

$$H_1 = (u_{22}/u_{12} - u_{23}/u_{13})(t - m_1\tau_1 - m_2\tau_2); \quad (17)$$

$$H_2 = \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left(\frac{t^2}{2} - m_1\tau_1 t + m_1^2 \tau_1^2 \right) + \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m_2\tau_2 (t - m_1\tau_1); \quad (18)$$

$$H_3 = \left(\frac{u_2}{u_1} - 3 \frac{u_{21}}{u_{11}} + 3 \frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \frac{t^3}{6} + \left(\frac{u_{21}}{u_{11}} - 2 \frac{u_{22}}{u_{12}} + \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) m_1\tau_1 t (t - m_1\tau_1) + \left(\frac{u_{22}}{u_{12}} - \frac{u_{23}}{u_{13}} \right) \left(\frac{m_1\tau_1 + m_2\tau_2}{2} t^2 + m_1\tau_1 m_2\tau_2 t \right). \quad (19)$$

Формулы (17) — (19) приобретают более простой вид, если все каскады имеют одинаковые параметры: $m_1 = m_2 = m_3$ и $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3$. С уменьшением постоянной времени $m\tau$ корректирующих цепей выражения для обобщенных параметров приближаются к соответствующим формулам (7)—(9) для идеальных дифференциаторов.

Рассмотренный способ прямого преобразования электрических параметров элементов пассивных двухполюсных

цепей RC -, RL - и RLC -типов при помощи обобщенных параметров измерительной схемы может найти применение при создании измерителей параметров многоэлементных двухполюсников с широкими функциональными возможностями.

Литература

1. Мартяшин А. И. и др. Основы инвариантного преобразования параметров электрических цепей / Под ред. А. И. Мартяшина. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Фаянс А. М. Определение параметров многоэлементных RLC -двухполюсников по характеристикам переходного процесса // Датчики и системы. 2011. № 4. С. 29—33.
3. Иванов В. И., Титов В. С., Голубов Д. А. Применение обобщенных параметров измерительной цепи для идентификации многоэлементных двухполюсников // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 43—45.
4. Пат. № 2422838 РФ. Способ и устройство измерения параметров многоэлементных двухполюсников / В. И. Иванов, В. С. Титов, А. С. Петров // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 18.

Дата принятия 13.04.2012 г.

621.317.7+389.1(075.8)

Измерение феррозондом в режиме детерминированного хаоса

В. П. КОРОТКИЙ, В. Н. ИЛЬИН

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь, e-mail: ilyin@inel.bas-net.by

Рассмотрены возможности проведения измерений магнитомодуляционным преобразователем в режиме детерминированного хаоса. Обсуждается принцип построения преобразователя.

Ключевые слова: феррозонд, магнито- и ферромодуляционные преобразователи, детерминированный хаос.

The possibilities of measurements by magnetic modulation converter in deterministic chaos regime are considered. The converter construction principle is discussed.

Key words: ferroprobe, magnetic and ferromodulation converters, deterministic chaos.

Системы линейных дифференциальных уравнений, являющихся приближениями по своей сути нелинейного Мира, благодаря упрощенным предположениям позволили описать многочисленные приложения и легли в основу их моделей. Они были некогда единственно приемлемыми, так как отвечали духу времени, требованиям получения решения любым способом, но в замкнутом виде (в виде формулы). В связи с возможностями вычислительной техники необходимость в упрощении моделей приобретает второстепенное значение, на первый план выдвигается адекватность математической модели сущности описываемого ею процесса. Стало возможным применять модели в виде систем нели-

нейных дифференциальных уравнений. И хотя их решения, как правило, нельзя представить в замкнутом виде, но ЭВМ позволяет наблюдать за характером их поведения. При некоторых сочетаниях параметров модели ведут себя непредсказуемо. Решения в виде временных реализаций напоминают шум, их характер зависит от начальных условий. Такое явление получило название детерминированного хаоса. Оно часто встречается, но мало изучено, характерно для нелинейных колебательных систем и контуров.

В измерительных технологиях детерминированный хаос может представить интерес в связи с применением активных датчиков (первичных преобразователей) в виде нели-

нейных колебательных контуров, активированных источниками возбуждения. Возникает вопрос: в контуре с параллельно включенными элементами $L(i)$, C , R , возбужденном источником тока, что является исключением — упрощенные процессы или детерминированный хаос? Этот вопрос не имеет ответа, поскольку в контуре бесконечно много хаотических режимов, о чем свидетельствуют численные и натурные эксперименты [1—3]. Для ответа на этот вопрос также бессмысленно применять параметрический подход, который разработан скорее для пояснения, чем для анализа принципов действия преобразователей в сугубо нелинейном режиме, так как он априори предполагает периодические изменения параметра, а значит, отсутствие хаоса. Таким образом, уверенность в том, что параметр $L(i)$ (индуктивность, зависящая от протекающего по ней тока) изменяется нужным образом и периодически, может быть обоснована только в результате практических испытаний. Однако при этом приходится сомневаться в том, не работает ли датчик на грани хаоса и оптимально ли выбран режим. Определению доверительных интервалов изменения параметров датчика может поспособствовать лишь его адекватная математическая модель. Как известно, шум ограничивает точность измерений, а появление хаоса может привести к невозможности проведения измерений и предсказания их результатов.

Безусловно, применительно к рассматриваемому ниже в качестве примера магнитомодуляционному преобразователю (феррозоду) с характерными устоявшимися метрологическими показателями многие разработчики, которые не имели в свое время ни малейшего представления о детерминированном хаосе, связанные с его появлением проблемы решали простым подбором параметров. Но дело не в конкретном, тщательно отработанном к настоящему времени датчике, а в проблеме в целом, которая ранее ускользала от внимания или не замечалась. Приводимый ниже анализ хотя и является частным решением задачи устойчивости системы к детерминированному хаосу, однако его можно обобщить, поскольку нелинейных систем и эффектов значительно больше, чем описывающих их моделей. Под обеспечением устойчивости в рассматриваемом случае понимает-

ся создание работоспособной конструкции, схемы в предположении возникновения или существования хаоса, а не меры по предотвращению возможности его возникновения.

Таким образом, в статье показана принципиальная возможность измерения напряженности магнитного поля магнитомодуляционным преобразователем, характеризующимся детерминированным хаосом, и разработки модели магнитометра, не восприимчивого ко всем возникающим и существующим в модуляторе режимам.

Модель и расчеты. Для измерения напряженности постоянных и низкочастотных магнитных полей широко применяется феррозонд, представляющий собой прецизионный магнитный модулятор. Получили распространение два его вида, основанные на выделении второй гармоники частоты возбуждения и ее измерении и обработке временных интервалов перемагничивания нелинейного элемента (ферромагнитного сердечника), по которым и судят о напряженности поля [4]. Причина, осложняющая понимание принципа действия феррозонда, связана с неизбежным присутствием емкостей, шунтирующих съемную обмотку и обмотку накачки. Емкости можно вводить и специально, например, в феррозонд, работающий на второй гармонике, для получения параметрического усиления. Как отмечается в [4, с. 65], «применять его все же следует с осторожностью ... имелись случаи, когда феррорезонансная цепь возбуждения становилась источником появления ложного сигнала... Поэтому выбор феррорезонансного режима требует последующего тщательного выявления и устранения подобных негативных явлений». Приведенные соображения подтверждают сказанное выше и требуют рассмотрения уточненной модели феррозонда в виде приближения нелинейным колебательным контуром. Для получения хаоса нелинейность необходима, но недостаточна. Еще следует добавить определенные сочетания параметров контура, частоты и амплитуды внешнего возбуждения. Относительно нелинейности отметим, что часто для рассмотрения феррозонда кривую перемагничивания аппроксимируют функцией $B = \varphi H - \gamma H^3$, где φ , γ — коэффициенты; H , B — напряженность и индукция магнитного поля [4]. На практике и при графоаналитическом рассмотрении пользуются кусочно-линейной аппроксима-

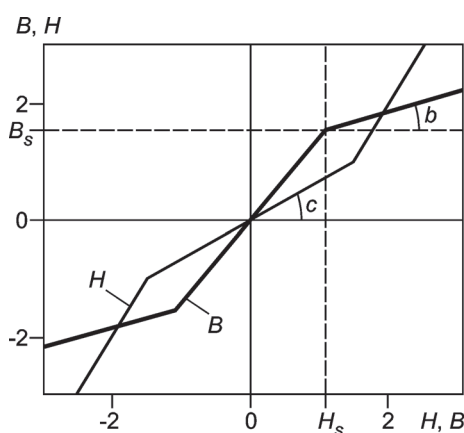


Рис. 1. Кривые перемагничивания ферромагнитного материала в виде кусочно-линейных взаимно обратных функций

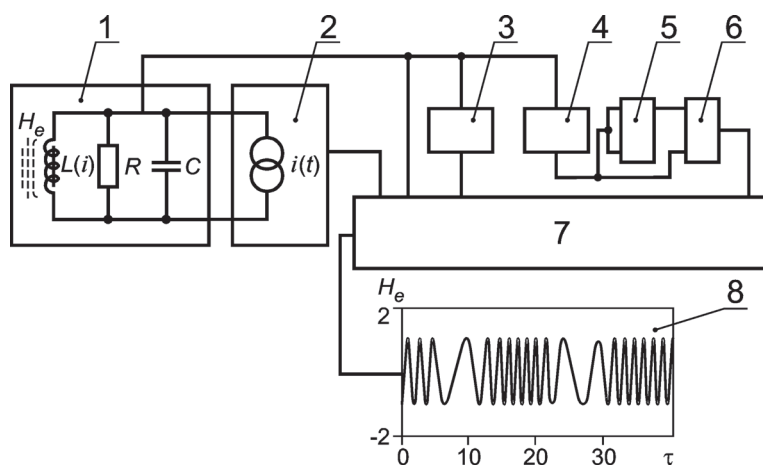


Рис. 2. Модель магнитометра:

1 — модулятор; 2 — источник тока возбуждения; 3 — дифференциатор; 4 — интегратор; 5, 6 — перемножители; 7 — сумматор; 8 — осциллограф; H_e — напряженность внешнего измеряемого магнитного поля

цией [4]. В этой связи для моделирования в MATHCAD можно предложить линейно-кусочные функции (рис. 1), справедливые при любом значении аргумента [5]:

$$H(B) = \frac{aB}{B_s} - \frac{a-H_s}{2} \left| \frac{B}{B_s} + 1 \right| - \frac{H_s-a}{2} \left| \frac{B}{B_s} - 1 \right|;$$

$$B(H) = \frac{H}{aH_s} - \frac{a^{-1}-B_s}{2} \left| \frac{H}{H_s} + 1 \right| - \frac{B_s-a^{-1}}{2} \left| \frac{H}{H_s} - 1 \right|,$$

где a — коэффициент; H_s, B_s — напряженность и индукция насыщения сердечника; $b = \arctg(a^{-1})$; $c = \arctg(H_s/B_s)$.

На рис. 2 приведена структурная схема магнитометра. Модулятор 1 содержит элементы $L(i), R, C$, соединенные параллельно с генератором возбуждения 2 в виде источника тока $i(t)$. Модулятор, таким образом, представлен ферромагнитным сердечником, охваченным обмоткой, в которую подается ток возбуждения. Эта же обмотка является и сигнальной.

Для контура $L(i), R, C$ справедливо уравнение

$$C \frac{d^2 \Phi}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt} + i_L = i, \quad (1)$$

где C — емкость контура; Φ — магнитный поток в сердечнике катушки индуктивности $L(i)$; i_L — ток в ней; R — эквивалентное сопротивление контура.

Вводя обозначения

$$\Phi_0 = I_0 L_0; \Phi / \Phi_0 = B; \omega_0^2 = (L_0 C)^{-1}; \tau = \omega_0 t; p = \omega / \omega_0;$$

$$K = R^{-1} \sqrt{L_0 / C} = (RC \omega_0)^{-1}; i = I_m \sin \omega t;$$

$$H_m = I_m / I_0; H_L = I = i_L / I_0$$

и полагая, что L_0 — некоторая индуктивность, определяемая протекающим через нее током I_0 , уравнение (1) контура можно записать в безразмерном виде

$$d^2 B / d\tau^2 + K dB / d\tau + I = H_m \sin p\tau. \quad (2)$$

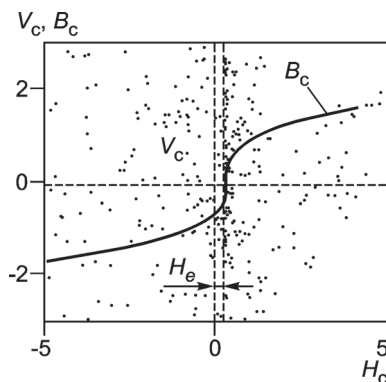


Рис. 3. Совмещение двух фазовых портретов с отображениями Пуанкаре. На одном из них изображен хаос, расположенный на инвариантной к нему функции перемагничивания. На втором — хаос в виде бесформенного облака ($K = 0,005$), при $K = 0,05$ и $H_e = 0$ облако проявляет симметрию и превращается во фракталы

На катушку индуктивности воздействуют напряженность внешнего измеряемого магнитного поля H_e и магнитного поля H_L , создаваемого током I , т. е. $H = H_L + H_e$; далее ограничимся зависимостью $H = B^3$ [1—3, 6]. Этого достаточно для возникновения хаоса, тогда (2) запишем окончательно в виде, удобном для компьютерного моделирования:

$$\frac{d^2 B}{d\tau^2} + K \frac{dB}{d\tau} + B^3 - H_e = H_m \sin p\tau. \quad (3)$$

Следует отметить, что уравнение (3) лишь на первый взгляд кажется простым, однако в нем скрывается глубокое внутреннее содержание. Его изучают при $H_e = 0$ на протяжении ряда лет с целью установления критерия возникновения хаоса, но сделано пока не очень много [1—3].

В натурных и численных экспериментах хаос наблюдается в широком диапазоне значений параметров [1—3]. Создадим хаос, полагая

$$H_e = 0,3; H_m = 5; p = 0,5; K = 0,005;$$

$$h = m2\pi/n; n = 100000; m = 500; \tau = 1, \dots, n,$$

и решим (3) по программе MATHCAD. Результаты решения приведены на рис. 3, где совмещены две системы координат V_c, H_c и B_c, H_c (индексы «с» обозначают стробирование). Эти фазовые портреты представлены точками отображения Пуанкаре, полученными при стробировании V, H, B с частотой второй гармоники генератора возбуждения (имитация синхронного детектирования, применяемого в феррозондах). В координатах V_c, H_c имеем бесформенное облако точек (хаос), а в координатах B_c, H_c хаос прочерчивает инвариантную

к нему кривую перемагничивания $B(H) = \sqrt[3]{H}$. Центр кривой перемагничивания смещен вправо на величину $H_e = 0,3$. Таким образом, в данной ситуации измерения, базирующиеся на синхронном детектировании четных (второй) гармоник при действии на сердечник внешнего (измеряемого) магнитного поля ($H_e = 0,3$), становятся невозможными. То же можно сказать и о принципах измерений напряженности магнитного поля, основанных на расчетах временных интервалов перемагничивания сердечника, наблюдающихся в напряжении V [7].

Перейдем к рассмотрению возможной процедуры измерения. Отметим при этом, что магнитными модуляторами (впрочем, как и всеми модуляторами) измеряются магнитные поля в полосе частот, значительно меньших частоты модуляции (возбуждения). Поэтому для большего эффекта, убедительности и наглядности введем в контур сигнал с угловой модуляцией

$$H_e = 1 \cos(6\tau + 6 \sin 0,7\tau), \quad (4)$$

полоса частот которого лежит в полосе частот детерминированного хаоса. Следовательно, верхняя граничная частота этого сигнала будет превышать частоту возбуждения модулятора приблизительно в 15 раз, что отражено на спектрограмме рис. 4, полученной в результате фурье-анализа FV напряжения V при $m = 50$.

Сигнал H_e оказался полностью замаскирован хаосом. На спектрограмме FV (см. рис. 4) видны экстремумы, некото-

рые из них соответствуют нечетным гармоникам частоты возбуждения, обозначенным цифрами; частота первой гармоники на шкале частот f равна 2. Задача состоит в выделении из хаоса (измерении) сигнала H_e .

Согласно (3) измеряемый сигнал H_e можно восстановить следующим образом (см. рис. 2): на контуре зафиксировать сигнал напряжения $V = dB/dt$, продифференцировать его, т. е. получить сигнал d^2B/dt^2 (емкостный ток); проинтегрировать сигнал V и получить B ; провести масштабирование V , умножив на K , и определить силу тока через резистор. Далее индукцию B возвести в куб. Сделать это можно двумя перемножителями 5 и 6 с учетом того, что каждый из них имеет по два входа. Затем эти сигналы сложить с сигналом тока накачки сумматором 7, предварительно осуществив фазировку и масштабирование всех сигналов, и получить информационный H_e -сигнал (4) на экране осциллографа 8. Напомним, что в простейшем случае дифференцирование и интегрирование можно осуществить RC -цепочкой.

Для нахождения напряженности магнитного поля в нелинейной индуктивности (возведения в куб $B(t)$) использовали перемножители (см. рис. 2). Известно, что при отсутствии гистерезиса зависимость $H(B)$ в общем случае можно представить более сложной функцией — в виде полинома нечетной степени $H = aB + cB^3 + dB^5 + \dots$. Это не меняет сути, но усложняет схему, так как теперь придется увеличить число перемножителей, соединив их определенным образом, а также применить сумматор, имеющий большее число масштабируемых входов. Если наиболее подходящей для сердечника окажется кусочно-линейная аппроксимация, то вместо перемножителей можно воспользоваться функцией $H(B)$, обратной $B(H)$; в принципе ее также можно реализовать на аналоговых элементах, диодах и операционных усилителях.

Можно отметить, что рассмотренная схема по своей структуре не сложнее традиционного магнитометра с синхронным детектором, который выполнен на перемножителе и избирательном усилителе и настроен на вторую гармонику частоты возбуждения.

Выводы. Показано, что в магнитном модуляторе может наблюдаться детерминированный хаос. При этом в процедуре известных методов модуляции сигнал, содержащий информацию, должен отражаться в изменении одного из параметров несущей (частоты, амплитуды или фазы). При динамическом хаосе о каком-либо виде модуляции и его подобию говорить не приходится. Можно лишь констатировать совместный результат сложного воздействия на модулятор информационного сигнала и гармонического сигнала накачки и феноменологически описать принцип извлечения информационного сигнала из хаоса (осуществление демодуляции). Алгоритм действует как в хаотическом, так и в конвергентном режимах работы модулятора.

Оказалось, что для создания магнитометра достаточно знать лишь кривую перемагничивания $H(B)$. Для нелинейной динамики эта задача, так же как и выбор модели, является ключевой. Для ее решения требуются соответствующие исследования при помощи натурного эксперимента. Кривую перемагничивания можно получить, используя сердечники из специальных материалов с учетом их геометрических размеров. На модели (3) можно проверить, что неустойчивость кривой перемагничивания в некоторых пределах допустима и не приводит к резкому изменению погрешности измерения.

В магнитометрии, прежде всего, уделяется внимание разработке новых, чувствительных к магнитным полям элементов на основе различных физических эффектов. Каждый прибор используется по своему назначению. Отметим, что потенциально прибор на основе предлагаемого решения может характеризоваться линейной передаточной характеристикой в большом динамическом диапазоне, широкополосностью и отсутствием фазовых искажений. Следовательно, его можно применять как универсальную магнитную антенну, а также для регистрации импульсных магнитных полей с широким спектром частот, включая постоянную составляющую.

Подчеркнем, что речь идет не о замене феррозондов, а о принципиальной возможности работы в режиме детерминированного хаоса. Альтернативу феррозонду на второй гармонике по чувствительности могут составить лишь квантовые магнитометры. Однако следует обратить внимание на то, что стоило только записать уравнение феррозонда в общем виде, отражающем его суть во всем известном спектре явлений, как концептуальная процедура измерения, замаскированная в прошлом деформированной моделью, стала очевидной. Нелинейное уравнение феррозонда оказалось достаточно простым, не абстрактным, но тем не менее не поддающимся детальному разбору. Последнего удалось избежать и предложить модель непосредственно для практического применения, несмотря на то, что детали и природа хаоса оказались так и не выясненными.

Так как система уравнений (3) неинтегрируемая и ее гармоники можно рассчитать приближенно разработанными для этих целей методами [8], не исключено, что одновременно с регулярными в них присутствуют хаотические составляющие, не различимые по результатам численного спектрального анализа Фурье. Гармоники не представляются «чистыми» спектральными линиями, так как всегда существует дисперсия амплитуды, частоты и фазы гармоник. В таком случае (для этого в схеме не нужны никакие источники шумов) подобные явления приведут к неустойчивости и дрейфу нуля приборов, основанных на детектировании гармоник. Процессы, наблюдаемые в феррозонде на второй гармонике, отмечали и изучали многие авторы и не без оснований их приписывали некогерентному поведению магнитных доменов ферромагнитного материала при перемагничивании периодическим магнитным полем, иначе говоря, магнитному шуму. Не исключено, что некорректная настройка феррозонда может привести к появлению в нем детерминированного хаоса, имитирующего те же явления.

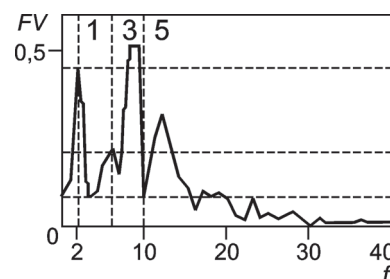


Рис. 4. Результаты фурье-анализа FV напряжения V на выходе магнитного модулятора. Цифрами 1, 3, 5 обозначены гармоники частоты возбуждения; на оси частот f первая гармоника соответствует делению 2

Л и т е р а т у р а

1. Кузнецов С. П. Динамический хаос. М.: Мир, 1990.
2. Мун Ф. Хаотические колебания. М.: Мир, 1990.

3. Короткий В. П. Детерминированный хаос в модели колебательного контура с нелинейной индуктивностью // Нелинейный мир. 2010. Т. 8. № 12. С. 758—763.

4. Афанасьев Ю. В. Феррозондовые приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1986.

5. Короткий В. П. Модель магнитомодуляционного преобразователя // Измерительная техника. 2009. № 1. С. 47—51; Korotkii V. P. A model of a magnetomodulation converter // Measurement Techniques. 2009. V. 52. N 1. P. 74—80.

6. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах. М.: Мир, 1968.

7. Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. Л.: Энергия, 1978.

8. Горяченко В. Д. Элементы теории колебаний. М.: Высшая школа, 2001.

Дата принятия 13.02.2012 г.

550.38

Влияние техногенных магнитных полей на геомагнитные измерения в обсерваториях

О. Л. СОКОЛ-КУТЫЛОВСКИЙ, Д. С. ТЯГУНОВ

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН,
Екатеринбург, Россия, e-mail: s-k52@mail.ru

Показано, что индексы геомагнитной активности A и K , определяемые магнитными обсерваториями в периоды спокойного и слабо возмущенного магнитного поля Земли, могут быть искажены в результате влияния магнитных помех, создаваемых техногенными источниками. Приведены примеры таких искажений.

Ключевые слова: геомагнитная активность, техногенный магнитный шум.

It is shown that A and K indices of geomagnetic activity determined by magnetic observatories during the periods of quiet and slightly perturbed Earth magnetic field could be distorted due to magnetic noise from technogenic sources. The examples of such distortions are demonstrated.

Key words: geomagnetic activity, technogenic magnetic noise.

Изучение магнитного поля Земли как источника данных о строении нашей планеты и протекающих в ее недрах процессах, а также солнечно-земных связях — одна из фундаментальных проблем геофизики. Магнитные исследования востребованы и в повседневной жизни общества. С развитием техногенной инфраструктуры возрастает их зависимость от возникающих аномальных явлений, связанных с поведением магнитного поля. Как известно, особую опасность представляют сильные магнитные бури, которые воздействуют на системы энергоснабжения, воздушные и космические перевозки, на здоровье людей. С резким ростом энергетической насыщенности промышленной и бытовой сферы возникла и новая проблема — техногенный магнитный шум, который в крупных промышленных центрах сопоставим с влиянием магнитных бурь.

Публикуемые в интернете индексы геомагнитной активности являются ее количественной оценкой и используются в геофизике для контроля за состоянием магнитосферы, в технике космической связи и дальней радиосвязи на коротких волнах — для прогноза оценки прохождения радиоволн коротковолнового диапазона, в биомедицине — для предупреждения населения о магнитных бурях. По результатам измерения вариаций магнитной индукции определяются индексы A и K , характеризующие магнитное и ионосферное возмущения. Индекс K показывает геомагнитную активность за каждые 3 ч, начиная с 00:00 UTC. Находят отклонения

индекса K относительно значений спокойного дня конкретной обсерватории и выбирают наибольшее значение. По этим данным вычисляют индексы K_p и A . Индекс A представляет собой дневное среднее и его рассчитывают следующим образом. Каждое измеренное значение индекса K , полученное с трехчасовым интервалом, по специальной таблице преобразуют в эквивалентный индекс, и определенные в течение дня его значения усредняют. В результате находят индекс A , который в обычные дни не превышает 100, а во время геомагнитных бурь может достигать 200 и более. Текущие значения индексов геомагнитной активности, используемые в технике коротковолновой дальней радиосвязи, постоянно публикуются на многих сайтах в интернете. При этом предполагается, что основная часть геомагнитных вариаций в зоне расположения магнитной обсерватории создается магнитосферой Земли.

До относительно недавнего времени это было действительно так. Но с непрерывным увеличением энергопотребления в быту и промышленности, быстрым ростом мегаполисов, развитием всех видов городского, пригородного и междугородного транспорта, особенно на электрической тяге, а также с расширением сети линий электропередач разного уровня, охватывающих огромную площадь поверхности Земли, давно назрела необходимость учитывать при геомагнитных измерениях электромагнитный шум техногенного происхождения. Техногенный электромагнитный шум,