

05.13.07

P472

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

РЕШЕТОВ НИКОЛАЙ ЕГОРОВИЧ

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
АКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Специальность 05.13.07 - Автоматизация  
технологических производств и процессов.  
Специальность 05.13.05 - Элементы и уст-  
ройства вычислительной техники и систем  
управления

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Челябинск

1990

Работа выполнена на кафедре "Теоретические основы электротехники" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
Г.М. Торбенков.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
Р.Х. Гафиятуллин;  
кандидат технических наук  
Г.Б. Бармасов.

Ведущее предприятие - ВНИИЭ  
(г. Москва)

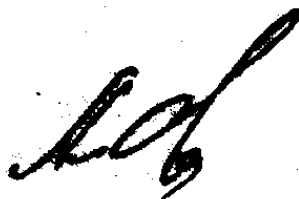
Защита состоится "5" декабря 1990 г.,  
в "10" часов, на заседании специализированного совета  
К 053.13.04

Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола  
по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского  
политехнического института.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1990 г.

Учёный секретарь  
специализированного совета  
доктор технических наук,  
профессор



А.П. Сибрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Основными направлениями социально экономического развития страны на 1986-1990 г и на период до 2000 г предусматривается дальнейшее развитие энергетики - ключевой отрасли народного хозяйства. В стране существует постоянная потребность в увеличении выработки электрической энергии. Качество электрической энергии должно удовлетворять требованиям ГОСТ, важнейшими из которых являются частота и величина напряжения.

В настоящее время основным источником электрической энергии является турбогенератор (ТГ). Рабочий режим ТГ должен обеспечивать заданные параметры качества переменного тока по частоте и величине напряжения. Отклонение частоты от номинального значения снижает экономические параметры электростанции, ускоряет износ рабочих лопаток турбины, изменяет производительность механизмов собственных нужд и т.д., что, в конечном итоге, может форсировать возникновение аварийной ситуации, приводящей к останову ТГ. Известно, что ущерб от вынужденного простоя мощных ТГ можно оценивать в промышленности 3-4 рубля за 1 кВт.ч, а в течение 2-3 месяцев соизмерим с его первоначальной стоимостью. В связи с этим к надёжности работы ТГ и средствам его технической диагностики предъявляются самые высокие требования.

Среди возможных аварий на электростанциях значительное место занимают асинхронные режимы, связанные с аварийным выбегом ротора ТГ. Асинхронный режим - асинхронный ход в ТГ может появиться по различным причинам, среди которых могут быть: исчезновение, или уменьшение ниже допустимого значения тока возбуждения генератора; появление дефицита активной мощности в электрической системе (ЭС) за счёт отключения линий электропередач или части параллельно работающих генераторов; возникновению коротких замыканий и т.д.

С увеличением единичной мощности современных высокоиспользуемых ТГ возросли реактивные сопротивления и уменьшилось номинальное время ускорения  $T_u$  всех вращающихся масс генератора. Эти особенности привели к снижению их статической и динамической устойчивости. В аварийных режимах ротор ТГ в течение долей секунды достигает критических оборотов, приводящих к срабатыванию автомата безопасности (АБ) турбины и, следовательно, к останову турбоблока.

Для своевременного выявления и исключения дальнейшего развития асинхронных режимов служат устройства противоаварийной режимной автоматики (ПРА). Устройства ПРА должны быть быстродействующими -

лими, чтобы по первым признакам аварийной ситуации распознать и исключить её дальнейшее развитие.

Поддержание нужного качества вырабатываемой электроэнергии по частоте в нормальном режиме возлагается на регулятор частоты вращения турбины и автоматический регулятор частоты сети. Согласно международному стандарту, принятому на заседании технического Комитета в Лондоне в 1968 году, зона нечувствительности регулятора по частоте для паровых турбин мощностью 30 МВт и выше не должна быть больше 0,06% относительно номинальной. В диссертационной работе эти регуляторы являются элементами комплекса противоаварийного управления мощностью турбины (КПУМ-Т) и котла (КПУМ-К). В состав упомянутых комплексов входят первичные датчики частоты вращения ротора турбины - тахогенераторы и вторичные датчики частоты вращения и частоты напряжения на шинах станции.

При быстропротекающих процессах в ТТ частота его напряжения может изменяться в течение периода основной частоты на значительную величину. В связи с этим возникает необходимость в разработке таких методов и средств, которые обеспечат заданную точность и быстроедействие преобразования параметров быстроизменяющихся процессов. Для определения требований к первичным датчикам частоты вращения, т.е. устройствам преобразующим механическое вращения ротора турбины в напряжение определённой частоты, необходим анализ выходного сигнала ТТ в аварийных режимах. В результате проведённого в данной работе исследования, доказана необходимость многократного измерения частоты вращения ротора ТТ в течение периода основной частоты.

Для выявления отклонения частоты относительно номинальной  $\omega$ , в КПУМ-Т используются вторичные датчики скорости и частоты ЭДС генератора. Эти датчики должны иметь линейную статическую характеристику  $I(\omega)$  в рабочем диапазоне изменения частоты, чувствительность не хуже 0,06% относительно номинальной, должны быть точными, способными многократно за период, или мгновенно, измерять частоту, а также иметь надёжность и наработку на отказ, соответствующие требованиям к станционным приборам. Промышленные измерительные преобразователи частоты, по своим характеристикам, не отвечают всему комплексу перечисленных требований. Поэтому создание методики улучшения основных характеристик первичных и вторичных датчиков регулятора частоты вращения турбины и автоматического регулятора частоты сети, разработка новых схем датчиков, методика расчёта а также ана-

лива их характеристик являются весьма актуальными.

Цель работы и задачи исследования. Целью работы является исследование автоматизации технологического процесса выработки электрической энергии на крупных энергоблоках (ЭБ) и разработка датчиков регуляторов частоты вращения турбины и частоты вращения ЭДС генератора с улучшенными характеристиками, позволяющими получить максимальный экономический эффект.

В соответствии с этим, в диссертационной работе решаются следующие задачи.

1. Анализ комплексной автоматизации ЭБ в нормальном и аварийном режимах. Определение способов повышения статической и динамической устойчивости ЭС в послеаварийном режиме. Исследование быстрого действия автоматизации по углу выбега ротора ТТ в аварийных режимах.

2. Разработка теории и реализация способов повышения быстрого действия функциональных фазочувствительных преобразователей непрерывного и дискретного действия в регуляторах угловой скорости вращения ротора турбины.

3. Исследование новых принципов преобразования частоты многофазных и трёхфазных систем.

4. Разработка и исследование новых структурных схем измерительного преобразователя частоты (ИПЧ) во вторичных датчиках регулятора частоты вращения турбины и регулятора частоты сети.

Методы исследования. Исследования проведены с помощью непрерывного и дискретного преобразования Лапласа, теории линейных электрических цепей, теории рядов Фурье. Для определения характеристик точности и надёжности ИПЧ и датчика частоты сети применены методы математической статистики. Характер распределения случайных погрешностей установлен путём проверки по критериям согласия Пирсона и Колмогорова. Исследование устойчивости ЭС проведено на базе теории электрических машин, теории электромагнитного поля. Для проверки основных результатов теоретических исследований проводились экспериментальные исследования. Аналитические исследования сопровождалась расчётами на ЭЦМ.

Научная новизна. Новые научные результаты состоят в следующем.

1. Предложена классификация методов измерения угловой скорости вращения ротора ТТ в регуляторах частоты вращения турбины по отношению к периоду измеряемого сигнала. На основании анализа выходного сигнала ТТ в аварийных режимах обоснована необходимость многократного измерения частоты в течение периода основной частоты.

2. Разработана теория непрерывно-дискретного и мгновенного преобразования частоты однофазных и многофазных источников сигнала.

3. Доказана возможность использования суммо-разностной схемы на прямоугольных сигналах. Предложена структурная схема и на её основе ИПЧ на прямоугольных сигналах.

4. Проведён анализ электромагнитных процессов, предложена и реализована инженерная методика расчёта вторичных датчиков регулятора частоты вращения турбины и автоматического регулятора частоты сети с улучшенными характеристиками. Произведена оценка точности, надёжности и быстродействия разработанных датчиков.

Практическая ценность. На основе теоретического анализа разработана инженерная методика расчёта и построения вторичных датчиков регулятора частоты вращения турбины и автоматического регулятора частоты сети, которая позволила существенно повысить точность, надёжность и быстродействие преобразования. Разработанные конструкции входного устройства, умножителя частоты и ИПЧ могут использоваться автономно и в любых сочетаниях.

Реализация в промышленности. Разработанные вторичные датчики внедрены в системах автоматического регулирования на блоках 300 и 500 МВт Троицкой и Костромской ГРЭС. Акты внедрения приведены в приложении к диссертации. Суммарный экономический эффект от внедрения всех устройств составил 70 тыс. рублей в год.

Апробация работы. Результаты работы, изложенные в диссертации, были изложены и обсуждены на заседаниях кафедры "Теоретические основы электротехники" и научно-технических семинарах в институтах: Челябинском политехническом (1984-1990 г.г.), Харьковском политехническом (1988 г.).

Публикации. По результатам исследований и разработок, изложенных в диссертации получено два авторских свидетельства и опубликована 21 печатная работа.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и 10 приложений. Основная часть работы содержит 255 страниц машинописного текста, 96 рисунков и 12 таблиц.

Автор выражает благодарность научному консультанту к.т.н., доценту Ю.А. Столбову.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе, на основании анализа комплексной автоматизации

ЭБ в нормальном и аварийном режимах, обеспечивающей получение электрической энергии нормированного качества, определяются требования по быстрдействию, точности к первичным и вторичным датчикам частоты вращения ротора турбины. Исследована статическая и динамическая устойчивость работы ТГ в ЭС. Проведён оценочный анализ работы ЭС при аварийных воздействиях в случае отключения и короткого замыкания линии электропередачи. Для практических оценок динамической устойчивости ЭС используется метод площадей. Приведены формулы для определения критического угла  $\delta_{кр}$  и предельного угла отключения короткого замыкания  $\delta_{пр.откл.}$ .

Проведён анализ процессов, протекающих в нерегулируемой по цепи возбуждения системе с учётом демпферного момента и переходного процесса в обмотке возбуждения после малого возмущения режимных параметров. На рис.1 приведена структурная схема исследуемой системы.

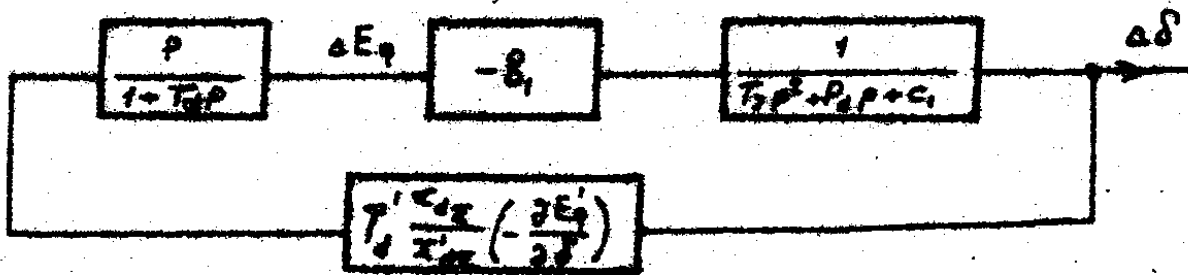


Рис.1

Передаточная функция по углу  $\delta$  (угол между ЭДС обмотки возбуждения  $E_f$  и напряжением на статоре  $U$ ) через параметры генератора имеет вид

$$W(P) = \frac{-b_1}{(1 + T_d P)(T_2 P^2 + P_2 P + C_1) + b_1 T_d' C_1}, \quad C_3 = \frac{I_{d2}}{x'_{d2}} \frac{\partial E_f'}{\partial \delta}. \quad (1)$$

Для анализа статической устойчивости исследуемой системы использовался алгебраический критерий Гурвица и частотный критерий Михайлова, позволившие определить область устойчивости системы по  $\delta$ . Из анализа следует, что система, работая даже с очень большим запасом статической устойчивости, тем не менее может оказаться на грани устойчивости в окрестности угла  $\delta_0 = 0$ . Для выявления этого режима необходимы специальные устройства. Автором разработаны фазометр и датчик частоты, удовлетворяющие требования МЭН.

Рассмотрены элементы системы управления частотой и активной мощностью ТГ в нормальном и аварийном режимах. На основании решения уравнения движения ротора ТГ в переходном режиме получены выражения текущей частоты  $f$ , а так же времени  $t$ , от начала аварии до момента, когда частота достигнет значения  $f_1$ .

Предложены рекомендации для сохранения статической и динамической устойчивости. Отмечаются возможности успешного управления

Т в аварийном режиме при использовании ЭВМ, что однако, требует решения многих задач, связанных с быстроедействием как цифровой обработки информации, так и создания быстроедействующих датчиков этой информации.

Для обеспечения устойчивости параллельной работы ГРЭС при аварийных возмущениях в ЭС и предупреждения отключения ЭБ от сети системной ПРА используется КПУМ-Т. Структурная схема комплекса приведена на рис.2

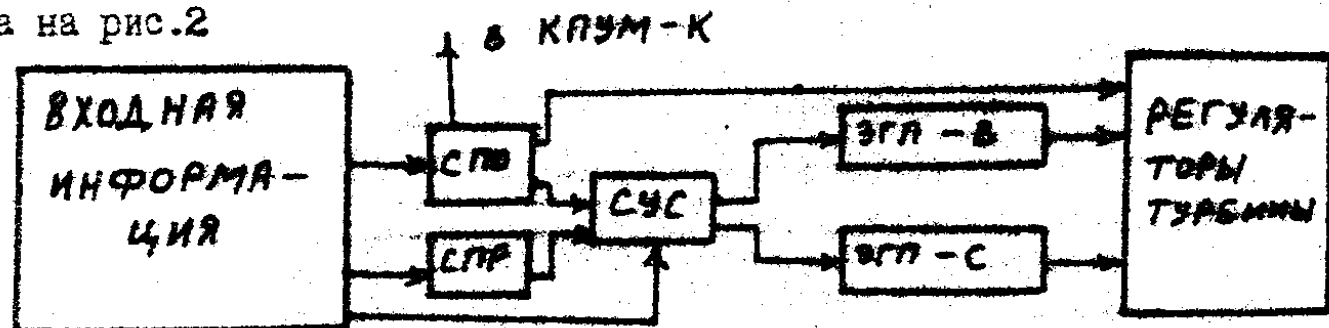


Рис.2

Особенностью комплекса является то, что через систему управления сервоприводами (СУС) осуществляется воздействие на электрогидравлические преобразователи высокого и среднего давлений (ЭГП-В и ЭГП-С) одновременно. КПУМ-Т разделён на систему противоаварийного ограничения (СПО) и систему противоаварийного регулирования (СПР). СПО обеспечивает статическую устойчивость в послеаварийном режиме, а СПР динамическую и результирующую устойчивости при проходящих возмущениях в ЭС типа короткого замыкания.

Приведена классификация первичных преобразователей угловой скорости по быстроедействию относительно периода измеряемого сигнала. Наиболее надёжными, обладающими малой зоной нечувствительности и быстроедействием меньшим периода измеряемой частоты, являются первичные преобразователи частотного типа. На мощных ТТ в качестве первичных датчиков скорости целесообразно применять тахогенераторы типа ТТИ. Исследование выходного сигнала такого датчика показало, что амплитуда его изменяется во времени и в аварийных режимах может изменяться в больших пределах. Получено уравнение для угловой частоты вращения ротора  $\omega(t)$ , которую в дальнейшем называем мгновенной частотой.

Показано, что использование преобразования частота-фаза частотнозависимых цепей (ЧЗЦ) позволяет получить время преобразования меньшее периода измеряемого сигнала.

Во второй главе исследован сигнал ТТ при аварийных выбегах ротора. Современные мощные ТТ имеют инерционную постоянную, такой величины, что ротор в рассматриваемых аварийных режимах движется с большой скоростью и при устойчивом переходном процессе, что обычно



достигает предельного угла выбега приблизительно за 0,5 с после возникновения аварийного режима. Для сохранения динамической устойчивости необходимо осуществить разгрузку ПГ, что требует в первую очередь уменьшения времени измерения частоты вращения ротора ПГ.

На основании экспериментальных кривых для ПГ типа БВВ-1200 и БВВ-320 был получен закон изменения частоты вращения ротора

$$\bar{\omega}_p(t) = \omega_c (1 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3). \quad (2)$$

На основании прямого преобразования Фурье

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\omega}_p(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (3)$$

учитывая, что переходный процесс длится конечное время  $T$ , можно определить спектр  $\bar{\omega}_p(t)$  по формуле

$$S(j\omega) = \int_0^T \omega_c (1 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3) e^{-j\omega t} dt = \alpha + j\beta, \quad (4)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  — коэффициенты аппроксимирующего полинома, зависящие от типа ПГ и вида аварийного режима;  $\omega_c$  — угловая частота сети.

Задаваясь предельно допустимой величиной амплитуды спектра

$$S(\omega) = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (5)$$

можно определить граничную частоту  $\omega_{гр}$ . На основании теоремы Котельникова определяется количество точек квантования  $N$ . Например, на периоде частоты сети  $T = T_c = 0,02$  с и  $\omega_c = 0,02$  по формуле

$$N = \frac{T_c}{T} \omega_{гр} \quad (6)$$

наибольшее число точек квантования  $N = 126$  необходимо в случае трёхфазного короткого замыкания. В остальных случаях аварийных режимов число точек квантования находится в пределах 30–40. Таким образом, возникает необходимость в разработке и исследовании способов непрерывного или многократного измерения частоты вращения ротора ПГ за период. Приводятся исследования по этому вопросу.

Для однофазных первичных датчиков вращения ротора ПГ, непрерывные "модулированные" колебания можно представить в виде узкополосного аналитического сигнала

$$u(t) = A(t) \cos \psi(t), \quad (7)$$

где  $A(t)$  — амплитуда,  $\psi(t)$  — фазовый угол. Опорное напряжение с опорной угловой частотой

$$u_0(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (8)$$

Считаем, что  $\omega_0$  велика по сравнению с частотой изменения  $A(t)$ , мгновенная частота может быть найдена по формуле

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega_0 + \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (9)$$

Приращение  $d\varphi(t)/dt$  определяет отклонение частоты  $\omega(t)$  от несущей.

При переходных процессах в ТГ, когда на каждом элементарном участке измерения, сколь угодно малом, колебание (7) имеет "свое" несущее колебание с амплитудой  $A_k$  и частотой  $\omega_k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ), изменяющимися от участка к участку. В этом случае так же можно указать ряд способов измерения мгновенной частоты. Например, для каждого аппроксимированного  $k$  требуется задавать три последовательных мгновенных значения  $u_k = u(t_k)$ ,  $u_{k+1} = u(t_{k+1})$ ,  $u_{k+2} = u(t_{k+2})$  позволяющие определить три параметра измеряемого колебания  $A_k$ ,  $\omega_k$  и  $\varphi_k$ . Так, для равноотстоящих узлов  $t_k, t_{k+1}, t_{k+2}$  можно определить частоту по выражению

$$\omega_k = \pm \frac{1}{\Delta t} \left( \arccos \frac{u_{k+2}}{A_k} - \arccos \frac{u_k}{A_k} \right) \quad (10)$$

Практическая реализация (10) возможна с помощью ЭВМ.

Если предположить, что для рассматриваемого номера  $k$   $u_k = 0$ , то из (10) имеем соотношение

$$\omega_k = \pm \frac{1}{\Delta t} \arcsin \sqrt{1 - \left( \frac{u_{k+2}}{2u_{k+1}} \right)^2} \quad (11)$$

или

$$\omega_k = \pm \arccos \frac{u_{k+2}}{2u_{k+1}} \quad (12)$$

При малой величине отношения  $\left( \frac{u_{k+2}}{2u_{k+1}} \right)$  можно приближённо записать

$$\omega_k = \pm \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{u_{k+2}}{2u_{k+1}} \right) \quad (13)$$

Условие  $u(t_k) = 0$  равносильно организации целого ряда "смещённых" друг относительно друга функций, каждая из которых проходит через ноль в начале последующего интервала и по виду повторяет предыдущую. Получение смещённых функций можно осуществить, как на аналоговой, так и на цифровой элементной базе, что позволит достаточно просто создать надёжные измерительные преобразователи для систем автоматического регулирования паровых турбин по скорости.

Показано, что с помощью многофазных систем можно производить измерение частоты в пределах периода исследуемого колебания.

Применение трёхфазного тахогенератора позволяет использовать безынерционное фазоделительное устройство (ФДУ) и исключить влияние частоты на взаимное расположение векторов  $U_A, U_B, U_C, \dots, U_1, U_2, U_3, \dots, U_{q-1}, U_q$ , сдвинутые друг относительно друга на  $2\pi/n$  радиан. Получив эти напряжения, можно предложить некоторые способы

непрерывно-дискретного преобразования частоты, которые в конечном виде математически можно записать

$$\bar{\omega}(t_s) = \frac{2\pi}{N} \frac{1}{t_{s+1} - t_s}, \quad (14)$$

$$\bar{\omega}(t_s) = \omega_0 \left[ 1 + \frac{N}{2\pi} \arcsin \frac{u_q(t_s) + u_{q+2}(t_{s+2})}{2u_{q+1}(t_{s+1})} \right]. \quad (15)$$

Практическая реализация безынерционного ФДУ при наличии однофазного или трёхфазного тахогенератора может быть осуществлена на линейных резисторах. Непрерывно-дискретный способ преобразования частоты позволяет сократить время, в течение которого канал занят передачей информации о частоте с  $T_c$  до  $\Delta t_n$ , где  $T_c$  — период исследуемого колебания, а  $\Delta t_n$  — длительность процесса преобразования.

В третьей главе проведён анализ структурных схем ИПЧ для регулятора частоты вращения ротора турбины. Ранее были определены пути повышения точности и быстродействия преобразования частоты на базе использования ФХ ЧЗЦ. Это обстоятельство является первым этапом конструирования ИПЧ, по которому осуществляется преобразование "отклонение частоты-фаза". Дальнейший, более углублённый, анализ включает в себя исследование устройств преобразования "фаза-напряжение". Статическая характеристика преобразования "частота-напряжение" является выходной характеристикой ИПЧ и должна удовлетворять требованиям системы регулирования. Характеристика должна быть линейной в полосе измеряемых частот и выходное напряжение (ток) по знаку соответствовать отклонению частоты вращения ротора турбины относительно её номинального значения.

В работе приводится оценка схем преобразования "фаза-напряжение", которая показала, что лучшие показатели по точности, надёжности и быстродействию имеют суммо-разностные схемы (СРС). Быстродействие СРС может быть увеличено за счёт применения ФДУ. Для СРС присуща амплитудная погрешность из-за формы и величины выходных сигналов первичных датчиков частотного типа. Этот вывод следует из анализа рассмотренных устройств, использующих СРС, для измерения частоты гармонических колебаний.

Автором исследована и доказана возможность работы синусной СРС на прямоугольных сигналах. Результатом исследования явилось создание ИПЧ на прямоугольных знакопеременных сигналах. Применение интегральных микросхем и структурных решений позволило существенно уменьшить размеры, вес, потребляемую мощность вторичных датчиков, увеличить чувствительность, точность и надёжность при непрерывной работе в условиях электростанции.

На рис. 3 приведена структурная схема разработанного ИПЧ, который используется в качестве преобразователя "отклонение частоты-напряжение" в датчиках для регулирования частоты вращения ротора турбины и частоты вращения ЭДС генератора.

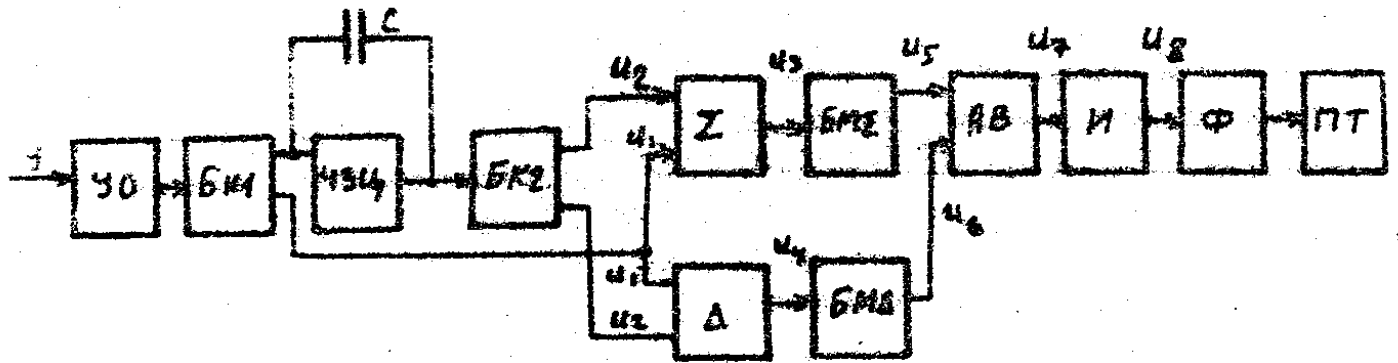


Рис. 3

На входе ИПЧ усилитель-ограничитель (УО) формирует из входного сигнала произвольной формы и амплитуды прямоугольное напряжение  $U_1$ , которое через буферный каскад (БМ1) подается на измерительный орган ЧЗЦ и на вход СРС (блоки суммы  $\Sigma$  и разности  $\Delta$ ). После ЧЗЦ сигнал поступает на БК2, с выхода которого напряжение  $U_2$ , сдвинутое по отношению к  $U_1$  на угол  $\varphi^1(\omega)$  поступает так же на вход СРС. С блоков  $\Sigma$  и  $\Delta$  напряжения  $U_3$  и  $U_4$  подаются на блоки взятия модуля (БМ  $\Sigma$  и БМ  $\Delta$ ), после которых напряжения  $U_5$  и  $U_6$  поступают на аналоговый вычитатель (АВ). Выходное напряжение после АВ  $U_7$  поступает на интегратор (И). Среднее значение выходного напряжения  $U_8$ , подаваемого в нагрузку через повторитель тока (ПТ), будет пропорционально отклонению частоты  $\Delta\omega$ . При этом, напряжение определяется по формуле

$$U_{cp} = -4U_0 \frac{Q}{\pi\omega_0} \Delta\omega, \quad (16)$$

т.е. выходное напряжение интегратора прямо пропорционально  $\Delta\omega$ .  $U_0$ ,  $Q$ ,  $\omega_0$  - постоянные величины, стабильность которых определяется элементами ЧЗЦ и характеристиками стабилитронов. С целью уменьшения пульсаций выходного напряжения (тока) в нагрузке и увеличения отношения сигнал/шум, после И сигнал подается на активный быстродействующий фильтр Ф. По структурной схеме разработаны принципиальные схемы датчиков частоты вращения ротора турбины и частоты ЭДС генератора. Применение в этих схемах ФДУ позволило значительно увеличить быстродействие датчиков. Более детальный анализ и исследование элементов разработанных датчиков проведен в четвертой главе и в приложениях.

В четвертой главе исследованы основные элементы электричес-

кой части регулятора частоты вращения ротора ТТ. Получены соотношения для расчёта элементов датчика частоты сети в зависимости от свойств входных сигналов и характеристик элементной базы разработанного датчика. Определены выражения для основных погрешностей датчика частоты, даны рекомендации по минимизации этих погрешностей.

Проведён анализ работы усилителя-ограничителя (УО), входящего в состав всех устройств, работающих с входными сигналами произвольной формы. В процессе анализа получена формула для расчёта коэффициента усиления по напряжению УО  $K_u$ , связывающая входное напряжение произвольной формы и амплитуды с выходным напряжением УО через параметры операционного усилителя (ОУ)

$$K_u = \frac{E_n}{U_{вх} \Gamma_2} \frac{1}{\sin \frac{2\pi}{T} \frac{E_n}{V}} \quad (17)$$

Здесь  $U_{вх}$ ,  $T$  величина и период входного сигнала после цепей защиты ОУ по входу;  $E_n$ ,  $V$  напряжение источника питания и скорость нарастания выходного напряжения ОУ.

Относительная мультипликативная погрешность УО

$$\gamma_{K_u} = E_n \left( \frac{1}{E_n} - \frac{\omega}{V} \operatorname{ctg} \frac{\omega E_n}{V} \right) \gamma_{E_n} + \frac{\omega E_n}{V} \operatorname{ctg} \frac{\omega E_n}{V} \gamma_V - \gamma_{U_{вх}} \quad (18)$$

Здесь  $\gamma_{E_n}$ ,  $\gamma_V$ ,  $\gamma_{U_{вх}}$  - относительные погрешности, вызванные нестабильностью источника питания, скоростью нарастания выходного напряжения и изменением амплитуды входного сигнала за счёт цепей защиты по входу.

Относительная аддитивная погрешность  $\gamma_{U_{см}}$  за счёт наличия  $U_{см}$  ОУ определяется по формуле

$$\gamma_{U_{см}} = \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{U_{см}}{U_m} \quad (19)$$

где  $U_m$  - амплитуда эквивалентной синусоиды входного сигнала.

Исследование работы активного резонансного контура с емкостной обратной связью при прямоугольном знакопеременном сигнале на входе позволило получить уравнение для определения частоты настройки колебательного контура  $\omega'$  с учётом элементов всей ЧЗЦ ( $r_k$ ,  $L_k$ ,  $C_k$ ,  $C_{ш}$ ,  $r_{ш}$ ):

$$\operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} \right) = \frac{\omega' L_k - \frac{1}{\omega' C_k}}{r_k} \quad (20)$$

С помощью математического аппарата  $\mathcal{D}$ -преобразования получено выражение выходного напряжения активного резонансного контура. Уравнение позволило определить фазовую погрешность в зависимости от добротности  $Q$  резонансного контура. Представив ФЧХ коэффициента пере-

даци по напряжению ЧЭЦ в виде ряда Тейлора в окрестности точки определены погрешность линейности  $\Delta_A$  и относительная мультипликативная погрешность активного резонансного контура  $\gamma_{\varphi_1}$  и  $\gamma_{\varphi_2}$

$$\Delta_A = \left[ \frac{8Q^3}{\omega_0^3} + 2\omega_0 \zeta_{\omega}^2 A^2 - 4\zeta_{\omega}^5 \omega_0^3 A^3 \right] \omega^2, \quad (21)$$

$$\gamma_{\varphi_1} = \frac{c_{\omega} r_{\omega}}{(1 + \omega^2 \zeta_{\omega}^2 r_{\omega}^2) \operatorname{arctg} \omega c_{\omega} r_{\omega}} (\gamma_{r_{\omega}} + \gamma_{c_{\omega}}), \quad (22)$$

$$\gamma_{\varphi_2} = \frac{1}{r_k (1 + A^2) \operatorname{arctg} A} (\omega L_k \gamma_{L_k} + \frac{1}{C_k} \gamma_{C_k} - r_k A \gamma_{r_k}), \quad (23)$$

где

$$A = \frac{1}{1 + \omega_0^2 \zeta_{\omega}^2}, \quad \zeta_{\omega} = c_{\omega} r_{\omega}, \quad A_0 = (\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k}) / r_k. \quad (24)$$

Из формул видно, что за счёт относительной погрешности  $\gamma_{r_k}$  можно значительно уменьшить относительную мультипликативную погрешность  $\gamma_{\varphi_2}$ . Для уменьшения  $\gamma_{\varphi_1}$  необходимо уменьшать относительные погрешности элементов обратной связи активного резонансного контура  $\gamma_{r_{\omega}}$  и  $\gamma_{c_{\omega}}$ .

Определены технические условия, необходимые для инженерного расчёта элементов датчика частоты сети, функционально состоящего из трёх самостоятельных устройств: фазоделительного устройства, умножителя частоты и ИПЧ. Подробно инженерный метод расчёта, а также анализ и исследование других элементов датчика частоты приведены в приложениях к диссертации.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию датчика частоты сети, состоящего из ИПЧ на прямоугольных сигналах, входного устройства, умножителя частоты и внедрённого на Троицкой и Костромской ГРЭС. По экспериментальным данным, с использованием методов математической статистики, на основании ГОСТ 8.009-84 "Нормирующие метрологические характеристики" и ГОСТ 8.011-84 "Показатели точности измерения и формы представления результатов измерений" определены основные показатели датчика частоты сети.

В качестве показателей точности приняты: интервал, в котором с установленной вероятностью находится систематическая составляющая погрешности  $\Delta_{\Sigma}$ , её нижняя и верхняя границы; среднеквадратичное отклонение случайной составляющей погрешности  $\sigma(\Delta)$ ; вариации показаний выходного сигнала датчика  $M$ . Путём проверки по критериям согласия Пирсона и Колмогорова показано, что распределение случайной погрешности датчика частоты сети носит нормальный характер.

Систематическая составляющая погрешности и вариация значения выходного сигнала датчика в нормальных условиях работы с вероят-

ностью 0,85 не превышает 0,003 Гц, что меньше допустимой зоны нечувствительности, которая для частоты 50 Гц равна 0,03 Гц. Составляющие систематической погрешности датчика  $\bar{\Delta}_u$  и  $\bar{\Delta}_t$  за счёт изменения неинформативных параметров (входного напряжения в пределах  $\pm 50\%$  относительно номинального 20 В и температуры от  $+10^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ ) не превышает 0,017 Гц, что также меньше допустимой зоны нечувствительности.

Расчёт надёжности проведён по вероятностным методам и показал, что устройство обладает достаточно высокой надёжностью, поскольку время наработки на отказ составляет 22810 часов, что соответствует 2,6 годам непрерывной работы.

Аналитически рассчитанное полное время задержки выходного сигнала датчика оказалось равным 0,00539 с.

В приложении к диссертации приведены:

- 1) исследования суммо-разностной схемы, активного резонансного контура, а также фильтрующего устройства и полосового фильтра Баттерворта при прямоугольном знакопеременном сигнале на входе;
- 2) анализ работы блока взятия модуля, входного устройства при изменении частоты и повторителя тока в ИПЧ;
- 3) инженерный метод расчёта умножителя частоты и ИПЧ;
- 4) статистическая обработка экспериментальных данных датчика частоты. Приложение содержит полные математические выкладки.

Из анализа работы блока взятия модуля были получены соотношения для обоснованного выбора его элементов и типа ОУ в зависимости от частоты и величины входного напряжения. Получены соотношения для относительных мультипликативной и аддитивной погрешностей.

Для получения необходимого качества выходного сигнала повторителя тока  $I_u$ , предложено и исследовано фильтрующее устройство, представляющее собой каскадное соединение интегратора  $A_1$  и быстродействующего активного фильтра Баттиса  $A_2$ , рис.4. Получены формулы АЧХ всего фильтрующего устройства, частоты среза и его быстродействия. На основании исследования выведены соотношения для выбора элементов фильтрующего устройства в зависимости от частоты входного сигнала и необходимого коэффициента подавления пульсаций в нагрузке.

Ответственным каскадом в ИПЧ является повторитель тока, рис.5, служащий для получения унифицированного сигнала по току в нагрузке.

В окончательном виде ток в нагрузке

$$I_u = 4U \cdot \frac{R_2}{R_1 R_{\text{нп}}} \frac{Q}{\omega_0} \Delta \omega, \quad (25)$$

пропорционален отклонению частоты  $\Delta\omega$  в рабочем диапазоне частот. Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  элементы рис.4. Получены формулы для расчёта относительных мультипликативных и аддитивных погрешностей.

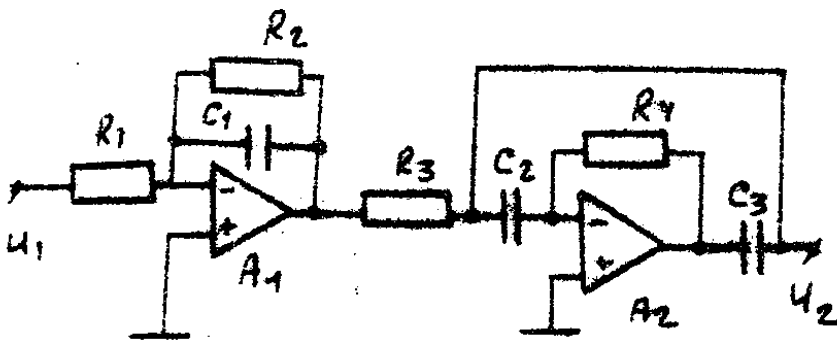


Рис.4

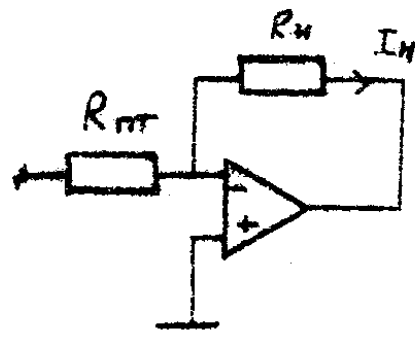


Рис.5

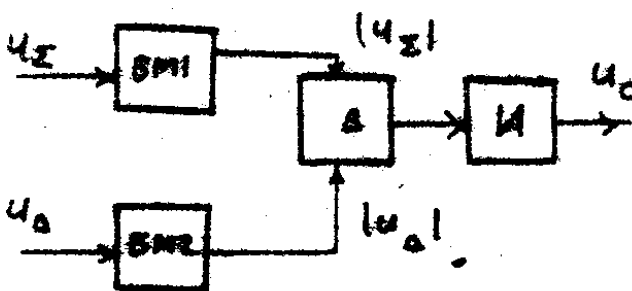


Рис.6

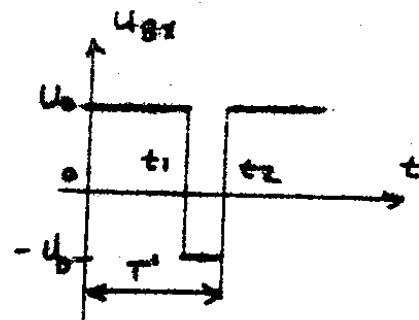


Рис.7

При использовании непрерывно-дискретных методов измерения частоты от однофазных источников использовалось специальное входное устройство, структурная схема которого содержит: фазовращатель, на основе фазового фильтра; фазоделительное устройство на резисторах. С целью получения формул для расчёта выходной частоты  $f_2$  и среднеквадратичного отклонения выходной частоты  $\sigma_{f_2}$  при случайном изменении элементов входного устройства, использовались вероятностные методы анализа.

Выведена формула для относительной мультипликативной погрешности  $\delta_f$

$$\delta_f = \frac{CR\omega}{(1+\omega^2 R^2 + C^2)\arctan RC} (\delta_\omega + \delta_r + \delta_c) \quad (26)$$

Для осуществления операции преобразования "фаза-напряжение" в ИЧ используется синусная суммо-разностная схема (СРС), структурная схема которой изображена на рис.6. С помощью  $\mathcal{D}$ -преобразования и метода наложения было проведено исследование работы СРС на прямоугольных сигналах. Доказана возможность работы СРС при таких сигналах, что позволило избавиться от амплитудной погрешности.

Выведены мгновенные значения выходного напряжения СРС на периоде входного напряжения, рис.7 в переходном и установившемся ре-



жиме. Среднее значение выходного напряжения СРС в диапазоне измеряемых частот определилось в таком виде

$$U_c = \int_0^{\gamma} u_c^I[\omega, n] d\varepsilon + \int_{\gamma}^1 u_c^II[\omega, n] d\varepsilon = U_0 \frac{R_2}{R_1} (2\gamma - 1), \quad (27)$$

где  $u_c^I$  — выходное напряжение СРС на интервале  $0 < \varepsilon \leq \gamma$ , а  $u_c^{II}$  на интервале  $\gamma < \varepsilon \leq 1$  в установившемся режиме. Здесь  $\varepsilon$  переменный параметр, изменяющийся в пределах  $0 < \varepsilon \leq 1$ .

В окончательном виде выходное напряжение имеет вид

$$U_c = 2U_0 \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{T \Delta \omega_{\text{полос}}} \Delta \omega. \quad (28)$$

Здесь резисторы  $R_1, R_2$  — элементы цепи на рис. 4,  $\Delta \omega_{\text{полос}}$  — полоса пропускания ЧЗЦ ИПЧ. В формулах введены обозначения (см. рис. 6):

$$\gamma = \gamma_1 = \frac{t_1}{T}, \quad \gamma_2 = \frac{t_2}{T}, \quad \gamma_1 + \gamma_2 = 1. \quad (29)$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые в диссертационной работе теоретические и экспериментальные исследования позволили получить следующие выводы и результаты.

1. На основании анализа статической и динамической устойчивости ЭС оценено время достижения угла вылета турбины при глубоких изменениях параметров ЭС и выработаны требования к регулятору частоты вращения турбины для повышения результирующей устойчивости. Разработан и защищён авторским свидетельством фазометр, с помощью которого можно измерить угол вылета.

2. Для нерегулируемой ЭС получена структурная схема — математическая модель, и по передаточной функции с помощью критериев Гурвица и Михайлова оценены области её устойчивости.

3. На основании исследования выходного сигнала ТГ в аварийных режимах показана необходимость многократного измерения частоты в течение периода основной частоты. Предложены способы многократного и мгновенного измерения частоты. Наиболее подходящей реализацией этих способов является создание тахогенератора типа ТТИ с заданным количеством зубцов.

4. Предложен инженерный метод расчёта ИПЧ, выходной сигнал которого пропорционален отклонению частоты относительно номинальной. Исследованы основные элементы датчика частоты при воздействии на них входного сигнала прямоугольной формы. Разработан и защищён авторским свидетельством ИПЧ на прямоугольных сигналах. Получены ма-

тематические зависимости для оценки относительных мультипликативных и аддитивных погрешностей основных блочков ИПЧ, а также погрешность линейности ФХ ЧЗЦ.

5. Исследована и доказана возможность работы СРС на прямоугольных сигналах. На основании интегрирующего звена и Филтра Бэттиса разработано быстродействующее фильтрующее устройство. Из анализа ЧЗЦ на знакопеременном прямоугольном сигнале, с помощью  $\mathcal{D}$ -преобразования, получены формулы для определения частоты настройки и выходного напряжения активного резонансного контура.

6. Для увеличения быстродействия вторичных датчиков частоты регулятора частоты вращения турбины разработана и исследована схема фазового деления периода основной частоты с помощью резистивно-фазоделительного устройства. Предложена структурная схема и инженерный метод расчёта измерительного элемента вторичного автоматического регулятора частоты сети - датчика частоты сети.

7. Для разработанных принципиальных схем датчика скорости и частоты сети рассчитаны надёжность, быстродействие, а по экспериментальным данным, с помощью методов математической статистики, оценена точность преобразования ИПЧ. На основании разработанных принципиальных схем изготовлены и внедрены на Костромской и Троицкой ГРЭС датчики частоты сети и скорости с общим экономическим эффектом за счёт снижения ущерба от возможной аварии 70 тыс. рублей в год.

8. Проведённый анализ полосового фильтра Баттерворта на прямоугольном знакопеременном сигнале позволил разработать методику по выбору и расчёту элементов фильтра, выходного напряжения в зависимости от коэффициента гармоник и полосы пропускания ИПЧ.

#### ПО ТЕМЕ РАБОТЫ ИМЕЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ПУБЛИКАЦИИ СОИСКАТЕЛЯ

1. Исследование схемы измерительного преобразователя частота-фаза / М.С. Розкина, Н.Э. Решетов, Г.М. Торбенков, А.В. Баев // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: ЧПИ, 1974. № 141, с. 92-96.

2. Анализ погрешностей измерения частоты по ФХ последовательного резонансного контура. Там же. С. 97-101.

3. Анализ работы полосового фильтра на прямоугольной форме приложенного напряжения / М.С. Розкина, А.В. Баев, Г.М. Торбенков, Н.Э. Решетов // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий. Челябинск: ЧПИ, 1975. № 160, с. 58-62.

4. Анализ работы двухкаскадной схемы стабилизации в устройстве измерения скорости вращения турбогенераторов / М.С. Розкина, Н.Е. Решетов, Г.М. Торбенков, А.К. Вязовский // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразований. Челябинск: ЧПИ, 1976. № 176, с. 191-196.

5. Розкина М.С., Решетов Н.Е., Торбенков Г.М. Определение точности измерительного преобразователя частоты с помощью методов математической статистики // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятия. Челябинск: ЧПИ, 1977. № 191, с. 130-133.

6. Исследование схемы измерительного преобразователя частоты на полевых транзисторах / Н.Е. Решетов, В.В. Нуждин, М.С. Розкина, Г.М. Торбенков // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятия. Челябинск: ЧПИ, 1978. № 213, с. 88-90.

7. Сравнительный анализ подходов к расчёту электромеханических процессов на ЭЦВМ / Н.Е. Решетов, Г.М. Торбенков, В.Г. Чечушков, А.К. Вязовский // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей. Челябинск: ЧПИ, 1980. № 247, с. 10-13.

8. Нуждин В.В., Решетов Н.Е., Розкина М.С. Измерительный преобразователь частоты для управления турбиной. Там же. с. 25-28.

9. Решетов Н.Е. Анализ работы однополярного релейного устройства с регулируемым коэффициентом возврата на ИС. Там же. С. 79-82.

10. Решетов Н.Е., Розкина М.С., Торбенков Г.М. Исследование суммо-разностной схемы на операционных усилителях // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятия. Челябинск: ЧПИ, 1981. № 258, с. 75-77.

11. Торбенков Г.М., Решетов Н.Е., Розкина М.С. К вопросу непрерывного измерения частоты колебания однофазных источников // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляльных преобразователей. Челябинск: ЧПИ, 1983, с. 118-120.

12. Решетов Н.Е., Торбенков Г.М., Чечушков В.Г. О принципах измерения мгновенной частоты и разности фаз колебательных процессов. Там же. С. 74-77.

13. Решетов Н.Е., Розкина М.С. Устройство для измерения частоты периодических сигналов. Там же. С. 77-79.

14. Борисова И.А., Решетов Н.Е., Торбенков Г.М. Исследование частотных характеристик колебательного контура при импульсных воздействиях // Межвузовский научный сборник: Сложные электромагнит-

ные поля и электрические цепи. Уфа, 1984, с. 98-101.

15. Решетов Н.Е., Розкина М.С. Повышение точности и быстродействия устройств измерения частоты тока в условиях помех // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Тематический сборник научных трудов. Челябинск: ЧПИ, 1985, с. 8-9.

16. А.с. 1190293 (СССР). Фазометр / Г.М. Торбенков, Л.Ф. Резник, М.С. Розкина, Н.Е. Решетов и др. // Оpubл. в Б.И. 1985. № 41.

17. А.с. 1287038 (СССР). Устройство для измерения частоты / Н.Е. Решетов, М.С. Розкина, Г.М. Торбенков // Оpubл. в Б.И. 1987. № 4.

18. Решетов Н.Е., Розкина М.С. Анализ работы входного устройства измерительного преобразователя частоты при наличии помех // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Тематический сборник научных трудов. Челябинск: ЧПИ, 1987, с. 17-18.

19. Решетов Н.Е., Розкина М.С. Анализ работы блока взятия модуля в устройствах измерения скорости вращения. Там же. С. 67-70.

20. Решетов Н.Е., Торбенков Г.М., Непопалов В.Н. Устройство измерения скорости вращения ротора турбогенератора (ТГ) // Устройства преобразования информации для контроля и управления в энергетике: Тезисы докладов третьей Республиканской научно-технической конференции. Харьков: ХПИ, 1988, с. 157.

21. Решетов Н.Е., Розкина М.С., Непопалов В.Н. Устройство измерения частоты сети. Там же. С. 160.

Личный вклад. В работах, написанных в соавторстве, лично соискателю принадлежат:

в / 6, 10, 12, 13, 15, 18-21 / разработка метода, проведение расчётов;

в / 7, 11, 14 / участие в проведении исследований, обработка результатов;

в / 1-5, 8 / проведение расчётов, анализ результатов и исследований.

