалізує блок логічних висновків на основі таблиці правил, що визначає логіку роботи нечіткого регулятора. Вихідні величини цього шару подаються на наступний шар нейронної мережі, який реалізований блоком дефазифікації. Візьмемо вже визначені терм-множини, функції належності, алгоритм роботи

нечіткого контролера і таблиці правил, що використовувались для реалізації НЛК діаметра первинної нитки.

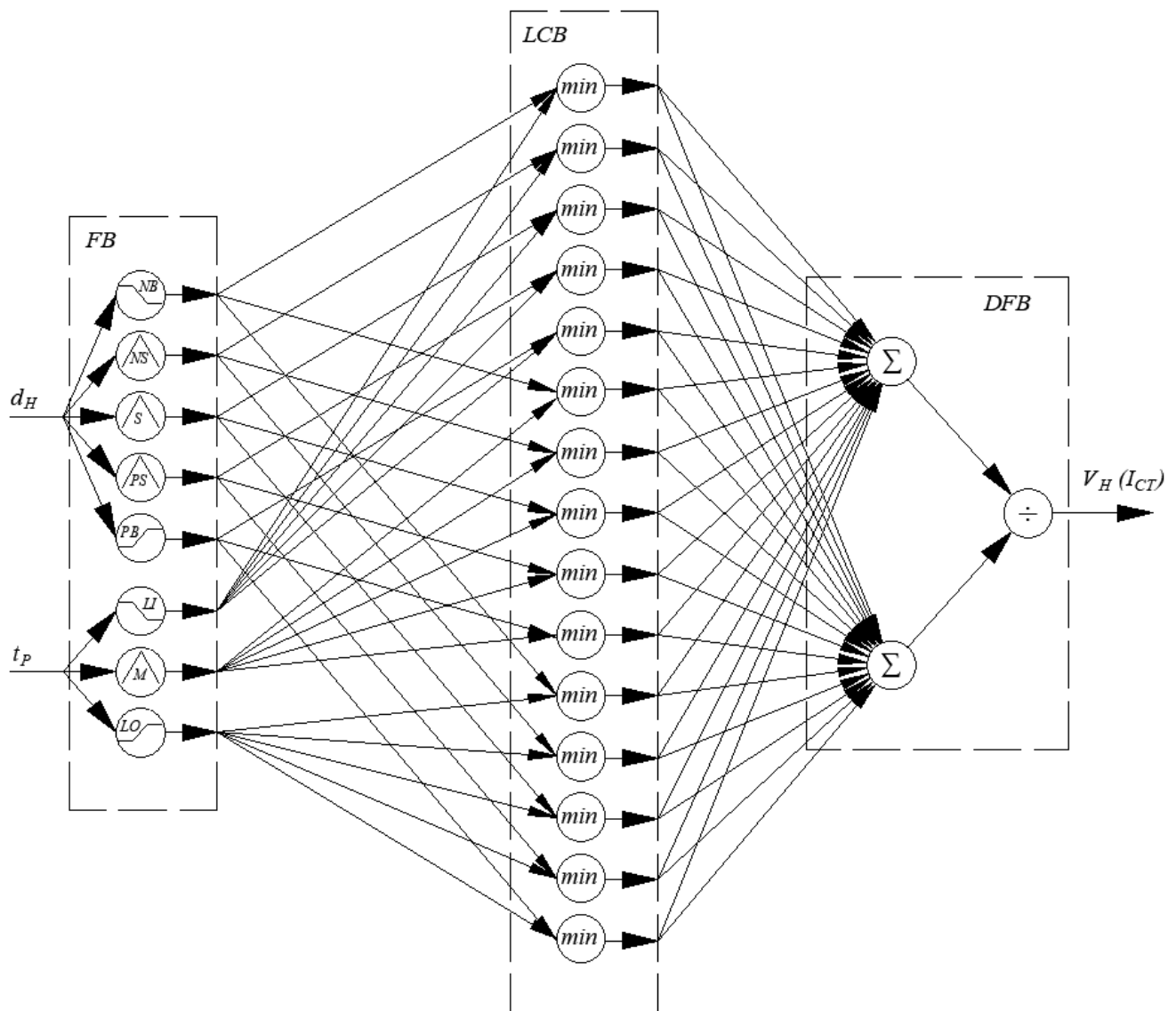


Рис. 3.19 Нейро-нечіткий контролер по алгоритму Такагі-Сугено.

ANFIS мережа для вихідної змінної *Speed (Current)*.

Навчання таких контролерів зводиться до підбору вагових коефіцієнтів нейронних мереж [71, 72]. Зміна вагових коефіцієнтів в шарах дефазифікації призводить до зміни функцій належності вихідних змінних. Зміна вагових коефіцієнтів в шарах фазифікації рівнозначна масштабуванню функцій належності вхідних змінних. Існує кілька варіантів навчання, але у даному випадку використаний алгоритм навчання з вчителем.

В якості навчальної вибірки використані експериментальні дані таблиць 3.1 – 3.2, отримані для установки БСТВ, що відображають взаємозв'язок технологічних параметрів з показниками якості первинної нитки. Якісно алгоритм прийняття рішення показаний в таблицях правил (таб. 3.5 – 3.6). Підбір вагових коефіцієнтів, які визначають остаточний вид поверхонь керування, проводився за допомогою програми Fuzzy Logic ANFIS editor пакета MATLAB, що показано на рис. 3.20 – 3.21.

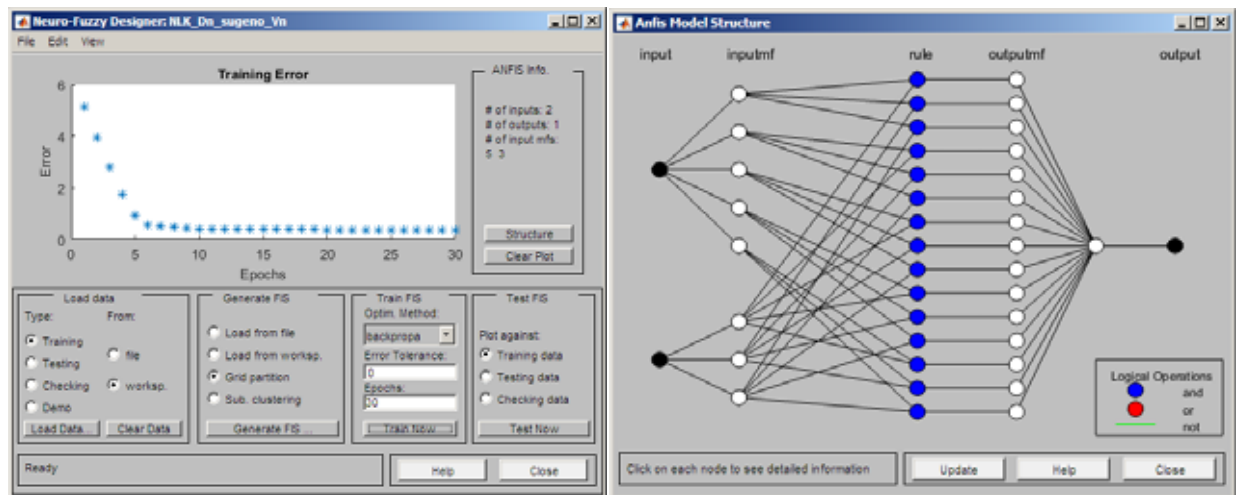


Рис. 3.20 Навчання нейро-нечіткого контролера для вихідної змінної *Speed* за допомогою Fuzzy Logic ANFIS editor

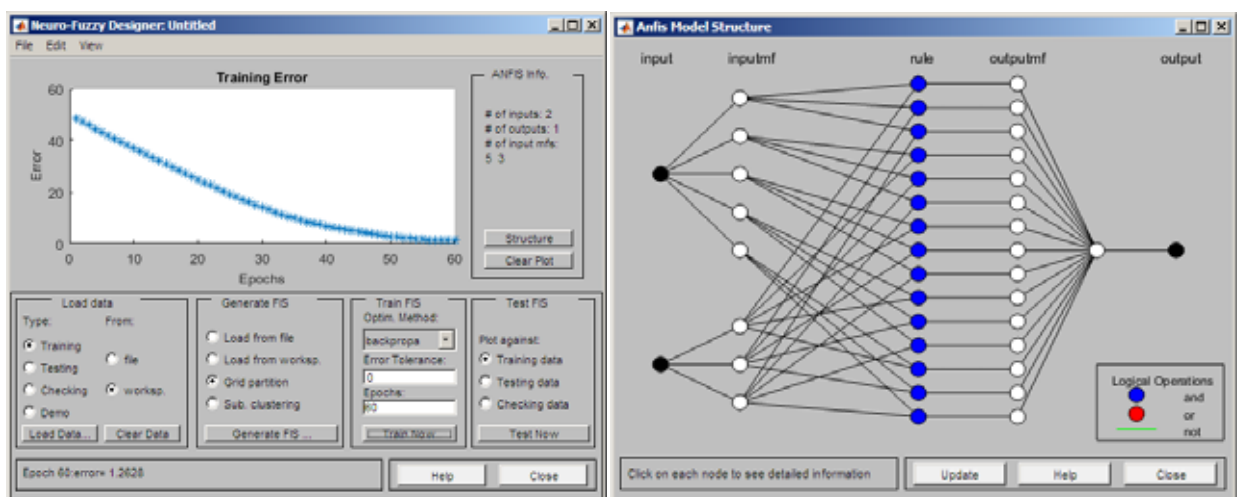


Рис. 3.21 Навчання нейро-нечіткого контролера для вихідної змінної *Current* за допомогою Fuzzy Logic ANFIS editor

В результаті моделювання отримано нейро-нечіткий контролер, оптимальні поверхні керування якого показані на рис. 3.22 – 3.23.

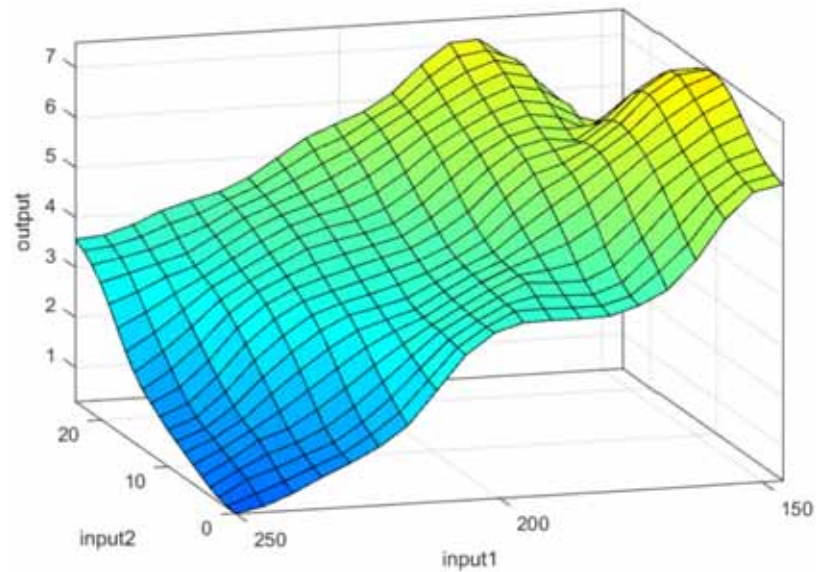


Рис. 3.22 Оптимальна поверхня керування нейро-нечіткого контролера для вихідної змінної *Speed*.

input1 – завдання d_H , *input2* – завдання t_P , *output* – вихід *Speed*

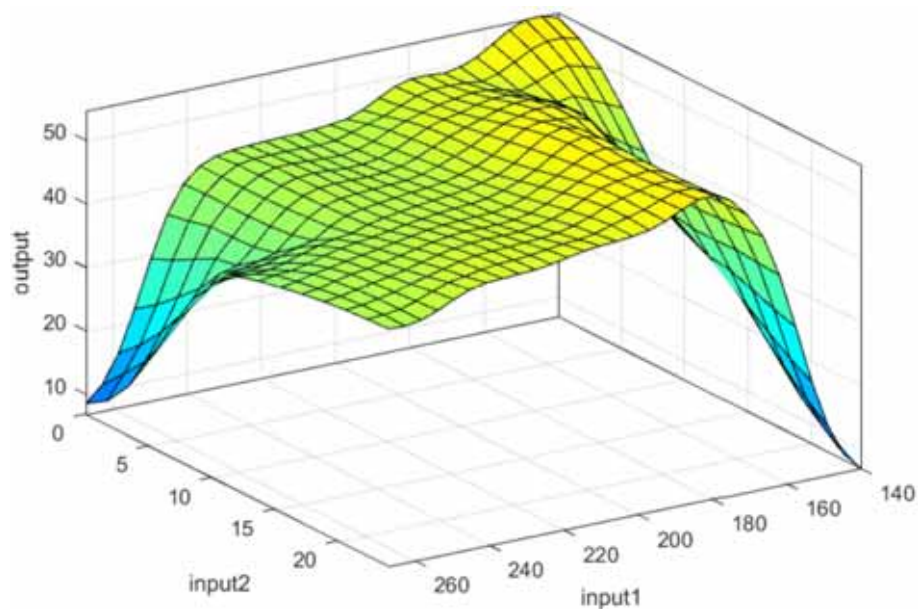


Рис. 3.23 Оптимальна поверхня керування нейро-нечіткого контролера для вихідної змінної *Current*.

input1 – завдання d_H , *input2* – завдання t_P , *output* – вихід *Current*.

Значення вагових коефіцієнтів, які отримані в результаті навчання, в подальшому будуть закладені в коді програми, при побудові нейро – нечіткого логічного контролера на базі мікропроцесорних систем керування технологічним процесом отримання неперервного базальтового волокна.

Модель нейро-нечіткого логічного контролера (рис. 3.24) в пакеті Matlab побудовано аналогічно рис. 3.15, а отримані результати моделювання зведені в таблиці 3.8.

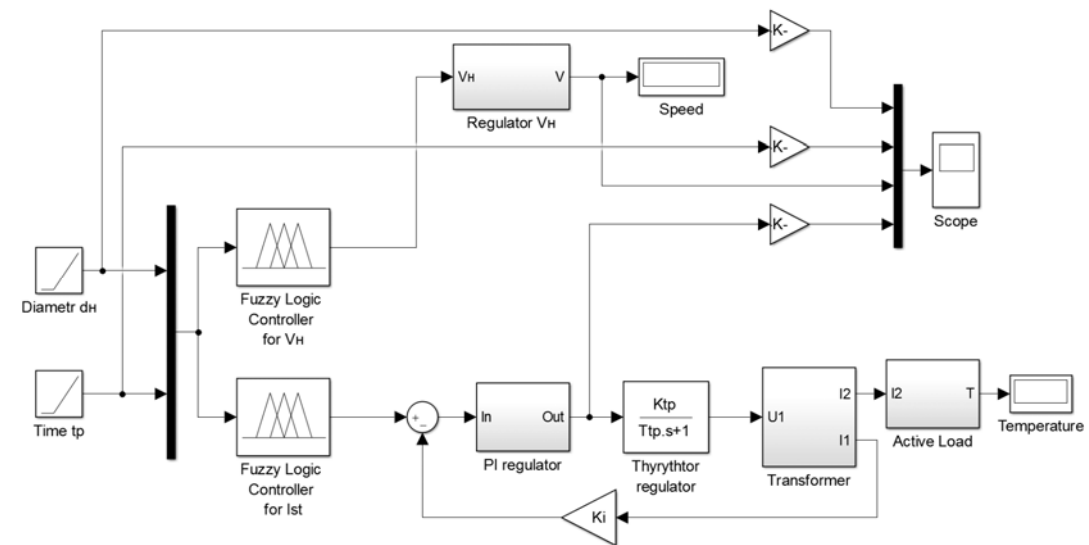


Рис. 3. 24 Блок-схема системи ТРТ- СТ з нейро-нечітким логічним контролером в середовищі MATLAB

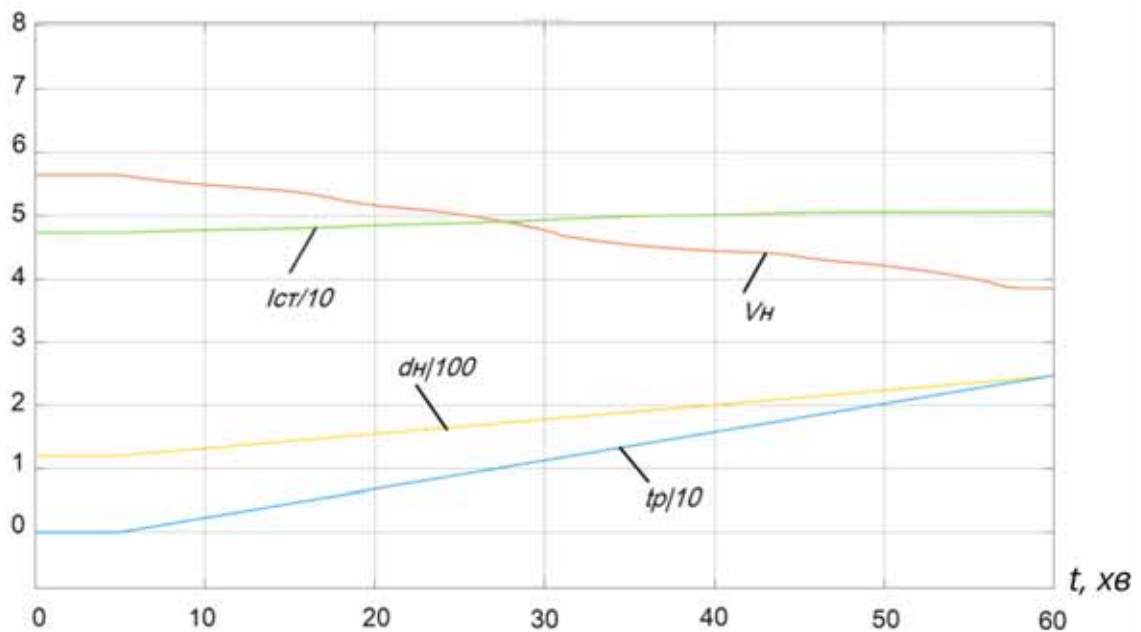


Рис. 3.25 Залежності технологічних параметрів системи з нейро-нечітким логічним контролером.

**Результати дослідження системи ТРТ-СТ з нейро-нечітким
контролером діаметра первинної нитки**

$V_H, \text{ м/хв.}$						
$t_P, \text{ діб}$	$d_H, \text{ мкм}$					
	120	144	168	192	216	240
0	6	6,24	4,26	3,8	2	0,6
6	5,9	7	5,4	4,2	2,8	1,2
12	4,5	7,4	6,1	4,5	3,6	1,9
18	4,1	5	6,4	5,5	4,3	3
24	4	2,2	6,7	5,9	4,6	3,7
$I_{CT}, \text{ А}$						
$t_P, \text{ діб}$	$d_H, \text{ мкм}$					
	120	144	168	192	216	240
0	44,75	54,7	49,11	45,9	44	40,4
6	36,1	43,5	50,7	48,4	44,6	40,5
12	23,9	31,7	50,2	49,6	46	43,4
18	12,3	21	47,7	52	47,7	46,2
24	4,4	9,4	48,5	52,4	50	48,4

Отриманий в результаті моделювання подвійний нейро-нечіткий контролер діаметра первинної нитки, що піддається навчанню, характеризуються відсутністю перерегулювання, а його помилка не перевищує 5% (порівнюючи таблицю 3.8 з таблицями 3.1 – 3.2) в порівнянні розглянутим раніше варіантом реалізації НЛК. Таким чином, робимо висновок про доцільність використання гібридних нейронних мережі для побудови і навчання контролера діаметра первинної нитки при виробництві БСТВ, а отримані правила та фаззі-множини можна в подальшому застосовувати при програмній реалізації таких інтелектуальних систем керування технологічним процесом, усунувши тим самим можливі помилки людини-експерта.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Визначено, що класичні методи керування з детермінованими зворотними зв'язками не ефективні для установки з виробництва БСТВ, бо технологічні параметри складним чином пов'язані між собою. За неможливості точного математичного опису процесу, врахування розкиду параметрів установки, варіації зовнішніх факторів і широкого діапазону зміни опору фільтрної пластини найбільш прийнятним методом побудови високоефективної системи керування є використання апарату нечіткої логіки.

2. Розроблено метод керування установкою з виробництва БСТВ, при якому в залежності від заданих технологічних параметрів (діаметр первинної нитки та час безперервної роботи установки) з використанням синтезованого нечіткого логічного контролера (НЛК) формуються величини сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і струму стабілізації первинної обмотки спеціального трансформатора системи ТРС-СТ.

3. Розроблено імітаційну модель системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки. Проведено розрахунки та дослідження системи за моделю та зроблено порівняльний аналіз розрахункових і отриманих експериментальним шляхом даних за критерієм якості керування (стабільність формування діаметра первинної нитки). Відхилення даних знаходяться в межах 15%. Це пояснюється неточністю математичного опису об'єкта керування та недостатньою коректністю бази правил НЛК, що певною мірою може впливати на діаметр отриманого первинного волокна.

4. Розвинуто метод керування установкою з виробництва БСТВ, при якому в залежності від заданих технологічних параметрів (діаметр первинної нитки та час безперервної роботи установки) з використанням синтезованого нейро-нечіткого логічного контролера НЛК формуються величини сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і струму стабілізації первинної обмотки спеціального трансформатора системи ТРС-СТ, який

дозволив усунути недоліки методу за п. 2 (суперечливість правил і відхилення фаззи множин від еталонної моделі).

6. Розроблено імітаційну модель системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ з НЛК діаметра первинної нитки зі застосуванням гібридної мережі ANFIS моделей, розташованих в паралельній комбінації, які утворюють адаптивну систему нейро-нечіткого виводу з декількома виходами. Порівняльний аналіз розрахункових і отриманих експериментальним шляхом даних показав відсутність перерегулювання, а відхилення даних не перевищують 5%.

Посилання: [54], [55], [56], [57], [58, 59], [60, 61], [59, 62], [63], [63, 64], [65], [66, 67], [68], [69], [70], [71, 72], див. список використаних джерел стор. 157-166.

РОЗДІЛ 4

ПІДВИЩЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ ТИРИСТОРНИЙ РЕГУЛЯТОР СТРУМУ - СПЕЦІАЛЬНИЙ ТРАНСФОРМАТОР УСТАНОВКИ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ

4.1 Дослідження і аналіз впливу на мережу живлення системи ТРС – СТ в технології отримання БСТВ

Однією з головних завдань енергозбереження в електроенергетиці України є заходи, спрямовані на скорочення втрат в електричних мережах, підвищення якості електричної енергії та ефективності її використання.

Широке впровадження сучасних електротехнічних установок (ЕТУ) в промисловість, тобто застосування нових високоефективних технологічних процесів, неможливе без створення спеціалізованих джерел живлення.

Пристрій електроживлення технологічної установки насамперед має узгоджувати параметри промислової мережі (фазність, рівень напруги, можливість енергообміну) і електричні параметри технологічної установки (вид струму, рівень напруги, специфічні вимоги технології: вихідні характеристики, форма струму, динаміка джерела). Специфіка навантаження установок, необхідність глибокого регулювання струму та інших особливостей визначають підвищені вимоги до енергетичних і динамічних характеристик джерел живлення.

Використання тиристорних регуляторів з фазоімпульсним керуванням призводить до появи в спектрі струмів і напруг вищих гармонійних складових, що ставить питання про електромагнітну сумісність ЕТУ з іншими приймачами електричної енергії, які отримують електроживлення від розподільчої мережі підприємства. Для зменшення негативного впливу тиристорних регуляторів, фільтрації вищих гармонійних складових і компенсації реактивної потужності доводиться використовувати дорогі і складні в налаштуванні фільтро-компенсуючі пристрої (ФКУ), в тому числі активні фільтри.

При фазо-імпульсному регулюванні струму в залежності від змін кута регулювання в мережі генеруються вищі гармоніки. Найбільш характерними вищими гармоніками є 3, 5, 7, 11, 13-а, інші гармоніки невеликі (менше 0,5%). Рівні вищих гармонік можуть бути визначені виразом [22, 73]:

$$I_v = \frac{0,7 \cdot S_{CT}}{\sqrt{3} U_s \cdot v}, \text{ при } v = 3, 5, 7, 11, 13 \quad (4.1)$$

де S_{CT} – потужність спеціального трансформатора, U_s – номінальна напруга мережі.

Вищі гармоніки струму напівпровідникових пристроїв зростають при глибокому регулюванні струму, що призводить до значного спотворення синусоїди споживаного струму, доводячи значення сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень цього струму (total harmonic distortion; THD_I) до значень більше 100% і знижуючи при цьому коефіцієнт потужності на вході (Power Factor; PF) до 0.5 – 0.6. Значення коефіцієнта потужності визначається відношенням активної і повної потужності, а THD_I визначається відношенням середньоквадратичного значення струму гармонік до середньоквадратичного значення струму основної частоти:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}. \quad (4.2)$$

Вищі гармоніки обумовлюють додаткові втрати потужності в електричних машинах, трансформаторах і мережах. Збільшення коефіцієнта гармонік по напрузі (THD_V), що обов'язково виникає при збільшенні THD_i , істотно змінює режим роботи конденсаторних батарей, які застосовуються для компенсації реактивної потужності в системах електропостачання. При включенні їх на несинусоїдальну напругу відбувається зміна лінійного характеру частотної характеристики мережі і виникнення на частотах вищих гармонік резонансних явищ, іноді настільки значних, що викликають аварійне перевантаження конденсаторів [73, 74].

Вищі гармоніки напруги і струму негативно впливають також на роботу систем імпульсно-фазового керування тиристорами, систем релейного захисту і систем автоматики електроустановок та мереж.

Питання негативного впливу вищих гармонік на мережу живлення більш детально вивчені в українських та зарубіжних роботах таких як [73-79] регулярно обговорюються на численних конференціях і сприяли прийняттю в ряді розвинених держав відповідних стандартів, що забороняють або обмежують введення в дію та експлуатацію електрообладнання, що генерує гармоніки, які перевищують допустимі норми. В умовах євроінтеграції України якість і надійність енергопостачання споживачів багато в чому визначається їх нормативно-правовим забезпеченням з урахуванням існуючих міжнародних зобов'язань України і вимог європейського енергетичного законодавства. Ця проблематика досить повно викладена в роботі [80-82], присвяченій нормативно-правовому регулюванню якості електричної енергії та аналізу українських і європейських законодавчих актів і нормативно-технічних документів.

Так, в нашій країні був опублікований національний стандарт ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009 [83], який є повним аналогом європейського стандарту ІЕС 61000-3-12, і встановлює норми емісії гармонік струму, що створюється обладнанням з номінальним вхідним струмом більш 16 А и до 75 А включно на фазу, що підключається до низьковольтних електропостачальних систем загального призначення змінного струму наступних типів: з номінальною напругою до 240 В, однофазне, дво- або трипровідні; з номінальною напругою до 690 В, трифазне, трьох- або чотирьохпровідну; номінальна частота 50 Гц або 60 Гц.

Варто звернути увагу на важливу особливість цього стандарту, згідно з якою допустимий рівень гармонік струму для потужного електрообладнання визначається не тільки параметрами мережі S_{SC} , але і величиною повної потужності обладнання, підключеного до неї S_{EQU} , тобто від «відносного короткого замикання» R_{SCE} , яке визначається наступними формулами: для

однофазного обладнання – $R_{SCE} = S_{SC}/3 \cdot S_{EQU}$, а для трьохфазного – $R_{SCE} = S_{SC}/S_{EQU}$. У цих формулах S_{SC} – потужність короткого замикання мережі, яка пов'язана з повним опором короткого замикання на основній частоті співвідношенням $S_{SC} = U^2/Z_{SC}$, де U – лінійна напруга.

Мінімальне значення R_{SCE} устаткування прийнято рівним значенню 33. Якщо рівень гармонік струму, створювані обладнанням, відповідають найжорсткішим нормам, наведеним у стандарті для випадку $R_{SCE} = 33$ то таке обладнання допускається підключати в будь-якій точці мережі низької напруги. Устаткування з більш високими значеннями гармонік споживаного струму допускається підключати до мережі з деякими вищими значеннями SSC. Виробник устаткування повинен вказувати в документації мінімальне значення SSC. мережі, в якій допускається його експлуатація. Якщо рівні гармонік струму обладнання перевищують норми, наведені в стандарті для мереж з найбільшим значенням R_{SCE} , то таке обладнання заборонено продавати і експлуатувати в станах Євросоюзу.

Варто відзначити важливе нововведення в даному стандарті, яке дозволяє визначати рівень гармонік струму обладнання не тільки методом "прямого" вимірювання, але і шляхом комп'ютерного моделювання режимів роботи обладнання.

Для визначення допустимих значень рівнів гармонік електрообладнання в стандарті наведені норми для трьох типів навантаження:

- норми рівнів гармонік струму для обладнання, яке не є симетричним трифазним;
- норми рівнів гармонік струму для симетричного трифазного обладнання;
- норми рівнів гармонік струму для симетричного трифазного обладнання, що відповідає певним умовам.

Однофазні зустрічно-паралельні тиристорні схеми належать до першої групи. У таблиці 4.1 наведені відповідні норми допустимих рівнів гармонік струму даної групи.

Таблиця 4.1

Мінімальне значення R_{SCE}	Допустима сила струму окремих гармонік $I_n/I_1^{(a)}, \%$						Допустимий коефіцієнт сили струму гармонік, %	
	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}	THD_i	$PWHD_i$
33	21.6	10.7	7.2	3.8	3.1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	5	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
≥ 350	41	24	15	12	10	8	47	47

Відносні значення парних гармонік до 12-го порядку включно не повинні перевищувати $16/n \%$. Парні гармоніки понад 12-го порядку застосовують для обчислення THD_i і $PWHD_i$ так само, як і для гармонік вищих порядків.

Примітка. Дозволено лінійну інтерполяцію між послідовним значенням R_{SCE} .

а) I_1 - сила струму опорного сигналу основної частоти, I_n - сила струму відповідної гармоніки.

Варто звернути увагу на те, що в стандарті ДСТУ ІЕС 61000-3-12: 2009 значення сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень THD_i та частково зваженого коефіцієнта гармонійних спотворень $PWHD_i$ (partial weighted harmonic distortion) визначаються в такий спосіб:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}, \quad PWHD_i = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}. \quad (4.3)$$

В даний час готуються стандарти, що посилюють ці норми, зокрема, стандарти Великобританії припускають збільшення числа врахованих гармонік струму аж до 100-ї.

З наведеного вище випливає, що завдання забезпечення електромагнітної сумісності необхідно вирішувати комплексно, з огляду на властивості самої системи електропостачання та особливості електротехнологічних установок, на підставі їх аналізу виробити ті чи інші заходи та рекомендації щодо поліпшення електромагнітної сумісності.

4.1.1 Промислові дослідження впливу роботи системи ТРС-СТ на мережу живлення

Промислові дослідження впливу роботи системи ТРС-СТ (рис 4.1) на мережу живлення проводилися за допомогою аналізатора параметрів електромережі С.А 8335 QUALISTAR PLUS фірми CHAUVIN ARNOUX.

На рис. 4.2 наведено криві фазного струму і їх спектральні характеристики, значення сумарних коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривих фазних струмів THD_I .

Виміри проводилися безпосередньо під час початку робочого циклу установки БСТВ в заводських умовах на ТОВ «Черновецький завод теплоізоляційних матеріалів».

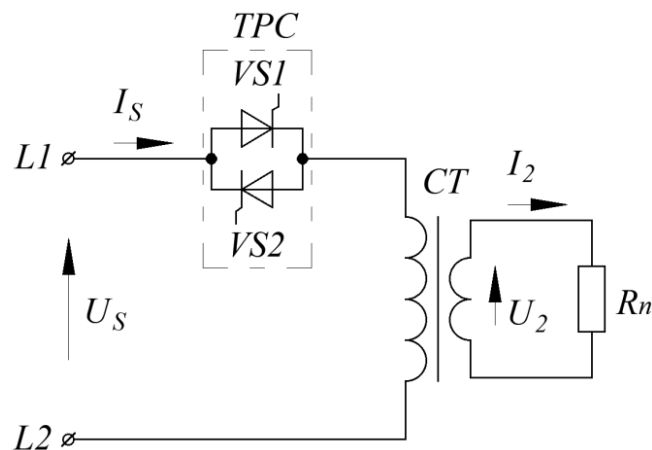


Рис. 4.1 Система ТРС – СТ

Криві наведено для величин вхідного струму спеціального трансформатора в діапазоні малих навантажень $I_S = A1=15$ А (рис. 4.1), тобто при глибокому регулюванні струму, та номінальних навантаженнях $I_S = 45...53$ А (рис. 4.2), тобто при неглибокому його регулювання в режимі виходу жаростійкої пластини на тепловий режим.

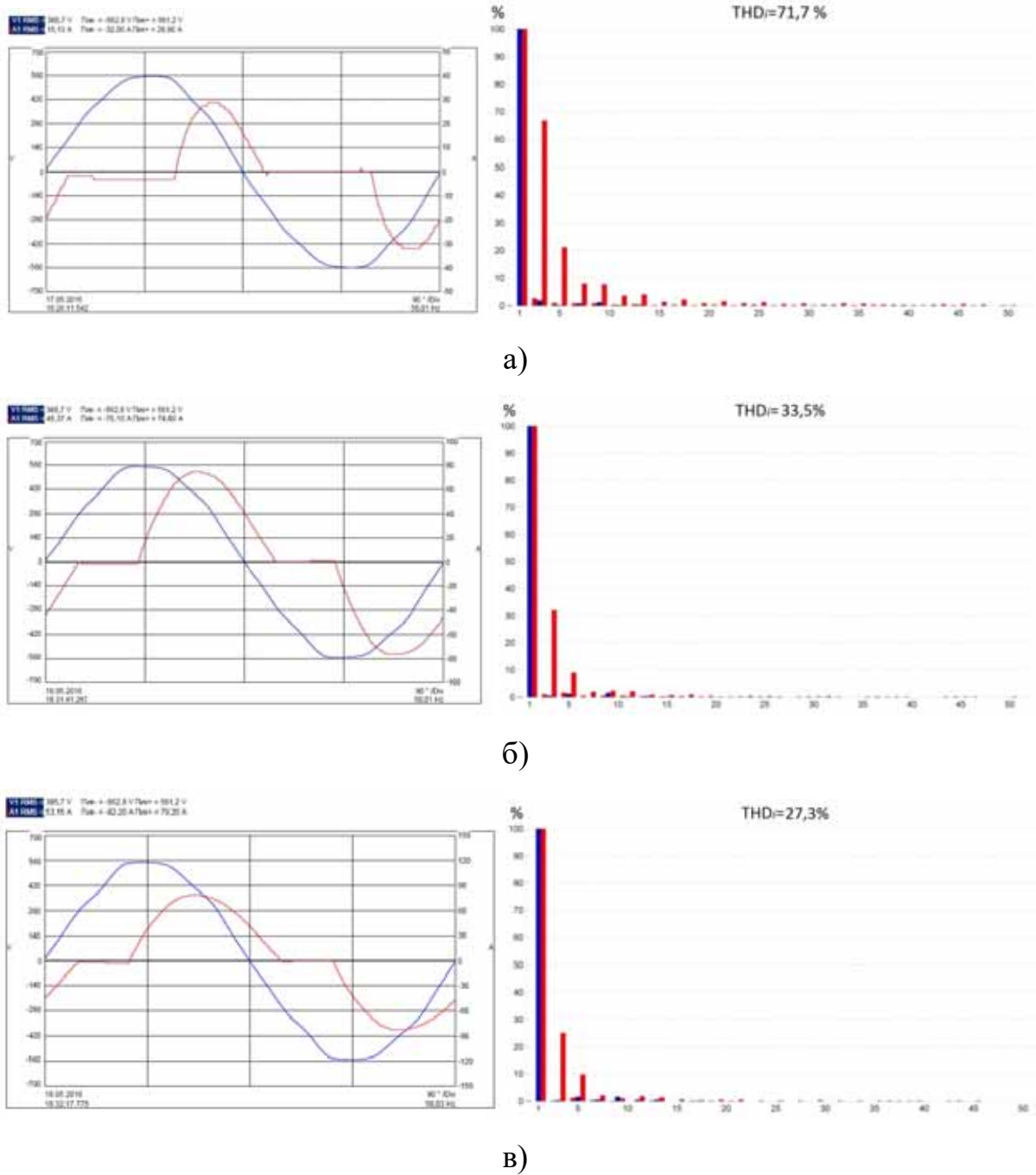


Рис. 4.2 Криві фазного струму і спектральні характеристики системи ТРС – СТ (промислові дослідження)

а – 15 А, б – 45 А, в – 53А

Із наведених вище діаграм виходить, що такі системи регулювання струму вносять в мережу окрім реактивної потужності на основній гармоніці, ще й високочастотні гармоніки, особливо при глибокому регулюванні струму (рис. 4.2 а). Тому необхідність дослідження цієї системи на предмет

зменшення спотворень синусоїдальної форми струму, що споживається із двохфазної або трифазної промислової мережі, є очевидною.

4.1.2 Дослідження впливу роботи системи ТРС – СТ на мережу живлення за допомогою комп'ютерного моделювання

Дослідження впливу роботи системи ТРС – СТ на мережу живлення проводилися за допомогою програми MATLAB з пакетом розширення SIMULINK.

На рис. 4.3 наведено схему системи " мережа живлення - регулятор змінного струму - спеціальний трансформатор" для проведення комп'ютерного моделювання режимів роботи. На рис. 4.3 позначено: U_{L1} , U_{L2} - система напруг живлення; $L_{L1} = L_{L2} = 0.1$ мГн - внутрішні індуктивності мережі живлення; U_s , I_s - значення споживаних напруги і струму системи ТРС-СТ; тиристорні ключі змінного струму $VS1$, $VS2$, спеціальний трансформатор СТ, R_n - активний нелінійний опір пластини, який характеризує навантаження СТ. Моделі побудовані в середовищі MATLAB SIMULINK [84] з використанням бібліотек «SIM POWER SYSTEM».

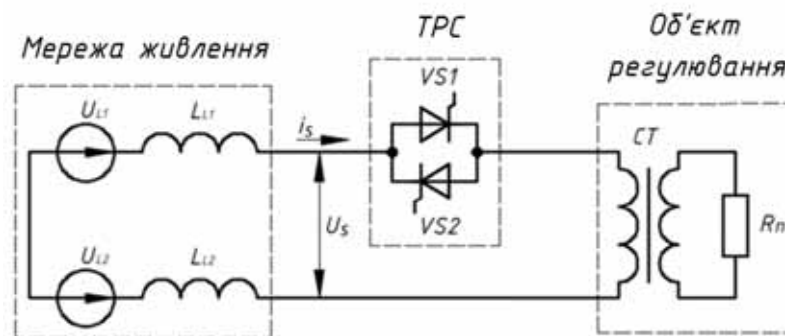


Рис.4.3 Схема для комп'ютерного моделювання режимів роботи системи ТРС-СТ

При моделюванні враховувались нелінійність характеристик матеріалу магнітопроводу СТ і нелінійність опору навантаження R_n , при цьому використовувалась модель СТ, розглянута в розділі 2.

Синтез структурної схеми системи ТРС-СТ проводився за допомогою програми SIMULINK програмного пакету Matlab.

Інтеграція математичних SIMULINK-моделей в сімейство блоків POWER SYSTEM BLOCKSET виконувалась за допомогою керованих джерел струму.

Структурну схему системи ТРС-СТ наведено на рис. 4.4, вона складається з підсистеми Special Transformer (рис. 4.5) і адаптера, що дозволяє спільне моделювання з блоками POWER SYSTEM BLOCKSET. Адаптер зібрано з регульованого джерела струму, вихід якого зашунтовано резистором $R_{sh} = 1000$ Ом, і датчика напруги [85].

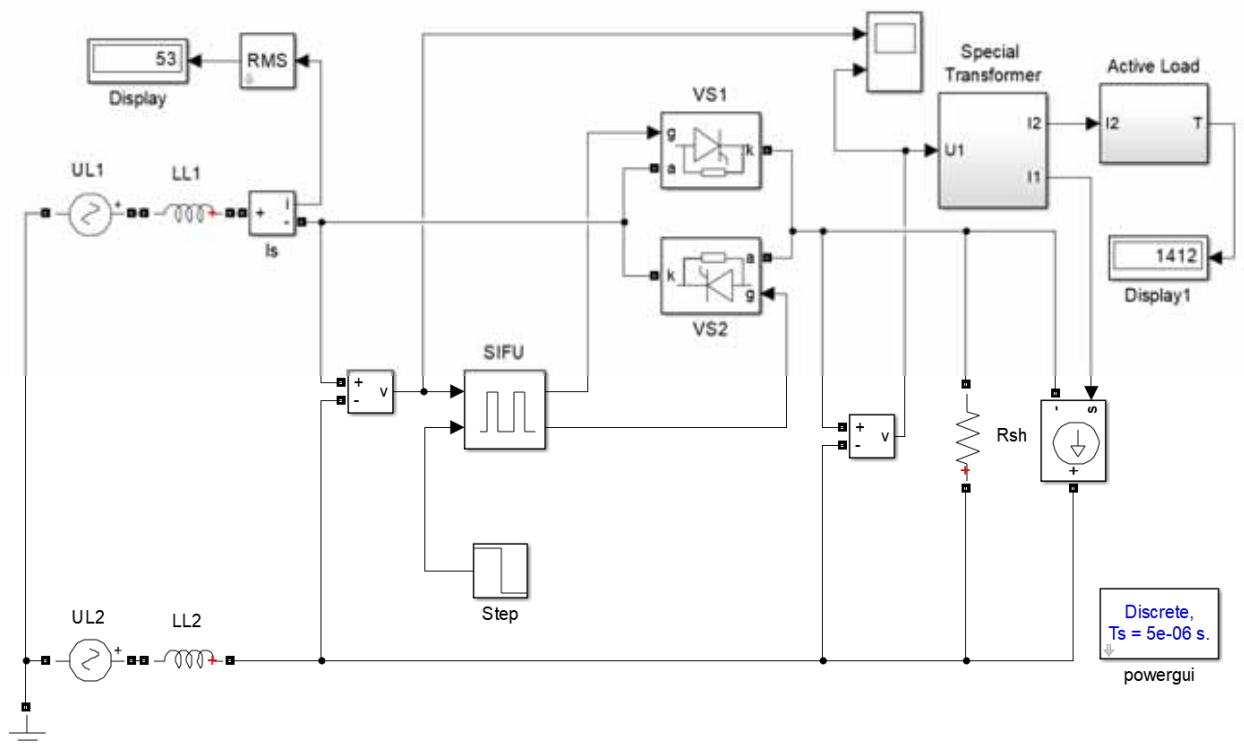


Рис. 4.4 Структурна схема системи ТРС-СТ в SIMULINK

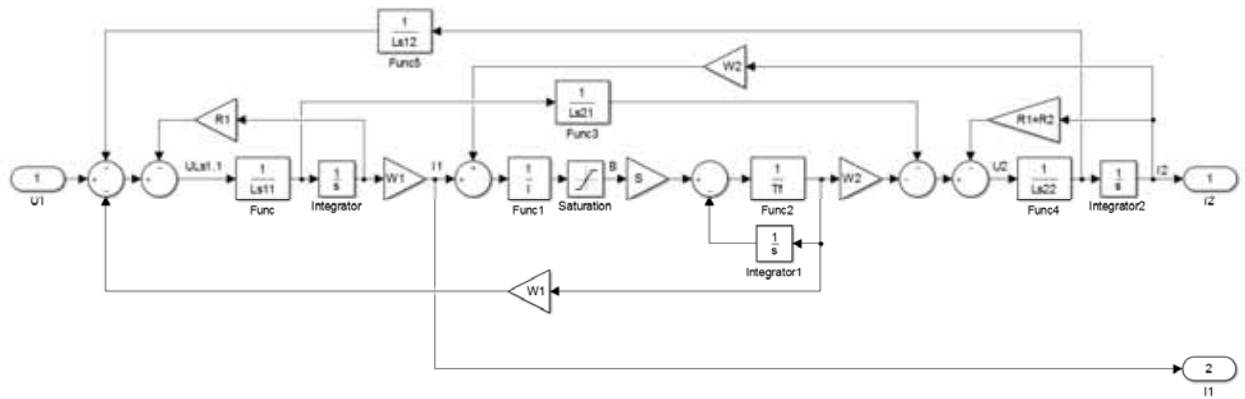


Рис. 4.5 Структурна схема підсистеми *Special Transformer* в *SIMULINK*

В якості ТРС виступають тиристори VS1, VS2, з фазовим керуванням від блоку SIFU, включені зустрічно-паралельно (рис. 4.6).

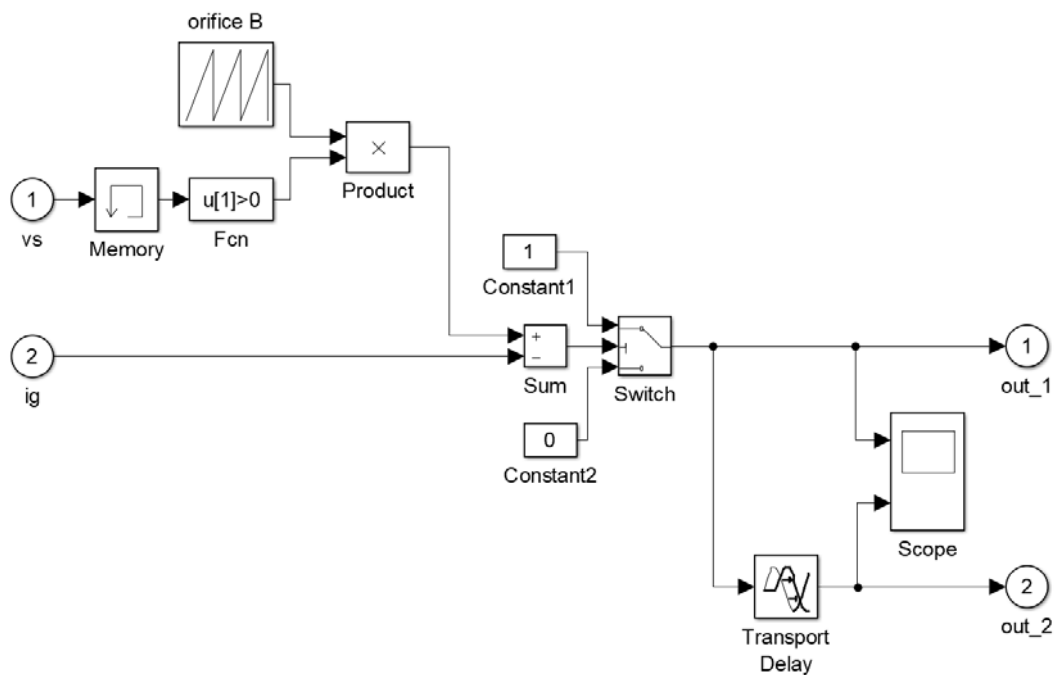
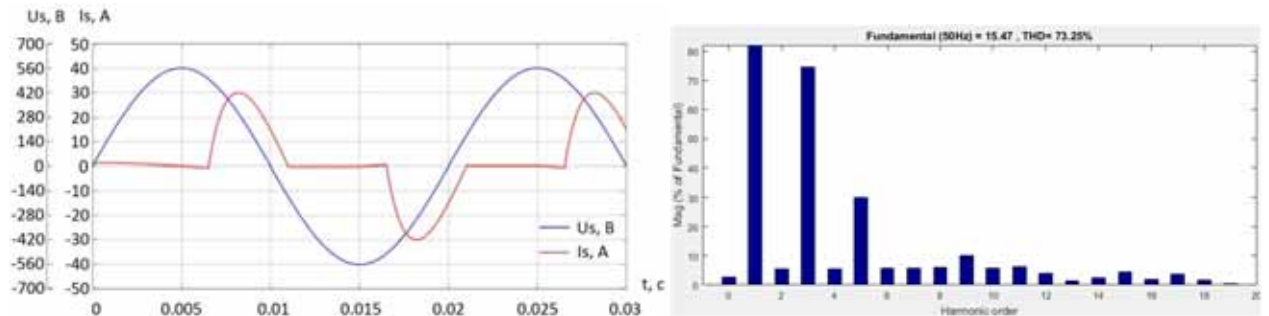


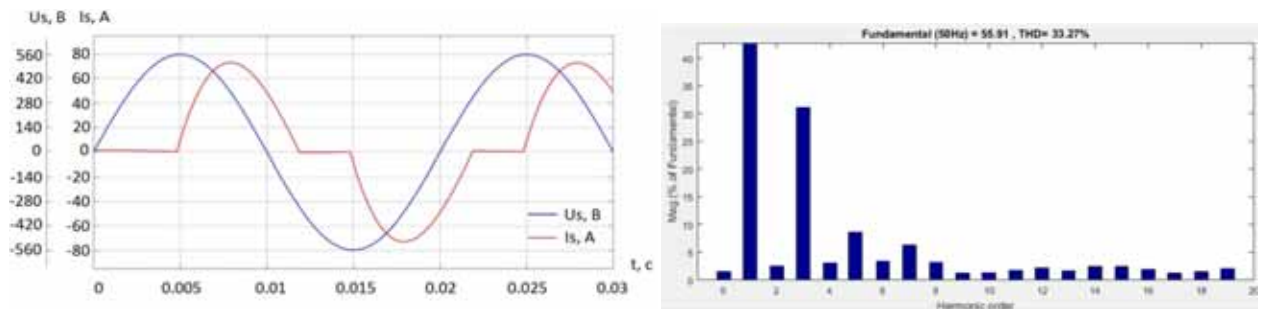
Рис. 4.6 Структурна схема блока SIFU в *SIMULINK*

На рис. 4.7 наведено результати моделювання, показано криві струмів на вході регулятора і їх спектральні характеристики для трьох величин струму

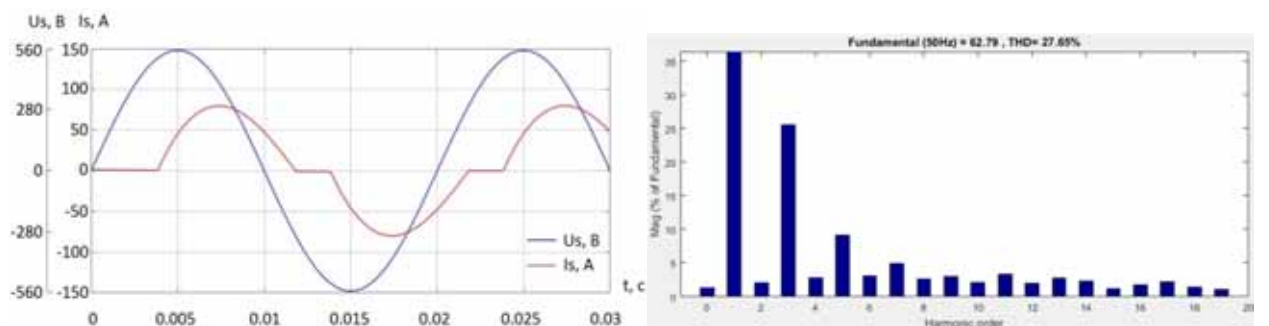
($I_l = 15$ A, $I_l = 45$ A, $I_l = 53$ A), а також наведено значення сумарних коефіцієнтів гармонік струмів живлення.



а)



б)



в)

Рис.4.7 Криві фазного струму і спектральні характеристики системи

ТРС-СТ (моделювання)

а – 15 A, б – 45 A, в – 53A

4.1.3 Аналіз впливу системи ТРТ - СТ на мережу живлення

Проведені промислові дослідження роботи системи тиристорний регулятор струму - спеціальний трансформатор підтверджують її суттєвий негативний вплив на мережу живлення, генеруючи в мережу потужні гармоніки струму порядку $6(k+1) \pm 1$ (де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$), в основному 3-ю і 5-ю, спотворюючи форму синусоїди струму споживання і доводячи коефіцієнт гармонік цього струму до 73% в діапазоні малих його значень і до 27% - 33% в діапазоні великих значень (рис. 4.2).

Комп'ютерне моделювання показало (рис. 4.7) практично аналогічні результати для струмів від 15 до 53 А. Незначні відмінності пояснюються лише неможливістю при моделюванні використання точних значень параметрів обмоток трансформатора і параметрів нелінійності активного навантаження (фільтери).

На разі застосовуються три основних способи придушення гармонік струму і корекції таким чином форми споживаного струму: активна, пасивна та гібридна фільтрація. Нижче ці способи розглядаються з точки зору ефективності їх застосування в системах ТРТ-СТ.

4.2 Активний коректор форми вхідного струму системи ТРТ – СТ

Дослідження і розробки нових схем пасивної, активної і гібридної фільтрації присвячені численні роботи [73, 75, 76, 86]. Кожна з цих розробок орієнтована на певний вид навантажень, діапазон потужностей, задану ступінь придушення вищих гармонік і т.д.

Пасивні фільтри відносно прості і надійні, налаштовуються на ряд гармонік, прилеглих до основної, обладнання для них може бути виконано на великі потужності, але при цьому вони громіздкі і їх ефективність обмежена, особливо при зміні вхідного струму споживача, коли є небезпека виникнення резонансних явищ [87]. Активні ж методи, більш точні і керовані, відносно дорогі і складні, обмежені за потужністю.

У цій роботі у значній мірі ми орієнтувалися на методологію активної фільтрації, розроблену в Інституті електродинаміки НАН України [88]. До того ж, якщо в експлуатації знаходиться багато обладнання, заміна або реконструкція якого недоцільна, а експлуатація призводить до порушення стандартів з енергоспоживання, то в цьому випадку більш виправдано застосування додаткових пристроїв паралельного підключення – активних коректорів форми вхідного струму (АКФС).

Принцип дії коректора полягає у формуванні струму коректора I_C , при якому сума струму I_C і струму навантаження I_L є струм I_S синусоїдальної форми, що співпадає по фазі з напругою мережі U_S (рис. 4.8), тим самим нівелюється кут зсуву фаз між напругою мережі і струмом навантаження, який в такому разі не містить вищих гармонік.

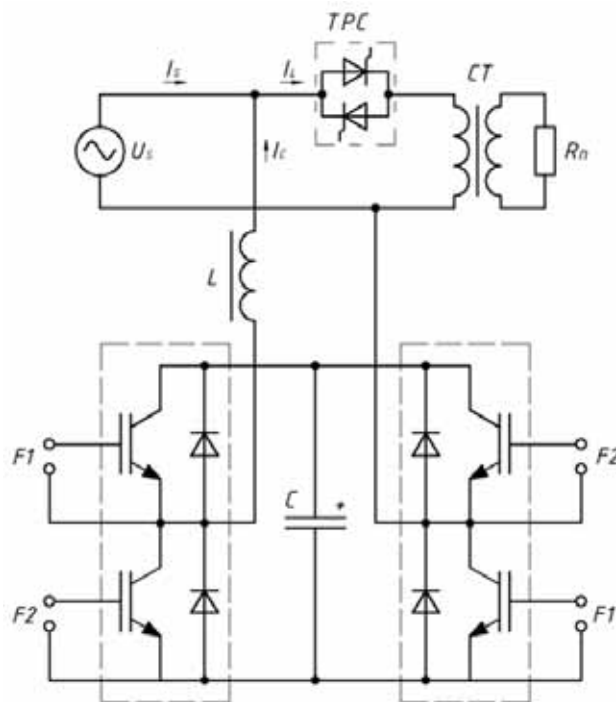


Рис. 4.8 Схема підключення паралельного активного коректора форми струму

Оскільки струм навантаження періодичний, то в ньому відсутні парні гармоніки, тому ряд Фур'є для нього набуває вигляду [88]:

$$I_L(t) = b_1 \sin \omega t + a_1 \cos \omega t + \sum_{k=1}^{\infty} (b_{2k+1} \sin(2k+1)\omega t + a_{2k+1} \cos(2k+1)\omega t) \quad (4.4)$$

де ω – кругова частота напруги мережі.

Перший доданок ряду, якщо його помножити на напругу мережі U_S , визначає активну потужність (P), другий – реактивну потужність (Q), а третій – потужність спотворень (N). Повна потужність (S), що є добутком діючих значень струму і напруги, знаходиться через її складові, як

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + N^2} \quad (4.5)$$

Ефективність енергетичних процесів в електричних ланцюгах прийнято характеризувати коефіцієнтом потужності $Kp = P / S$. Очевидно, що максимальне значення коефіцієнта потужності $Kp = 1$ досягається при відсутності всіх неактивних складових струму мережі. Для цього активний коректор має формувати струм, що описується рядом:

$$I_C(t) = -a_1 \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} (b_{2k+1} \sin(2k+1)\omega t + a_{2k+1} \cos(2k+1)\omega t) \quad (4.6)$$

який, при додаванні зі струмом нелінійного споживача, забезпечує формування мережевого струму у вигляді:

$$I_S(t) = b_1 \sin \omega t \quad (4.7)$$

Ця операція виконується за допомогою періодичного підключення зарядженого конденсатора C в прямій і зворотній полярності, послідовно з індуктивністю L (рис. 4.8). Для формування струму необхідно, щоб напруга інвертора перевищувала амплітуду напруги мережі, в такому разі напруга на дроселі, в залежності від сигналу керування F , змінює полярність, що призводить до збільшення або зменшення струму коректора I_C .

Таку систему керування коректором форми струму представлено на рис. 4.9.

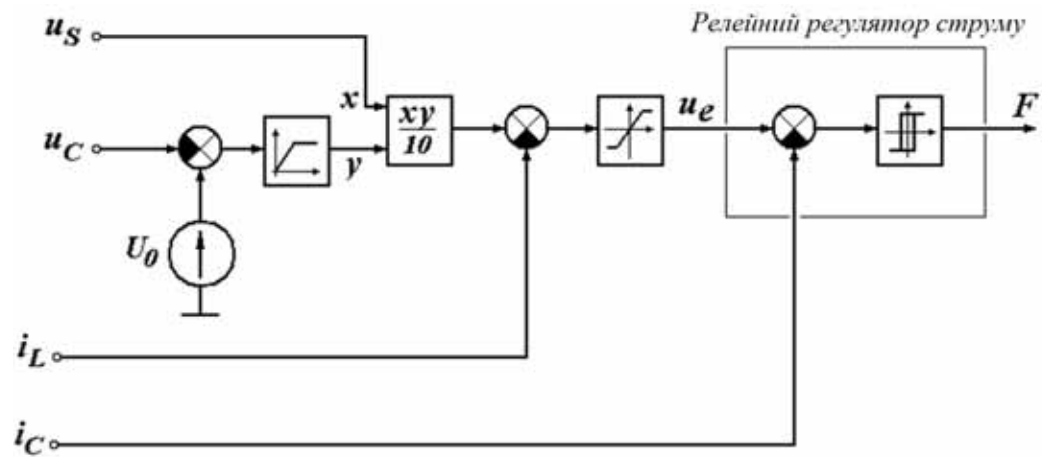


Рис. 4.9 Система керування коректором форми струму

Вихідними сигналами керування є: u_s – напруга, пропорційна миттєвому значенню напругі мережі; u_C – напруга, пропорційна миттєвому значенню напругі на конденсаторі інвертора; i_L – напруга, пропорційна миттєвому значенню струму навантаження; i_C – напруга, пропорційна миттєвому значенню струму коректора.

У наведеній схемі значення еталонного сигналу релейного регулятора $u_E(t)$ формується відповідно до виразу:

$$u_E(t) = \left[k \cdot u_C(t) \cdot (U_{ном} - u_i(t)) \right] - n \cdot i_L(t) \quad (4.8)$$

де n , k – масштабні коефіцієнти.

Припустимо, що значення сигналу u_s перевищує максимальне значення b_l . В такому випадку коректор струму формує струм мережі, у якого $b_{lBX} > b_l$ і активна потужність мережі перевищує активну потужність навантаження. Різниця цих потужностей викликає накопичення енергії в конденсаторі інвертора і відповідно, підвищення його напруги. При напрузі $ku_C > U_0$ знижується напруга на вході аналогового помножувача і, відповідно, активна потужність мережі. У разі рівного розподілу активних потужностей мережі та навантаження забезпечується баланс потужностей і напруга на конденсаторі інвертора залишається незмінною. У такому режимі еталонний сигнал u_E повторює форму струму навантаження, тільки його гармоніка b_l

дорівнює нулю [88]. Таким чином АКФС є адаптивним пристроєм, здатним змінювати свої характеристики при зміні параметрів мережі і навантаження.

Розрахунок коректора проводився на амплітудне значення струму 50А, що відповідає режиму розігріву фільери при роботі від двох фаз трифазної мережі напругою 380В. Номінальна напруга живлення мостового інвертора не залежить від напруги мережі і складає 750В. Схема силової частини коректора показана на рис. 4.10.

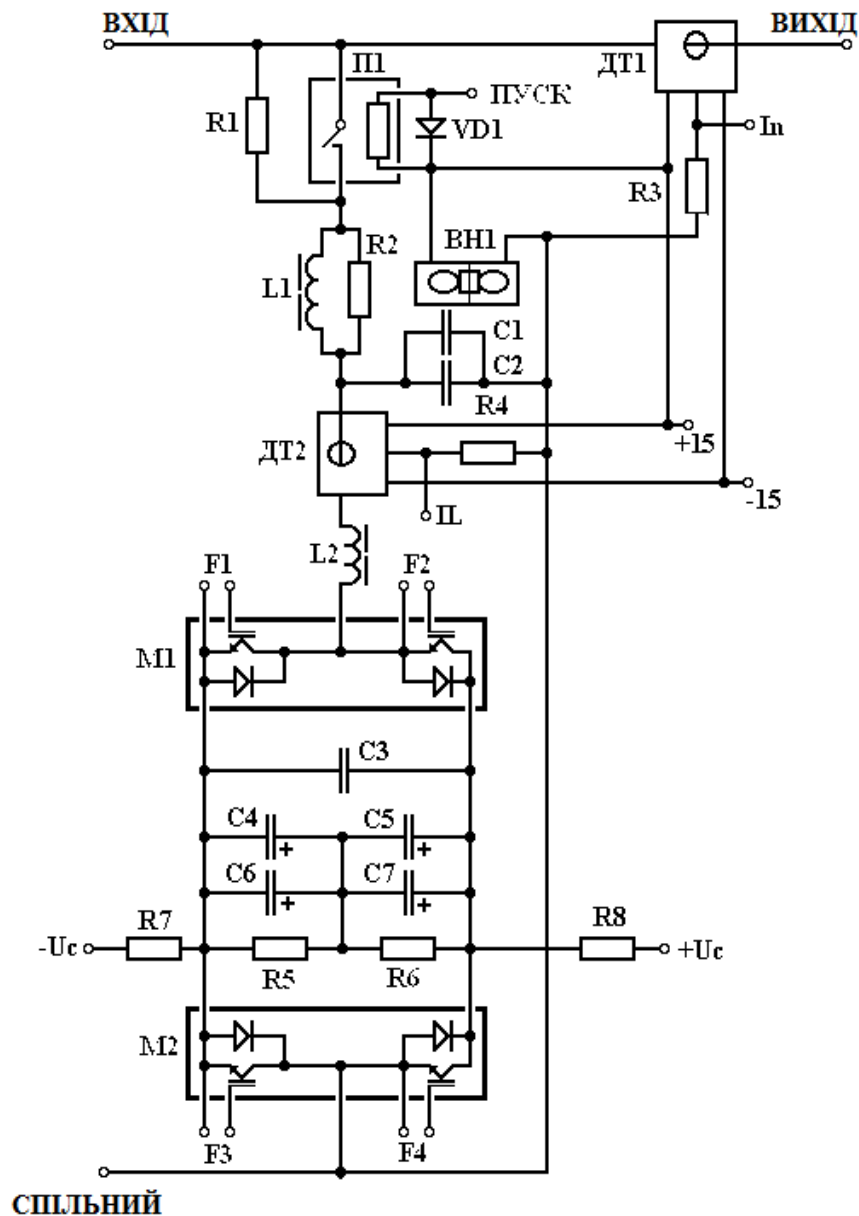


Рис. 4.10 Схема силової частини коректора форми струму

Спрощена еквівалентна схема силової частини АКФС показана на рис. 4.11.

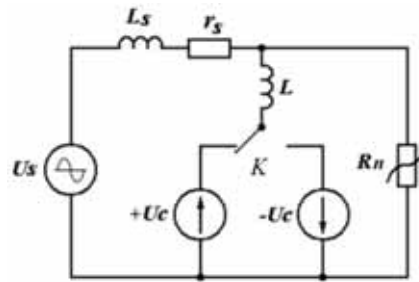


Рис. 4.11 Спрощена еквівалентна схема силової частини АКФС

В цій схемі враховано подовжні параметри мережі L_s , r_s , конденсатор мостового інвертора замінено джерелами ЕРС $+U_c$ і $-U_c$, а транзисторний вузол – двопозиційним ключем К.

Розглянемо приклад релейного несинхронізованого керування, при якому максимальне відхилення миттєвого значення струму дроселя L від завдання задається шириною зони гістерезису релейного елементу і воно постійне на будь-якому періоді імпульсної модуляції. Припустимо, що частота імпульсної модуляції значно вище частоти мережі і на будь-якому періоді імпульсної модуляції миттєве значення напруги мережі можна вважати незмінним.

Визначимо напругу на дроселі L на періоді імпульсної модуляції згідно епюр, приведених на рис. 4.12.

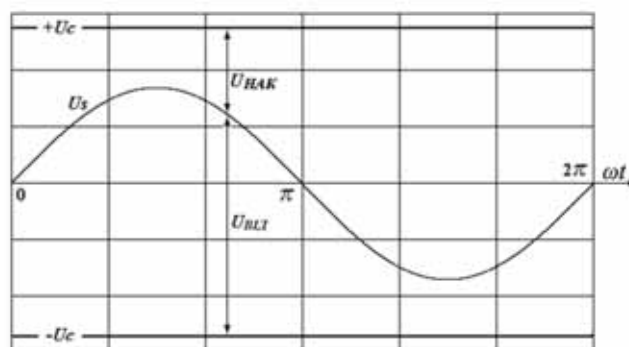


Рис. 4.12 Період імпульсної модуляції
при зміні напруг U_s та U_c на дроселі L

На інтервалах накопичення і віддачі енергії дроселем знаходимо:

$$\begin{aligned} U_{НАК} &= U_C - U_S \\ U_{ВД} &= U_C + U_S \end{aligned} \quad (4.9)$$

Тривалість інтервалів ΔT визначимо з виразу

$$\Delta T = \frac{L \cdot \Delta I}{U_L} \quad (4.10)$$

де ΔI - ширина зони гістерезису релейного елементу.

Частоту імпульсної модуляції знайдемо, як

$$F_M = \frac{1}{\Delta T_{НАК} + \Delta T_{ВД}} = \frac{1}{L \Delta I \left(\frac{1}{U_C - U_S} + \frac{1}{U_C + U_S} \right)} = \frac{U_C^2 - U_S^2}{2 U_C L \Delta I} \quad (4.11)$$

Нехай напруга мережі змінюється згідно із законом

$$U_S = U_M \sin \omega t \quad (4.12)$$

Позначимо $a = U_M / U_C$, $x = \omega t$, тоді частота імпульсної модуляції визначається з виразу:

$$F_M = \frac{U_C}{2 L \Delta I} [1 - (a \cdot \sin x)^2], \quad (4.13)$$

звідки виходить, що максимальне значення частоти імпульсної модуляції відповідає моменту проходження мережевої напруги через нуль, тобто

$$F_{MAX} = \frac{U_C}{2 L \Delta I} \quad (4.14)$$

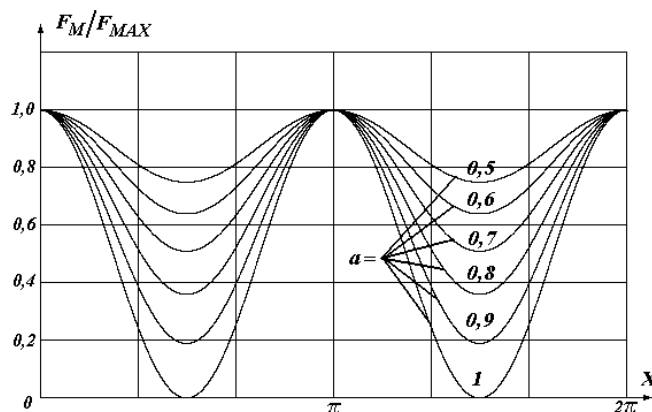


Рис. 4.13 Залежність частоти імпульсної модуляції від миттєвого значення напруги мережі.

З наведеної залежності (рис. 4.13) виходить, що напруга на конденсаторі U_C повинна перевищувати амплітуду напруги мережі U_M , інакше мінімальна частота імпульсної модуляції прагне до нуля, що обмежує швидкість зміни струму дроселя і, відповідно, швидкодію коректора. Так, при роботі на індуктивне навантаження при фазовому керуванні значення коефіцієнта a не повинно бути більше 0,6 [88].

Для розрахунку втрат в магнітопроводі дроселя практичний інтерес представляє середнє значення частоти імпульсної модуляції F_{CP} за період мережевої напруги. З (4.11) знаходимо:

$$F_{CP} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_M dx = \frac{U_C}{4\pi L \Delta I} \int_0^{2\pi} [1 - (a \cdot \sin x)^2] dx = \frac{U_C (2 - a^2)}{4L \Delta I} = F_{MAX} \frac{2 - a^2}{2} \quad (4.15)$$

Наприклад, для однофазного коректора з максимальною лінійною напругою мережі амплітудою $U_M = 537\text{В}$ при $U_C = 750\text{В}$ ($a = 0,6$), при $F_{MAX} = 20\text{ кГц}$, середня частота імпульсної модуляції складає $F_{CP} = 16,4\text{ кГц}$.

При релейному несинхронізованому керуванні частота змінюється із зміною струму дроселя: чим вище за значення струму, тим менше частота. Отже, максимальна частота модуляції буде при нульовому значенні струму. При даному способі керування пульсації струму дроселя не змінюються, $\Delta I = \text{const}$, і визначаються шириною зони гістерезису релейного елемента.

Якщо ввести коефіцієнт високочастотних пульсацій струму як $m_I = \Delta I / 2I_{MAX}$, де I_{MAX} - задане проектне амплітудне значення струму, то індуктивність дроселя можна розрахувати за формулою:

$$L = \frac{U_C}{4 \cdot F_{MAX} \cdot I_{MAX} \cdot m_I}; \quad (4.16)$$

Значення коефіцієнта пульсацій m_I вище 0,08 викликають значну амплітуду пульсацій струму коректора на частоті імпульсної модуляції, які при необхідності можуть бути зменшені додатковим фільтром високочастотних гармонік, який для нашого прикладу такий: $LI = 400\text{ мкГн}$, $CI = 5\text{ мкФ}$ (рис. 4.10) [89].

Для розглянутого випадку індуктивність дроселя $L2=2,2$ мГн при $U_c = 750\text{В}$, $F_{MAX}= 20\text{кГц}$; $I_{MAX}= 60\text{А}$; $m_i = 0,07$.

Схема ланки постійного струму розробленого коректора приведена на рис. 4.14. Для його роботи конденсатори $C1...C4$ мають бути ємністю не менше ніж 500 мкФ [90].

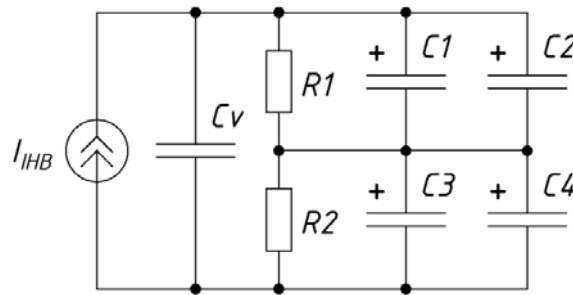


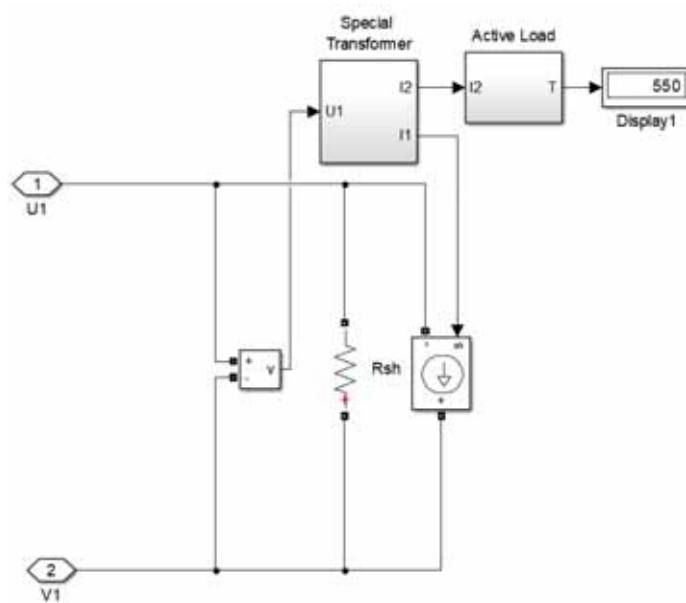
Рис. 4.14. Схема ланки постійного струму коректора.

В якості високочастотного конденсатора C_V можливе застосування високовольтного конденсатора з діелектриком на основі поліпропіленової плівки (табл. 4.2):

Таблиця 4.2

Ur Vdc	Urms Vac ⁽⁴⁾	Upk Vdc	Cap. μF	B	Dimension in mm						du/dt V/μs	Ipeak A	Irms ⁽²⁾ A	ESR ⁽³⁾ mΩ	ICEL Code ⁽¹⁾
1200	500	1600	2,5	35	50	57,5	1,2	52,5	-		350	875	12	2,7	PSB2124250*R#
1200	500	1600	2,5	35	50	57,5	1,2	52,5	20,3		350	875	22	2,1	PSB2124250*RS

Імітаційну математичну модель системи ТРС-СТ з коректором форми струму розроблено за допомогою пакета моделювання Simulink в MATLAB і показано на рис. 4.15. Вона вміщує як складову частину модель системи керування Corrector Control System та модель нелінійного навантаження Nonlinear Load, показані відповідно на рис. 4.16 та 4.17.

Рис. 4.17 Модель системи *Nonlinear Load*

Вхідний струм споживання з мережі I_S (рис. 4.18, 4.19) має форму, близьку до синусоїдальної і збігається за фазою напруги мережі u_S , показуючи, що запропонована система корекції струму з досить високою точністю формує струм коректора I_C , зменшуючи при цьому діюче значення вхідного струму I_S майже в 3 рази в режимі розігріву фільтрних пластин (струм $I_L = 15\text{A}$). Високочастотні пульсації з частотою 20 кГц, які присутні в струмі дроселя коректора, значно послаблюються високочастотним фільтром радіоперешкод.

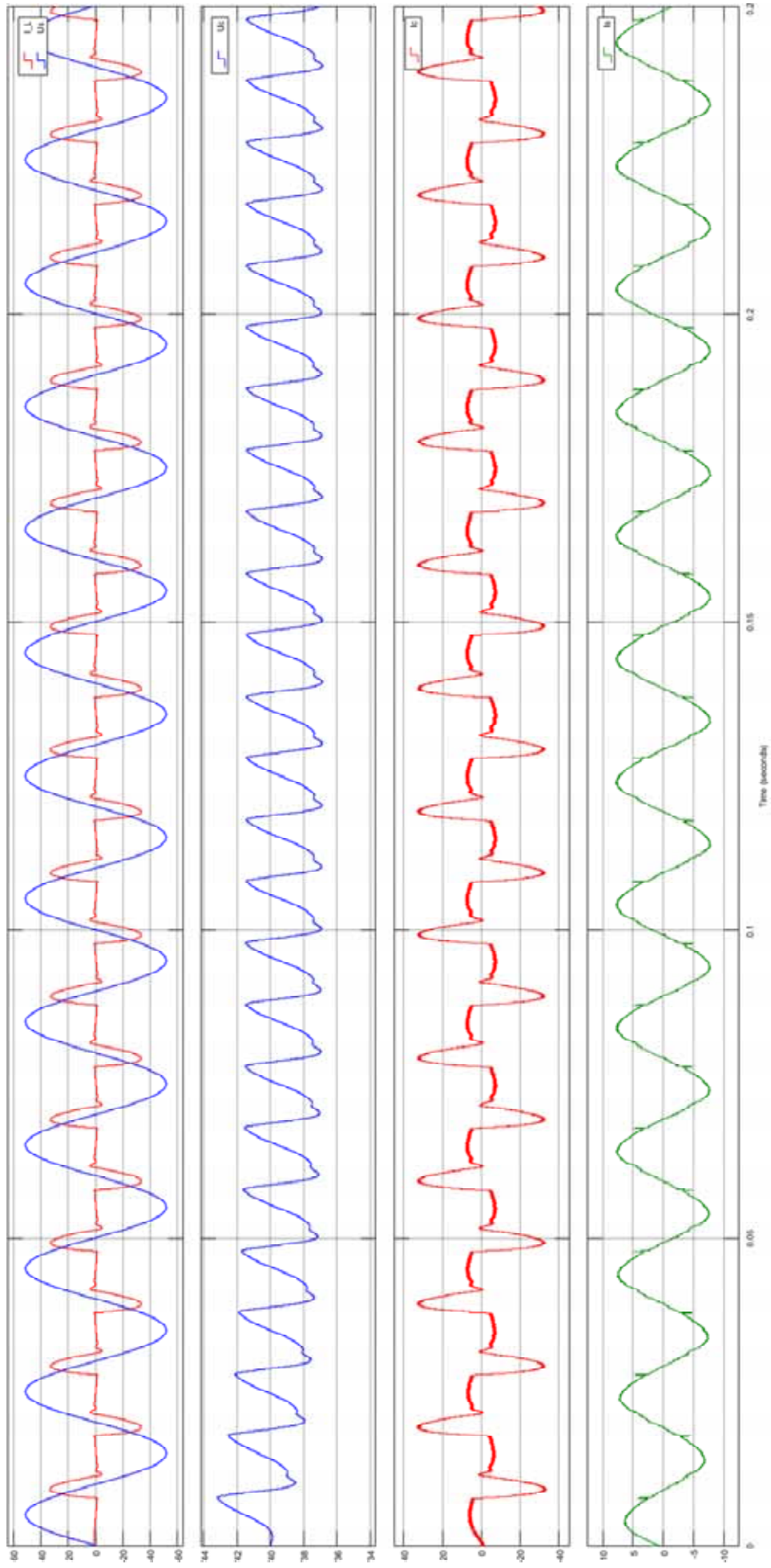


Рис. 4.18 Діаграми електричних величин системи ТРС-СТ при роботі АКФС

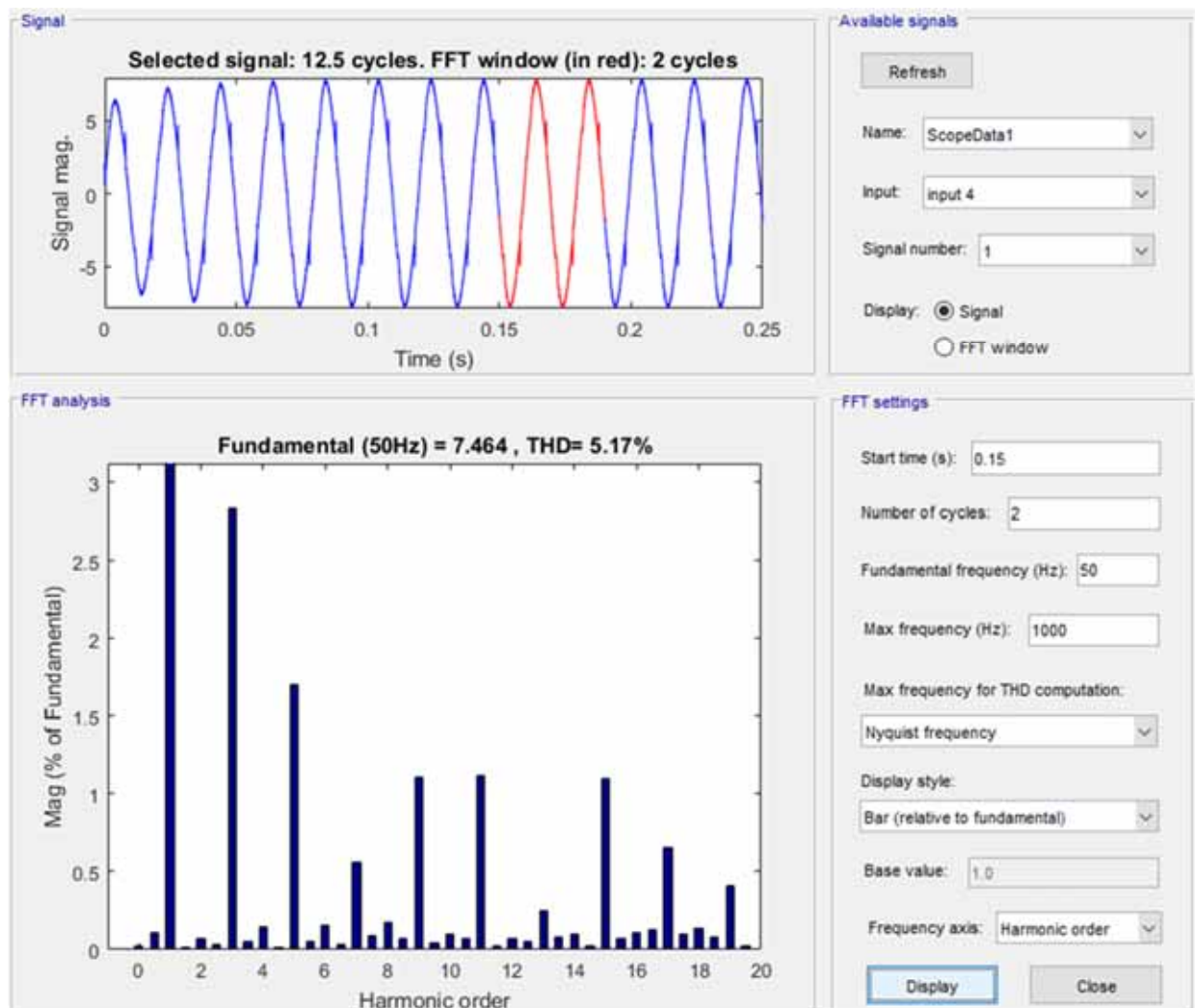


Рис. 4.19 Гармонійний склад струму I_S .

4.3 Зменшення встановленої потужності активного коректора форми струму в складі гібридного фільтра

Виходячи з того, що інвертор коректора струму розраховується на максимальне амплітудне значення струму навантаження, для поліпшення економічної ефективності доцільним є використання гібридних коректорів, що містять в собі пасивний LC фільтр, який зменшує амплітуду вхідного струму. Така структура дозволяє значно зменшити встановлену потужність активного коректора форми струму і таку (гібридну) корекцію струму споживання можна застосувати при великих потужностях ФКП [91].

Комбіновані ФКП (гібридні фільтри), що поєднують переваги широкосмугового пасивного LMC - фільтра і активного коректора форми струму, також знаходять широке застосування в [92, 93].

Для дослідження спотворень струму споживання системи ТРС-СТ моделлю усталені процеси в схемі (рис. 4.3) за допомогою спеціалізованої програми OMEGA 2010, розробленої в ІЕД НАНУ.

Моделювання пасивного фільтра в середовищі OMEGA 2010.

Серед пасивних широкосмугових LMC-фільтрів найкращими характеристики мають фільтри [94, 95], що серійно випускаються в даний час (в трифазному варіанті) фірмами MIRUS (Канада), ABB, DANFOSS, ELHAND (Польща), Арнаді (Росія) та інші.

В однофазному варіанті такий фільтр, включений на вході мостового випрямляча із конденсатором, що згладжує пульсації випрямленої напруги, здатний придушити гармоніки до рівня $THDi = 12-15\%$ [89].

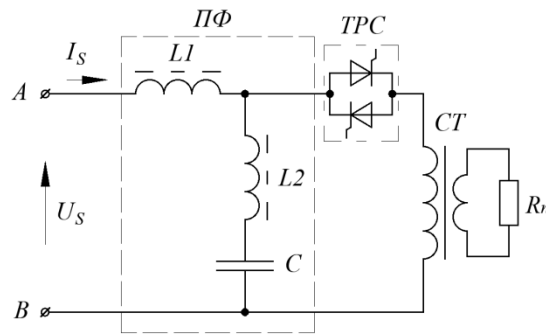


Рис. 4.19 Система ТРТ-СТ при підключенні до мережи через пасивний фільтр

На рис. 4.19 показано включення такого фільтра (ПФ) на вході розглянутого регулятора струму, а на рис. 4.20, а, б – отримані в результаті моделювання епюри струму, напруги і спектральний склад вхідного струму цього регулятора.

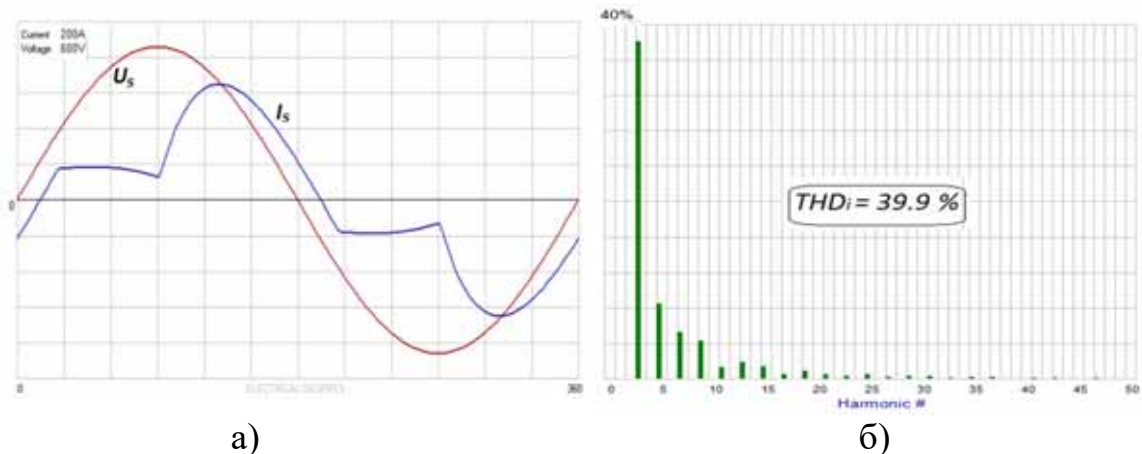


Рис. 4.20 Результати моделювання системи ТРТ-СТ з ПФ

Найкращий результат, який в цьому випадку вдається отримати з таким фільтром, становить всього лише $THDi = 39.9\%$ при $L1 = 4 \text{ мН}$, $L2 = 20 \text{ мН}$, $C = 200 \text{ мкФ}$. Справа в тому, що збільшення цих параметрів, перш за все $L1$, приводить до зниження рівня $THDi$, але вступає в протиріччя з можливістю отримання номінального струму (при куті керування тиристорами $\alpha = 0$) через велике падіння напруги на індуктивності $L1$ при будь-яких варіантах добору параметрів фільтра (як показали результати

моделювання). Так що ефективне застосування пасивних фільтрів в регуляторах такого типу при діапазоні регулювання струму $d \geq (1: 2)$ принципово неможливо.

Моделювання активного фільтра в середовищі OMEGA 2010. Як уже згадувалося, основний недолік активної фільтрації полягає в його дорожнечі, викликаню не тільки вартістю елементної бази, а й труднощами в забезпеченні належної швидкодії при мінімальних динамічних втратах в транзисторах.

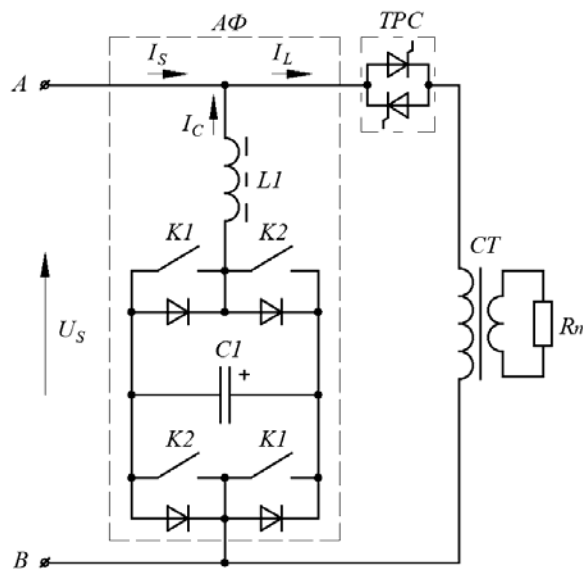


Рис. 4.21 Система ТРТ-СТ при підключенні до мережі через активний фільтр.

Результати моделювання процесів в системі ТРТ-СТ-АФ (рис.4.21) представлені на рис. 4.22, а – епюри вхідного струму I_S і струму навантаження I_L , б – спектральний склад вхідного струму.

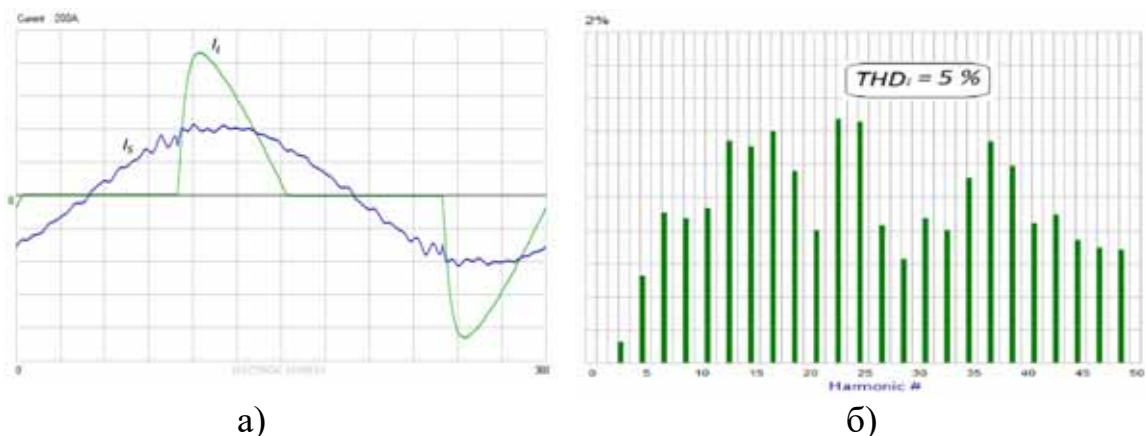


Рис. 4.22 Результати моделювання системи ТРТ-СТ с АФ

Ці графіки демонструють, що форма мережевого струму споживання наближена до синусоїди, а $THDi$ знижений до 5%, що задовольняє всім міжнародним нормам. Більш того, є можливість практично повного придушення всіх вищих гармонік, що пояснюється генерацією інвертором активного фільтру несинусоїдального струму I_C , який можна представити рядом Фур'є як суму гармонік різної амплітуди і фази

$$I_C = \sum_k^n I_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (4.17)$$

де k – непарні числа натурального ряду починаючи з 3 і закінчуючи n , а амплітуда k -ої гармоніки I_k і її фазовий кут φ_k обчислюються за відомими формулами [87]. Замінюючи при моделюванні активний фільтр паралельним з'єднанням n джерел струму наведеного вище виду і перебираючи за певним алгоритмом I_k і φ_k таким чином, щоб мінімізувати кожен гармоніку вхідного струму I_S , можна мінімізувати сумарний $THDi$ на будь-якому заданому рівні. У нашому випадку ми обмежилися рівнем 5%, для чого було достатньо врахувати 9 гармонік з параметрами, наведеними в таблиці 4.3. При цьому діюче значення струму, що генерується активним фільтром, склало $I_C = 48.0\text{A}$.

Таблиця 4.3

k	3	5	7	9	11	13	15	17	19
I_k , А	57	26	14	12.5	7	6	4.5	2.8	3
φ_k , град	36	138	-75	50	0	-40	90	150	0

Моделювання гібридного фільтра (ГФ) в середовищі OMEGA 2010.

Гібридний фільтр являє собою поєднання активного і пасивного фільтрів, причому, на відміну від відомих [96], його пасивна складова $ПФ$ крім паралельної LC – ланки містить і послідовну L – ланку ($L2$ на рис. 4.23). Ця ланка відіграє вирішальну роль в поліпшенні режиму роботи активної складової такого фільтра, дозволяючи звільнити її від фільтрації вищих гармонік спектра – цю функцію виконує пасивна складова.

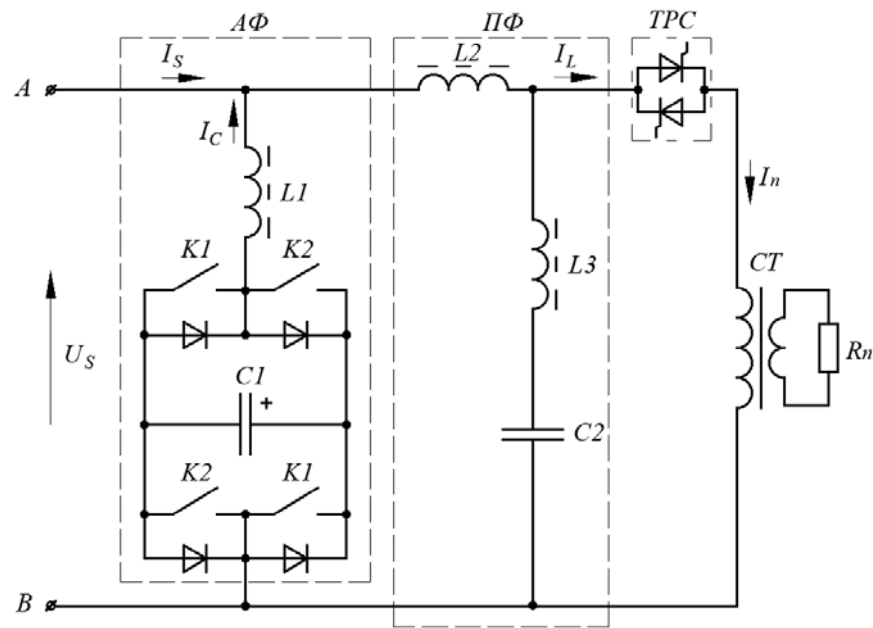


Рис. 4.23 Система ТРС-СТ при включенні до мережі через гібридний фільтр

На рис. 4.24 представлено епюри струмів і спектральна характеристика гібридного фільтра, що живить те ж навантаження, що і в попередньому випадку, а в таблиці 4.4 наведено величини амплітуд струмів відповідних гармонік, що генеруються активною частиною фільтра, та їх фазових кутів. Результуючий струм активної частини становить 23.9 А (r.m.s.), тобто практично в 2 рази менше, ніж при відсутності пасивної частини фільтра, що істотно знижує вартість фільтра в цілому.

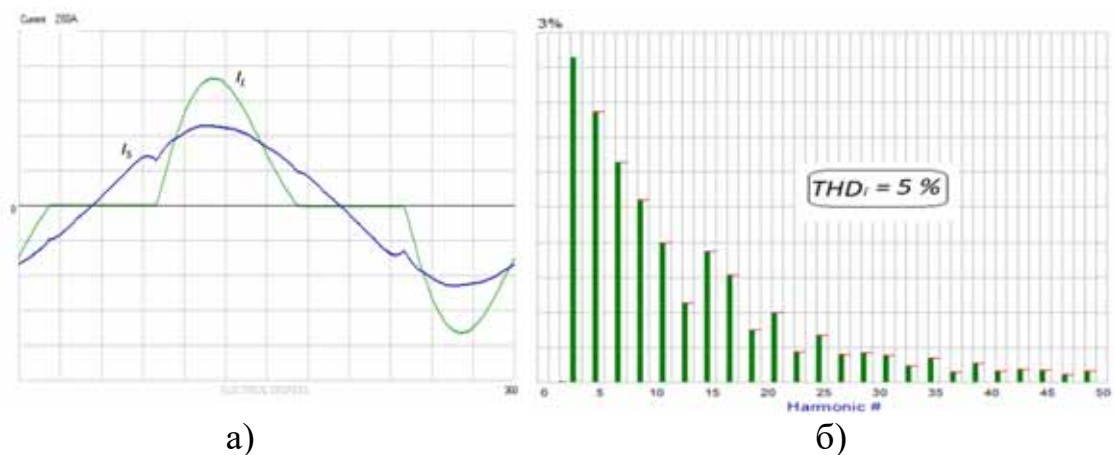


Рис. 4.24 Результати моделювання системи ТРС-СТ с ГФ

Таблиця 4.4

k	3	5	7	9	11	13	15	17	19
I_k , А	34	3.6	5.9	0.4	1.5	0.2	0.2	0.3	0.3
φ_k , град	30	60	-150	-50	100	-60	-20	-150	-60

Фактично, ця перевага проявляється ще більше завдяки таким обставинам. Фірми, що виробляють активні фільтри з використанням IGBT транзисторів, дають рекомендації щодо обмеження допустимих струмів вищих гармонік, що генеруються фільтром (у протифазі з генерованими нелінійним навантаженням), у зв'язку з перегрівом транзисторів через динамічні втрати на підвищених частотах (т.зв. derating).

Так, наприклад, фірма DANFOSS рекомендує рівень 3-ої гармоніки знизити до 85% від необхідного (розрахункового), рівень 5-ої – до 70%, 7-ої – до 50% і т.д. Природньо, це призвело б до збільшення $THDi$ фільтра, на що споживач піти не може і змушений купувати фільтр з відповідно завищеним номіналом струму. Так, для розглянутого вище варіанту активного фільтра з розрахунковим номінальним струмом $I_C = 48$ А необхідність завищити допустимі рівні амплітуд 3-ої гармоніки до $I_3 = 57/0.85 = 67$ А, 5-ої – до $I_5 = 26/0.7 = 37$ А і 7-ої – до $I_7 = 14/0.5 = 28$ А (відповідно до даних таблиці 4.4 це означає завищення номінального струму активного фільтра з 48 А до 58 А, тобто в 1.2 рази, оскільки при врахуванні тільки цих трьох найбільш значущих гармонік діюче значення цього струму

$$I_C = \sqrt{\frac{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}{2}} = 58 \text{ А.} \quad (4.18)$$

Звичайно, аналогічне вимушене завищення номінального струму має місце і для активної складової гібридного фільтра, але воно, як показують розрахунки, в процентному відношенні набагато менше.

Варто зазначити, що наведений набір I_k і φ_k – один з безлічі можливих, він лише демонструє можливість як мінімум удвічі зменшити номінальний

струм (і встановлену потужність) активного фільтра. Оптимізація цих параметрів (яка тут не розглядається) дозволить, очевидно, істотно поліпшити цей показник. Такі оптимізовані параметри, перш за все, можна використовувати як стартові при розробці програм керування активною частиною гібридних фільтрів, що працюють за принципом компенсації гармонік спотворення мережевого струму, які нівелюються гармоніками протилежного знака.

При використанні ж активної частини гібридних фільтрів, що працюють за принципом компенсації часових сигналів, така компенсація спотворень відбувається автоматично після порівняння миттєвих значень сигналів, пропорційних живлячій напрузі і мережевому струму.

4.4 Зменшення встановленої потужності активного коректора форми струму за допомогою комбінованих перетворювачів змінного струму

В електротермічних установках зазвичай використовують СТ з нормальним магнітним розсіюванням і секційними обмотками. Такі трансформатори з ТРС при фазовому керуванні мають практично жорстку зовнішню характеристику з диференціальним нахилом опору даного джерела живлення не більше 0,01 В/А [24]. Вищезгаданий водоохолоджуваний зварювальний трансформатор ТВК-75, що використовується в установці БСТВ для нагрівання жароміцної фільєрної пластини, має відпайки на його первинній стороні (рис. 1.13), що дає можливість організувати 8 ступенів регулювання струму I_n [97].

Тиристорні перетворювачі, виконавчі органи (ВО) яких поєднують напівпровідникові ключові елементи і СТ з відпайками на первинній стороні, при використанні імпульсно-фазових принципів керування (рис. 1.14), зменшують спотворення струму, що споживається з мережі, забезпечуючи при цьому задану глибину регулювання струму навантаження I_L [41].

Розглянемо двоступеневу схему ВО (рис. 4.25), щодо використання АКФС. При роботі такої схеми, як було вказано в п. 1.5, форма вхідного струму I_S має східчасто-синусоїдальну форму.

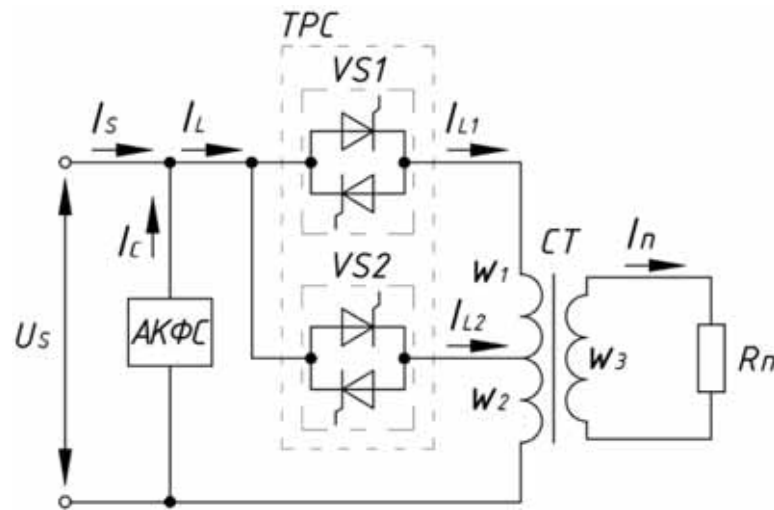


Рис. 4.25 Електрична схема двоступеневого ВО

Для поліпшення спектральних характеристик струму I_S можливо піти шляхом збільшення кількості ступенів ВО, що призведе до значного ускладнення схеми керування тиристорними парами VS , бо існує певна послідовність переключення тиристорних ключів в залежності від зсуву струму, при їх природній комутації.

Для отримання мінімального струму навантаження $I_{n_{MIN}}$ весь напівперіод повинна бути відкрита пара $VS1$. При максимальному значенні струму навантаження $I_{n_{MAX}}$ - відкрита пара $VS2$ (а пара $VS1$ закрита). Таким чином, в першому ступені регулювання забезпечується струм $I_n = 1280$ А, $i_s = 38$ А, а в другому ступені - $I_n = 2150$ А, $I_S = 58,5$ А. Вхідний струм I_S при цьому має синусоїдальну форму, а його величина залежить від співвідношення обмоток w_1 , w_2 , w_3 . У регульовальних режимах струму I_n першу частину напівперіоду відкрита пара $VS1$, а іншу - $VS2$, при цьому форма вхідного струму I_S має східчасто-синусоїдальну форму. Регулювання здійснюється за рахунок зміщення моменту включення $VS2$ на кут α відносно початку напівперіоду. Враховуючи наведене вище, більш раціонально використати

АКФС в режимі розігріву пластини на першій ступені регулювання при використанні $VS1$. В такому разі для компенсації реактивної складової струму мережі $I_L = 30\text{A}$ та зниження рівня THD_L , АКФС має забезпечувати струм $I_{C_MAX} = 56.3\text{ A}$ (рис. 4.26, а), а не $I_{C_MAX} = 85\text{ A}$, як при роботі тиристорної пари $VS2$ (рис. 4.27, а).

На другій ступені регулювання (рис. 4.28, б) відбувається розігрів фільтри до номінального теплового режиму без АКФС в поєднанні $VS1$ та $VS2$, а корегування реактивної складової струму споживання I_S реалізується за допомогою додаткових статичних конденсаторних батарей.

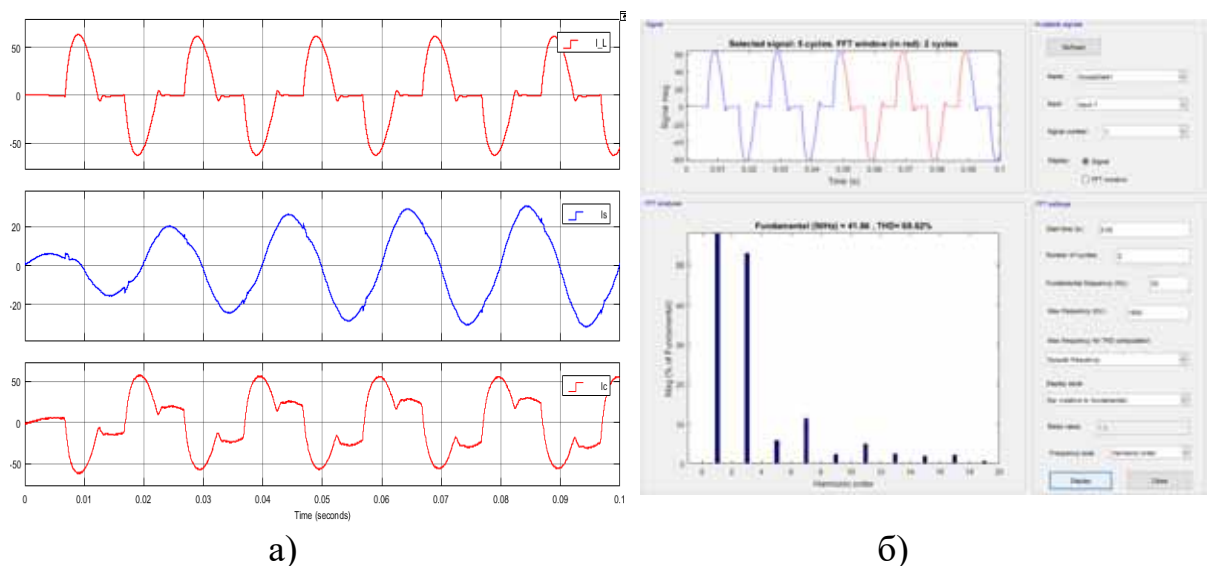


Рис. 4.26. Розігрів пластини з АКФС при фазовому регулюванні $VS1$ ($I_L = 30\text{A}$)

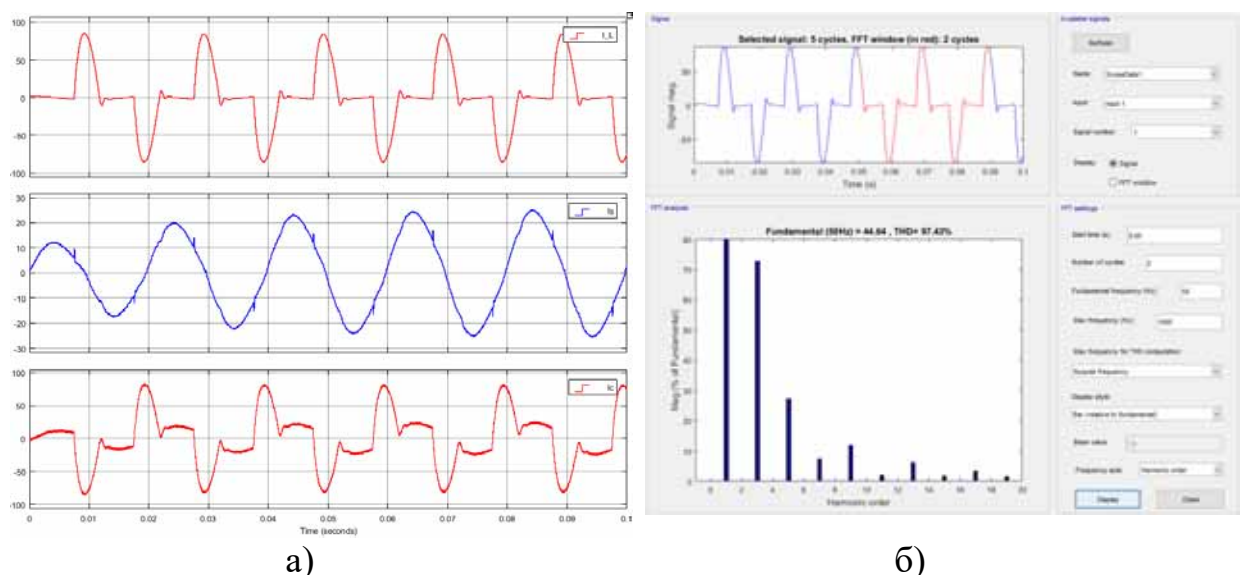
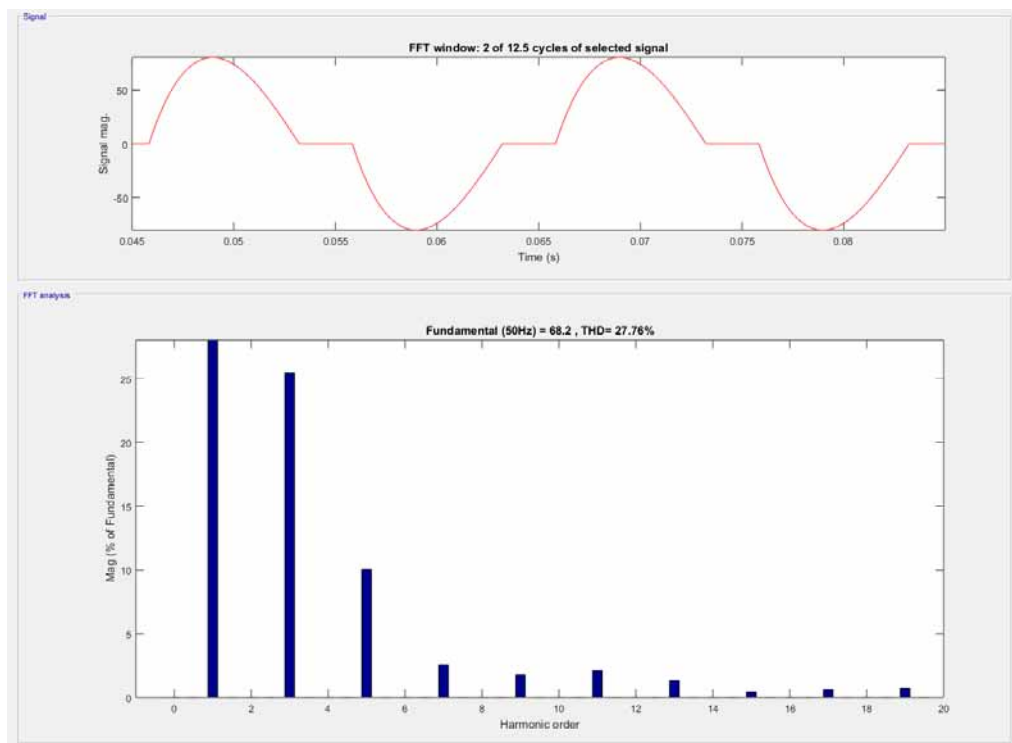
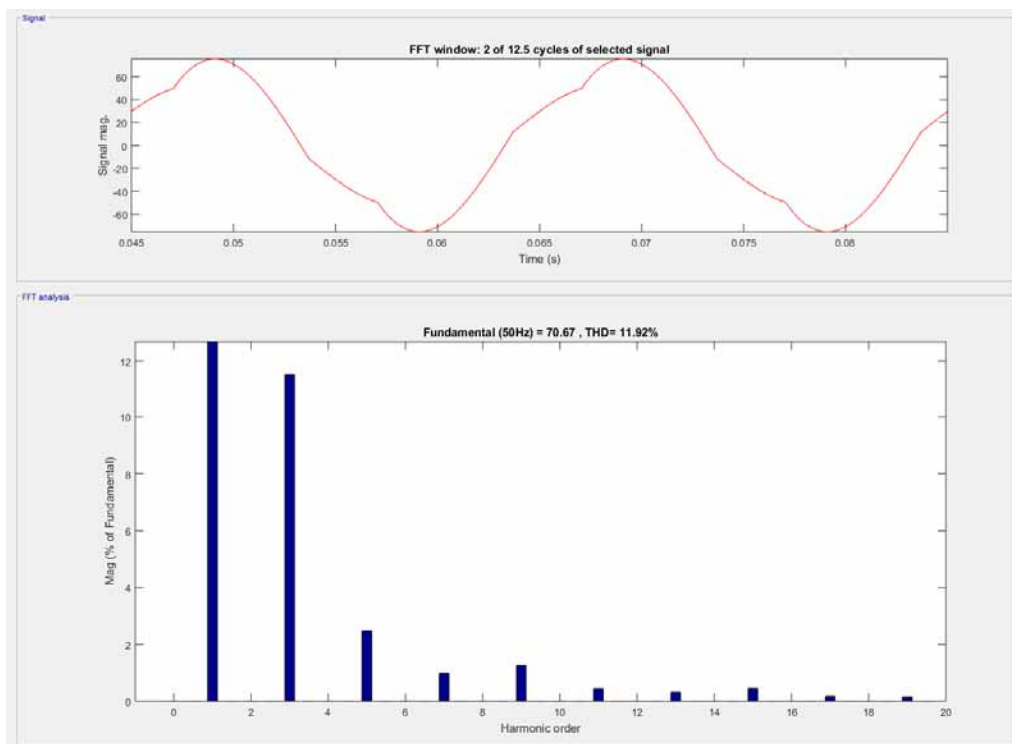


Рис. 4.27. Розігрів пластини з АКФС при фазовому регулюванні $VS2$ ($I_L = 30\text{A}$)



a)



б)

Рис. 4.28. Форма та THD_I вхідного струму $I_S = 53$ А
в номінальному тепловому режимі роботи фільтри:
а – без ВО , б – при використанні ВО

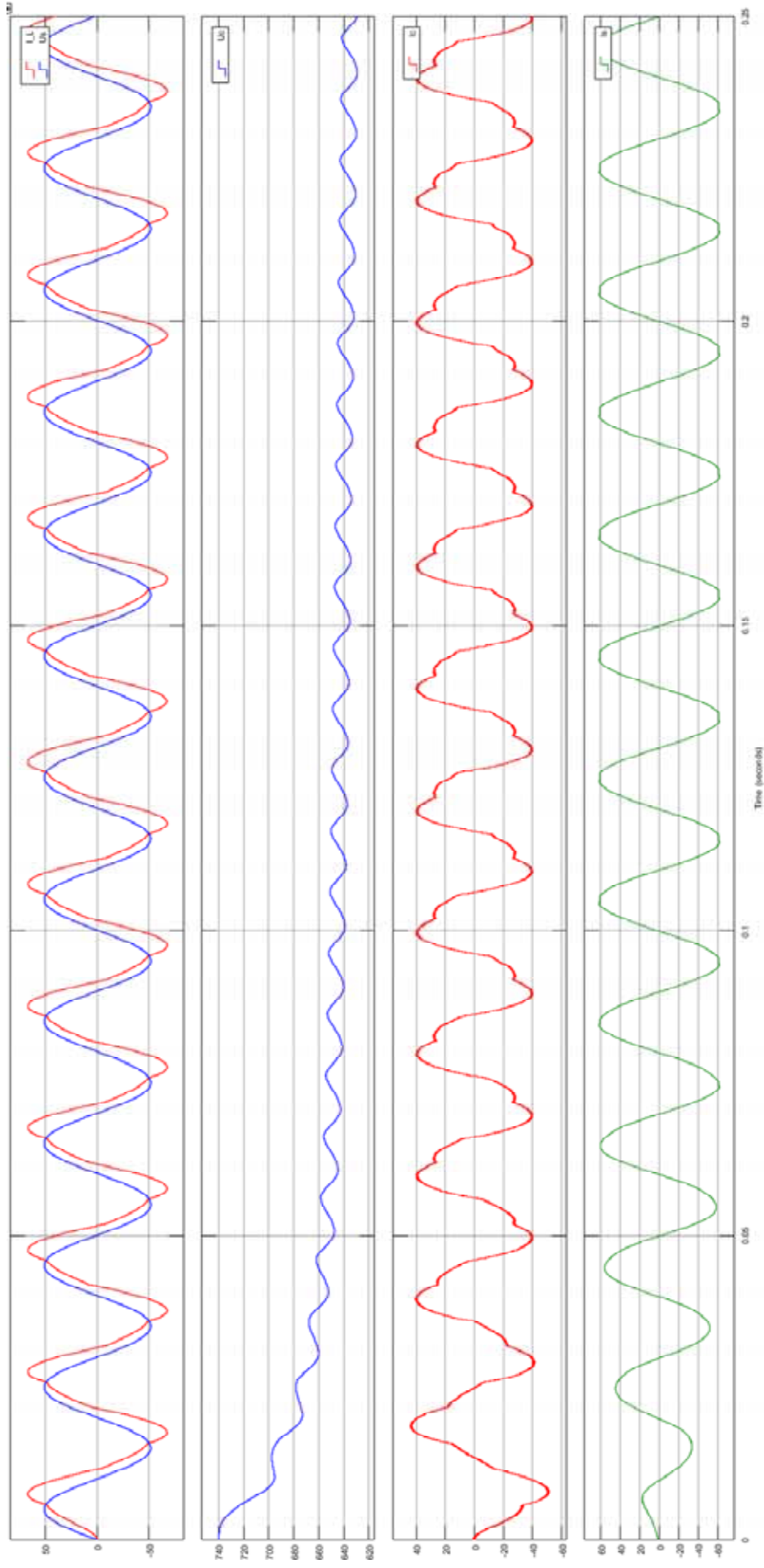


Рис. 4.29 Діаграми електричних величин системи ТРС-СТ при роботі гіридної схеми ФКП (ВО та АКФС)

Завдяки запропонованій топології комбінованих фільтро-компенсуючих пристроїв в системі ТРС – СТ зменшився сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень THD_I із 74% до 9.5% в режимі розігріву фільтри, а в номінальному тепловому режимі із 31% до 19%, при застосуванні АКФС $THD_I = 5\%$, а струм коректора I_{C_MAX} знизився з 85А більше ніж в 2 рази до 40А.

4.5 Висновки до розділу 4

1. Визначено, що система ТРС-СТ є джерелом електромагнітних спотворень, які погіршують показники якості електромережі. Проведено промислові заводські випробування системи ТРС-СТ, які показали високий рівень гармонік струму, що генеруються в мережу живлення і перевищують всі допустимі норми (коефіцієнт гармонік струму доходить до 73% в діапазоні малих його значень і до 27% - 33% в діапазоні великих значень). Проведено дослідження системи за допомогою комп'ютерного моделювання, які показали аналогічні результати. Визначено, що застосування системи ТРС-СТ неможливо без спеціальних заходів і засобів, за яких рівень гармонік струму буде зменшено до допустимих значень, встановлених державними стандартами.

2. Доведено, що пасивні широкосмугові ЛМС-фільтри не ефективні для придушення гармонік струму, особливо в широкому діапазоні регулювання струму в системі ТРС-СТ з фазовим керуванням, яка живить потужні однофазні навантаження, виправдано застосування додаткових пристроїв паралельного підключення – активних коректорів форми вхідного струму (АКФС).

3. Проведено комп'ютерне моделювання активного коректора форми струму при використанні в системі ТРС-СТ. Визначено, що вхідний струм споживання системою з мережі має форму, близьку до синусоїдальної і збігається за фазою з напругою мережі. Крім того, з досить високою точністю формується струм коректора, зменшуючи при цьому діюче значення вхідного струму системи майже в 3 рази в режимі розігріву фільтрних пластин.

Високочастотні пульсації з частотою 20 кГц, які присутні в струмі дроселя коректора, значно послаблюються високочастотним фільтром радіоперешкод.

4. Доведено, що активні коректори форми струму (АКФС) дозволяють досягти малого коефіцієнта гармонік (THD_I) струму живлення, в тому числі при широкому діапазоні його регулювання, проте досягається це за рахунок невиправдано завищеного значення номінального струму силового інвертора та АКФС в цілому.

5. Показано, що найбільш доцільними для використання з потужними однофазними навантаженнями є гібридні фільтри, що складаються з каскадного з'єднання паралельного активного і послідовно-паралельного пасивного ЛМС фільтра, що дозволяють суттєво зменшити загальну вартість фільтру в цілому при збереженні необхідного THD_I , що не перевищує 5%.

6. Доведено, що при наявності спеціального трансформатора з відгалудженнями достатньо хороші результати фільтрації гармонік струму дає запропоноване об'єднання АКФС з двоступеневим виконавчим органом тиристорно-трансформаторної структури (зменшився сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень THD_I із 74% до 5%).

Посилання: [24], [41], [22, 73], [73, 79], [80-82], [83], [84], [85], [73, 75, 76, 86], [87], [88], [89], [91], [92, 93], [94, 95], [96], [97], див. список використаних джерел стор. 157-166.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЧІТКОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ УСТАНОВКОЮ З ВИРОБНИЦТВА БСТВ З ГІБРИДНИМ ФІЛЬТРОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

На основі результатів теоретичних і практичних досліджень, електронного моделювання системи ТРТ-СТ з ННЛК розроблено лабораторний стенд такої системи для установки УБ СТВ 22, який пройшов випробування в заводських умовах на ТОВ «Черновецький завод теплоізоляційних матеріалів», про що свідчить відповідний акт впровадження (додаток В).

5.1 Комп'ютерна система нейрон-нечіткого логічного контролера

У комп'ютерній системі ННЛК прийняття рішення керування параметрами системи виконує SCADA програма. Основними функціями програми є збір даних параметрів системи (рівень розплаву в печі, значення первинного струму СТ і швидкості обертання витяжних валків), підготовка необхідних параметрів для формування базових фізичних змінних, фазифікації, логічного рішення, дефазифікації, формування передачі даних по Ethernet. На рис. 5.1 показана функціональна схема комп'ютерної системи ННЛК. Система складається з персонального комп'ютера - автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора з програмним продуктом Siemens SIMATIC WinCC Runtime Professional, програмованого логічного контролера (ПЛК) серії S7-1200 CPU 1211C AC/DC/RLY Siemens з двома модулями розширення аналогових входів-виході SM1231, SM1232, напівпровідникового регулятора струму *TPC* (РЕНАП-1Т-100ДТ фірми ТОВ «НТФ «ТЕМС»), існуючих на діючій установці регуляторів рівня розплаву в плавильної печі *PL*, та швидкості *PW* на базі перетворювача частоти Delta Electronics. Функції ПЛК полягають в перетворенні цифрових сигналів керування отриманих від ННЛК в фізичні сигнали напруги U_{ZL} , I_{CT} , U_{ZW} (0...10В), а також збір, перетворення

фізичних сигналів напруги ($4\ldots 20\text{mA}$) пропорційних значенням рівня H_P , струму I_I та швидкості V_H в цифровий код для подальшої взаємодії з SCADA програмою.

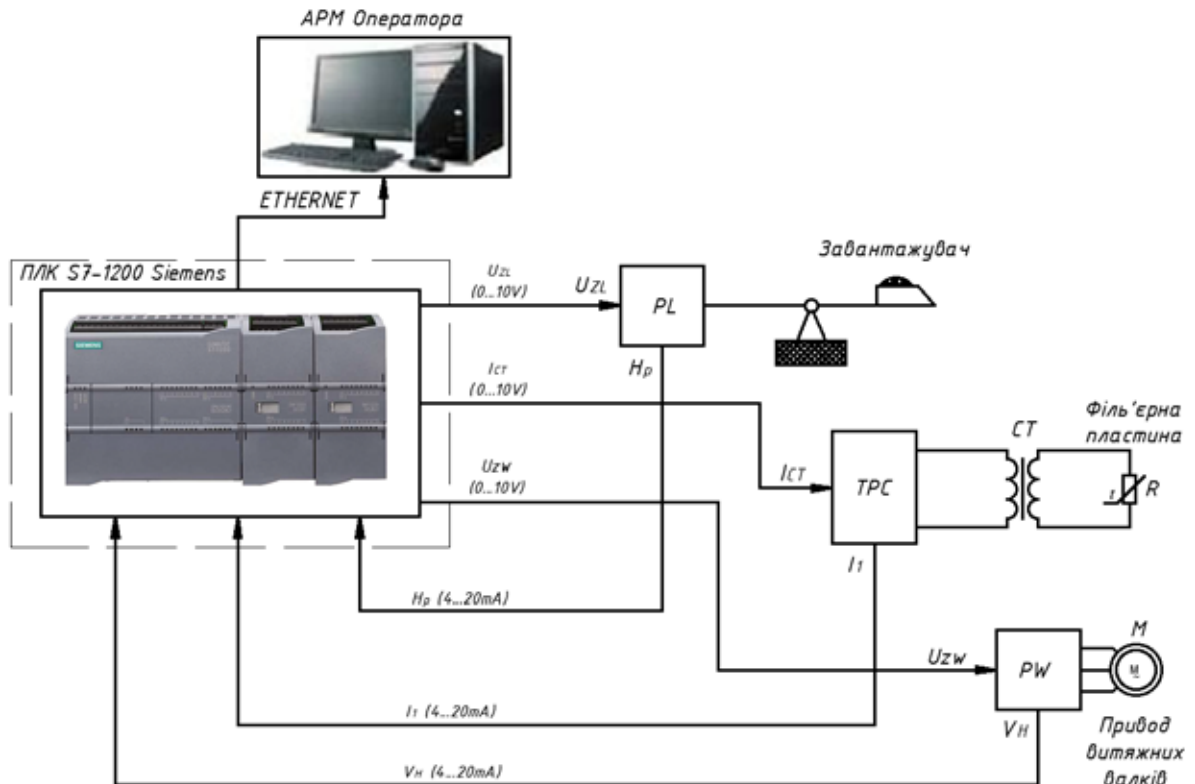


Рис. 5.1 Функціональна схема комп'ютерної системи ННЛК

У якості середовища розробки при вирішенні даного завдання автоматичного керування використано програмне забезпечення STEP 7 єдиного середовища розробки TIA Portal, що дозволяє використовувати загальний набір функцій керування даними, оперативного керування та моніторингу, конфігурації пристроїв системи ННЛК, організації промислового зв'язку Ethernet, діагностики і т.д.

TIA Portal включає широкий спектр інструментальних засобів для розробки системи ННЛК на базі контролерів SIMATIC S7-1200. Одним з них є засіб конфігурації NeuroSystems (стандартні функціональні блоки NEURO-4K), на основі якого і була створена нейро-нечітка система автоматичного керування. Зв'язок між Fuzzy системою і нейронною мережею реалізується

через інтерфейс FuzzyControl ++ вище зазначеного інструментального засобу конфігурації. Завдяки цьому Fuzzy система може бути синтезована на основі поточних значень параметрів, які були визначені в результаті комп'ютерного моделювання в розділі 3.

5.2 Опис експериментального зразка фільтро-компенсуючого пристрою

На рис. 5.2 представлена структурна схема експериментального зразка для дослідження роботи однофазного ФКП, яка містить вимірювальний блок, систему керування на основі релейного регулятора струму, драйвер керування IGBT транзисторами з гальванічною розв'язкою і силову частину ФКП - інвертора струму.

Загальний вигляд макету АКФТ представлений в додатку Б, де показана фотографія вимірювальної частини, СУ, драйвера і силова частина ФКП (рис. А4)

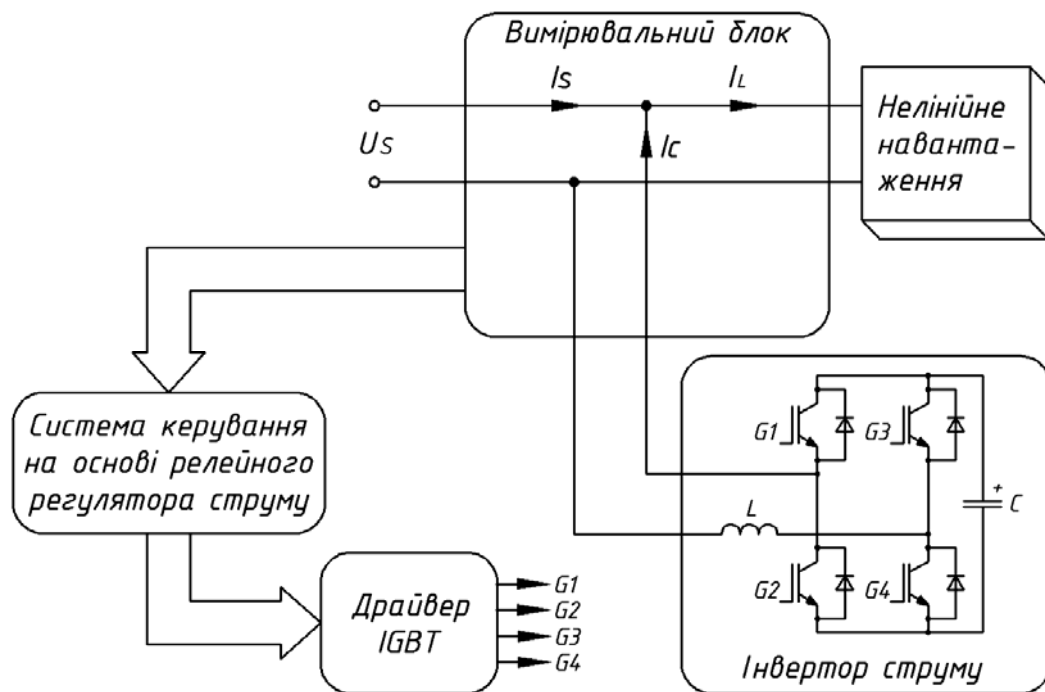


Рис. 5.2. Структурна схема експериментального макета для дослідження роботи однофазного ФКП

Вимірювальна частина включає в себе датчики вимірювання струму LEM LA 100-P з гальванічною ізоляцією на основі датчиків Холла.

Сигнали з датчиків подаються на плату керування, схема і зовнішній вигляд якої показано в додатку Б.

Сигнали з плати керування подаються на драйвер IGBT транзисторів, який реалізований на оптронах HCPL 3120 по схемі додатку Б.

Силова частина ФКП була реалізована на основі потужних IGBT транзисторів BSM150GB120DN2, електролітичних конденсаторів в якості накопичувача енергії та дроселів, осердя яких виконано на основі аморфних сплавів.

Експериментальний зразок дозволяє досліджувати роботу ФКП при різному характері навантаження. Зразок розраховано на прохідну потужність навантаження до 10 кВА. У схемі керування передбачений захист від перевантаження і коротких замикань.

5.3 Промислова апробація використання гібридного фільтра вищих гармонік в системі ТРС-СТ

Можливість використання застосованої методики математичного моделювання гібридних фільтрів перевірялася на експериментальній установці за схемою (рис. 4.23), яка містить активний фільтр з номінальним діючим струмом 50 А, пасивний фільтр з $THDi = 23\%$ ($L1 = 10$ мН, $L2 = 112$ мН, $C2 = 10$ мкФ), трансформатор з коефіцієнтом трансформації 4:1 з підвищеним розсіюванням магнітного потоку (для забезпечення падаючої зовнішньої характеристики) і активне навантаження потужністю 2 кВт. У якості ТРС застосовувався тиристорний регулятор серії «РЕНАП-1Т-100ДТ» фірми ТОВ «НТФ «ТЕМС». Результати експериментів представлені на наступних рисунках: без фільтрів – рис. 5.3, тільки з пасивним фільтром – рис. 5.4, тільки з активним фільтром – рис. 5.5, з обома фільтрами і з додатковим конденсатором $C_d = 200$ мкФ, підключеним паралельно виходу пасивного фільтра – рис. 5.6.

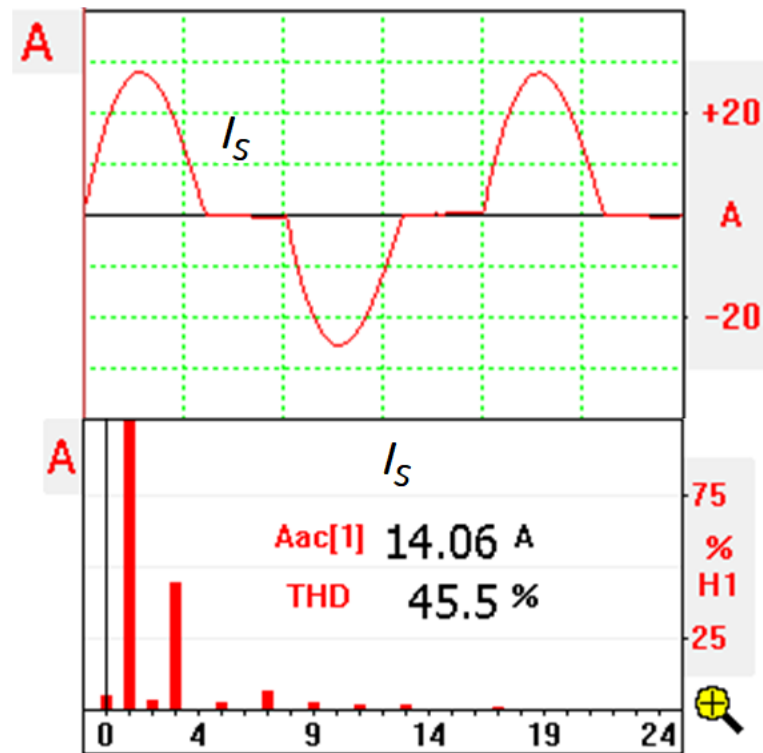


Рис. 5.3 Форма та $THDi$ струму споживання I_S системи ТРС-СТ

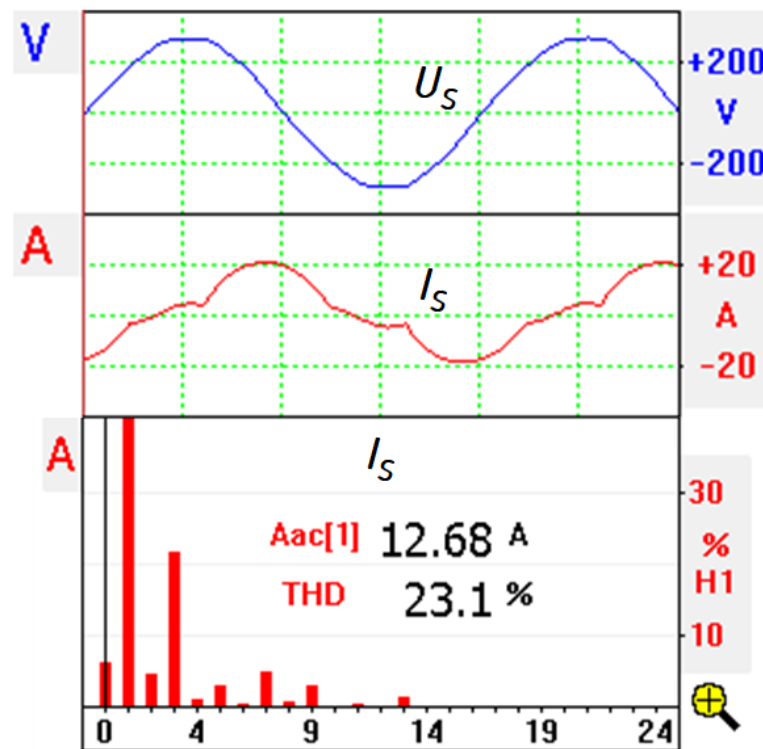


Рис. 5.4. Форма та $THDi$ струму I_S системи ТРС-СТ з ПФ

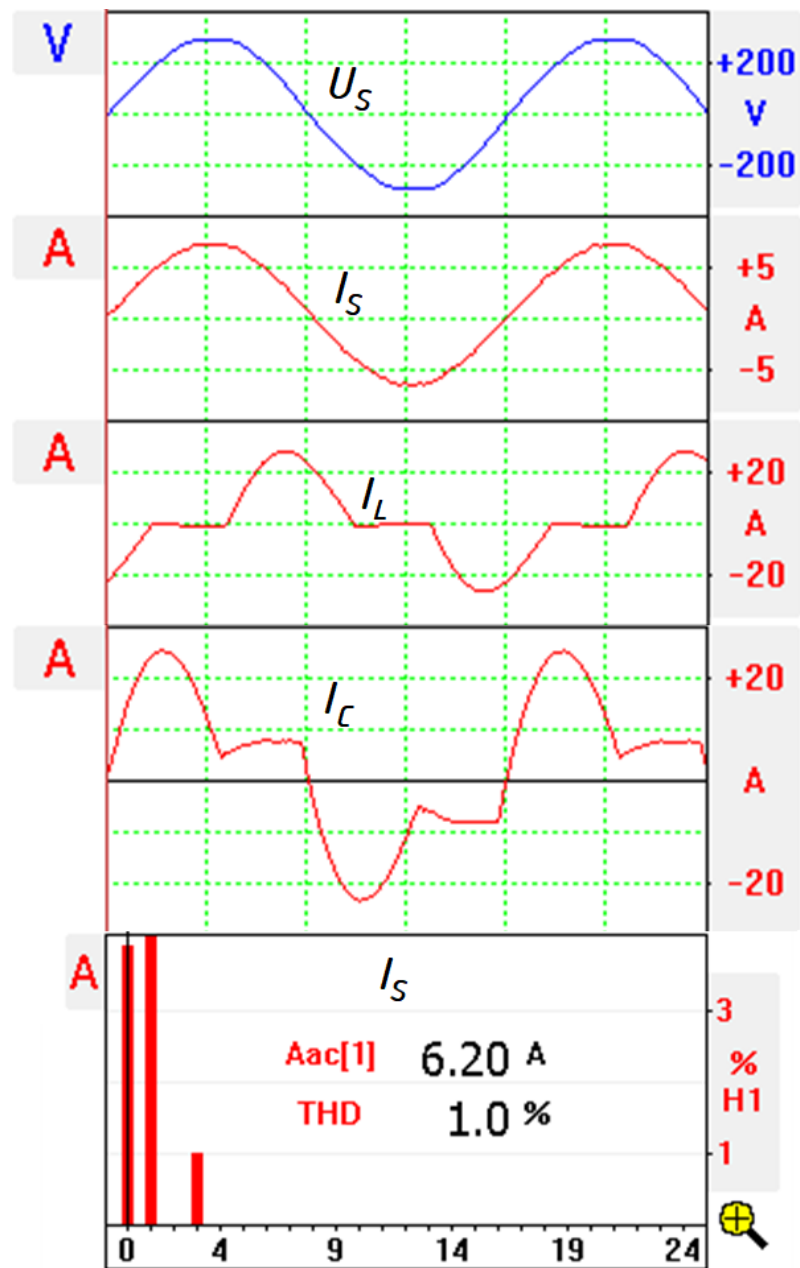


Рис. 5.5. Результати експериментальних досліджень системи ТРС-СТ с АКФС

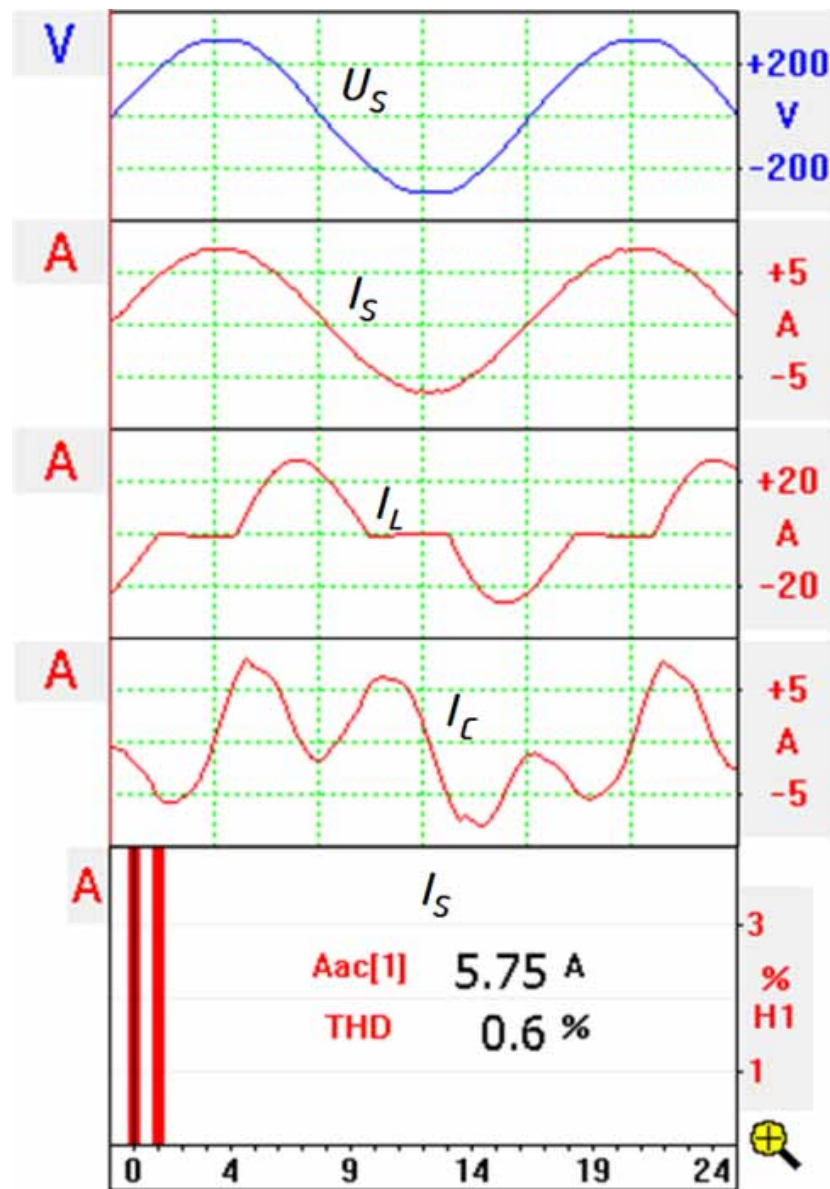


Рис. 5.6. Результати експериментальних досліджень системи ТРС-СТ с ГФ

Без використання фільтрів струм мережі, рівний току навантаження, становив $I_S = I_L = 14.4\text{A}$ при $THDi = 45.5\%$ (рис. 5.3). При використанні пасивного фільтра, як виходить з даних на рис. 5.4, струм мережі при тому ж навантаженні знижувався до 12.6 A та відставав по фазі від напруги майже на 90 градусів, а $THDi$ знижувався до 23% . При підключенні тільки активного фільтра (рис. 5.5, в) $THDi$ знизився до 1% (практично ідеальна фільтрація) при повному збігу по фазі вхідних струму і напруги ($\cos\varphi = 1$). При цьому струм активного фільтра становив значну величину – 16A , оскільки саме цей фільтр

виконує функцію компенсатора реактивної потужності. Коли цю функцію переклали на додатковий конденсатор $C_D = 200$ мкФ, підключений паралельно виходу гібридного фільтра, струм активного фільтра знизився до 4 А, тобто майже в 4 рази (рис. 5.6, г).

На рис. 5.7 – 5.10 наведено діаграми струмів I_S , I_C , I_L , отриманих при випробовуваннях системи ТРС-СТ з АКФС та ВО в заводських умовах на установці УБ СТВ 22.

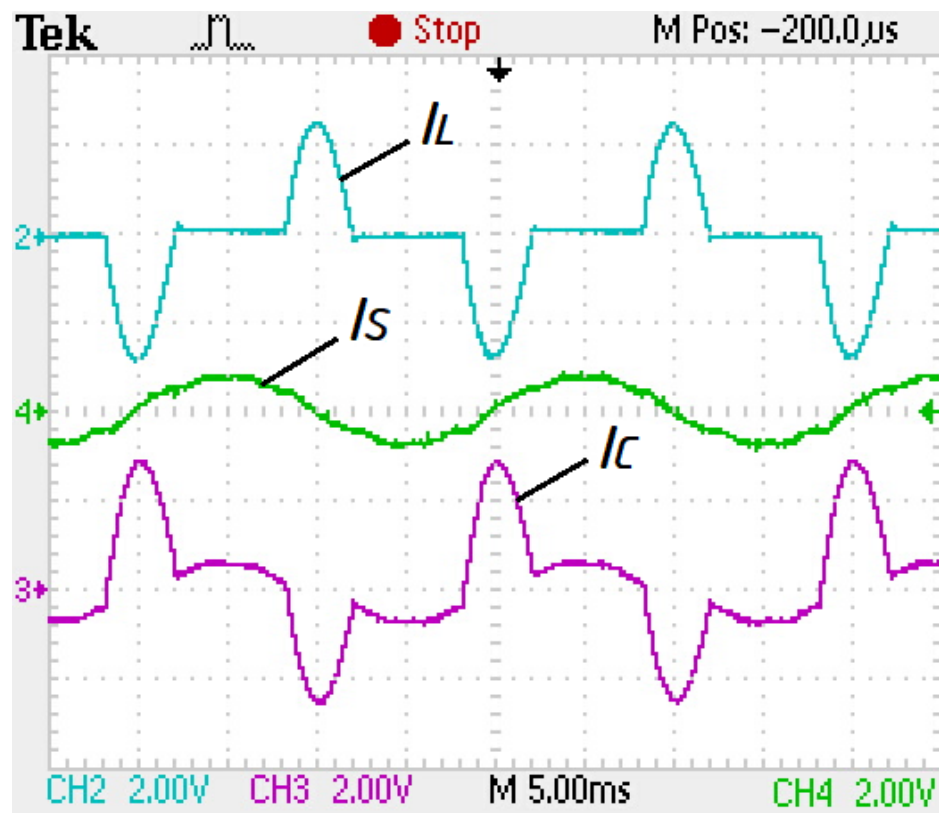


Рис. 5.7. Форми струму I_S , I_C , I_L з АКФС

при фазовому регулюванні $VS2$

де $I_{C_MAX} = 85.5\text{A}$, $THD_{I, I_L} = 98.5\%$, $THD_{I, I_S} = 6.3\%$

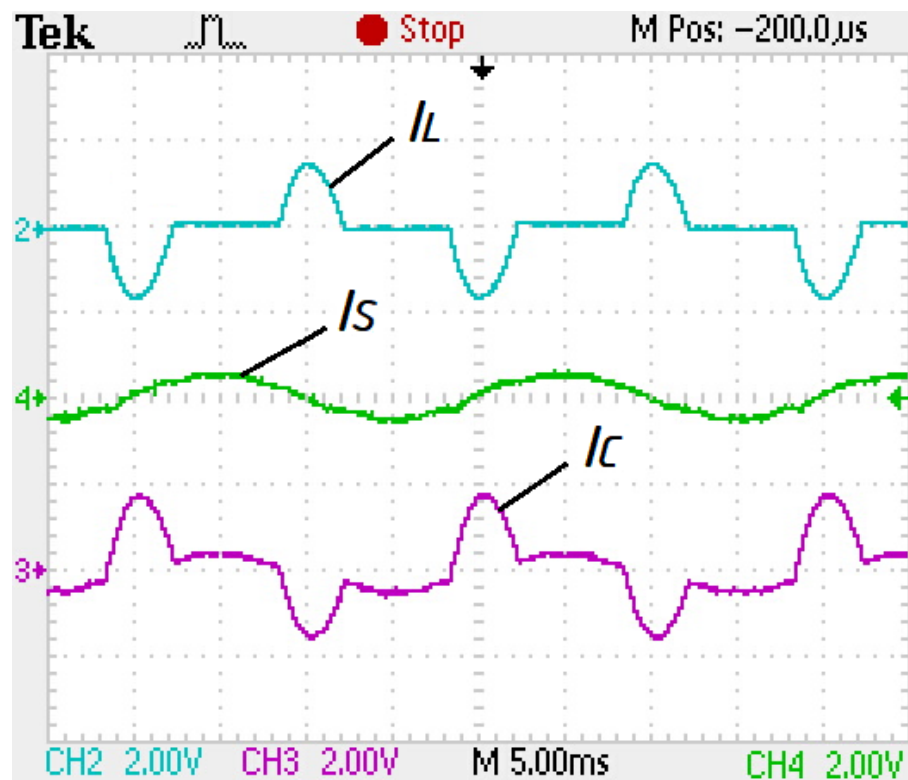


Рис. 5.8. Форми струму I_S , I_C , I_L з АКФС

при фазовому регулюванні $VS1$

де $I_{C_MAX} = 56.3A$, $THD_{I_L} = 74\%$, $THD_{I_S} = 5.5\%$

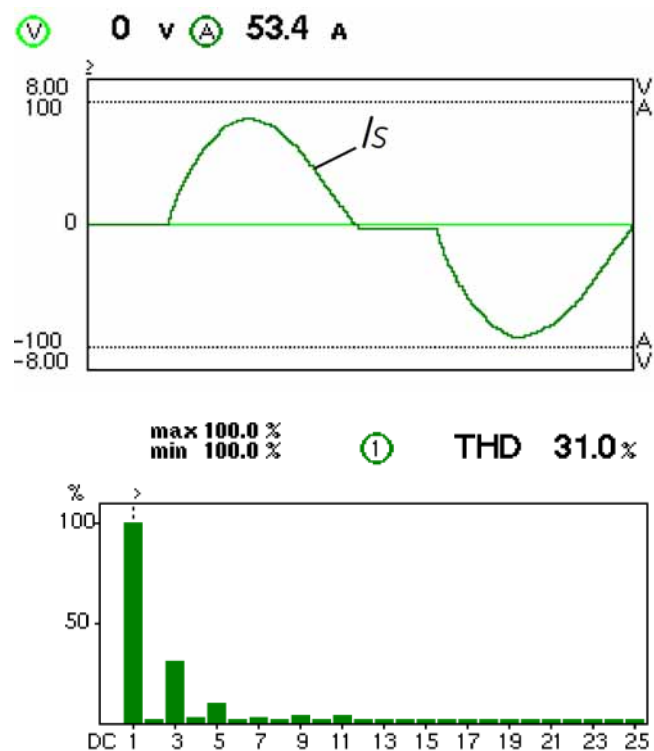


Рис. 5.9. Тепловий режим при фазовому регулюванні $VS2$
без АКФС

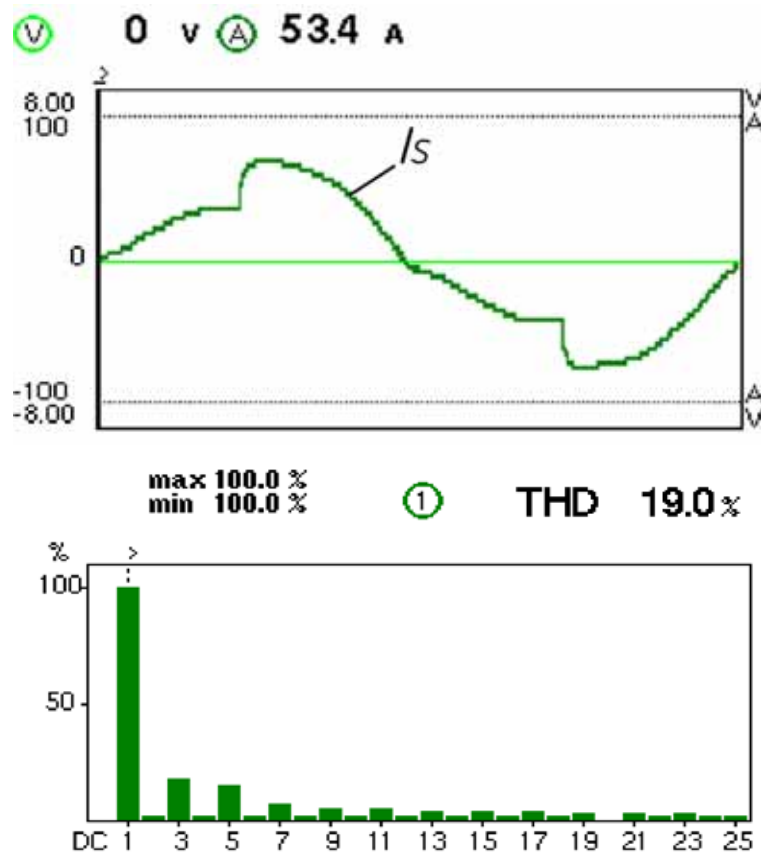


Рис. 5.10. Тепловий режим при фазовому регулюванні $VS1$ та $VS2$

Порівнюючи дані, наведені в табл. 4.3 з даними математичного моделювання (рис. 4.26 – 4.28) можна виявити розбіжності показників THD_I струму споживання I_s , обумовлені неможливістю використання більш якісного джерела живлення в заводських умовах, з його більш низьким гармонійним складом напруги та струму.

Запропонований підхід поєднує переваги СТ з відпайками та АКФС, знижує струм I_{C_MAX} з 85,5А до 56.3А в режимі розігріву фільєрної пластини (рис. 5.7 -5.8), а вартість такого ФКП стає прийнятною для подальшого використання в джерелах живлення електротермічних установках з виробництва БСТВ. В тепловому ж режимі, завдяки використанню ВО, коефіцієнт гармонік THD_I струму споживання знизився з 31% до 19%, що значно покращує якість спожитої енергії з мережі живлення.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Розроблено і виготовлено лабораторний стенд, який реалізує основний силовий електричний блок керування установкою УБСТВ з виробництва базальтового супертонкого волокна (система ТРС-СТ) та комп'ютерну систему керування, яка складається з автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора з програмним продуктом Siemens SIMATIC WinCC Runtime Professional, програмованого логічного контролера (ПЛК) серії S7-1200 Siemens, для комплексних досліджень системи, імітаційного моделювання електромагнітних процесів в системі, виявлення взаємозв'язків між електричними та технологічними параметрами системи.

2. Розроблено алгоритми нечіткого та нейро-нечіткого логічного контролера формування необхідного діаметра первинної нитки в установках з виробництва базальтового супертонкого волокна.

3. Розроблено і виготовлено експериментальний стенд і зразок для дослідження роботи однофазного ФКП, який містить вимірювальний блок, систему керування на основі релейного регулятора струму, драйвера керування IGBT транзисторами з гальванічною розв'язкою і силову частину ФКП - інвертора струму.

4. Розроблено і виготовлено експериментальну установку, яка містить гібридний фільтр (активний фільтр плюс пасивний фільтр), спеціальний трансформатор трансформатор з відгалудженнями і активне навантаження, для досліджень підвищення якості електроспоживання системи ТРС-СТ і випробувань в умовах діючого виробництва. Запропонований підхід формування гібридного фільтра дозволив знизити струм споживання в режимі розігріву фільтрної пластини, забезпечити прийнятний $THDi$, а також знизити вартість такого ФКП стає прийнятною для подальшого використання в джерелах живлення установок з виробництва БСТВ.

5. Розроблені алгоритми керування та фільтро-компенсуючі пристрої пройшли апробацію в умовах діючих виробництв на ВКП «Чернівецький завод

теплоізоляційних матеріалів» та ТОВ «Севєродонецький завод теплоізоляційних матеріалів».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розроблення принципів побудови систем автоматичного керування електротермічними установками на основі нейро-нечіткої логіки, за рахунок визначення взаємозв'язків між електричними та технологічними параметрами об'єкту керування з метою створення імітаційних моделей нейро-нечіткого логічного контролера в системі ТРС-СТ з гібридним ФКП, що підвищує енергоефективність виробництва і якість отриманих мінеральних волокнистих матеріалів.

При цьому отримано такі результати:

1. Встановлено, що установки з виробництва БСТВ занадто чутливі до змін, що вносяться внутрішніми і зовнішніми чинниками і є складними нелінійними системами з взаємопов'язаними та змінними у часі параметрами. Якість отриманого волокна залежить від геометрична точність первинних ниток, що залежить від закону та режиму роботи струмового контуру для нагріву фільтрального живильника, а застосування при цьому плавно-ступінчастого регулювання струму підвищує енергетичні показники джерел живлення електротермічних установок.

2. Проведено математичне та імітаційне моделювання системи регулятор струму – спеціальний трансформатор – активне навантаження, що враховують нелінійні властивості осердя трансформатора та нелінійну залежність температури нагрівального елементу установки в зоні утворення первинних волокон від величини первинного струму трансформатора для подальшої оптимізації багатоконтурної системи керування з взаємопов'язаними і нелінійними параметрами. Розбіжність між змодельованими та реальними графіками перехідних процесів такої системи

не більше 5%, що свідчатить про адекватність запропонованої математичної моделі.

3. Вперше за допомогою апарату нечіткої та нейро-нечіткої логіки розвинуто метод керування установкою з виробництва БСТВ, який полягає у формуванні необхідних величин сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і первинного струму стабілізації спеціального трансформатора в залежності від заданих технологічних параметрів, а функцію адаптера в системі нечіткого керування виконує адаптивна нейро-нечітка мережа ANFIS. Порівняльний аналіз розрахункових і експериментальних даних показав певні відхилення в діаметрі первинного волокна в межах 5%.

4. Визначено закономірності впливу режимів роботи системи з регулятором струму електротермічної установки на показники якості електроенергії мережі живлення, які показали високий рівень гармонік струму споживання (коефіцієнт гармонік струму доходить до 73% в діапазоні малих його значень і до 27% - 33% в діапазоні великих значень), що дало змогу розробити нові гібридні фільтро-компенсуючі пристрої для придушення вищих гармонік споживаного струму, що складаються із пасивного ЛМС – фільтра та АКФС (THDI струму споживання не перевищує 5%) або в поєднанні АКФС, що працює з трансформаторно-тиристорним виконавчим органом (зменшивши THDI із 74% до 9.5% в режимі розігріву фільтери, а в номінальному тепловому режимі із 31% до 19% – без АКФС та до 5% – з АКФС).

5. Порівняльний аналіз результатів електронного моделювання з експериментальними даними, отриманими при проведенні випробування експериментального зразка системи ТРС – СТ з ННЛК та гібридним ФКП в заводських умовах, підтвердив адекватність створених моделей.

6. Отримані наукові результати роботи знайшли практичне використання при розробці Інститутом електродинаміки НАН України і серійному виготовленні науково-технічною фірмою "ТЕМС" (м.Київ)

напівпровідникових тиристорних регуляторів струму РЕНАП-1Т-100ДТ, як основних складових системи тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор ТРС-СТ, створенні високоефективних систем керування установками УБСТВ 22 з виробництва базальтового супертонкого волокна, які пройшли апробацію в умовах діючих виробництв ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» та ТОВ «Севєродонецький завод теплоізоляційних матеріалів» (підтверджено актами впровадження).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тобольский Г.Ф. Минеральная вата изделия из неё. Челябинск, 1968. 235 с.
2. Власов Б.И., Воловник Б.Я., Иванов И.Н., Махова М.Ф., Чебаненко В.В. Сырьевая база для производства базальтовых волокон. Сырье, свойства расплавов и волокон, технология производства. Киев: ИПМ АН УССР, 1991. 820 с.
3. Сулейменов С. Стекла и стеклокристаллические материалы из горных пород Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1969. 228 с.
4. Сухарев М.Ф. Производство теплоизоляционных материалов и изделий: Учебник для подготовки рабочих на производстве. М.: «Высшая школа», 1969. 304 с.
5. Федоткин И.М., Новицкий А.Г. Тепломеханические процессы при производстве волокон из горных пород: *Новые огнеупоры*, 2003. №6. С. 48-52.
6. Новицкий А.Г., Мазур В. Л. Базальтовое сырьё. Технология выбора для производства волокон различного назначения: *Хімічна промисловість України*, 2003. №2. С. 47-52.
7. Хан Б. Х. Теория и практика процессов литья: *ИПЛ АН УССР*, 1967. С. 183-190.
8. Махова М.Ф. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий: М.: Теплоэнергетик, 2002. 170.
9. Гаврияюк, Н. С., Гаврияюк, В. П., Джигирис Д. Д. Применение фильерных питателей из жаростойкого сплава в производстве теплоизоляционного базальтового волокна. Промышленность полимерных, мягких кровельных и теплоизоляционных строительных материалов. *ВНИИЭСМ*, 1979. №10. С. 13-14.
10. Короткий курс навчання операторів, налагоджувальників, майстрів виробництва базальтових супертонких штапельних волокон (БСТВ):

Система керування якістю. Інструкція. ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів», 2014. 47 с.

11. Рожанский А.И. Козловский П.П. Режимные параметры получения базальтового штапельного волокна для фильтров гидротехнических сооружений: *Стекло и керамика*. 1969. №5. С. 19-21.
12. Гужавин О. В., Городецкая С. В. Получение непрерывного волокна из базальта: *Волокнистые материалы из базальтов Украины*. Техника, 1971. С. 45-47.
13. Хан Б.Х. и др. Затвердевание и кристаллизация каменного литья. «Наукова думка». Киев: 1969. 214 с.
14. Тобольский Г.Ф. Минеральная вата изделия из неё. Челябинск. 1968. 235 с.
15. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1976. Т.2. 576 с.
16. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974. 212 с.
17. Махова М.Ф., Мищенко Е.С., Иванов И.Н. Новая минерально-сырьевая база для производства супертонких волокон: *Разведка и охрана недр*. 1986. № 4. С.20-23.
18. Базальтоволокнистые композиционные материалы и конструкции. Сборник научных трудов. Киев: «Наукова думка».1980. 212 с.
19. Стяжкин В. П. Подейко П. П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна: *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2015. №12. С. 124-127.
20. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Адаптивная система регулирования тока трансформатора в электротермических установках плавления: *Тезисы СЭЭ*. 2009 г. С. 32-33.
21. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Тиристорные регуляторы тока в электротермических установках плавления и модификации материалов: *Праці ІЕД НАНУ*. 2008. № 20 . С. 59.
22. Яров В.М. Источники питания для электрических печей сопротивления: Чебоксары: 1982. 120 с.

23. Альтгаузен А.П., Бершицкий И.М., Бершицкий М.Д. и др. Электрооборудование и автоматика электротермических установок. Справочник. М.: Энергия. 1978. 303 с.
24. Голошубов В.І. Зварювальні джерела живлення. Навч. посіб. В. І. Голошубов. К.: Арістей, 2005. 448 с.
25. Порудоминский В.В. Устройства переключения трансформаторов под нагрузкой. М.: Энергия, 1974. 288 с.
26. Боос В.Я. Исследование и разработка регуляторов переменного напряжения с тиристорными ключами на первичной стороне трансформатора: автореф. дис. канд. техн. Наук: 05.09.12. Челябинск: ЧПИ, 1979. 22с.
27. Гельман М.В., Лохов С.П. Тиристорные регуляторы переменного напряжения. М.: Энергия, 1975. 140 с.
28. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. Электрические печи сопротивлешм. М.: Энергия, 1975. Часть 1, Изд. 2-е. 382 с.
29. Кислый П.С., Бадян А.Х., Киндышева В.С., Гарибян Ф.С. Высокотемпературные неметаллические нагреватели. Киев: Наукова думка, 1981. 160 с.
30. Окунь С.С. Сергеенков Б.Н., Киселев В.М. Трансформаторные и трансформаторно-тиристорные регуляторы-стабилизаторы напряжения. М.: Энергия, 1969. 183 с.
31. Иванчук Б.Н., Липман О.А., Рувинов Б.Я. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения: М.: Энергия, 1968. 112 с.
32. Кравец П.И. Исполнительные и регулирующие устройства прецизионных систем управления электронагревом: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.10/ Киевский политехнический институт. Киев, 1985. 16 с.
33. Разгонов Е.Л. Повышение эффективности систем электроснабжения многозонных электрических печей сопротивления с тиристорными регуляторами: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03/ Алма-Атинский энергетический институт. Алма-Ата, 1995. 20 с.

34. Грудская В. П. Исследование электромагнитных процессов в трансформаторно-тиристорных регуляторах напряжения: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.12/ ИЭД АН УССР. Киев, 1981. 22 с.
35. Собчук А.С. Тиристорно-дрессельное регулирование переменного напряжения: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.10/ ИЭД АН УССР. Киев, 1980. 23 с.
36. Алтунин Б.Ю., Кралин А.А. Исследование гармонического состава напряжения трансформаторно-тиристорных регуляторов в системе MATLAB: *"Актуальные проблемы электроэнергетики"*. 2001. С. 34-36.
37. Сучков В.А., Алтунин Б.Ю., Петров Ю.Н. Тиристорные стабилизаторы переменного напряжения с регулируемыми вольтодобавочными трансформаторами: Сб. рефератов, НИОКР, обзоров, переводов и депонированных рукописей. Серия "ЭЛ". 1985, вып. 09, № Д06423. 322 с.
38. Тиристорная преобразовательная техника в цветной металлургии. Никулин А.Д., Родштейн Л.С., Сальников В.Г., Бобков В.А. М.: Металлургия, 1983. 125 с.
39. Алтунин Б.Ю. Трансформаторно-тиристорные регуляторы напряжения с разделением регулируемой и нерегулируемой мощностей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.12/ Горький ГПИ. Горький, 1972. 20 с.
40. Липковский К.А. Трансформаторно-ключевые исполнительные структуры преобразователей переменного напряжения: Киев: Наук. Думка, 1983. 216 с.
41. Липківський К.О. Халіков, А.Г. Фазове регулювання напруги ключами із природною комутацією та її дослідження в системі MATLAB: *Технічна електродинаміка*. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". 2002. С. 32-43.
42. Липковский К.А. Трёхфазные трансформаторно-тиристорные регуляторы и стабилизаторы дискретного действия: Оптимизация полупроводниковых устройств энергетической электроники: *"Наукова думка"*. 1980 С. 171-176.

43. Богрый В.С., Русских А.А. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. М.: Энергия, 1972. 184 с.
44. Иванушкин В.А., Сарапулов С.Ф., Шымчак П.П. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. Щецин, 2000. 310 с.
45. Б.Ю. Алтунин, И.В. Блинов, А.А. Кралин, Н.Г. Панкова. Электротехнические расчеты в системе компьютерной математики MATLAB SIMULINK. Н. Новгород: Учеб. пособие НГТУ, 2005. 102 с.
46. Алтунин Б.Ю. Макромоделирование тиристорных переключающих устройств силовых преобразовательных трансформаторов. Н. Новгород: Учеб. пособие. Нижегород. гос. техн. ун-т, 1998. 108 с.
47. Фильц Р.В. Семчишин О.В. Цифровая математическая модель обобщенного статического электромагнитного преобразователя энергии со стержневым магнитопроводом: *Изв. вузов. Энергетика*. 1987. №9. С.25-29.
48. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле М.: Высшая школа, 1986, 263 с.
49. Алтунин Б.Ю., Кралин А.А. Моделирование трансформаторно-тиристорных устройств с дискретным управлением при использовании коммутационных процессов: мат. Научно-техн. конференция "Актуальные проблемы электроэнергетики". Н. Новгород: Тез. докл. НГТУ, 20 с.
50. Блинов И.В., Кралин А.А., Н.Г.Панкова. Информационное сопровождение учебного процесса по электротехнике с использованием системы MATLAB SIMULINK: Учеб. пособие. Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород: Волжская гос. инж.-педагогич. Академия, 2003. 320 с.
51. Попов В.А. Преобразователи электрической энергии с безреактивным сглаживанием пульсаций выпрямленного напряжения: *Технічна електро-динаміка*. 2000. Ч 7. С. 56-63.
52. Иванушкин В.А., Сарапулов С.Ф., Шымчак П.Н. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. Щецин, 2000. 72 с.

53. Гулятьев А.К. Визуальное моделирование в среде MATLAB. СПб.: ПИТЕР, 2000. 320 с.
54. Цыпкин, Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1988. 72 с.
55. Система с нечеткой логикой регулирования режимов работы установки по производству базальтового супертонкого волокна/ И. В. Волков, В.П. Стяжкин, О.А. Зайченко, П.П. Подейко. *Вестник НТУ "ХПИ"*. 2017. Вып. 27 (1249). С. 379-383.
56. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 719 с.
57. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. Серия «Библиотека профессионала». М.: Солон-ПРЕСС, 2006. 456 с.
58. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия -Телеком, 2006. 452 с.
59. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия - Телеком, 2007. 288 с.
60. Щерба А.А, Кирик В.В. Системы с нечеткой логикой регулирования электроэнергетических режимов. К.: Национальная академия наук Украины Институт электродинамики, 2011. 330 с.
61. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Л. Заде. Перевод на русский язык. М.: Мир, 1976. 168 с.
62. Поспелов Д.А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука., 1986. 312 с.
63. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: Радіоаматор, 2008. 971 с.

64. Федоткин И.М. Влияние технологических параметров на диаметр и качество базальтового волокна: *Химическое машиностроение*. 1987. №46. С. 33-39.
65. Батыршин И. З., Недосекин А. О., Стецко А. А., Тарасов В. Б., Язенин А. В., Ярушкина Н. Г. Нечеткие гибридные системы. Теория и практика. Под ред. Н. Г. Ярушкиной. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 208 с.
66. Хайкинг, Саймон, Нейронные сети. Полный курс, 2-е изд., Пер. с англ. М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2006. 1104 с.
67. Войтенко В.П. Хоменко М.А. Нейроидентификация в промышленных регуляторах: *Технічна електродинаміка*. Тем. вип.: Силова електроніка та енергоефективність. 2008. Ч. 2. С. 60-61.
68. Круглов В.В., Борисов В.В. Гибридные нейронные сети. М.: Горячая линия - Телеком, 2002. 382 с.
69. Jyh-Shing R Jang. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. vol. 23, no. 3, 1993. P. 665–685.
70. Jovanovic BB, Reljin Irini S, Reljin Branimir. Modified ANFIS architecture - Improving efficiency of ANFIS technique. *Neurel: Seventh seminar on neural network applications in electrical engineering, proceedings*. 2004. P. 215-220.
71. Jie Yang. Is bias dispensable for fuzzy neural networks. Jie Yang, Wei Wu. *Fuzzy Sets and Systems*. 2007. № 158. P. 2757-2762.
72. Moon G. J. A Method of Convening a Fuzzy Syslcm to a Two-Layered Hierarchical Fuzzy System and Its Run-Time Efficiency: *Applied Mathematical Modelling*.. January 2001. Volume 25, issue 1. P. 51-62.
73. Жежеленко И.В, Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1994. 272 с.
74. Сальников В.Т., Шевченко В.В. Эффективные системы электроснабжения предприятий цветной металлургии. М: Металлургия, 1986. 320 с.

75. Волков И.В., Акинин К.П., Исаков Г.В. Сравнительный анализ способов фильтрации токов, потребляемых выпрямительными установками: *Техн. електродинаміка*. 1999. №1. С 23-27.
76. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. К.: Наукова думка, 2005. 210 с.
77. Jos Arrillaga, Neville R. Watson. Power system harmonics. Second edition. Chicheste. John Wiley and Sons Ltd. The Atrium. Southern Gate. 2003. 399 p.
78. Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Waynebeaty H. Electrical power systems quality. New York: McGraw-Hill. 1996. 265 p.
79. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.ups-info.ru/for_partners/library/probleme_vesshih_garmonik_v_sovremenneh_sistemah_i/
80. Жаркин А.Ф., Новский В.А., Палачев С.А. Нормативно-правовое регулирование качества электрической энергии. Анализ украинских и европейских законодательных актов и нормативно-технических документов. Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2010. 167 с.
81. Жаркий А.Ф. Новский В.А., Палачев С.А. Европейская практика нормативно-правового обеспечения предельных уровней гармоник напряжения в электрических сетях. *Техн. електродинаміка*. Темат. вип. Силова електрошкка та енергоефективність. 2008. Ч. I. С. 89-92.
82. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наук. думка. 1985. 268 с.
83. ДСТУ ІЕС 61000-3-12:2009. Електромагнітна сумісність. Частина 3-12. Норми. Норми на силу струму гармоніки, створені обладнанням із номінальним входним струмом силою струму понад 16 А та до 75 А включно на фазу, підключеним до низьковольтних електропостачальних систем загальної призначеності. Держспоживстандарт України. 2014. 17 с.
84. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учеб. пособие. СПб.: КОРОНА принт, 2001. 320 с.

85. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2007. 288 с.
86. Жаркін А.Ф., Пазєєв А.Г. Однофазні активні коректори коефіцієнта потужності для багатомодульних систем електроживлення. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України. 2014. 212 с.
87. Комаров Н.С. Качество электроэнергии в низковольтных распределительных сетях и средства его повышения. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2000. С. 69-86.
88. Комаров М.С., Головка О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П. Энергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти: *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. № 6. С. 278-286.
89. Комаров М.С., Спірін В.М., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В. Оптимізація електромагнітних вузлів – реакторів з різними матеріалами осердь для активних коректорів форми струму: *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. №4(2). С. 71-74.
90. Расчет емкости конденсатора в цепи постоянного тока активного фильтра гармоник. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/224>.
91. Bhattacharya S. Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications: *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1997. Vol. 33. № 3. P. 732-747.
92. Волков И.В., Стяжкин В.П., Подейко П.П. Подавление гармоник тока питания мощных однофазных нагрузок: *Технічна електродинаміка*. 2019. №3. С. 51-59.
93. Шрейнер Р.Т. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода: *Електричество*. 2000. №3. С. 46-54.
94. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility. Part 3-2: Limits. Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16\text{A}$ and $\leq 75\text{A}$ per phase. 2019. 2 p.

95. M. Levin, I., Volkov. Universal Harmonic Mitigating system: pat. USA 6127743; pub. 10.03.2000.
96. Колб А.А. Гибридные фильтры в устройствах управления качеством электроэнергии: *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2012. Вип. 3/2012 (19). С. 250-253.
97. Трансформатор сварочный ТВК-75 УХЛ4 для контактных электросварочных машин. Паспорт. 8 с.

ДОДАТОК А

Список опублікованих праць за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Тиристорные регуляторы тока в электротермических установках плавления и модификации материалов. *Праці ІЕД НАН України*. 2008. № 20. С. 59. (Особистий внесок – запропоновано застосування напівпровідникових регуляторів струму для електротермічних установок плавлення та модифікації матеріалів) .
2. Комаров М.С., Головка О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П. Энергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. № 6. С. 278–286. (Особистий внесок – розроблено активний коректор форми струму з релейним несинхронізованим способом керування силовими транзисторами).
3. Стяжкин В.П., Зайченко О.А., Подейко П.П., Гаврилюк С.И., Рыжков А.М. Автоматизированная система управления электроприводами мостового крана-манипулятора для установки дезактивации металлов. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2015. №19 (95). С.71–74. (Особистий внесок – розроблено автоматизовану систему керування електроприводами мостового крана-маніпулятора для установки дезактивації металів).
4. Стяжкін В.П., Комаров М.С., Подейко П.П. Підвищення енергетичних показників системи тиристорний регулятор струму – трансформатор живлення в електротермічних установках. *Електротехніка та зв'язок*. 2016. №5(94). С. 20–23. (Особистий внесок – визначено гармонійний склад вхідного струму

джерел живлення електротермічними установками та розроблено імітаційну модель системи з активним коректором форми струму).

5. Комаров М.С., Спірін В.М., Губаревич В.М., Подейко П.П., Маруня Ю.В. Оптимізація електромагнітних вузлів – реакторів з різними матеріалами осердь для активних коректорів форми струму. *Електротехніка і електромеханіка*. 2016. №4 (2). С. 71–74. (Особистий внесок – проведено дослідження та розрахунки оптимального варіанту матеріалу осердь реакторів активних фільтрів).

6. Волков И.В., Стяжкин В.П., Зайченко О.А., Подейко П.П. Система с нечеткой логикой регулирования режимов работы установки по производству базальтового супертонкого волокна. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2017. Вип. 27 (1249). С. 379–383. (Особистий внесок – проведено аналіз основних факторів, що впливають на процес волокноутворення при виробництві базальтового супертонкого волокна та побудовано систему регулювання і стабілізації діаметру первинних ниток на базі нечіткої логіки).

7. Волков І.В., Стяжкін В.П., Подейко П.П. Топологія фільтро-компенсуючих пристроїв для покращення спектру вхідного струму джерел живлення в електротермічних установках з виробництва базальтового супертонкого волокна. *Технічна електродинаміка*. 2018. №6. С. 85-88. (Особистий внесок – розроблено гібридні фільтро-компенсуючі пристрої для електротермічних джерел живлення, проведено математичне моделювання таких пристроїв і експериментальну перевірку їх ефективності).

Наукові праці апробаційного характеру:

8. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Адаптивная система регулирования тока трансформатора в электротермических установках плавления. *Технічна електродинаміка*: мат. Міжнародної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", Алушта, Крим, 21 – 26 вересня 2009. Ч. 5. С. 109–110 (форма участі – публікація тез та усна доповідь).

9. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Повышение качества регулирования в системе регулируемый источник тока – установка электрошлакового

переплава. *Технічна електродинаміка*: мат. Міжнародної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", Алушта, Крим, 19 – 26 вересня 2011. Ч. 2. С.287–292 (форма участі – публікація тез та усна доповідь).

10. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна. *Вестник НТУ "ХПИ"*: мат. Об'єднаної науково-технічної конференції "Силовая електроніка та енергоефективність", Одеса, 7 вересня 2015. № 12 (1121). С. 124–127 (форма участі – публікація тез та усна доповідь).

ДОДАТОК Б

Лабораторний макет АКФС та впровадження системи ТРС-СТ з ННЛК

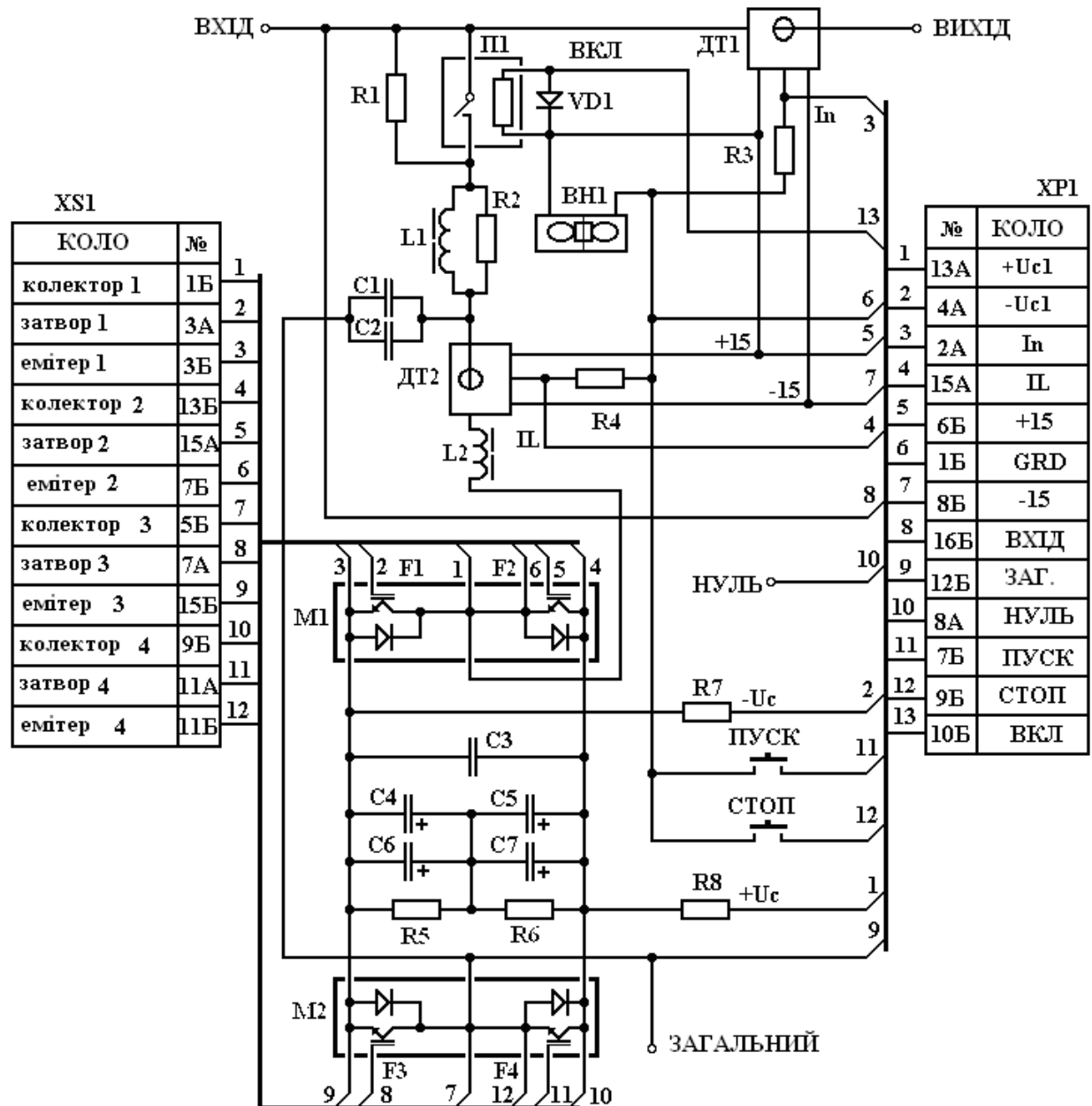


Рис. Б1 Схема електрична принципова силової частини АКФС системи керування

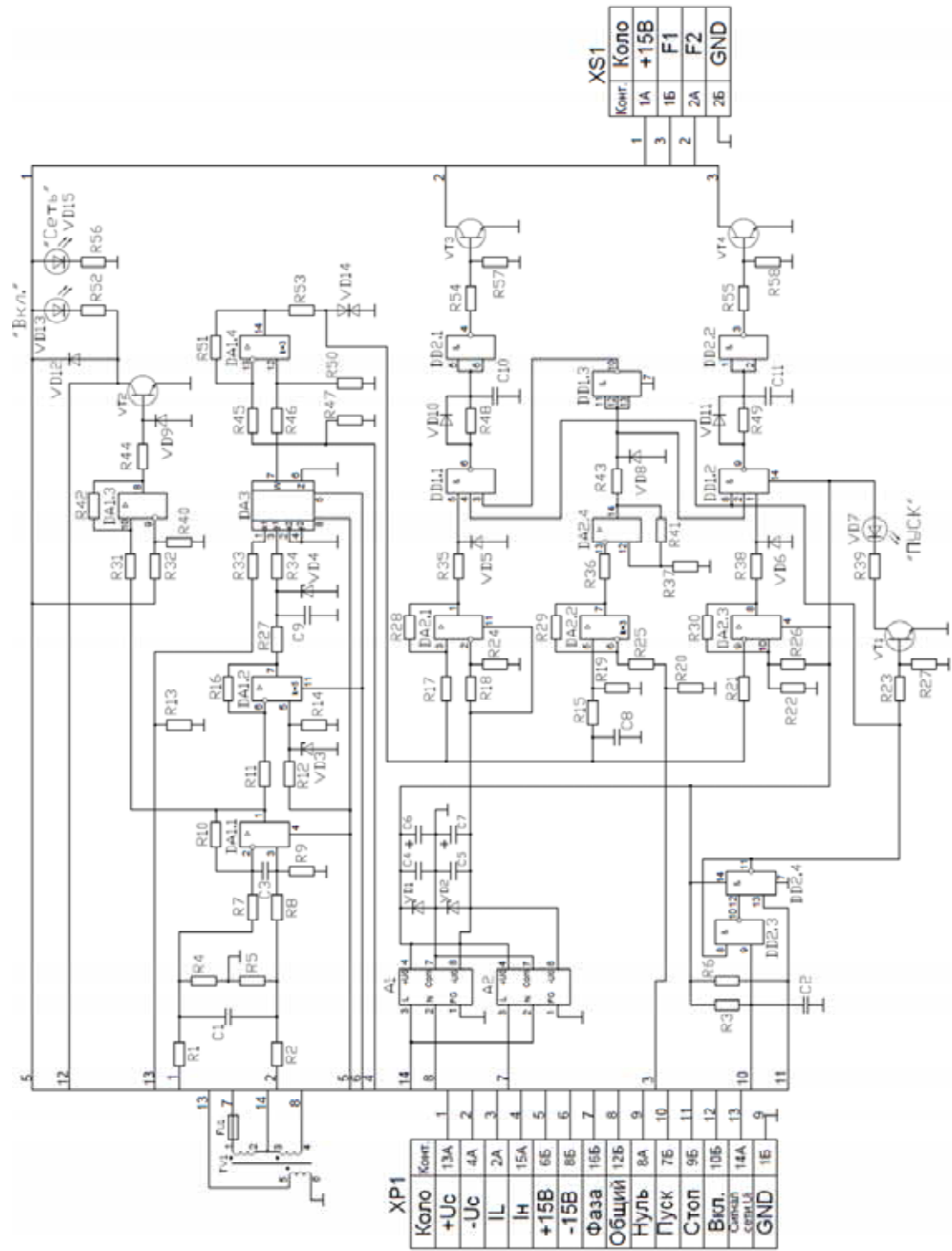


Рис. Б2 Схема электрична принципова керування АКФС ФКП (ВО та АКФС)

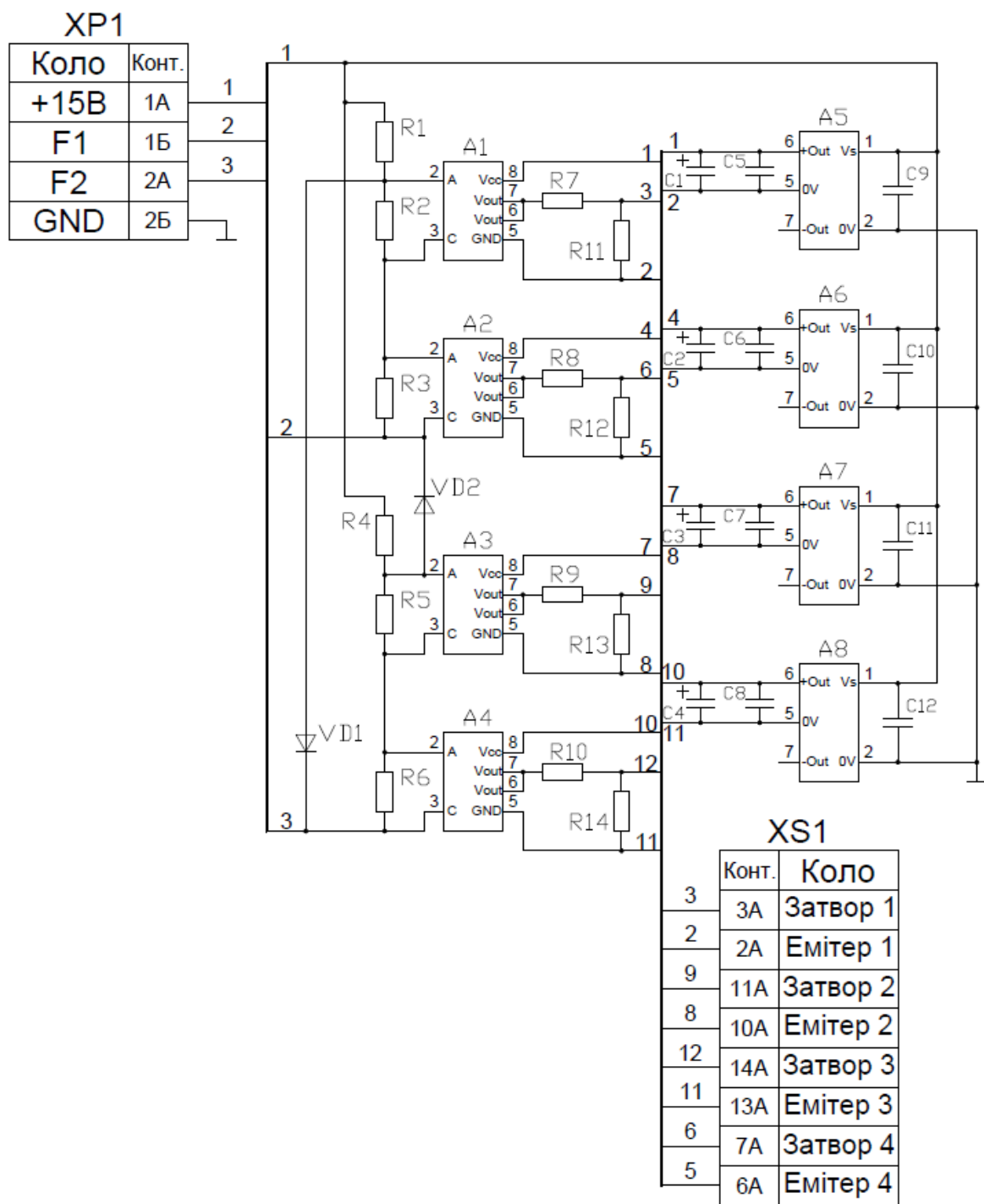


Рис. Б3 Схема електрична принципова драйвера IGBT

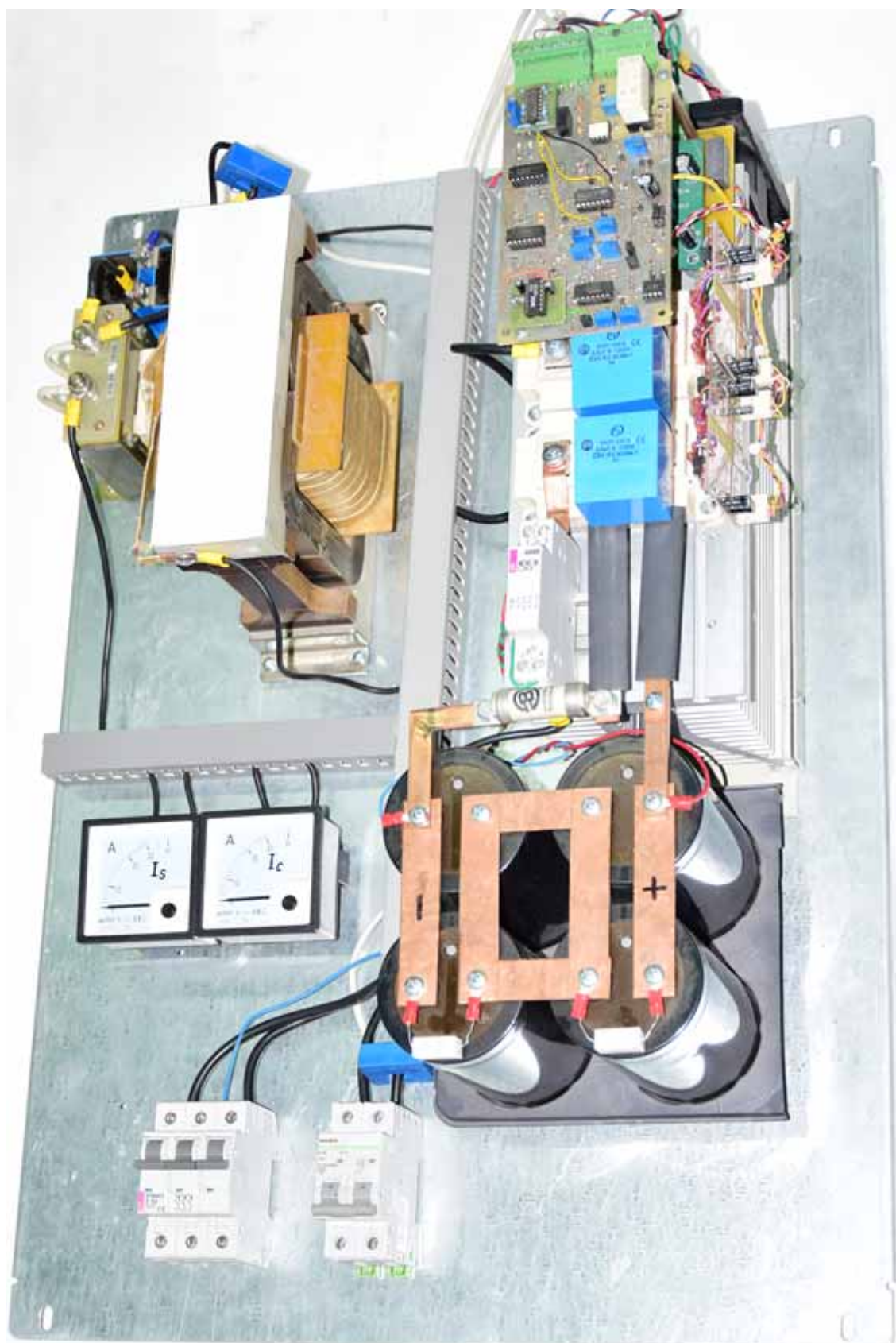


Рис. Б4 Фото лабораторного макету АКФС потужністю 10 кВА



а

б

Рис. Б5 Фото тиристорного регулятора струму РЕНАП – 1Т:
а) $I_{НОМ} = 100 \text{ A}$; б) $I_{НОМ} = 200 \text{ A}$



Рис. Б6 Фото шафи керування установкою УБ СТВ 22 з ННЛК

ДОДАТОК В

Акти використання результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ ВКП «Чернівецький
завод теплоізоляційних матеріалів»

С.В. Тимчишин
2019 г.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор Інституту електродинаміки
НАН України, академік НАН України

О.В.Кириленко
2019 г.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи м.н.с. Інституту електродинаміки НАН України **Подейка Павла Петровича** «Системи автоматичного керування електротермічними установками на основі нейро-нечіткої логіки в умовах неповної визначеності технологічних характеристик»

Цим актом підтверджуємо, що розроблений в кандидатській дисертації метод керування установкою для виробництва базальтового супертонкого волокна з використанням нечіткої та нейро-нечіткої логіки, який полягає у формуванні необхідних величин сигналів керування – швидкості витягування первинного волокна і первинного струму стабілізації спеціального трансформатора, в залежності від заданих технологічних параметрів, був використаний ТОВ ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів» при синтезі систем керування установками з виготовлення базальтових супертонких волокон УБСТВ-42 і випробуваний на діючому обладнанні.

В системах керування були використані розроблені в ІЕД НАН України та виготовлені ТОВ «НТФ «ТЕМС» регулятори напруги РЕНАП-1Т-100ДТ, призначені для автоматичного регулювання струму в первинних обмотках трансформаторів ТВК-75 (струму філь'єрного живильника) та підтримання температури філь'єри на рівні, необхідному для ефективного та точного підтримання довжини та діаметру первинного волокна, незалежно від зміни параметрів самої філь'єри і параметрів мережі живлення.

Застосування синтезованої системи керування і регуляторів струму РЕНАП-1Т-100ДТ у складі установок з виготовлення базальтових супертонких волокон УБСТВ-42 дозволило підвищити продуктивність обладнання, збільшити якість вихідної продукції (теплоізоляційного матеріалу), зменшити абсолютні і відносні показники споживання електроенергії. Все це підтвердило придатність регуляторів струму РЕНАП-1Т-100ДТ для їх подальшого застосування та експлуатації в складі установок з виготовлення базальтових супертонких волокон на підприємствах будівельної індустрії.

Зам. директора ТОВ ВКП
«Чернівецький ЗТМ»

 І.І. Гнатович

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Севєродонецький завод теплоізоляційних виробів»



О.Ю. Горячев

2019 г.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту електродинаміки НАН України, академік НАН України



О.В.Кириленко

2019 г.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи м.н.с. Інституту електродинаміки НАН України **Подейка Павла Петровича**
«Системи автоматичного керування електротермічними установками на основі нейро-нечіткої логіки в умовах неповної визначеності технологічних характеристик»

Цим актом підтверджуємо, що розроблені в кандидатській дисертації П.П. Подейка імітаційні моделі системи регулятор струму – спеціальний трансформатор – активне навантаження, які враховують нелінійні властивості осердя трансформатора та нелінійну залежність температури нагрівального елементу установки в зоні утворення первинних волокон від величини первинного струму трансформатора та метод керування установкою для виробництва базальтового супертонкого волокна з використанням нечіткої та нейро-нечіткої логіки були використані ТОВ «Севєродонецький завод теплоізоляційних виробів» при синтезі систем керування установками з виготовлення базальтових супертонких волокон і випробувані на діючому обладнанні.

В ході випробувань системи встановлено закономірності впливу режимів роботи електротермічної установки на показники якості електроенергії мережі живлення, що дозволило синтезувати фільтро-компенсуючі пристрої для придушення вищих гармонік споживаного струму, які наведені в дисертаційній роботі.

В системах керування були використані розроблені в ІЕД НАН України та виготовлені ТОВ «НТФ «ТЕМС» регулятори напруги РЕНАП-1Т-100ДТ, призначені для автоматичного регулювання струму філь'єрних живильників та підтримання температури філь'єри на рівні, заданому технологічним процесом. Застосування синтезованої системи керування і регуляторів РЕНАП-1Т-100ДТ у складі установок з виготовлення базальтових супертонких волокон дозволило збільшити якість вихідної продукції, зменшити абсолютні і відносні показники споживання електроенергії.

Гол. енергетик ТОВ

«Севєродонецький завод теплоізоляційних виробів»



С.І. Чепіга