

Определим погрешности системы АПЧ. Положив все производные в системе (6) равными нулю, можно получить выражения для статических погрешностей

$$x_{ст} = \frac{x_n}{\beta_1(1-S)} - \frac{S_{12}}{S_{11}N} \frac{y_n}{\beta_2(1-S)}, \quad y_{ст} = \frac{y_1}{\beta_2(1-S)} - \frac{S_{21}N}{S_{22}} \frac{x_n}{\beta_1(1-S)}. \quad (9)$$

Если кроме постоянных начальных расстроек частоты кварцевого генератора и резонатора имеется систематический ход со скоростями a_1 и a_2 соответственно, то, кроме статической погрешности, выражаемой формулами (9), появляется динамическая погрешность, которая для кварцевого генератора будет равна

$$x_{дин} = \frac{a_1 t}{\beta_1(1-S)} - \frac{S_{12}}{NS_{11}} \frac{a_2 t}{\beta_2(1-S)} + \frac{a_1 T_1}{\beta_1(1-S)} - \frac{a_2 T_2}{\beta_2(1-S)}. \quad (10)$$

Выражения (9), (10) для погрешностей отличаются от аналогичных выражений для стандарта частоты с независимыми кольцами АПЧ множителем $1/(1-S)$. Числовые оценки достижимой точности стабилизации частоты дают, при $T_1=10^4$ с, $T_{31}=0,1$ с коэффициент β_1 можно взять, согласно (8), равным 10^5 , тогда при $x_n/\omega_{кв}=10^{-9}$, $a_1/\omega_{кв}=10^{-9}$ Г/сут, $S=+0,5$, $y_n=0$ получим $x_{ст}/\omega_{кв}=2,0 \cdot 10^{-14}$, $x_{дин}/\omega_{кв}=2,0 \cdot 10^{-14}$ 1/сут (при $t \gg T_1$).

Рассмотрим переходные процессы в КСЧ. Анализ проведем при тех же, что и ранее, предположениях о малости времен задержек, при которых была получена система уравнений (6). Решение этой системы дает следующее выражение для x :

$$x = C_1 e^{\alpha_1 t} + C_2 e^{\alpha_2 t} + x_{ст}, \quad (11)$$

где $x_{ст}$ — значение x при $t \rightarrow \infty$, C_1, C_2 определяются начальными условиями, а коэффициенты α_1, α_2 , являющиеся корнями характеристического уравнения, равны

$$\alpha_{1,2} = - \left(\frac{\beta_1}{2T_1} + \frac{\beta_2}{2T_2} + S\beta_1\beta_2 \frac{T_{31} + T_{32}}{2T_1T_2} \right) \pm \left\{ \left[\frac{\beta_1}{2T_1} + \frac{\beta_2}{2T_2} + \frac{S\beta_1\beta_2(T_{31} + T_{32})}{2T_1T_2} \right]^2 - \frac{\beta_1\beta_2(1-S)}{T_1T_2} \right\}^{1/2}. \quad (12)$$

Можно убедиться, что при выполнении условия (8) корни характеристического уравнения действительны и отрицательны, т. е. в системе осуществляется затухающий апериодический процесс

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Козлов С. А., Логачев В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 8, с 978.
- 2 Капланов М. Р., Левин В. А. Автоматическая подстройка частоты — М—Л: Госэнергонздат, 1962, с 144.

Поступила в редакцию
20 июня 1983 г.,
после доработки
29 февраля 1984 г

УДК 539.28

ИЗБЫТОЧНЫЙ НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ШУМ КОНДЕНСАТОРНЫХ СИСТЕМ

Ю. С. Капшин, В. А. Носкин, Б. И. Якубович

Фликкерный или избыточный шум (спектр которого имеет вид $\sim 1/F^\alpha$, где F — частота, α — константа) наблюдается в чрезвычайно широком классе явлений природы. Однако до сих пор не удается выяснить его физическое происхождение. Созданы многочисленные модели, в рамках которых дается описание механизма возникновения фликкерного шума: он вызывается флуктуациями числа посетителей заряда [1, 2], флуктуациями температуры [3, 4], нестационарностью в токопроводящей системе [5] и т. д. Не вдаваясь в критику того или иного механизма, лишь укажем, что дальнейшее изучение этого вопроса остается актуальным. Интерес к таким исследованиям дополнительно стимулируется еще и гипотезой о возможности прогнозирования долговечности электронных приборов по свойствам избыточного шума. В данной работе рассмотрены возможности прогнозирования работоспособности конденсаторных си-

стем с помощью методики изучения избыточных низкочастотных шумов в них. В ранее опубликованных работах при изучении свойств фликкерного шума характерно было измерение мощности шума на фиксированной частоте [6, 7], регистрация изменения частоты [8-10], глубины модуляции высокочастотного напряжения [8] генератора, в контур которого включен мерцающий элемент. В данной работе предлагается

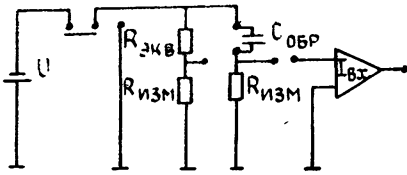


Рис. 1.

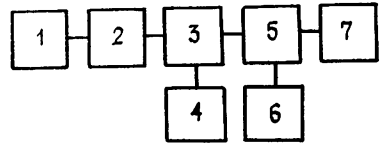


Рис. 2.

Рис. 1. Схема измерений:

U — источник напряжения, $R_{\text{экв}}$ — эквивалентное омическое сопротивление, $R_{\text{изм}}$ — маломощающее измерительное сопротивление, $I_{\text{вх}}$ — входной усилитель.

Рис. 2. Блок-схема измерений.

1 — блок образца, 2 — входной усилитель, 3 — анализатор, 4 — дисплей анализатора, 5 — накопитель, 6 — дисплей накопителя, 7 — периферийное устройство вывода.

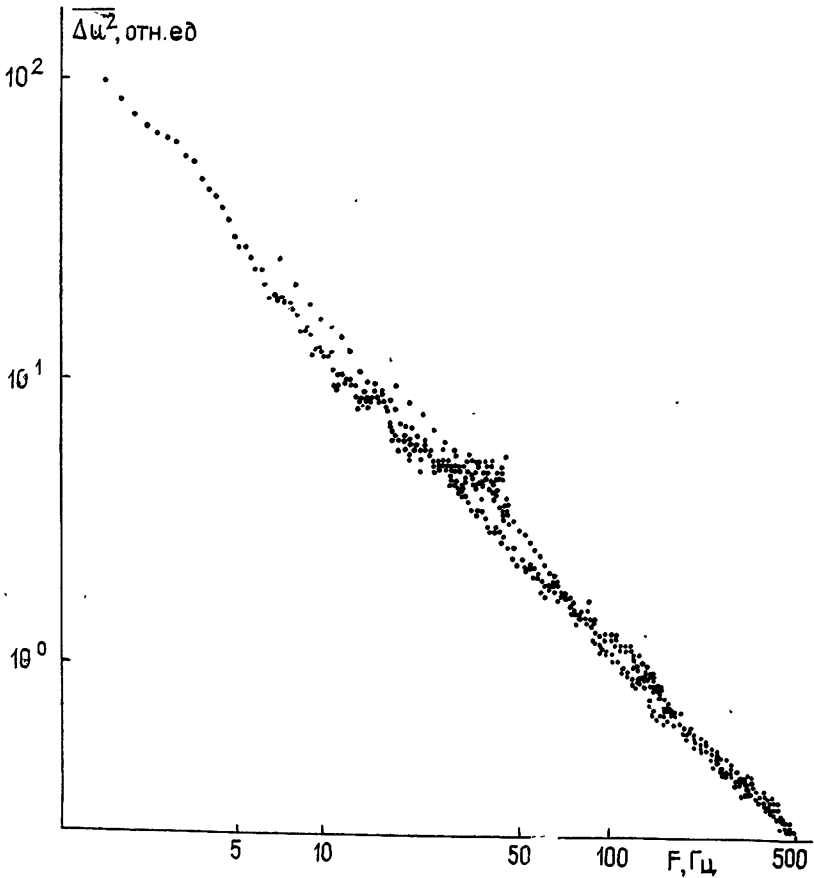


Рис. 3.

метод исследований, позволяющий изучать спектральные характеристики избыточного шума в достаточно широком частотном диапазоне, значительно повышать отношение сигнал/шум за счет накопления с заданным характером усреднения и в результате выделять сигнал, скрытый аддитивной помехой. Приводятся результаты исследований избыточного шума конденсаторов указанным методом.

Измерения низкочастотных шумов конденсаторов производились в режиме заданного напряжения. Схема включения образца (рис 1) помещалась в бокс из пермолоя и меди, которые устраняли влияние внешних электрических и магнитных полей. Сигнал с измерительного сопротивления подавался на вход широкополосного низкочастотного усилителя У4-28, обладающего достаточно низким уровнем собственных шумов. С выхода усилителя сигнал поступал на анализатор спектра реального масштаба времени С4-54, имеющий семь частотных диапазонов, позволяющих работать в области от 0,01 Гц до 2 кГц. Указание на то, что анализатор работает в реальном масштабе времени, означает, что он может работать, выдавая результаты измерения в темпе поступления входной информации без ее потерь. С анализатора сигнал подавался на цифровой синхронный накопитель Ф-36, предназначенный для выделения медленно меняющихся электрических сигналов, скрытых аддитивной помехой, методом синхронного накопления с усреднением. Блок-схема установки приведена на рис 2.

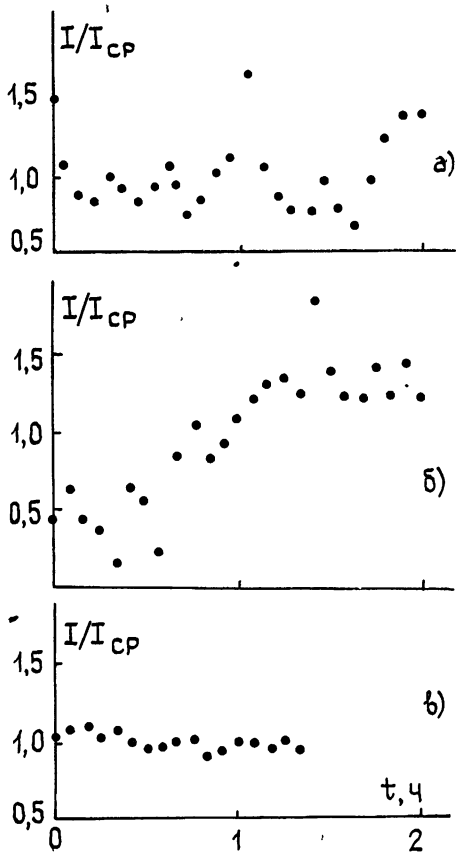


Рис. 4

Данная экспериментальная техника позволяет проводить исследования в широком частотном диапазоне. На рис 3 приведена характерная спектрограмма низкочастотного шума. Для ее получения производились измерения в трех частотных диапазонах анализатора 50 Гц, 200 Гц и 500 Гц, затем была проведена шшивка спектров.

Создание описанной установки сделало возможным изучение шумовых свойств конденсаторных систем в низкочастотной и инфранизкочастотной областях спектра. В связи с большим практическим интересом возможности прогнозирования долговечности электронных элементов были проведены исследования связи уровня низкочастотных шумов с деградационными процессами в конденсаторах. Исследовались пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком К73-11, емкостью 1 мкФ ($\pm 5\%$), номинальное напряжение—400 В. Предполагалось в соответствии с логикой целого ряда авторов [8, 10–12], что уровень избыточных шумов связан со структурным состоянием конденсатора и может являться критерием его работоспособности. В обследованной партии образцы разбраковывались по уровню фликкерного шума, а затем подвергались разрушающим испытаниям постоянным напряжением. В результате установлена хорошая корреляция между образцами, обладающими повышенным уровнем шума и оказавшимися ненадежными по результатам разрушающего контроля. Для партии из 16 конденсаторов вероятность прогнозирования оказалась равной 88%. Параллельно для сравнения проводились исследования прогнозирования работоспособности конденсаторов традиционными методами. Для разбраковки образцов этой партии по тангенсу угла потерь вероятность прогнозирования оказалась равной 63%. Это позволяет сделать вывод о перспективности данного метода для повышения качества прогнозирования работоспособности конденсаторов [13, 14].

Как известно, вплоть до настоящего момента обсуждалось два принципиально разных подхода к объяснению природы фликкерного шума, связывающих его происхождение как со стационарными, так и с нестационарными процессами [15, 16]. В данной работе получены данные, свидетельствующие о нестационарной природе этого явления: на временной зависимости мощности низкочастотного шума обнаруживаются многочасовые изменения произвольного вида (рис 4а, б), где I — мощность шума на частоте 3 Гц в относительных единицах. В процессе работы производилась следующая, позволяющая исключить аппаратные эффекты калибровка: измерялся низкочастотный шум при включенном в цепь проволочном резисторе с номиналом, равным омическому сопротивлению конденсатора (порядка 20 гОм). В последнем случае не регистрировалось ярко выраженной нестационарности, т. е. уровень относительных флуктуаций наблюдался на порядок ниже (рис. 4в).

Надо отметить, что регистрация спектральных шумовых характеристик в достаточно широком частотном диапазоне позволяет с большой точностью определить значение константы α . Таким образом, рассмотренная методика раскрывает широкие возможности для исследования корреляции уровня фликкерных шумов со значением указанного параметра. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что рассмотренная методика является средством для изучения физических процессов по их спектральным характеристикам в низком и инфранизком частотном диапазоне. Предложенный метод обладает следующими достоинствами: а) высокой разрешающей способностью, б) экспрессностью, в) возможностью анализа функциональной зависимости спектра в широком частотном диапазоне. Использование данного метода может оказаться перспективным для исследования вопросов, представляющих как чисто научный, так и практический интерес

ЛИТЕРАТУРА

- 1 McWhorter A. L. — M I T Lincoln Laboratory Report, 1955, № 80.
- 2 Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. J. — Repts Progr. Phys., 1981, 44, p. 479
- 3 Voss R. F., Clarke J. — Phys. Rev. Lett., 1976, 36, № 1, p. 42.
- 4 Voss R. F., Clarke J. — Phys. Rev. B, 1976, 13, № 2, p. 556.
- 5 Малахов А. Н., Якимов А. В. — Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 11, с. 2436
- 6 Van der Ziel A., Tong Hu. — Electronics, 1966, 39, № 24, p. 95.
- 7 Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. — М Энергия, 1978.
- 8 Полулях К. С. — Изв ЛЭТИ, 1955, № 26, с. 89.
- 9 Мальцев А. А., Якимов А. В. — Изв. вузов — Радиоэлектроника, 1975, 18, № 8, с. 113.
- 10 Бочков Г. Н., Мальцев А. А., Якимов А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 1, с. 126.
- 11 Lindeman W., Van der Ziel A. — J. Appl. Phys., 1952, 23, p. 1410.
- 12 Малахов А. Н. — Радиотехника и электроника, 1959, 4, № 1, с. 54.
- 13 Дьяконов М. Н., Капшин Ю. С., Муждаба В. М., Носкин В. А., Ханин С. Д., Юдин В. А., Якубович Б. И. Препринт ЛИЯФ № 884. — Ленинград, 1983
- 14 Авт. свид. № 997113. Офиц. бюллетень, 1983, № 6, с. 247.
- 15 Keshner M. S., Proc. IEEE, 1982, 70, № 2, p. 60.
- 16 Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. — УФН, 1983, 141, № 1, с. 151.

Ленинградский институт ядерной физики
АН СССР

Поступила в редакцию
1 декабря 1983 г.

УДК 621 372 828

СТУПЕНЧАТАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ТОКА В ПРОЕКЦИОННОМ АЛГОРИТМЕ ДЛЯ РЕГУЛЯРНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ

С. Г. Веснин

1. **Постановка задачи.** Применение проекционного подхода к импедансным и адмитансным интегральным уравнениям [1] позволило к настоящему времени алгоритмизировать ряд задач о регулярных и нерегулярных полосковых структурах (см. [2] и [3], pp 222, 322, а также библиогр. в [2, 3]). При этом базисы решения строились на тригонометрической основе, так что, в частности, поперечная компонента плотности тока j_x точно обращалась в нуль на краях полоскового проводника. Известен, однако, вариант [4] (см также [3], п 2.1.2), когда применялся не проекционный, а коллокационный подход. В этом случае область проводника разбивалась на ряд носителей, на которых неизвестная плотность тока аппроксимировалась двумя векторными константами (поперечная x_0 и продольная z_0), а интегральное уравнение удовлетворялось на системе точек. Совокупность таких констант на всех носителях образует ортогональный базис ступенчатой аппроксимации тока. Воспользовавшись этим обстоятельством, можно применить такую же аппроксимацию и в рамках проекционной системы. Тогда будет получена известная алгебраическая формулировка

$$PZQC = 0 \quad (1)$$

(см. [1] или, например, [3], pp 134, 2.1.2, 2.2.2), где в интегралах, представляющих элементы матриц P и Q , в качестве базисных функций v_q и w_q будут фигурировать константы z_0, x_0 , задаваемые на своих носителях (как это делалось в других работах, положим $v_q = w_q$).