

Дуба І.Е.

Одеський національний політехнічний університет

СУЧАСНА ЦИФРОВА БАГАТОЗВ'ЯЗНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ОСНОВНИМ КОНТУРОМ – ПОЛОЖЕННЯ ПЛАЗМОВОГО ШНУРА – УСТАНОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ ТОКАМАК

ТОКАМАК – пристрій для здійснення реакції термоядерного синтезу в гарячій плазмі в квазістаціонарному режимі, причому плазма створюється в тороїдальній камері і її стабілізує магнітне поле. Призначення установки – перетворення внутрішньоядерної енергії в теплову й далі в електричну. Саме слово «ТОКАМАК» є аббревіатурою від назви «тороїдальна камера магнітна», проте творці установки замінили наприкінці «г» на «к», щоб не викликати асоціацій з чимось магічним.

Атомну енергію (і в реакторі, і в бомбі) людина отримує, розділяючи ядра важких елементів на більш легкі. Енергія, яка припадає на нуклон, максимальна для заліза (так званий «залізний максимум»), а так як максимум посередині, то енергія буде виділятися не тільки під час розпаду важких, а й під час з'єднання легких елементів. Цей процес називається термоядерним синтезом, він відбувається у водневій бомбі й термоядерному реакторі. Термоядерних реакцій, реакцій синтезу, відомо багато. Джерелом енергії можуть бути ті, для яких є недороге паливо, причому можливі два принципово різні шляхи запуску реакції синтезу.

Ключові слова: ТОКАМАК, атомна енергія, математична модель, перехідний процес, плазмовий шнур.

Постановка проблеми. Сучасна цифрова багатозв'язна система управління основним контуром – положенням плазмового шнура-установки термоядерного синтезу ТОКАМАК. Відомо, що сталість положення шнура визначає надійність функціонування всієї установки. При сучасному розвитку техніки автоматизації й математичного моделювання управлінням конфігурації магнітного поля вдалося збільшити стійкість положення плазми до можливості технічної реалізації.

З іншого боку, ТОКАМАК не виділяє ніяких шкідливих речовин – ні хімічних, ні радіоактивних. Але що станеться, якщо все-таки плазма витече з реактора? Ясно, що в разі аварії ТОКАМАК набагато менш небезпечний, ніж атомний реактор, і не набагато небезпечніший, ніж станція на вугіллі.

По-перше, атомний реактор містить у собі запас пального на роки нормальної роботи. Це великий плюс для підводного човна або космічного польоту, але це ж створює принципову можливість великої аварії. У ТОКАМАК запасу «пального» немає.

По-друге, оскільки під час реакції синтезу виділяється більше енергії, то при рівній потужності самі кількості речовин будуть меншими: плазма в ТОКАМАК «важить» менше ніж сто грамів, а скільки важить активна зона реактора?

І нарешті, використаний у ТОКАМАК тритій має маленький період напіврозпаду й сам по собі не отруйний.

Отже, можна сподіватися, що досягнута висока надійність технологічного обладнання, висока надійність засобів автоматизації та висока якість керування передусім положенням плазмового шнура дасть змогу перейти від експериментів до промислового використання термоядерної енергії. При цьому, можливо, вигідніше за все будувати невеликі установки, які б за рахунок високої надійності обладнання гарантовано окупалися. А можливий витік плазми за періодом окупності не має великого значення: поряд можна побудувати нову, більш сучасну установку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження щодо установок ТОКАМАК проводяться досить давно. Сьогодні експлуатація установок неможлива, проте спроби досягнути використання ТОКАМАК як альтернативного виду енергії проводяться.

Дослідження ТОКАМАК проводились в обмеженій кількості робіт.

Так, математична модель ТОКАМАК розглянута в роботі А.А. Стопакевич [1, с. 62–65]. У працях Д.В. Орлинського [2, с. 32–36] та Л.Е. Захарова, В.Д. Шафранова [3, с. 79–84] показані основні характеристики плазми.

Постановка завдання. Керування та застосування системи установки термоядерного синтезу ТОКАМАК.

Виклад основного матеріалу дослідження. Зовнішній вигляд ТОКАМАК показаний на рис. 1.

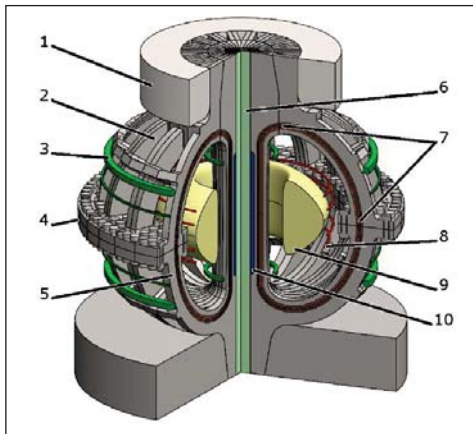


Рис. 1. Зовнішній вигляд ТОКАМАК:

1. Силоне кільце; 2. Силкові тороїдальні ребра;
3. Полоїдальна надпровідна котушка. 4. Роз'єм тороїдальних ребер і котушок; 7. Тороїдальний провідник; 8. Коригувальні полоїдальні котушки;
9. Плазмовий об'єм; 10. Центральний індуктор

Атомну енергію (і в реакторі, і в бомбі) людина отримує, розділяючи ядра важких елементів на більш легкі. Енергія, яка припадає на нуклон, максимальна для заліза (так званий «залізний максимум»), а так як максимум посередині, то енергія буде виділятися не тільки під час розпаду важких, а й під час з'єднання легких елементів. Цей процес називається термоядерним синтезом, він відбувається у водневій бомбі й термоядерному реакторі. Термоядерних реакцій, реакцій синтезу, відомо багато. Джерелом енергії можуть бути ті, для яких є недороге паливо, причому можливі два принципово різні шляхи запуску реакції синтезу.

Перший шлях – «вибуховий»: частина енергії витрачається на те, щоб привести в необхідний початковий стан дуже невелику кількість речовини, відбувається реакція синтезу, енергія, що виділилася, перетворюється в зручну форму. Власне, це воднева бомба, тільки вагою в міліграм. Як джерело вихідної енергії використовувати атомну бомбу не можна, вона не була «маленькою». Тому передбачалося, що міліметрова таблетка з дейтерій-тритієвого льоду (або скляна сфера зі стислою сумішшю дейтерію і тритію) буде опромінюватися з усіх боків лазерними імпульсами. Щільність енергії на поверхні повинна бути при цьому такою, щоб верхній шар таблетки, що перетворився в плазму, виявився нагрітий до температури, при якій тиск на внутрішні шари й сам нагрів внутрішніх шарів таблетки стануть достатніми для реакції синтезу. При цьому імпульс має бути настільки коротким, щоб речовина, що перетворилася за наносекунду в плазму з температурою в десять мільйонів градусів, не встигала розлетітися, а давила на вну-

трішню частину таблетки. Ця внутрішня частина стискається до щільності, в сто разів більшої, ніж щільність твердих тіл, і нагрівається до ста мільйонів градусів.

Другий шлях: вихідні речовини можна нагріти відносно повільно – вони перетворяться в плазму, а потім к неї можна будь-яким способом вводити енергію, аж до досягнення умов початку реакції. Для протікання термоядерної реакції в суміші дейтерію з тритієм та отримання позитивного виходу енергії (коли енергія, що виділилася в результаті термоядерної реакції, виявиться більшою за енергію, витрачену на здійснення цієї реакції) потрібно створити плазму зі щільністю хоча б 10^{14} частинок/см³ (10–5 атм.) і нагріти її приблизно до 10⁹ градусів, при цьому плазма стає повністю іонізованою.

Конструкція. Пристрій виглядає так: тороїдальна камера надягнута на сердечник трансформатора, плазма в камері є, по суті, обмоткою трансформатора. З камери відкачують атмосферне повітря, а потім напускають суміш газів, що містять ті атоми, які братимуть участь у синтезі. Потім по первинній обмотці трансформатора пропускають імпульс струму, достатній для того, щоб у вторинній «обмотці» (тобто в газі) стався пробій і почав текти струм. Під час протікання струму плазма нагрівається, але одним цим методом не вдається її нагріти вище за 20 млн. градусів, оскільки зі зростанням температури опір плазми й виділення тепла зменшуються. Струм, що тече по плазмі, створює своє магнітне поле, яке стискає плазму, збільшуючи її температуру й концентрацію, але цього ще недостатньо для досягнення критерію Лоусона, тому плазму треба нагрівати додатково. Цей додатковий нагрів може досягатися електромагнітним випромінюванням частотою від 10 МГц до 10 ГГц, потоком нейтральних атомів з високою енергією – близько 0,1 МеВ – або стисненням зовнішнім змінним магнітним полем.

Плазма «живе» в магнітному полі. Постійне поле можна було б створити постійним магнітом, хоча в них є свої обмеження, але в цьому випадку питання про постійні магніти не виникає, так як потрібні змінні поля, тому використовується електромагніт, але під час протікання струму по його обмотці виділяється тепло. Коли це відбувається в плазмі, тепло використовується, а в обмотці – витрачається даремно, його треба відводити й витрачати енергію, призначену для забезпечення протікання струму по обмотках, при цьому на роботу електромагнітів витрачалася б помітна

частка отриманої енергії, а обмотки будуть робити з надпровідних матеріалів.

Однією з важливих проблем ТОКАМАК є забезпечення чистоти плазми, так як домішки, що потрапляють у плазму, припиняють реакцію. Потрапляють вони в плазму зі стінок камери, так як робочі речовини, що запускають в обсяг, можна очистити, а стінка камери працює в таких умовах, що проблема – з чого і як її зробити – отримала власну назву – «проблема першої стінки». Усе, що виходить із плазми (нейтрони, протони, іони й електромагнітне випромінювання в діапазоні від інфрачервоного до гамма-променів), руйнує стінку, продукти руйнування потрапляють у плазму. Проблема стійкості та проблема «нешкідливості» вирішуються в протилежних напрямках, тому що, чим важчий іон, тим він шкідливіший (допустима концентрація танталу й вольфраму в сто разів менша, ніж вуглецю), а більшість стійких матеріалів створено на основі саме важких металів. Свого часу великі надії покладалися на вуглецеві матеріали та композити на основі карбідів, боридів і нітридів. Розглядалися пористі й профільовані (з ребрами або голками) стінки. І взагалі важко сказати, що не

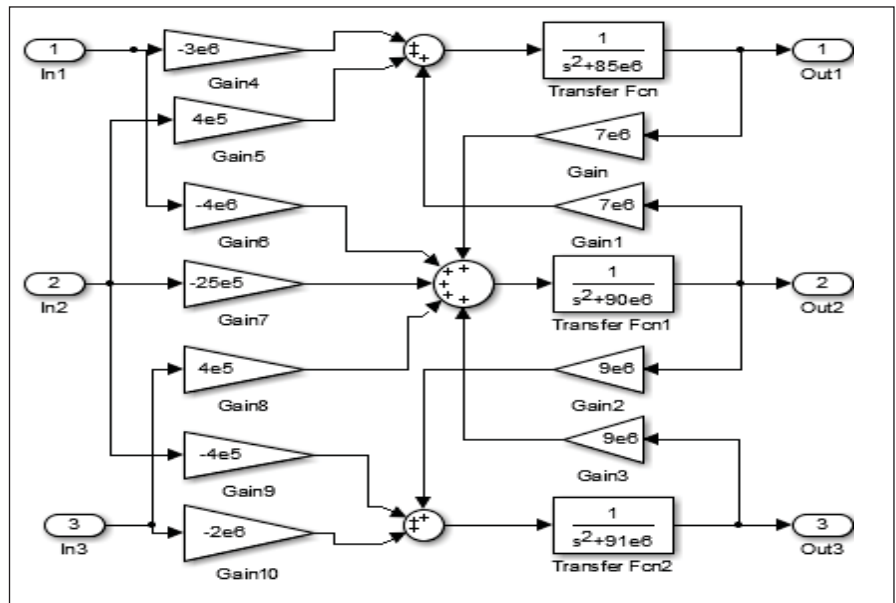


Рис. 2. Структурна схема моделі динаміки плазмового шнура в установці ТОКАМАК

розглядалося, але в підсумку як матеріал стінок зараз обраний берилій.

Є три можливості.

Перша можливість – розігнати в прискорювачі пучок іонів і бомбардувати ними тверду мішень. Цей шлях неефективний: енергія витрачається на іонізацію атомів мішені, а не на зближення ядер.

Другий шлях – направити назустріч один одному два прискорених пучки іонів, але й цей шлях неефективний через низьку концентрацію ядер у пучках і малий час їх взаємодії.

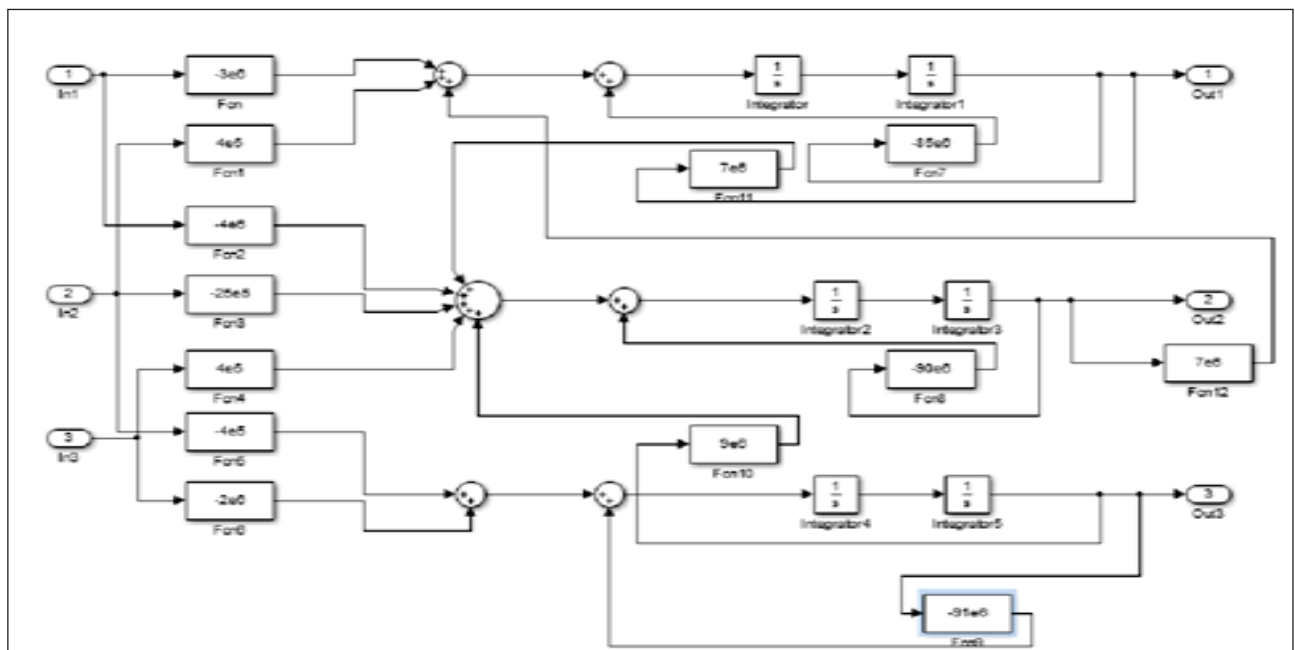


Рис. 3. Структурна схема моделі динаміки в просторі станів

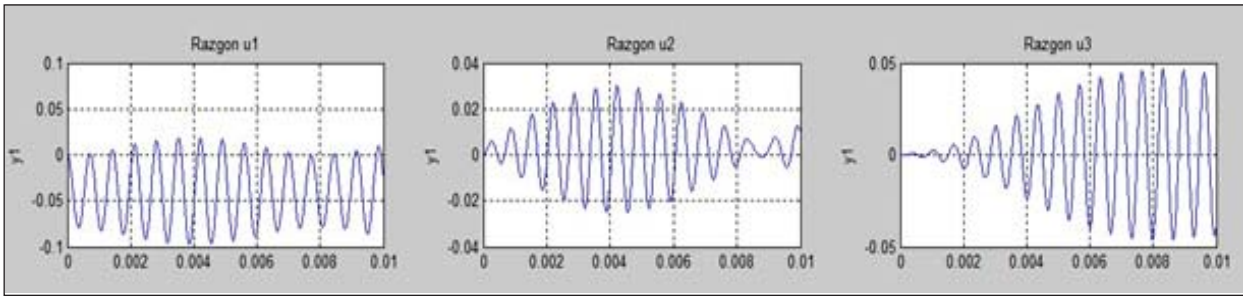


Рис. 4. Розгінні характеристики по першому виходу й подачі сигналів по всіх трьох входах

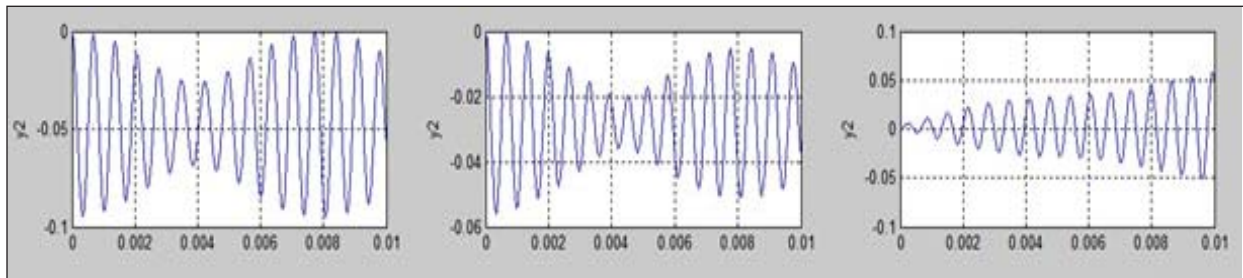


Рис. 5. Розгінні характеристики по другому виходу й подачі сигналів по всіх трьох входах

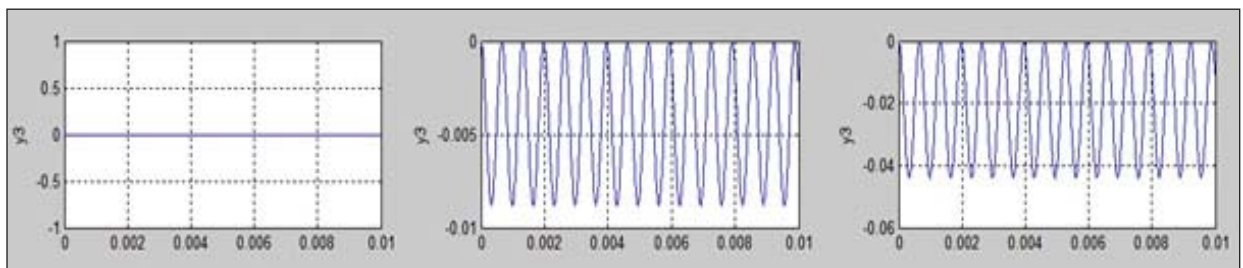


Рис. 6. Розгінні характеристики по третьому виходу й подачі сигналів по всіх трьох входах

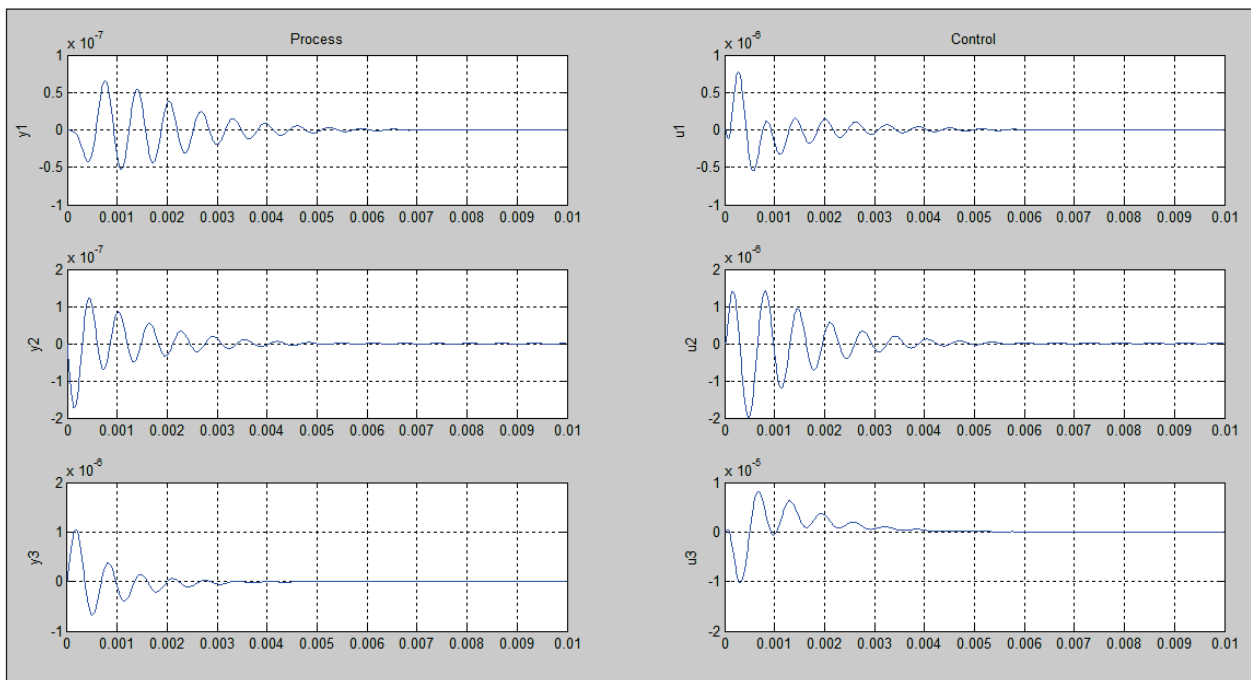


Рис. 7. Перехідні процеси

Третій шлях – нагрівання речовини до температур порядку 100 млн. градусів. Чим вища температура, тим вища середня кінетична енергія частинок і тим більша їх кількість може подолати кулонівський бар'єр. Цей метод і реалізований у ТОКАМАК.

Керування ведеться за допомогою керуючих обмоток, що генерують тороїдальне магнітне поле вздовж орт. Збурення мають імпульсну природу і типово мають значення [0; -10⁻⁷; -0,5*10⁻³].

Математична модель подана розробниками у вигляді структурної схеми, що представлена на рис. 2. Керуючими входами моделі є складники магнітного потоку за осями координат, визначаються у веберах [Вб]. Виходами моделі є відхилення положення плазмового шнура за осями координат, визначаються у [м*10⁻⁶].

Беручи до уваги структурну схему, зображену на рис. 2, дійдемо такої моделі шляхом заміни кожної передаточної функції вигляду $\frac{1}{s^2+k}$

Будемо показувати у вигляді системи $x_2' = -k * x_1 + u, x_1' = x_2, y = x_1$, отримаємо структурну схему, зображену на рис. 3.

Із цієї схеми отримано розгінні характеристики по першому, другому і третьому виходах і подачі сигналів по всіх трьох входах, які показані на рис. 4, 5, 6.

Із цих графіків ми бачимо, що процеси коливальні, стоять на межі стійкості, це зумовлює такі обставини:

1. Апарат без регулювання функціонувати не може.

2. Обладнання має бути найбільш надійне.

Перехідні процеси можна побачити на рис. 7.

На графіках перехідних процесів можна побачити, що відбуваються відносно невеликі відхилення в коливаннях, а для цього процесу це добре. Затухання коливань після системи відбувається швидше, ніж на вході, що теж досить добре характеризує систему.

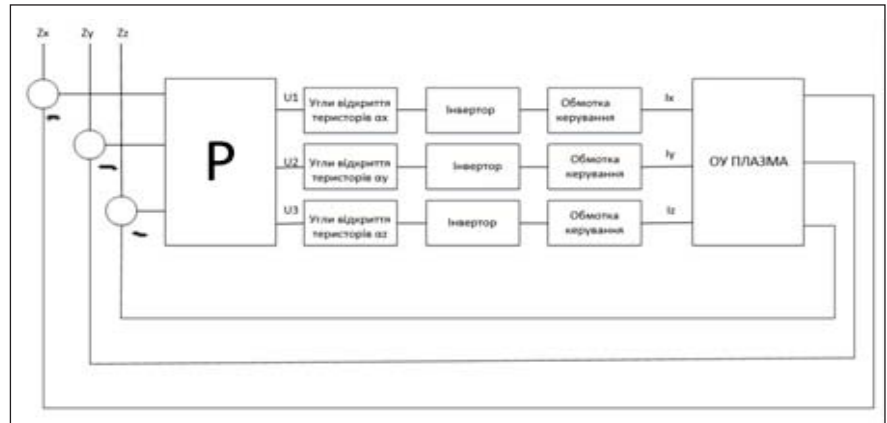


Рис. 8. Структурна схема системи керування

Структурна схема системи керування, що розробляється, має вигляд, поданий на рис. 8. На цій схемі бачимо, що сигнал подається на кутки відкриття тиристорів, після чого йде на інвертор, у якому напруга перетворюється в змінний багатофазний струм. Після інвертора йдуть обмотки керування, по цих обмотках іде регульований струм, який використовується в процесі керуванням плазмою.

Висновки. Система ТОКАМАК призначена для видобутку електроенергії з термоядерного синтезу. Якщо добитися результату утримання плазми на стабільному рівні, то ТОКАМАК може замінити АЕС, адже він економічніший у плані пального, для його роботи потрібно всього пару грамів пального, і воно не складується як на АЕС, а відразу використовується. Відходи також безпечні для навколишнього середовища.

Якщо можна буде добитися повної автоматизації під час збільшення робочих годин установки та простежити, скільки енергії до аварійного стану буде вироблено, тоді можна вирахувати, чи за цей період станція себе окупить. Якщо станція окупить себе, то можна буде будувати такі станції на безлюдних місцях, оскільки загроза від аварії у вигляді плазми все ж є, одразу ж після аварії однієї будувати іншу. У разі автоматизації процесу для роботи станції потрібно буде лише декілька операторів, щоб наглядали за показниками на відстані.

Список літератури:

1. Стопакевич А.А. Системный анализ и теория сложных систем управления. Одесса, 2013. С. 62–65.
2. Орлинский Д.В. Общая характеристика комплекса диагностики плазмы на установке Т15. Электромагнитные измерения, измерения плотности. Москва, 1985. С. 32–36.
3. Захаров Л.Е., Шафранов В.Д. Интегральные соотношения для равновесного тороидального плазменного шнура с некруглым сечением. Журнал технической физики. 1986. Вып. 2. С. 79–84.
4. Самойленко Ю.И. Управление быстропротекающими процессами в термоядерных установках. Киев. 1988. С. 379.

**СОВРЕМЕННАЯ ЦИФРОВАЯ МНОГОСВЯЗНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ОСНОВНЫМИ КОНТУРАМИ – ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА –
УСТАНОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА ТОКАМАК**

ТОКАМАК – устройство для осуществления реакции термоядерного синтеза в горячей плазме в квазистационарном режиме, причем плазма создается в тороидальной камере и ее стабилизирует магнитное поле. Назначение установки – преобразование внутриядерной энергии в тепловую и далее в электрическую. Слово «ТОКАМАК» является аббревиатурой от названия «тороидальная камера магнитная», однако создатели установки заменили в конце «г» на «к», чтобы не вызвать ассоциаций с чем-то магическим.

Атомную энергию (и в реакторе, и в бомбе) человек получает, разделяя ядра тяжелых элементов на более легкие. Энергия, приходящаяся на нуклон, максимальная для железа (так называемый «железный максимум»), а так как максимум посередине, то энергия будет выделяться не только при распаде тяжелых, но и при соединении легких элементов. Этот процесс называется термоядерным синтезом, он происходит в водородной бомбе и термоядерном реакторе. Термоядерных реакций, реакций синтеза, известно много. Источником энергии могут быть те, для которых недорогое топливо, причем возможны два принципиально разных пути запуска реакции синтеза.

Ключевые слова: ТОКАМАК, атомная энергия, математическая модель, переходный процесс, плазменный шнур.

**MODERN DIGITAL MULTIPLAYER CONTROL SYSTEM BY MAIN CONTROL –
POSITION OF PLASMA SHEET – INSTALLATION OF THERMOBILE SYNTHESIS TOKAMAK**

TOKAMAK – device for carrying out the reaction of thermonuclear fusion in a hot plasma in quasi-stationary mode, and the plasma is created in the toroidal chamber and stabilizes the magnetic field. The purpose of the installation – the transformation of the internal nuclear energy into the heat and further – into the electric. The word tokamaks is an abbreviation of the name “toroidal camera magnetic”, but the creators of the installation replaced at the end of the “g” on “k”, so as not to cause associations with something magical.

The atomic energy (both in the reactor and in the bomb) is obtained by separating the nuclei of the heavy elements into lighter ones. The energy that falls on the nucleon is maximum for iron (the so-called “iron maximum”), but as the maximum in the middle, then the energy will be allocated not only when the heavy disintegration, but also when the light elements are connected. This process is called fusion, it occurs in a hydrogen bomb and a thermonuclear reactor. Thermonuclear reactions, synthesis reactions are known. The source of energy may be those for which there is inexpensive fuel, and there are two fundamentally different ways to start the synthesis reaction.

Key words: TOKAMAK, atomic energy, mathematical model, transient process, plasma cord.