

1/Д⁸00
МИНИСТЕРСТВО ВЫШЕГО 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
ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Специальность 05.13.05 – „Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления”

Автореферат
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.

Зашита 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-
мola.

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧИИ.

Ученый Секретарь Специализированного
Совета, кандидат технических наук, В.С.ЖАБРЕЕВ
доцент

Актуальность темы. 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, обусловливает 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 развертывающем во времени преобразовании информативного воздействия. Развертывающие 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-широко-импульсной модуляцией и оценка характера его ошибок при явлении замедленной дискретизации динамической составляющей входной координаты. Фильтрация несущих колебаний РОУ с различными законами широтно-импульсной 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 ЦМС 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-широтно-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 широтно-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 ФИ на их основе;

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

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 ВЭП.

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

- 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 развертывающих операционных усилителей и функциональных преобразователей легли в основу:

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

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

Апробация работы. 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 и/т конференции "Автоматизация технологических процессов в различных отраслях народного хозяйства", Сызрань, 1975 г.; 3) и/т семинаре "Повышение эффективности вторичных источников питания", Киев, 1976 г.; 4) юбилейной и/т конференции, посвященной 40-летию кафедры электротехники ЧИМЭСХ, Челябинск, 1976 г.; 5) первой и/т конференции молодых ученых и специалистов ЧПИ, Челябинск, 1977 г.; 6) семинаре "Наладка электрооборудования станов холодной прокатки", Челябинск, 1977 г.; 7) и/т конференции "Повышение надежности автоматизированного электропривода", Челябинск, 1978 г.; 8) и/т конференции по автоматизированному электроприводу прокатных станов, Свердловск, 1978 г.; 9) ежегодных 1974 - 1978 гг. и/т конференциях Челябинского политехнического института.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 16 статей и получено 15 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем работы. 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, включаящий 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, э.д.с., смещения "нуля" и входной ток, а также уровень их стабильности, напряжение 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 показателями 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 широтно-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-широко-импульсной модуляцией (рис. I, 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.

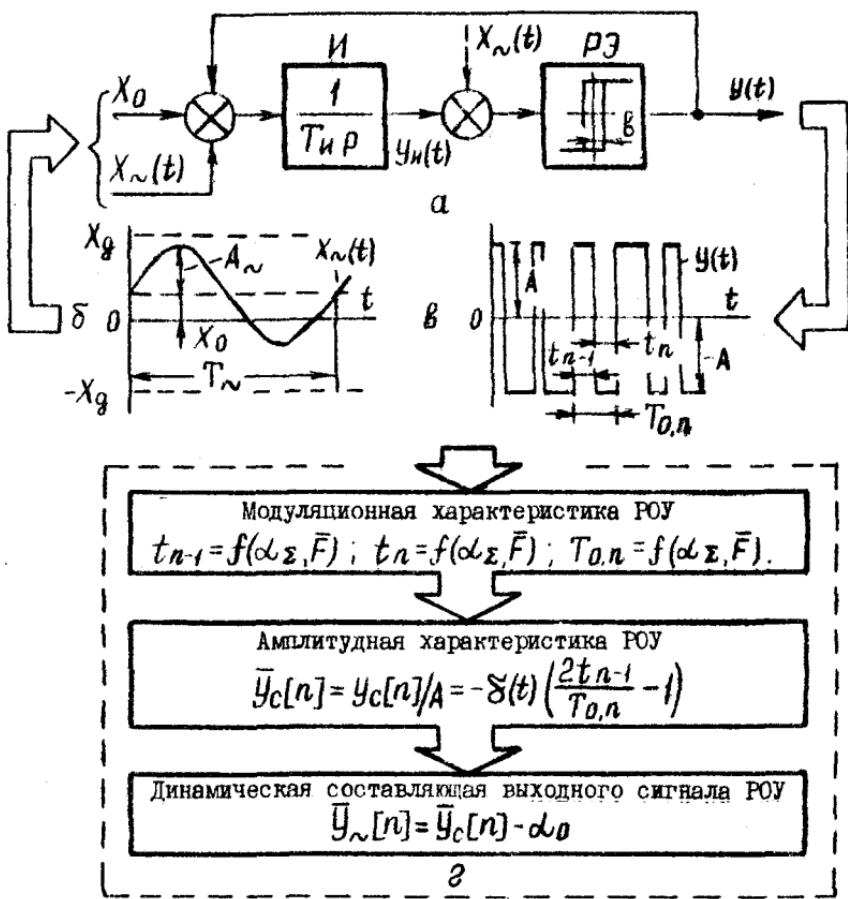
Рассмотрены основные свойства и приведены аналитические зависимости, характеризующие РОУ с позиций операционного преобразования сигналов постоянного тока при условии идеализации характеристик, входящих в его состав звеньев.

Вторая глава 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 $U_H(t)$



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

Рис. I. 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); $\alpha_0 = |\chi_0/\chi_g|$ — относительная величина постоянной составляющей входного сигнала РОУ (рис. I, б). $\pm \chi_g$ — 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 развертывающей функции не оказывает практического влияния на динамические показатели РОУ.

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

$$W_i(p) = (1 + T_a p) \{ (T_i + T_h) p [1 + T_a T_h p (T_i + T_h)]^{-1} \}^{-1}, \quad (2)$$

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

$$\lim_{\begin{array}{c} T_a \bar{C}_a \rightarrow 0 \\ T_a \neq 0; \bar{C}_a \neq 0 \end{array}} \delta y_c^a = 0 \quad (3)$$

согласно которому в РОУ целесообразно применять интегрирующие конденсаторы с минимальным значением произведения $T_a \bar{C}_a$, где $\bar{C}_a = C_a/C_h$, $T_a = T_a/T_0|_{\alpha_0=0}$ — относительные значения параметров C_a, T_a .

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

$$\sqrt{W_i(p)} = [T_h p (1 + T_M p)]^{-1}, \quad (4)$$

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

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

где $\bar{T}_M = T_M / T_0 |_{\alpha_0=0}$ - относительное значение параметра T_M .

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

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 $dy_U(t)/dt$ и $d[e \cdot i(t)]/dt$, величины информативного сигнала X_0 и взаимного положения во времени сигналов $y_U(t)$, $e \cdot i(t)$, а ее максимальный уровень определяется из соотношения

$$\Delta Y_C^e = (1 - Y_C^e) A^{-1} = \pm 0,25 \bar{e} (1 - \alpha_0^2) [1 \mp 0,25 \bar{e} (1 + \alpha_0)]^{-1}, \quad (6)$$

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 $y(t)$, отключение 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 $y_U(t)$ и порогом переключения РЭ. Наряду с искажением динамических показателей (интервала дискретизации) подобных РОУ, конечное значение времени переноса сигнала в тракте РЭ обусловливает смещения "нуля" сигнала $y_U(t)$, 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 типа исполнения 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 кискажению 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 $\bar{Y}_n[n] = f(d_x, \bar{F})$ 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

$$t_n = 2 \left\{ \bar{B} T_0 + (-1)^n d_n \omega_n^{-1} \sin \left[\frac{\omega_n}{2} \left(t_0 + 2 \sum_{i=0}^{i=n-1} t_i \right) \right] \times \right. \\ \left. \times \sin \frac{\omega_n t_n}{2} \right\} \left[1 - (-1)^n d_0 \right]^{-1}, \quad (7)$$

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

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 $d_x \leq 0,8$, что соответствует на практике реальному диапазону использования статической характеристики ОУ, то полоса равномерного пропускания частот РОУ равна

$$f_p = 0,1 \cdot T_0^{-1} |_{d_0=0}. \quad (8)$$

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

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

на частотах сигнала $X_n(t)$ 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 $X_n(t)$, вследствие чего интервал дискретизации импульсов $Y(t)$ оказывается кратным частоте динамической составляющей входного воздействия.

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

$$t_n = \left\{ 2\bar{B} + d_n \left[(-1)^n \sin \left(\omega_n \sum_{i=0}^{i=n-1} t_i \right) - (-1)^n \sin \left(\omega_n \sum_{i=1}^n t_i \right) \right] \right\} \times \\ \times T_u [1 + (-1)^n d_0]^{-1}, \quad (9)$$

где $d_n < \bar{B}$; $d_0 < 1,0$; $t_0 = 0$. 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 $X_n(t)$, прикладываемому ко входу РЭ. При $\bar{F} > 10^{-1}$ выходной сигнал РОУ может содержать низкочастотные биения со средним нулевым значением. Ошибка замедленной дискретизации вида дрейф "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, параболическими уменьшающимся и линейно возрастающим в функции сигнала управления законами изменения частоты выходных импульсов. Указанные законы ШИМ рассматривались применительно к РОУ с двухполарным и однополярным характером сигнала $Y(t)$.

Анализ показал, что РОУ с однополярной ШИМ позволяют максимально использовать предельные динамические возможности развертывающего усилителя как импульсной системы. При каскадном включение РОУ в системе

мах подчиненного регулирования наилучшими динамическими показателями будут обладать каскады на основе РОУ с линейно-возрастющей 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 развертывающих 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 ЭП максимален. Предполагалось, что функция помехового воздействия выполняет сигнал

$$X_n(t) = \begin{cases} A_n > X_g, n \cdot T_n < t < T_n(n+0,5) \\ -A_n < -X_g, T_n(n+0,5) < t < T_n(n+1), \end{cases}$$

имеющий период T_n , амплитуду A_n , относительный уровень $\alpha_n = |A_n/X_g|$ и среднее нулевое значение.

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

$$T_3 \approx \frac{\pi}{16} T_n \alpha_n \quad (11)$$

автоматически перестраиваемой в функции параметров помехового воздействия. Данна сравнительная оценка динамики РОУ и линейных апериодических фильтров первого ($\Phi 1$) и второго ($\Phi 2$) порядков, работавших при одном и том же уровне α_n помехи $X_n(t)$. Показано, что инерционность РОУ существенно ниже инерционности $\Phi 1$ и в значительном диапазоне α_n меньше инерционности $\Phi 2$, т.к. для линейных фильтров выбор их постоянных времени зависит не только от параметров помехового сигнала, но и определяется уровнем информативного воздействия $X_0 + X_n(t)$. Получены условия синхронизации РОУ внешней гармонической помехой и показано, что степень помехоустойчивости РОУ увеличивается по мере роста частоты сигнала $X_n(t)$.

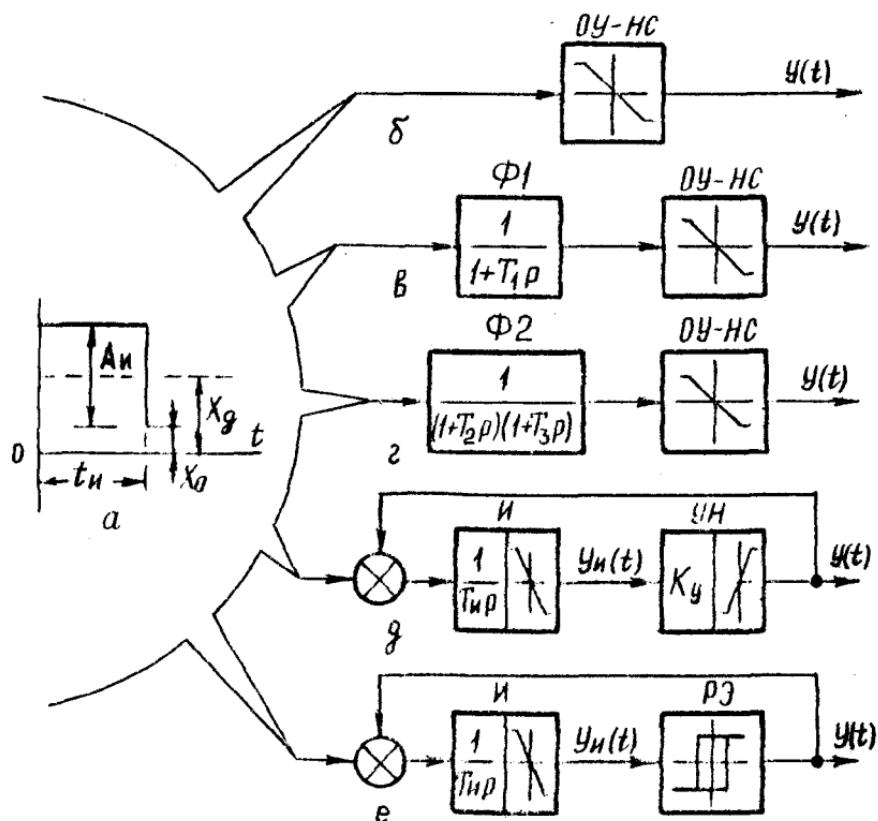


Рис.2. Диаграммы входных сигналов (а) и структурные схемы (б-г) операционных усилителей.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований помехоустойчивости дифференцирующих звеньев (Δ) на основе РОУ и линейных интегральных ОУ-НС с различными входными фильтрами. Анализ показал, что Δ – 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 ВЭП. Так, например, при частоте механического резонанса объекта регулирования 35 c^{-1} была получена полоса пропускания системы управления на уровне $(50 - 60) \text{ c}^{-1}$.

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

$$X_{ii}(t) = \begin{cases} A_{ii} > X_g, & 0 < t \leq t_i \\ 0, & t > t_i \end{cases}$$

имеющим амплитуду A_{ii} и длительность t_i (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), включавший звено И, а также неинвертирующий усилитель УН с коэффициентом K_y и РОУ (рис.2,е). На основе полученных аналитических зависимостей и разработанной математической модели процесса преобразования усилителями сигнала $X_{ii}(t)$ 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 $X_{ii}(t)$, их инерционность определяется параметрами возмущения $X_{ii}(t)$. Анализ показал также, что динамика РОУ зависит от взаимного положения во времени сигналов $Y_{ii}(t)$ и $X_{ii}(t)$. Способность развертывающих ОУ адаптироваться к параметрам входных воздействий позволяет эффективно применять их для работы с преобразователями, представляющими регулируемую или контролируемую 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. Дано сравнительная оценка динамики взаимно синхронизированного каскада РОУ с динамическими возможностями каскадов, использующих демодулирующие фильтры Ф1 и Ф2.

Пятая глава диссертации посвящена теоретическому и экспериментальному анализу, предлагаемых автором, способов повышения помехоустойчивости, а также временной и температурной стабильности характеристик РОУ и ФИ 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 - С 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 $Y(t)$.

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

В приложении рассматривается 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 ЦВМ и 4) результаты экспериментальных исследований характеристик систем управления электроприводами, выполненных на базе РОУ.

Основные выводы

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-широко-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 адаптации 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 азек-

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 развертывающих 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 внести 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 помехозадаченностью.-Приборы и техника эксперимента, 1976, №5, с.144-146.

3. Цытович Л.И., Маурер В.Г. Время-импульсный преобразователь значение 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 помехозадаченностью.-Электротехн.пром.-сть. Сер."Электропривод", 1976, вып.6(50), с.8-II.

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.Н., 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 вентильных 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 вентильных преобразователей. Челябинск, 1976, №176, с.140-147.

12.Суворов Г.В., Осипов О.И., Цытович Л.И. Многофункциональный операционный усилитель.-Информационный листок №Г70-75. Челябинск, ЦТИ, 1975.

13.Цытович Л.И., Суворов Г.В., Осипов О.И. Широтно-импульсный операционный усилитель на типовых интегральных элементах.-Информационный листок №265-75. Челябинск, ЦТИ, 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 стаках холодной прокатки заводов черной и цветной металлургии.-Там же, с.97-98.

16.Цытович Л.И. Каскадное включение и диагностика неисправностей развертывающих 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-Бюл. ОИПОТЗ, 1975, №23, с.115.

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

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

импульсный операционный преобразователь. Авт.свид.№507871 - Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №II, с. I38.

20. Суворов Г.В., Осипов О.И., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№515II7 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №I9, с. II7.

21. Суворов Г.В., Шестаков Ю.С., Осипов О.И., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№515III8 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №I9, с. II7.

22. Цытович Л.И., Цытович В.П., Суворов Г.В. Преобразователь аналогового сигнала в длительность импульсов. Авт.свид.№523525 - Бюл. ОИПОТЗ, 1976, №28, с. I57.

23. Осипов О.И., Цытович Л.И., Суворов Г.В., Маурер В.Г. Релейный квадратичный преобразователь. Авт.свид.№525970 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №3I, с. I26.

24. Суворов Г.В., Цытович Л.И., Осипов О.И., Маурер В.Г. Релейный усилитель. Авт.свид.№53IIG5 - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №37, с. I29.

25. Цытович Л.И. Широтно-импульсный операционный усилитель. Авт.свид.№53837I - Бюл.ОИПОТЗ, 1976, №45, с. I82.

26. Суворов Г.В., Цытович Л.И. Релейный операционный усилитель. Авт.свид.№542I97 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №I, с. I93-I94.

27. Суворов Г.В., Цытович Л.И., Осипов О.И., Маурер В.Г. Широтно-импульсный операционный усилитель. Авт.свид.№547778 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с. I45-I46.

28. Суворов Г.В., Цытович Л.И., Маурер В.Г. Множительное устройство. Авт.свид.№547782 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с. I46.

29. Цытович Л.И., Суворов Г.В., Маурер В.Г. Делительное устройство. Авт.свид.№54778I - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с. I46.

30. Цытович Л.И., Осипов О.И., Суворов Г.В. Релейный преобразователь сигналов. Авт.свид.№547787 - Бюл.ОИПОТЗ, 1977, №7, с. I47-I48.

31. Цытович Л.И., Суворов Г.В., Петренко Б.А., Цытович В.П. Релейный функциональный преобразователь. Авт.свид.№68I335 - Бюл.ОИПОТЗ, 1978, №26, с. I70.