УДК 002.6

Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов

ВКЛАД ЛЕНИНГРАДСКИХ УЧЕНЫХ В РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. **Вклад ленинградских ученых в развитие теории чувствительности систем управления.**

Аннотация. Теория чувствительности объединяет принципы и методы исследования влияния вариации параметров на свойства систем управления. Как самостоятельное научное направление теория чувствительности начала формироваться в конце пятидесятых и начале шестидесятых годов двадцатого столетия. На ее становление заметное влияние оказали работы ленинградских ученых Розенвассера Е.Н. и Юсупова Р.М.

В статье приводятся общие сведения об истории развития теории чувствительности, о вкладе авторов в ее формирование в рамках теории управления и общей теории динамических систем, о той научно-организационной деятельности, которая проводилась в стране, в том числе с участием авторов, по продвижению теории чувствительности.

Ключевые слова: теория чувствительности, вариация параметров, дополнительное движение, функции и коэффициенты чувствительности, уравнения чувствительности.

Rozenwasser E.N., Yusupov R.M. **Contribution of Leningrad scientists to the development of control systems sensitivity theory.**

Abstract. The sensitivity theory combines the principles and methods for exploring the influence of parameters variation on properties of control systems. The sensitivity theory was formed at the end 1950s – the beginning of 1960s as an independent scientific field. Rozenwasser E.N. and Yusupov R. M. made a significant contribution to its formation. The paper describes general aspects of the historical development of sensitivity theory, the authors' contribution to its formation within the control theory and the general theory of dynamic systems, and scientific and organizational activity which was carried out in the country with participation of authors on promotion of the sensitivity theory.

Keywords: sensitivity theory, parameter variation, additional movement, functions and coefficients of sensitivity, sensitivity equations.

1. Введение. Теория чувствительности как самостоятельное научное направление в кибернетике и теории автоматического управления начала формироваться в конце пятидесятых и начале шестидесятых годов прошлого столетия. На ее развитие существенное влияние оказал возросший в те годы интерес к разработке методов, моделей и алгоритмов оценки влияния изменения параметров систем управления на характер их функционирования. В частности это стимулировалось бурным развитием теории и практики адаптивных (самонастраивающихся) систем. Как известно, математическая модель системы управления, помимо структуры и основных переменных состояния, характеризуется и некоторой совокупностью вспомогательных независимых величин, называемых параметрами. В процессе функционирования

системы параметры могут возмущаться, что неизбежно приводит к изменению качества управляемого процесса.

Такие изменения параметров носят обычно неконтролируемый и неуправляемый характер. Это приводит к тому, что процесс функционирования системы на всех этапах его жизненного цикла, как правило, отличается от расчетного. Кроме того, по самому принципу построения некоторых важных классов систем управления, таких, как адаптивные системы, системы автоматической настройки регуляторов, системы с идентификацией моделей, по их принципу действия должна быть предусмотрена возможность целенаправленного (управляемого) изменения некоторых параметров системы.

В обоих случаях исследователей и проектировщиков интересует степень влияния изменения параметров на качество работы системы. При этом в роли параметров могут выступать некоторые технологические характеристики системы, условия ее эксплуатации, а также параметры внешней среды.

Свойство системы изменять свои характеристики при изменении различных внутренних и внешних факторов принято называть ее чувствительностью. Совокупность принципов и методов, связанных с исследованием чувствительности формирует общую теорию чувствительности. Раздел теории чувствительности, связанный с изучением влияния изменения параметров на характеристики системы, принято называть теорией параметрической чувствительности. Ниже в статье термин «чувствительность» подразумевает именно параметрическую чувствительность.

Проблема параметрической чувствительности важна не только для теории автоматического управления. Теоретически основы этой проблемы имеют давнюю историю и уходят своими корнями в теорию стрельбы и баллистику снарядов и ракет, теорию электрических и электронных цепей, а также в многочисленные разделы математики, такие как теория ошибок (погрешностей), в вычислительную математику, теорию дифференциальных уравнений, теорию возмущений линейных и нелинейных операторов, вариационное исчисление и т.д.

Так, в теории ошибок большое влияние уделяется прямым и обратным задачам теории погрешностей. Прямая задача заключается в определении погрешности вычисления заданной функции нескольких аргументов при их известных погрешностях. Обратная задача связана с определением таких абсолютных погрешностей аргументов функции, при которых погрешность вычислений функции не превышает заданной величины. В теории полета и баллистике снарядов и ракет рас-

сматриваются аналогичные задачи, связанные с влиянием ошибок целеуказания на точность стрельбы.

К числу первых серьезных исследований по теории параметрической чувствительности можно отнести следующие работы: К.М. Поливанов «Теорема о вариации параметров линейных электрических цепей» [1], Г. Боде «Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью» [2], М.Л. Быховский «Основы динамической точности электрических и динамических цепей» [3]. Развитие непосредственно теории чувствительности систем автоматического управления как самостоятельного научного направления было инициировано появлением монографий [4], [5] югославских ученых Р. Томовича и М. Вукобратовича. Содержательный обзор литературы по некоторым разделам теории чувствительности в период с 1912 по 1993 гг. приведен в монографии [19], библиография в которой содержит более двух с половиной тысяч наименований.

В целом следует принять, что теория чувствительности систем управления стала составной частью общего курса теории автоматического управления и вошла в качестве раздела в учебные руководства России и ряда зарубежных стран.

2. Развитие теории чувствительности в работах Е.Н. Розенвассера и Р.М. Юсупова. В начале 1964 г. Е.Н. Розенвассер обратился к профессору Е.П. Попову (впоследствии академик РАН), работавшему в то время в военной академии имени Можайского, с просьбой быть оппонентом по его докторской диссертации. Е.П. Попов дал согласие и дал поручение своему молодому сотруднику к.т.н. Р.М. Юсупову выполнить все необходимые формальности. Так началась личная дружба Е.Н. Розенвассера и Р.М. Юсупова. Р.М. Юсупов в это время заканчивал заочно математико-механический факультет Ленинградского Университета, и Е.Н. Розенвассер стал руководителем его дипломной работы, посвященной некоторым вопросам теории чувствительности. На этой почве появился взаимный интерес к проблеме чувствительности и возникло тесное научное сотрудничество, продолжающееся многие годы.

В период с начала 60-х годов до конца восьмидесятых прошлого века Е.Н. Розенвассером и Р.М. Юсуповым и их учениками был выполнен ряд оригинальных исследований по теории чувствительности, опубликованных в четырех совместных монографиях. Кроме того, ими опубликовано несколько десятков статей и докладов, часть которых написана совместно, а часть раздельно каждым из авторов. Эти работы опубликованы в ведущих отечественных журналах «Автоматика и Те-

лемеханика», «Известия АН СССР. Техническая кибернетика», «Известия ВУЗов. Приборостроение», а также в трудах ряда всесоюзных конференций. Перечень основных публикаций авторов в области теории чувствительности дан в конце данной статьи.

Результаты совместной работы Е.Н. Розенвассера и Р.М. Юсупова по проблеме чувствительности в основном подытожены в монографии «Чувствительность систем управления», М.Наука, 1981 [П.41]. В этой книге фактически сформулированы основы общей теории чувствительности нелинейных нестационарных и разрывных систем как самостоятельного направления в современной теории управления. Основное содержание книги делится на две самостоятельные части. В первой части разработан строгий математический аппарат исследования чувствительности упомянутого выше класса систем во временной области. Предложенная методология исследования фактически делится на ряд последовательных разделов.

Первый раздел связан с выбором переменных состояния и параметров исследуемой системы. Эта задача не является формальной. Она требует глубокого изучения физических свойств системы. Раздел заканчивается построением так называемой параметрической модели системы управления, которая является основой последующего исследования чувствительности.

Второй раздел посвящен установлению связи между проблемой чувствительности и математическими задачами теории устойчивости. Введено понятие параметрической устойчивости и установлена его связь с теорией особенных случаев во втором методе Ляпунова. Установлено, что в ряде случаев, в частности при исследовании краевых задач, имеет место параметрическая неустойчивость, когда использование функции чувствительности по первому приближению на больших интервалах времени приводит к ошибочному результату.

Даны достаточные условия, обеспечивающие параметрическую устойчивость, и приведены способы применения функций чувствительности для ряда задач, в которых параметрическая устойчивость не имеет места.

Третий раздел первой части посвящен методам построения уравнений, определяющих функции чувствительности для конечномерных нелинейных и нестационарных разрывных систем. Здесь используются два подхода. Для систем, описываемых последовательностью обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши, построены определяющие функции чувствительности последовательности линейных дифференциальных уравнений, решения которых соединяются с

помощью специальных условий разрыва. Этот метод предложен в [П.4], его дальнейшее развитие и применение для решения различных прикладных задач имеется в [П.5], [П.6], [П.41]. Краткое описание этого подхода дано в приложении 1.

Для систем, заданных структурными схемами с передаточными функциями линейных стационарных элементов, описан метод построения уравнений чувствительности, основанный на применении теории обобщенных функций. Этот метод предложен в [П.10] и приводит к модели чувствительности в виде некоторой эквивалентной линейной импульсной системы. Краткое описание этого метода дано в приложении 2.

Вторая часть книги посвящена применению методов теории чувствительности для решения широких классов прикладных задач. Здесь введено понятие инвариантов чувствительности и изложены методы их вычисления для различных временных характеристик динамических систем. Рассматриваются корневые инварианты, а также инварианты передаточных функций, частотных характеристик, интегральных оценок качества. Значительное внимание во второй части уделено вопросам, связанным с чувствительностью задач математического программирования и вариационного исчисления, в том числе в вариационных задачах с подвижными концами и угловыми точками, а также вариационных задачах на условный экстремум. В этой части книги также излагаются пути применения функций чувствительности для решения таких фундаментальных проблем, как идентификация динамических систем, распределение допусков на параметры, синтез малочувствительных систем и другие.

Структура монографии [П.41] представлена в приложении 3

В целом следует признать, что за годы совместной научной деятельности нам удалось сформировать теорию параметрической чувствительности как самостоятельное научное направление в теории динамических систем. Полученные результаты выходят далеко за рамки задач теории управления, первоначально изучавшихся авторами, и применимы к многочисленным проблемам физики и техники, математические модели в которых относятся к классам математических моделей, описанных выше. Так, например, в работе [П.48] рассматривается возможность применения моделей и функций чувствительности к задаче оценивания параметров разрывных динамических систем по результатам косвенных измерений. В частности, к этой проблеме приводит проблема определения параметров движения маневрирующих объектов.

Вариант обобщенной структуры теории параметрической чувствительности и методов ее практического применения приведен на рис. 1. На рисунке через $\Delta\alpha$ обозначена вариация вектора параметров системы, через Δy - вариация вектора состояния системы и через u - вектор функций (коэффициентов) чувствительности.

3. Научно-организационная деятельность в области теории чувствительности. В шестидесятых и семидесятых годах прошлого столетия Е.Н. Розенвассер и Р.М. Юсупов активно «продвигали» теорию чувствительности «в массы». По их инициативе и при их личном участии были организованы и проведены различные конференции, семинары и научные школы, посвященные рассмотрению вопросов теории и практики анализа чувствительности систем автоматического управления. В частности, состоялись Первый Ленинградский симпозиум по теории чувствительности (1974 г.), Всесоюзная школа-семинар по теории чувствительности и ее применению (1975 г., Владивосток), Республиканская школа-семинар «Инвариантность, устойчивость, чувствительность» (1976 г., Киев), Всесоюзная научная конференция «Проблемы теории чувствительности электронных и электромеханических систем» (1978 г., Москва), Второй Ленинградский симпозиум по теории чувствительности (1979 г.), Всесоюзная школа «Общие проблемы теории устойчивости, инвариантности и чувствительности систем управления» (1979 г., Баку).

В свое время в СССР проводились популярные Всесоюзные совещания по теории инвариантности. На них обсуждались вопросы теории и практики создания систем, состояние которых не зависит (инвариантно) от внешних возмущающих воздействий. Начиная с 1958 г. было проведено семь таких совещаний: 1958 г., 1962 г., 1966 г., 1971 г., 1976 г., — Киев, 1982 г. — Москва, 1987 г. — Баку.

Рис. 1. Обобщенная структура теории чувствительности.

$$\Delta_i = U_i^+ - U_i^- = U_i(t_i + 0) - U_i(t_i - 0) =$$

$$\left[-\Delta F_i + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial X} - E \right) F_i + \frac{\partial \Phi_i}{\partial X} \right] \frac{dt_i}{d\alpha} + \left(\frac{\partial \Phi_i}{\partial X} - E \right) U_i^- + \frac{\partial \Phi_i^-}{\partial \alpha}. \tag{11}$$

Здесь

$$\frac{dt_0}{d\alpha} = -\frac{\frac{\partial f_0^-}{\partial X} U_i^- + \frac{\partial f_i^-}{\partial \alpha}}{\frac{\partial f_i^-}{\partial X} F_i + \frac{\partial f_i^-}{\partial t}} \tag{12}$$

и E — единичная матрица соответствующего размера.

В важном для приложений случае, когда решение $X(t,\alpha)$ непрерывно относительно t, условия разрыва существенно упрощаются и принимают вид

$$\Delta U_i = -\Delta F_i \frac{dt_i}{d\alpha}, \tag{13}$$

причем имеют место дополнительные соотношения

$$\frac{dt_i}{d\alpha} = -\frac{\frac{\partial f_i^-}{\partial X} U_i^- + \frac{\partial f_i^-}{\partial \alpha}}{\frac{\partial f_i^-}{\partial X} F_i + \frac{\partial f_i^-}{\partial t}} = -\frac{\frac{\partial f_i}{\partial X} U_i^+ + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha}}{\frac{\partial f_i}{\partial X} F_i^+ + \frac{\partial f_i}{\partial t}}. \tag{14}$$

Пример 1.

Рассмотрим простейшую релейную систему

$$\frac{dy(t)}{dt} = f(y,k), \quad f(y,k) = k \, sign \, y + c, \tag{15}$$

где $y(0) = y_0 > 0$, $k > 0$, $c < 0$, $|c| > k$, предполагая решение $y(t,k)$ непрерывным относительно t. Построим уравнение чувствительности по параметру k, из которого могут быть получена функция чувствительности

$$u(t) = \frac{\partial y(t,k)}{\partial k}.$$

Пусть $y(t,k)$ — решение уравнения (15) при заданных начальных условиях. Тогда до момента переключения t_1, определяемого соотношением

$$y(t_1, k) = 0,$$

имеем

$$y(t, k) = (k + c)t + y_0.$$

Следовательно

$$t_1 = -\frac{y_0}{c + k}. \tag{16}$$

Введем обозначения

$$u(t) = \begin{cases} u^-(t), & 0 \le t \le t_1 - 0 \\ u^+(t), & t \ge t_1 + 0. \end{cases}$$

Тогда уравнения чувствительности (9) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \frac{du^-(t)}{dt} &= 1, \qquad 0 \le t \le t_1 - 0, \\ \frac{du^+(t)}{dt} &= -1, \qquad t \ge t_1 + 0. \end{aligned} \tag{17}$$

При этом, поскольку начальные условия не зависят от параметра, следует принять $u(t_0 + 0) = 0$.

Интегрируя первое уравнение (17) при нулевых начальных условиях, получаем

$$\begin{aligned} u(t) &= u^-(t) = t \qquad 0 \le t \le t_1 - 0, \\ u(t) &= u^+(t) = -t + \ell, \qquad t \ge t_1 + 0, \end{aligned} \tag{18}$$

где ℓ — постоянная, подлежащая определению.

Разрыв функции чувствительности в момент $t = t_1$ равен

$$\Delta u_1 = u^+(t_1) - u^-(t_1) = -2t_1 + \ell. \tag{19}$$

С другой стороны, в силу непрерывности решения $y(t, k)$ относительно t, имеем в силу (13)

$$\Delta u_1 = -\Delta f_1 \frac{dt}{dk}. \tag{20}$$

Из (16) следует

$$\frac{dt_1}{dk} = \frac{y_0}{(k + c)^2}.$$

Кроме того

$$\Delta f_1 = f(y, t_1 + 0) - f(y, t_1 - 0) = -2k.$$

Поэтому из (20) получаем

$$\Delta u_1 = \frac{2ky_0}{(k+c)^2}. \qquad (21)$$

Сопоставляя (19) и (21), получаем с учетом (16)

$$\ell = \frac{2ky_0}{(k+c)^2} - \frac{2y_0}{k+c} = -\frac{2cy_0}{(k+c)^2}.$$

В результате из (18) находим явные выражения для функций чувствительности

$$u(t) = \begin{cases} t, & 0 \le t \le -\dfrac{y_0}{k+c} - 0; \\ -t - \dfrac{2cy_0}{(k+c)^2}, & t \ge -\dfrac{y_0}{k+c} + 0. \end{cases}$$

Примерный характер решения $y(t_k)$ и функции чувствительности $u(t)$ представлены на рис. 2.

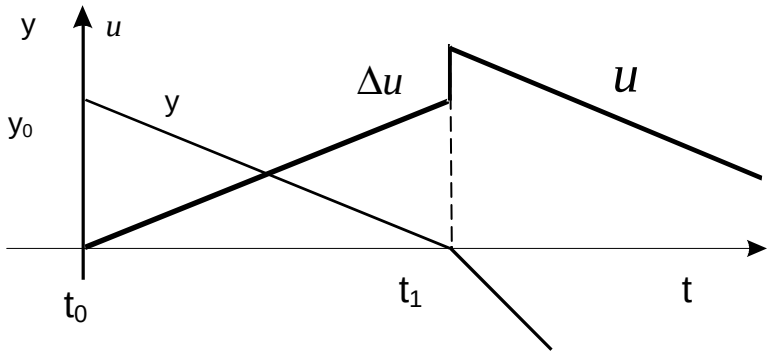

Рис. 2. Характер решения $y(t_k)$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Операторный метод построения уравнений чувствительности. Описываемый метод построения уравнений чувствительности предложен в [10] и получил дальнейшее развитие в [41]. Ниже основные идеи метода излагаются на конкретном примере. Пусть изучаемая система задана скалярным операторным уравнением

$$y(t,\alpha) = W(p)\, f(y,\alpha), \qquad (1)$$

где $f(y,\alpha)$ — нелинейная разрывная функция, зависящая от параметра α. Кроме того, $W(p)$ — передаточная функция вида

$$W(p)=\frac{b_1 p+b_2}{p^2-(a_1+a_2)p+a_1 a_2}=\frac{bc(p)}{a(p)},\quad \alpha_1\neq a_2. \tag{2}$$

Формально уравнение (1) можно записать в виде

$$a(p)y(t,\alpha)=b(p)f(y,\alpha). \tag{3}$$

Если здесь понимать символ p как оператор дифференцирования $\frac{d}{dt}$, то имеем

$$\frac{d^2y(t,\alpha)}{dt^2}=-(a_1+a_2)\frac{dy(t,\alpha)}{dt}+a_1a_2y(t,\alpha)=b_1\frac{df(y,\alpha)}{dt}+b_2f(y,\alpha). \tag{4}$$

При $b_1\neq 0$ полученное уравнение не имеет смысла в силу разрывности функции $f(y,\alpha)$. В тоже время, если записать функцию $W(p)$ в виде

$$W(p)=\frac{d_1}{p-a_1}+\frac{d_2}{p-a_2}, \tag{5}$$

то уравнению (1) можно сопоставить уравнения состояния

$$\begin{aligned} y(t)&=d_1y_1(t)+d_2y_2(t),\\ \frac{dy_1(t)}{dt}&=a_1y_1(t)+f(y,\alpha),\\ \frac{dy_2(t)}{dt}&=a_2y_2(t)+f(y,\alpha), \end{aligned} \tag{6}$$

для которых построение уравнений чувствительности может быть выполнено методом, описанным в приложении 1. Если же существует необходимость построения функции чувствительности $\frac{\partial y(t,\alpha)}{\partial\alpha}$ непосредственно по уравнению (3), то возникающие при этом трудности можно преодолеть, если понимать уравнение (3), как уравнение в обобщенных функциях [10], [41]. Для этого в уравнениях (3) будем полагать, что p - это оператор обобщенного дифференцирования по времени $\frac{D}{dt}$. Для разрывной функции

$$f(t) = f_i(t), \quad \text{при } t_i < t < t_i$$

имеем

$$\frac{Df(t)}{dt} = \frac{df(t)}{dt} + \sum \Delta f_i \delta(t - t_i). \tag{7}$$

Здесь

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{df_i(t)}{dt}, \ t_i < t < t_{i+1}, \ \Delta f_i = f_{i+1}(t_i) - f_i(t_i) \tag{8}$$

и $\delta(t)$ — функция Дирака. При таком подходе уравнение (4) записывается в виде

$$\frac{D^2 y(t,\alpha)}{dt^2} - (a_1 + a_2)\frac{Dy(t,\alpha)}{dt} + a_1 a_2 y(t,\alpha) = b_1 \frac{Df(t,\alpha)}{dt} + b_2 f(t,\alpha). \tag{9}$$

Для построения уравнений чувствительности следует обобщенно продифференцировать уравнение (9) по α, используя операцию обобщенного дифференцирования $\frac{D}{dt}$ разрывной функции $f(t,\alpha)$ по параметру α. Если

$$f(t,\alpha) = f_i(t,\alpha), \quad t_i(\alpha) < t < t_{i+1}(\alpha),$$

где функции $f_i(t,\alpha)$ непрерывно дифференцируемы по α, то

$$\frac{Df(t,\alpha)}{d\alpha} = \frac{\partial f(t,\alpha)}{\partial \alpha} - \sum_i \Delta f_i \frac{dt_i}{d\alpha}\delta(t - t_i)(\alpha), \tag{10}$$

где

$$\frac{\partial f(t,\alpha)}{\partial \alpha} = \frac{\partial f_i(t,\alpha)}{\partial \alpha}, \ t_i(\alpha) < t < t_{i+1}(\alpha).$$

Учитывая коммутативность обобщенного дифференцирования по t и α, из (9) можно получить

$$\frac{D^2}{\partial t^2}\frac{Dy(t,\alpha)}{\partial \alpha} - (a_1 + a_2)\frac{D}{\partial t}\frac{Dy(t,\alpha)}{\partial \alpha} + aby(t,\alpha) = b\frac{D}{\partial t}\left[\frac{Df(t,\alpha)}{\partial \alpha} + b_2 f(t,\alpha)\right].$$

Выполняя обобщенное дифференцирование по формулам (7) и (10) и приравнивая коэффициенты при функции δ в правой и левой частях, можно получить уравнения, определяющие функции чувствительности на интервале между моментами переключения, а также условия скачка для функции чувствительности и ее производных.

Пример 2.

Рассмотрим уравнение релейной системы из примера 1 (приложение 1)

$$\frac{dy(t,k)}{d\alpha} = k\,sign\,y(t,k) + c \tag{12}$$

при $y(0) = y_0 > 0$, $k > 0$, $c < 0$, $|c| > k$. Поскольку решение $y(t,k)$ непрерывно относительно t, то уравнение (12) можно записать как уравнение в обобщенных производных

$$\frac{Dy(t,k)}{\partial t} = k\,signy(t,k) + c\,. \tag{13}$$

Дифференцируя это уравнение обобщенно по $\frac{D}{\partial\alpha}\delta^{(\rho)}\left(t - t_i(\alpha)\right) = -\delta^{(\rho+1)}\left(t - t_i(\alpha)\right)\frac{dt_i}{d\alpha}$, имеем

$$\frac{D}{\partial t}\left[\frac{Dy(t,k)}{\partial k}\right] = \frac{D\left[k\,sign\,y(t,k) + c\right]}{\partial k}\,. \tag{14}$$

Далее сохраняются все обозначения из примера 1.

Поскольку при сделанных предположениях имеется только один момент переключения t_1, то получим

$$\frac{D}{\partial t}\left[\frac{Dy(t,k)}{\partial t}\right] = \frac{D}{\partial t}u(t,k) = \frac{\partial}{\partial t}u(t,k) + \Delta u_1\delta(t - t_1)\,, \tag{15}$$

где

$$\frac{\partial}{\partial t}u(t,k) = \begin{cases} u^-(t,k), & 0 \le t \le t_1 - 0; \\ u^+(t,k), & t \ge t_1 + 0. \end{cases} \tag{16}$$

Кроме того, по формуле (10)

$$\frac{D\left[k\,sign\,y(t,k) + c\right]}{\partial k} = sign\;y - \delta(t - t_1)\Delta f_1\frac{dt}{d\alpha}\,.$$

Подставляя (5) и (16) в (9), находим

$$\frac{\partial}{\partial t}u(t,k) + \Delta u_1\delta(t - t_1) = sign\,y - \Delta f_1\frac{dt_1}{d\alpha}\delta(t - t_1)\,.$$

Отсюда следует

$$\frac{\partial}{\partial t}u(t,k) = sign\,y(t,k)\,,\ \Delta u_1 = -\Delta f_1\frac{dt_1}{d\alpha}\,,$$

что приводит к решению примера 1.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.
Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ
Предисловие
Глава 1. Параметрические модели систем управления и постановка задач теории чувствительности.
§ 1.Переменные состояния и параметры систем управления.
§ 2. Параметрические модели систем управления.
§ 3. Функции чувствительности и их применения.
Глава 2. Чувствительность конечномерных непрерывных систем.
§ 1. Конечномерные непрерывные системы, зависящие от параметров.
§ 2. Второй метод Ляпунова в теории чувствительности.
§ 3. Чувствительность на бесконечных интервалах времени.
§ 4. Анализ чувствительности автоколебательных систем во временной области.
§ 5. Анализ чувствительности неавтономных колебательных систем по отношению к частоте возбуждения.
§ 6. Чувствительность решений краевых задач.
Глава 3. Чувствительность конечномерных разрывных систем.
§ 1. Уравнения чувствительности конечномерных разрывных систем.
§ 2. Уравнения чувствительности релейных систем.
§ 3. Чувствительность импульсных и релейно-импульсных систем.
Глава 4. Исследование чувствительности разрывных систем, заданных операторными моделями.
§ 1. Операторные параметрические модели систем управления.
§ 2. Операторные модели разрывных систем как уравнения в обобщенных функциях.
§ 3. Чувствительность операторных моделей.
§ 4. Операторные уравнения чувствительности релейных и импульсных систем.
Глава 5. Чувствительность невременных характеристик систем управления.
§ 1. Чувствительность передаточной функции и частотных характеристик линейных систем.
§ 2. Чувствительность нулей и полюсов передаточных функций.
§ 3. Чувствительность собственных значений и собственных векторов матриц линейных стационарных систем управления.
§ 4. Чувствительность интегральных оценок качества регулирования.
§ 5. Косвенные характеристики функций чувствительности
Глава 6. Инварианты чувствительности систем управления.
§ 1. Инварианты чувствительности временных характеристик динамических систем.
§ 2. Корневые инварианты и инварианты чувствительности передаточных функций.
§ 3. Инварианты чувствительности частотных характеристик.
§ 4. Инварианты чувствительности интегральных оценок.
§ 5. Инварианты чувствительности гироскопических систем.
Глава 7. Чувствительность задач математического программирования и вариационного исчисления.
§ 1. Чувствительность задач линейного программирования.
§ 2. Чувствительность оптимальных решений задач нелинейного программирования.
§ 3. Чувствительность простейшей вариационной задачи.
§ 4. Чувствительность вариационных задач с подвижными границами и угловыми точками.
§ 5. Чувствительность вариационных задач на условный экстремум.
Глава 8. Некоторые прикладные задачи теории чувствительности.
§ 1. Прямые и обратные задачи теории чувствительности.

§ 2. Идентификация динамических систем.
§ 3. Распределение допусков на параметры.
§ 4. О синтезе малочувствительных систем.
§ 5. Об интегрировании уравнений чувствительности на цифровых вычислительных машинах.

Литература

1. Поливанов К.М. Теорема о вариации параметров линейной электрической цепи. // Электричество, № 2, 1946.
2. Боде Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. М.: Изд-во иностр.лит., 1948.
3. Быховский М.Л. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
4. Tomovich R. Sensitivity Analyses of Dynamic Systems. Mc. Graw-Hill, New York, 1963.
5. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. М.: Изд-во «Советское радио», 1972.
6. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Физматгиз, 1961.
7. Кокотович П.В., Рутман Р.С. Чувствительность систем автоматического управления. // Автоматика и телемеханика, 1965.
8. Измайлов Л.Ф. Чувствительность в оптимизации. М.: Физматлит, 2006.
9. Рубан А.И. Идентификация и чувствительность сложных систем. Томск: Изд-во ТГУ, 1982, 304 с.
10. Ивановский Р.И., Игнатов А.А. Теория чувствительности в задачах управления и оценки. СПб.:ЦНИИ «Румб», 1986.
11. Современная прикладная теория управления. Под ред. А.А. Колесникова. Москва-Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
12. Кузнецов Л.А. Анализ эффективности деятельности предприятия инструментами теории чувствительности. URL: www.volsu.ru/s_conf/tez_htm/035htm
13. Морева О.Д. Разработка методики оценки информационной защищенности социотехнических систем с использованием функций чувствительности. Дисс.канд.техн.наук. Воронеж:ВГТУ, 2006.
14. Овсянников Д.А. и др. К теории расчета допусков на параметры фокусирующих систем // ЖТФ РАН, т.61, вып. 7, 1991.
15. Городецкий Ю.И. Функции чувствительности и динамика сложных механических систем. Н.Новгород: ННГУ, 2006.
16. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Часть II. М.: Энергия, 1966.
17. Основы автоматического регулирования и управления. Под ред. В.М.Пономарева и А.П.Литвинова. М.: Высшая школа, 1974.
18. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1989.
19. Eslami M. Theory of Sensitivity in Dynamic Systems And Introduction. Springer ferlag, 1994.

Перечень трудов Е.Н.Розенвассера и Р.М.Юсупова в области теории чувствительности

П.1. Юсупов Р.М. К вопросу о грубости и чувствительности систем автоматического управления / Системы автоматического управления: Сб. статей. Л: ЛВИКА, 1966.

П.2. Юсупов Р.М. Коэффициентный метод определения функций чувствительности линейных систем автоматического управления / Системы автоматического управления: Сб. статей. Л: ЛВИКА, 1966.
П.3. Юсупов Р.М. Теория чувствительности и ее применение для построения самонастраивающихся систем / Теория и практика самонастраивающихся систем: Сб.научных трудов. ЛДНТП, 1966.
П.4. Розенвассер Е.Н. Общие уравнения чувствительности разрывных систем. Автоматика и телемеханика, 1967, №3.
П.5. Юсупов Р.М. Модели чувствительности разрывных систем автоматического управления / Математическое моделирование на ЭВМ процессов организации и планирования управления. Л.:ЛВИКА, 1967.
П.6. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем автоматического управления. Л.: Энергия, 1969, 208 с.
П.7. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Уравнения чувствительности импульсных систем управления. Автоматика и телемеханика, 1969, №4.
П.8. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Модели чувствительности нелинейных разрывных систем автоматического управления. В кн.: Труды II Всесоюзной конференции по теории и методам математического моделирования. М.: Наука, 1969.
П.9. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Общие уравнения чувствительности и оценка параметрической инвариантности автоматических систем. В кн.: Труды II Всесоюзного совещания по теории инвариантности. М.: Наука, 1969.
П.10. Розенвассер Е.Н. О построении моделей чувствительности разрывных систем, заданных операторными уравнениями. Автоматика и телемеханика, 1969, №5.
П.11. Юсупов Р.М., Сидоров В.Н. Оценка точности вычисления функций чувствительности временных характеристик на ЦВМ / Вопросы анализа и синтеза САУ: Сб. научных трудов. Л.:ЛВИКА, 1969.
П.12. Юсупов Р.М., Козеев В.А. Метод частичной линеаризации для исследования точности нелинейных стохастических систем управления / Известия ВУЗов. Приборостроение, №7. М., 1969.
П.13. Юсупов Р.М., Козеев В.А. О способе выделения случайных параметров с большими вариациями в методе частичной линеаризации / Известия ВУЗов. Приборостроение, №11. М., 1970.
П.14. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Применение теории чувствительности к нелинейным системам управления / Точные методы исследования нелинейных систем автоматического управления: Монография.– Гл.11. /Под ред. Попова Е.П. М.: Машиностроение, 1970.
П.15. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Общие уравнения чувствительности и оценка степени параметрической инвариантности автоматических систем / Труды 3 Всесоюзного совещания по теории инвариантности. М.: Наука, 1970.
П.16. Юсупов Р.М. Использование избыточности при синтезе систем автоматического управления с учетом чувствительности их динамических характеристик / Труды 2 Всесоюзного симпозиума по использованию избыточности в информационных системах. М.: Наука, 1970.
П.17. Юсупов Р.М., Сидоров В.Н. Некоторые способы вычисления чувствительности частотных характеристик на ЦВМ и их сравнительная оценка / Известия ВУЗов. Приборостроение, №7. М., 1970.
П.18. Юсупов Р.М., Захарин Ф.М. Приложение теории чувствительности к решению задач оптимизации стохастических систем / Доклады 2 Всесоюзного совещания по статистическим методам управления. М.: Наука, 1970.

П.19. Юсупов Р.М., Сидоров В.Н. Чувствительность и надежность систем автоматического управления / Труды НТК. Л.:ЛВИКА, 1970.
П.20. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении/ Под ред. Е.Н. Розенвассера и Р.М. Юсупова. Л.: Энергия, 1971, 344 с.
П.21. Юсупов Р.М., Захарин Ф.М., Пономарев В.М. О разрешимости обратной задачи теории чувствительности / Материалы 4 Всесоюзного совещания по теории инвариантности. М.:АН СССР, 1971.
П.22. Юсупов Р.М., Городецкий В.И., Захарин Ф.М., Пономарев В.М. Прямые и обратные задачи теории чувствительности / Известия АН СССР. Техническая кибернетика, № 5. М.:АН СССР, 1971.
П.23. Юсупов Р.М., Захарин Ф.М. Методы теории чувствительности в задачах идентификации динамических систем / Теория и применение адаптивных систем: Сб.научных трудов. АН СССР, 1971.
П.24. Юсупов Р.М., Козеев В.А. Метод стохастических разностей для анализа точности нелинейных стохастических САУ / Известия ВУЗов. Приборостроение, №10. М., 1971.
П.25. Юсупов Р.М., Козеев В.А. Об одном алгоритме градиентного метода синтеза нелинейных систем управления / Известия ВУЗов. Приборостроение, №5. М., 1972.
П.26. Юсупов Р.М. Использование функций чувствительности в адаптивных системах управления / Теория и практика адаптивных АСУ: Материалы семинара. Ленинград, 1972.
П.27. Юсупов Р.М., Городецкий В.И. и др. Чувствительность, оптимальность и адаптация в системах автоматического управления: Монография. Л.:ЛВИКА, 1973, 278 с.
П.28. Юсупов Р.М. Первый Ленинградский симпозиум по теории чувствительности / Информационные материалы, Советское радио, №6. Л.,1974.
П.29. Бурэ Э.Г., Розенвассер Е.Н., Об исследовании чувствительности автоколебательных систем, Автоматика и Телемеханика, № 7, 1974
П.30. Юсупов Р.М., Ермаченко А.И. Применение функций чувствительности в задаче синтеза линейных многосвязных систем управления / Известия АН СССР, Техническая кибернетика, №2. М., 1976.
П.31. Юсупов Р.М. Функции чувствительности в задачах устойчивости и оптимального управления / Материалы II Четаевской конференции, Том 2. АН СССР, Казань, 1976.
П.32. Воронов А.А., Юсупов Р.М.и др. Чувствительность САУ. Состояние и перспективы развития / Труды Всесоюзной школы-семинара по теории чувствительности, Том 1. Владивосток, 1977.
П.33. Розенвассер Е.Н. Достаточные условия применимости первого приближения в задачах теории чувствительности. Автоматика и телемеханика, 1978, №11.
П.34. Юсупов Р.М. Развитие и состояние теории чувствительности в стране / Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение, Вып.23. М.: Связь, 1978.
П.35. Юсупов Р.М., Белошапкин В.К.. Чувствительность задачи Больца вариационного исчисления / Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение, Вып.23. М.: Связь, 1978.
П.36. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Модели чувствительности нелинейных разрывных систем автоматического управления / Труды 5 Всесоюзной конференции по теории и методам математического моделирования. М., 1979.
П.37. Воронов А.А., Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М., Сиразетдинов Т.К., Широков Л.Л. Состояние и перспективы развития теории чувствительности / Труды V Всесоюзного совещания «Теория инвариантности и ее применение, ч.1. Киев: Наукова думка, 1979.

П.38. Юсупов Р.М., Попов Ю.В. Обобщенные показатели чувствительности гироскопических систем / Труды V Всесоюзного совещания «Теория инвариантности и ее применение, ч.2. Киев: Наукова думка, 1979.
П.39. Юсупов Р.М. Инварианты чувствительности переходных процессов динамических систем управления. М., АНСССР, Научный совет по комплексной проблеме «Кибернетика», 1979.
П.40. Розенвассер Е.Н. Об исследовании чувствительности неавтономных колебательных систем по отношению к частоте возбуждения. - Автоматика и телемеханика, 1980, №00.
П.41. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981, 464 с.
П.42. Юсупов Р.М., Григорьев С.М., Пальчун Б.П. О применении теории чувствительности к оценке надежности специального математического обеспечения для решения вычислительных задач / Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение: Сб. научных трудов. М.:АН СССР, 1981.
П.43. Юсупов Р.М., Громыко П.С., Панченко А.Е. Исследование эффективности сложных систем методами теории чувствительности и корреляционного анализа / Вопросы кибернетики. Теория чувствительности и ее применение: Сб. научных трудов. М.:АН СССР, 1981.
П.44. Юсупов Р.М., Канарейкин Д.Б, Завируха В.К. Информационные характеристики целей в радиолокационной метеорологии и теория чувствительности / Методы обработки информации и принятие решений: Труды НТС, вып.607. МО СССР, 1984.
П.45. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Рецензия: IEEE Transaction on Automatic Control. V.44, N5/ Рец. на книгу: M.Eslami. Theory of Sesitivity in Dynamic Systems. Springer Verlag, 1994.
П.46. Юсупов Р.М., Костельцев В.И. Возмущения структуры и функции чувствительности математических моделей при их алгоритмизации / V СПб конференция «Региональная информатика-96»: Тезисы докладов, ч.1, 1996.
П.47. Юсупов Р.М., Костельцев А.В., Костельцев В.И.. Возмущения структуры и чувствительность математических моделей динамических объектов при их дискретизации / Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий: Сб. научных трудов. СПб.: СПИИРАН, 1998.
П.48. Розенвассер Е.Н. О построении матрицы Фишера для задачи оценивания параметров конечномерных систем, Автоматика и Телемеханика, № 2, 1988
П.49. Rozenwasser E., Yusupov R. Sensitivity of Automatic Control Systems. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington, D.C, 2000, 436 p.

Всесоюзная школа «Общие проблемы теории устойчивости, инвариантности и чувствительности систем управления». Баку, ноябрь 1979 г.

Всесоюзная школа «Общие проблемы теории устойчивости, инвариантности и чувствительности систем управления». Баку, ноябрь 1979 г.

Кунцевич В.М., Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М.

Всесоюзная школа «Общие проблемы теории устойчивости, инвариантности и чувствительности систем управления». Баку, ноябрь 1979 г.

На Бакинском заводе кондиционеров.

Юсупов Рафаэль Мидхатович — член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ; директор СПИИРАН. Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 390. E-mail: yusupov@iias.spb.su; www.spiiras.nw.ru. СПИИРАН, 14-я линия, д. 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; тел. +7(812) 328–3311, +7(812) 328–3411, факс +7(812) 328–4450.

Yusupov Rafael Midkhatovich — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Sciences (Tech), Professor, Director SPIIRAS, Honored scientist of Russian Federation. Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. Number of research publications: 390. E-mail: yusupov@iias.spb.su; www.spiiras.nw.ru. SPIIRAS, 14th Line, 39, St.Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328–3311, +7(812)328–3411, fax +7(812) 328–4450.

Розенвассер Ефим Натанович — д.т.н., профессор; заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов: теория автоматического управления – математические методы анализа и синтеза нелинейных, нестационарных и цифровых систем управления. Число научных публикаций — 200. E-mail: fishka33@mail.ru. СПбГМТУ, ул. Лоцманская, д.3, г. Санкт-Петербург, 190008, РФ; тел.(812)713-8410.

Rozenwasser Efim Natanovich — Doctor of Sciences (Tech.), Professor; Head of Department, St.Petersburg State Marine Technical University. Research interests: control theory – mathematical methods of analysis and synthesis of nonlinear, non-stationary and digital control systems. The number of publications — 200. E-mail: fishka33@mail.ru. SPbSMTU, 3, Lotsmanskaya Str., St.Petersburg, 190008, Russia; tel. +7(812) 713-8410.

Рекомендовано СПИИРАН, директор Юсупов Р.М., чл.-корр. РАН.
Статья поступила в редакцию 22.01.2013.

РЕФЕРАТ

Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. **Вклад ленинградских ученых в развитие теории чувствительности систем управления.**

В процессе эксплуатации значения параметров реальных систем отличаются от их расчетных значений. Свойство систем изменять свои характеристики при изменении параметров принято называть их чувствительность. Совокупность принципов и методов исследования чувствительности формирует теорию чувствительности.

Теория чувствительности как самостоятельное научное направление в кибернетике и теории управления начало формироваться в конце пятидесятых и начале шестидесятых годов прошлого столетия. На ее развитие определенное влияние оказали работы ленинградских ученых в области теории автоматического управления Розенвассера Е.Н. и Юсупов Р.М. Результаты их исследований опубликованы в четырех совместных монографиях и более пятидесяти статьях.

В представленной статье приводится краткая историческая справка о развитии теории чувствительности, дается сжатый анализ вклада авторов в становление этой теории, описывается научно-организационная деятельность Розенвассера Е.Н. и Юсупова Р.М. по продвижению теории чувствительности в научные исследования и учебный процесс в вузах.

В заключение статьи подчеркивается, что развитие теории чувствительности продолжается. Разрабатываются методы исследования чувствительности новых классов систем управления: интеллектуальных, сетевых, информационных и т.д. Методы теории чувствительности широко используются и в других предметных областях.

SUMMARY

Rozenwasser E.N., Yusupov R.M. **Contribution of Leningrad scientists to the development of control systems sensitivity theory.**

Real systems parameters values usually differ from their calculated values. Systems' property which enables to change the characteristics due to the change of the parameters is called sensitivity. The principles and methods of sensitivity research forms the sensitivity theory.

The sensitivity theory was formed in the late 1950s – the beginning of 1960s as the independent scientific field in cybernetics and the control theory. Leningrad scientists Rozenwasser E.N. and Yusupov R. M. made a significant contribution to its formation. Results of their researches are published in four joint monographs and more than fifty articles.

The paper describes general aspects of the historical development of sensitivity theory, contribution of Rozenvasser E.N. and Yusupov R.M. to its formation within the control theory and the general theory of dynamic systems., and their scientific and organizational activity on promotion of the sensitivity theory in scientific researches and educational process.

The conclusion of this paper emphasizes that the sensitivity theory is still being developed. Research methods for new classes of control systems such as intellectual, network, information, etc are elaborated. Methods of the sensitivity theory are widely used in other fields.