

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

ЦЫТОВИЧ Леонид Игнатьевич

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ
ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИБОДАМИ

Специальность 05.13.05 - "Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск

1979

Работа выполнена на кафедре электропривода и автоматизации
промышленных установок Челябинского политехнического института
имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Г.В.СУВОРОВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Б.С.ЯКОВЛЕВ,

кандидат технических наук
А.Д.Хмелевцов

Ведущее предприятие – указывается в решении Совета.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1979 г.

Защита диссертации состоится " _____ " _____ 1979 г.
в _____ час. на заседании Специализированного Совета по эле-
ментам и устройствам вычислительной техники и систем управления
при Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсо-
мола.

Отзывы в двух экземплярах (заверенные печатью) просим направ-
лять по адресу: 454044, Челябинск – 44, пр.Ленина 76, Ученый Совет ЧПИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧПИ.

Ученый Секретарь Специализированного
Совета, кандидат технических наук,
доцент

В.С.КАБРЕЕВ

А к т у а л ь н о с т ь т е м ы . Отличительной особенностью прогресса в области автоматизированного вентильного электропривода (ВЭП) является быстрое и непрерывное совершенствование его элементной базы в направлении роста мощности вентильных преобразователей, увеличении чувствительности элементов систем регулирования, снижения их инерционности и уменьшения мощности сигналов в каналах передачи информации. Указанные тенденции в развитии элементной базы систем управления направлены прежде всего на повышение динамических показателей ВЭП и обеспечение высокой точности регулирования технологических процессов.

Однако, существенным препятствием на пути расширения динамических возможностей систем регулирования ВЭП явилось резкое увеличение относительного уровня помех в схемах управления. Сигналы помех стали вызывать искажения статических и динамических характеристик отдельных элементов и всей системы ВЭП, а в ряде случаев приводить к ее полной неработоспособности. Появилась необходимость либо введения в каналы преобразования информации различных стационарных фильтров, что, как правило, обуславливает существенное снижение предельных динамических возможностей ВЭП, либо применения элементной базы, обладающей высокой помехоустойчивостью. Последний путь относится к числу наиболее перспективных.

Учитывая, что основными и наиболее чувствительными к сигналам помех элементами систем управления ВЭП являются операционные усилители (ОУ), в первую очередь необходимо решать проблему увеличения их помехоустойчивости.

Одним из прогрессивных методов эффективной борьбы с сигналами помех является переход к автоколебательным широтно-импульсным усилителям, принцип действия которых основан на разворачивающемся во времени преобразовании информативного воздействия. Разворачивающиеся операционные усилители (РОУ) удачно сочетают в себе такие показатели как высокая точность, простота технической реализации, значительный коэффициент усиления по мощности, а также многофункциональность, которая позволяет выполнять на их основе как аналоговые, так и цифровые алгоритмы управления технологическими процессами. Кроме того, широтно-импульсные носители информации весьма перспективны с точки зрения увеличения помехозащищенности проводных линий связи систем ВЭП.

В то же время, широкое применение РОУ в системах ВЭП сдерживается тем, что еще не полностью раскрыты потенциальные возможности подобных ОУ применительно к решению основных задач в области автоматизированного вентильного электропривода.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование технических показателей РОУ, а также возможностей построения на их основе систем управления электроприводами с высокими динамическими и эксплуатационными характеристиками.

В работе были поставлены и решались следующие основные задачи:

- Анализ статических погрешностей РОУ и выбор наилучшего с точки зрения точности реализации заданного закона регулирования соотношения параметров его звеньев и внешних операторных цепей. Сравнение точностных характеристик линейных и развертывающих ОУ.
- Исследование динамических показателей РОУ как звена с частотно-широотно-импульсной модуляцией и оценка характера его ошибок при явлении замедленной дискретизации динамической составляющей входной координаты. Фильтрация несущих колебаний РОУ с различными законами широкоимпульсной модуляции.
- Анализ помехоустойчивости РОУ к сигналам помех, имеющих уровень и спектральный состав, характерный для систем управления ВЭП. Сравнительный анализ помехоустойчивости дифференцирующих звеньев на базе линейных (интегральных) и развертывающих ОУ.
- Исследование динамических показателей линейных и развертывающих ОУ при передаче импульсных воздействий.
- Исследование динамических показателей различных вариантов каскадного включения РОУ в системах подчиненного управления электроприводами.

- Разработка и исследование путей повышения помехоустойчивости, а также временной и температурной стабильности характеристик РОУ и функциональных преобразователей (ФП) на их основе.

- Анализ возможных путей диагностики и безопасности неисправности РОУ в системах управления ВЭП.

- Реализация на базе РОУ систем управления ВЭП с высокими динамическими и эксплуатационными показателями.

Методика проведения исследований.

Теоретический анализ статических и динамических показателей РОУ производился на основе методов математического моделирования процессов развертывающего преобразования на ЦМ с использованием аппарата трансцендентных функций, а также с применением логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик. Результаты теоретических исследований экспериментально проверялись на лабораторных стендах и действующих системах управления электроприводами.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

- на основе полученных аналитических зависимостей проведен анализ

статических характеристик РОУ, а также даны конкретные рекомендации по выбору его параметров и внешних операторных цепей, обеспечивающие *минимизацию* результирующей ошибки преобразования информативного воздействия;

- на базе разработанной математической модели процесса развертывающего преобразования с частотно-широко-импульсной модуляцией дан анализ динамических характеристик РОУ, его ошибок при явлении замедленной дискретизации и получен критерий выбора частоты автоколебаний развертывающей системы, при которой ее помехозащищенность максимальна;

- дан анализ помехоустойчивости РОУ к сигналам внешних помех, а также произведена сравнительная оценка динамических характеристик различных звеньев на базе РОУ и линейных ОУ, функционирующих при высоком уровне помеховых воздействий;

- с помощью разработанной математической модели и полученных аналитических зависимостей исследованы динамические показатели линейных ОУ и РОУ при передаче возмущений, представленных в дискретной форме;

- рассмотрены вопросы *фильтрации несущих колебаний РОУ* с различными законами широко-импульсной модуляции и их каскадного включения в системах подчиненного регулирования электроприводами;

- разработаны и исследованы пути повышения помехоустойчивости, временной и температурной стабильности характеристик, а также эксплуатационных показателей РОУ и ФП на их основе;

- исследована динамика систем управления электроприводами, выполненных на базе разработанных РОУ и ФП.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- Даны рекомендации по проектированию РОУ, направленные на *минимизацию* его результирующей статической и динамической ошибок, а также на расширение динамических показателей систем электропривода. В частности, показана возможность реализации на базе РОУ дифференцирующих звеньев высокого порядка, позволяющих в реальных условиях промышленной эксплуатации при наличии помех существенно увеличить полосу пропускания информативного сигнала систем ЭЗП.

- Исследованы и практически реализованы способы повышения эксплуатационной надежности, помехоустойчивости, временной и температурной стабильности характеристик РОУ и ФП.

- Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в относительных единицах, имеют обобщенный характер и могут быть распространены на широкий класс электромеханических, гидравлических и других систем, имеющих траектории движения, аналогичные РОУ.

Реализация результатов исследований. Разработанные схемы развортывающихся операционных усилителей и функциональных преобразователей легли в основу:

- системы управления электроприводами многоклетьевого стана холодного проката на Орском заводе по обработке цветных металлов;
- системы управления приводом подачи шлифовальных станков на Челябинском тракторном заводе;
- серии складящихся электроприводов малой и средней мощности, разрабатываемых на предприятиях г. Челябинска.

Экономический эффект от результатов исследований согласно двухсторонним актам внедрений составляет более 200 тыс. руб.

А п р о б а ц и я р а б о т ы . Основные результаты работы докладывались и обсуждались на : 1) заседании координационной комиссии по проблеме "Коммутационно-модуляционные методы повышения точности устройств измерительной техники и автоматики", Челябинск, 1974 г.; 2) межотраслевой н/т конференции "Автоматизация технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства", Сызрань, 1975 г.; 3) н/т семинаре "Повышение эффективности вторичных источников питания", Киев, 1976 г.; 4) юбилейной н/т конференции, посвященной 40-летию кафедры электротехники ЧИМЭСХ, Челябинск, 1976 г.; 5) первой н/т конференции молодых ученых и специалистов ЧПИ, Челябинск, 1977 г.; 6) семинаре "Наладка электрооборудования станов холодной прокатки", Челябинск, 1977 г.; 7) н/т конференции "Повышение надежности автоматизированного электропривода", Челябинск, 1978 г.; 8) н/т конференции по автоматизированному электроприводу прокатных станков, Свердловск, 1978 г.; 9) ежегодных 1974 - 1978 гг. н/т конференциях Челябинского политехнического института.

П у б л и к а ц и я . По результатам выполненных исследований опубликовано 16 статей и получено 15 авторских свидетельств на изобретения.

С т р у к т у р а и о б ъ е м р а б о т ы . Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов по работе, содержание которых изложено на 142 страницах машинописного текста, иллюстрирована 68 рисунками, имеет 23 таблицы, перечень используемой литературы, включающий 186 наименований и приложения на 12 страницах машинописного текста и 9 рисунках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе материала, опубликованного в литературе, а также по данным ряда отечественных и зарубежных фирм, исследуются технические возможности ОУ различных классов с точ-

ки зрения их наибольшего удовлетворения всей совокупности требований, предъявляемой к элементной базе ВЭП. Сравнивались получившие наибольшее распространение в области систем электропривода усилители с непосредственной связью между каскадами (ОУ-НС), ОУ с "модуляцией - демодуляцией" информативной координаты (М-ДМ) и ОУ автогенераторного типа (ОУ-АГ). Анализ характеристик перечисленных классов ОУ базировался на оценке их метрологических (группа I) и эксплуатационных (группа II) показателей. В группу I входили такие показатели как коэффициент усиления, входное сопротивление, полоса пропускания, в.д.с. смещения "нуля" и входной ток, а также уровень их стабильности, напряжения шумов и коэффициент влияния источника питания.

В работе показывается, что сопоставление ОУ-НС, М-ДМ, ОУ-АГ на основе сравнительной оценки их параметров группы I не позволяет обоснованно выделить какой-либо один класс ОУ, применение которого в системах ВЭП оказалось бы наиболее эффективным. Это вызвано прежде всего тем, что системы управления электроприводами с позиций информационно-измерительной техники относятся к категории систем низкой и средней точности, где относительная приведенная погрешность выполнения ОУ заданного закона преобразования сигнала управления должна находиться в пределах 0,05 - 0,5%. Существенный же прогресс за последние годы в области интегральной схемотехники позволил поднять на новый качественный рубеж основные метрологические показатели усилителей всех классов без исключения и перекрыть тем самым реально необходимые требования к ОУ систем ВЭП.

Однако, опыт наладки промышленных объектов показывает, что качество, динамические возможности и надежность систем ВЭП во многом зависят от типа применяемых ОУ, а именно от степени их удовлетворения показателям группы II, среди которых целесообразно выделить следующие: 1) мощность выходного сигнала, 2) помехоустойчивость, 3) многофункциональность, 4) диагностика неисправности, 5) безопасность неисправности.

Результаты анализа показали, что ни один из применяемых в настоящее время в области ВЭП классов ОУ не удовлетворяет полной совокупности требований, определяемых показателями группы II. Несоответствие между высоким уровнем метрологических характеристик и ограниченностью эксплуатационных возможностей ОУ-НС, М-ДМ, ОУ-АГ вынуждает обратиться к анализу другого класса ОУ - импульсных развертывающих операционных усилителей.

На основе проведенного анализа различных принципов построения РОУ было установлено, что многофункциональный характер широко-импуль-

сных носителей информации, их перспективность с позиций помехоустойчивости систем управления и помехозащищенности каналов передачи информации, а также простота технической реализации дискретных устройств, сочетающаяся с высокой точностью их работы, позволяют наиболее приемлемым для решения задач в области ВЭП считать базовый принцип построения РОУ, представляющий собой автоколебательное звено с частотно-широотно-импульсной модуляцией (рис. 1, а).

Однако, недостаточная изученность потенциальных возможностей РОУ как операционного усилителя постоянного тока вызывает необходимость детального исследования его технических характеристик применительно к решению задач в области автоматизированного электропривода.

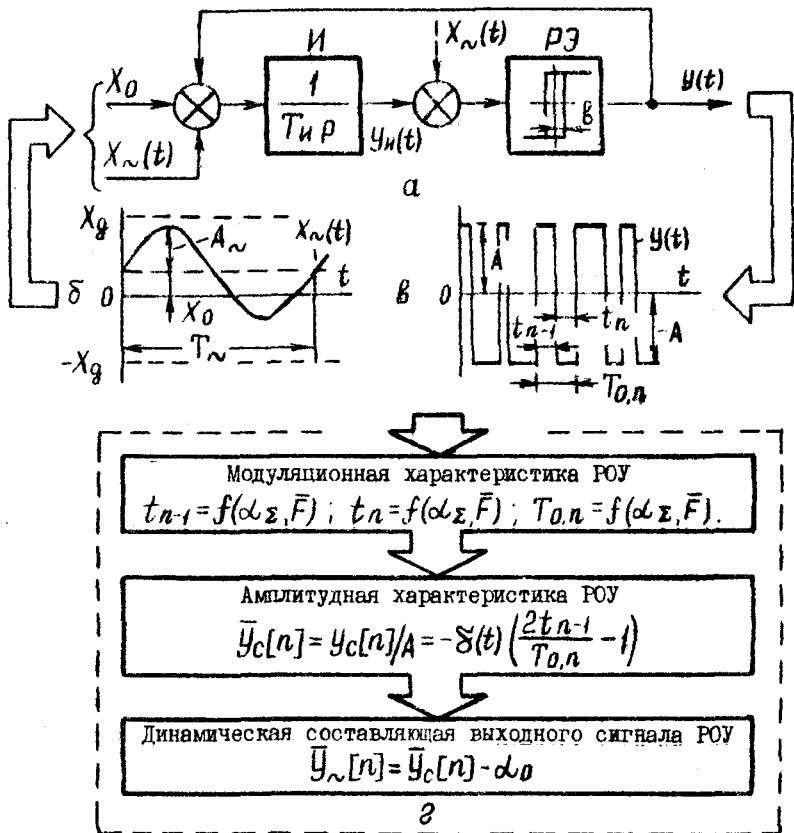
Рассмотрены основные свойства и приведены аналитические зависимости, характеризующие РОУ с позиций операционного преобразования сигналов постоянного тока при условии идеализации характеристик, входящих в его состав звеньев.

В т о р а я г л а в а диссертации посвящена исследованию влияния различных дестабилизирующих факторов на статическую точность РОУ и определению рациональных путей выбора параметров его звеньев и внешних операторных цепей с целью минимизации отдельных составляющих результирующей погрешности преобразования информативного воздействия.

В работе анализировались следующие основные причины отклонения уровня выходных координат РОУ от заданной величины: 1) ограниченность коэффициента усиления, входного и выходного сопротивлений и полосы равномерного пропускания частот усилителя постоянного тока (УПТ) интегратора (И) с учетом заданной функции преобразования РОУ; 2) наличие сопротивления R_y утечки монтажа и интегрирующего конденсатора; 3) абсорбция интегрирующего конденсатора; 4) наличие "малых" постоянных времени УПТ звена И; 5) статическая и динамическая составляющие дрейфа "нуля" УПТ интегратора; 6) асимметрия порогов переключения релейного элемента (РЭ); 7) конечное значение времени переноса сигнала в тракте РЭ; 8) статическая и динамическая составляющие асимметрии амплитуд выходного сигнала РЭ; 9) нестабильность питающего напряжения.

При анализе рассматривались две выходных координаты РОУ: интервал дискретизации T_0 и постоянная составляющая U_c выходных импульсов $U(t)$. Это вызвано спецификой РОУ, для которого отклонение среднего значения сигнала $U(t)$ происходит, как правило, в сочетании с изменением его динамических свойств, определяемых временем T_0 .

Исследования показали, что погрешность чувствительности РОУ, обусловленная экспоненциальным характером изменения развертки $U_n(t)$



- $\alpha_{\Sigma} = \alpha_0 + \alpha_{\sim}$ - относительное значение амплитуды суммарного входного сигнала РОУ;
- $\alpha_0 = |X_0/X_g|$ - относительная величина постоянной составляющей входного сигнала РОУ;
- $\alpha_{\sim} = |X_{\sim}/X_g|$ - относительное значение динамической составляющей входного сигнала РОУ;
- $\bar{F} = (T_0/\alpha_{\Sigma=0})/T_{\sim}$ - относительное значение частоты динамической составляющей входного сигнала РОУ;
- $\delta(t)$ - дельта-функция Дирака.

Рис. 1. Структурная схема (а), временные диаграммы сигналов (б, в) и алгоритм анализа динамических характеристик РОУ (г).

равна

$$\delta y_c^3 = 1 - \frac{y_c^p}{y_c} = - \frac{\bar{B}}{K_3(\omega_0)} \left[1 + \frac{\bar{B}(1 + \alpha_0^2)}{K_3(\omega_0)(1 - \alpha_0^2)} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где: y_c^p - реальная величина постоянной составляющей импульсов $y(t)$; $K_3(\omega_0)$ - эквивалентный коэффициент усиления И на частоте ω_0 автоколебаний РОУ с учетом ограниченности динамических возможностей УПТ как апериодического звена первого порядка, сопротивления R_y и параметров внешних операторных цепей РОУ, определяющих вид его передаточной функции; $\bar{B} = |B/A|$ - относительное значение порогов переключения РЭ; $\pm A$ - амплитуда выходного сигнала РОУ (рис. I, в); $\alpha_0 = |X_0/X_g|$ - относительная величина постоянной составляющей входного сигнала РОУ (рис. I, б). $\pm X_g$ - допустимый входной сигнал РОУ.

На основе полученных аналитических зависимостей, для различных сочетаний характеристик УПТ сформулированы требования к параметрам интегрирующей емкости и внешних операторных цепей РОУ, при выполнении которых ошибка δy_c^3 минимальна. Показано, что экспоненциальный характер изменения разворачивающей функции не оказывает практического влияния на динамические показатели РОУ.

Анализ влияния абсорбции интегрирующего конденсатора на точность РОУ производился при условии, что передаточная функция И соответствует виду

$$W_{II}(p) = (1 + T_a p) \{ (T_1 + T_i) p [1 + T_a T_i p (T_1 + T_i)^{-1}] \}^{-1}, \quad (2)$$

где: $T_a = R_a C_a$; $T_1 = R_{oc} C_a$; $T_i = R_{oc} C_{II}$ - постоянные времени; R_a, R_{oc} - сопротивление абсорбции и цепи обратной связи РОУ; C_a, C_{II} - емкость абсорбции и интегрирующего конденсатора. С помощью разработанной на основе (2) математической модели процесса разворачивающего преобразования получен критерий минимизации ошибки РОУ из-за R_a, C_a ,

$$\lim_{\substack{T_a C_a \rightarrow 0 \\ T_a \neq 0; C_a \neq 0}} \delta y_c^3 = 0 \quad (3)$$

согласно которому в РОУ целесообразно применять интегрирующие конденсаторы с минимальным значением произведения $T_a C_a$, где $C_a = C_a/C_{II}$, $T_a = T_a/T_0|_{\alpha_0=0}$ - относительные значения параметров C_a, T_a .

В диссертации получен критерий оптимизации частотной характеристики УПТ интегратора. Считалось, что линейная часть РОУ представлена звеном

$$W_{II}(p) = [T_M p (1 + T_M p)]^{-1}, \quad (4)$$

где T_M - "малая" постоянная времени. Для исключения динамической

ошибки РОУ при ступенчатом изменении сигнала X_0 частотную характеристику УПТ необходимо формировать, исходя из условия

$$\overline{T}_M \leq 10^{-1}, \quad (5)$$

где $\overline{T}_M = T_M / T_0 |_{\omega_0=0}$ - относительное значение параметра T_M .

При условии выполнения (3), (5), погрешность чувствительности РОУ всецело определяется величиной Δy_c^2 . В работе дана сопоставительная оценка ошибки чувствительности линейного интегрального ОУ и РОУ на его основе, а также определена область частот автоколебаний, где развертывающаяся система по своим точностным показателям значительно превосходит линейную.

Исследовано влияние статической и динамической составляющих дрейфовой ошибки УПТ звена И на статические и динамические показатели РОУ. На основе полученных аналитических зависимостей показано, например, что ошибка РОУ, вызванная ступенчатым изменением сигнала э.д.с. смещения "нуля" УПТ $e \cdot i(t)$, существует в пределах одного интервала дискретизации импульсов $y(t)$, зависит от знаков производных $dy_n(t)/dt$ и $d[e \cdot i(t)]/dt$, величины информативного сигнала X_0 и взаимного положения во времени сигналов $y_n(t)$, $e \cdot i(t)$, а ее максимальный уровень определяется из соотношения

$$\Delta y_c^e = (1 - y_c^p) A^{-1} = \pm 0,25 \bar{e} (1 - \omega_0^2) [1 \mp 0,25 \bar{e} (1 + \omega_0)]^{-1}, \quad (6)$$

где $\bar{e} = e \cdot i(t) / g$. В работе дана сравнительная оценка дрейфовых ошибок РОУ и линейного ОУ.

Как показали результаты анализа, с точки зрения процесса преобразования сигнала управления в среднее значение импульсов $y(t)$, отклонение характеристик РЭ от требуемого вида не оказывает заметного влияния на статическую точность РОУ с активными (на базе УПТ) интеграторами. В РОУ, линейная часть которых выполнена на основе пассивных R - C цепей, основными составляющими ошибки являются аддитивный дрейф зоны неоднозначности РЭ и неточность определения моментов времени соответствия между амплитудой сигнала развертки $y_n(t)$ и порогом переключения РЭ. Наряду с искажением динамических показателей (интервала дискретизации) подобных РОУ, конечное значение времени переноса сигнала в тракте РЭ обуславливает смещения "нуля" сигнала $y_n(t)$, что воспринимается РОУ как эквивалентное изменение сигнала управления. На основе полученных аналитических зависимостей показано, что при ступенчатом изменении сигнала X_0 в РОУ независимо от типополнения его линейной части в пределах одного интервала дискретизации существует динамическая ошибка, обусловленная конечным значением времени переноса сигнала в тракте РЭ. С позиций статической точности РОУ данный вид ошибки может не учитываться.

В диссертации дан сравнительный анализ различных принципов построения РЭ с точки зрения обеспечения максимальной адаптации РОУ к искажению его характеристик. Показано, что наиболее приемлемым вариантом построения РЭ является схема регенеративного компаратора с положительной обратной связью по напряжению, позволяющая существенно снизить восприимчивость РОУ к возмущениям типа статической и динамической асимметрии амплитуд выходного сигнала $y(t)$.

Результаты экспериментальных исследований показали, что источник питания РОУ должен удовлетворять требованиям, предъявляемым к напряжению питания элементов, на основе которых реализуются звенья И и РЭ.

Третья глава диссертации посвящена анализу динамических характеристик РОУ при воздействии гармонического сигнала $X_n(t)$ (рис. I, б) на информационный вход и на вход РЭ (рис. I, а), а также сравнительной оценке различных законов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с точки зрения влияния параметров демодулирующего фильтра на динамические показатели РОУ. Динамические характеристики РОУ исследовались на основе графиков переходных процессов $\bar{y}_n[n] = f(\alpha_\Sigma, \bar{F})$ в соответствии с методикой, блок-схема которой представлена на рис. I, г.

Модуляционная характеристика РОУ при воздействии сигнала на информационный вход в рекуррентной форме записывается как

$$t_n = 2 \left\{ \bar{B} T u + (-1)^n \alpha_n \omega_n^{-1} \sin \left[\frac{\omega_n}{2} \left(t_n + 2 \sum_{i=0}^{n-1} t_i \right) \right] \right\} \times \sin \frac{\omega_n t_n}{2} \left\{ [1 - (-1)^n \alpha_0]^{-1} \right\}, \quad (7)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$; $t_0 = 0$; $\bar{B} < 1, 0$; $\alpha_\Sigma < 1, 0$.

Теоретические на основе (7) и экспериментальные исследования показали, что РОУ является существенно нелинейным звеном, динамические характеристики которого в общем случае зависят от соотношения статической X_0 и динамической $X_n(t)$ составляющих информативного воздействия. Если принять $\alpha_\Sigma \leq 0,8$, что соответствует на практике реальному диапазону использования статической характеристики ОУ, то полоса равномерного пропускания частот РОУ равна

$$f_p = 0,1 \cdot T_0^{-1} \Big|_{\alpha_0=0}. \quad (8)$$

В указанной области f_p РОУ обладает свойствами линейного ОУ с динамическими характеристиками независимыми от соотношения амплитуд сигналов X_0 и $X_n(t)$.

Как показано в диссертации, существенным преимуществом частотно-широтного импульсного способа обработки информации является отсутствие

на частотах сигнала $\chi_n(t)$ близких или превышающих частоту несущих автоколебаний РОУ ошибок замедленной дискретизации вида низкочастотных биений, либо дрейфа "нуля" выходной координаты $y(t)$, свойственных широтно-импульсным системам с постоянной частотой несущих колебаний. Это является результатом способности РОУ синхронизироваться с частотой сигнала $\chi_n(t)$, вследствие чего интервал дискретизации импульсов $y(t)$ оказывается кратным частоте динамической составляющей входного воздействия.

При передаче гармонического сигнала $\chi_n(t)$ со стороны входа РЭ (рис. 1, а) модуляционная характеристика РОУ имеет вид

$$t_n = \left\{ 2\bar{B} + d_n \left[(-1)^n \sin\left(\omega_n \sum_{i=0}^{i=n-1} t_i\right) - (-1)^n \sin\left(\omega_n \sum_{i=1}^{i=n} t_i\right) \right] \right\} \times \quad (9)$$

$$\times T_n [1 + (-1)^n \alpha_0]^{-1},$$

где $d_n < \bar{B}$; $\alpha_0 < 1, 0$; $t_0 = 0$. Результаты анализа показали, что в области частот

$$\bar{F} \leq 5 \cdot 10^{-2} \quad (10)$$

РОУ обладает свойствами линейного дифференцирующего звена по отношению к сигналу $\chi_n(t)$, прикладываемому ко входу РЭ. При $\bar{F} > 10^{-1}$ выходной сигнал РОУ может содержать низкочастотные биения со средним нулевым значением. Ошибка замедленной дискретизации вида дрейфа "нуля" сигнала $y(t)$ при этом отсутствует. Частоту автоколебаний РОУ желательно выбирать из условия (10), что исключает появление на его выходе низкочастотных составляющих и обеспечивает повышенную помехозащищенность развертывающей системы по отношению к помехам, поступающим на вход РЭ. В работе получены также аналитические зависимости для максимальных отклонений выходных координат РОУ, справедливые для области частот (10), и дана оценка влияния высокочастотной девиации зоны неоднозначности РЭ на статические и динамические показатели развертывающего усилителя.

В диссертации произведен сравнительный анализ различных законов ШИМ с позиций уровня пульсаций сигнала на выходе демодулирующего фильтра первого порядка. Сравнивались РОУ с постоянным, параболически уменьшающимся и линейно возрастающим в функции сигнала управления законами изменения частоты выходных импульсов. Указанные законы ШИМ рассматривались применительно к РОУ с двухполярным и однополярным характером сигнала $y(t)$.

Анализ показал, что РОУ с однополярной ШИМ позволяет максимально использовать предельные динамические возможности развертывающего усилителя как импульсной системы. При каскадном включении РОУ в систе-

мах подчиненного регулирования наилучшими динамическими показателями будут обладать каскады на основе РОУ с линейно-возрастающей в функции информативного воздействия частотой автоколебаний. В работе приводятся, предложенные автором, принципы построения РОУ с различными законами ШИМ.

Четвертая глава диссертации содержит результаты 1) теоретических и экспериментальных исследований помехоустойчивости РОУ и линейных ОУ, а также дифференцирующих звеньев на их основе, 2) исследований динамических показателей линейных и разветвляющихся ОУ при передаче дискретных воздействий, 3) теоретического и экспериментального анализа динамики различных вариантов каскадного включения РОУ в системах подчиненного регулирования электроприводами.

Оценка помехоустойчивости РОУ производилась для гармонических помех, уровень которых в системах БЭП максимален. Предполагалось, что функции помехового воздействия выполняет сигнал

$$X_{\Pi}(t) = \begin{cases} A_{\Pi} > X_{g}, n \cdot T_{\Pi} < t < T_{\Pi}(n+0,5) \\ -A_{\Pi} < -X_{g}, T_{\Pi}(n+0,5) < t < T_{\Pi}(n+1), \end{cases}$$

имеющий период T_{Π} , амплитуду A_{Π} , относительный уровень $\alpha_{\Pi} = |A_{\Pi}/X_{g}|$ и среднее нулевое значение.

При воздействии помехи $X_{\Pi}(t)$ на информационный вход, РОУ из режима автоколебаний переходит в режим синхронизации с частотой сигнала $X_{\Pi}(t)$ и преобразуется из частотно-широко-импульсной системы в широко-импульсную, где воздействие $X_{\Pi}(t)$ играет роль сигнала несущей частоты. На основе разработанной модели процесса квазиразветвляющегося преобразования показано, что РОУ в режиме синхронизации помехой $X_{\Pi}(t)$ в диапазоне $T_{\sim}^{-1} \leq 0,5 T_{\Pi}^{-1}$ приобретает свойства линейного аperiodического звена первого порядка с эквивалентной постоянной времени

$$T_{\sim} \approx \frac{\pi}{16} T_{\Pi} \alpha_{\Pi} \quad (II)$$

автоматически перестраиваемой в функции параметров помехового воздействия. Дана сравнительная оценка динамики РОУ и линейных аperiodических фильтров первого (Ф1) и второго (Ф2) порядков, работающих при одном и том же уровне α_{Π} помехи $X_{\Pi}(t)$. Показано, что инерционность РОУ существенно ниже инерционности Ф1 и в значительном диапазоне α_{Π} меньше инерционности Ф2, т.е. для линейных фильтров выбор их постоянных времени зависит не только от параметров помехового сигнала, но и определяется уровнем информативного воздействия $X_{\Pi} + X_{\sim}(t)$. Получены условия синхронизации РОУ внешней гармонической помехой и показано, что степень помехоустойчивости РОУ увеличивается по мере роста частоты сигнала $X_{\Pi}(t)$.

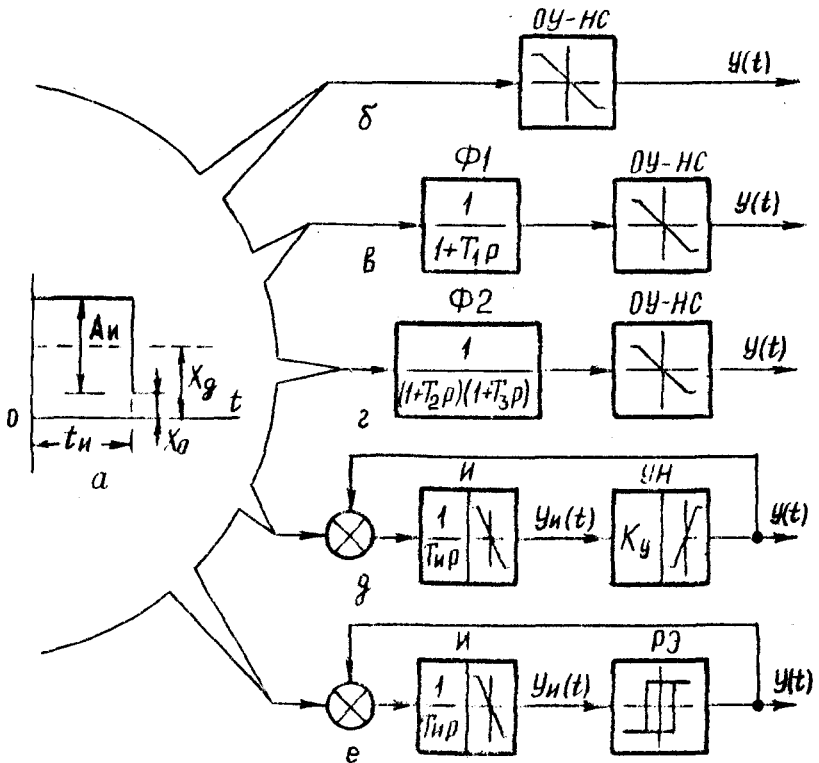


Рис.2. Диаграммы входных сигналов (а) и структурные схемы (б-е) операционных усилителей

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований помехоустойчивости дифференцирующих звеньев (Д) на основе РОУ и линейных интегральных ОУ-НС с различными входными фильтрами. Анализ показал, что Д – звенья на основе РОУ при работе с внешними помехами имеют минимальные искажения динамических характеристик. Высокая помехоустойчивость РОУ позволила в реальных условиях промышленной эксплуатации ввести в закон управления электроприводами производные высших порядков и существенно расширить динамические возможности систем ЭП. Так, например, при частоте механического резонанса объекта регулирования 35 с^{-1} была получена полоса пропускания системы управления на уровне $(50 - 60) \text{ с}^{-1}$.

В диссертации осуществлен сравнительный анализ динамики линейных и развертывающих ОУ при работе с импульсным воздействием

$$X_{и}(t) = \begin{cases} A_{и} > X_{г}, & 0 < t \leq t_{и} \\ 0, & t > t_{и} \end{cases},$$

имеющим амплитуду $A_{и}$ и длительность $t_{и}$ (рис.2,а). Сравнивались ОУ-НС (рис.2,б), ОУ-НС с Ф1 (рис.2,в), ОУ-НС с Ф2 (рис.2,г), псевдоразвертывающий ОУ (ОУ-ПР) (рис.2,д), включающий звено И, а также неинвертирующий усилитель УН с коэффициентом $K_{у}$ и РОУ (рис.2,е). На основе полученных аналитических зависимостей и разработанной математической модели процесса преобразования усилителями сигнала $X_{и}(t)$ было показано, что ОУ-ПР и РОУ по сравнению с линейными ОУ (рис.2,б-г), обладают значительно более высоким быстродействием, причем, как и в случае работы с сигналом $X_{п}(t)$, их инерционность определяется параметрами возмущения $X_{и}(t)$. Анализ показал также, что динамика РОУ зависит от взаимного положения во времени сигналов $U_{и}(t)$ и $X_{и}(t)$. Способность развертывающих ОУ адаптироваться к параметрам входных воздействий позволяет эффективно применять их для работы с преобразователями, представляющими регулируемый или контролируемый координату в импульсной форме.

В работе на основе теоретических и экспериментальных исследований показано, что каскадное включение РОУ в системах подчиненного регулирования может осуществляться без использования промежуточных демодулирующих фильтров, а базироваться на принципе взаимной синхронизации развертывающих усилителей, когда один из предыдущих РОУ выполняет функции не только операционного усилителя соответствующего контура регулирования, но и берет на себя роль источника сигнала несущей частоты для последующих усилителей. Дана сравнительная оценка динамики взаимно синхронизованного каскада РОУ с динамическими возможностями каскадов, использующих демодулирующие фильтры Ф1 и Ф2.

П я т а я г л а в а диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному анализу, предлагаемых автором, способов повышения помехоустойчивости, а также временной и температурной стабильности характеристик РОУ и Ф1 на их основе.

Среди принципов построения РОУ с повышенной помехоустойчивостью рассматриваются усилители с дискретной коррекцией сигнала ошибки интегратора, с регулируемой в функции информативного или задающего воздействий полосой равномерного пропускания частот и РОУ с потенциально разделенным на базе каскада М-ДМ входом, где функции источника несущей частоты выполняет выходной сигнал РЭ. Приводятся принципиальные схемы РОУ и их основные технические характеристики.

В работе анализируются различные пути повышения временной и температурной стабильности характеристик РОУ с активными на базе УПТ и пассивными R - C интеграторами, основанные на непрерывной и дискретной коррекции источников аддитивной ошибки. Предлагается, в частности, РОУ с промежуточным каскадом преобразования на базе усилителя переменного напряжения и с узлом циклической коррекции "нуля" интегратора. На основе теоретического анализа найдено оптимальное по быстродействию соотношение постоянных времени заряда и разряда корректирующего конденсатора, при котором циклическая коррекция "нуля" РОУ осуществляется за время одного интервала дискретизации импульсов $U(t)$.

Предложен и исследован ряд принципов построения функциональных преобразователей на основе РОУ, обладающих повышенной стабильностью характеристик и обеспечивающих не только значительный коэффициент усиления ФП по мощности, но и возможность получения высокой помехозащищенности каналов передачи информации систем БЭП.

В приложении рассматриваются 1) вопросы диагностики неисправности РОУ с использованием световых индикаторов, 2) предлагаемые автором принципы построения РОУ с повышенной безопасностью неисправности, обеспечивающие нулевое значение постоянной составляющей выходного сигнала РОУ при неработоспособности его предварительных каскадов усиления, 3) алгоритм анализа динамики РОУ на ЦЕМ и 4) результаты экспериментальных исследований характеристик систем управления электроприводами, выполненных на базе РОУ.

О с н о в н ы е в ы в о д ы

1. Анализ различных классов ОУ, используемых в системах управления электроприводами, показал, что наиболее перспективными, с точки зрения эксплуатационных возможностей, являются развертывающие операционные усилители, базовый принцип построения которых представляет собой автоколебательное звено с частотно-широко-импульсной модуляцией.

2. На основе теоретических исследований погрешностей РОУ получены аналитические зависимости влияния основных дестабилизирующих факторов на статическую точность развертывающего усилителя. В результате намечены и практически реализованы рациональные пути выбора параметров элементов РОУ с целью минимизации его результирующей погрешности. Даны рекомендации по выбору параметров внешних операторных цепей РОУ с учетом заданной функции преобразования и характеристик звеньев, входящих в его состав.

3. На базе разработанной математической модели процесса развертывающего преобразования с помощью ЦВМ произведен теоретический анализ динамических характеристик и ошибок замедленной дискретизации РОУ при воздействии гармонического сигнала как со стороны информационного входа РОУ, так и со стороны входа РЭ.

Показано существенное преимущество частотно-широотно-импульсного метода преобразования информации по сравнению с другими видами ШИМ, заключающееся в отсутствии ошибок замедленной дискретизации в виде низкочастотных биений или дрейфа "нуля" выходной координаты при воздействии гармонического сигнала на информационный вход РОУ.

Получен критерий выбора частоты автоколебаний РОУ с целью исключения в его выходном сигнале низкочастотных биений, обусловленных воздействием гармонической помехи на вход релейного элемента.

4. Произведена сравнительная оценка различных законов ШИМ с позиций уровня пульсаций на выходе демодулирующего фильтра. Показано, что РОУ с однополярной ШИМ позволяют максимально использовать предельные динамические возможности развертывающих усилителей как импульсных систем.

5. Теоретические и экспериментальные исследования влияния помех, поступающих на информационный вход РОУ, показали высокую степень помехоустойчивости развертывающего усилителя и адаптацию его динамических характеристик к параметрам синхронизирующих воздействий. Показано, что РОУ в режиме синхронизации с частотой внешней гармонической помехи представляет собой звено, близкое по своим характеристикам к линейному апериодическому фильтру первого порядка с постоянной времени, пропорциональной периоду и амплитуде помехового сигнала. Получены в аналитической форме условия синхронизации РОУ внешним периодическим сигналом.

6. С помощью теоретических и экспериментальных исследований произведено сравнение динамических характеристик дифференцирующих звеньев, выполненных на базе РОУ и линейных ОУ с различными входными фильтрами. Показано, что дифференцирующие регуляторы на основе РОУ обладают повышенной помехоустойчивостью.

7. На основе разработанной математической модели и полученных аналитических зависимостей показано, что РОУ по сравнению с линейными ОУ обладает максимальным быстродействием при передаче импульсных синхронизирующих воздействий. Получены условия синхронизации РОУ импульсным сигналом.

8. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что каскадное включение РОУ в системах подчиненного регулирования элек-

троприводами может осуществляться без введения в схему регуляторов демодулирующих фильтров, а базироваться на эффекте взаимной синхронизации усилителей.

9. Предложены, исследованы и практически реализованы пути повышения помехоустойчивости, временной и температурной стабильности характеристик, диагностики и безопасности неисправностей РОУ и функциональных преобразователей на их основе.

10. Промышленное внедрение РОУ в системах электропривода подтвердило высокие технические возможности развертываемых усилителей и функциональных преобразователей на их основе.

На базе РОУ выполнены ряд систем автоматического управления электроприводами с повышенными динамическими и эксплуатационными показателями. Например, высокая помехоустойчивость РОУ позволила в реальных условиях промышленной эксплуатации ввести в закон управления производные высших порядков и за счет этого получить частоту среза системы управления выше частоты механического резонанса объекта регулирования.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Суворов Г.В., Маурер В.Г., Цытович Л.И. Релейный преобразователь сигналов с циклической коррекцией дрейфовых параметров. - Приборы и техника эксперимента, 1976, №2, с.83-84.

2. Суворов Г.В., Цытович Л.И. Импульсный усилитель постоянного тока с повышенной помехозащищенностью. - Приборы и техника эксперимента, 1976, №5, с.144-146.

3. Цытович Л.И., Маурер В.Г. Время-импульсный преобразователь значения сопротивления в напряжение. - Приборы и техника эксперимента, 1978, №1, с.71-74.

4. Цытович Л.И., Петренко Б.А., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. - Приборы и техника эксперимента, 1978, №2, с.154-157.

5. Цытович Л.И., Осипов О.И., Суворов Г.В. Релейный операционный усилитель с повышенной помехозащищенностью. - Электротехн.пром.-сть. Сер."Электропривод", 1976, вып.6 (50), с.8-11.

6. Цытович Л.И., Суворов Г.В. Влияние периодических помех на динамические характеристики релейного операционного усилителя. - Электротехн.пром.-сть. Сер."Электропривод", 1978, вып.1(63), с.23-25.

7. Цытович Л.И., Мацин В.И., Осипов О.И. Релейный операционный усилитель с гальваническим разделением цепей постоянного тока. - Электротехн.пром.-сть. Сер."Электропривод", 1978, вып.3(65), с.23-24.

8. Суворов Г.В., Маурер В.Г., Цытович Л.И. Прямое регулирование

натяжения моталки непрерывного стана холодной прокатки.-Электротехн. пром.-сть.Сер."Электропривод", 1978, вып.4(66), с.17-18.

9.Цытович Л.И., Маурер В.Г., Осипов О.И., Суворов Г.В. Помехозащищенность дифференцирующих регуляторов на основе релейного операционного усилителя.-Электротехн.пром.-сть.Сер."Электропривод", 1978, вып.6(68), с.8-10.

10.Цытович Л.И., Суворов Г.В., Осипов О.И. Экспериментальная оценка помехозащищенности операционных усилителей систем автоматизированного электропривода.- В кн:Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей. Челябинск, 1975, №158, с.167-173.

11.Цытович Л.И., Осипов О.И. Анализ статических погрешностей релейного операционного усилителя.- В кн:Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей. Челябинск, 1976, №176, с.140-147.

12.Суворов Г.В., Осипов О.И., Цытович Л.И. Многофункциональный операционный усилитель.-Информационный листок №170-75. Челябинск, ЦНТИ, 1975.

13.Цытович Л.И., Суворов Г.В., Осипов О.И. Широотно-импульсный операционный усилитель на типовых интегральных элементах.-Информационный листок №265-75. Челябинск, ЦНТИ, 1975.

14.Цытович Л.И., Суворов Г.В., Осипов О.И. Многофункциональный релейно-импульсный операционный усилитель с высокой помехозащищенностью для систем автоматизированного электропривода.-Тезисы докл. обл.межотрасл.науч.-техн.конф."Автоматизация технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства". Куйбышев, 1975, с.293.

15.Рожков В.И., Суворов Г.В., Шестаков Ю.С., Осипов О.И., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Непрерывные регуляторы толщины на реверсивных станах колочной прокатки заводов черной и цветной металлургии.-Там же, с.97-98.

16.Цытович Л.И. Каскадное включение и диагностика неисправностей разветвляющихся операционных усилителей в системах регулирования с подчиненной структурой.-Тезисы докл.науч.-техн.конф."Повышение надежности автоматизированного электропривода".Челябинск, 1978, с.16.

17.Суворов Г.В., Шестаков Ю.С., Осипов О.И., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№474816-Бул.ОИПОТЗ, 1975, №23, с.115.

18.Суворов Г.В., Цытович Л.И., Осипов О.И., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№482758 - Бул.ОИПОТЗ, 1975, №32, с.126.

19.Суворов Г.В., Маурер В.Г., Цытович Л.И., Осипов О.И. Релейно-

импульсный операционный преобразователь. Авт.свид.№50787I - Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №II, с.138.

20.Суворов Г.В., Осипов О.И., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№5151I7 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №19, с.117.

21.Суворов Г.В., Шестаков Ю.С., Осипов О.И., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№5151I8 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №19, с.117.

22.Цытович Л.И., Цытович В.П., Суворов Г.В. Преобразователь аналогового сигнала в длительность импульсов. Авт.свид.№523525 - Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №28, с.157.

23.Осипов О.И., Цытович Л.И., Суворов Г.В., Маурер В.Г. Релейный квадратичный преобразователь. Авт.свид.№525970 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №31, с.126.

24.Суворов Г.В., Цытович Л.И., Осипов О.И., Маурер В.Г. Релейный усилитель. Авт.свид.№531165 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №37, с.129.

25.Цытович Л.И. Широотно-импульсный операционный усилитель. Авт.свид.№53837I - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №45, с.182.

26.Суворов Г.В., Цытович Л.И. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№542197 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №1, с.193-194.

27.Суворов Г.В., Цытович Л.И., Осипов О.И., Маурер В.Г. Широотно-импульсный операционный усилитель. Авт.свид.№547778 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с.145-146.

28.Суворов Г.В., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Множительное устройство. Авт.свид.№547782 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с.146.

29.Цытович Л.И., Суворов Г.В., Маурер В.Г. Делительное устройство. Авт.свид.№54778I - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с.146.

30.Цытович Л.И., Осипов О.И., Суворов Г.В. Релейный преобразователь сигналов. Авт.свид.№547787 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с.147-148.

31.Цытович Л.И., Суворов Г.В., Петренко Б.А., Цытович В.П. Релейный функциональный преобразователь. Авт.свид.№681335 - Бюл.ОИПОТЗ, 1978, №26, с.170.