

ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ НЕБОЛЬШОГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ЦЕНТРИФУГАМИ

Б. Хабиб

Центрифуги, применяемые при обогащении урана, используют электрические моторы для вращения роторов с большой скоростью. Протекающие в этих моторах токи вызывают электромагнитное излучение. Данная статья предлагает модель для оценки интенсивности излучения в зависимости от расстояния до предприятия с центрифугами. Обсуждаются зависимость излучаемой мощности от размера предприятия, источники шума на частотах, при которых работают моторы, и средства обнаружения сигнала от обогатительной установки с центрифугами. Как показывают результаты, предприятие с тысячей работающими центрифугами типа Р-2, является источником электромагнитного излучения, которое должно обнаруживаться на расстоянии 0.5-3 км при отсутствии экранирования.

Б. Хабиб работает в Принстонском университете, Принстон, штат Нью-Джерси, США.

Статья получена редакцией 16 августа 2006 года и принята к опубликованию 13 декабря 2006 года.

Автор благодарен профессору Фрэнку фон Хиппелю за многочисленные ценные предложения технического и редакционного характера по данной работе. Автор благодарит также профессора Харольда Фейвесона и Зиа Миана за полезные советы, а также Александра Глейзера за руководство в постановке эксперимента, упомянутого в Приложении.

Почтовый адрес для корреспонденций: B.Habib, 2100 Sayre Drive, Princeton, NJ 08540, USA. E-mail: bhabib@princeton.edu.

ВВЕДЕНИЕ

Технология центрифуг быстро стала одним из методов обогащения урана во всем мире. Основное преимущество этой технологии заключается в том, что она требует гораздо меньше энергии, чем газодиффузионный процесс¹. Кроме того, она обладает значительной модальностью и поэтому имеет возможность наращивания. Хотя процесс диффузии технически проще для реализации, это препятствие для центрифуг быстро теряет смысл в результате успехов в компьютерном моделировании и в новых материалах. Благодаря таким преимуществам и почти полному отсутствию потери частиц, эта технология вскоре стала также ведущей для скрытных обогатительных установок. В качестве примера на Рис.1 показана иранская обогатительная установка в Натансе².

Производительность разделения газовой центрифуги зависит от ее физических характеристик - длины (L), радиуса (r) и угловой скорости (ω). Она пропорциональна выражению $(\omega r)^2 L^3$, а также зависит от скоростей потока входящих и выходящих газов и от силы потока, направленного против вращения. В зависимости от конструкции выход центрифуги за год, измеренный в единицах разделительной работы (SWU/год) может значительно изменяться. Основные параметры используемых центрифуг приведены в Таблице 1³.

На разделительном заводе большое количество центрифуг соединены в каскад для получения требуемой степени обогащения на выходе. Например, каскад из центрифуг типа ТС-12 (компания «Уренко») должен иметь, по крайней мере, 2750 центрифуг, чтобы обогатить урановое топливо для реактора с электрической мощностью 1 ГВт (для этого следует затратить около 110000 SWU/год)⁴.

Если страна желает построить небольшой завод с пакистанскими центрифугами Р-2, чтобы каждый год производить по 25 кг урана, обогащенного до уровня 90%, ей потребуется иметь около 1000 центрифуг⁵. такой завод будет потреблять около 200 кВт и занимать площадь размером примерно в 500 квадратных метров⁶. Приведенные цифры говорят о том, что завод очень трудно можно будет обнаружить на изображениях, полученных со спутников. В случае заводов с центрифугами на спутниковых фотографиях с метровым разреше-

нием видны детали. Например, на фотографиях пакистанского завода в Кахуте видны производственные зоны в северной и южной частях установки, откуда можно оценить масштаб обогащения⁷. Однако из сказанного все еще вытекает, что требуется дополнительная информация для грубого определения положения скрываемого разделительного завода. Это было ясно в случае иранской установки в Натанзе, где положение пришлось определять при помощи оппозиционной группы иранцев, раскрывшей иранскую ядерную программу⁸.



Рис.1: Иранская разделительная установка в Натанзе, где, судя по сообщениям, работают 164 центрифуги.

Таблица 1: Основные параметры современных центрифуг.

Тип	P-1	P-2	Россия	ТС-12	США
Материал ротора	Al	MS	CFRC	CFRC	CFRC
Линейная скорость на краю ротора (м/с)	350	500	700	700	700
Длина (м)	1-2	1	<1	3-4	12
SWU/год	1-3	5	10	40	500

MS – обработанная сталь, CFRC – углеродный композит

Возможным решением проблемы обнаружения секретных обогатительных установок, как кажется, станет сбор образцов окружающей природы (например, воздух, вода, растительность, пыль с твердых поверхностей) на больших площадях в местах, выбранных МАГАТЭ, с целью получения заключения о наличии или отсутствии незаявленных ядерных материалов на этих территориях⁹. Но такой метод, конечно, имеет свои ограничения.

Гораздо труднее организовать методику атмосферного мониторинга на большой площади для обнаружения заводов с центрифугами, поскольку утечки из них очень малы. Любые повреждения в трубах приводят к всасыванию воздуха, потому что давление в трубопроводах и центрифугах меньше атмосферного. Более того, сбор образцов с большой территории может оказаться очень дорогим и его придется проводить осторожно, поскольку расходы резко возрастают с увеличением покрываемой площади¹⁰. Поэтому большинство предлагаемых схем сводится к просмотру отобранных участков конкретного района. Это может привести к возможным «дырам» в районах, которые, как утверждается, были проверены при помощи взятия образцов с больших площадей.

Проблемы и ограничения двух разобранных методов детектирования указывают на не-

обходимость дальнейшего рассмотрения возможностей обнаружения скрытых установок. В дальнейшем будет изучаться возможность детектирования заводов с центрифугами за счет их электромагнитных характерных сигналов, излучаемых в атмосферу.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ИЗЛУЧАЕМОГО ЦЕНТРИФУГАМИ В АТМОСФЕРЕ

Центрифуги движутся с очень высокой скоростью для разделения изотопов урана, как отмечено в Табл.1. Ротор центрифуги вращается с этими высокими скоростями при помощи электромотора.. Электрический мотор переменного тока¹¹ пропускает по своей обмотке переменный ток, который испускает электромагнитные волны. Интенсивность электромагнитного излучения меняется в зависимости от расстояния до завода и зависит от числа центрифуг. Существует максимальное расстояние, при котором эти волны еще можно обнаружить. Пороговое расстояние зависит также от уровня электромагнитного шума в конкретном месте.

Моторы

Электромагнитные моторы основаны на фундаментальном принципе, что на любой проводник, по которому движется ток, действует сила, если проводник находится в магнитном поле. Сила определяется по закону Лоренца и она перпендикулярна как направлению тока, так и магнитному полю. Во вращающемся моторе его подвижная часть (обычно она располагается внутри) называется ротором, а неподвижная часть – статором. Ротор вращается, потому что проводники и магнитное поле расположены так, что возникает вращающий момент относительно оси ротора.

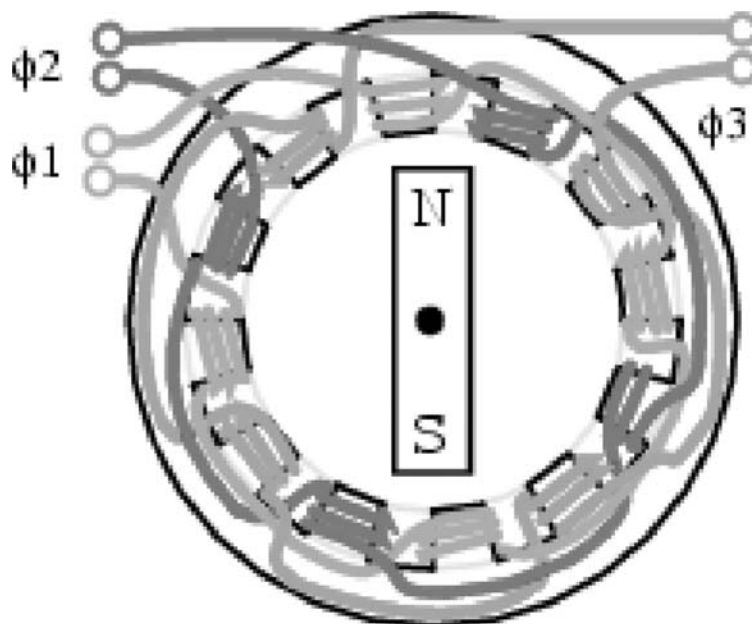


Рис.2: Схема трехфазного синхронного мотора переменного тока (1, 2, 3). Показаны две пары полюсов для каждой фазы. Ротор в середине изготовлен из постоянного магнита.

В моторе переменного тока обмотки статора питаются переменным током таким образом, чтобы магнитное поле, возникающее вокруг статора, было направлено против постоянного магнитного поля от ротора. Это заставляет мотор двигаться, и он вращается, чтобы совместить северный полюс своего магнитного поля с южным полюсом электромагнита, намотанного на статор. Как только ток в статоре меняет направление, полярность электромагнита меняется и поэтому мотор продолжает вращаться. Каждая обмотка на статоре называется полюсом, а всего в моторе имеется, как минимум, два полюса.

Мотор переменного тока может работать более эффективно, если обмотки статора питаются многофазным током. Обмотки статора физически смещены в пространстве, а при пи-

тании от переменного тока они смещаются и во времени, генерируя вращающееся магнитное поле, так что магнитное поле ротора «следует» за этим вращающимся магнитным полем¹². Кроме того, на каждую фазу тока обычно используются более двух полюсов.

Существуют два фундаментальных типа моторов переменного тока; (1) синхронные моторы (Рис.2), которые вращаются с частотой, совпадающей с частотой питающего тока или его гармоник, и (2) индукционный мотор, вращающийся с чуть меньшей частотой, чем частота питающего тока или его гармоник.

Частота вращения мотора определяется формулой:

$$S(\Gamma\text{ц}) = 2f/p \quad (1)$$

где f – частота переменного тока, а p – число полюсов мотора на фазу.

Модель для оценки электромагнитного излучения от мотора

Обмотки мотора можно представить в виде проволочной петли, по которой идет переменный ток. Эффект от каждой секции обмотки не зависит от других секций и поэтому полная мощность излучения может быть аппроксимирована умножением эффекта от одной петли на полное количество витков обмотки N . Для моделирования рассмотрим однородный гармонический ток $i(t) = I \cdot \cos(\omega t)$, протекающий по петле радиуса b . Существует элементарный магнитный диполь (Рис.3) с векторным магнитным моментом

$$\mathbf{m} = \mathbf{a}_z I \pi b^2 = \mathbf{a}_z m \quad (\text{A} \cdot \text{m}^2) \quad (2)$$

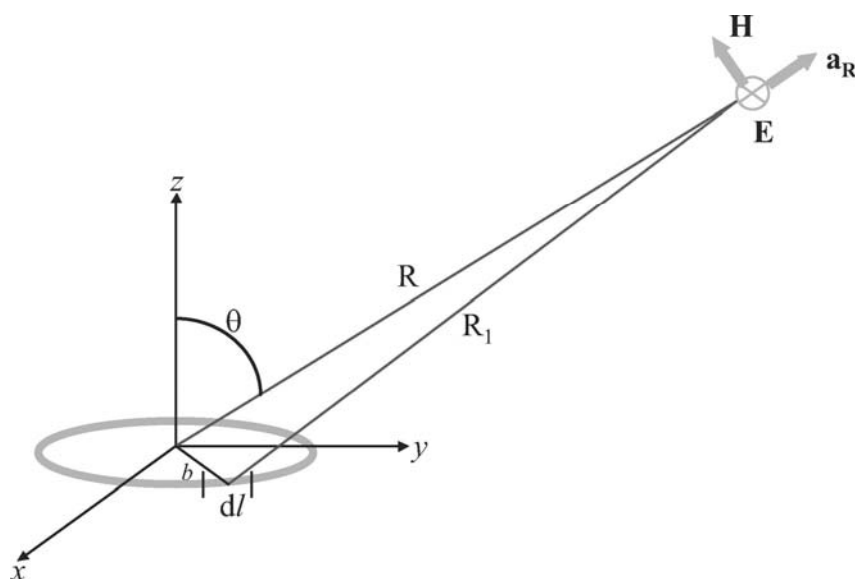


Рисунок 3: Элементарный магнитный диполь. В этой статье проявляется интерес к оценке электромагнитной мощности на расстоянии R от центра диполя.

Представляет интерес оценить излученную электромагнитную мощность на расстоянии R от центра этого диполя¹³. Общее выражение для электрического и магнитного полей оказывается достаточно сложным и рекомендуется рассматривать его поведение в близкой и удаленной области. Эти две области полей определяются с точки зрения длины волны λ электромагнитной волны, которая в свою очередь определяется частотой тока. Как будет обсуждаться в последующих разделах, частота моторов в центрифугах лежит в области киллогерц, что дает длины волн порядка сотен километров. Следовательно, близкая область, определяемая соотношением $R \ll R_c = \lambda/2\pi$, оказывается подходящей областью для данных целей и напряженности полей даются выражениями¹⁴

$$E_{\phi} = \frac{j\omega\mu_0 m}{4\pi R^2} \sin \theta \quad (3)$$

где $j = \sqrt{-1}$.

$$H_R = \frac{m}{4\pi R^3} 2 \cos \theta \quad (4)$$

$$H_{\theta} = \frac{m}{4\pi R^3} \sin \theta \quad (5)$$

Антенны для электрического поля должны оптимально иметь размеры порядка длины волны излучаемого излучения. При таких низкочастотных электрических полях поэтому трудно обнаружить сигналы. С другой стороны, магнетометры гораздо меньше и более портативны. По этой причине сконцентрируемся на обнаружении магнитного поля, в частности на радиальном компоненте в ближней области.

Следует отметить, что для мотора переменного тока магнитное поле от движущегося мотора и магнитное поле статора образуют обратную электромагнитную силу (эмс) в статоре. Ток, наводимый в статоре этой эмс, движется в противоположном направлении относительно тока I в уравнении (2). Поэтому для мотора ток I оказывается эффективным значением тока, протекающего через обмотку. Он может быть определен по измерению тока, протекающего через мотор, или оценен из мощности мотора, если известно напряжение, подаваемое на мотор.

Проверка модели

Чтобы проверить модель, она была применена к небольшому двухполюсному мотору переменного тока, работающему от основной линии питания с частотой 60 Гц. Этот мотор работал на вентиляторе компьютера, потреблял 0.13 А и имел радиус обмотки примерно 2 см, что приводит к значению момента $m = 1.6 \times 10^{-4}$ А.м². Для электромагнитной волны с частотой 60 Гц длина волны составляет 5000 км, а величина $R_c = \lambda/2 = 796$ км. Поэтому все измерения, приведенные позднее, для этого мотора проводились в ближней области, так что уравнения (3), (4) и (5) справедливы. Эти уравнения надо умножить на число витков в обмотке для мотора N .

Таблица 2: Измерения и расчеты для маленького мотора переменного тока.

Расстояние (см)	Измеренное В-поле ($\times 10^{-7}$ тесла (Т))	Подсчитанное В-поле ($\times 10^{-7}$ Т)
2	1200	-
4	660	-
6	350	-
8	200	-
10	130	-
12	85	-
14	59	59
16	42	40
18	30	28
20	22	21
22	17	16
24	13	12
26	10	10
28	8	8

Результаты измерений приведены в Табл. 2¹⁵. Измеряемые результаты зависят от угла направления измерений θ . Максимум магнитного поля находится в аксиальном направлении, где $\theta = 0$, а $H_R = m/2\pi R^3$, Измеренные величины, приведенные во втором столбце, соответствуют этому направлению и были проведены в промежутке расстояний 2-28 см от мотора. Когда результаты откладываются в двойном логарифмическом масштабе (Рис.4) на-

клон при больших расстояниях дает экспоненциальную зависимость от расстояния R . Данные соответствуют результату 2.9 согласно измерениям, что находится в отличном согласии с моделированной величиной 3. После подгонки данных найдено значение $N = 600$. Отложив мотор в сторону, автор сосчитал примерно 550-650 витков. Подсчитанные значения для больших расстояний показаны в третьем столбце Табл. 2.

Результаты для мотора показывают, что такая очень простая модель находится в количественном согласии с измеренными данными.

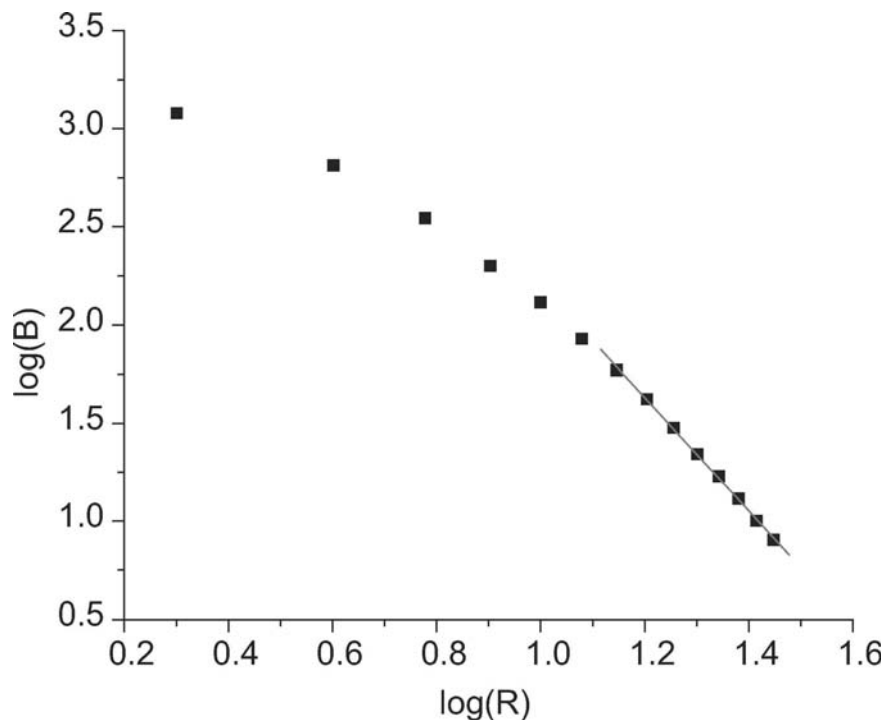


Рисунок 4 : Двойной логарифмический график магнитного поля мотора переменного тока. Линейная подгонка данных на больших расстояниях приводит к экспоненциальной зависимости R с показателем 2.9 (в отличном согласии с моделью).

Приложение модели к мотору центрифуги

Рассмотренная в этой статье центрифуга сравнима с принадлежащими Пакистану конструкциями P-2, работающими с тангенциальной скоростью 500 м/с (Табл.1). Они имеют производительность 5 SWU/год у каждой и энергопотребление по 200 Вт³. Как отмечено ранее, для получения 25 кг урана, обогащенного до 90%, потребуется 1000 центрифуг P-2.

Конструкция P-2 основана на модели «Уренко» G-2.¹⁶ Внешний радиус ротора G-2 равен приблизительно 7.4 см¹⁷, который при предполагаемой тангенциальной скоростью 500 м/с соответствует вращательной частоте около 1 кГц¹⁸. Предположим, что имеем дело с трехфазным током¹¹, причем на каждую фазу приходится по 8 полюсов¹⁹, и мотор переменного тока, вращается с этой угловой скоростью. При такой скорости частота питающего напряжения составит 4 кГц (Уравнение 1), Значение R_c равно около 12 км в данном случае, так что любое расстояние до 4 км будет рассматриваться как находящееся в ближней области. Мотор с мощностью 200 Вт при среднеквадратичном напряжении 200 В использует пиковый ток в 1.4 А и это соответствует в среднем току 0.5 А на фазу. Предположим, что в обмотке содержится 1000 витков²⁰, площадь витка обмотки равна 2 x 5 см²²¹, что дает $m = 0.5 \times 10^{-3}$ А.м² (Уравнение 2) для пары полюсов на фазу. Так как в исследовании предполагаются четыре пары полюсов на фазу и трехфазовое питание, векторное сложение магнитных полей дает эффективное значение $m = 4 \times 0.5 \times 10^{-3}$ А.м².²²

Кожух мотора зависит от конкретной конструкции. В статье приводятся подсчеты для мотора, не помещенного в кожух, а также для толщины алюминиевого кожуха, равной 10 и 50 мм²³. Когда мотор полностью помещен в металлический кожух, как показано на Рис.1, необходимо учитывать глубину скин-слоя δ как расстояние, на котором амплитуда магнитной

волны уменьшается на множитель ~ 0.37 , и которое дается выражением

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

где σ - проводимость металла. Для алюминиевого кожуха $\delta \sim 1.25$ мм при 4 кГц.

В Табл.3 приведены значения для обогатительного завода с 1000 центрифугами. Если предположить случайное распределение фаз, то амплитуда сигнала зависит как корень квадратный от полного числа моторов. Следовательно, для обогатительного завода с 10000 центрифугами цифры в Табл.3 надо увеличить в 3.2 раза.

Если алюминиевый кожух, действительно, имеет толщину 50 мм, тогда окажется невозможным обнаруживать любой сигнал от излучения даже на расстоянии 10 м. Даже при гораздо более тонком кожухе из алюминия толщиной около 10 мм сигнал окажется чуть заметным на расстоянии нескольких сотен метров, как будет показано в следующем разделе.

Другим случаем для рассмотрения станет подземный завод. Мокрая почва обладает проводимостью порядка 0.1 сименс/м²⁴, а при объемном содержании воды около 0.3 диэлектрическая проницаемость принимает значение 10²⁵. При 4 кГц мокрая почва станет хорошим проводником²⁶ ($\delta = 36$ м). Поэтому, если завод не запрягать под землю на 30-40 м, это заметно не повлияет на интенсивность сигнала магнитного поля в Табл.3. Проводимость сухой почвы и бетона ниже, чем у влажной почвы и поэтому влияние на амплитуду сигнала окажется еще меньшим.

Таблица 3: Оценка амплитуды магнитного поля от обогатительного завода, содержащего 1000 центрифуг, в зависимости от расстояния и экранирования.

Расстояние (м)	В-поле (Т)		
	Без кожуха	Кожух 10 мм Al	Кожух 50 мм Al
10	$0.12 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-26}$
100	$12 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-15}$	$8 \cdot 10^{-37}$
2000	$16 \cdot 10^{-16}$	$4 \cdot 10^{-19}$	$8 \cdot 10^{-33}$

Уровень шумов и методы обнаружения

Фактический уровень шумов в некотором месте будет очень значительно изменяться при наличии источников электромагнитного шума. Сюда входят промышленные заводы, радиопередающие станции и вообще близость к городским районам. Впрочем, основной шум при низких частотах генерируется природными источниками, например, молниями²⁷. Значит, будем проводить анализ сигнала к уровню шумов только с учетом природных источников.

Наиболее значительными источниками шумов в диапазонах исключительно низких и очень низких частот оказываются разряды молний, то есть токи электрических пробоев, способные протекать от облака до почвы или между грозowymi облаками. Разрядные токи генерируют переходные радиоимпульсы, называемые «атмосфериками» или «сфериками», которые обычно делятся 1-10 мс (смотрите Рис.5). Оценивается, что в каждый момент времени во всем мире действует около 2000 гроз.

Мощность шума от сфериков измеряется в разных местах по всему миру. Идет сбор данных от силовых линий и от промышленных источников шумов для уверенности в том, что измеряемый сигнал связан с молнией. Чтобы использовать конкретные цифры в этой статье, автор взял два конкретных измерения, зафиксированных в штатах Колорадо и Калифорния. Сводка спектральной плотности шумов в волноводах земля-тропосфера для двух положений представлена на Рис.6²⁹. как показывает рисунок, плотность шумов зависит от многих факторов, включая время года и дневное время, не говоря о положении.

На основе Рис.6 уровень шумов, усредненный за три месяца в районе Колорадо, составляет – 40 дБ (дБ на этом графике определяется как $20 \log(x)$) в единицах $\text{пТ}/(\text{Гц})^{1/2}$ при 4 кГц. Это переводится в уровень шумов 10 $\text{фТ}/(\text{Гц})^{1/2}$. С другой стороны, в Калифорнии летом уровень шумов составляет – 60 дБ в единицах $\text{пТ}/(\text{Гц})^{1/2}$ при 4 кГц. Это соответствует 1 $\text{фТ}/(\text{Гц})^{1/2}$. Принимающий фильтр с добротностью $Q = 100$ будет обладать полосой частот 40 Гц при 4 кГц³⁰. Это переводится в полный уровень шумов 6.5 фТ в Калифорнии и около 65

фТ в Колорадо.

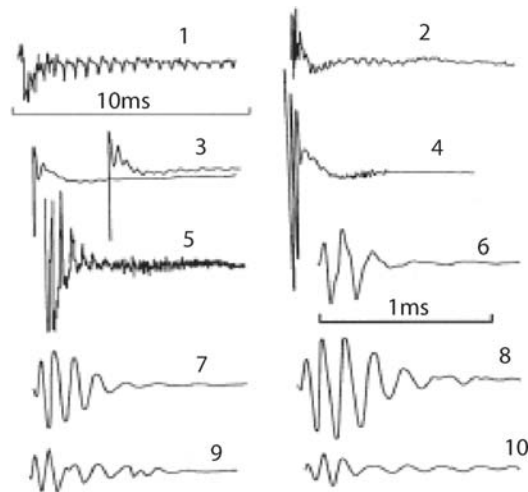


Рисунок 5: Типичные формы атмосферных волн. Следы 1-5 были зафиксированы с базой 10 мс. Следы 6-10 зафиксированы с базой 1мс, но слегка превышают 1 мс.

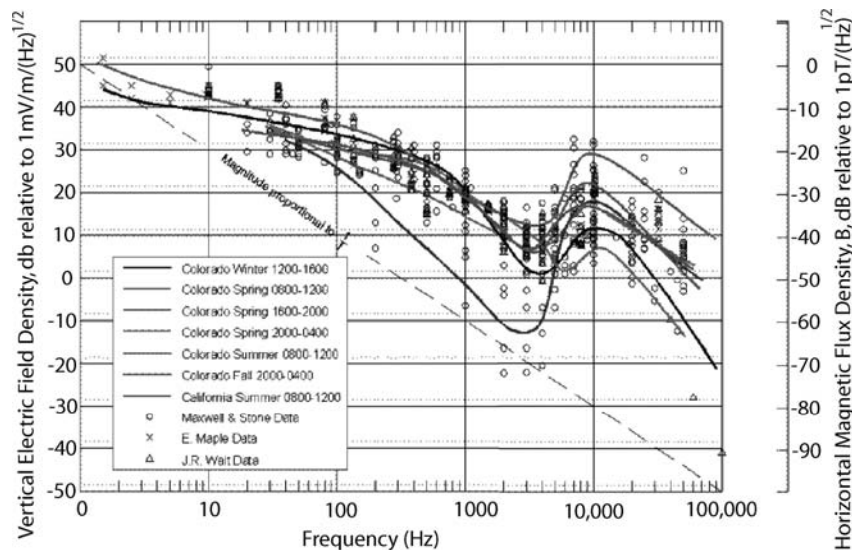


Рис.6: Спектральная плотность шума в диапазоне частот 1 – 100 кГц, измеренная в разных регионах и в различное время года. По оси абсцисс отложена частота в единицах Гц. По оси ординат слева отложена плотность вертикального компонента электрического поля (в дБ), где один дБ соответствует $1 \text{ мВ/м}/(\text{Гц})^{1/2}$. По оси ординат справа отложена плотность горизонтального компонента магнитного потока (в дБ), где один дБ соответствует $1 \text{ пТ}/(\text{Гц})^{1/2}$. Надписи в колонке (сверху вниз): зима в Колорадо 1200 – 1600; весна в Колорадо 0800 – 1200; весна в Колорадо 1600 – 2000; весна в Колорадо 2000 – 0400; лето в Колорадо 0800 – 1200; осень в Колорадо 2000 – 0400; лето в Калифорнии 0800 – 1200; данные Максвелла и Стоуна; данные Э. Мейпла; данные Дж.Р. Уэйта.

Различные характеристики атмосферного шума теперь могут быть применены для конструирования фильтров, чтобы уменьшить его мощность. Из Рис.5 очевидно, что простой клиппирующий фильтр удалит шумы от ближайших гроз³¹. Пик в начале данных по шумам можно ослабить с помощью клиппирующей схемы, причем, как показывают анализы, это может ослабить шум в десять раз³². Поэтому уровень шума составит 0.65 фТ вместо 6.5 фТ и при отношении сигнал/шум (ОСШ), равным 2, можно будет наблюдать сигнал величины примерно от 1.3 фТ до 13 фТ, В Табл.4, показано расстояние, на котором обогатительный завод конкретного размера будет генерировать поле с такими амплитудами.

Как можно увидеть в Табл.4, расстояние обнаружения составляет всего 0,5-3 км, когда мотор не заэкранирован. Если мотор помещен в алюминиевый кожух толщиной 10 мм или более, расстояние, на котором возможно обнаружение, составит всего несколько сотен метров от завода.

Существует несколько путей, которые можно использовать для увеличения параметра ОСШ для конкретной схемы обнаружения. Поскольку характеристики сфериков не меняются на больших расстояниях, уровни шумов могут быть достаточно хорошо характеризоваться для конкретного района, а также для часовых и сезонных вариаций. Имея такую информацию в руках, можно сконструировать фильтр, чтобы подавлять шумовые характеристики, в не использовать клиппирующую схему для общих задач. Кроме того, данные могут быть накоплены за произвольно длительное время при помощи статистической техники, что позволит уменьшить уровни шума еще более.

Таблица 4: Оценка расстояния, на котором можно обнаружить заводы с разным количеством центрифуг при уровне шумов магнитного поля в диапазоне от 6.5 фТ до 65 фТ. Первое число в каждом столбце соответствует наименьшему уровню шумов. При установке алюминиевого кожуха толщиной 50 мм и при наличии наименьшего уровня шумов расстояние обнаружения менее 10 м.

Центрифуги	Дальность обнаружения (м)		
	Без кожуха	Кожух 10 мм Al	Кожух 50 мм Al
100	1400; 650	100; 40	< 10
1000	2100; 1000	150; 700	< 10
10 000	3100; 1400	220; 100	< 10

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная здесь простая модель показывает, что любое обнаружение заводов с центрифугами на больших расстояниях по их электромагнитным сигналам в атмосфере невозможно. Впрочем, в диапазоне расстояний от завода 0.5 – 3 км такая методика может оказаться жизнеспособной, если моторы не покрыты алюминиевым кожухом. Если мотор помещен в алюминиевый чехол толщиной не свыше 10 мм, возможность обнаружения скрытого завода уменьшается до нескольких сотен метров.

Некоторые предположения, относящиеся к конструкции моторов и их применению, сойдутся в этой работе. Например, речь идет о потребляемой мощности и о размере моторов. Эти параметры были взяты из доступной литературы и могут быть поправлены на основе лучшей информации. Однако общие выводы статьи не изменятся, поскольку двумя самыми важными факторами определения амплитуды сигнала остаются кубическая зависимость ослабления амплитуды сигнала с расстоянием и толщина скин-слоя в алюминиевом кожухе. С учетом этих двух факторов, даже если удвоить размер и мощность мотора, а шум ослабить на порядок величины, расстояние обнаружения по-прежнему останется порядка 1 км для моторов, помещенных в алюминиевый кожух толщиной 10 мм, для завода с 1000 центрифугами.

Аналогичный анализ может быть проведен для обнаружения сигнала от электрического поля, если определять сигнал из Ур-ия 3 и сравнить его с уровнями шума на Рис.6. В Калифорнии уровень шумов электрического поля составляет порядка 10 дБ по отношению к $1 \text{ мкВ/м}/(\text{Гц})^{1/2}$, что по абсолютной величине составляет 2 мкВ/м для полосы частот шириной 40 Гц. Как и в случае установки для обнаружения магнитного поля, если предположить усиление 10 дБ от фильтрации и ОСШ, равное двум, то потребуется 0.4 мкВ/м амплитуды сигнала от завода с центрифугами. Аналогично, при уровнях шума в Колорадо амплитуда сигнала электрического поля должна составлять 4 мкВ/м. Из Уравнения (3) оценивается величина электрического поля в ближней области. Таблица 5 подводит итоги проблемы обнаружения электрического поля для разных размеров заводов с центрифугами при двух уровнях шумов и без накрытия мотора кожухом. Из сравнения ее с Таблицей 4 становится очевидным, что даже при очень большой антенне расстояние, на котором надежно можно обнаружить электрическое поле, меньше, чем для магнитного поля.

Таблица 5: Оценки расстояния, на котором можно обнаружить завод с центрифугами с разным количеством центрифуг, при уровнях электрических шумов в диапазоне от 2 мкВ/м до 20 мкВ/м. Первое число в столбце соответствует минимальному уровню шума.

Количество центрифуг	Дальность обнаружения (без кожуха)
100	350; 110
1000	600; 200
10 000	1100; 340

Другая возможность заключается в обнаружении сигналов шума в силовых линиях. На заводах с центрифугами применяются преобразователи частоты. чтобы моторы переменного тока вращались с более высокой скоростью, а такие схемы генерируют шумы, которые могут быть связаны с силовыми линиями. Описание простого эксперимента и его результатов обсуждаются в Приложении. Речь идет о простом частотном преобразователе, подсоединенном к мотору, который настроен на 400 Гц. Автор не наблюдал никаких признаков на силовой линии, способных указать на наличие преобразователя частоты, а мотор работал при частоте 400 Гц.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Метод газовой диффузии требует около 2500 кВт-часов на SWU, а центрифугам надо около 100 кВт-часов/SWU. Donald R. Olander, "The Gas Centrifuges", *Scientific American* 239 (1978), 2, 37-43.

2. M. Saeidi, Vice President for Planning and International Affairs, Atomic Energy Organization of Iran, presentation at the Annual Symposium of World Nuclear Association, 2005, www.worldnuclear.org/sym/2005/pdf/Saeidippt.pdf.

3. Victor Gilinsky, Marvin Miller, Harmon Hubbard, "A Fresh Examination of Proliferation Dangers of Light Water Reactors", Oct. 2004, Nonproliferation Policy Education Center, www.iranwatch.org/privateviews/NPEC/prespexnpeclwr102204.pdf.

4. Современный энергетический реактор рассчитан на выгорание 53 МВт-д/кг и использует урановое топливо, обогащенное до уровня 4.4% ..Около одной трети тепловой энергии успешно преобразуется в электроэнергию: 53 МВт-д/ кг/3 = 17.7 МВт(э)-д./кг. При 90% времени занятости реактор на 1 ГВт(э) будет использовать (1000 МВт(э) x 365 дней x 0.9)/17.7 МВт(э)-д/кг = 18.6 тонн. Не столь современный реактор, работающий при меньшем выгорании (скажем, 41 МВт-д/кг) потребует около 24 тонн топлива. Работа по разделению. требуемая для производства обогащенного уранового топлива, основана на следующей функции: $V(e) = (2e - 1) \ln[e/1-e]$. Полное количество SWU, требуемое на кг топлива, составляет $V(e_p) - V(e_t) - F \times \{V(e_f) - V(e_t)\}$, где индексы p, f, t соответствуют конечному продукту, начальному продукту и отходам, соответственно, а F - масса начального продукта на кг, выражаемая как $(e_p - e_t)/(e_f - e_t)$. На кг конечного продукта с уровнем обогащения 4.5%, если предположить начальный продукт в виде естественного урана ($e_f = 0.000711$) и отходы с содержанием урана 0,32% ($e_t = 0.00032$), требуется 10.7 кг начального продукта и 6.0 SWU. Для 18.6 тонн потребуется 110 000 SWU.

5. Для получения одного килограмма высокообогащенного урана (ВОУ) потребуется $F = (e_p - e_t)/(e_f - e_t) = 236$ кг естественного урана и 190 единиц работы по разделению в год при концентрации урана в отходах 0.32%. Чтобы получить 25 кг ВОУ (количество, требуемое для создания имплозивной бомбы первого поколения), потребуется 5900 кг естественного урана и 4750 единиц работы по разделению в год. Если применять пакистанские центрифуги P-2 с производительностью 5 е.р./год, необходимо иметь не менее 1000 таких центрифуг. Число центрифуг уменьшится на 70%, если использовать скрытые запасы урана со степенью обогащения 4.4% в качестве начального продукта для получения 25 кг ВОУ. При этом количество е.р. уменьшится до 1500 при 90%-ном обогащении конечного продукта, а количество центрифуг P-2 снизится до 300. Эта последняя величина уменьшится примерно до 160 центрифуг, если концентрация урана в отходах увеличат до 2% на скрытой установке. Такое увеличение концентрации отходов возникнет за счет увеличения характеристик начального продукта. Поэтому, если концентрация урана в в отходах вырастет до 2%, количество на-

- чального урана с обогащением 4.4%, необходимого для получения 25 кг ВОУ, составит 917 кг вместо 547 кг при концентрации урана в отходах 0.32%.
6. На основе снимков с воздуха существующих установок с центрифугами следует, что одному м² площади завода, где установлены центрифуги Р-2, будет соответствовать производительность около 10 е.р.р/год. Alexander Glaser, "Beyond A.Q.Khan", *International Network of Engineers and Scientists Against Proliferation Bulletin* (2004), 23, 50-54) (<http://www.inesap.org/bulletin23/art13.htm>) and private communication with A.Glaser.
7. Hui Zhang, "Strengthening IAEA Safeguards Using High Resolution Commercial Imagery", Symposium on International Safeguards, Vienna, 2001, <http://bscia.ksg.harvard.edu/BSCIA.content/documents/ViennaSATpaper.pdf>.
8. David Albright and Corey Hinderstein, "The Iranian Gas Centrifuge Uranium Enrichment Plant at Natanz: Drawing from Commercial Satellite Images", 2003, http://www.isis-online.org/publications/iran/natanz03_0/2.html.
9. D. W. Swindle, R. L. Pearson, N. A. Wogman and P. W. Krey, "Screening of Potential Sites for Undeclared Nuclear Facilities in Environmental Monitoring for Nuclear Proliferation", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 248 (2001), 3, 599-604.
10. P. W. Krey and K. W. Nicholson, "Atmospheric Sampling and Analysis for the Detection of Nuclear Proliferation", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 248 (2001), 3, 605-610.
11. В определениях МАГАТЭ предметов ядерного и двойного использования упоминается многофазный мотор переменного тока в частотном диапазоне 600-1000 Гц и с мощностью 50-2000 ВА. Поэтому здесь могут рассматриваться только моторы переменного тока. Смотрите INFCIRC/254/Rev6/Part1(Nuclear Specific Items) (2003), www.iaea.org/Publications/Documents/Infircs/2003/infirc254r6p1.pdf.
- О деталях многофазного мотора смотрите, например, С. Siskind, *Induction Motors* (McGraw Hill, 1958); Р. L. Alger, *Induction Machines* (Gordon and Breach Publishers, 1995); С. Concoridia, *Synchronous Machines* (Wiley, 1951).
13. Математические детали модели можно найти в любом элементарном учебнике по электромагнитным волнам, например, D..Cheng, "Antennas and Radiating Systems" in *Field and Wave Electromagnetics* (Prentice Hall, 1989, 2nd edition), 600-671.
14. В атмосфере магнитное поле **B** связано с интенсивностью магнитного поля **H** соотношением $\mathbf{B}=\mu_0\mathbf{H}$, где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Н/м в единицах СИ.
15. Измерения проводились ручным магнетометром марки ELF 50D компании Walker Scientific.
16. *Nuclear Fuel*, 27 February 2006.
17. *Nuclear Fuel*, 26 May 2003.
18. Это стандартная частота для конструкции G-2, *Nuclear Fuel*, 24 December 1990.
19. В Ираке в начале 90-х гг были обнаружены во время инспекций изготовленные статоры с 24 ферритовыми магнитами, установленными на каждом статоре. Для трехфазного мотора это означает 8 полюсов на фазу. *Nuclear Fuel*, 20 January, 1990.
20. Это число основано на моторах с аналогичными или более высокими мощностью и размерами.
21. Северная Корея заказывала алюминиевые трубки длиной 1200 мм, которые, по словам официальных лиц, могли быть использованы для установки ротора G-2 длиной 1000 мм, а дополнительное пространство занималось мотором и подшипниками. Если половину этого дополнительного пространства занята мотором, его высота может составить около 10 см. Обмотки статора занимают около половины высоты мотора, что составляет около 5 см. Ширина статора определяется окружностью мотора. Если мотор помещается в алюминиевую трубку, как предполагается в статье, то радиус статора будет около 8 см, поскольку внутренний диаметр труб равен 168 мм. Чтобы разместить 24 обмотки, каждая обмотка ограничена шириной примерно 2 см. *Nuclear Fuel*, 20 May 2003.
22. Если складывать магнитные поля как векторы, получаем коэффициент усиления порядка 4 (2.6 x 1,5). Множитель 2.6 возникает от полей четырех пар полюсов в одной фазе, а множитель 1.5 связан со сложением магнитных полей от трех разных фаз. Детали расчетов приведены в книге С. Siskind, Chapter 1 in *Induction Motors* (McGraw Hill, 1958).
23. Северная Корея заказывала алюминиевые трубки толщиной 52 мм, что согласно западным официальным лицам, совпадало с толщиной трубок, требуемых для центрифуг. *Nuclear Fuel*, 26 May 2003.

24. J. Q. Shang and R. K. Rowe, "Detecting Landfill Leachate Contamination Using Soil Electrical Properties", *Practice Periodical of Hazardous Toxic and Radioactive Waste Management*, 7 (2003), 1, 3-11.
25. T. Miyamoto, T. Annaka, and J. Chikushi, "Extended Dual Composite Sphere Model for Determining Dielectric Permittivity of Andisols," *Soil Sci. Society, Am. J.* 69 (2005), 23-29.
26. Для хорошего проводника $\sigma/2\pi f \epsilon_r \epsilon_0 \gg 1$. При 4 кГц эта величина равна 1×10^5 для мокрой почвы.
27. R. Barr, D. L. Jones, and C. J. Rodger, "ELF and VLF Radio Waves", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62 (2000), 16898-1718; S. L. Bernstein, M. L. Burrows, J. E. Evans, A.S. Griffiths, D. A. McNeil, G. W. Niessen, I. Richter, D. P. White, and D. K. Willim, "Long Range Communications at Extremely Low Frequencies", *Proceedings of the IEEE*, 62 (1974), 3, 292-312.
28. См. [27], первая ссылка.
29. E. I. Maxwell and D. L. Stone, "Natural Noise Fields 1cps to 100 kc", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-11 (1963), 3, 339-343.
30. Добротность Q полосового фильтра определяется как $f_0/\Delta f$, где f_0 - центральная частота фильтра, а Δf - ширина полосы. Значение добротности порядка 100 встречается очень часто, и по этой причине мы используем его при анализе.
31. Ослабление шумов от молний происходит на расстояниях от сотен до тысяч километров. Поэтому близкими молниями считаются те, которые находятся на таких расстояниях.
32. См. [27], вторая ссылка.
33. ДПЧ произведен корейской компанией LG, номер модели iG5008-2.
34. Осциллоскоп имеет буферную память объемом 1000 точек. Следовательно, секундные сигналы накапливались за время с разрешением 500 Гц при частоте Найквиста.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Заводы с центрифугами, где используются моторы переменного тока, нуждаются в частотном преобразователе, который преобразует частоту питающего тока (50 – 60 Гц) в подходящую частоту, требуемую для центрифуг. Сейчас широко распространены твердотельные конвертеры, которые поначалу переводят входной сигнал переменного тока в сигнал постоянного тока, а затем используют подходящую цепочку контуров, соединенных в петлю, для получения требуемой выходной частоты. Поскольку нельзя избежать наводок между входом и выходом любого контура, выход частотного преобразователя может иметь доступ к линии силового питания и по этой причине стать источником увеличенного уровня шумов на конкретной выходной частоте.

Чтобы проверить, действительно ли присутствует такое увеличение шумов в линиях силового питания, автор провел простой эксперимент. Был взят трехфазный драйвер переменной частоты (ДПЧ)³³ с выходной мощностью 1 л.с. и с диапазоном частот 0-400 Гц. Выход ДПЧ был соединен с трехфазным мотором, работающим на частоте 400 Гц и имеющим мощность 7/8 л.с. ДПЧ питался от силовой трехфазной линии с напряжением 208 В. К этой же силовой линии был подключен осциллоскоп на расстоянии около 60 см.

Сигнал на силовой линии был сначала измерен, когда выключались ДПЧ и мотор³⁴. На Рис.7 приведен спектр Фурье переходного процесса синусоидального сигнала с частотой 60 Гц.

Затем включался ДПЧ и мотор начинал работать с частотой 400 Гц. На Рис.8 приведен спектр преобразования Фурье сигнала, измеренного на силовой линии примерно в 60 см в стороне. Если сравнить спектры Фурье на Рис.7 и Рис.8, то не видно явного возрастания сигнала при 400 Гц. Но заметно увеличение шумов при всех остальных частотах в том случае, когда ДПЧ и мотор начинали работу. Одним из путей для придания численной оценки этой разницы стало получение суммы мощности шумов в интервалах шириной по 50 Гц в промежутке между 200 и 400 Гц. Затем для каждого интервала должно получаться число, большее единицы, если рассмотреть соотношение между суммами, когда мотор работал и когда мотор и ДПЧ отключались. Именно такую картину видно на Рис.9. Как пример, поясним, что квадратик при частоте 300 Гц получен путем суммирования мощности шумов между 250 и 300 Гц, когда мотор работает. Эта сумма делится на сумму мощности шумов в том же интервале частот, когда ДПЧ и мотор отключались. Величина, близкая к 2, говорит о том, что шум в этом интервале частот удвоился при работе ДПЧ и мотора. Символы в виде квадра-

тиков и кружков отличаются тем, что при включении ДПЧ и мотора немного по-разному можно было проводить сбор данных.

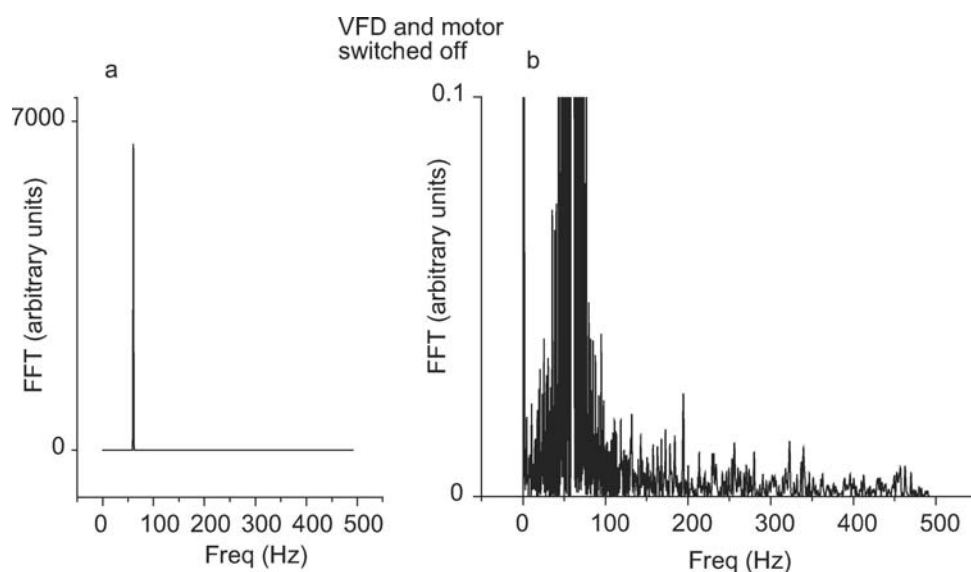


Рисунок 7: (а) Спектр Фурье сигнала с частотой 60 Гц на трехфазной силовой линии с напряжением 208 В при выключении ДПЧ и мотора. (б) Развертка случая (а) для демонстрации шумов при других частотах, когда ДПЧ и мотор отключены. По оси Х отложена частота (Гц), а по оси Y – спектральная интенсивность (в произвольных единицах).

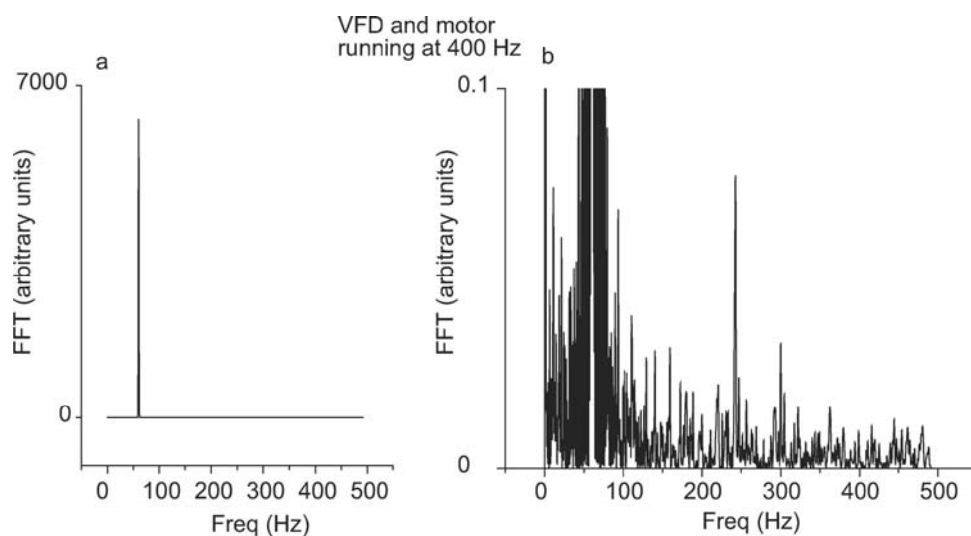


Рисунок 8: (а) Спектр Фурье сигнала на трехфазной силовой линии (208 В, 60 Гц), когда ДПЧ и мотор работают на 400 Гц, (б) Развертка случая (а) для демонстрации шумов при других частотах. Остальные обозначения такие же, что и на Рис.7.

Из данных на Рис.9 очевидно, что шумы, связанные с ДПЧ и силовой линией оказываются широкополосными и не просто находятся вблизи рабочей частоты мотора (в данном случае, 400 Гц).

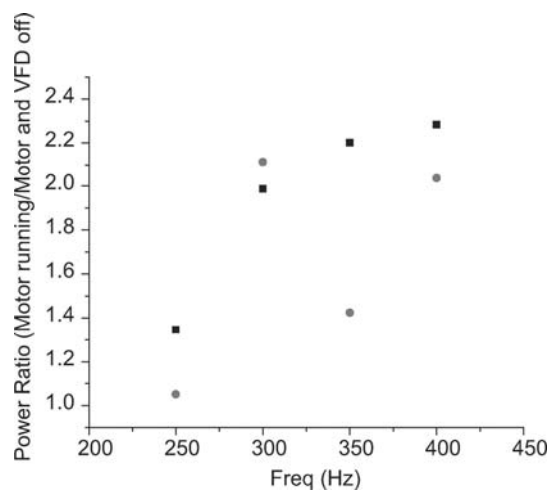


Рисунок 9: Отношение мощности шумов, просуммированной по интервалу 50 Гц. Детали приведены в тексте.