

**ПРИБОРЫ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ
ЛИСТОВОГО ПРОКАТА СТАЛЕЙ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПОТОКЕ ПРОИЗВОДСТВА**
*Instruments of magnetic structurescopy for rolled steel
in the technological line*

Матюк В.Ф.
Matyuk V.F.

Описан принцип работы, устройство, назначение и технические характеристики приборов, реализующих импульсный метод магнитной структуроскопии с использованием локального двухстороннего намагничивания. Рассмотрены особенности построения и работы установок типа ИМПОК разных модификаций для контроля механических свойств листового проката сталей в технологическом потоке производства.

The principle of operation, the structure, the purpose and technical characteristics of instruments implementing the pulsed method of magnetic structurescopy using local double-sided magnetization are given. The design and operation features of various modifications of IMPOK systems for testing rolled steel mechanical properties in technological line are discussed.

Введение

В силу особенностей технологии производства механические свойства листового проката сталей изменяются неравномерно вдоль рулона. Поэтому проблема контроля качества металла в потоке производства является постоянной задачей его производителей. Для ее решения на многих металлургических предприятиях в технологическую линию листопрокатного производства внедряются приборы неразрушающего контроля [1–3]. Некоторые крупные потребители листового проката сталей применяют входной неразрушающий контроль для определения его пригодности к той или иной технологической операции.

Информативными параметрами для неразрушающего контроля данного вида продукции может служить электропроводность, начальная и максимальная магнитные проницаемости, коэрцитивная

сила, остаточная магнитная индукция, магнитная индукция насыщения, магнитная индукция после частично размагничивания, амплитуда и фаза одной или нескольких гармонических составляющих гистерезисного цикла, число скачков Баркгаузена и другие физические характеристики листового проката. В зависимости от используемого информативного параметра и способов отстройки от влияния мешающих факторов, неизбежных при контроле движущегося листа (скорость перемещения, отклонение от плоскости движения, изменение натяжения и др.), разработаны разные методы и приборы контроля механических свойств листового проката в технологическом потоке производства [1–2].

Среди средств неразрушающего контроля листового проката сталей в технологическом потоке особо можно выделить приборы, реализующие метод высших гармоник, метод двухчастотного перемагничивания и импульсный магнитный метод. Анализ этих средств контроля показал, что наиболее перспективным для практического применения является импульсный магнитный метод, который нашел широкое применение на многих металлургических предприятиях на агрегатах резки, а также в линиях гальванизации и травления [2–3].

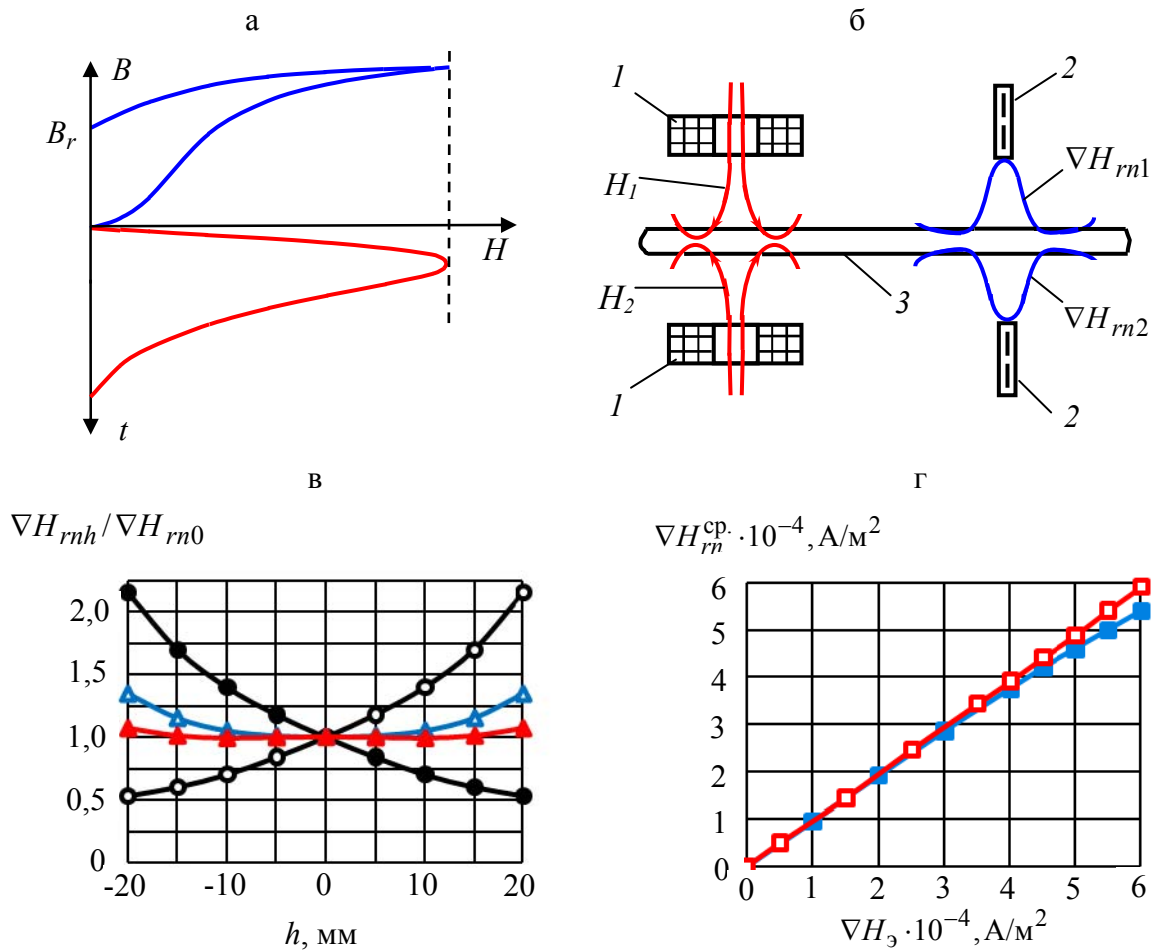
В данной работе рассмотрены особенности построения, возможности применения и перспективы дальнейшего совершенствования приборов импульсного магнитного контроля листового проката сталей в технологическом потоке производства установок типа ИМПОК (импульсный магнитный поточный контролер) разных модификаций, созданных на протяжении ряда лет в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси. Они позволили решить задачу контроля механических свойств и структуры листового проката низкоуглеродистых сталей толщиной 0,15–15 мм, движущегося в процессе производства со скоростью от 0,5 до 25 м/с.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УСТАНОВОК ИМПОК

Установки типа ИМПОК основаны на наличии значимых корреляционных связей между остаточной намагниченностью локально намагниченного участка и основными механическими свойствами листового проката из низкоуглеродистых, некоторых среднеуглеродистых и низколегированных сталей, подвергнутого различным режимам технологического отжига. В них реализованы новые принципы построения преобразователей для импульсного магнитного контроля, новые режимы намагничивания, измерения и обработки сигналов,

пропорциональных величине градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности [4–12].

Особенностями неразрушающего контроля механических свойств листовых материалов в процессе движения в технологическом потоке производства являются непостоянство зазора между поверхностью контролируемого материала и преобразователем, перемещение листа вдоль направления движения и непостоянство скорости его движения.



H – напряженность намагничивающего импульса (—), B и B_r – магнитная индукция и остаточная магнитная индукция локально намагничиваемого участка (—); 1 – намагничивающие соленоиды, 2 – феррозонды-градиентометры, 3 – движущийся лист, H_1 и H_1 – силовые линии магнитного поля встречно включенных соленоидов, ∇H_{rn1} и ∇H_{rn2} – градиенты нормальных составляющих напряженности поля остаточной намагниченности; h – смещение листа, $\nabla H_{rn}h$ – градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности на расстоянии h от поверхности листа, $\nabla H_{rn0} = \nabla H_{rn}h$ при $h = 0$, \circ и \bullet – результаты измерения соответственно 1-м и 2-ым феррозондами, \blacktriangle – среднее арифметическое; \blacktriangle – среднее геометрическое; ∇H_3 – градиент напряженности поля меры, ∇H_{rn}^{cp} : \blacksquare – без компенсации, \square – с компенсацией

Рис. 1. Принцип работы установок типа ИМПОК

Для устранения их влияния при импульсном магнитном методе применяются: разнесение в пространстве и во времени процессов намагничивания и измерения градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности; проведение намагничивания и измерения максимальных значений градиентов с двух сторон движущегося листового проката; осуществление контроля по усредненному значению (среднему арифметическому или среднему геометрическому) величин градиентов, измеренных с двух сторон листа [5, 6, 10] (рис. 1).

При встречном включении соленоидов нормальные составляющие их полей компенсируются, а тангенциальные составляющие – суммируются. Этим достигается максимальная намагниченность локального участка листа. При смещении листа от средней плоскости движения суммарное намагничивающее поле (сумма тангенциальных составляющих) меняется незначительно. Величина намагничивающего поля выбирается такой, чтобы довести контролируемый материал до магнитного насыщения в локальной зоне. Таким образом, смещение листа (в допустимых пределах) практически не сказывается на намагниченности локального участка.

В процессе движения листа локально намагниченный участок проходит между феррозондами и индуцирует в каждом из них сигналы, пропорциональные величине градиента напряженности поля остаточной намагниченности с соответствующей стороны листа. Если намагниченный участок (вместе с листом) при своем движении смещается в сторону одного из феррозондов, то сигнал, наводимый в последнем, увеличится, а сигнал, наводимый во втором феррозонде – уменьшится (рис. 1, в).

При смещении листа до ± 10 мм от плоскости прокатки величина ∇H_{rn} изменяется примерно по линейному закону (∇H_{rn1} увеличивается, а ∇H_{rn2} уменьшается при смещении листа в сторону первого феррозонда, а при смещении в сторону второго феррозонда – наоборот). Среднее арифметическое измеренных величин в данном диапазоне смещений листа практически не зависит от их величины [7].

При смещениях листа более ± 10 мм изменение ∇H_{rn} можно считать экспоненциальным и представить в виде [8]

$$\nabla H_{rn} = \nabla H_{rn0} e^{-kh}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, имеющий размерность, обратную размерности длины, и зависящий от протяженности намагниченного участка и расстояния между феррозондами.

Тогда градиенты, измеренные феррозондами с двух сторон листа, будут равны соответственно

$$\nabla H_{rn1} = \nabla H_{rn0} e^{kh} \text{ и } \nabla H_{rn2} = \nabla H_{rn0} e^{-kh}, \quad (2)$$

а их среднее геометрическое равно

$$\nabla H_{rnг} = \sqrt{\nabla H_{rn1} \cdot \nabla H_{rn2}} = \nabla H_{rn0}. \quad (3)$$

Оно не зависит от величины смещения и определяется лишь свойствами контролируемого изделия.

Важными метрологическими характеристиками средств контроля являются временная и температурная стабильность, а также линейность зависимости выходного сигнала от величины информативного параметра. При непосредственном измерении второй гармоники феррозонда получить высокие метрологические характеристики невозможно из-за его низкой температурной и временной стабильности и нелинейности характеристики преобразования. Мультипликативная погрешность при этом достигает несколько процентов [13]. Кроме того, при таком способе измерения предъявляются повышенные требования к стабильности тока возбуждения феррозонда и стабильности измерительного тракта. Применять известные компенсационные методы измерений для улучшения метрологических характеристик средств контроля в потоке производства затруднительно из-за локальности намагниченного участка и большой скорости перемещения объекта контроля.

Нами разработан способ [9–11], позволяющий использовать преимущества компенсационных методов измерения применительно к импульсному магнитному методу контроля движущегося стального проката. Сущность его заключается в следующем. Движущийся лист намагничивают импульсным магнитным полем двух встречно включенных и расположенных с двух сторон листа соленоидов. При прохождении локально намагниченного участка вместе с листом мимо феррозондов, расположенных с двух сторон от плоскости прокатки на некотором расстоянии от намагничивающих соленоидов в направлении движения листа, в феррозондах возникают сигналы U_1 и U_2 , пропорциональные градиентам ∇H_{rn1} и ∇H_{rn2} с каждой из сторон листа соответственно. Максимальные значения этих сигналов (U_{1m} и U_{2m})

запоминают до прихода следующего намагниченного участка. При этом

$$U_1 = k_1 \nabla H_{rn1}, \quad U_2 = k_2 \nabla H_{rn2}, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты преобразования соответствующих феррозондов в момент измерения.

По окончании прохождения намагниченного участка мимо феррозондов с некоторой задержкой, необходимой для того, чтобы эти участки переместились за область чувствительности феррозондов, в зонах расположения последних создают эталонные магнитные поля, градиенты нормальных составляющих которых $\nabla H_{\varepsilon 1}$ и $\nabla H_{\varepsilon 2}$ имеют то же направление, что и градиенты ∇H_{rn1} и ∇H_{rn2} . Величину эталонных магнитных полей изменяют до тех пор, пока сигналы с феррозондов U_1 и U_2 не сравняются с соответствующими значениями сигналов U_{1m} и U_{2m} , хранящимися в памяти. В этом случае

$$U_1 = (k_1 + \Delta k_1) \nabla H_{\varepsilon 1}; \quad U_2 = (k_2 + \Delta k_2) \nabla H_{\varepsilon 2}, \quad (5)$$

где Δk_1 и Δk_2 – изменение коэффициентов преобразования соответствующих феррозондов за время между измерением градиентов поля от намагниченного участка и измерением градиентов эталонных магнитных полей.

Из (4) и (5) с учетом ошибок Δ_1 и Δ_2 сравнения сигналов U_{1m} и U_1 , U_{2m} и U_2 соответственно, получим

$$\nabla H_{rn1} = \nabla H_{\varepsilon 1} + \frac{\Delta k_1}{k_1} \nabla H_{\varepsilon 1} + \frac{\Delta_1}{k_1}, \quad \nabla H_{rn2} = \nabla H_{\varepsilon 2} + \frac{\Delta k_2}{k_2} \nabla H_{\varepsilon 2} + \frac{\Delta_2}{k_2}. \quad (6)$$

Время между измерениями градиентов нормальных составляющих напряженности поля остаточной намагниченности с обеих сторон листа и измерением градиентов напряженности соответствующих эталонных полей достаточно мало (для установок типа ИМПОК оно не превышает 5 с), поэтому Δk_1 и Δk_2 практически равны нулю, и их влиянием можно пренебречь. Сравнение сигналов с погрешностью не хуже 0,1% реализуется сравнительно просто [14].

Следовательно, точность и стабильность измерения величин ∇H_{rn1} и ∇H_{rn2} определяется стабильностью и точностью измерения

эталонных полей с градиентами $\nabla H_{\varepsilon 1}$ и $\nabla H_{\varepsilon 2}$ соответственно. Эти поля создаются эталонными катушками и при постоянстве их размеров зависят только от величины тока через них (I_1 и I_2 соответственно).

$$\nabla H_{rn1} = k_3 I_1; \quad \nabla H_{rn2} = k_4 I_2; \quad (7)$$

где k_3 и k_4 – коэффициенты пропорциональности.

Для компенсации влияния смещений листа при движении контроль ведется по усредненному значению (среднему арифметическому или среднему геометрическому) градиентов ∇H_{rn1} и ∇H_{rn2} . При этом выходной сигнал равен $0,5(k_3 I_1 + k_4 I_2)$ или $\sqrt{k_3 I_1 \cdot k_4 I_2}$ в зависимости от допустимых смещений листа при движении. Деформация эталонных катушек не превышает сотой доли процента на градус, измерение тока в них может быть проведено с высокой точностью, несмотря на изменение параметров катушек при нагреве или со временем.

На рис. 1, г представлены зависимости усредненной величины сигналов, измеряемых двумя феррозондами, от величины градиента напряженности магнитного поля ∇H_{ε} , создаваемого мерой градиента магнитного поля [15]. При измерениях использовали феррозонды-градиентометры наружным диаметром 4,5 мм, длиной 28 мм и размерами пластин сердечника $12 \times 2 \times 0,1$ мм³ каждый. Частота тока возбуждения феррозонда составляла 10 кГц, а амплитуда – около 50 мА. Эталонные катушки состояли из двух встречно включенных секций, центры которых совпадали с центром элементов феррозонда. Мету градиента магнитного поля подключали к импульсному источнику тока. Импульсы тока имели колоколообразный вид, близкий по форме и длительности к сигналам, наводимым в феррозонде намагниченным участком движущегося листа. Из представленных зависимостей видно, что при измерении тока через эталонную катушку область линейности преобразования примерно в полтора раза шире, чем при измерении амплитуды второй гармоники феррозонда.

В [9] показано, что при непосредственном измерении амплитуды второй гармоники изменение температуры от комнатной до +60 °С увеличивает погрешность измерения от нуля до 4,7% , в то время как при измерении тока через эталонную катушку в этом же интервале температур погрешность близка к нулю.

Еще одним достоинством данного способа измерения является нечувствительность его результатов к влиянию внешних постоянных

и медленно изменяющихся во времени магнитных полей вследствие того, что эти поля одинаково воздействуют на феррозонд как в момент измерения градиента напряженности поля намагниченного участка, так и в момент измерения градиента эталонного поля. Пусть ∇H_{Π} – градиент внешнего постоянного магнитного поля. Тогда вместо выражений (7) получим

$$\begin{aligned}\nabla H_{rn1} &= \nabla H_{\varepsilon 1} + \frac{\Delta k_1}{k_1} (\nabla H_{\varepsilon 1} + \nabla H_{\Pi}) + \frac{\Delta_1}{k_1}, \\ \nabla H_{rn2} &= \nabla H_{\varepsilon 2} + \frac{\Delta k_2}{k_2} (\nabla H_{\varepsilon 1} + \nabla H_{\Pi}) + \frac{\Delta_2}{k_2}.\end{aligned}\quad (8)$$

Вследствие малости величин Δk_1 и Δk_2 за время одного цикла измерения ∇H_{Π} можно пренебречь. То же самое верно и в случае, если ∇H_{Π} мало изменяется за время от начала до окончания одного цикла измерения.

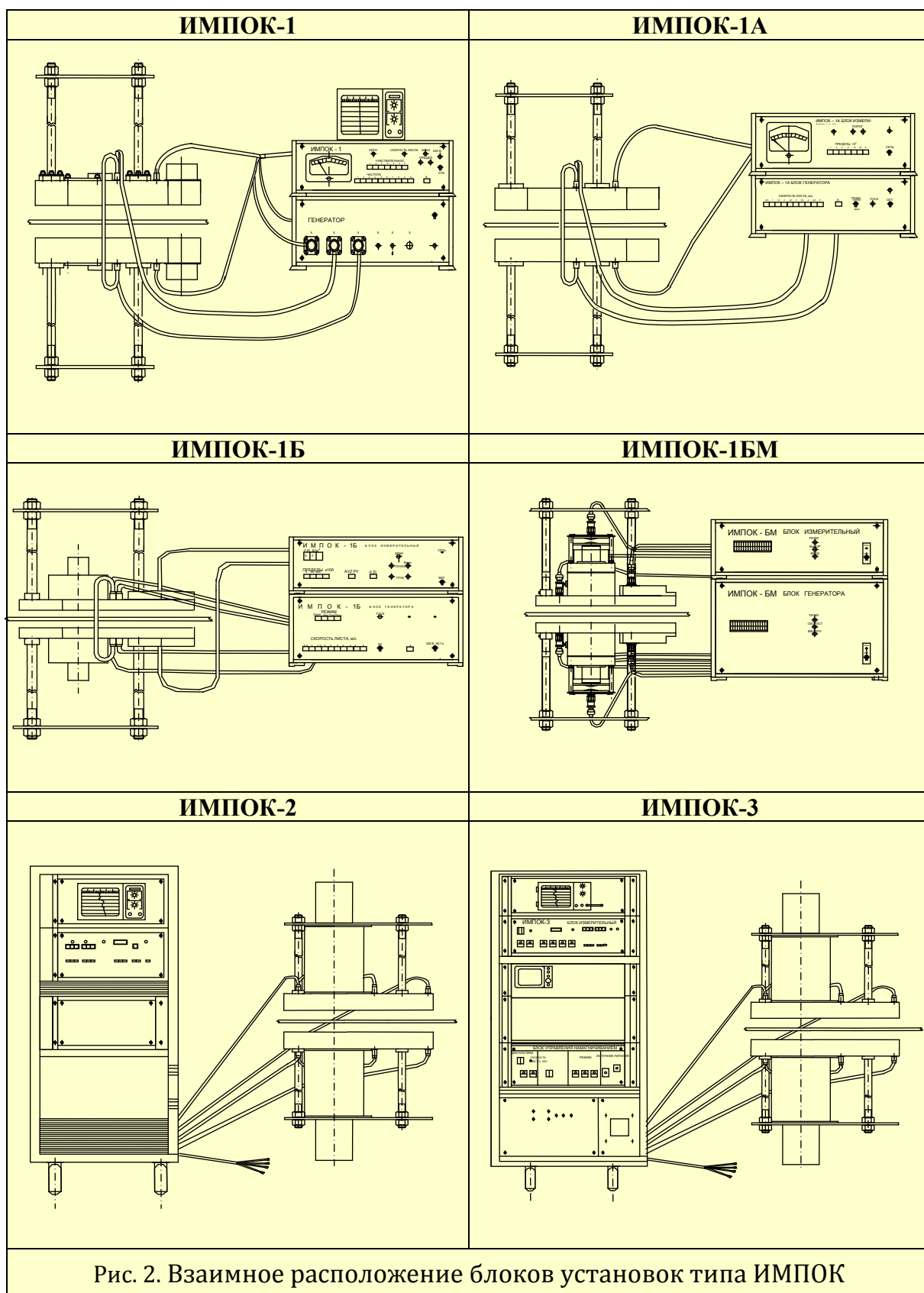
Таким образом, данный способ измерения позволяет исключить влияние температурного и временного дрейфа феррозондов на результаты контроля листового проката сталей в движении. Кроме того, улучшается и линейность зависимости выходного сигнала от измеренной величины, так как при этом она определяется не линейностью феррозонда, а линейностью источников эталонных магнитных полей.

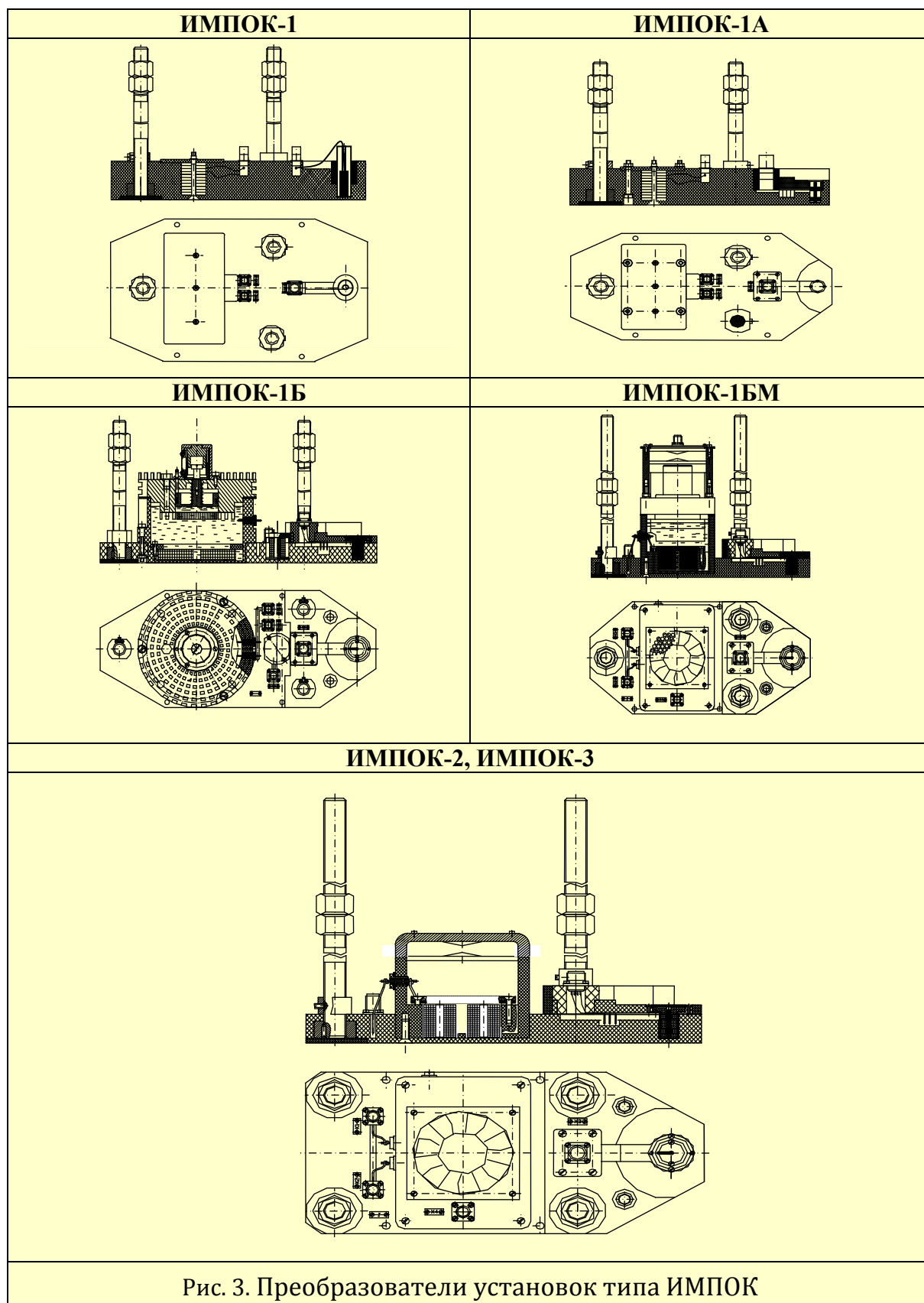
ПРИБОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

На основе рассматриваемого метода разработаны установки “Импульсный Магнитный Поточный Контролер” типа ИМПОК-1 [16], ИМПОК-1А [17], ИМПОК-1Б [18], ИМПОК-1БМ [19], ИМПОК-2 [20] и ИМПОК-3 [21], отличающиеся функциональными возможностями, схемными и конструктивными решениями.

Установка ИМПОК-1

Установка ИМПОК-1 предназначена для автоматического неразрушающего контроля качества термообработки, механических свойств и структуры листового проката из низкоуглеродистых сталей толщиной 0,15–10 мм, движущегося в потоке производства со скоростью 0,5–5 м/с.





Конструктивно установка ИМПОК-1 состоит из двух преобразователей, генератора и измерительного блока (рис. 2). Каждый из преобразователей (рис. 3) включает в себя намагничивающий соленоид и феррозонд-градиентометр, которые располагаются в текстолитовом основании на расстоянии 300 мм друг от друга. Это расстояние выбрано из расчета, чтобы центр намагниченного участка при всем диапазоне допустимых скоростей движения листа подошел к феррозондам после окончания намагничивающего импульса. Преобразователи устанавливаются с двух сторон контролируемой полосы симметрично относительно средней плоскости ее движения (плоскости прокатки). Зазор между преобразователями составляет 50 ± 1 мм, а их несоосность не должна превышать ± 2 мм.

Намагничивающие соленоиды выполнены в виде прямоугольных катушек с внутренними размерами 160×10 мм², внешними размерами 196×56 мм² и высотой 50 мм и содержат 437 витков провода ПЭТВ диаметром 1,4 мм. Индуктивность каждого из соленоидов равна 7,6 мГн, а активное сопротивление – 2,08 Ом. Они соединены между собой последовательно-встречно и подсоединены к генератору. Амплитуда импульсов магнитного поля на торце каждого из преобразователей составляет $1,3 \cdot 10^5$ А/м.

Электрическая структурная схема установки ИМПОК-1 приведена на рис. 4, а ее общий вид – на рис. 5.

Генератор формирует импульсы тока в форме аperiodического разряда конденсатора, их длительность по уровню 0,1 равна 12 мс, а амплитуда – 50 А (емкость накопительных конденсаторов составляет 200 мкФ, а напряжение заряда – примерно 600 В). При этом расстояние между намагниченными участками листа составляет 5 м. Установка частоты импульсов осуществляется как в ручном, так и в автоматическом (при наличии датчика скорости) режимах. Возможен также и режим одиночных импульсов для проверки установки на контрольном образце.

Результаты измерений записываются ампервольтметром самопишущим и на ленте перфоратора. Предусмотрены световая и звуковая индикация о браке.

Чтобы избежать влияния помех от намагничивающего импульса на измерительный тракт, последний блокируется на время действия этого импульса. Контроль ведется по среднему арифметическому максимальных значений измеренных с двух сторон листа градиентов.

Технические характеристики установки ИМПОК-1 приведены в табл.1.

Установка ИМПОК-1А

Установка ИМПОК-1А отличается тем, что измерение информативного сигнала осуществляется компенсационным методом. Это позволило повысить временную и температурную стабильность измерений и улучшить линейность. Кроме определения среднего арифметического, в установке ИМПОК-1А возможен контроль по среднему геометрическому измеренных градиентов. Это позволило в два раза (до ± 20 мм) расширить величину допустимых смещений листа при движении.

Принцип работы установки ИМПОК-1А поясняется ее электрической структурной схемой (рис. 4).

В связи с компенсационным методом измерений каждый из преобразователей установки ИМПОК-1А, помимо намагничивающего соленоида и феррозонда-градиентометра, содержит компенсирующую катушку.

Намагничивающие соленоиды выполнены в виде прямоугольных катушек с внутренними размерами 120×10 мм², внешними размерами 155×54 мм² и высотой 50 мм. Число витков 336. Индуктивность каждого из соленоидов равна 6,2 мГн, а активное сопротивление – 1 Ом. Они соединены между собой последовательно-встречно. Дополнительным достоинством установки ИМПОК-1А (по сравнению с ИМПОК-1) является возможность проверки ее работоспособности по контрольному образцу.

Установка ИМПОК-1Б

При контроле отдельно движущихся листов возникают трудности из-за влияния края листа (так называемый краевой эффект) и промежутков между листами на достоверность контроля. Величина краевого эффекта зависит в основном от конструкции конкретного средства контроля и (в небольшой степени) от сортамента контролируемого материала [22] и для установок типа ИМПОК не превышает 0,5 м. Поэтому для обеспечения контроля отдельно движущихся листов установками типа ИМПОК намагничивание листа необходимо осуществлять на расстоянии не менее 0,5 м от его края. При этом длина листа должна быть не менее 1 м. Кроме того, необходимо исключить формирование намагничивающего импульса в момент отсутствия листа между намагничивающими соленоидами. Для этого в преобразователь установки типа ИМПОК-1Б вводится трансформаторный датчик края листа, излучающая катушка которого размещена с одной стороны листа, а приемная – с другой (рис. 2).

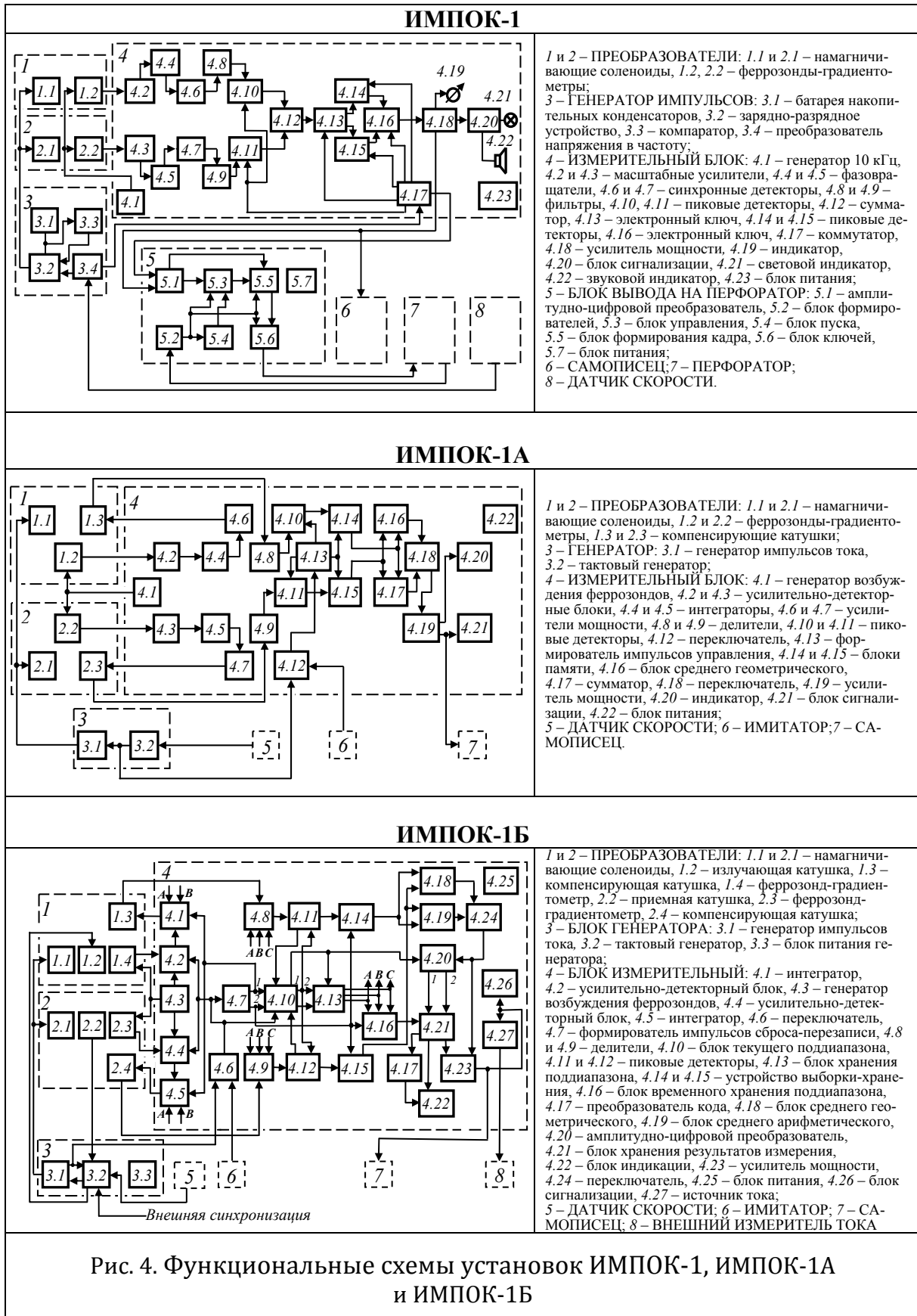


Рис. 4. Функциональные схемы установок ИМПОК-1, ИМПОК-1А и ИМПОК-1Б

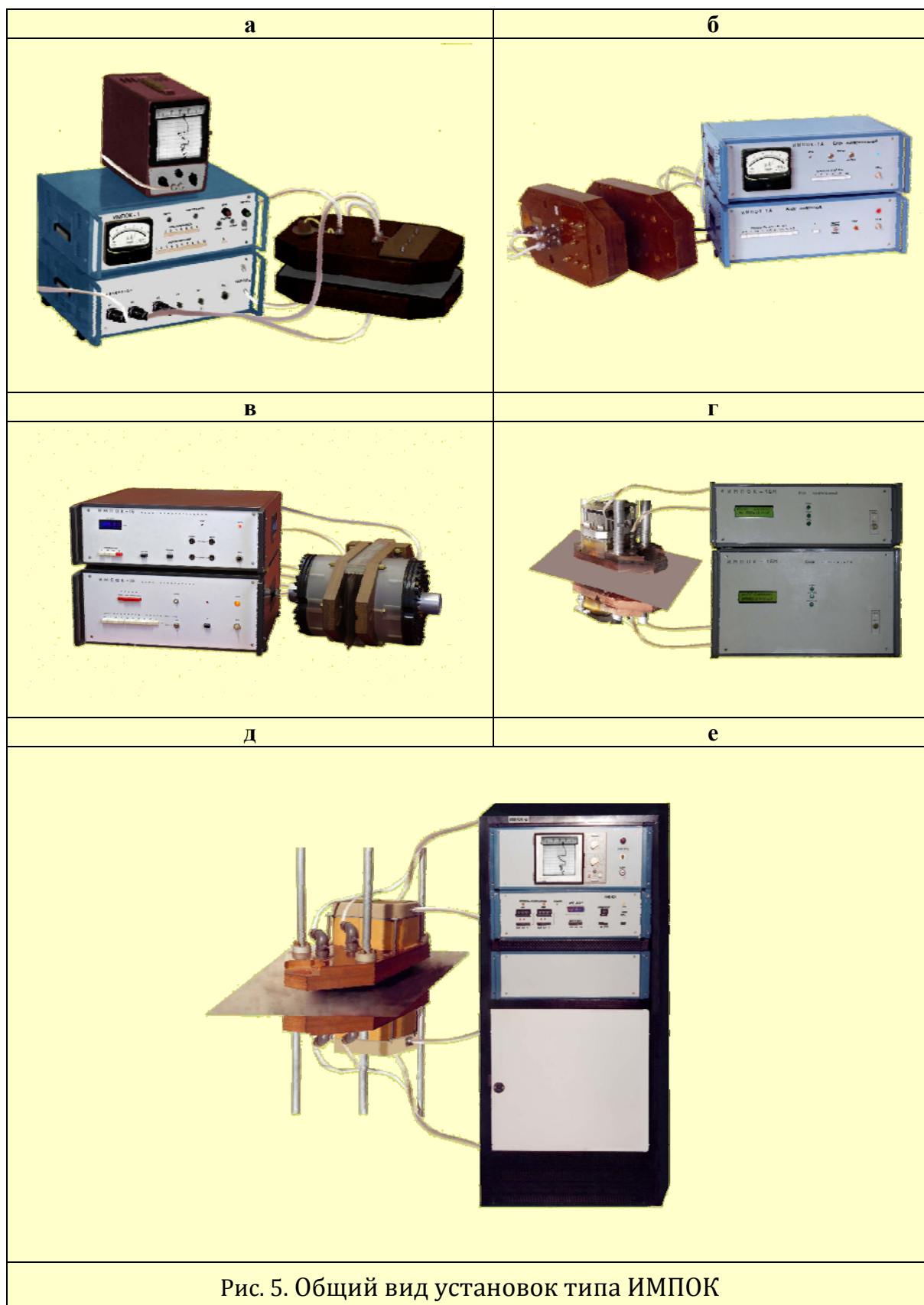


Таблица 1. Основные технические характеристики установок ИМПОК

Толщина листа, мм	
ИМПОК-1, ИМПОК-1А	0,15-10
ИМПОК-1Б	0,15-12
ИМПОК-1БМ	0,15-3
ИМПОК-2, ИМПОК-3	0,15-15
Скорость движения листа, м/с	
ИМПОК-1, ИМПОК-1А	0,5-5
ИМПОК-1Б	0,1-5
ИМПОК-1БМ	0,1-10
ИМПОК-2, ИМПОК-3	1-25
Допустимое отклонение листа от плоскости прокатки, мм	
ИМПОК-1	±10
остальные	±20
Возможность контроля отдельно движущихся листов	
ИМПОК-1Б	да
Амплитуда импульсов магнитного поля, А/м	
ИМПОК-1, ИМПОК-1А	$1,3 \cdot 10^5$
ИМПОК-1Б	$3,2 \cdot 10^5$
ИМПОК-1БМ	$1,25 \cdot 10^5$
ИМПОК-2, ИМПОК-3	$5 \cdot 10^5$
Верхний предел измерения градиента магнитного поля, А/м²	
ИМПОК-1, ИМПОК-1А	$3,2 \cdot 10^4$
ИМПОК-1Б, ИМПОК-1БМ	$5 \cdot 10^4$
ИМПОК-2, ИМПОК-3	$3 \cdot 10^4$
Максимальное число измерений в минуту	
ИМПОК-1, ИМПОК-1А, ИМПОК-1Б,	60
ИМПОК-1БМ, ИМПОК-2, ИМПОК-3	300
Мощность, потребляемая от сети, кВА, не более	
ИМПОК-1	1,5
ИМПОК-1А	0,6
ИМПОК-1Б	0,8
ИМПОК-1БМ	1,0
ИМПОК-2, ИМПОК-3	1,5
Габаритные размеры (длина×ширина×высота) мм, не более (генератора, измерительного блока, преобразователя с крепежом)	
ИМПОК-1	360×480×210; 360×480×170; 2×(480×260×590)
ИМПОК-1А	360×480×170; 360×480×170; 2×(480×200×604)
ИМПОК-1Б	480×480×210; 280×480×170; 2×(515×220×606)
ИМПОК-1БМ	540×480×295; 480×480×170; 2×(415×220×606)
ИМПОК-2 (электронного блока, преобразователя с крепежом)	580×700×1490; 2×(700×300×750)
ИМПОК-3 (электронного блока, преобразователя с крепежом)	600×800×1600; 2×(700×300×750)
Масса, кг	
ИМПОК-1	68
ИМПОК-1А	70
ИМПОК-1Б	84
ИМПОК-1БМ	85
ИМПОК-2	145
ИМПОК-3	150

Кроме того, в установках ИМПОК-1Б в 3,5 раза (по сравнению с установками ИМПОК-1 и ИМПОК-1А) увеличена амплитуда намагничивающих импульсов и изменена геометрия намагничивающих соленоидов (размеры каждого из соленоидов: $a_1 = 7,5$ мм; $a_2 = 72,5$ мм; $2b = 15$ мм), что позволило расширить диапазон толщин контролируемых листов до 12 мм и диапазон допустимых смещений листа при движении до ± 30 мм, а также в 1,5 раза увеличен диапазон измеряемых градиентов. Установка ИМПОК-1Б имеет цифровую индикацию результатов измерения и автоматическое переключение поддиапазонов, предусмотрены возможность подключения самописца и датчика скорости и вывод информации о свойствах контролируемого металла в двоичном коде.

Зазор между преобразователями составляет 50 мм. При невозможности ограничить смещения листа величиной ± 20 мм и при достаточном уровне измеряемых сигналов (зависит от толщины и марки стали контролируемых листов) допускается увеличение зазора между преобразователями до 100 мм при ограничении смещений листа величиной ± 30 мм.

Электрическая структурная схема установки ИМПОК-1Б представлена на рис. 4.

Установка ИМПОК-1БМ

Отличия электрической схемы установки ИМПОК-1БМ от ее аналогов связаны прежде всего с увеличением в 5 раз частоты следования намагничивающих импульсов, что привело к значительному увеличению мощности зарядно-разрядной цепи и мощности системы охлаждения намагничивающих соленоидов, и с увеличением скорости движения листа, что потребовало повышения быстродействия измерительной схемы.

В связи со значительным увеличением рассеиваемой соленоидами мощности помимо масляного предусмотрено и воздушное охлаждение. Преобразователи устанавливаются с двух сторон листа симметрично относительно средней плоскости его движения. Зазор между преобразователями составляет 50 мм.

Генератор может работать в одном из четырех режимов формирования импульсов:

- 1 – одиночных импульсов тока по команде оператора;
- 2 – периодически следующих импульсов тока в соответствии с выбранной скоростью проката;

3 – периодически следующих импульсов тока в соответствии с сигналом от датчика скорости;

4 – одиночных импульсов тока по сигналу внешней синхронизации.

Функциональная схема установки ИМПОК-1БМ представлена на рис. 6.

Установка ИМПОК-2

Установка ИМПОК-2 [20, 21], в отличие от рассмотренных выше установок типа ИМПОК, характеризуется значительным увеличением (до 25 м/с) диапазона скоростей движения проката, на которых возможен контроль, повышением достоверности контроля проката толщиной свыше 4 мм и улучшением основных метрологических характеристик (диапазон линейности, температурная и временная стабильность, отстройка от влияния внешних постоянных и медленно изменяющихся магнитных полей).

Увеличение диапазона допустимых скоростей движения контролируемого проката при одновременном улучшении метрологических характеристик установки обеспечено, с одной стороны, значительным увеличением мощности генератора намагничивающих импульсов [23] и, с другой стороны, – разнесением во времени процессов измерения градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности (максимального значения), создания градиента напряженности магнитного поля эталонным источником и их сравнения [9, 11, 23].

Установка ИМПОК-2 состоит из двух преобразователей и стойки, включающей в себя генератор намагничивающих импульсов тока, измерительный блок и самописец (рис. 2)

В отличие от преобразователей установок ИМПОК-1, ИМПОК-1А и ИМПОК-1Б, каждый из преобразователей установки ИМПОК-2 содержит (рис. 3) по две пары намагничивающих соленоидов, соединенных попарно-встречно так, что один из соленоидов в каждой из пар расположен в верхнем, а второй – в нижнем преобразователе. Каждая из пар соленоидов поочередно подключается к генератору импульсов тока. Это вызвано необходимостью снижения нагрева намагничивающих соленоидов. Кроме того, намагничивающие соленоиды охлаждаются вентиляторами, расположенными в каждом из преобразователей. Частота следования импульсов устанавливается в зависимости от скорости движения листа: скорости 25 м/с соответствует частота намагничивающих импульсов 5 Гц, а скорости 1 м/с – 0,2 Гц. Амплитудное значение импульсов напряженности магнитного поля на торце каждого

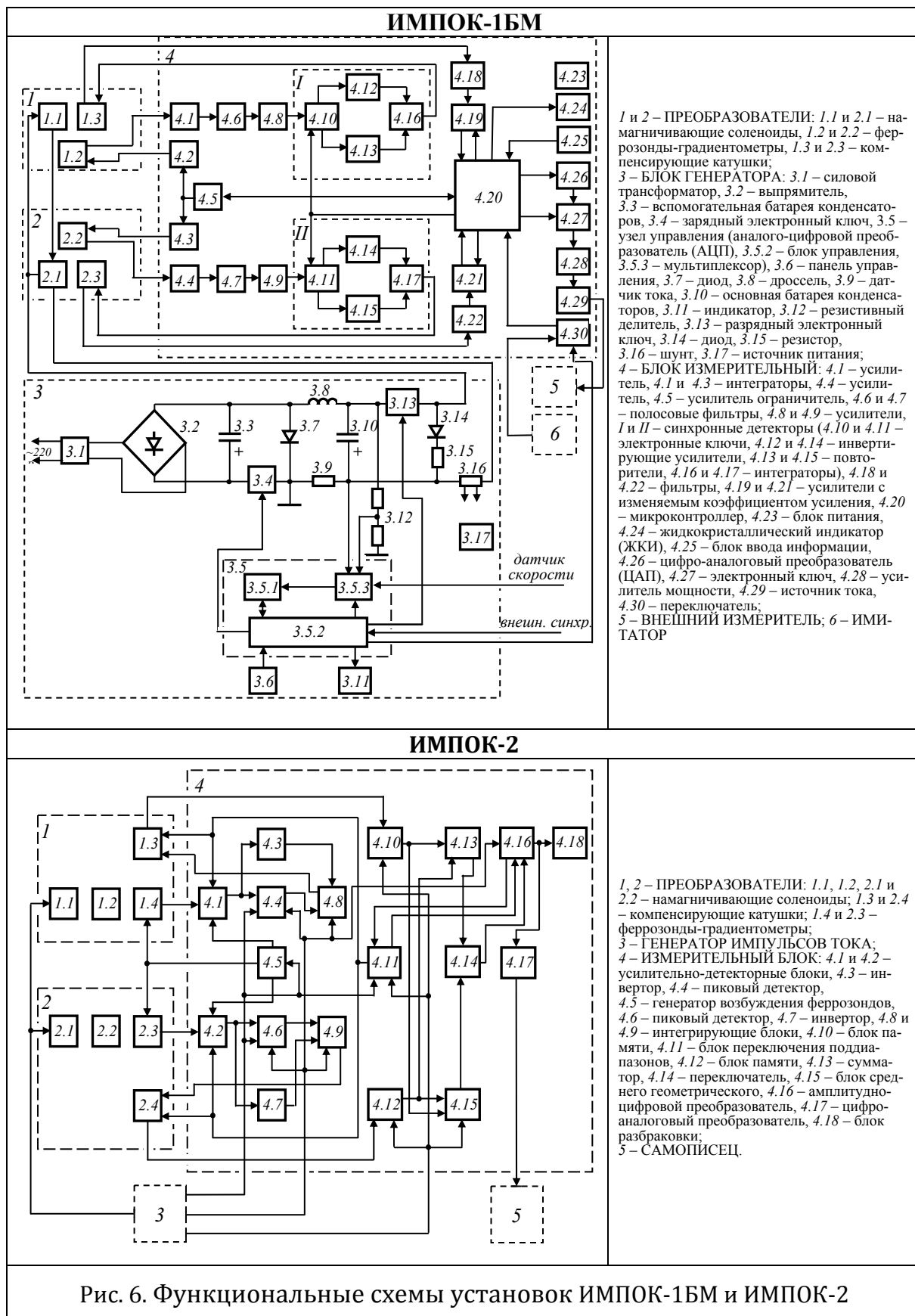


Рис. 6. Функциональные схемы установок ИМПОК-1БМ и ИМПОК-2

из соленоидов составляет ($5 \cdot 10^5 \pm 10\%$) А/м, а их длительность – 3 мс. Расстояние между локально намагниченными участками листового проката составляет 5 м.

При смещениях проката менее ± 10 мм контроль ведется по сумме измеренных градиентов, а при смещениях до ± 20 мм – по их среднему геометрическому.

В установке ИМПОК-2 предусмотрена сигнализация о выходе контролируемых параметров за пределы годности, а также запись результатов контроля на ленте самописца. Переключение поддиапазонов измерения может осуществляться как вручную, так и автоматически.

Для подключения внешних регистрирующих и вычислительных устройств в установке ИМПОК-2 на специальный разъем выводится информативный сигнал в двоично-десятичном коде, стробируемый сигналом о достоверности данных. Повышение достоверности контроля достигается усреднением по n измерениям, где n – натуральный ряд чисел от 1 до 10.

Установка ИМПОК-3

Установка ИМПОК-3 [24] разработана на основе принципов, заложенных в ИМПОК-2. Ее отличительными особенностями являются автоматическая регулировка частоты следования намагничивающих импульсов в соответствии с изменениями скорости движения листа без использования внешних датчиков скорости, отстройка от влияния на результаты контроля внешнего постоянного или медленно изменяющегося поля независимо от его полярности, стабилизация амплитуды намагничивающих импульсов, наличие имитатора поля намагниченного участка и устройства управления, позволяющего проводить сбор, хранение и обработку результатов измерений по длине рулона. Эти особенности установки ИМПОК-3 повышают достоверность контроля и расширяют ее функциональные возможности.

Автоматическая регулировка частоты следования намагничивающих импульсов обеспечивает контроль механических свойств металла вдоль рулона с заданным шагом (5 м) и исключает намагничивание ранее намагниченных участков листа, приводящее к ошибочным результатам контроля при неравномерной скорости и остановках движения. Она основана на измерении временного интервала между моментом локального намагничивания движущегося листа и прохождением намагниченного участка между феррозондами. Измерение временного интервала проводится по числу импульсов тактового генератора между моментом намагничивания и обнаружением максимума намагниченного участка измерительными каналами.

Отстройка от влияния на результаты измерений внешнего постоянного или медленно изменяющегося поля осуществляется за счет разнесения во времени процессов измерения и запоминания максимального значения градиента напряженности поля намагниченного участка, создания поля эталонными источниками в той же полярности, измерения его градиента и сравнения последнего с запомненным ранее значением. Запоминание максимального значения градиента напряженности поля намагниченного участка осуществляется независимо от величины и знака внешнего постоянного или медленно изменяющегося поля цифровым пиковым детектором. Это позволило (в отличие от ИМПОК-2) проводить измерения в случае, когда величина полезного сигнала меньше по абсолютной величине и противоположна по знаку в сравнении с величиной сигнала внешней помехи.

Введение стабилизации амплитуды намагничивающих импульсов необходимо вследствие изменения теплового режима работы намагничивающих соленоидов при изменении скорости движения проката от минимальной (1 м/с) до максимальной (25 м/с). Стабилизация амплитуды импульсов поля обеспечивается за счет введения отрицательной обратной связи между амплитудой тока через намагничивающие соленоиды и напряжением заряда батареи накопительных конденсаторов, что повышает достоверность контроля толстолистного проката.

Так как установка ИМПОК-3 является сложным электронным комплексом, то введение имитатора поля намагниченного участка облегчает ее диагностику в процессе эксплуатации. Имитатор формирует через компенсирующие катушки преобразователя импульс тока, создающий в зоне расположения феррозондов поле, эквивалентное по амплитуде и длительности полю от намагниченного участка листа при его прохождении мимо этих элементов.

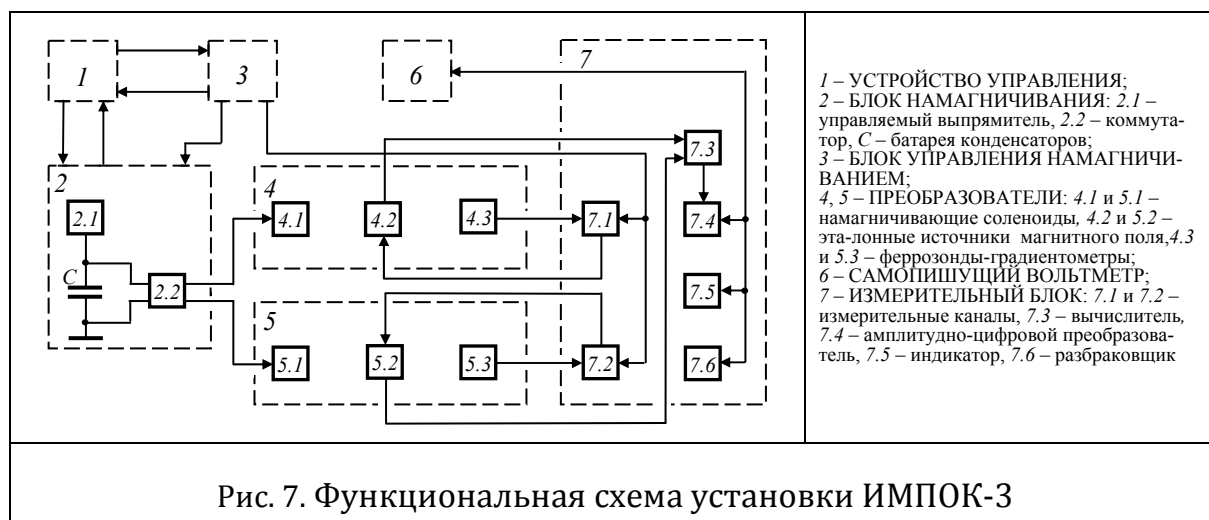


Рис. 7. Функциональная схема установки ИМПОК-3

Устройство управления выполнено на основе микропроцессорного комплекта и позволяет управлять параметрами процессов намагничивания и измерения, контролировать внешние события (остановка движения листа, ввод-вывод преобразователей в зону контроля, конец рулона), рассчитывать средние значения механических свойств, их дисперсию и доверительный интервал, осуществлять контроль работоспособности отдельных узлов и всей установки в целом, осуществлять связь установки ИМПОК-3 с центральным компьютером по последовательному каналу.

Функциональная схема установки ИМПОК-3 представлена на рис. 7, а взаимное расположение ее блоков – на рис. 2.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ УСТАНОВОК ИМПОК В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

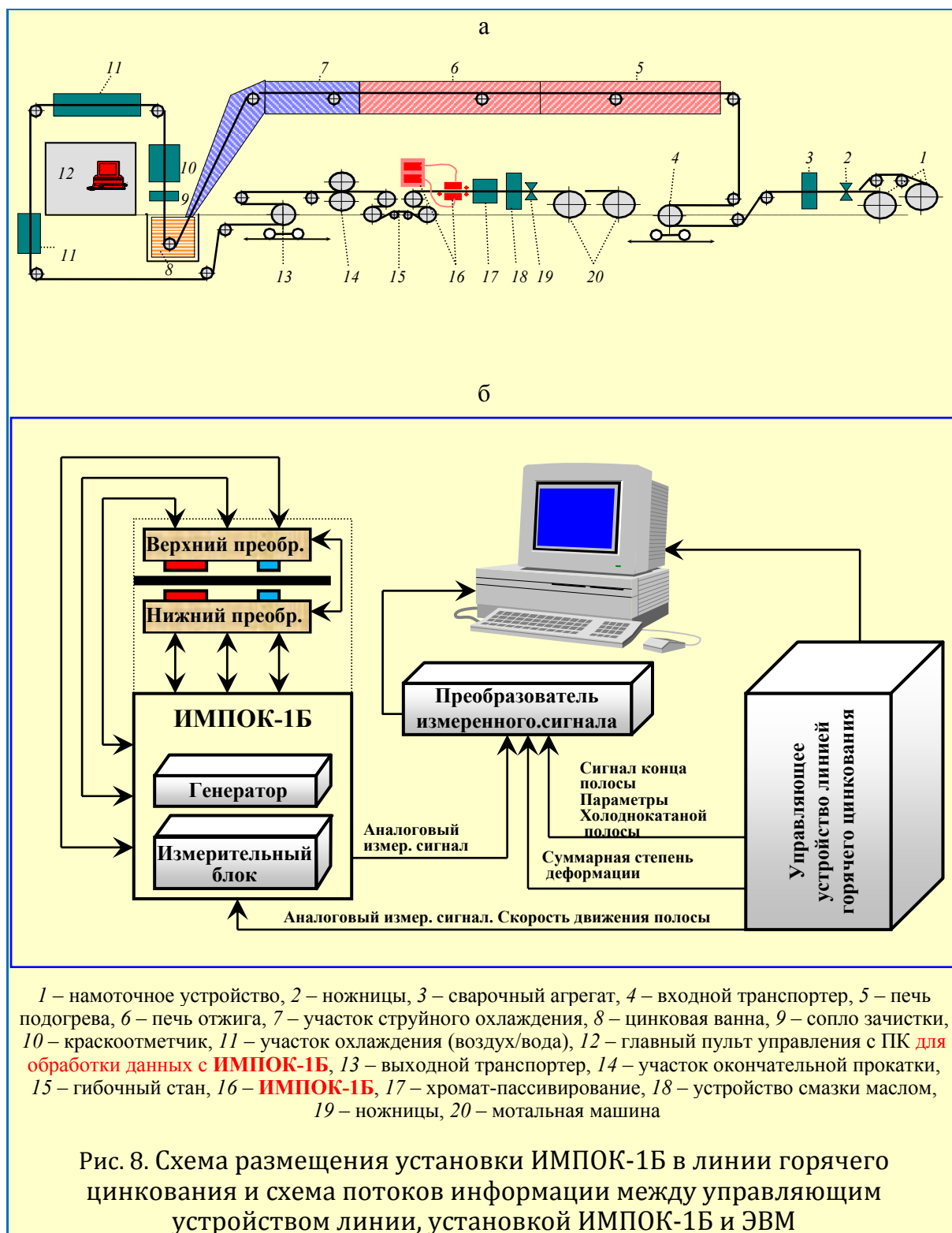
В качестве примера на рис. 8, а представлена схема размещения установки ИМПОК-1Б в линии горячего цинкования ЕКО Stahl. Местом расположения преобразователей установки выбрана выпускная часть линии в области за устройством вторичной прокатки и гибочным станом, где механические параметры горячеоцинкованной полосы явно выражены. Компьютер для приема данных и оценки результатов измерения установлен на главном пульте линии.

Техническая концепция метода предусматривает привязку программируемого управляющего устройства для реализации непрерывного контроля материала и проведения сравнительного анализа и анализа правильности хода процесса на выходе линии горячего цинкования.

На рис. 8, б показана схема размещения ИМПОК-1Б и ЭВМ, а также потоки информации между управляющим устройством линии горячего цинкования и измерительным прибором, а также ЭВМ.

Сигналы, пропорциональные градиенту напряженности поля остаточной намагниченности, поступают в ЭВМ. ЭВМ получает от процессора линии горячего цинкования данные о находящейся в обработке холоднокатаной полосе: размеры, марка подката и марка стали, а также технологические параметры, например, степень общей деформации. На экране ЭВМ главного пульта линии горячего цинкования непрерывно графически отображаются полученные с помощью уравнений регрессии механические параметры в сравнении с номинальными их значениями в соответствии с маркой стали.

На рис. 9 приведен пример записи механических свойств горячеоцинкованного рулона с помощью установки ИМПОК-1Б.



В [25] сообщается о результатах работы по созданию на основе установок типа ИМПОК-1А компьютеризированного комплекса непрерывного неразрушающего магнитного контроля механических и технологических свойств холоднокатаной стальной полосы толщиной

до 2 мм в технологическом потоке агрегата резки при скорости движения полосы до 5 м/с и агрегата горячего цинкования цеха холодного проката Мариупольского металлургического комбината им. Ильича. Комплекс обеспечивает для низкоуглеродистых сталей толщиной 0,5-2 мм определение: временного сопротивления разрыву, предела текучести, относительного удлинения, твердости HRB, способности к вытяжке по Эриксену, балла зерна феррита.

Для построения математических моделей, описывающих связь механических свойств проката с показаниями установки ИМПОК-1А, применены программные средства на основе несогласованных во времени и по месту измерения результатах прямых испытаний и результатах измерений с помощью установки ИМПОК-1А без проведения параллельных испытаний. Это позволяет автоматизировать формирование выборок прямых и неразрушающих испытаний



ЗАДАЧИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ УСТАНОВОК ИМПОК

Новые классы марок сталей (прочные и высокопрочные стали типа IF, DP и TRIP и др.) вызывают новые требования по принципам построения и точности измерения средств контроля.

В [26] показано, что дополнительное измерение радиальной и азимутальной составляющих градиента поля остаточной намагниченности и протяженности намагниченного участка значительно увеличивают коэффициент корреляции между измеряемыми параметрами и контролируемым механическим свойством.

Опыт промышленной эксплуатации установок ИМПОК показал, что наиболее востребованным диапазоном изменения скорости движения листа является 0,1–15 м/с. Для отбраковки негодных листов частота измерений должна быть повышена до 7,5 гц., а допустимый зазор между преобразователями увеличен до 100 мм.

Заключение

На основе теоретических и экспериментальных работ, выполненных в Институте прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, впервые в мире решена важная научно-техническая проблема неразрушающего контроля механических свойств и структуры листового проката сталей толщиной до 12 мм в процессе его движения в технологическом потоке со скоростью до 25 м/с.

Установки ИМПОК разных модификаций внедрены на Магнитогорском, Новолипецком, Мариупольском и др. металлургических предприятиях разных стран. Установки ИМПОК-1Б и ИМПОК-1БМ по лицензионным соглашениям выпускаются фирмой EMG (г. Венден, Германия).

Литература

1. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Контроль механических свойств листового проката сталей в потоке производства. – В кн.: Физические свойства металлов и проблемы неразрушающего контроля. – Минск: Наука и техника, 1978, с. 57-75.
2. Матюк В.Ф., Гончаренко С.А., Хартманн Х., Райхельт Х. Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства. – Дефектоскопия, 2003, № 5, с. 19–60.
3. Матюк В.Ф. Импульсный магнитный контроль прочностных характеристик ферромагнитных изделий. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук, 1998, № 4, с. 114–118.
4. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
5. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Способ электромагнитного контроля физико-механических параметров движущегося ферромагнитного материала. – Авт. свид. СССР № 974242. – Бюл. изобр., 1982, № 42, с. 202.

6. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Востриков А.А. Устройство для электромагнитного контроля механических свойств движущихся ферромагнитных материалов в форме протяженных прутков, лент и профильного проката. – Авт. свид. СССР № 587776. – Бюл. изобр., 1989, № 30, с. 297.
7. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Исследование возможности отстройки от влияния изменений зазора между преобразователем и контролируемым материалом при импульсном магнитном методе контроля. – Дефектоскопия, 1981, № 6, с. 74–79.
8. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Расширение области отстройки от влияния изменений зазора между преобразователем и контролируемым изделием при импульсном магнитном методе контроля. – Дефектоскопия. – 1982, № 11, с. 46–49.
9. Матюк В.Ф. Улучшение характеристик средств импульсного магнитного контроля движущегося листового проката. Дефектоскопия, 1989, № 9, с. 52–58.
10. Матюк В.Ф. Способ электромагнитного контроля физико-механических параметров движущегося ферромагнитного материала. – Авт. свид. СССР № 1527567. – Бюл. изобр., 1989, № 45, с. 212.
11. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Способ электромагнитного контроля физико-механических параметров движущегося ферромагнитного материала. – Авт. свид. СССР № 1109625. – Бюл. изобр., 1984, № 31, с. 108.
12. Matyuk V.F. Pulse magnetic testing of strength of steel rolled products moving in technological rolling practice. – In book: Proceedings of the Institute of Applied Physics of Academy of Sciences of Belarus. Minsk-Tokyo, 1994, p. 43-63.
13. Испытание магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
14. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
15. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение приборов импульсного магнитного контроля ферромагнитных материалов. – Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. Навук, 1987, № 2, с. 107–112.
16. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-1. – Дефектоскопия, 1982, № 9, с. 62–66.
17. Матюк В.Ф., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-1А. – Дефектоскопия, 1992, № 4, с. 38–43.
18. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Импульсный магнитный метод контроля отдельно движущихся листов в технологическом потоке производства. – Дефектоскопия, 1995, № 6, с. 56–62.
19. Матюк В.Ф., Делендик М.Н., Кратиров В.Б., Осипов А.А., Пинчуков Д.А., Хартманн Х., Райхельт Х., Шмидт Р. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-1БМ. – Дефектоскопия, 2007, № 4, с. 12 – 23.
20. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Цукерман В.Л. Установка ИМПОК-2 для контроля механических свойств листового проката сталей, движущегося в потоке производства. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1994, № 2, с. 62–66.
21. Цукерман В.Л., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-2. – Научное и аналитическое приборостроение: Тез. докл. республиканской научно-техн. конф. – Минск, 1995, с. 110–111.
22. Матюк В.Ф. Особенности влияния амплитуды и числа импульсов магнитного поля на величину градиента нормальной составляющей напряженности поля

- остаточной намагниченности при локальном намагничивании толстых изделий. – Дефектоскопия, 1996, № 3, с. 18–24.
23. Цукерман В.Л., Линник И.И., Матюк В.Ф. Устройство для импульсного намагничивания ферромагнитных материалов. – Авт. свид. СССР № 1559323. – Бюл. изобр., 1990, № 15, с. 225-226.
 24. Матюк В.Ф., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный поточный контролер ИМПОК-3. – В кн.: Научное и аналитическое приборостроение. Тезисы докл. республ. конф. 25–28 сентября 1995 г. – Минск, 1995, с. 110–111.
 25. Тараненко П.П., Фишев В.Н., Великий Н.И., Довгалева Л.А., Зайцев В.М., Антонов Г.И., Норка С.П., Сидоренко А.И. Организация и функционирование программно-технических средств неразрушающего контроля механических свойств металлопродукции в технологическом потоке. – Металл и литье Украины, 1997, № 2-4, с. 39-41.
 26. Матюк В.Ф., Осипов А.А., Делендик М.Н., Хартманн Х., Райхельт Х. Исследование возможности использования дополнительных параметров при импульсном магнитном контроле листового проката сталей в технологическом потоке производства. – Дефектоскопия, 2004, № 1, с. 17–28.

Статья поступила в редакцию 27.05.13