

УДК 621.396.969.3

О построении высокоэффективных электромагнитных металлообнаружителей

В.Г. Арсентьев

Рассматривается задача повышения эффективности электромагнитных металлообнаружителей путём введения в их структуру адаптивных компенсационных устройств.

Ключевые слова: контролируемая зона, адаптивные компенсационные устройства, чувствительность обнаружения, мощность излучения.

1. Введение

Электромагнитные обнаружители металлических предметов широко используются в интегрированных системах контроля доступа различного назначения, а в последнее время они стали активно применяться и на этапах производственно-технологического контроля во многих отраслях промышленности.

Многообразие технических решений при реализации электромагнитных металлообнаружителей базируется на использовании фундаментального физического закона электромагнитной индукции и соответствующих методов помехоустойчивой обработки сигналов, обеспечивающих заданные показатели качества и надёжности спроектированных устройств.

подавляющее большинство электромагнитных металлообнаружителей, нашедших применение на практике, построено на основе комплексных схемотехнических решений, которые могут быть охарактеризованы обобщённой структурой обнаружителя, представленной на рис.1.

Формирователь сигнала (гармонического или модулированного) с помощью электромагнитных излучателей (в общем случае нескольких) создаёт в некотором объёме окружающего пространства, называемом контролируемой зоной, переменное электромагнитное поле, под действием которого на выходе приёмных антенн формируется соответствующий электрический сигнал. Изменения этого сигнала, возникающие на выходе приёмных антенн при внесении в контролируемую зону обнаружителя металлического предмета, после усиления и фильтрации обнаруживаются в устройстве обработки и воспроизводятся исполнительными устройствами в виде звуковой и/или световой тревожной сигнализации.

Основным недостатком металлообнаружителей указанной конфигурации является ограничение функциональных возможностей по увеличению чувствительности при фиксированной мощности излучения. Указанный недостаток (при прочих равных условиях эксплуатации) ограничивает область практического применения электромагнитных обнаружителей и не позволяет технологически повышать их эксплуатационную надёжность.

2. Постановка задачи

Для получения требуемой чувствительности электромагнитного обнаружителя на входе порогового элемента устройства обработки сигналов необходимо иметь уверенно регистрируе-

мый сигнал – с отношением сигнал/шум, обеспечивающим заданную вероятность ложной тревоги обнаружителя. Требуемое отношение сигнал/шум обнаруживаемого сигнала может быть достигнуто вариацией двух составляющих: мощностью излучения и усилением приёмного тракта обнаружителя. Соотношение указанных составляющих (мощности и коэффициента усиления) может быть различным, но технически ограниченным.

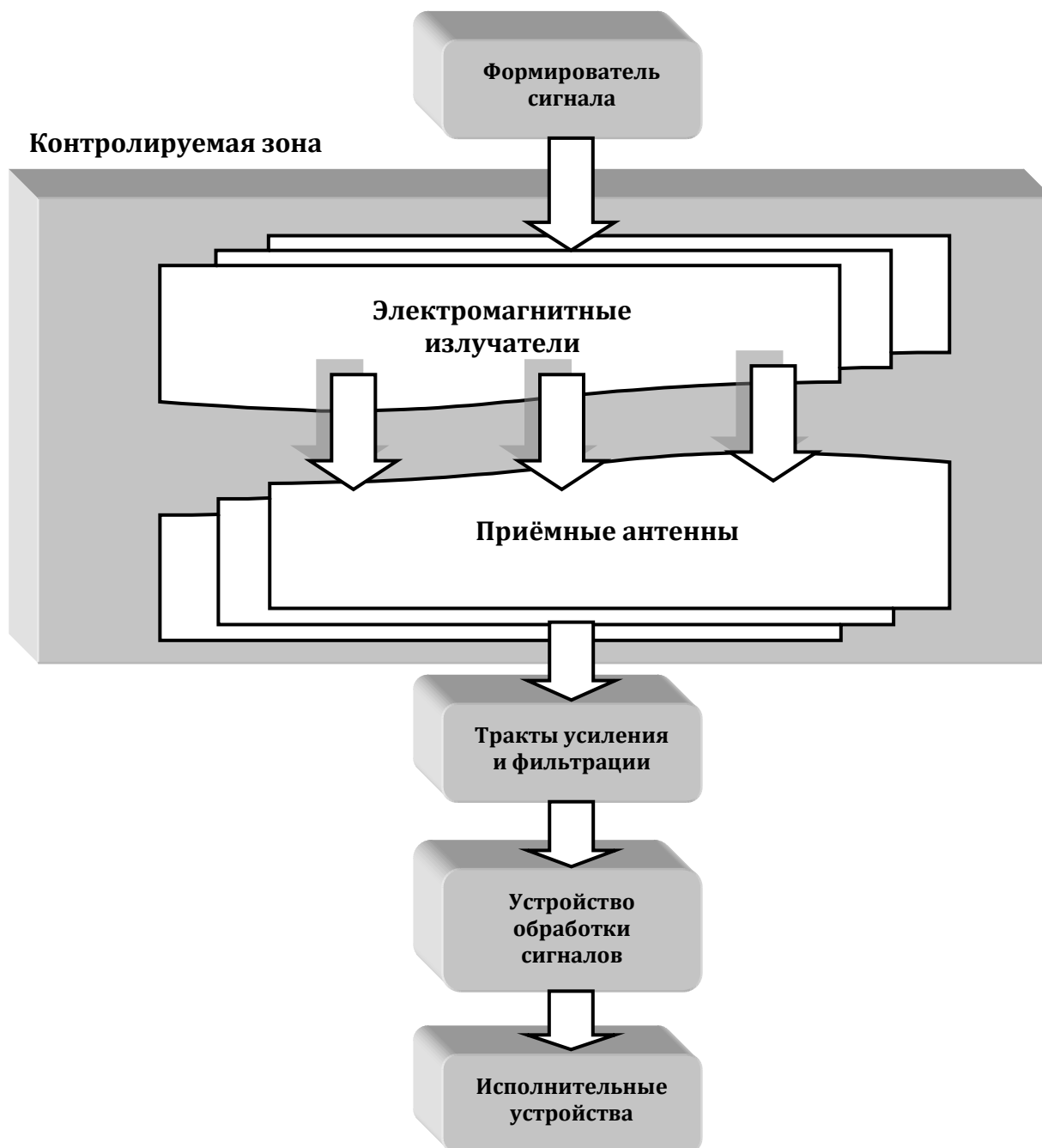


Рис. 1. Обобщённая структура электромагнитного металлообнаружителя

С одной стороны, величина излучаемой мощности сверху ограничивается надёжностью силовых элементов генератора тока и заданным – энергопотреблением обнаружителя, а снизу – величиной тока, обеспечивающего его достаточную помехозащищённость в условиях внешних электромагнитных воздействий.

С другой стороны, на выходе приёмных антенн обнаружителя под воздействием поля электромагнитных излучателей всегда присутствует фоновое (остаточное) напряжение. Ве-

личина этого фоновое напряжения зависит от размеров, конфигурации, взаимного расположения в пространстве излучателей и приёмных антенн. На уровне этого фоновое напряжения и осуществляется обнаружение тех изменений сигнала приёмного тракта, которые обусловлены изменением электромагнитного поля при появлении в контролируемой зоне обнаружителя металлического предмета. Уровень фоновое напряжения, имеющий место в конкретной конструкции контролируемой зоны обнаружителя, и ограничивает максимально возможный коэффициент усиления приёмного тракта, при котором усилители тракта функционируют в линейном режиме и не испытывают перегрузки.

Следовательно, обеспечение требуемой чувствительности металлообнаружителя осуществляется выбором технически оправданного соотношения между мощностью, подводимой от генератора тока к излучателям, и коэффициентом усиления приёмного тракта, зависящим от взаимного расположения излучающих элементов и приёмных антенн, то есть непосредственно от конфигурации контролируемой зоны.

Таким образом, существование фоновое напряжения в приёмном тракте обнаружителя ограничивает его функциональные возможности по увеличению чувствительности при фиксированном энергопотреблении. Указанный недостаток препятствует расширению класса электромагнитных металлообнаружителей, обладающих повышенной чувствительностью, и неоправданно сужает области их возможного применения.

3. Металлообнаружитель повышенной чувствительности

Рассмотрим техническое решение [1], которое позволяет многократно повысить чувствительность металлообнаружителя за счёт до сих пор не применявшегося сочетания следующих функциональных элементов: двух последовательно включённых адаптивных компенсационных устройств с полосовым усилителем между ними, а также использования одного из компенсационных устройств по новому назначению – для обнаружения малых амплитудно-фазовых флуктуаций сигнала в приёмном тракте обнаружителя.

Адаптивное компенсационное устройство (АКУ), предлагаемое к использованию в обнаружителе, имеет структуру, представленную на рис. 2. Область преимущественного применения, особенности реализации и аналитическое описание основных процессов его функционирования содержатся в литературе [2, 3].

Структура предлагаемого металлообнаружителя, обладающего повышенной чувствительностью при ограниченной мощности излучения в контролируемой зоне, приведена на рис.3.

Излучающий блок формирует в пространстве контролируемой зоны электромагнитное поле с частотой, задаваемой генератором тока, и напряжённостью, зависящей от тока генератора. Под воздействием электромагнитного поля излучающего блока в приёмном блоке формируется фоновое (остаточное) напряжение.

Это напряжение усиливается первым полосовым усилителем и поступает на первый вход первого АКУ, на второй вход которого подаётся сигнал от генератора тока.

В соответствии с алгоритмом функционирования [2] на выходе сумматора первого АКУ устанавливается минимум напряжения, т.е. осуществляется компенсация фоновое напряжения, поступающего по первому входу, напряжением, подаваемым на второй вход от генератора тока. Выравнивание амплитуд компенсируемых напряжений и обеспечение их противофазности осуществляется благодаря разложению колебаний второго входа на две квадратурные составляющие с соответствующим управлением этими квадратурами за счёт корреляционных обратных связей.

Минимум фоновое напряжения на выходе сумматора первого АКУ (остаток компенсации) поддерживается автоматически вне зависимости от всякого рода внешних дестабилизирующих факторов: старения элементов, температурного влияния, конструктивных деформаций.

ций элементов контролируемой зоны обнаружителя. В результате фоновое напряжение, ограничивающее коэффициент усиления приёмного тракта обнаружителя, оказывается значительно ослабленным – коэффициент подавления гармонических сигналов в АКУ подобного рода находится в пределах от 60 до 80 дБ, в зависимости от их аппаратурной реализации [4].

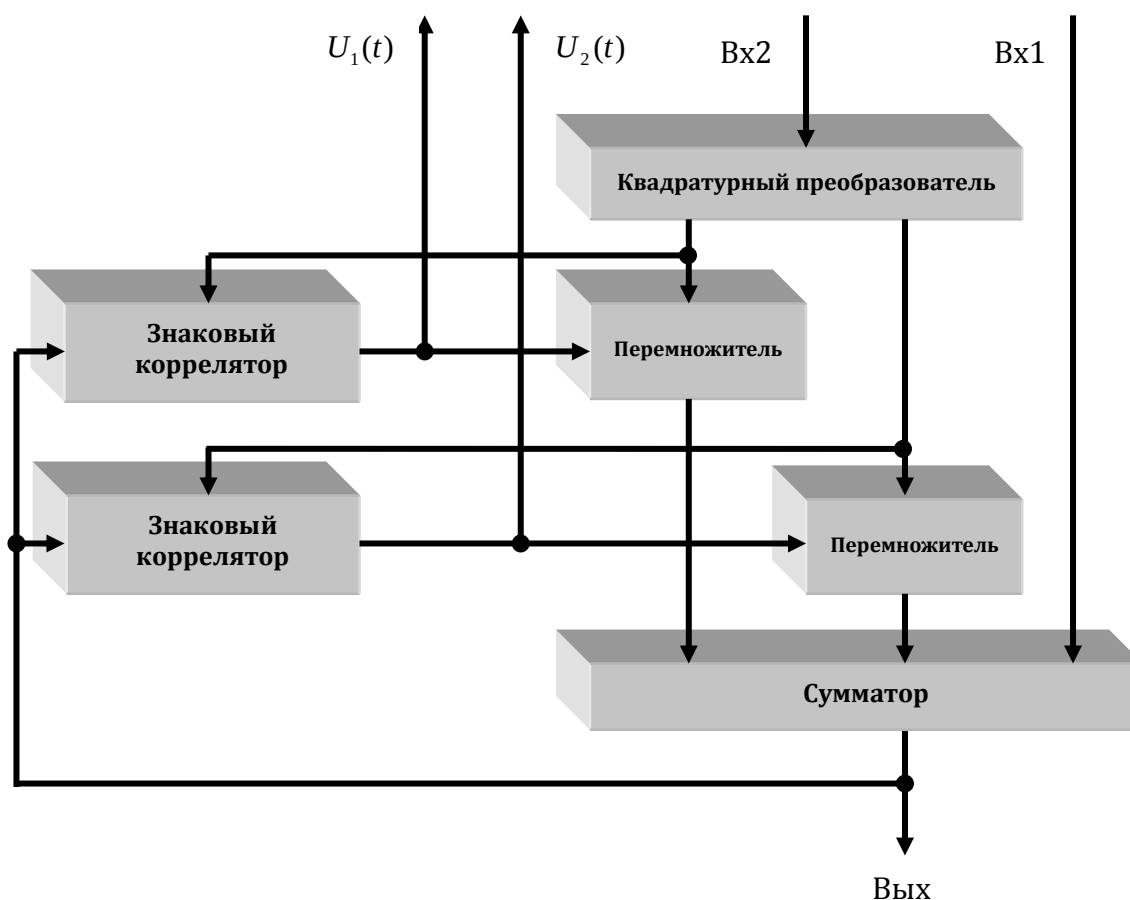


Рис. 2. Структура адаптивного компенсационного устройства (квадратурного автокомпенсатора)

Постоянные времени знаковых корреляторов первого АКУ выбираются значительными (сотни секунд), чтобы автокомпенсатор отслеживал только очень медленные изменения сигнала на первом входе (фоновую составляющую) и не реагировал на относительно быстрые его флуктуации (полезный сигнал), вызываемые изменениями электромагнитного поля при внесении в контролируемую зону обнаружителя металлического предмета.

В установившемся режиме в сигнале на выходе сумматора первого АКУ присутствуют три составляющие: остаток компенсации фоновой составляющей сигнала приёмного блока, шумы первого полосового усилителя и шумы самого сумматора. Соотношение уровней этих составляющих может быть различным (оно зависит от аппаратурной реализации указанных элементов), но в соответствии с алгоритмом функционирования автокомпенсатора в установившемся режиме сумма сигналов этих трёх составляющих на выходе сумматора всегда некоррелирована с сигналом генератора тока, поступающим на второй вход первого АКУ.

Выходной сигнал сумматора первого АКУ усиливается вторым полосовым усилителем и поступает на первый вход второго АКУ, которое по своей структуре полностью аналогично первому.

Постоянные времени знаковых корреляторов второго АКУ выбираются небольшими (сотни миллисекунд), чтобы автокомпенсатор отслеживал относительно быстрые флуктуации сигнала, действующего на его первом входе, которые вызываются изменениями элек-

ромагнитного поля при внесении в контролируемую зону обнаружителя металлического предмета.

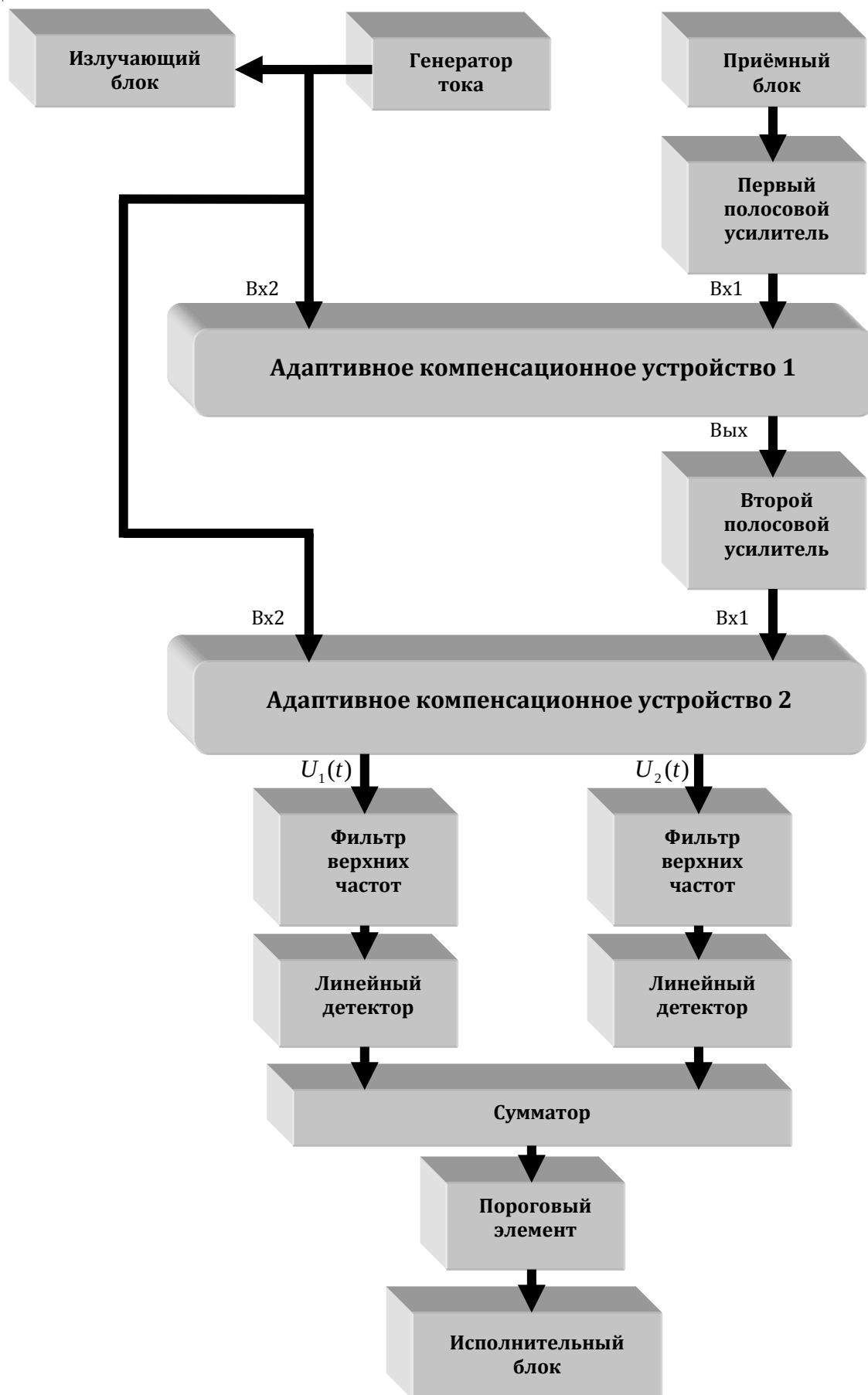


Рис. 3. Структура металлообнаружителя повышенной чувствительности

В силу некоррелированности сигналов на первом и втором входах второго АКУ в режиме ожидания, в соответствии с алгоритмом функционирования автокомпенсатора, напряжения на выходах его знаковых корреляторов, минимизирующие выходной сигнал сумматора, будут достаточно малыми (при большом усреднении они стремятся к нулю) и медленно меняющимися.

Медленные изменения напряжений на выходах знаковых корреляторов второго АКУ подавляются фильтрами верхних частот, и напряжения на выходах линейных выпрямителей и сумматора будут малыми, не превышающими установленный пороговый уровень порогового элемента, поэтому они не регистрируются исполнительным блоком.

Перемещение в контролируемой зоне металлического предмета приводит к возникновению на выходе приемного блока относительно быстрых флуктуаций напряжения, которые не компенсируются в первом АКУ (вследствие большой постоянной времени его цепей регулирования) и проходят с заданным усилением через тракт: первый полосовой усилитель, сумматор первого АКУ, второй полосовой усилитель, поступая на первый вход второго АКУ.

Второе АКУ, имея малые постоянные времени цепей регулирования, отслеживает флуктуации напряжения на первом входе и в процессе компенсации этих флуктуаций формирует на выходах знаковых корреляторов выбросы напряжения, которые проходят на выходы фильтров верхних частот, детектируются линейными выпрямителями, объединяются в сумматоре и вызывают срабатывание порогового элемента, поскольку их уровень превышает установленный порог. Напряжение срабатывания порогового элемента выставляется в режиме ожидания в соответствии с требуемой вероятностью ложных тревог. Выходное напряжение порогового элемента активизирует соответствующие элементы исполнительного блока, в результате регистрируется световой и/или звуковой сигнал/сигналы тревоги.

Оценим величину прироста чувствительности, которая может быть получена в предлагаемой структуре обнаружителя (по сравнению с выбранным прототипом) с учётом использования при реализации его основных функциональных узлов достаточно надёжной и экономичной (с точки зрения энергопотребления) аналоговой элементной базы. В качестве прототипа выбран широко распространённый у массового потребителя арочный металлообнаружитель «Признак», имеющий следующие, необходимые для анализа, характеристики: активная мощность излучения в контролируемой зоне от 20 до 30 Вт, коэффициент усиления приёмного тракта от 500 до 1000.

Используя наиболее общую форму аналитического представления сигналов, колебания, действующие на выходе приёмного блока прототипа и предлагаемого обнаружителя, можно представить в следующем виде:

$$U(t) = U_o(t) + \Delta U(t), \quad (1)$$

где $U_o(t)$ – остаточное напряжение, обусловленное наличием электромагнитной связи между передающим и приёмным блоками и представляющее собой гармонические или модулированные колебания, формируемые генератором тока с частотой, которая при обнаружении металлических предметов из разных металлов может варьироваться в пределах от единиц до сотен килогерц;

$\Delta U(t)$ – обнаруживаемое изменение напряжения на выходе приёмного блока, вызванное перемещением металлического предмета в контролируемой зоне обнаружителя.

Для повышения помехозащищённости обнаружителя от всякого рода внешних электромагнитных воздействий мощность излучающего блока выбирается такой, чтобы выходной сигнал приёмного блока имел достаточно большое отношение сигнал/шум. В этом случае можно считать, что приведённые к входу шумы полосового усилителя прототипа (или первого полосового усилителя предлагаемого обнаружителя) будут малыми относительно составляющих $U_o(t)$ и $\Delta U(t)$, тогда колебания на выходе полосового усилителя будут определяться соотношением

$$U_1(t) = k_1[U_o(t) + \Delta U(t)], \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент усиления полосового усилителя прототипа или первого полосового усилителя предлагаемого обнаружителя.

При эффективной фильтрации медленно изменяющейся составляющей $U_o(t)$ фильтром верхних частот, когда $U_o(t)$ много меньше $\Delta U(t)$, напряжение на входе порогового элемента при обнаружении будет определяться зависимостью

$$U_n(t) = k_1 \Delta U(t). \quad (3)$$

Если обозначить $U_n^*(t)$ – напряжение уверенного срабатывания порогового элемента, то из соотношения (3) можно найти величину уверенно обнаруживаемого изменения напряжения на выходе приёмного блока, вызванного перемещением металлического предмета в контролируемой зоне обнаружителя прототипа. Эта величина находится из выражения

$$\Delta U(t) = \frac{U_n^*(t)}{k_1}. \quad (4)$$

Для упрощения анализа (не влияющего на конечный результат) считаем, что коэффициент передачи сумматора первого АКУ равен единице, а его приведённые к входу шумы значительно меньше выходного напряжения первого полосового усилителя, тогда напряжение на выходе сумматора первого АКУ, после компенсации составляющей $U_o(t)$, можно представить в следующей форме:

$$U_{\text{вых}}(t) = k_1 \Delta U(t) + \delta U_o(t), \quad (5)$$

где $\delta U_o(t)$ – некомпенсированный остаток фоновой составляющей $U_o(t)$, величина которого, как уже указывалось, на 60 – 80 дБ меньше напряжения $k_1 U_o(t)$ на выходе первого полосового усилителя.

Поскольку влияние собственных шумов на выходной сигнал второго полосового усилителя предлагаемого обнаружителя уже незначительно, то напряжение на его выходе описывается соотношением

$$U_2(t) = k_2[k_1 \Delta U(t) + \delta U_o(t)], \quad (6)$$

где k_2 – коэффициент усиления второго полосового усилителя.

Из условия равенства мощностей компенсируемых колебаний на входах сумматора автокомпенсатора [2] вытекает уравнение компенсации входного воздействия для второго АКУ предлагаемого обнаружителя, которое применительно к обнаруживаемой составляющей $\Delta U(t)$ имеет вид

$$k_1 k_2 \Delta U(t) = k_c U_T(t) \sqrt{U_1^2(t) + U_2^2(t)}, \quad (7)$$

где $U_T(t)$ – выходное напряжение генератора тока, поступающее на вторые входы первого и второго АКУ;

$U_1(t)$ и $U_2(t)$ – изменения напряжений на выходах знаковых корреляторов в цепях регулирования синфазного и квадратурного каналов второго АКУ, обеспечивающие компенсацию входного воздействия $\Delta U(t)$ на первом входе;

k_c – коэффициент передачи каждого из перемножителей в сигнальных цепях второго АКУ, имеющий размерность $[1/V]$.

Из уравнения (7) нетрудно найти обнаруживаемое с использованием квадратурного автокомпенсатора изменение напряжения на выходе приёмного блока, вызванное перемещением металлического предмета в контролируемой зоне предлагаемого устройства обнаружения

$$\Delta U(t) = \frac{k_c U_r(t) \sqrt{U_1^2(t) + U_2^2(t)}}{k_1 k_2}. \quad (8)$$

Для корректного сравнения эффективности предлагаемого обнаружителя и прототипа считаем, что коэффициенты передачи его фильтров верхних частот, линейных выпрямителей и сумматора равны единице, а регистрируемые напряжения соответствуют пороговым

$$U_1(t) = U_2(t) = U_n^*(t).$$

Тогда выражение (8) можно записать в следующем виде:

$$\Delta U(t) = \frac{\sqrt{2} k_c U_r(t) U_n^*(t)}{k_1 k_2}, \quad (9)$$

где $\Delta U(t)$ теперь определяет величину уверенно обнаруживаемого изменения напряжения на выходе приёмного блока, вызванного перемещением металлического предмета в контролируемой зоне предлагаемого обнаружителя.

Прирост чувствительности в предлагаемом обнаружителе по отношению к прототипу (в логарифмических единицах) может быть рассчитан на основе зависимостей (4) и (9) следующим образом:

$$V_U = 20 \lg \frac{\Delta U(t) \{ \text{прототипа} \}}{\Delta U(t) \{ \text{предл. обнаружителя} \}} = 20 \left[\lg k_2 + \lg \frac{1}{\sqrt{2} k_c U_r(t)} \right] \text{ [дБ]}, \quad (10)$$

где первое слагаемое определяет прирост чувствительности обнаружителя за счёт компенсации с помощью первого АКУ фоновой составляющей $U_o(t)$ и введения дополнительно усиления k_2 в его приёмный тракт, а второе слагаемое характеризует эффективность использования второго АКУ по новому назначению – для обнаружения малых амплитудно-фазовых флуктуаций напряжения $\Delta U(t)$ в приёмном тракте обнаружителя.

Максимальная величина (оценка сверху) коэффициента усиления второго полосового усилителя k_2 предлагаемого обнаружителя может быть определена из условия обеспечения линейности приёмного тракта из двух последовательно включённых усилителей. Это условие характеризуется следующей зависимостью:

$$U_{in}(t) k_1 k_2 h \sqrt{\Delta f} \leq U_{max}(t),$$

откуда получаем

$$k_2 \leq \frac{U_{\max}(t)}{U_{\text{ш}}(t) h k_1 \sqrt{\Delta f}}, \quad (11)$$

где h – требуемое отношение сигнал/шум на входе порогового элемента;

$U_{\text{ш}}(t)$ – приведённый к входу уровень собственных шумов первого полосового усилителя;

Δf – эффективная полоса пропускания первого полосового усилителя;

$U_{\max}(t)$ – уровень максимального неискажённого выходного сигнала второго полосового усилителя.

Численные значения параметров $U_{\text{ш}}(t)$, Δf , $U_{\max}(t)$ при реализации полосовых усилителей на базе операционных усилителей общего применения [5] могут быть приняты следующими:

$$U_{\text{ш}}(t) = 100 \frac{\text{нВ}}{\sqrt{\Gamma_{\text{ш}}}}; \quad \Delta f = 5 \text{ кГц}; \quad U_{\max}(t) = 10 \text{ В}.$$

Отношение сигнал/шум на входе порогового элемента h примем равным 10, исходя из требования обеспечения малой вероятности ложных тревог в устройстве обнаружения. Коэффициент усиления k_1 первого полосового усилителя будем считать равным 1000, чтобы использовать для сравнения уже упоминавшийся прототип – металлодетектор «Признак». Тогда на основании зависимости (11) получаем, что максимальная величина коэффициента усиления k_2 второго полосового усилителя не должна превышать 140.

Произведение параметров k_c и $U_r(t)$ в соотношении (10) может варьироваться в достаточно широких пределах, оно зависит, в основном, от технически реализуемого динамического диапазона перемножителей в сигнальных цепях второго АКУ. Например, при реализации перемножителей на базе специализированных микросхем 525ПС2 среднестатистическая величина произведения $k_c U_r(t)$, ограниченная технологией изготовления интегральных микросхем этого класса, может достигать значения 0.05 [6].

Руководствуясь зависимостью (10), нетрудно увидеть, что максимальный прирост чувствительности предлагаемого обнаружителя за счёт введения первого АКУ и второго полосового усилителя может достигать величины 43 дБ, а использование второго АКУ для решения задачи обнаружения позволяет дополнительно повысить чувствительность устройства ещё на 23 дБ, что в совокупности повышает чувствительность предлагаемого обнаружителя на 66 дБ по сравнению с прототипом.

Полученные количественные оценки свидетельствуют и о возможности гибкого варьирования двумя основными характеристиками обнаружителя: чувствительностью и излучаемой в контролируемую зону мощностью. Так, например, по сравнению с рассмотренным прототипом предлагаемый обнаружитель позволяет снизить излучаемую в контролируемую зону мощность на два порядка (до 0.2 – 0.3 Вт) и одновременно повысить чувствительность не менее чем на 40 дБ при одинаковой с прототипом вероятности ложных тревог.

4. Обнаружитель с классификацией металлов

Ещё одно техническое решение [7], обеспечивающее возможность расширения функциональных возможностей электромагнитных металлообнаружителей путём использования АКУ, представлено на рис.4.

Излучающий блок обнаружителя выполняется в виде одной или нескольких соответствующим образом соединённых многовитковых плоскостных рамок, являющихся составной

частью высокочастотной резонансной системы, образующей в заданном технологическом пространстве контролируруемую зону.

Конструкционная индуктивность рамок излучающего блока, совместно с ёмкостью дополнительно введённых конденсаторов, образуют параллельный контур, изначально настроенный в резонанс на заданной частоте генератора, управляемого напряжением. Напряжение с контура подаётся на первый вход АКУ, а с выхода генератора, управляемого напряжением, – на его второй вход.

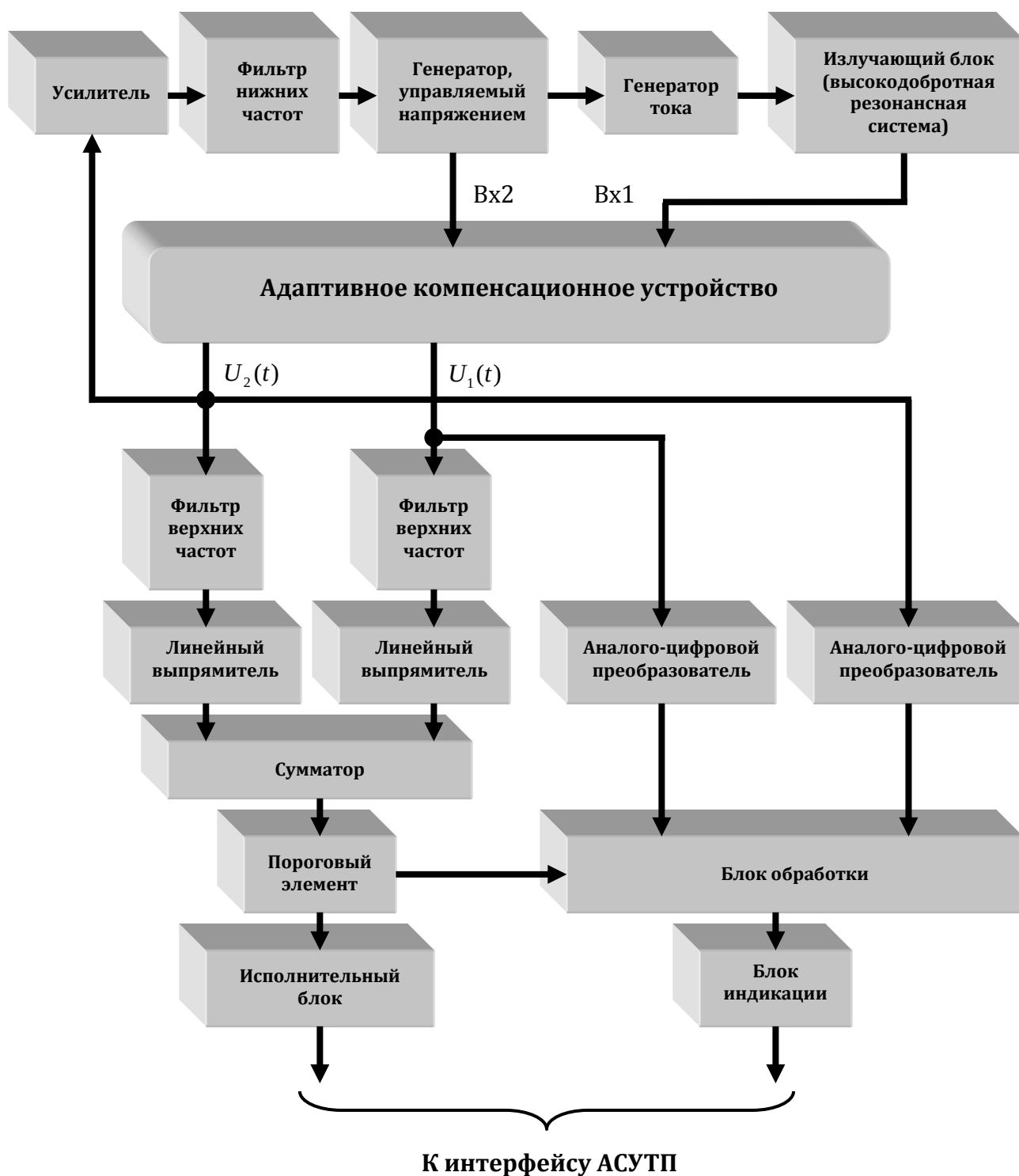


Рис. 4. Структура металлообнаружителя с классификацией металлов

Поскольку параллельный контур при резонансе имеет чисто активное эквивалентное сопротивление, то фазы напряжений, поступающих на первый и второй входы АКУ, будут одинаковыми, следовательно, напряжения на выходах знаковых корреляторов цепей регулирования (определяющие «вес» каждой квадратурной составляющей в компенсирующем сигнале) будут существенно различными: одно из них (квадратурное) будет близко к нулю, а другое (синфазное) будет иметь отрицательный знак и величину, обеспечивающую компенсацию напряжений, поступающих по первому и второму входам АКУ, на выходе его сумматора. В установившемся режиме работы АКУ эти напряжения цепей регулирования будут медленно меняющимися.

При несоответствии резонансной частоты контура частоте генератора, управляемого напряжением (из-за ухода частоты генератора, старения элементов, действия внешних дестабилизирующих факторов), будет наблюдаться изменение знака и величины (в зависимости от расстройки) квадратурной составляющей напряжения на выходе знакового коррелятора АКУ, который выступает, в данном случае, в роли частотно-фазового дискриминатора.

После соответствующего усиления и усреднения фильтром нижних частот это напряжение поступает на управляющий вход генератора, управляемого напряжением, изменяя его частоту генерации. Указанная цепь автоподстройки обеспечивает постоянную в процессе эксплуатации подстройку частоты генератора, управляемого напряжением, под резонансную частоту параллельного контура. Для обеспечения устойчивой работы всего обнаружителя постоянные времени знаковых корреляторов цепей регулирования АКУ выбираются на несколько порядков (4 – 5 порядков) меньше постоянной времени фильтра нижних частот цепи автоподстройки частоты.

При попадании металлического предмета в контролируемую зону обнаружителя, вследствие явления электромагнитной индукции, происходит изменение индуктивности рамок излучающего блока, что вызывает смещение резонансной частоты контура, которое сопровождается изменением фазы и амплитуды напряжения на первом входе АКУ и, как следствие, приводит к появлению кратковременного изменения напряжений на выходах знаковых корреляторов его цепей регулирования, связанного с переходными процессами компенсации в квадратурном автокомпенсаторе.

Эти относительно быстрые изменения напряжений проходят на выходы фильтров верхних частот, преобразуются (становятся одинаковой полярности) в линейных выпрямителях, объединяются в сумматоре и поступают на вход порогового элемента. При превышении сигналом на выходе сумматора порогового уровня порогового элемента в исполнительном блоке воспроизводится сигнал тревоги, имеющий удобный для потребителя вид.

Классификация обнаруженных металлических предметов в предлагаемом устройстве базируется на следующих физических принципах.

Как известно [8], металлические предметы из категории чёрных металлов обладают свойствами ферромагнетиков, а предметы из категории цветных металлов – свойствами диамагнетиков.

Ферромагнетики, попадая в пространственно-контролируемую зону многовитковых плоскостных рамок излучающего блока, вызывают увеличение общей индуктивности параллельного контура, а диамагнетики, наоборот, уменьшают эту индуктивность. Это позволяет по знаку изменения разности фаз напряжений на первом и втором входах квадратурного автокомпенсатора (при расстройке параллельного резонансного контура, вызванной металлическим предметом) определять принадлежность обнаруженного предмета к категории чёрных или цветных металлов.

Разность фаз напряжений, поступающих на первый и второй входы квадратурного автокомпенсатора, определяется соотношением

$$\Delta\varphi(t) = \arctg \left[\frac{U_2(t)}{U_1(t)} \right], \quad (12)$$

где $U_2(t)$ и $U_1(t)$ – величины напряжений на выходах знаковых корреляторов, определяющие соответственно «вес» квадратурной и синфазной составляющей в компенсирующем сигнале.

Для осуществления процедуры классификации достаточно информации только о знаке $\Delta\varphi(t)$, тогда соотношение (12) для принятия решения преобразуется к виду:

$$\Delta\varphi(t)_{\text{зн}} = \operatorname{sgn} \left[\frac{U_2(t)}{U_1(t)} \right], \quad (13)$$

где $\operatorname{sgn}[x]$ – сигнум-функция (знак отношения).

В этом случае вся процедура классификации при обнаружении металлического предмета может быть сведена к проверке следующих условий:

$$\left\langle \begin{array}{l} \Delta\varphi_{\text{зн}} = 1, / \text{принадлежность} / \kappa / \text{чёрным} / \text{металлам} \\ \Delta\varphi_{\text{зн}} = -1, / \text{принадлежность} / \kappa / \text{цветным} / \text{металлам} \end{array} \right\rangle. \quad (14)$$

В результате, с помощью аналого-цифровых преобразователей постоянно осуществляется оцифровка напряжений на выходах знаковых корреляторов АКУ. Данные оцифровки передаются в блок обработки для получения оценок составляющих $U_2(t)$, $U_1(t)$ и $\Delta\varphi(t)_{\text{зн}}$. При обнаружении металлического предмета, по сигналу порогового элемента, в блоке обработки осуществляется проверка условий (14), после чего принятое решение по классификации передается в блок индикации, где классификационная информация преобразуется в удобный для потребителя вид.

Дополнительно следует заметить, что при функционировании обнаружителя в составе оборудования какого-либо производственно-технологического процесса может быть предусмотрена возможность сопряжения исполнительного блока и блока индикации с аппаратно-программным комплексом автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) по одному из стандартных интерфейсов связи.

В рассмотренной структуре металлообнаружителя отсутствует функциональное разделение излучающего и приёмного элементов. Излучателем выступает высокочастотная резонансная система, а сам факт обнаружения металлического предмета оценивается по величине изменения индуктивности параллельного резонансного контура.

Использование резонансной системы совместно с АКУ позволяет регистрировать достаточно малые изменения индуктивности плоскостных рамок, обусловленные внесением в контролируемую зону металлических предметов, при малой мощности сигнала, подводимого к рамкам и создающего электромагнитное поле в контролируемой зоне. Оценим минимальную величину изменения индуктивности, регистрируемую с помощью квадратурного автокомпенсатора.

В первом приближении (дающем заниженную оценку) считаем, что изменения амплитуды сигнала, снимаемого с резонансного контура, вблизи резонансной частоты малы, а имеют место лишь относительно малые изменения его фазы, вызванные меняющейся под воздействием вносимого в контролируемую зону металла индуктивностью контура.

Диапазон уверенно регистрируемых простыми электронными схемами различной конфигурации напряжений $U_2(t)$ и $U_1(t)$ находится в пределах от единиц милливольт до единиц вольт. Следовательно, минимальное отношение $\frac{U_2(t)}{U_1(t)}$, в первом приближении, можно характеризовать величиной порядка 0.001. Тогда, на основании соотношения (12), нетрудно оце-

нить минимальную разность фаз колебаний, уверенно регистрируемую с помощью квадратурного автокомпенсатора. Её величина будет составлять: $\Delta\varphi_{\min}(t) = 0.05$ градуса.

Фазочастотная характеристика параллельного резонансного контура, в зависимости от относительного изменения индуктивности, определяется выражением [9]:

$$\varphi(m) = \arctg \left[2Q(1 - \sqrt{1-m}) \right], \quad (15)$$

где $m = \frac{\Delta L}{L}$ – относительное изменение индуктивности контура;

Q – добротность контура.

На основе соотношения (15) можно оценить изменение индуктивности контура, приводящее к изменению фазы на $\Delta\varphi_{\min}(t)$:

$$\operatorname{tg} \Delta\varphi_{\min}(t) = 2Q(1 - \sqrt{1-m}),$$

откуда нетрудно найти m :

$$m = 1 - \left\{ 1 - \frac{\operatorname{tg} \Delta\varphi_{\min}(t)}{2Q} \right\}^2. \quad (16)$$

Как показали экспериментальные исследования, величины добротностей резонансных систем, получаемые при изготовлении опытных образцов обнаружителей, находятся в пределах от 200 до 300. Тогда нижняя оценка m (при $Q = 200$), на основании зависимости (16), составляет $m = 4.4 \cdot 10^{-6}$, что соответствует уверенной регистрации обнаружителем относительных изменений индуктивности на уровне шестого порядка малости. Это указывает на возможность получения высокой чувствительности обнаружителя, которая и была экспериментально подтверждена в изготовленных на ПО «Север» опытных образцах металлообнаружителей «СМ-2000». При этом активная мощность излучения в контролируемой зоне не превышала 10 мВт, что существенно уменьшает не только уровень внешнего излучения, но и снижает общее энергопотребление обнаружителя, делая его более надёжным и безопасным.

5. Заключение

Рассмотренные технические решения апробированы и доведены до стадии промышленных образцов, успешно прошедших стадию опытной эксплуатации. Результаты эксплуатации свидетельствуют о возможности реализации нового класса высокочувствительных и энергоэкономичных электромагнитных металлообнаружителей, существенно расширяя область их самого разнообразного применения.

Литература

1. Арсентьев В. Г., Абаренов С. П., Буркацкий В. Т., Осколков В. А. Устройство обнаружения металлических предметов // Пат. 2321069 (Россия). 2008.
2. Адаптивная компенсация помех в каналах связи/ Ю.И. Лосев, А.Г. Бердников, Э.Ш. Гойхман, Б.Д. Сизов. М.: Радио и связь, 1988, 208 с.
3. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ./ Уидроу Б., Стирнз С. М.: Радио и связь, 1989, 440 с.
4. Арсентьев В. Г. , Штанюк А. М. Экспериментальные исследования адаптивного компенсатора помех при приеме импульсных сигналов // Техника средств связи: Системы связи, 1984, вып. 3. с. 74 – 80.
5. Мячин Ю.А. 180 аналоговых микросхем. М.: Патриот, 1993, 235 с.
6. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых микросхем. М.: Радио и связь, 1985, 304 с.
7. Арсентьев В. Г., Абаренов С. П. Устройство обнаружения и классификации металлических предметов // Пат. 2331113 (Россия). 2008.
8. Краткий технический справочник под редакцией В.А. Зиновьева. М.: Издательство технико-теоретической литературы, 1952, 530 с.
9. Кугушев А.М., Голубева Н.С. Основы радиоэлектроники. Линейные электромагнитные процессы. М.: Энергия, 1969, 880 с.

Статья поступила в редакцию 23.10.2009

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., проректор по инновационному развитию СибГУТИ, (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86)
тел. (383) 269-82-05, e-mail: vigar@sibsutis.ru

About construction of highly effective electromagnetic metal detectors

V. G. Arsentiev

The problem of improving effectiveness of electromagnetic metal detectors is considered. A solution is based on introduction of adaptive compensators in their structure.

Keywords: controlled area, adaptive compensators, detection sensitivity, energy of radiation.