

# **Секция 1. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ТЭК И ЖКХ**

УДК 519.95

## **НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МОДУЛЕЙ В СИСТЕМЕ МЕХАНООБРАБОТКИ**

Гафар Нариман оглы Атаев<sup>1</sup>, Валех Азад оглы Мустафаев<sup>2</sup>,  
Ирада Самед кызы Зейналабдыева<sup>3</sup>

СГУ, г. Сумгаит, Республика Азербайджан

<sup>1</sup>gafar\_atayev@mail.ru, <sup>2</sup>valex-sdu@mail.ru, <sup>3</sup>irada0907@mail.ru

Рассматривается нечеткая модель управления параллельно функционирующих гибких производственных модулей (ГПМ) в системе механообработки. Модель управления параллельно функционирующих ГПМ в системе механообработки представляется в виде нечетких сетей Петри (СП). Выбрана оптимальная траектория, игнорирующая случайные задержки при симуляции модели. Показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью описывает процесс функционирования нечетких СП.

**Ключевые слова:** модель управления, нечеткие сети Петри, гибкие производственные модули (ГПМ).

## **FUZZY CONTROL MODEL OF CONCURRENTLY FUNCTIONING FLEXIBLE PRODUCTION MODULES IN MACHINE PROCESSING SYSTEM**

Gafar Nariman Atayev, Valeh Azad Mustafayev, Irada Samad Zeynalabdiyeva

The article examines a fuzzy control model of concurrently functioning flexible production modules (FPM) in the machine processing system. The control model of parallel-functioning FPMs in the machine processing system is represented in the form of fuzzy Petri nets (PN). An optimal path was chosen that ignored random delays when simulating a model. It is shown that the adopted rules for triggering transitions fully describe the process of the functioning of fuzzy PNs.

**Key words:** control model, fuzzy Petri nets, flexible production modules (FPM), parallel-functioning FPM.

Рассмотрим модель параллельно функционирующих гибких производственных модулей (ГПМ). В гибкой производственной системе механообработки каждый ГПМ состоит из одного промышленного робота (ПР), одного персонального входного накопителя, однотипного обрабатывающего

устройства для выполнения одинаковой операции над разными однотипными заготовками и из одного персонального выходного накопителя. На каждом модуле обрабатывается детали одного типа. Заготовки поступают на персональный входной накопитель и ожидают обработку. Свободное устройство захватывает заготовку из входного накопителя. После выполнения операции обработанная деталь поступает на выходной персональный накопитель.

Структура параллельно функционирующих обрабатывающих устройств показана на рис. 1.

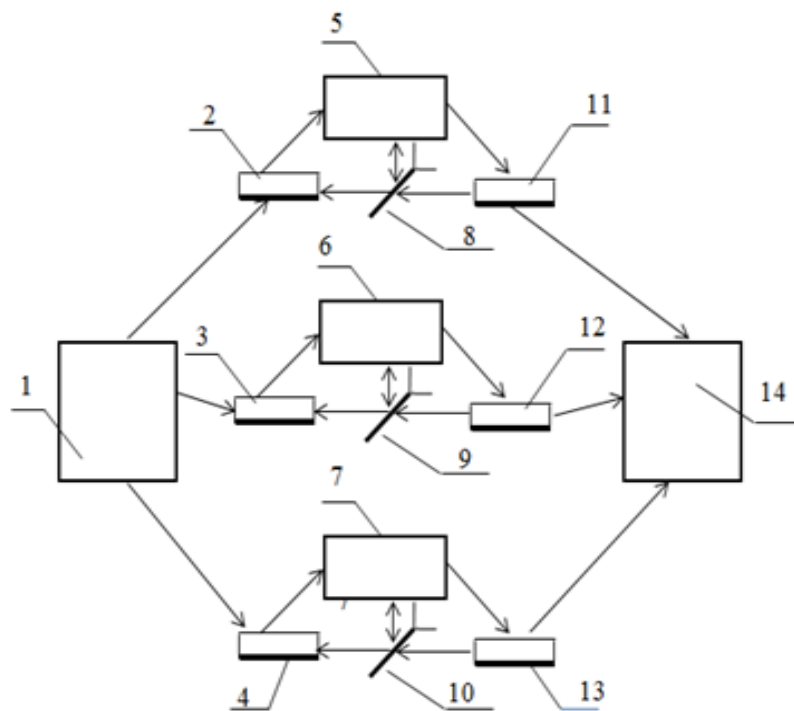


Рис. 1. Структура параллельно функционирующих обрабатывающих устройств: 1 – склад заготовки; 2–4 – соответственно входные накопители устройств 1, 2 и 3; 5–7 – устройства 1–3, соответственно; 8–10 – соответственно ПР1–ПР3; 11–13 – соответственно выходные накопители устройств 1–3; 14 – склад изделий

Модель управления параллельно функционирующих ГПМ в системе механообработки представляется в виде нечетких сетей Петри (СП).

Нечеткой СП называется пятерка [2, стр. 71]:

$$N = (P, T, I, O, \mu),$$

где  $P$  и  $T$  – нечеткие множества позиций и переходов;  $I: P \times T \rightarrow (0, 1, \dots)$  и  $O: T \times P \rightarrow (0, 1, \dots)$  – функции входных и выходных инцидентов, соответственно. Отображение  $\mu: P \rightarrow [0, 1]$  присваивает каждой позиции  $p_i$  вектор распределения степеней принадлежности фишек к позиции  $\mu(p_i)$ .

Если вектор распределения степеней принадлежности каждой входной позиции  $p_i \in P$  имеет компоненту, не равную нулю, с номером, равным или большим числа дуг, соединяющих данную позицию с переходом  $t_j \in T$ , то срабатывает переход  $t_j$ ; после срабатывания перехода происходит процесс перераспределения фишек в позициях. Число фишек в позициях определяет состояние сети.

Переход  $t_j$  при маркировке  $\mu$  разрешен, при условиях: выбираются все  $f_{ij} \neq 0$  при  $i = \overline{1, n}$ ; для каждого фиксированного  $i \exists \mu_{ik} \neq 0$  при  $k = \overline{f_{ij}, k_i}$ , где  $k_i$  – длина вектора распределения степеней принадлежности  $i$ -й позиции.

После срабатывания перехода  $t_j$  происходит перераспределение фишек по позициям и новую маркировку определяют по следующему алгоритму [1]:

1. Формируют вектор распределения степеней принадлежности каждой входной позиции после срабатывания перехода  $t_j$ .

1.1. Вычисляют нулевой компонент вектора распределения степеней принадлежности:

$$\mu'_{i0} = \bigvee_{\alpha=0}^{f_{ij}} \mu_{i\alpha},$$

где  $\vee$  – операция логического максимума.

1.2. Определяют остальные компоненты вектора распределения степеней принадлежности:

$$\mu_{i\beta} = \mu_{i\beta} + f_{ij}, \quad \beta = 1, 2, \dots, k_i - f_{ij}.$$

1.3. При запуске перехода  $t_j$  размерность вектора распределения степеней принадлежности каждой входной позиции уменьшается на число входных дуг:  $k_i = k_i - f_{ij}$ .

2. Формируют вектор распределения степеней принадлежности каждой выходной позиции после срабатывания перехода. Этот вектор равен вектору диагональной свертки матрицы Грама исходного выходного вектора и промежуточного вектора  $r = (r_0, r_1, \dots, r_{h_{jz}})$ .

2.1. Выбирают все  $h_{jz} \neq 0$  при  $z = 1, n$ .

2.2. Вычисляют последнюю компоненту вектора  $\mathbf{r}$  для всех фиксированных  $i$  при  $f_{ij} \neq 0$ :

$$r_{h_{jz}} = \bigwedge_i \bigvee_{\alpha=f_{ij}}^{\overline{k_i-1}} \mu_{i\alpha},$$

где  $\wedge$  – операция логического минимума.

2.3. Рассчитывают нулевой компонент  $r_0$ :  $r_0 = 1 - r_{h_{jz}}$ .

2.4. Определяют остальные компоненты:  $r_i = 0$ ,  $i = \overline{1, h_{jz} - 1}$ .

3. Формируют матрицу Грама векторов  $\mu_z$  и  $r^T$ :

$$\mathbf{G}(\mu_z, r^T) = (\mu_{z0} \mu_{z1} \dots \mu_{zk_z}) \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \dots \\ r_{h_{jz}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{z0} \wedge r_0 \mu_{z0} \wedge r_1 \dots \mu_{z0} \wedge r_{h_{jz}} \\ \mu_{z1} \wedge r_0 \mu_{z1} \wedge r_1 \dots \mu_{z1} \wedge r_{h_{jz}} \\ \dots \\ \mu_{zk_z} \wedge r_0 \mu_{zk_z} \wedge r_1 \dots \mu_{zk_z} \wedge r_{h_{jz}} \end{bmatrix},$$

где  $g_{lk} = \mu_{zl} \wedge r_k$ ;  $l = \overline{0, k_z}$ ;  $k = \overline{0, h_{jz}}$ .

4. Вычисляют вектор диагональной свертки Грама  $\mathbf{C}(G(\mu_z, r^T))$ :

$$\mathbf{C}(G(\mu_z, r^T)) = \begin{bmatrix} (\mu_{z0} \wedge r_0) \\ (\mu_{z1} \wedge r_0) \wedge (\mu_{z1} \wedge r_1) \\ \dots \\ (\mu_{zk_z} \wedge r_0) \vee (\mu_{zk_{z-1}} \wedge r_1) \vee \dots \vee (\mu_{z-h_{jz}} \wedge r_{h_{jz}}) \\ \dots \\ (\mu_{zk_z} \wedge r_{h_{jz}}) \end{bmatrix}.$$

Элементы этого вектора рассчитывают по формуле  $c_l = \bigvee_{k+i=l} (\mu_{zk_z} \wedge r_{h_{jz}})$  при  $k = \overline{0, k_z}$  и  $i = \overline{1, h_{jz}}$ . Размерность вектора распределения степеней принадлежности увеличивается на число  $h_{jz}$ :

$$h_{jz} : k_z = k_z + h_{jz}.$$

5. Формируют вектор  $\mu'_z = (\mu'_{z0} \mu'_{z1} \dots \mu'_{k_z})$  распределения степеней принадлежности выходной позиции  $p_z$ :  $\mu'_{zk} = c_k$ ,  $k = \overline{0, k_z}$ .

В граф-модели (рис. 2) параллельно функционирующих ГПМ в гибкой производственной системе механообработки их состояния описываются следующими позициями:  $P_1$  – склад заготовки;  $P_2 - P_4$  – соответственно входные накопители устройств 1–3;  $P_5 - P_7$  – метки исключающие загрузки неразгруженных устройств 1–3, соответственно;  $P_8 - P_{10}$  – ПР1–ПР3, выполняющие загрузки-разгрузки устройств 1–3;  $P_{11} - P_{13}$  – устройства 1–3, выполняющие операции над заготовками;  $P_{14} - P_{16}$  – выходные накопители устройств 1–3;  $P_{17}$  – склад изделий.

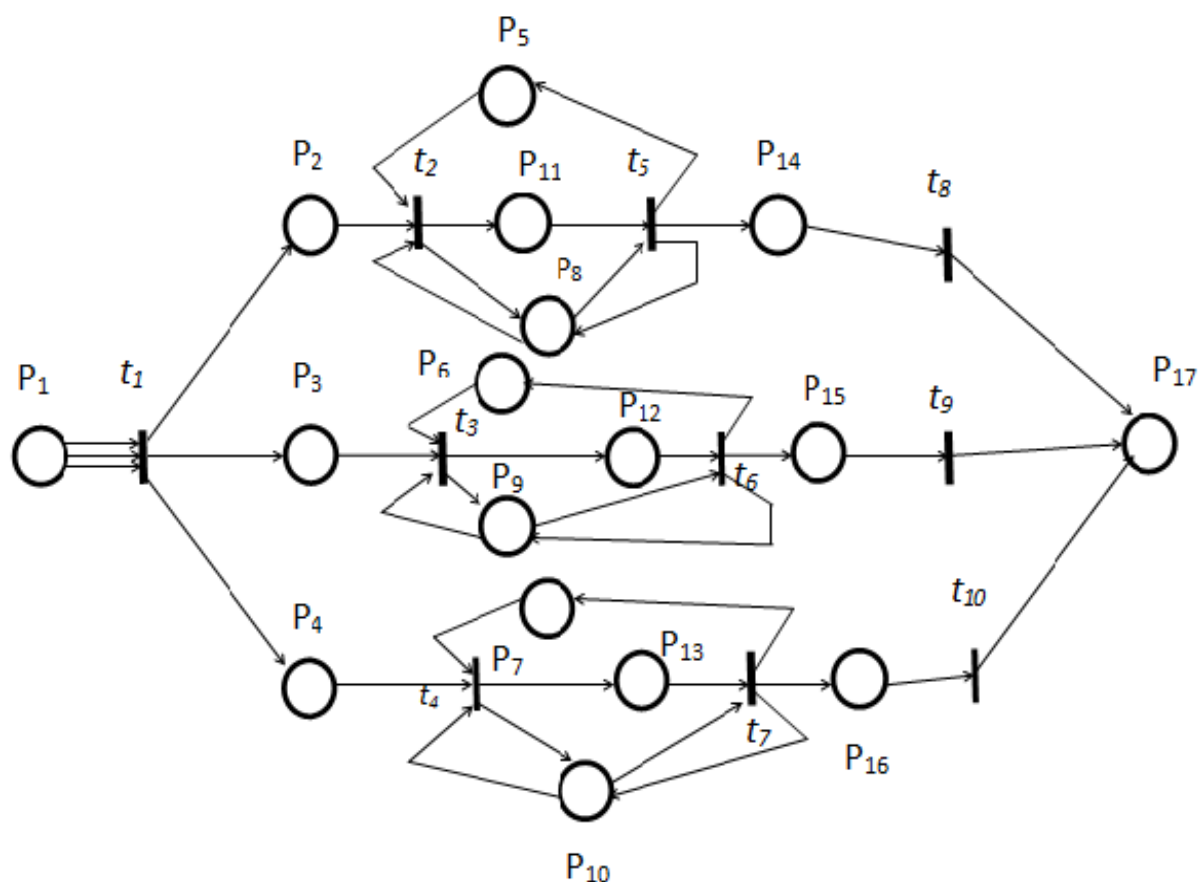


Рис. 2. Граф-модель параллельно функционирующих ГПМ

Возможные события в параллельно функционирующих ГПМ описываются следующими переходами:  $t_1$  – доставки заготовки из склада к позиции устройств 1–3;  $t_2 - t_4$  – выполнение загрузки устройств 1–3;  $t_5 - t_7$  – выполнение разгрузки устройств 1–3;  $t_8 - t_{10}$  – транспортировка обработанных деталей от выходов устройств 1–3 к складу изделий.

Функции инцидентности множеств позиции и переходов представлены матрицами [1, стр. 115]:

$$F(10,17) = \begin{array}{c|cccccccccccccccccc} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 & P_6 & P_7 & P_8 & P_9 & P_{10} & P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} \\ \hline t_1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_4 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ t_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ t_{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array}$$

$$H(17,10) = \begin{array}{c|cccccccccccc} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} \\ \hline P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_8 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_9 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{10} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_{11} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{12} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{13} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ P_{17} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Одним из преимуществ нечетких СП является их использование для наглядного представления правил нечетких продукций и выполнения на их основе вывода нечетких заключений [3, стр. 303]. В этом случае используется следующая интерпретация позиции и переходов нечетких СП. Правило нечеткой продукции вида «ЕСЛИ  $A$  ТО  $B$ » представляется как некоторый переход  $t_j \in T$  нечетких СП, при этом условию  $A$  этого правила соответствует входная позиция  $p_i \in P$  этого перехода, а заключению – выходная позиция  $p_i \in P$ .

Срабатывание переходов и изменение состояний нечетких СП определяется следующими правилами:

**Правило 1.** ЕСЛИ на складе есть заготовки, а во входных накопителях устройства 1, устройства 2 И устройства 3 заготовки отсутствуют, ТО следует выполнить транспортировки заготовки от склада к входным накопителям устройств 1–3;

**Правило 2.** ЕСЛИ во входном накопителе устройства 1 имеется заготовка И устройство, И ПР1 свободны, ТО следует выполнить загрузку устройства 1.

**Правило 3.** ЕСЛИ во входном накопителе устройства 2 имеется заготовка, устройство 2 И ПР2 свободны, ТО следует выполнить загрузку устройства 2.

**Правило 4.** ЕСЛИ во входном накопителе устройства 3 имеется заготовка, устройство 3 И ПР3 свободны, ТО следует выполнить загрузку устройства 3.

**Правило 5.** ЕСЛИ устройство 1 закончило выполнение операции над заготовкой, И ПР1 свободен, ТО следует выполнить разгрузку устройства 1.

**Правило 6.** ЕСЛИ устройство 2 закончило выполнение операции над заготовкой, И ПР2 свободен, ТО следует выполнить разгрузку устройства 2.

**Правило 7.** ЕСЛИ устройство 3 закончило выполнение операции над заготовкой, И ПР3 свободен, ТО следует выполнить разгрузку устройства 3.

**Правило 8.** ЕСЛИ в выходном накопителе устройства 1 имеется обработанная деталь, ТО следует выполнить транспортировку обработанной детали от выхода устройства 1 на склад изделий.

**Правило 9.** ЕСЛИ в выходном накопителе устройства 2 имеется обработанная деталь, ТО следует выполнить транспортировку обработанной детали от выхода устройства 2 на склад изделий.

**Правило 10.** ЕСЛИ в выходном накопителе устройства 3 имеется обработанная деталь, ТО следует выполнить транспортировку обработанной детали от выхода устройства 3 на склад изделий.

С использованием вышеуказанных исходных данных проведены эксперименты симуляции сети и получены результаты в виде пространства состояний. Определены возможные траектории обслуживания параллельно функционирующих ГПМ в гибкой производственной системе механообработки. Выбрана оптимальная траектория, игнорирующая случайные задержки при симуляции модели. Показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью оценивают процесс функционирования нечетких СП.

## Источники

1. Ахмедов М.А., Мустафаев В.А. Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением стохастических и нечетких сетей Петри // Электронное моделирование. 2013. Т. 35, № 4. С. 109–121.
2. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. Л.: Наука, 1989. 133 с.
3. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 717 с.

УДК 620.179.14

## К РАСЧЕТУ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ ФЕРРОМОДУЛЯЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Владимир Сергеевич Безкорвайный<sup>1</sup>, Олег Владимирович Тарасенко<sup>2</sup>,  
Валерий Владимирович Яковенко<sup>3</sup>, Светлана Николаевна Швеца<sup>4</sup>

ЛНУ им. В.Даля, г. Луганск

<sup>1,2,3</sup>volk7@ukr.net, <sup>4</sup>myblok@yandex.ru

Приведены элементы теории измерения существенно неоднородных магнитных полей магнитомодуляционными датчиками. Магнитомодуляционные датчики состоят из двух частей: источника постоянного магнитного поля и измерительного преобразователя. Расчет магнитных систем датчиков основывается на теореме К.М. Поливанова о взаимности.

**Ключевые слова:** намагниченность, датчик, функция потенциала, теорема о взаимности.

## TO CALCULATION OF MAGNETIC SYSTEMS FERROMODULATION MEASURING CONVERTERS

Vladimir Sergeevich Bezkorovainy, Oleg Vladimirovich Tarasenko,  
Valery Vladimirovich Yakovenko, Svetlana Nikolaevna Shvets

Elements of the theory measurement significantly of non-uniform magnetic fields by magnetomodulation sensors are given. Magnetomodulation sensors consist of two parts: source of constant magnetic field and measuring converter. Calculation of sensors magnetic systems is based on K.M. Polivanov's theorem of reciprocity.

**Key words:** magnetization, sensor, function of potential, theorem of reciprocity.

Неоднородные магнитные поля очень часто и многообразно используются в дефектоскопии, автоматике, диагностике, системах управления, информационных системах. Разные области применения магнитных датчиков создают различные конструкции их магнитных систем. Общим для датчиков является то, что магнитные системы датчиков состоят из двух частей: источник магнитного поля, измеритель магнитного поля.