

УДК 621.314.52

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И СИНТЕЗ
ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМИ
УСИЛИТЕЛЬНО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ**
М.В. Никитина, Д.В. Осипов, В.А. Толмачев

Изложена методика синтеза адаптивной системы управления с цифровыми регуляторами и N -модульным импульсным усилительно-преобразовательным устройством из условия обеспечения устойчивости в заданном диапазоне изменения параметров силовой цепи и заданного быстродействия при заданном уровне пульсаций тока в нагрузке и ограниченной частоте коммутации силовых ключей.

Ключевые слова: адаптивная система управления, цифровой регулятор, анализ устойчивости, параметрический синтез.

Введение

В настоящее время импульсные усилительно-преобразовательные устройства (УПУ), построенные, в частности, на базе широтно-импульсных преобразователей

(ШИП), находят весьма широкое применение в системах управления различными электротехническими устройствами в силу ряда известных преимуществ. Особую область их применения составляют устройства, статические и динамические характеристики которых определяются свойствами ШИП.

При ограниченной частоте коммутации использование в системе управления N -модульных УПУ с многофазным принципом синхронизации составляющих ШИП позволяет повысить предельные динамические показатели системы. Технические требования и принципы построения таких систем управления рассмотрены в работе [1].

Современный этап развития преобразовательной техники характеризуется внедрением в информационные подсистемы систем управления микроконтроллеров, реализующих цифровые алгоритмы управления. Применение микропроцессорной техники в системе управления позволяет повысить ее надежность и снизить функциональную сложность. Актуальной является проблема приближения статических и динамических качеств цифровых систем управления к соответствующим качествам эталонных непрерывных систем предельного быстродействия.

В работе [2] сформулирована методика синтеза одноконтурной системы управления источника тока с N -модульным УПУ и цифровым ПИ-регулятором из условия обеспечения экспоненциального характера переходного процесса с постоянной времени T_m при максимальной допустимой амплитуде пульсаций тока нагрузки ΔI_d в квазистановившемся режиме в диапазоне амплитуд скачкообразных задающих воздействий от 0 до $I_{z \text{ макс}}$ и заданной частоте коммутации силовых ключей ШИП T_k .

Упрощенная структурная схема такой системы представлена на рис. 1. Система содержит N реверсивных ШИП, работающих на общую нагрузку резистивного характера R_n , и контур регулирования тока нагрузки i_n . Каждый ШИП содержит силовой каскад мостового типа на четырех транзисторных ключах с напряжением питания E_n и широтно-импульсный модулятор (ШИМ), осуществляющий коммутацию силовых ключей с постоянным периодом T_k по несимметричному закону и обеспечивающий модуляцию первого рода с шагом дискретизации T_0 . Напряжение на нагрузке имеет вид импульсов с амплитудой E_n , относительной длительностью γ , пропорциональной величине выходного сигнала u_y цифрового ПИ-регулятора тока (РТ), и полярностью, определяемой полярностью последнего. На входе регулятора осуществляется сравнение напряжения U_z , пропорционального заданному значению тока нагрузки I_z , и напряжения $u_{ос}$, поступающего с датчика тока ДТ с коэффициентом передачи $K_{дт}$ и пропорционального истинному значению тока нагрузки. Сглаживание пульсаций тока нагрузки i_n осуществляется разделительными дросселями каналов с параметрами r, L .

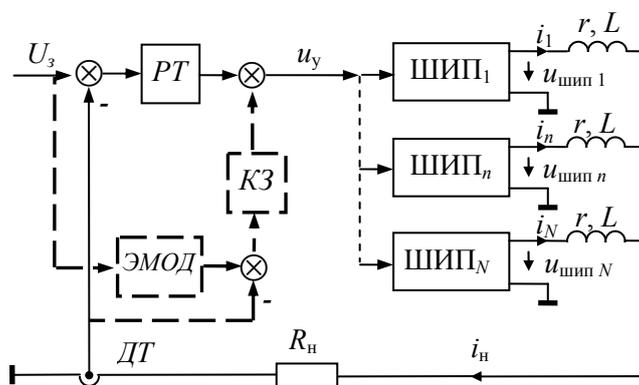


Рис. 1. Структурная схема системы

Уже упомянутая методика синтеза [2] предполагает постоянство параметров силовой цепи. Актуальной является задача сохранения статических и динамических характеристик системы в условиях изменения в процессе эксплуатации как сопротивления на-

грузки R_n , так и напряжения E_n источника питания силового каскада ШИП. Решение такой задачи возможно в структурах с адаптивными алгоритмами управления [3].

Непрерывная модель адаптивной системы управления

Для организации такой системы в структурную схему, представленную на рис. 1, введем дополнительный контур адаптации, содержащий эталонную модель ЭМОД и корректирующее звено КЗ, на вход которого поступает разность выходного напряжения эталонной модели и напряжения датчика тока нагрузки. Выходной сигнал корректирующего звена поступает на вход ШИП, суммируясь с выходным напряжением цифрового ПИ-регулятора основного контура.

Используя подход к реализации адаптивных систем, описанный в работе [3], выбираем в качестве ЭМОД – $W_3(p) = 1/[K_{дт} \cdot (T_m \cdot p + 1)]$, в качестве КЗ – $W_k(p) = K_a \cdot W_R(p)$, где $W_R(p)$ – передаточная функция регулятора в эквивалентной непрерывной одноконтурной системе, K_a – коэффициент адаптации. Тогда структурная схема эквивалентной непрерывной модели системы примет вид, показанный на рис. 2.

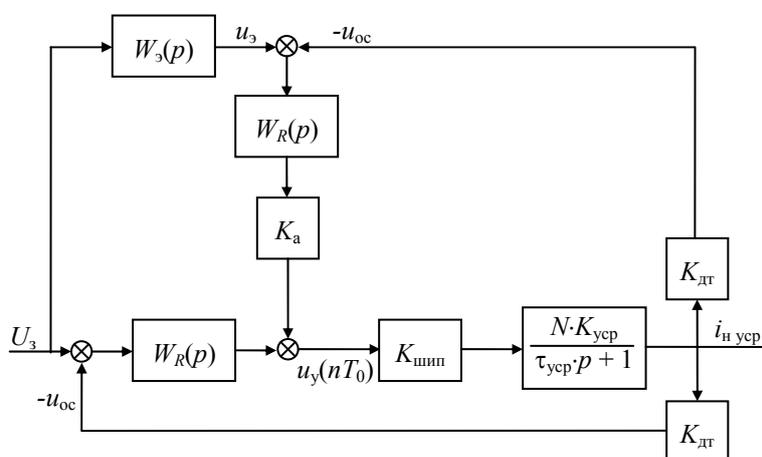


Рис. 2. Эквивалентная непрерывная модель

В представленной модели, составленной относительно усредненных гладких составляющих напряжений и токов, коэффициенты $K_{шип}$, $K_{уср}$ и $\tau_{уср}$ определяются как

$$K_{шип} = E_n / U_{оп}, K_{уср} = 1 / (r + N \cdot R_n), \tau_{уср} = L / (r + N \cdot R_n), \quad (1)$$

где $U_{оп}$ – амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИП.

В работе [3] показано, что при неизменных параметрах силовой цепи (R_n и E_n) передаточная функция системы соответствует эталонной при любом значении коэффициента K_a . При изменении параметров силовой цепи и достаточно высоком значении коэффициента K_a динамические характеристики адаптивной системы приближаются к соответствующим характеристикам эталонной модели $W_3(p)$. Таким образом, точность поддержания эталонного экспоненциального процесса в условиях изменения параметров силовой цепи связана с предельным значением $K_a_{пр}$ коэффициента K_a .

Методика синтеза адаптивной системы управления

Одной из задач синтеза адаптивной системы с выбранной структурой является такой выбор настроек регуляторов, чтобы в процессе изменения параметров силовой цепи при выбранном предельном значении коэффициента K_a не происходило нарушение условий ее устойчивости. В работе [2] показано, что при выборе параметров регулятора основного контура на основе соотношений

$$\alpha = \frac{1}{K_{\text{ШИП}} \cdot K_{\text{уср}} \cdot N \cdot K_{\text{дт}}} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_m}}{1 - e^{-T_0/\tau_{\text{уср}}}}, \quad (2a)$$

$$\beta = \frac{-e^{-T_0/T_m}}{K_{\text{ШИП}} \cdot K_{\text{уср}} \cdot N \cdot K_{\text{дт}}} \cdot \frac{1 - e^{-T_0/T_m}}{1 - e^{-T_0/\tau_{\text{уср}}}}, \quad (2б)$$

минимально допустимое значение постоянной времени T_m реализуемого экспоненциального процесса определяется условиями устойчивости системы. В соотношениях (2) α и β – параметры дискретного ПИ-регулятора, описываемого известным уравнением [4] $U_y(n) = U_y(n-1) + \alpha \cdot \varepsilon(n) + \beta \cdot \varepsilon(n-1)$; $\varepsilon(n)$, $\varepsilon(n-1)$, $U_y(n)$, $U_y(n-1)$ – сигналы рассогласования и сигналы регулятора, вычисленные в дискретные моменты времени.

Даже в случае, если параметры процессов в замкнутой непрерывной системе соответствуют эталонным, в системе с ШИП и дополнительным контуром адаптации изменяются границы устойчивости относительно условий в исходной системе, поскольку появляется дополнительная обратная связь, по которой пульсации тока нагрузки поступают на вход ШИМ. Анализ устойчивости в таких системах является сложной задачей. Для ее решения были разработаны алгоритмы определения границ устойчивости, основанные на методе точечных отображений [5]. На основе этих алгоритмов был разработан программный комплекс, позволяющий строить зависимости $K_{\text{а пр}}$ от изменяемых параметров [6] и токов задания. Минимальное из значений этих коэффициентов в области изменяемых параметров принимается в качестве $K_{\text{а}}$ в адаптивной системе.

Другим немаловажным фактором при синтезе рассматриваемых систем является выбор точки настройки регуляторов системы, обеспечивающей точность воспроизведения эталонного переходного процесса. В уже не раз упомянутой работе [3] показано, что параметры регуляторов следует рассчитывать при максимально возможном сопротивлении нагрузки и минимально возможном напряжении силового источника.

Параметрический синтез рассматриваемых систем состоит в таком выборе числа модулей N , индуктивностей разделительных дросселей L , параметров цифровых ПИ-регуляторов тока α и β , предельного значения коэффициента адаптации $K_{\text{а}}$, чтобы был обеспечен допустимый уровень пульсаций тока в нагрузке, экспоненциальный переходной процесс с постоянной времени T_m во всем диапазоне токов задания (от 0 до $I_{\text{з макс}}$) и диапазоне изменения параметров силовой цепи.

Основу предлагаемой методики синтеза составляют два соотношения, связывающие между собой вышеперечисленные параметры [2]:

$$\beta_L = \frac{r + R_H}{2Nr} \cdot \left[\ln \frac{r + R_H + \chi_{\text{доп}} \cdot (r + NR_H)}{r + R_H - \chi_{\text{доп}} \cdot (r + NR_H)} \right]^{-1}, \quad (3)$$

$$\beta_L = \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{з макс}}} \cdot \frac{N \cdot (r + R_H)}{r} \cdot \left(\frac{T_m}{T_K} + 0,5 \right) - \frac{r + NR_H}{2r}, \quad (4)$$

где $I_{\text{макс}} = E_{\text{п}} / (R_{\text{н}} + r)$, $\chi_{\text{доп}} = 2 \cdot \Delta I_{\text{д}} / I_{\text{макс}}$, $\beta_L = L / (r \cdot T_K)$.

Совместное решение уравнений (3) и (4) определяет требуемые N и L , далее по формулам (2) с учетом (1) определяются параметры цифровых ПИ-регуляторов, после чего строятся зависимости предельного значения коэффициента адаптации в области измеряемых параметров. Минимальное из всех возможных значений предельного коэффициента адаптации выбирается в качестве $K_{\text{а}}$.

Пример синтеза адаптивной системы управления

Для примера синтезируем систему с параметрами: $E_{\text{п}}$ – от 45 В до 55 В, $U_{\text{оп}} = 10$ В, $r = 0,03$ Ом, $R_{\text{н}}$ – от 0,02 Ом до 0,03 Ом, $T_K = 1$ мс, $K_{\text{дт}} = 0,2$ В/А, $\Delta I_{\text{д}} = 5$ А,

$T_m = T_k = T_0$, $I_{3 \text{ макс}} = 50$ А. Согласно предложенной методике, $E_{п} = 45$ В, $R_{п} = 0,3$ Ом (точка настройки), тогда совместное решение уравнений (3) и (4) дает $N = 1$, $L = 1,123$ мГн, и по формулам (2) $\alpha = 0,91$, $\beta = -0,679$.

На рис. 3, а–в, представлены зависимости предельного значения коэффициента адаптации от изменяемых параметров силовой цепи и различных токах задания, полученные с помощью программного комплекса [6]. Как видно из графиков, минимальное значение коэффициента адаптации $K_a^* = 1,58$.

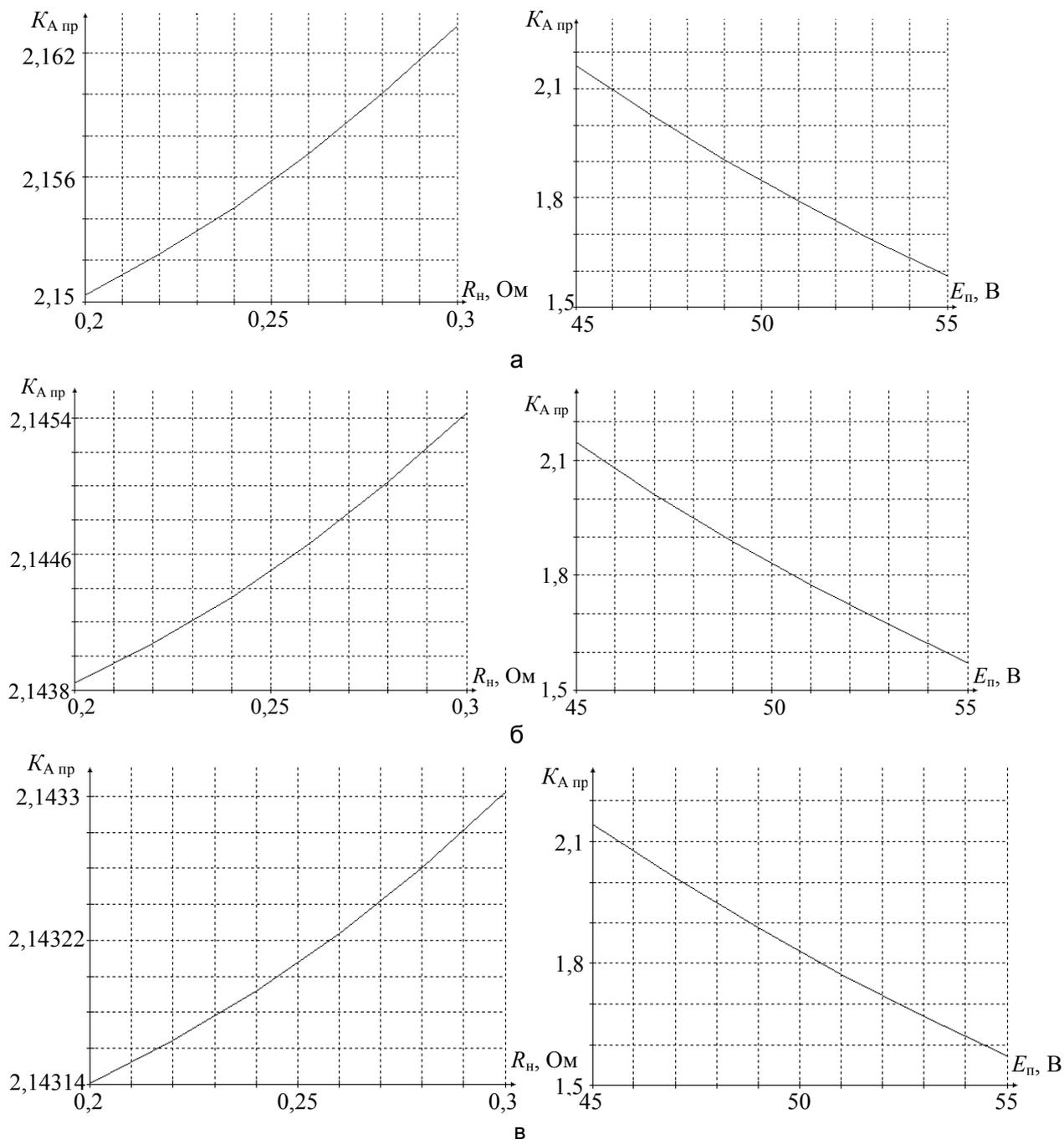


Рис. 3. Зависимости $K_{a \text{ пр}}$ при: а – $I_3 = 50$ А, б – $I_3 = 5$ А; в – $I_3 = 0,5$ А

На рис. 4 показаны результаты математического моделирования процессов при реакции синтезируемой системы на скачок задающего воздействия. Здесь i_3 – эталонная кривая, $i_{н1}$ – кривая тока нагрузки, соответствующая расчетным параметрам силовой цепи и регуляторов при $K_a = 0$, $i_{н2}$, $i_{н3}$ – кривые тока нагрузки, соответствующие расчет-

ным параметрам регуляторов и отличным от расчетных значениях параметров силовой цепи соответственно при $K_a = 0$ и $K_a = 1,58$, u_y – кривая напряжения, поступающего на вход ШИП, $u_{оп}$ – кривая опорного напряжения ШИП, $u_{шип}$ – кривая выходного напряжения ШИП. Кривая тока нагрузки $i_{н3}$ близка к эталонному экспоненциальному процессу, отличаясь лишь на величину пульсаций тока в переходном и квазистатическом режимах, не превышающую допустимого значения.

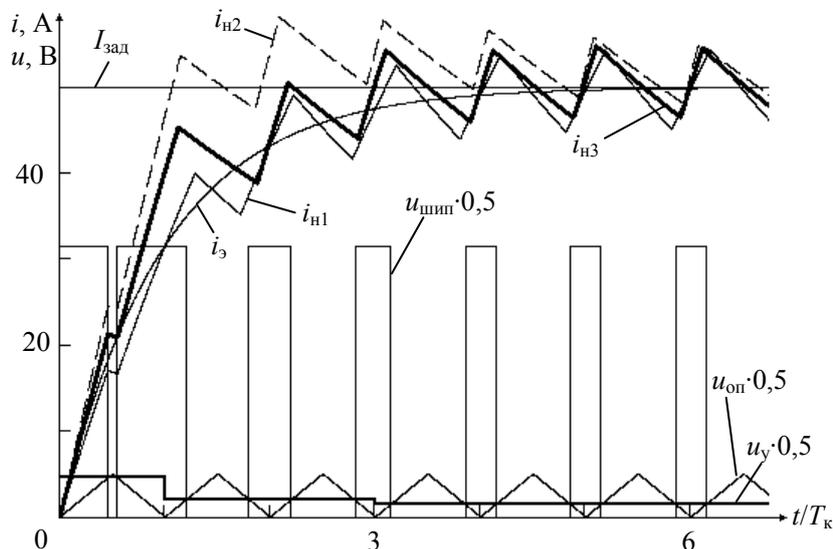


Рис. 4. Результаты моделирования

Выводы

1. Сохранение заданных динамических качеств системы управления регулируемого источника тока с транзисторным ШИП в условиях изменяющихся параметров силовой цепи возможно при введении дополнительного контура сигнальной адаптации с эталонной моделью в виде апериодического звена первого порядка с заданной постоянной времени T_m и ПИ-регулятором.

2. Параметрический синтез адаптивной системы управления можно производить, используя известную методику [2], если в качестве исходных параметров принять максимальное из возможных значений сопротивления нагрузки и минимальное из возможных значений напряжения силового источника питания.

3. Значение коэффициента адаптации целесообразно определять на основе зависимостей предельного значения коэффициента адаптации $K_{а пр}$ от изменяемых параметров, полученных с использованием методики, приведенной в работе [5], и программного комплекса, описанного в работе [6].

Следует отметить, что приведенная в данной работе методика синтеза позволяет выбирать параметры элементов энергетической и информационной подсистем из условия обеспечения заданного быстродействия при допустимом уровне пульсаций тока в нагрузке, заданной частоте коммутации силовых ключей и заданном диапазоне изменения параметров силовой цепи.

Литература

1. Сеницын В.А., Толмачев В.А., Томасов В.С. Принципы построения и пути совершенствования технических характеристик мощных источников электропитания с произвольной формой выходного параметра // Изв. вузов. Приборостроение. – 1999. Т. 39. – № 4. – С. 47–54.

2. Толмачев В.А., Кротенко В.В., Никитина М.В. Синтез цифровой систем управления источником тока с многофазным усилительно-преобразовательным устройством // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Выпуск 15. Теория и практика современных технологий. – С. 330–334.
3. Толмачев В.А., Никитина М.В. Адаптивная система управления многомодульного источника тока с индуктивным сглаживающим фильтром // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 11. – С. 48–53.
4. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984.
5. Толмачев В.А., Осипов Д.В. Анализ устойчивости к автоколебаниям на субгармонических частотах импульсных источников тока программируемой формы // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). – 2001. – Выпуск 3. Физические процессы, системы и технологии точной механики. – С. 132–136.
6. Осипов Д.В. Программный комплекс для анализа устойчивости систем автоматического регулирования тока с широтно-импульсными преобразователями // Современные технологии: сборник научных статей / под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. – С.267–276.

<i>Никитина Мария Владимировна</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nikitina@ets.ifmo.ru
<i>Осипов Дмитрий Владимирович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, osipov77@mail.ru
<i>Толмачев Валерий Александрович</i>	–	Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, tolmachov@ets.ifmo.ru