

УДК 621.311.25:621.039:661.654

**Киселёва Н.И.**

Одесский национальный политехнический университет

**Погребной Я.С.**

Одесский национальный политехнический университет

**Беглов К.В.**

Одесский национальный политехнический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ С ЖИДКИМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВВЭР-1000

*В энергосистеме Украины существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в течение суточного цикла, а суммарная доля установок, предназначенных для регулирования нагрузки энергосистемы, очень мала, поэтому актуальным является адаптация действующих энергоблоков атомных электростанций к новым специфическим условиям путем создания автоматизированной системы управления мощностью энергоблока в маневренных режимах. Все украинские атомные электростанции с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура допускает эксплуатацию в режимах маневрирования мощностью. Ранее были предложены новые алгоритмы управления мощностью энергоблока по компромиссно-комбинированной программе регулирования. Одним из элементов указанной системы регулирования является регулятор мощности, который воздействует на реактор изменением концентрации жидкого поглотителя. Таким образом, в статье рассматриваются свойства указанного регулятора.*

**Ключевые слова:** регулятор, мощность, энергоблок, устойчивость.

**Постановка проблемы.** В многочисленных работах, посвященных проблеме покрытия переменной части графиков нагрузок [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], указывается, что повышение доли атомных электростанций (далее – АЭС) в общей установленной мощности требует повышенной маневренности энергооборудования АЭС, то есть работы энергоблоков АЭС в переменном режиме. В [3, с. 56–59] был предложен новый алгоритм поддержания технологических параметров энергоблока. Для реализации предложенного алгоритма в АСУ ТП энергоблока была разработана математическая модель [4, с. 108–122], с помощью которой исследовались свойства энергоблока при различных программах регулирования. Для реализации указанного алгоритма был применен новый регулятор мощности энергоблока. Таким образом, статья посвящена исследованию свойств регулятора мощности.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Влияние концентрации борной кислоты,

а точнее атомов бора  $^{10}\text{B}$ , на энерговыделение в активной зоне реактора ВВЭР-1000 исследовалось в ряде работ.

Так, в работе [5, с. 2956] показано, что использование борной кислоты для управления мощностью реакторной установки позволяет значительно увеличить время эксплуатации тепловыделяющих элементов, повышая экономичность эксплуатации АЭС без снижения показателей безопасности.

Работа [6, с. 22] посвящена исследованию свойств первого контура АЭС как объекта управления концентрацией жидкого поглотителя, а именно борной кислоты. Показано, что, с точки зрения управления, реактор по каналу «расход борной кислоты – концентрация борной кислоты» является нелинейным объектом. Нелинейность состоит в том, что статические и динамические свойства существенно отличаются друг от друга при изменении направления воздействия, т. е. при вводе борной кислоты и при её выводе.

В работе [7, с. 18] приведены результаты исследования системы автоматического регулирования концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС. Показана принципиальная возможность применения стандартного ПИ-закона регулирования для управления нелинейным объектом.

**Постановка задания.** Таким образом, целью работы является дальнейшее развитие системы регулирования мощностью и исследование регулятора мощности энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 при применении жидкого поглотителя.

**Изложение основного материала исследования.** В энергоблоке, работающем на электрическую сеть, происходит преобразование тепловой энергии, вырабатываемой в ядерном реакторе, в механическую энергию вала турбины и затем в электрическую энергию в генераторе, как показано на рис. 1.

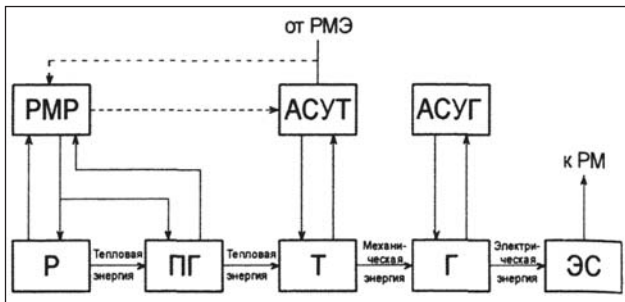


Рис. 1. Схема преобразования энергии и регулирования энергоблока

Основная задача регулирования паросиловой установки – поддержание равенства между количеством производимой и потребляемой энергии. Несоответствие между вырабатываемой энергией в реакторе и потребляемой в турбине проявляется в изменении давления и температуры теплоносителя в 1 контуре и давления (температуры) насыщенного пара во 2 контуре. Указанное несоответствие должно устраняться регулятором мощности реактора (далее – РМР), который оказывает управляющее воздействие либо на реактор, либо на турбину, в зависимости от режима работы энергоблока.

Мощность энергоблока является заданной величиной, при этом она может быть постоянной при работе энергоблока в базовом режиме или переменной при работе в регулирующем режиме.

Энергоблоки работают на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии. Основная задача регулирования энергосистемы состоит в том, чтобы производить выработку электроэнергии в точном соответствии с непрерывно меняющимся потреблением. Единственным источником информации о величине несоответствия выработки электроэнергии её потреблению является отклонение частоты в энергосистеме от её номинального значения. Задачу регулирования частоты и мощности в энергосистеме решают регуляторы частоты и мощности турбины и регулятор мощности энергосистемы. При неизменной частоте сети мощность турбины вполне определенная, и для её изменения необходимо изменять задание регулятору частоты вращения.

С этой целью турбины оснащены механизмом управления турбиной.

Таким образом, система автоматизированного управления мощностью энергоблока (далее – САУМ) включает в себя регуляторы давления пара, частоты и мощности реактора и турбины. Конкретный вид САУМ определяется типом реактора, турбогенератора, тепловой схемы энергоблока и режимом работы в энергосистеме.

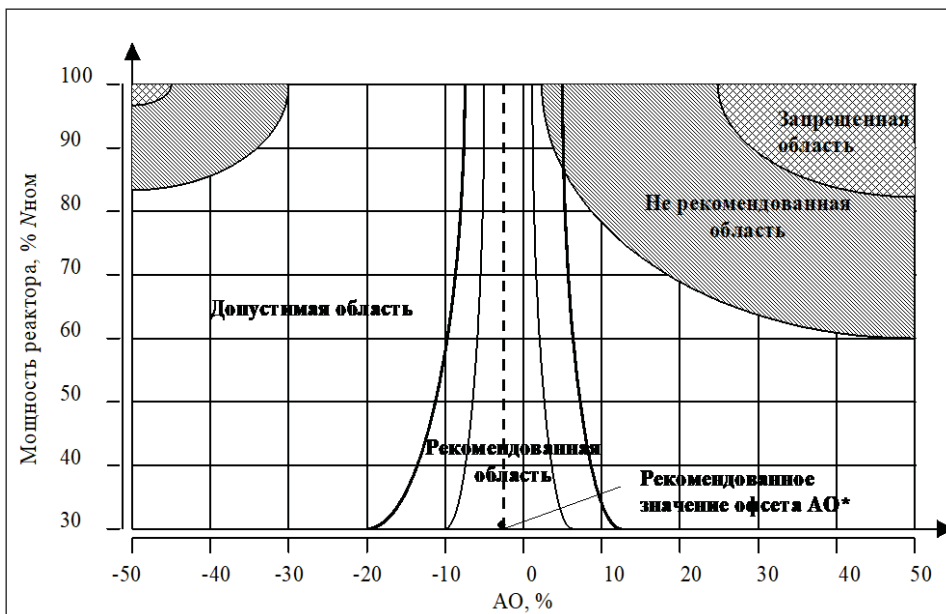


Рис. 2. Зависимость аксиального оффсета от текущего уровня мощности реактора

Для двухконтурных АЭС важным является характер изменения параметров рабочих сред по контурам (давление, температура, расход) при изменении мощности в статических режимах работы (так называемая программа регулирования). Выбор статической программы регулирования зависит от многих физических, конструктивных, технико-экономических особенностей энергоблока и режима использования его в энергосистеме. Выбранная программа регулирова-

ния реализуется с помощью системы управления энергоблоком.

При выборе статических программ регулирования учитывают технико-экономические показатели, а также длительность работы энергоблока на сниженных уровнях мощности. Наибольшее распространение получили программы с постоянным давлением пара во 2 контуре ( $P_s = \text{const}$ ), с постоянной средней температурой теплоносителя в 1 контуре ( $t_{cp} = \text{const}$ ) и компромиссные программы.

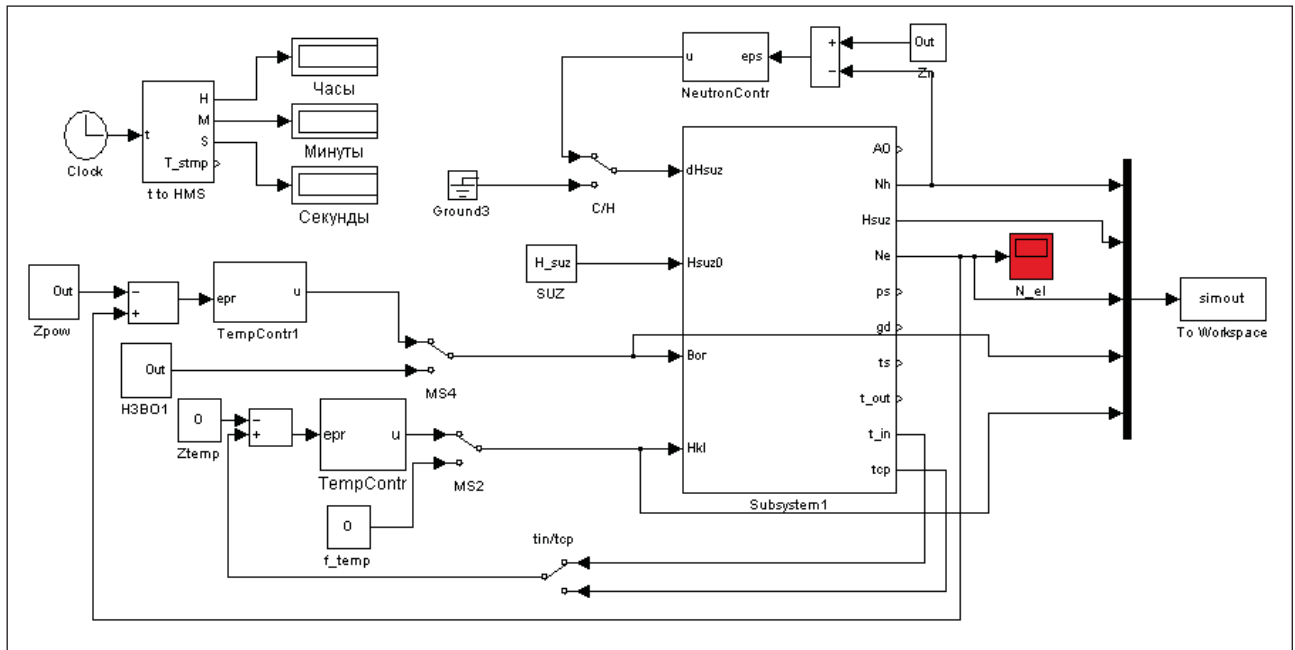


Рис. 3. Схема АСР мощности энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 по компромиссно-комбинированной программе ргулирования

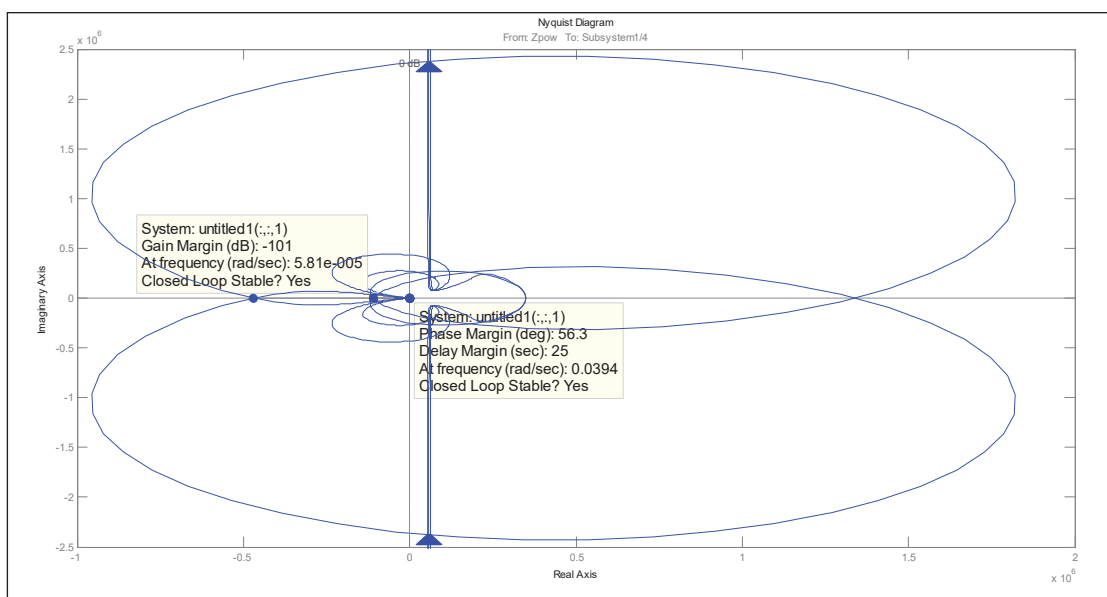


Рис. 4. Годограф Найквиста для энергоблока по каналу концентрация  $H_2O_3 \rightarrow N_{эл}$  система разомкнута

Однако всем вышеперечисленным программам регулирования присущ общий недостаток: в них не контролируется такой важный для надежной эксплуатации ТВЭЛ параметр, как аксиальный офсет [8, с. 19–27].

Значения АО должны поддерживаться в определенных пределах в зависимости от текущего уровня мощности, как это показано на рис. 2.

Превышение предельно допустимых значений коэффициентов неравномерности и АО может привести к неустойчивости нейтронного поля ядерного реактора и возникновению ксеноновых колебаний высотного распределения энерговыделения, увеличению времени стабилизации состояния реактора в переходных режимах [9, с. 3–8].

Неравномерность нейтронного поля реактора снижает экономические показатели работы РУ и в некоторых случаях может привести к возникновению предаварийных и аварийных ситуаций [10, с. 252–257; 11, с. 231–233].

Так как при эксплуатации реактора регулирующие стержни ОР СУЗ находятся только в верхней части активной зоны, то поддерживать АО возможно только перемещая ОР СУЗ. С другой стороны, в типовых программах регулирования регулирующие стержни используются для поддержания мощности реактора в целом.

Результаты работы. Для решения указанного противоречия предлагается мощность реактора изменять путем изменения концентрации поглотителя (раствора борной кислоты) в воде первого контура.

Возникающие от мощностного эффекта реактивности колебания аксиального офсета компенсировать перемещением регулирующих стержней ОР СУЗ.

Таким образом, появляются два новых контура регулирования. Соответственно, возникает задача анализа свойств объекта регулирования по новым каналам: концентрация борной кислоты – нейтронный поток и положение ОР СУЗ – аксиальный офсет.

В работе [8] приведена математическая модель энергоблока, с помощью которой была проанализирована устойчивость объекта управления по отдельным каналам, а также устойчивость систем регулирования, поддерживающих указанные технологические переменные.

Для реализации поставленной задачи была использована схема регулирования мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, созданная в среде имитационного моделирования Simulink пакета MATLAB (1–4 АЕ К761327 ВД, № 308918). Схема регулирования мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 приведена на рис. 3.

С помощью приведенной схемы проводилось исследование АСР мощности по каналу «Концентрация  $H_2BO_3$  (Вор) – Электрическая мощность (Ne)». Проверяться

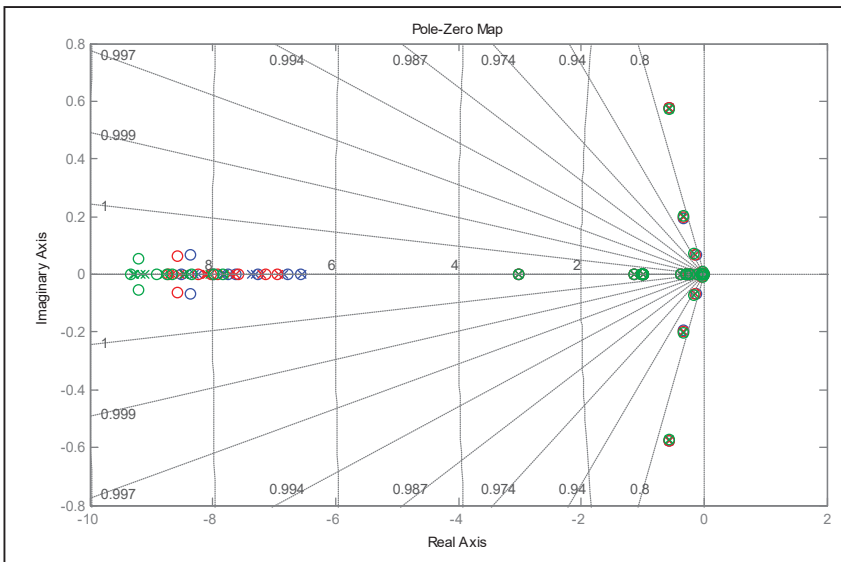


Рис. 5. Запас устойчивости по критерию Найквиста – Михайлова для энергоблока по каналу концентрация  $H_2BO_3$  -> Нэл система разомкнута

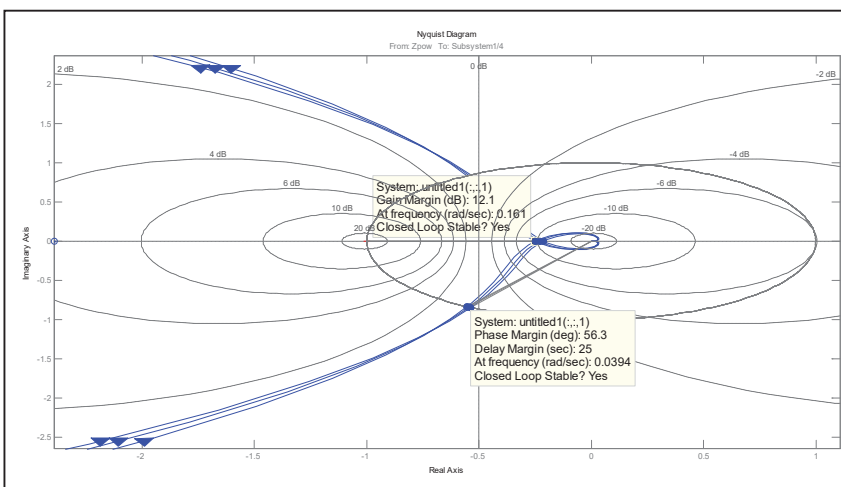


Рис. 6. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с разомкнутой обратной связью

устойчивость системы регулирования по критерию Найквиста – Михайлова. На рис. 4 и 5 представлены годографы разомкнутой АСР мощности. Из анализа графиков можно сделать следующие выводы.

Во-первых, на разных уровнях мощности энергоблока статические и динамические характеристики реакторной установки имеют большие различия. Причем с уменьшением мощности эти различия нивелируются.

Во-вторых, система устойчива при всех уровнях мощности энергоблока. Устойчивость наблюдается даже при отключенном регуляторе.

На рис. 6 и 7 показано расположение нулей и полюсов разомкнутой системы на комплексной плоскости. На рисунках приведены семейства нулей и полюсов, соответствующих линеаризованной модели на разных уровнях мощности от 100 до 80%.

Анализ расположения полюсов линеаризованной системы также позволяет сделать вывод об устойчивости системы. Несмотря на наличие комплексного корня с положительной вещественной частью, систему можно считать устойчивой, т. к. он имеет значение  $4 \cdot 10^{-6}$ . И, по сравнению с другими корнями, не оказывает значительного влияния на длительность переходных процессов в системе.

Далее было проведено исследование системы после замыкания обратной связи. На рис. 8 приведен годограф, а на рис. 9 и 10 – расположение нулей и полюсов для замкнутой системы.

Анализируя расположение полюсов на приведенных рисунках, можно сделать вывод, что применение регулятора значительно улучшает динамические характеристики системы. Все полюса сдвигаются влево по действительной оси. Кроме того, регулятор компенсирует нелинейные свойства реакторной установки, приближая замкнутую АСР по своим характеристикам к инерционному звену второго – третьего порядка.

**Выводы.** Проведенный анализ показывает, что при регулировании мощности реактора изменением концентрации борной кислоты реактор без регулятора является устойчивым на всех уровнях мощности. Устойчивость обеспечивается регулятором аксиального оффсета. После замыкания обратной связи система регулирования с ПИ-регулятором устойчива с запасом по амплитуде 12,1 dB и по фазе  $56,3^\circ$ . Причем с уменьшением мощности запас устойчивости увеличивается. Это видно из рис. 9 и 10 по смещению корней характеристического уравнения влево по действительной оси. Физически это объясняется уменьшением потока нейтронов в активной зоне, вследствие их поглощения атомами  $^{10}\text{B}$ .

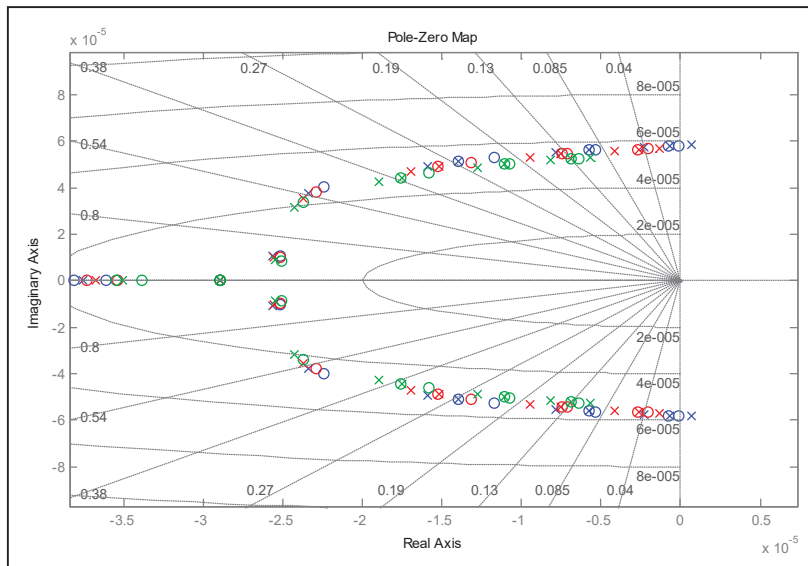


Рис. 7. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с разомкнутой обратной связью в окрестностях мнимой оси

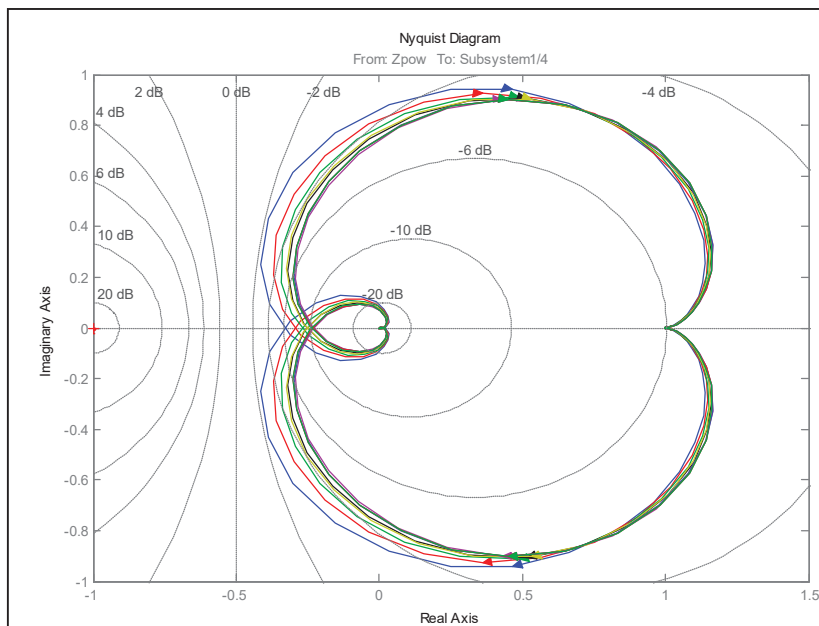


Рис. 8. Годограф Найквиста для энергоблока по каналу концентрация  $\text{H}_2\text{BO}_3 \rightarrow \text{Nэл}$  для замкнутой систем

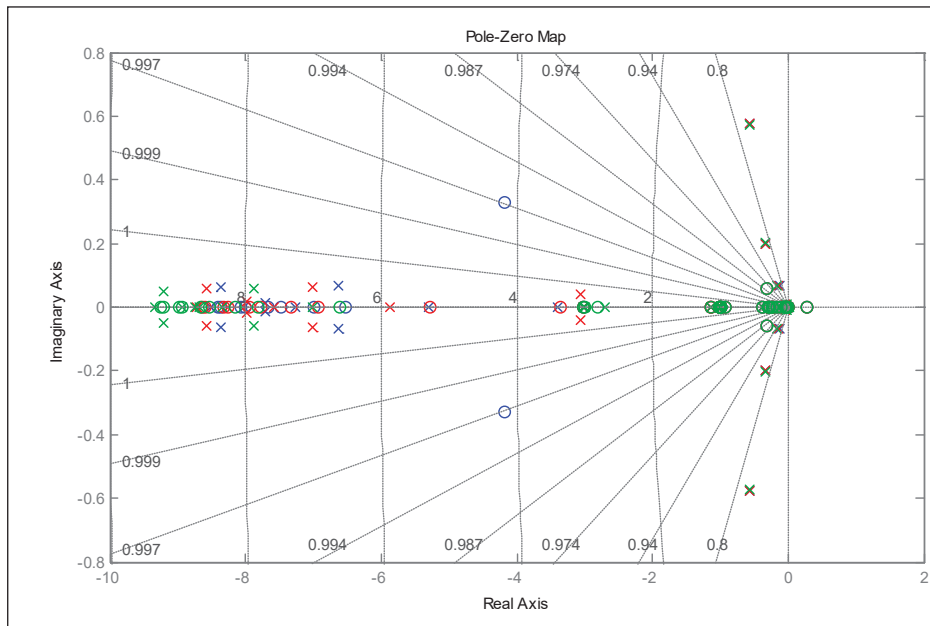


Рис. 9. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с замкнутой обратной связью

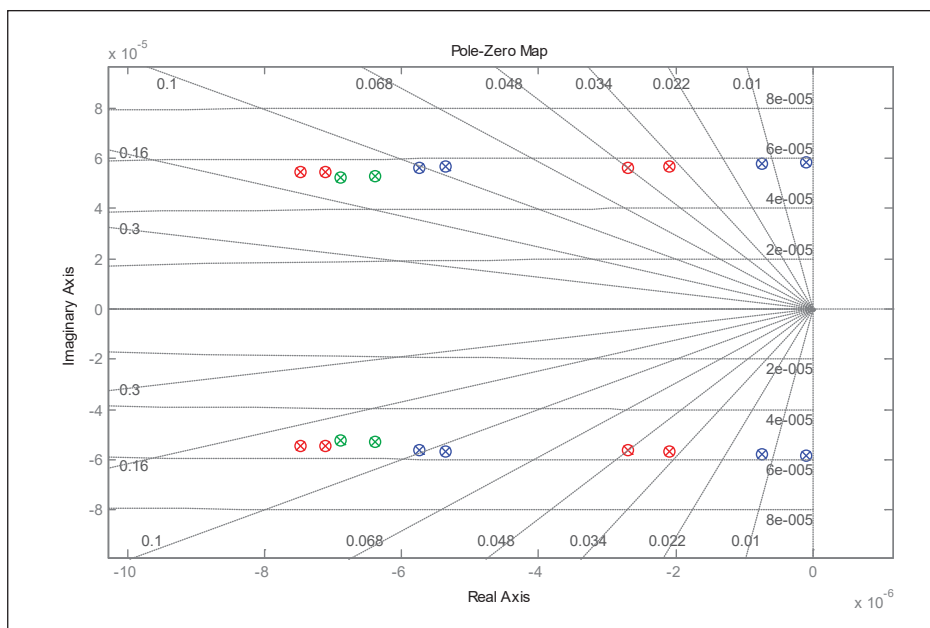


Рис. 10. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с замкнутой обратной связью в окрестностях мнимой оси

#### Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 128–139.
3. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы. Труды Одесского политехнического университета. 2007. Вып. 2 (28). С. 56–59.
4. Современные технологии управления: в 2 т. монография / под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса: Куприенко С.В., 2012. 179 с.

5. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit. Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. № 8. P. 2956–2963.
6. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2002. № 2 (22). С. 22.
7. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. Т. 7. № 4. С. 18–24.
8. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольський М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2 (8). С. 19–27.
9. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. Атомная энергия. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.
10. Коренной А.А., Титов С.Н., Литус В.А., Неделин О.В. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах. Атомная энергия. 1998. Т. 88. № 4. С. 252–257.
11. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. Атомная энергия. 2001. Т. 90. № 3. С. 231–233.

### **ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА ПОТУЖНОСТІ З РІДКИМИ ПОГЛИНАЧАМИ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ВВЕР-1000**

*В енергосистемі України існує невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу, а сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала, тому актуальним є адаптація діючих енергоблоків атомних електростанцій до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку в маневрених режимах. Всі українські атомні електростанції з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру допускає експлуатацію в режимах маневрування потужністю. Раніше були запропоновані нові алгоритми управління потужністю енергоблоку за компромісно-комбінованою програмою регулювання. Одним з елементів зазначеної системи регулювання є регулятор потужності, який впливає на реактор зміною концентрації рідкого поглинача. Таким чином, у статті розглядаються властивості зазначеного регулятора*

**Ключові слова:** регулятор, потужність, енергоблок, стійкість.

### **RESEARCH OF POWER CONTROL SYSTEM WITH LIQUID ABSORBERS FOR NUCLEAR POWER PLANT WITH WWER-1000**

*In the grid of Ukraine there is disparity between making and consumption of electric energy during day's cycle, and total stake of settings, intended for adjusting of loading of grid very small, therefore actual is adaptation of operating power units nuclear power plant to the new specific terms by creation of automated control systems power of power unit in the maneuver modes. All Ukrainian nuclear power plants with WWER-1000 is exploited in the mode of stabilizing of power of power unit at set level, although the equipment of the first contour assumes exploitation in the modes of maneuvering power. The new algorithms of management power of power unit were before offered on the compromise-combined program of adjusting. One of elements of the indicated system of adjusting is a regulator of power, which affects reactor a change the concentration of liquid absorber. Thus, the article examines the properties of the controller.*

**Key words:** controller, power, power unit, steadiness.