

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи
УДК 621.311 (043.2)

ХО ДАК ЛОК

(Вьетнам)

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ СИСТЕМ АРВ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Специальность : 05.14.02 - Электрические станции/Электрическая часть/, сети, электроэнергетические системы и управление ими.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1994

АВ 30,644



00756822 (U)

... рукописью.
Работа выполнена на кафедре электрических станций

Киевского политехнического института.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
В. Д. ЛЕПОРСКИЙ.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент
Н. П. ЛУКАШ.

Официальные оппоненты : - доктор технических наук, профессор
А. В. ПРАХОВНИК.
- кандидат технических наук, старший
научный сотрудник отдела "Автоматизация электрических систем"
ИЭД НАН Украины.
А. Ф. БУТКЕВИЧ.

Ведущая организация - Национальный диспетчерский Центр
электроэнергетики Украины, Минэнерго
Украины.

Защита диссертации состоится "26" сентября 1994 г. в
15 часов на заседании специализированного Совета К 068.14.05 в
Киевском политехническом институте, 252056, г.Киев, пр.Победы, 37,
корп. 20 ауд. 03.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского
политехнического интитута.

Автореферат разослан "23" августа 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
канд. технич. наук, профессор
ЛННБ ім. В. Стефаніка ..
АН України

Б. Н. КОНДРА

АВ - 30.644

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Последние годы характеризуются существенным прогрессом в области цифровых систем управления. Популярность этих систем во всех отраслях промышленности, в том числе электроэнергетике, объясняется как развитием цифровых вычислительных машин, так и преимуществами работы с цифровыми сигналами. Эти преимущества обусловлены простотой обработки цифровых сигналов, практически произвольной сложностью реализуемого алгоритма обработки информации, большой точностью получения необходимого результата, высокой помехозащищенностью, отсутствием дрейфа настройки и быстродействием, достаточным для управления динамическими процессами.

Качественные и количественные изменения в электроэнергетических системах выдвигают задачу создания новых, более совершенных систем АРВ, обеспечивающих необходимое качество регулирования напряжения синхронных генераторов (СГ). Одним из направлений решения этой задачи является применение в системах АРВ СГ цифровых регуляторов, реализуемых программным путем.

Диссертационная работа посвящена актуальной проблеме применения цифровых регуляторов в системах АРВ синхронных генераторов и решения задачи их синтеза. Предложенные разработки дают комплексный подход к решению задачи синтеза цифровых регуляторов (ЦР). Из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что цифровые регуляторы обладают значительно большими функциональными возможностями по сравнению с аналоговыми и их использование позволяет конструктивно подойти к решению общей проблемы управления переходными процессами.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является разработка методологии аналитического конструирования цифровых систем управления и ее применение для решения задачи синтеза цифровых регуляторов систем АРВ синхронных генераторов. Задача синтеза цифровых регуляторов решается в следующих постановках: а) по условию обеспечения компенсации полюсов управляемого процесса нулями цифровых регуляторов; б) по условию обеспечения заданной степени устойчивости системы регулирования и степени

колебательности переходного процесса: в) по условию обеспечения заданного спектра замкнутой системы и установившейся ошибки выходной переменной; г) по условию обеспечения заданного перерегулирования и времени нарастания переходного процесса при представлении цифровой системы парой доминирующих полюсов; д) по условию обеспечения заданного вида переходного процесса из допустимой области его определения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Сформулированные в диссертационной работе научные положения, выводы и рекомендации обоснованы с научной и технической точек зрения. Выводы диссертации получены по результатам исследований, выполненных с использованием методов пространства состояний, z -преобразования и моделирования на ЭВМ. Достоверность полученных результатов подтверждена корректностью методов моделирования и совпадением результатов расчетов с заданиями на аналитическое проектирование цифровых систем АРВ.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Основные теоретические положения диссертации являются развитием методов синтеза и исследования цифровых систем АРВ синхронных генераторов.

Научную новизну составляют:

1. Комплексное использование методов пространства состояний и z -преобразования для решения задач синтеза цифровых регуляторов систем АРВ синхронных генераторов.

2. Синтез цифровых регуляторов по условиям обеспечения заданной степени устойчивости системы АРВ и степени колебательности переходных процессов, а также сочетание этого подхода с идеей компенсации нежелательных полюсов объекта нулями цифрового регулятора.

3. Синтез цифровых регуляторов по заданному спектру замкнутой системы регулирования и условию обеспечения допустимой установившейся ошибки с помощью обратной связи по состоянию и выходу.

4. Обеспечение заданного спектра с помощью последовательного

динамического регулятора общего вида.

в. Метод синтеза цифровых регуляторов по заданному виду переходного процесса из допустимой области его определения.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Практическая ценность работы состоит в развитии методологии и инструментария решения задач синтеза цифровых регуляторов систем АРВ синхронных генераторов по вышеупомянутым критериям.

Использование цифровых регуляторов, позволяющих реализовать закон регулирования практически любой необходимой сложности, открывает новые возможности в управлении режимами электроэнергетических объектов и обеспечивает конструктивный подход к решению проблемы управления переходными процессами.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ

1. Синтез типовых цифровых ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторов на основе компенсации нежелательных полюсов нулями цифрового регулятора.

2. Синтез цифровых регуляторов по условию обеспечения заданной степени устойчивости системы АРВ и заданной степени колебательности составляющих переходного процесса на основе метода Д-разбиения, а также подход к решению задачи синтеза цифровых регуляторов на основе сочетания метода Д-разбиения с идеей компенсации полюсов управляемого процесса.

3. Синтез цифровых регуляторов по условию обеспечения заданного расположения полюсов замкнутой системы и заданной установившейся ошибки выходной переменной с помощью обратной связи по состоянию и последовательного динамического регулятора общего вида.

4. Синтез цифровых регуляторов по условию обеспечения заданного перерегулирования и времени нарастания переходного процесса при представлении системы АРВ парой доминирующих полюсов.

5. Синтез цифровых регуляторов по заданному виду переходного процесса из допустимой области его определения.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на IV научно-технической конференции "Проблемы нелинейной электротехники" (Киев, 1992), 1-ой Украинской конференции по автоматическому управлению "Автоматика - 94" (Киев, 1994) и научном семинаре кафедры "Электрические станции" Киевского политехнического института.

Основные научные и практические результаты, положенные в основу диссертационной работы, получены при выполнении на кафедре госбюджетной научно-исследовательской работы "Разработка и исследование цифровых регуляторов режимов электроэнергетических объектов" (номер гос. регистрации 0193028932).

ПУБЛИКАЦИИ

По материалам диссертации опубликовано 9 работ, среди которых два тезиса докладов на научно-технических конференциях, шесть депонированных статей и статья в журнале "Техническая электродинамика".

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных литературных источников, включающего 85 наименований, содержит 157 страниц машинописного текста, 56 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ сформулирована научная проблема, цель работы, основные задачи исследования, защищаемые научные положения и другие обязательные сведения.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ дана краткая характеристика цифровых систем управления электроэнергетическими объектами. Приведены анализ проблемы и постановка задачи синтеза цифровых регуляторов систем АРВ синхронных генераторов. Кратко изложен основной математический аппарат (метод пространства состояния и метод z -преобразования), использованный для анализа и синтеза цифровых систем управления.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ приведена линеаризованная полная

математическая модель регулируемого синхронного генератора в форме Коши, в которую входят уравнение э.д.с., уравнения движения и угла ротора, уравнения системы возбуждения, уравнение напряжения и уравнение регулятора

$$\dot{\Delta E}'_q = - \frac{1}{K_3 \tau'_{d0}} \Delta E'_q - \frac{K_4}{\tau'_{d0}} \Delta \delta + \frac{1}{\tau'_{d0}} \Delta U_f$$

$$\dot{\Delta M} = - \frac{K_2}{\tau_J} \Delta E'_q - \frac{K_1}{\tau_J} \Delta \delta + \frac{1}{\tau_J} \Delta M_{\text{мх}}$$

$$\Delta \delta = \Delta \omega$$

$$\dot{\Delta U}_E = - \frac{1}{\tau_A} \Delta U_E + \frac{K_A}{\tau_A} \Delta U_R$$

$$\dot{\Delta U}_f = - \frac{1}{\tau_E} \Delta U_f + \frac{K_E}{\tau_E} \Delta U_E$$

(1)

$$\Delta U_\Gamma = K_B \Delta \delta + K_B \Delta E'_q - \Delta U_{\text{всз}}$$

$$\Delta U_R = r(\Delta U_\Gamma)$$

где E'_q - э.д.с. статора, пропорциональная основному потоку, охватывающему статор; U_f - напряжение возбуждения; τ'_{d0} - постоянная времени синхронного генератора по продольной оси при разомкнутой обмотке статора; δ - угол ротора; K_3 - коэффициент, отражающий влияние внешнего сопротивления; K_4 - коэффициент, характеризующий размагничивающее действие при изменении угла ротора; K_1 - изменение электрического момента при малом изменении угла ротора и постоянстве потокосцепления по оси d , т.е. синхронизирующий момент; K_2 - изменение электрического момента при малом изменении потокосцепления по оси d и постоянстве угла ротора; K_B - изменение напряжения на шинах генератора при малом изменении угла ротора и постоянстве потокосцепления по оси d ; K_B - изменение напряжения на шинах генератора при малом изменении потокосцепления по оси d и постоянстве угла ротора; U_Γ - напряжение на шинах генератора; U_R - выходной сигнал регулятора; $M_{\text{мх}}$ - механический момент; M_Ω - электрический момент; τ_J - постоянная инерции; K_E , K_A , τ_E , τ_A - коэффициенты пропорциональности и постоянные времени системы возбудителя и усилителя соответственно. Последнее уравнение

является уравнением регулятора, которое подлежит определению при решении задачи синтеза.

Обозначив переменные состояния как $\Delta E'_q$, $\Delta \omega$, $\Delta \delta$, ΔU_E , ΔU_f и внешние действия как ΔU_R , $\Delta M_{\text{нх}}$, $\Delta U_{\text{воз}}$, можно записать уравнение состояния регулируемого генератора в следующем виде

$$\dot{X} = A X + B u + C F, \quad (2)$$

где вектор состояния $X = [\Delta E'_q \ \Delta \omega \ \Delta \delta \ \Delta U_E \ \Delta U_f]^T$; вектор управления $u = \Delta U_R$; вектор возмущения $F = [\Delta M_{\text{нх}} \ \Delta U_{\text{воз}}]^T$; и матрицы

$$A = \begin{bmatrix} -1/K\tau'_{d0} 0 - K_4/\tau'_{d0} & 0 & 1/\tau'_{d0} \\ -K_2/\tau_j & 0 - K_1/\tau_j & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau_\Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_E/\tau_E & -1/\tau_E \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -K_\Delta/\tau_\Delta \\ 0 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1/\tau_j & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

Уравнение выхода системы записывается в виде:

$$\Delta U_\Gamma = D X + E F, \quad (4)$$

где $D = [K_B \ 0 \ K_B \ 0 \ 0]$; $E = [0 \ -1]$.

Задача синтеза регуляторов решается на упрощенной модели с последующей проверкой их работоспособности на полной модели. Для этой цели выполнено упрощение модели регулируемого СТ, приняв во внимание незначительные величины коэффициентов K_4 и K_B в полной модели. В результате отбрасывания K_4 и K_B получена более простая модель

$$\dot{\Delta E}'_q = - \frac{1}{K_3 \tau'_{d0}} \Delta E'_q + \frac{1}{\tau'_{d0}} \Delta U_f$$

$$\dot{\Delta U}_E = - \frac{1}{\tau_\Delta} \Delta U_E + \frac{K_\Delta}{\tau_\Delta} \Delta U_R \quad (5)$$

$$\dot{\Delta U}_f = - \frac{1}{\tau_E} \Delta U_f + \frac{K_E}{\tau_E} \Delta U_E$$

$$\Delta U_\Gamma = K_B \Delta E'_q - \Delta U_{\text{воз}}$$

$$\Delta U_R = f(\Delta U_\Gamma)$$

Уравнения состояния и выхода упрощенной модели имеют вид

$$\dot{X} = AX + Bu;$$

$$\Delta U_\Gamma = DX + E \Delta U_{\text{воз}}.$$

(6)

где вектор состояния $X = [\Delta U_E \Delta U_r \Delta E'_q]^T$; вектор управления $u = \Delta U_R$; матрицы A, B, D, E имеют следующий вид:

$$A = \begin{bmatrix} -1/\tau_A & 0 & 0 \\ K_E/\tau_E & -1/\tau_E & 0 \\ 0 & 1/\tau_{d0} & -1/K_3 \tau_{d0} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} K_A/\tau_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$D = [0 \ 0 \ 1]; \quad E = -1.$$

Поскольку управляемый процесс и ЦР в системе АРВ, рис.1, разделены квантователем и фиксатором нулевого порядка (ФНП), для дальнейшего исследования выполнен переход от модели в непрерывном времени к дискретной. Дискретная математическая модель объекта описывается с помощью уравнений пространства состояния в дискретном времени и метода z -преобразования.

В разделе 2.3 выполнен известный переход уравнений пространства состояния (6) от непрерывного времени к дискретному, в результате чего получена дискретная система уравнений в следующем виде

$$\begin{cases} X[(k+1)T] = \Phi(T)X(kT) + \theta(T)\Delta U_R(kT), \\ \Delta U_r(kT) = K_E \Delta E'_q(kT) - \Delta U_{\text{воз}} \end{cases} \quad (9)$$

где $\Phi(T)$ - переходная матрица, которая определяется следующим выражением

$$\Phi(T) = e^{AT} = \sum_{i=0}^n \frac{(AT)^i}{i!} = 1 + AT + \frac{A^2 T^2}{2!} + \dots + \frac{A^n T^n}{n!}; \quad (10)$$

матрица управления $\theta(T)$ определяется выражением

$$\theta(T) = \int_0^T \Phi(\tau) B(\tau) d\tau = [\Phi(T) - I] A^{-1} B; \quad (11)$$

I - единичная матрица; T - период квантования.

Получены следующие передаточные функции ЦС АРВ СТ, которые использовались при ее исследовании:

- дискретная передаточная функция разомкнутой системы

$$W_0(z) = \frac{\Delta U_r(z)}{\Delta U_R(z)} = z \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \frac{K_A}{1 + s\tau_A} \frac{K_E}{1 + s\tau_E} \frac{K_3 K_B}{1 + sK_3 \tau_{d0}} \right] = \frac{P(z)}{Q(z)}, \quad (12)$$

где z - оператор z -преобразования.

- дискретная передаточная функция замкнутой системы

$$\frac{\Delta U_{\Gamma}(z)}{\Delta U_{\text{с}}(z)} = \frac{W_0(z)R(z)}{1+W_0(z)R(z)} = H(z) \quad (13)$$

где $R(z)$ - передаточная функция цифрового регулятора.

- дискретная передаточная функция системы по возмущению

$$\frac{\Delta U_{\Gamma}(z)}{\Delta U_{\text{воз}}(z)} = \frac{-1}{1+W_0(z)R(z)} = H_{\text{воз}}(z) \quad (14)$$

В разделе 2.4 проведено сравнение характеристик непрерывных и цифровых систем АРВ синхронных генераторов, подтверждающее положение о том, что при одних и тех же структуре и параметрах цифровая система обычно менее устойчива, чем непрерывная, и возрастание периода квантования обычно способствует увеличению неустойчивости системы и перерегулирования. Поэтому дальнейшее исследование посвящено как параметрическому, так и структурному синтезу цифровых систем с заданными свойствами.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ разработаны методики синтеза типовых ПД-, ПИ- и ПИД-регуляторов в следующих постановках: а) обеспечение компенсации нежелательных полюсов управляемого процесса нулями цифрового регулятора; б) обеспечение заданной степени устойчивости и степени колебательности составляющих переходного процесса с помощью метода Д-разбиения; в) сочетание метода Д-разбиения с идеей компенсации полюсов с целью решения проблемы диполя, возникающего при неточной компенсации.

Раздел 3.1 посвящен решению задачи синтеза типовых цифровых регуляторов, включенных последовательно в цепь ошибки, рис.1, на основе компенсации нежелательных полюсов. Передаточные функции этих регуляторов приведены в табл.1.

В качестве нежелательного выбран полюс, расположенный наиболее близко к границе устойчивости. Приведены кривые переходных процессов в ЦС АРВ с ПИ-, ПД- и ПИД-регуляторами. Из полученных кривых можно сделать вывод о том, что ПИД-регулятор обеспечивает относительно малые перерегулирование, время нарастания и время установления. Синтез на основе компенсации полюсов имеет свои недостатки. Во-первых, при неточной компенсации возникает эффект диполя, что может нарушать

устойчивость системы. Во-вторых синтез, основанный на этом подходе, не может обеспечить заданные показатели качества переходного процесса (степень устойчивости, степень колебательности и т.п.).

Таблица 1

Тип регулятора	Передаточная функция $R(z)$	Параметры настройки
1. ПИ	$K_P + K_I \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1}$	K_P, K_I
2. ПД	$K_P + K_d \frac{z-1}{Tz}$	K_P, K_d
3. ПИД	$K_P + K_I \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} + K_d \frac{z-1}{Tz}$	K_P, K_I, K_d

В разделе 3.2 предложено решение задачи синтеза ЦР по условию обеспечения заданной степени устойчивости и степени колебательности переходных процессов в замкнутой системе с помощью метода Д-разбиения. Кривые Д-разбиения построены в плоскости настраиваемых коэффициентов ПИ-регулятора известным способом. Используемое для этого характеристическое уравнение замкнутой системы имеет вид

$$1 + w_0(z) R(z) = 0 \quad (15)$$

Необходимый для выполнения Д-разбиения переход от цифровой системы к непрерывной выполнен с использованием обычно используемого билинейного преобразования $z = (1+w)/(1-w)$ и непосредственной замены $z = \exp(sT)$. Полученные кривые Д-разбиения с помощью вышеупомянутых преобразований полностью совпадают друг с другом, однако выполнение Д-разбиения с использованием z -преобразования является более простым и удобным. Для построения границы устойчивости используется замена $z = \exp(j\omega T)$, семейства кривых, разграничивающих области с разными степенями устойчивости m , - замена $z = \exp[-m + j\omega T]$ и семейства кривых, разграничивающих области с разными степенями колебательности ϕ , - замена $z = \exp[-\omega \tau \phi + j\omega T]$. Задав желаемые степень устойчивости и степень колебательности, получим искомые настройки ПИ-регулятора графическим способом (по портрету Д-разбиения) или аналитическим

путем решения соответствующей системы уравнений.

В разделе 3.3 приведены результаты исследований ЦС АРВ синхронного генератора с ПИ-регуляторами, настроенными вышеупомянутым образом. Результаты исследований показывают, что полученные результаты соответствуют заданиям на проектирование «синтез ЦС АРВ СТ». Сочетание идеи компенсации полюсов управляемого процесса с методом Д-разбиения позволяет частично снимать проблему диполя путем обеспечения заданной степени устойчивости замкнутой системы. Надо отметить, что синтез с помощью метода Д-разбиения позволяет обеспечить нижнюю границу заданного спектра замкнутой системы, но не обеспечивает заданный спектр системы, которым во многом характеризуется качество переходных процессов в системе.

В разделе 3.4 разработана методика программной реализации передаточных функций цифровых регуляторов. В качестве примера получено выражение для определения сигнала управления на k -ом шаге для ПИ-регулятора

$$\Delta U_R(kT) = k_0 \Delta U_3(kT) + k_1 \Delta U_3[(k-1)T] - k_0 \Delta U_T(kT) - k_1 \Delta U_T[(k-1)T] + \Delta U_R[(k-1)T], \quad (16)$$

которое показывает, что текущее значение сигнала управления зависит от текущего и предыдущего значений входного ΔU_3 и выходных сигналов ΔU_T , а также от предыдущего значения управляющего сигнала ΔU_R .

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ разработаны методики синтеза цифровых регуляторов по заданному расположению полюсов замкнутой системы и установившейся ошибке выходной переменной в двух постановках: а) с помощью обратной связи по состоянию; б) с помощью последовательного динамического регулятора общего вида. Предложен подход к решению задачи синтеза ЦР по условию обеспечения заданного перерегулирования и времени нарастания переходного процесса путем представления цифровой системы управления парой доминирующих полюсов. Проведено исследование влияния расположения полюсов замкнутой системы на качество переходного процесса. Решена задача синтеза ЦР по условию обеспечения заданного вида переходного процесса на выходе системы из допустимой области его определения.

В разделе 4.1 приведено решение задачи синтеза ЦР по заданному расположению полюсов с помощью обратной связи по состоянию через матрицу постоянных коэффициентов $G = [g_1 \ g_2 \ g_3]$, которая подлжит определению при решении задачи синтеза. Матрица обратной связи G может быть определена следующим образом

$$G = - [\Lambda_{p1} \ \Lambda_{p2} \ \Lambda_{p3}] K^{-1} \quad (17)$$

где $\Lambda_{p1} = \Lambda_p(z_1) = |z_1 I - \Phi|$;

$$K = [k_1 \ k_2 \ k_3]; \quad k_1 = k(z_1) = \text{Adj}(z_1 I - \Phi) B;$$

z_1 - спектр замкнутой системы.

Принимая во внимание, что классический подход к решению задачи синтеза оставляет открытым вопрос об установившейся ошибке выходной переменной, введен дополнительный канал обратной связи g_4 (рис.2), при этом коэффициенты настройки ЦР определяются решением следующей системы уравнений

$$|zI - \Phi + B(G + g_4 D)| = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad (18)$$

$$D(zI - \Phi + B(G + g_4 D))^{-1} (y - B g_4) \Big|_{z=1} \Delta U_{\text{воз}} = \Delta U_{\text{густ}}$$

$$y = (\Phi - I) A^{-1} c$$

где последнее уравнение соответствует условию обеспечения заданной установившейся ошибки.

Отметим, что решение задачи синтеза с помощью обратной связи по состоянию требует дополнительной установки измерительных устройств, что усложняет и удорожает систему управления. В разделе 3.2 предложен подход к решению задачи синтеза по условию обеспечения заданного расположения полюсов замкнутой системы с помощью динамического регулятора, включенного в прямую цепь ошибки, при этом обеспечивается также допустимая установившаяся ошибка. Передаточная функция такого регулятора имеет в общем случае вид дробно-рациональной функции двух полиномов

$$R(z) = \frac{\sum_{i=0}^m a_i z^i}{\sum_{i=0}^{n-1} b_i z^i + z^n} = \frac{a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_m z^m}{b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + \dots + b_{n-1} z^{n-1} + z^n} \quad (19)$$

Целью синтеза является определение коэффициентов a_i и b_i таким образом, чтобы замкнутая система имела заданный спектр и заданную

установившуюся ошибку выходной переменной. Решаемая задача является задачей структурно-параметрического синтеза, который обеспечивается решением двух задач. В первой из анализа условий физической реализуемости передаточной функции ЦР определяется структура ЦС, т.е. значения m и n в (19), которые задают порядок регулятора. Для второй задачи составляется система $m+n+1$ уравнений относительно искомым коэффициентов $a_i, i=\overline{0, m}$ и $b_i, i=\overline{0, n-1}$, решение которой является решением поставленной задачи

$$Q(z) (z_1^n + b_{n-1}z_1^{n-1} + \dots + b_0) + \\ + BP(z) (a_m z_1^m + a_{m-1}z_1^{m-1} + \dots + a_0) = 0; \quad i = \overline{0, m+n} \quad (20)$$

$$L_i \Pi (1 - z^{-1}) H(z) = \Delta U_{\Gamma \text{ уст}}$$

где $Q(z)$ и $P(z)$ - полиномы передаточной функции управляемого процесса (12); $H(z)$ определяется в соответствии с (13).

До решения задачи синтеза по условию обеспечения заданного спектра надо предварительно решить задачу выбора желаемого спектра, исходя из условия обеспечения желаемого качества переходного процесса. В разделе 4.3 предложен подход к решению этой задачи при представлении системы управления парой доминирующих полюсов. По заданным перерегулированию и времени нарастания T_{\max} определяется пара доминирующих полюсов $s = |s| e^{-j\phi}$ по известным формулам

$$\phi = T_{\max} \left[\operatorname{arctg} \frac{-\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \pm \alpha + \pi \right] \quad (21)$$

$$|s| = \exp \frac{-\zeta\phi}{\sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (22)$$

где угол α и коэффициент затухания ζ определяются по номограмме [Б.Куо. Теория и проектирование цифровых систем управления. -М.: Машиностроение, 1986, стр.216]. Следующим шагом является решение задачи синтеза ЦР, обеспечивающего найденный спектр. Результаты исследований показывают, что синтез в соответствии с предложенным подходом обеспечивает хорошее совпадение заданных значений перерегулирования и времени нарастания со значениями, полученными экспериментально-расчетным путем.

Ни один из рассматриваемых подходов к синтезу ЦР не может

обеспечить желаемый вид переходного процесса. В разделе 4.4 предложен подход к решению задачи синтеза по условию обеспечения желаемого вида переходного процесса выходной переменной. Выражение для выходной переменной представлено в виде

$$\begin{aligned} \Delta u_{\Gamma}(z) &= \frac{N(z)}{z^n} + \frac{Y_0}{z-1} = \\ &= \frac{K_1 \cdot z^{n-1} + K_2 \cdot z^{n-2} + \dots + K_n}{z^n} + \frac{Y_0}{z-1} \end{aligned} \quad (24)$$

где коэффициентами k_1, \dots, k_n задается желаемый вид переходного процесса из допустимой области его определения, а Y_0 - установившееся значение переменной. С другой стороны можно записать

$$\Delta u_{\Gamma}(z) = \frac{R(z)w_0(z)}{1 + R(z)w_0(z)} \Delta u_3(z) \quad (25)$$

Сравнение правых частей (24) и (25) дает уравнение, решение которого относительно $R(z)$ дает искомую передаточную функцию ЦР. Приведены результаты моделирования ЦС АРВ СТ, полученные с использованием предлагаемого метода синтеза ЦР. Неизбежная погрешность при практической реализации ЦР, естественно, приведет к отличающимся от задаваемых графикам переходных процессов. Кроме того, при задании желаемых графиков переходных процессов должны учитываться ограничения на значения физических переменных во всей ЦС АРВ. Поэтому возможному заданию желаемых графиков переходных процессов должно предшествовать решения задачи нахождения допустимой области их определения.

Поскольку задача синтеза решалась с использованием упрощенной модели, в диссертации была проверена работоспособность полученных ЦР на полной модели. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что синтезированные ЦР обеспечивают показатели качества ЦС АРВ, близкие к задаваемым.

Из проведенных исследований следует, что ЦР обладают существенно большими возможностями по сравнению с аналоговыми, и решение задачи их синтеза по тем или иным критериям имеет практическую ценность в плане решения общей проблемы управления переходными процессами в ЭЭС и отвечает современному уровню развития цифровой вычислительной техники.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ обобщены и сформулированы основные результаты и выводы по работе.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны полная и упрощенная дискретная математическая модель ЦС АРВ синхронного генератора в пространстве состояний.

2. Решена задача синтеза типовых цифровых ПД-, ПИ- и ПИД-регуляторов на основе идеи компенсации нежелательных полюсов управляемого процесса нулями регулятора.

3. Решена задача синтеза ЦР по условию обеспечения заданных степени устойчивости и степени колебательности переходных процессов в системе АРВ с помощью метода Д-разбиения. Выполнение Д-разбиения на основе z -формы характеристического уравнения цифровой системы проще и удобнее, чем с использованием w -образования при том же получаемом эффекте.

4. Предложен подход к решению задачи синтеза ЦР на основе сочетания метода Д-разбиения с идеей компенсации полюсов управляемого процесса.

5. Решена задача синтеза ЦР по условию обеспечения заданного спектра замкнутой системы и заданной установившейся ошибки выходной переменной с помощью обратной связи по состоянию и выходу.

6. Решена задача синтеза ЦР по условию обеспечения заданного спектра замкнутой системы и заданной установившейся ошибки с помощью последовательного динамического цифрового регулятора, включенного в цепь ошибки. Такое решение не требует установки дополнительных измерительных приборов в цепях обратной связи.

7. Предложена и опробована на математических моделях ЦС АРВ методика синтеза ЦР, обеспечивающих заданные перерегулирование и время нарастания переходного процесса при представлении системы управления парой доминирующих полюсов.

8. Предложен и опробован на математических моделях ЦС АРВ метод синтеза ЦР, обеспечивающий желаемый вид переходных процессов в системе из допустимой области их определения. Метод дает возможность конструктивно ставить и решать задачи управления переходными процессами в электроэнергетических объектах. Необходимость учета ограничений на значения физических

переменных при задании желаемого вида переходного процесса в системе требует решения дополнительной задачи нахождения вышеупомянутой допустимой области.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. Подход к синтезу цифровых регуляторов режимами электроэнергетических объектов // В кн.: Проблемы нелинейной электротехники. Тез. докл. IV н.-т. Конф., Киев, 1992, с. 93-94.
2. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. К синтезу цифровых регуляторов режимов электроэнергетических объектов. - Деп. в УкрИНТЭИ 23.09.92 и 1466-Ук 92, 18 с.
3. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. Синтез цифровых регуляторов по заданному виду переходного процесса. - Деп. в УкрИНТЭИ 21.10.92 и 1714-Ук 92, 15 с.
4. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. Применение метода Д-разбиения для настройки цифровых регуляторов электроэнергетических объектов. - Деп. в УкрИНТЭИ 4.11.92 и 1808-Ук 92, 17 с.
5. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. К синтезу цифровых систем управления с заданным спектром. - Деп. в УкрИНТЭИ 22.02.93 и 235-Ук 93, 18 с.
6. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. Параметрический синтез цифровых систем АРВ синхронных генераторов. - Деп. в ГНТБ Украины 01.12.93 и 2338-Ук 93, 23 с.
7. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. К синтезу цифровых систем АРВ синхронных генераторов с заданным спектром. - Деп. в ГНТБ Украины 01.12.93 и 2339-Ук 93, 12 с.
8. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. Синтез цифровой системы АРВ синхронного генератора // В кн.: 1-а Українська конференція з автоматичного керування. Автоматика-94: Тез. докл., ч. II, Київ, 1994, 1 с.
9. Лепорский В. Д., Лукаш Н. П., Хо Дак Лок. Синтез цифровых систем АРВ синхронных генераторов с заданным спектром. - Техническая электродинамика. 1994. № 2, 11 с.

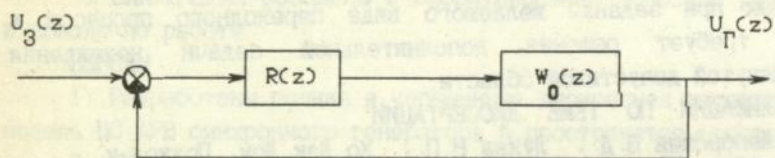


Рис.1. Цифровая система управления с последовательным цифровым регулятором

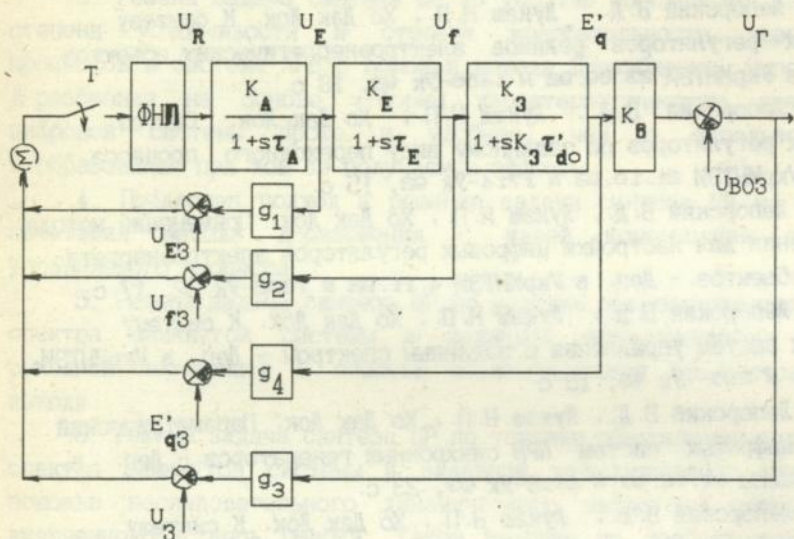


Рис.2. Цифровая система управления с обратной связью по состоянию и выходу

458884

AB 30.644

AB 30.644