

УДК 621.317

*Б. А. Свистунов*

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

*B. L. Svistunov*

### MEASURING TRANSDUCERS FOR PARAMETRIC SENSORS USING ANALYTICAL REDUNDANCY

**А н н о т а ц и я.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются измерительные преобразователи выходных величин параметрических датчиков в унифицированных сигналах, которые широко используются в информационно-измерительных и управляющих системах, в частности, для измерения состава крови и биологических растворов, являясь важнейшим узлом этих систем с точки зрения обеспечения требуемых метрологических и эксплуатационных характеристик. Важным аспектом является необходимость обеспечения независимости результата преобразования от неинформативных в данном измерительном эксперименте параметров исследуемого объекта и собственно параметрического датчика (т.е. инвариантности результата преобразования к этим параметрам и их неконтролируемым изменениям). Предметом исследования является поиск способов построения измерительных преобразователей с использованием базовых положений технической кибернетики, в частности принципа инвариантности акад. Б. Н. Петрова. *Материалы и методы.* Предложено при разработке измерительных преобразователей реализовать указанный принцип инвариантности путем организации в структуре и/или алгоритме измерительного преобразования избыточности, конкретно – аналитической. *Результаты.* Предложена обобщенная структурная схема измерительных преобразователей с избыточностью и составлена соответствующая ей математическая модель. Рассмотрены варианты реализации предложенного подхода к синтезу измерительных преобразователей. *Выводы.* Полученные теоретические результаты и опыт практического применения разработанных измерительных преобразователей различного назначения позволяют сделать вывод о перспективности использования избыточности, в частности аналитической, при построении измерительных преобразователей для параметрических датчиков, прежде всего для снижения погрешностей от влияния неинформативных параметров исследуемого объекта и датчика.

**A b s t r a c t.** *Background.* The object of the study are measuring converters of the output values of parametric sensors into unified signals, which are widely used in information-measuring and control systems, in particular, for measuring the composition of blood and biological solutions, being the most important node of these systems in terms of providing the required metrological and operational characteristics. An important aspect is the need to ensure the independence of the result of the conversion from data in this measuring experiment, the parameters of the parametric object and the actual sensor (the invariance of the result of the

conversion to these options and their uncontrolled change) the subject of the research is to find methods to build transducers with the use of the basic provisions of technical cybernetics, in particular, of the Acad. Belberov invariance principle. **Materials and methods.** Proposed with the development of transducers to implement the invariance principle by the structure and / or algorithm of measuring conversion of redundancy, specifically analytical. **Results.** A general structure of measuring converter redundancy and the corresponding mathematical Model are worked out. The considered variants of implementation of the proposed approach to the synthesis of the measuring converters. **Conclusions.** The theoretical results and the experience of practical application of the developed transducers of different purposes allow to make a **Conclusion** About the prospects of the use of redundancy, in particular, the analytical, the construction of transducers for sensors parametric primarily to reduce bias from the influence of uninformative parameters of the studied object and sensor.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** параметрический датчик, измерительный преобразователь, аналитическая избыточность.

**К e y w o r d s:** parametric sensor, measuring transducers, analytical redundancy.

### *Введение*

Измерительные преобразователи выходных величин параметрических датчиков в унифицированные сигналы широко применяются в различных информационно-измерительных и управляющих системах и автономных устройствах. Одной из важнейших задач, стоящих перед разработчиками измерительных преобразователей данного назначения, является необходимость обеспечения независимости результата преобразования по главному, информативному выходному параметру датчика, связанному нормированной зависимостью с контролируемым параметром объекта исследования (изделия, среды и др.) от ряда второстепенных, неинформативных (мешающих, паразитных) параметров объекта, самого датчика и собственно измерительного преобразователя. В научно-производственной литературе указанная задача трактуется как задача раздельного независимого измерения, а также обеспечения взаимной инвариантности результатов преобразования [1]. Пути решения сформулированной задачи предлагались и предлагаются многими учеными и научно-техническими школами и описаны в обширной литературе по данной тематике.

Одна из попыток обобщения способов построения так называемых инвариантных измерительных преобразователей (преобразователей, обеспечивающих независимость результата преобразования к неинформативным в данном измерительном эксперименте параметрам различной локализации и природы, инвариантность результата преобразования к этим параметрам) связана с применением методологии и инструментария теории систем автоматического регулирования, более конкретно – адаптивных систем координатно-параметрического управления, одного из перспективных направлений развития систем управления, которое активно развивается в Институте проблем управления РАН. Теоретическим фундаментом упомянутого направления является теория инвариантности систем автоматического управления, создание которой связано с именами советских ученых А. Г. Ивахненко, В. С. Кулебакина, А. И. Кухтенко, Б. Н. Петрова, Г. В. Щипанова и др.

Определяющая идея координатно-параметрического управления (КПУ) применительно к ее использованию для совершенствования средств измерений, в том числе измерительных преобразователей (ИП) для параметрических датчиков (ПД), заключается в реализации согласованного управления как собственно комплексом «датчик – вторичный преобразователь», так и объектом исследования [2, 3].

Применение КПУ в ИП для ПД приводит к усложнению алгоритмов измерительного преобразования и структур ИП, введению дополнительных узлов и/или тактов преобразования, т.е. созданию избыточности. В литературе выделяют аппаратную и аналитическую избыточность. В работе [4] аналитическая избыточность понимается как «создание на основе априорной информации математической модели ИП и ее использование для корректировки реальной функции преобразования последнего». В работе [5] аналитическая избыточность

определяется как «учет известных соотношений между сигналами нескольких датчиков или их связь с параметрами модели контролируемого технологического процесса и анализ дополнительных сигналов или дополнительных величин, например параметров и режимов цепей».

Указанные виды избыточности имеют особенности при их использовании в ИП [6–8]. Избыточность в смысле, рассматриваемом в настоящей статье, реализуется увеличением количества каналов восприятия и обработки информации, усложнением их структуры и алгоритмов функционирования с целью адаптации ИП к изменению информативных и неинформативных (в данном измерительном эксперименте) параметров исследуемого объекта (ИО) и ПД, а также к изменяющимся параметрам среды, линии связи и, в широком смысле, к изменяющимся задачам измерительного эксперимента.

#### Реализация аналитической избыточности в ИП

Теоретическим основанием использования аналитической избыточности, в частности в ИП, является классический принцип многоканальности акад. Б. П. Петрова. Аналитическая избыточность предполагает наличие математической модели, связывающей системой уравнений результаты итогового и промежуточных преобразований информативного сигнала в ИП [9]. Аналитическая избыточность учитывает связь параметров информативного сигнала с параметрами модели ИО и, собственно, ПД, представляемого эквивалентной электрической схемой (ЭС). Наиболее часто используется ЭС ПД в виде двухэлементной пассивной электрической цепи, что объясняется оптимальным сочетанием адекватности такой модели ИО и простоты построения ИП. Обозначим параметры ЭС как  $x_1, x_2$ , тогда необходимо организовать в ИП не менее двух каналов распространения информативного сигнала.

На рис. 1 представлена обобщенная структурная схема ИП параметров двухэлементных ЭС ПД, построенного по принципу двухканальности [10] (рассмотрение наиболее простого случая не снижает общности выводов).

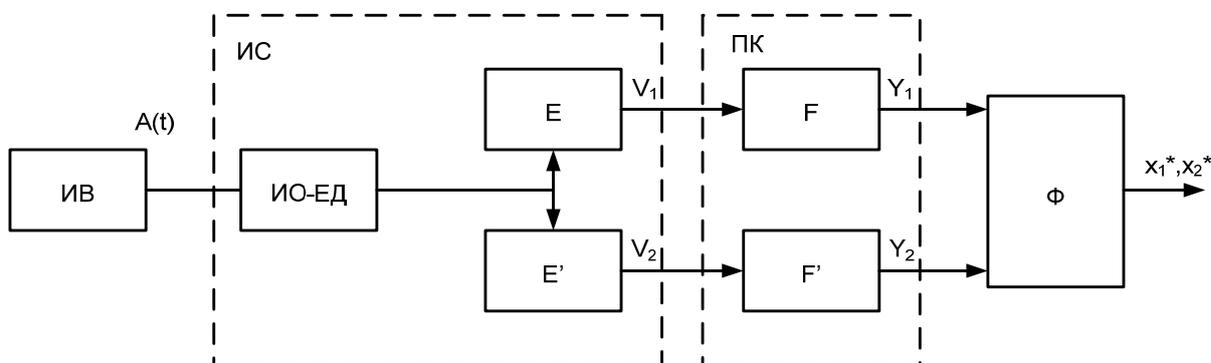


Рис. 1

На рис. 1 через  $E, E'$  обозначены операторы измерительной схемы (ИС);  $F, F'$  – операторы узлов, входящих в промежуточные каналы (ПК);  $A(t)$  – возбуждающее воздействие на комплекс ИО-ПД, включаемый в измерительную схему; электрическое воздействие формируется источником воздействия (ИВ);  $y_{1,2}(t)$  – выходные величины промежуточных каналов преобразования ПК, содержащие информацию об искомых параметрах  $x_{1,2}$ ;  $x_1^*, x_2^*$  – результаты преобразования, полученные обработкой значений  $y_1, y_2$  посредством узла с оператором  $\Phi$ .

Работа ИП описывается системой операторных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} V &= E(x, A, U_1, t), \\ Y &= F(x, U_2, t), \\ X^x &= \Phi(Y, U_3, t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $U_1, U_2, U_3$  – управления, определяющие алгоритмы функционирования узлов ИП.

ИП должен обеспечить взаимную инвариантность результатов преобразования.

Условием, при котором поставленная задача решается, является неидентичность «сквозных» операторов ИС-ПК по параметрам  $x$ . Это условие реализуется путем создания асимметрии ПК. Способы обеспечения асимметрии рассмотрены, например, в [11]. Структуры промежуточных каналов ПК могут быть стационарными или адаптивными, «приспосабливающимися» к обрабатываемому сигналу, а соответственно, алгоритмы функционирования каналов – жесткими, априори заданными или гибкими. В соответствии с этим определяющим признаком выделяются две обширных группы ИП параметров ПД; обе группы используют аналитическую избыточность.

### *Адаптивные ИП с моделью ЭС ПД*

Группа адаптивных ИП базируется на реализации в дополнительных ПК модели исследуемой ЭС (физической или математической) на основе априорной информации о ее топологии, номенклатуре и диапазонах изменения параметров из соответствующего тезауруса. С учетом оговоренной выше специфики измерения параметров пассивных ЭС практически моделируется электрический сигнал – реакция ЭС ПД на возбуждающее воздействие.

Промежуточные каналы служат для получения дополнительной информации об искомым параметрах ЭС. Формально алгоритмы этой групп также приводят к системе уравнений вида (1); результаты преобразования получают как решения этой системы путем проведения по заданной программе вычислительных операций со значениями промежуточных величин – выходных величин ПК. Возможность решения исходно неопределенной системы уравнений вида (1) предложено обеспечивать введением в один из параллельных каналов некоторой дополнительной калиброванной величины, являющейся моделью изменения (вариации) параметра ЭС [10]. Практически эта вариация может быть задана как энергетически – путем введения в один из ПК заданного изменения опорного сигнала, совпадающего с изменением одного из составляющих выходного сигнала измерительной схемы, так и параметрически – путем задания в ИС калиброванной вариации пассивного параметра. ПК могут быть разделены в пространстве или во времени. Очевидно, что использование временного разделения позволяет обеспечить практически полную идентичность ПК, однако обуславливает необходимость проведения по меньшей мере двух тактов преобразования (временная (алгоритмическая) избыточность). Обобщенная структурная схема ИП, реализующих данный подход (рис. 1), также предусматривает наличие в ИП по меньшей мере двух каналов, описываемых операторами  $F_1$  и  $F_2$ . С учетом этого базовая система уравнений (1) может быть представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} F_1 V(x_1, x_2, A, t) &= 0 \\ F_2 V(x_1, x_2, A, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $V(x_1, x_2, A, t)$  – уравнение преобразования параметров ЭС и ИО в ИС. Физически решения уравнений, входящих в систему (2), суть выходные величины ПК; по значениям этих величин, названных промежуточными, с помощью вычислений по заданной программе определяются значения искомым параметров  $x_1$  и  $x_2$ . Характер промежуточных величин определяется характером преобразования в каналах, т.е. видом операторов  $F_1$  и  $F_2$ . Условие инвариантности результатов измерения при использовании для синтеза ИП методов рассматриваемой группы формально совпадает с условием разрешимости системы (2) относительно искомым параметров  $x_1$  и  $x_2$ , формулируемым в виде неравенства тождественно нулю якобиана последней. Анализ показал, что имеются различные способы удовлетворения данному условию, обуславливающие разнообразие способов построения ИП в рамках рассматриваемого подхода. Первый способ, наиболее очевидный, состоит в задании различных по характеру операторов ПК  $F$ ; при этом вид преобразования информации в ПК различен, т.е. реализуются разнотипные уравнения промежуточного преобразования. Второй способ основан на использовании одина-

ковых по характеру операторов ПК (как правило, с временным разделением последних); при этом вид преобразования информации в ПК одинаков. Для выполнения условия инвариантности при этом необходимо, как следует из (2), реализовать различные уравнения преобразования в ИС (т.е. различные операторы  $E$ ).

Из принципа двухканальности непосредственно следует, что с целью улучшения характеристик ИП наиболее целесообразно осуществлять разделение каналов непосредственно от входа ИП. В этом случае реализация различных операторов ПК при пространственном разделении последних приводит к необходимости использования двух отдельных ИС, а при временном разделении – одной ИС с изменяемым характером оператора. Тот и другой путь с успехом применяются для решения, например, некоторых задач измерения состава и свойств веществ, однако использование их для синтеза ИП параметров ПД существенно ограничено. Это связано с неочевидностью в настоящее время возможности одновременного включения ПД в различные ИС. Реализация ИС с изменяемым характером оператора также представляется нецелесообразной, так как необходимость функционирования ИС в различных режимах неизбежно приводит к их существенному усложнению и снижению точности. Вследствие сказанного на практике приходится ограничиваться разделением ПК. Анализ известных решений, основанных на рассмотренном принципе, показал, что построение ИП с разнотипными операторами ПК оказалось целесообразным лишь для ряда специфических задач измерения неэлектрических величин.

#### *ИП с однотипными промежуточными каналами преобразования*

Более перспективным оказывается построение ИП с одинаковыми по характеру операторами ПК (т.е. с однотипными каналами). Такие ИП используют, как правило, одну ИС с неизменным характером оператора, что существенно упрощает практическую реализацию последней.

Условие взаимной инвариантности результатов преобразования при этом может быть удовлетворено двумя путями, формально связанными с заданием: первый – количественно различных коэффициентов уравнений преобразования в ПК, второй – калиброванных приращений преобразуемых параметров ЭС ПД [11]. Первый путь непосредственно вытекает из анализа условия разрешимости исходной системы уравнений. Записывая последнюю в канонической форме

$$\left. \begin{aligned} a_{11}(D)x_1 + a_{12}(D)x_2 &= 0 \\ a_{12}(D)x_1 + a_{22}(D)x_2 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

получим данное условие в виде неравенства нулю ее определителя:

$$a_{11}(D)a_{22}(D) - a_{21}(D)a_{12}(D) \neq 0, \quad (4)$$

где  $a_{ij}(D) = \sum_{k,v} m_k D^v$  – полиномы, описывающие процесс преобразования информации в ИС и

ПК. Синтез ИП, основанных на данном принципе, в качестве основного этапа включает качественно и/или количественно различное задание операторов ИС и КП.

Второй путь подразумевает задание однотипных операторов КП с одинаковыми параметрами, т.е.  $a_{11}(D) = a_{21}(D)$  и  $a_{12}(D) = a_{22}(D)$ . Как следует из (4), решение системы (3) при этом может быть получено с помощью ее доопределения. Последнее предложено реализовать введением в один из ПК некоторой калиброванной величины  $\Delta_0$ , являющейся моделью приращения некоторого параметра ЭС ( $x_1$  или  $x_2$  в системе уравнений (3)). Учитывая, что последняя при сформулированных выше условиях вырождается в уравнение с двумя неизвестными, а также предполагая, что вид уравнений преобразования ПК в диапазонах, включающих  $x_1$ ,  $x_2$  и  $\Delta_0$ , известен, алгоритм измерения для рассматриваемого случая может быть представлен в виде

$$\left. \begin{aligned} a_1(D)x_1 + a_2(D)x_2 &= 0 \\ a_1(D)\Delta_0^{x_1} &= 0 \\ \text{или} \\ a_2(D)\Delta_0^{x_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, исходно неразрешимое уравнение измерения аппаратурно доопределяется. Решения системы (5) (т.е. искомые результаты преобразования) могут быть получены через промежуточные величины  $\Theta$  – корни уравнений и величину  $\Delta_0$  как

$$x_1 = \Phi_1(\Delta_0, \theta_1, \theta_2); x_2 = \Phi_2(\Delta_0, \theta_1, \theta_2). \quad (6)$$

Практически калиброванное приращение  $\Delta_0$  может быть задано как энергетически – путем введения в один из каналов калиброванного сигнала  $A_0$  в частном случае, совпадающего по форме с одной из составляющих сигнала ИС, так и параметрически – путем создания на входе ИП калиброванного приращения пассивного параметра  $\Pi_0$  в частном случае, того же характера, что и один из параметров ЭС ПД  $\pi$ , значения которых  $x_1$  ( $x_2$ ) подлежат измерению (рис. 2).

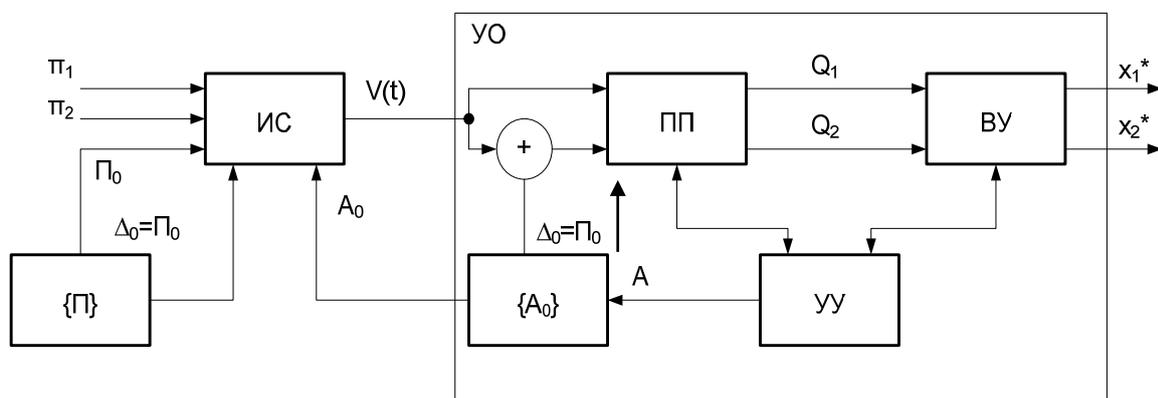


Рис. 2

Формально способ задания калиброванной величины  $\Delta_0$ , как следует из (5), безразличен, однако анализ показывает, что он во многом определяет точностные характеристики ИП. Действительно, при параметрическом задании  $\Delta_0$  («варьируемый объект») разделение каналов осуществляется непосредственно от входа ИП, что позволяет обеспечить их практически полную идентичность и тем самым существенно снизить погрешность, обусловленные различием характеристики каналов и отклонением их параметров от номинальных. При использовании энергетического доопределения сказанное справедливо лишь для узлов ИП, расположенных от выхода ИС до выхода ИП, т.е. требования к ИС более жесткие. С другой стороны, практическая реализация энергетического доопределения оказывается существенно более простой. Задание  $\Delta_0$  в виде электрического сигнала универсально, так как одно и то же возбуждающее воздействие может быть использовано при преобразовании различных параметров ЭС, включаемых в ИС одного класса; немаловажно то обстоятельство, что электрическая величина  $\Delta_0$  при этом может быть задана весьма точно.

### Заключение

Разработка ИП с организацией аналитической избыточности, вводимой посредством составления математической модели ЭС ПД путем аппаратурного составления и решения системы уравнений, связывающих искомые параметры ЭС ПД и опорные параметры ИП, представляется перспективной, так как данный подход позволяет свести к минимуму и предельно

упростить аналоговые преобразования в ИП и тем самым повысить точность измерительного преобразования при сохранении, а в ряде случаев и при снижении требований к узлам ИП. При этом относительно просто реализуется высокая степень инвариантности результатов измерения. Перспективность исследований в данном направлении обусловлена также расширяющимся применением микропроцессорных узлов информационно-измерительных и управляющих систем, развитием интеллектуальных ИП.

С использованием рассмотренных выше способов разработан ряд ИП для параметрических (в частности емкостных) датчиков, ориентированных на применение в информационно-измерительных управляющих системах различного назначения [12].

#### *Библиографический список*

1. Петров, Б. Н. Принцип инвариантности в измерительной технике. / Б. Н. Петров, В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М. : Наука, 1976. – 242 с.
2. Петров, Б. Н. Адаптивное координатно-параметрическое управление нестационарными объектами / Б. Н. Петров, В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков. – М. : Наука, 1980. – 218 с.
3. Рутковский, В. Ю. Некоторые новые направления развития теории и применения адаптивного координатно-параметрического управления / В. Ю. Рутковский, С. Д. Земляков, В. М. Суханов, В. М. Глузов // Проблемы управления. – 2003. – № 2. – С. 2–10.
4. Henry, M. P. Thesels – validating sensor: rationale, desinitions and examples / M. P. Henry, D. W. Clarke // Control Engineering Practice. – 1993. – Vol. 1, № 4. – P. 585–610.
5. Feng, Z. A review of self-validating sensor technology / Z. Feng // Sensor Review. – 2007. – Vol. 27, № 1. – P. 48–56.
6. Туз, Ю. М. Структурные методы повышения точности измерительных устройств / Ю. М. Туз. – Киев : Вища школа, 1976. – 285 с.
7. Батищев, В. И. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики / В. И. Батищев, В. С. Мелентьев. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 392 с.
8. Мартяшин, А. И. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / А. И. Мартяшин, К. Л. Куликовский, С. К. Куроедов, Л. В. Орлова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 216 с.
9. Taymanov, R. Metrological self-check and evolution of metrology / R. Taymanov, K. Sapozhnikova // Measurement. – 2010. – Vol. 43, № 7. – С. 869–877.
10. Свистунов, Б. Л. Пути реализации принципа двухканальной инвариантности в средствах измерений параметров электрических цепей / Б. Л. Свистунов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2003. – № 3. – С. 31–37.
11. Свистунов, Б. Л. Классификация способов построения инвариантных средств измерения параметров электрических цепей / Б. Л. Свистунов // Датчики и системы. – 2003. – № 2 (45). – С. 14–17.
12. Артамонов, П. И. Использование структурной и временной избыточности в преобразователях емкости датчиков / П. И. Артамонов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2016. – № 5 (34). – С. 82–89.

#### **Свистунов Борис Львович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра физики,  
Пензенский государственный  
технологический университет  
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /  
ул. Гагарина, 1а/11)  
E-mail: sbl@penzgtu.ru

#### **Svistunov Boris L'vovich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of physics,  
Penza State Technology University  
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street, Penza, Russia)

УДК 621.317

**Свистунов, Б. Л.**

**Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности** / Б. Л. Свистунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 94–100.