О ВЫБОРЕ УРОВНЯ ЗАТУХАНИЯ В КАНАЛАХ ТЕЛЕМЕХАНИКИ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВЯЗИ ПО РЭС В СЛУЧАЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА С ОПРЕДЕЛЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

И. Ф. Огороднейчук, А. Я. Куземин, В. И. Мелешко, В. И. Пономарев

Харьков

Определение экстремальных значений уровня затухания

При расчете канала связи по распределительной электрической сети (РЭС) методом узловых потенциалов составляется матрица проводимостей сложной цепи [1—2], на основании которой могут быть найдены на определенной частоте все интересующие нас параметры (затухание, входное сопротивление и др.).

Для организации канала связи необходимо выяснить как значения частот, при которых будут оптимальными интересующие нас величины в отдельности, так и относительный оптимум для различных критериев, рассматриваемых одновременно.

Актуальной задачей является определение минимума и максимума многоэкстремальной функции рабочего затухания с заданной точностью.

В настоящее время для решения данного вопроса широко применяется метод сканирования функции с постоянным шагом, позволяющий определить, например, глобальный минимум, но при большом количестве вычислений функции, что приводит к большим затратам времени и средств.

Введением переменного шага при определенных условиях можно сократить объем вычислений. При максимальных значениях функции (для определения минимума) шаг должен быть максимальным, а при минимальных значениях — минимальным. Отсюда следует, что

$$\Delta\omega_{i+1} = (\Delta\omega_{\max} - \Delta\omega_{\min}) \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} + \Delta\omega_{\min}, \quad i = 1, 2, 3 \ldots \qquad (1)$$

где $\Delta\omega_{i+1}$ — очередное значение шага;

$\Delta\omega_{\min}$ — шаг, который определяется точностью, необходимой для вычисления экстремальных значений;

F_i — текущее значение функции.

Предложенный алгоритм вычисления нуждается в изменениях, так как он является малоэффективным в окрестности минимума. Выражение (1) есть отражение трапецеидальной аппроксимации функции в окрестности минимума.

Применим аппроксимацию синусоидой, которая лучше отражает характер функции. Для доказательства формулы вычисления переменного шага при использовании этой аппроксимации предположим, что мы заранее можем указать характер исследуемой функции. Пусть она имеет несколько явно выраженных минимумов и максимумов, как показано на рис. 1.

Аналитическое выражение синусоиды в нашем случае принимает вид

$$F_s = F_{\text{ср}} + \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2} \sin\left(\frac{2\pi\omega}{T_{\min}} + \nu\right), \qquad (2)$$

где ν — фаза;

$T_{\min}$ — минимальный период вписываемой синусоиды.

Если известен постоянный шаг при сканировании $\Delta\omega_n$, то абсолютная погрешность δF_s определения минимума, как видно из рис. 1 выражается формулой

$$\delta F_s = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{2}\left(1 - \cos\frac{\pi\Delta\omega}{T_{\min}}\right). \tag{3}$$

Введем относительную погрешность

$$\xi F_s = \frac{\delta F_s 100\%}{F_{\max} - F_{\min}} = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\frac{\pi\Delta\omega_n}{T_{\min}}\right)\cdot 100\%, \tag{4}$$

где

$$0\% < \xi F_s < 100\%.$$

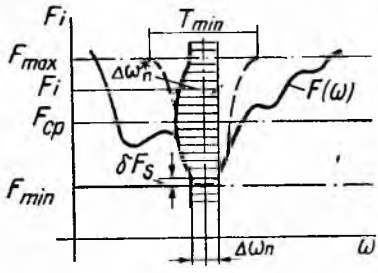


Рис. 1. Аппроксимация синусоидной функции затухания от частоты.

Пусть

$$T_{\min} \geqslant 3_{\Delta}\omega_n.$$

Тогда по формуле (4) имеем

$$\xi F_s = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\frac{\pi}{3}\right)\cdot 100\% \leqslant 25\%. \tag{5}$$

Относительная погрешность всегда меньше 25%, поэтому в дальнейшем будем считать, что $T \geqslant 3_{\Delta}\omega_n$.

Разложим в ряд Тейлора выражение (4)

$$\xi F_s = \frac{1}{2}\left(1 - \cos\frac{\pi}{T_{\min}}\Delta\omega_n\right)\cdot 100\% = \left[1 - 1 + \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{T_{\min}}\cdot\Delta\omega_n\right)^2 - 0\left\{\left(\frac{\pi}{T_{\min}}\Delta\omega_n\right)^4\frac{1}{4!}\right\}\right]\cdot 100\% \approx \frac{\pi^2}{2}\left(\frac{\Delta\omega_n}{T_{\min}}\right)^2\cdot 100\%, \tag{6}$$

где мы учли, что при выполнении

$$\left(\frac{\pi}{T_{\min}}\Delta\omega_n\right)^4\frac{1}{4!} < 0{,}05, \tag{7}$$

чем можно пренебречь.

При определении максимальных и минимальных значений относительная погрешность

$$\xi F_s = \frac{\pi^2}{4}\left(\frac{\Delta\omega_n}{T_{\min}}\right)^2\cdot 100\%. \tag{8}$$

Введем переменный шаг

$$\Delta\omega_{i+1} = \Delta^*\omega_{i+1} + \Delta\omega_n,$$
$$\Delta^*\omega_{i+1} \geqslant 0, \tag{9}$$

где $\Delta^*\omega_{i+1} = \Delta^*\omega_{i+1}(F_i)$, т. е. зависит от предыдущего значения функции.

Будем выбирать его из условия попадания F_{i+1} в $\Delta\omega_n$ — окрестность минимума при любом F_i. Тогда приращение переменного шага $\Delta^*\omega_{i+1}$ должно принимать значения для каждого F_i, как показано на рис. 1 (заштрихованная область).

С учетом сделанных замечаний предложим алгоритм вычисления переменного шага для определения экстремальных значений затухания.

1. На основании априорной информации приближенно определяем пределы изменения $F_{\max}$ и $F_{\min}$.

2. Задаемся величиной $T_{\min}$ — периодом, который соответствует синусоиде, аппроксимирующей функцию на самом узком экстремуме.

3. Исходя из заданной точности вычисления экстремумов δF_s, находим $\Delta\omega_n$ — постоянный шаг

$$\Delta\omega_n = T_{\min}\frac{2}{\pi}\sqrt{\frac{\delta F_s}{F_{\max}-F_{\min}}}. \tag{10}$$

4. Переменный шаг по найденным $T_{\min}$, $F_{\min}$, $F_{\max}$, $\Delta\omega_n$ определяется по формуле

$$\Delta\omega_{i+1} = \begin{cases} \dfrac{T_{\min}}{2\pi}\arccos\left|\dfrac{F_{\max}+F_{\min}-2F_i}{F_{\max}-F_{\min}}\right| + \dfrac{\Delta\omega_n}{2} + \alpha_{i+1}\dfrac{T_{\min}}{2} \\ \qquad \text{при } F_{\min}+\delta F_s \leqslant F_i \leqslant F_{\max}-\delta F_s; \\ \Delta\omega_n \text{ при } F_i > F_{\max}-\delta F_s, \text{ или } F_i < F_{\min}+\sigma F_s, \end{cases} \tag{11}$$

где

$$\alpha_{i+1} = \begin{cases} \dfrac{|F_i - F_{i-1}|}{F_{\max}-F_{\min}}\cos\pi\dfrac{F_i - F_{\text{ср}}}{F_{\max}-F_{\min}} \text{ при } (F_i > F_{\text{ср}}) \cap (F_i < \\ \qquad < F_{i-1}) \cup (F_i < F_{\text{ср}}) \cap (F_i > F_{i-1}; \\ 0 \qquad \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Определим эффективность алгоритма поиска экстремальных значений сравнив с методом сканирования с постоянным шагом.

Пусть затухание $F(\omega)$ равномерно распределено на интервале $[F_{\min}, F_{\max}]$. Математическое ожидание переменного шага выразится формулой

$$M\{\Delta\omega_{i+1}\}_{\text{пер}} = \int_{F_{\min}}^{F_{\max}} \Delta\omega_{i+1}(F_i)\, d\Phi_{F_i} = \int_{F_{\min}}^{F_{\max}} \Delta\omega_{i+1}(F_i)\frac{1}{F_{\max}-F_{\min}}\, dF_i, \tag{12}$$

где

$$\Phi_{Fi} = \begin{cases} 0 & \text{при } F_i < F_{\min} \\ \dfrac{F_i - F_{\min}}{F_{\max}-F_{\min}} & \text{при } F_{\min} \leqslant F_i \leqslant F_{\max}; \\ 1 & \text{при } F_i > F_{\max} \end{cases}$$

является функцией распределения затухания: $\Delta\omega_{i+1}(F_i)$ определяется формулой (11).

После вычисления (12) получаем

$$M\{\Delta\omega_{i+1}\} \approx \frac{T_{\min}}{2\pi} + \frac{\Delta\omega_n}{2}. \tag{13}$$

Математическое ожидание при постоянном шаге

$$M\{\Delta\omega_{i+1}\}_{\text{пост}} = \Delta\omega_n. \tag{14}$$

Следовательно, коэффициент эффективности алгоритма

$$K_{\text{эф}} = \frac{M\{\Delta\omega_{i+1}\}_{\text{перем}}}{M\{\Delta\omega_{i+1}\}_{\text{пост}}} \approx \frac{T_{\min}}{2\pi\Delta\omega_n} + \frac{1}{2}. \tag{15}$$

Из (10) находим

$$\frac{T_{\min}}{\Delta\omega_n} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{F_{\max}-F_{\min}}{\delta F_s}}, \tag{16}$$

тогда коэффициент эффективности можно записать так:

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{4}\sqrt{\frac{F_{\max}-F_{\min}}{\delta F_s}} + \frac{1}{2}. \tag{17}$$

Если обозначить относительную погрешность

$$\xi F_s = \frac{\delta F_s}{F_{\max} - F_{\min}} \cdot 100\%, \tag{18}$$

то

$$K_{эф} = \frac{5}{2} \frac{1}{\sqrt{\xi F_s}} + \frac{1}{2}. \tag{19}$$

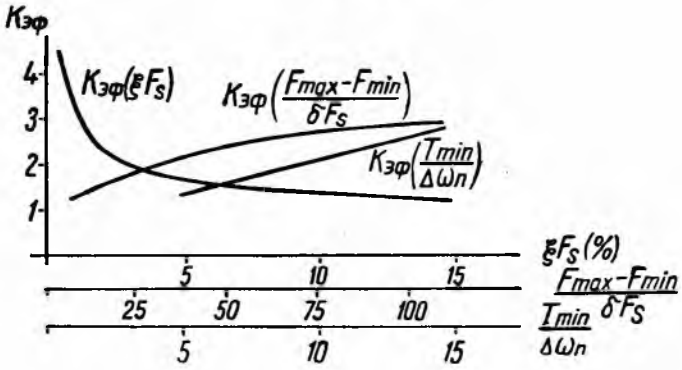


Рис. 2. График коэффициента эффективности.

Графики

$$K_{эф} = K_{эф}\left(\frac{T_{\min}}{\Delta\omega_n}\right), \quad K_{эф} = K_{эф}(\xi F_s),$$

$$K_{эф} = K_{эф}\left(\frac{F_{\max} - F_{\min}}{\delta F_s}\right)$$

представлены на рис. 2.

Определение экстремальных значений с учетом нестабильности основных параметров

Известно [4], что физическому процессу соответствует идеализированная «математическая» функция $g = g(x)$ и вторая «физическая» функция $h = h(x)$. Если $g(x)$ определяется как результат измерений или вычислений (в нашем случае имеет место и тот и другой способ определения коэффициентов матриц проводимостей элементов цепи [2], то е-значение в каждой точке x никогда не равно числу $h(x)$ в силу рассеяния значений.

Пусть задана разветвленная система произвольной конфигурации. Затухание передачи высокочастотного сигнала по каналу связи, в качестве которого взята РЭС произвольной структуры, можно выразить как функцию частоты и основных параметров разветвленной системы, т. е.

$$B = F(\omega, l), \tag{20}$$

где ω — частота;

l — n — мерный вектор основных параметров (длина, проводимость и т. д.);

l — параметры могут изменяться во времени в определенных пределах;

$$l_{1i} \leqslant l_i \leqslant l_{2i}; \; i = 1, \ldots, n. \tag{21}$$

При этом относительные изменения параметров

$$\varepsilon_i = \frac{|l_{2i} - l_{1i}|}{l_i}, \qquad (22)$$

$$i = 1, \ldots, n$$

где ε_i — изменяется в малых пределах.

Будем считать, что затухание является непрерывной функцией параметров l.

За номинальные параметры $l_{н\,i}$ примем средние значения

$$l_{н\,i} = l_{1i} + \frac{\varepsilon_i}{2} l_{1i} = l_{1i}\left(1 + \frac{\varepsilon_i}{2}\right), \qquad (23)$$

$$i = 1, \ldots, n$$

а соответствующее им затухание назовем также номинальным. Тогда изменение затухания Δb относительно номинального при изменении параметров l в определенных пределах (21) можно оценить сверху с точностью до бесконечно малых более высокого порядка следующим образом:

$$\Delta b = \left|\frac{\partial F}{\partial l_1}\right| \Delta l_1 + \left|\frac{\partial F}{\partial l_2}\right| \Delta l_2 + \ldots + \left|\frac{\partial F}{\partial l_n}\right| \Delta l_n = \sum_{i=1}^{n} \left|\frac{\partial F}{\partial l_i}\right| \Delta l_i, \qquad (24)$$

где

$$\Delta l_i = l_i \frac{\varepsilon_i}{2}.$$

$$i = 1, \ldots, n$$

Определить производные невозможно в силу чрезвычайной громоздкости аналитического выражения функции затухания, поэтому в дальнейшем мы заменим частные производные приращениями.

Чтобы определить экстремальные значения с учетом нестабильности значений основных параметров при номинальных значениях параметров $l_н$ с переменным шагом, по формуле (11) находим экстремумы затухания.

В задачах оптимизации при определении параметров канала по минимуму затухания также необходимо учитывать нестабильность основных параметров. Проведем выбор минимального уровня затухания из условия, что этот минимальный уровень, который не превышается в полосе $\Delta\omega_{пп}$ затуханиями, полученными при изменениях параметров l в определенных пределах.

В формуле (24) заменим частные производные приращениями

$$\left|\frac{\partial F}{\partial l_i}\right| \approx \left|\frac{F(\omega,\ l + \Delta l_i) - F(\omega,\ l)}{\Delta l_i}\right|. \qquad (25)$$

Тогда

$$\Delta b = \sum_{i=1}^{n} \left|\frac{F(\omega, l + \Delta l_i) - F(\omega, l)}{\Delta l_i}\right| \Delta l_i = \sum_{i=1}^{n} |F(\omega,\ l + \Delta l_i) - F(\omega,\ l)|. \qquad (26)$$

Проведем оптимизацию канала по минимуму затухания с учетом предложенного выше алгоритма, преобразованного для определения минимальных значений.

Покажем, что выбранный диапазон частот для канала по минимуму затухания при изменении основных параметров определяется в зависимости от характера изменения значений функции затухания (рис. 3).

По формуле (26) найдем приращения в точке $\omega_1 = \omega$

$$\omega_2 = \omega - \frac{\Delta\omega_{пп}}{2} \text{ и } \omega_3 = \omega + \frac{\Delta\omega_{пп}}{2},$$

т. е.

$$\Delta b_1 = \sum_{i=1}^{n} |F(\omega_1,\ l + \Delta l_i) - F(\omega_1,\ l)|;$$

$$\Delta b_2 = \sum_{i=1}^{n} |F(\omega_2,\ l + \Delta l_i) - F(\omega_2,\ l)|; \qquad (27)$$

$$\Delta b_3 = \sum_{i=1}^{n} |F(\omega_3,\ l + \Delta l_i) - F(\omega_3,\ l)|.$$

Максимально возможное затухание в точках *1*, *2*, *3* полосы $\Delta\omega_{пп}$ (рис. 3) примет значение

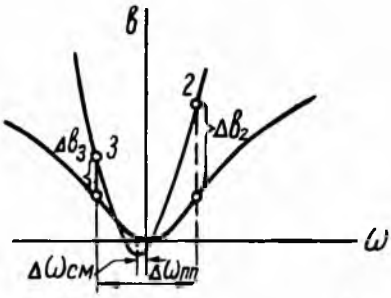


Рис. 3. Определение направления и величины смещения.

$$b_1 = b_{1н} + \Delta b_1;$$
$$b_2 = b_{2н} + \Delta b_2; \qquad (28)$$
$$b_3 = b_{3н} + \Delta b_3,$$

где $b_{1н}$; $b_{2н}$; $b_{3н}$ — номинальные значения затухания.

Чтобы определить направление смещения диапазона канала $\Delta\omega_{пп}$, аппроксимируем окрестность минимума параболой, проходящей через точки *1*, *2*, *3* (рис. 3).

Начало координат перенесем в точку *1* (рис. 3), тогда

$$b'_1 = 0;$$
$$b'_2 = b_{2н} - \Delta b_2 - b_1; \qquad (29)$$
$$b'_3 = b_{3н} + \Delta b_3 - b_1.$$

Не нарушая общности, запишем уравнение параболы при $b_3 < b_2$

$$b = \alpha(\omega - \Delta\omega_{см})^2 + \beta, \qquad (30)$$

где $\Delta\omega_{см}$ — величина смещения полосы.

Из условия прохождения параболы (30) через точки *1*, *2*, *3* (рис. 3) получим три уравнения:

$$0 = \alpha\Delta\omega_{см} + \beta;$$
$$b'_2 = \alpha\left(\frac{\Delta\omega_{пп}}{2} - \Delta\omega_{см}\right)^2 + \beta; \qquad (31)$$
$$b'_3 = \alpha\left(\frac{\Delta\omega_{пп}}{2} + \Delta\omega_{см}\right)^2 + \beta.$$

Решая эту систему относительно $\Delta\omega_{см}$, найдем

$$\Delta\omega_{см} = \frac{\Delta\omega_{пп}}{2} \cdot \frac{1 - \sqrt{\dfrac{2\Delta\omega_{пп}b'_2 + b'_3 - b'_2}{2\Delta\omega_{пп}b'_3 + b'_3 - b'_2}}}{1 + \sqrt{\dfrac{2\Delta\omega_{пп}b'_2 + b'_3 - b'_2}{2\Delta\omega_{пп}b'_3 + b'_3 - b'_2}}}. \qquad (32)$$

В новом диапазоне необходимо определить максимальное значение затухания с учетом нестабильности основных параметров.

Вариации $\Delta l_i = 1, 2 \ldots, n$ происходят вследствие различных случайных факторов (изменения температуры, влажности, давления и т. д.) и учет этих причин можно свести к вероятностному. В допустимых пределах вариаций $\{\Delta l_i\}_{i=1}^{n}$ можно считать распределение случайных величин по нормальному закону вокруг средних номинальных значений $l_{iн}$.

Тогда, абсолютное изменение величины затухания

$$\Delta b = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial F}{\partial l_i} \right| \Delta l_i$$

также является нормально распределенной случайной величиной со средним $b_н$.

Полагая, что в пределах допусков величин $\Delta l_i = 3\sigma_i$, имеем

$$\sigma_i = \frac{\Delta l_i}{3}. \qquad (33)$$

Тогда дисперсия изменения величин затухания будет

$$D_{\Delta b} = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial F}{\partial l_i} \right|^2 D_{\Delta l_i}, \qquad (34)$$

а среднеквадратичное отклонение затухания

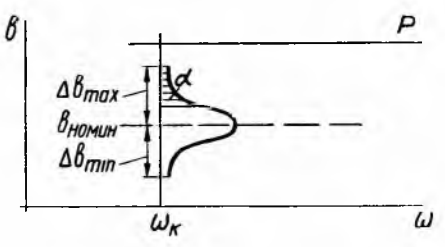


Рис. 4. Распределение вероятности для частоты $\omega_к$.

$$\sigma_{\Delta b} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial F}{\partial l_i} \right|^2 \left(\frac{\Delta l_i}{3} \right)^2}. \qquad (35)$$

Согласно полученным формулам (34) и (35) можно считать, что величина максимально возможного возмущения затухания за счет случайности параметров определяется следующим значением:

$$\Delta b_{\max \text{ возм}} = 3\sigma_{\Delta b} = 3 \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left| \frac{\partial F}{\partial l_i} \right|^2 \left(\frac{\Delta l_i}{3} \right)^2}. \qquad (36)$$

Для практических расчетов в формуле (36) следует заменить частные производные приращениями (25).

Фактически кривая затухания с вероятностью 99,7% расположена не выше кривой затухания, определенной для каждого значения частоты

$$b_{\max}(\omega) = b_н(\omega) + \Delta b_{\max \text{ возм}}(\omega). \qquad (37)$$

Следовательно, выбор канала связи на основании чувствительности к существующей неопределенности исходных параметров, приводит к выполнению следующих этапов.

1. Для каждой частоты ω существует отклонение кривой затухания от номинальных. Считая это возмущение в допустимых пределах нормальным, построим распределение вероятностей для возможных отклонений (рис. 4).

2. Задаваясь вероятностью $\alpha = \alpha_{зад}$, строим значение Δb_α [3]. (Приложение 1) по таблице процентных точек нормального распределения.

3. Получив для каждой частоты $\Delta B_\alpha(\omega)$ и $B_н(\omega) + \Delta B_\alpha(\omega)$ в окрестности заданного диапазона вокруг минимума выбираем участок, включающий этот минимум таким образом, чтобы выполнялось условие

$$b_н(\omega') + \Delta B_\alpha(\omega') = B_н(\omega' + \Delta\omega) + \Delta B_\alpha(\omega' + \Delta\omega), \qquad (38)$$

где $\Delta\omega$ — фиксированная полоса работы канала связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Белоус, В. Е. Ефремов. Средства связи в электрических сетях. «Энергия», 1968.
2. И. Ф. Огороднейчук, В. Д. Остроухов. Расчет каналов связи по симметричным трехфазным сетям методом теории схем с многополюсными элементами. «Электричество», 1967, № 5.
3. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники, ч. 2, Изд-во «Советское радио», 1968.
4. Р. Белман, С. Дрейфус. Прикладные задачи динамического программирования. Изд-во «Наука», 1965.

РАДИОВОЛНОВОЙ ДАТЧИК БЕСКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ УРОВНЯ РУДЫ В БУНКЕРАХ ГОКов

С. А. Волотковский, М. М. Задериголова

Днепропетровск

Создание автоматических устройств контроля технологических процессов, эффективных в техническом и в экономическом смысле, что весьма важно для большинства систем горной автоматики, связано с разрешением многих противоречий.

Основными противоречиями являются: а) необходимость создания устройств автоматического контроля с высокой технической эффективностью при малых затратах производства; б) обеспечение устройствами автоматического контроля довольно сложных задач при простых структуре и конструкции, упрощающих их обслуживание и снижающих эксплуатационные расходы; в) обеспечение условий высокой надежности устройств автоматического контроля при учете перечисленных требований.

Устройства для контроля или фиксации уровня руды в бункерах ГОКов находящиеся в эксплуатации, либо требуют соприкосновения чувствительных элементов с горной породой (механические, емкостные, электродные [1]), либо довольно громоздки (ультразвуковые), обладающие рядом специфичных особенностей (радиационные), не обеспечивая при этом заданной надежности и высокой разрешающей способности.

Интенсивная разработка бесконтактной аппаратуры горной автоматики позволила значительно повысить задаваемый уровень надежности систем автоматического управления и контроля технологических процессов без их существенного структурного усложнения по сравнению с аналогичными системами, выполненными на релейно-контактной аппаратуре. При этом достигался выигрыш в общих показателях массы, размеров, энергопотребления, удобства обслуживания [2].

Исследования, проведенные в Днепропетровском горном институте [3], показали, что для решения указанных задач наиболее пригоден радиоволновой метод. В качестве конкретного примера в статье приводится описание конструкции радиоволнового датчика, разработанного авторами для бесконтактного контроля уровня горных пород в бункерах.