

УДК 538.95

ФОТОХРОМНЫЙ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Давыдов В.А., профессор, E-mail: davydov@mirea.ru,

Кац Н.Д., студент, E-mail: ,nkatz777@gmail.com

Коробкин Ю.В., доцент, E-mail: korobkin@mirea.ru,
МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены физические принципы релаксационных автоколебаний в нелинейных системах с использованием фотохромных сред. Получены выражения для периода колебаний и зависимости концентрации активных центров окраски от времени. Разработана и создана экспериментальная установка, на которой впервые наблюдались и исследовались фотохромные автоколебания. Обсуждаются перспективы дальнейших исследований, в первую очередь, изучение взаимодействия диффузионно связанных между собой фотохромных осцилляторов.

Ключевые слова: Нелинейность, автоколебания, фотохромизм.

PHOTOCHROMIC AUTOOSCILLATING ELEMENT

Davydov V.A., prof., E-mail: davydov@mirea.ru,

Katz N.D., student, E-mail: nkatz777@gmail.com,

Korobkin Y.V., assoc.prof., E-mail: korobkin@mirea.ru,
MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The physical principles of relaxation autooscillations in nonlinear systems with photochromic glasses are considered. Expressions for the period of oscillations and dependency of concentration of active centers on time are obtained. The experimental plant is designed and built which was used for the first observations and researches of photochromic autooscillations. The perspectives of further researches are discussed firstly the study of interaction of oscillators connected by diffusion.

Keywords: Nonlinearity, autooscillations, photochromism

Нелинейные процессы играют важнейшую роль в поведении многих физических, химических, биологических и даже социальных систем. Установление этого факта, а также многих закономерностей, общих для самых разнообразных систем, привело к появлению междисциплинарного научного направления, изучающего, в частности, влияние нелинейности на процессы самоорганизации и часто называемого «Синергетика» [1].

Одним из самых важных свойств нелинейной системы является возможность появления в ней упорядоченных или хаотических пространственно-временных структур [2, 3].

Простейшим примером самоорганизации, возможным даже в нераспределенных (точечных) системах, являются автоколебания. Они могут возникать и поддерживаться в нелинейной системе без всякой вынуждающей силы. Энергия на поддержание

автоколебаний черпается извне или запасена в системе, а их свойства – период, амплитуда, зависимость колеблющейся величины от времени и т.д. – определяются внутренними свойствами автоколебательной системы [4,5].

В данной работе создана и исследуется автоколебательная система, в основе работы которой лежит явление фотохромизма [6].

Фотохромизм – это обратимый фотоиндуцированный переход вещества из одного состояния в другое, которое отличается от начального в первую очередь спектральными характеристиками поглощения и пропускания света. Как правило, фотохромные свойства проявляются под действием достаточно коротковолнового излучения, длины волн которого лежат в фиолетовой области видимого света и в ультрафиолетовом диапазоне.

Существует множество способов получения фотохромных материалов. Одним из важнейших является активация исходных материалов (например, органических или неорганических стекол) светочувствительными микрокристаллами галогенидов серебра или меди. Такие кристаллы иногда называют центрами чувствительности. Под действием света центры чувствительности становятся т.н. центрами окраски, концентрация которых и определяет новые спектральные свойства материала.

Фотохромизм нашел широкое применение в различных областях науки, техники и в повседневной жизни. Это явление применяется для регистрации и обработки информации, для модуляции добротности лазеров, в качестве оптических затворов, для производства игрушек, декоративного оформления и создания средств камуфляжа. Но, конечно же, наиболее важное приложение явления фотохромизма – это создание средств защиты органов зрения от светового излучения

Рассмотрим несложную теорию кинетики фотохромизма, которая вполне удовлетворительно описывает зависимость прозрачности фотохромного материала от времени. Изменение концентрации центров окраски описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = k_0 I (c^* - c) - k_f c \quad (1)$$

где c – концентрация центров окраски, c^* – концентрация центров чувствительности, k_a, k_f – т.н. константы активации и обесцвечивания, I – интенсивность облучения.

Приравняв в (1) производную к нулю, получим равновесную концентрацию центров окраски, которой можно достичь при заданной интенсивности I :

$$c_0 = \frac{k_a I c^*}{k_a I + k_f} \quad (2)$$

Решением уравнения (1) с учетом (2) является следующая функция:

$$c = c_0(1 - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

где $\beta = k_a I + k_f$.

Отметим, что выражение (3) описывает динамику концентрации центров окраски только в том случае, когда начальная концентрация равнялась нулю при $t = 0$. Если же начальная концентрация центров окраски равнялась c_1 , то зависимость концентрации c от времени будет описываться следующим уравнением:

$$c = c_0 - (c_0 - c_1)e^{-\beta t} \quad (4)$$

Если же отключить источник коротковолнового излучения, то концентрация центров окраски будет экспоненциально стремиться к нулю:

$$c = c_2 e^{-k_f t} \quad (5)$$

Отметим, что скорость возрастания концентрации β растет с увеличением интенсивности облучения I , в то время как скорость релаксации не зависит от I и определяется только внутренними свойствами фотохромного вещества.

Увеличение концентрации c приводит к потемнению фотохромной среды и, следовательно, к уменьшению коэффициента пропускания.

При этом в широком диапазоне концентраций коэффициент пропускания r будет линейно убывать с ростом c :

$$r = r_0 - bc \quad (6)$$

где r_0 - коэффициент пропускания среды в отсутствии центров окраски.

Полученные формулы (4), (5), (6) хорошо описывают динамику потемнения и осветления реальных фотохромных стекол

Автоколебания в системах с фотохромными стеклами могут быть реализованы следующим образом. Представим себе пучок достаточно длинноволнового излучения (например, красного цвета), падающий на фотохромное стекло. Напомним, что столь длинноволновое излучение не может вызвать потемнения фотохромной среды. Пройдя через стекло, красный пучок падает на фотоэлемент, фототок от которого переключает реле, которое, в свою очередь, включает ультрафиолетовую лампу, облучающую фотохромное стекло. Концентрация центров окраски в стекле начинает расти, что приводит к уменьшению коэффициента пропускания.

При достижении концентрацией некоторого порогового значения c_2 прозрачность стекла уменьшится настолько, что ток фотоэлемента станет столь малым, что

произойдет отключение ультрафиолетовой лампы. После этого концентрация центров окраски начнет убывать, а прозрачность стекла – расти. При достижении концентрацией некоторого значения c_1 ток фотоэлемента возрастет настолько, что реле опять включит ультрафиолетовую лампу, и процесс повторится. В системе возникнут автоколебания, которые можно будет наблюдать по включению и выключению ультрафиолетовой лампы или по изменению прозрачности фотохромного стекла.

Необходимым условием возникновения автоколебаний (их иногда называют релаксационными) является неравенство $c_1 < c_2$. В этом случае в зависимости $I(c)$ появится неоднозначность. Такое гистерезисное поведение одного из параметров нелинейной системы часто приводит к автоколебательному или триггерному режимам.

Используя (4) и (5), нетрудно найти период автоколебаний:

$$T = \frac{1}{\beta} \ln \frac{c_0 - c_1}{c_0 - c_2} + \frac{1}{k_f} \ln \frac{c_2}{c_1} \quad (7)$$

Отметим, что зависимость коэффициента β от интенсивности облучения I дает возможность управления периодом автоколебаний.

Для обнаружения автоколебаний пучок красного цвета от гелий-неонового лазера пропускаться через систему из двух поляризаторов, а затем проходил через фотохромное стекло и падал на фотоэлемент (фотодиод). Поляризаторы необходимы, поскольку с их помощью можно плавно менять интенсивность в длинноволновом пучке. В наших экспериментах интенсивность лазерного излучения приходилось уменьшать, чтобы попасть в необходимый для возникновения автоколебаний интервал концентраций центров окраски. В качестве активного фотохромного элемента мы использовали бездиоптрийную очковую линзу французского производства, изготовленную по технологии “transitions”. Согласно документации, под действием ультрафиолетового излучения коэффициент прозрачности данной линзы может меняться от 90 до 17 процентов. В качестве источника ультрафиолетового излучения с характерной длиной волны 395 нанометров нами использовался светодиодный блок ультрафиолетового фонаря.

Основными элементами схемы, управляющей включением и выключением ультрафиолетовой лампы, являются полевой транзистор с изолированным затвором, который работает в режиме ключа, р-і-n фотодиод D1 и операционный усилитель (ОУ) (см. рис.1):

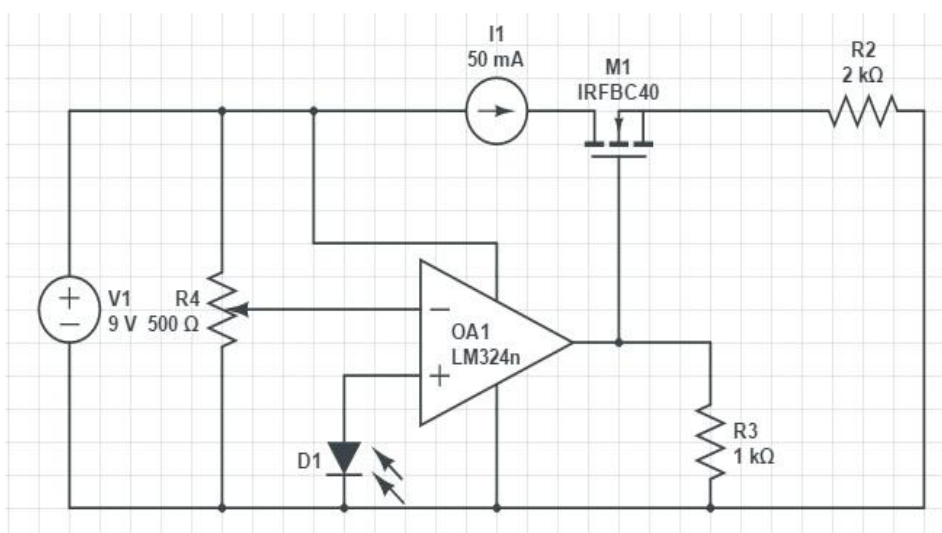


Рис.1. Электрическая схема для наблюдения автоколебаний.

При включении прибора напряжение на инвертирующем входе ОУ незначительно больше, чем на прямом, вследствие чего усиления сигнала не происходит и затвор транзистора остаётся в закрытом положении. Когда на фотодиод подаётся направленный поток красного света, в нем начинается дрейф заряженных частиц и на прямом входе ОУ напряжение равно $U_{\text{общ}} = U_1 + U_{\text{смещ}} \approx 0$. С помощью делителя напряжения, реализованного на потенциометре, напряжение $U_{\text{инверт}} < U_{\text{общ}}$, вследствие чего на выходе ОУ появляется потенциал, открывающий затвор полевого транзистора, и через лампу R2 течёт основной ток. Когда поток света, падающий на фотодиод, уменьшается, за счет потемнения фотохромного стекла уменьшается и напряжение смещения, вследствие чего $U_{\text{инверт}} > U_{\text{общ}}$, напряжение на выходе ОУ становится равным 0, затвор транзистора разряжается через сопротивление R3, лампа R2 гаснет. Для питания схемы нами использовался источник постоянного напряжения в 9 вольт.

После выставления с помощью поляризаторов необходимой интенсивности падающего пучка красного цвета удалось добиться возникновения автоколебаний.

В качестве характеристики колебаний мы использовали и измеряли напряжение на фотодиоде, которое пропорционально интенсивности падающего пучка красного цвета. Эта интенсивность, в свою очередь, зависит от прозрачности фотохромного стекла, уменьшаясь во время горения ультрафиолетовой лампы и возрастая после ее отключения. На рис.2 приведена зависимость напряжения на фотодиоде от времени.

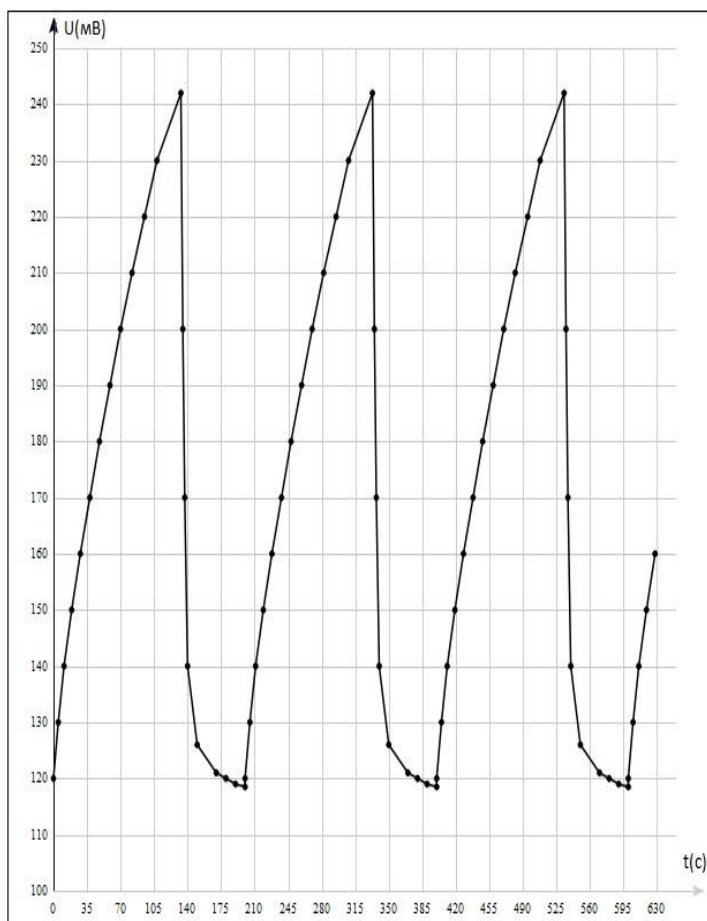


Рис 2. График зависимости напряжения на фотодиоде от времени при одном из автоколебательных режимов.

Как видно из рис.2, период колебаний равен примерно 200 секунд. При этом время горения ультрафиолетовой лампы составляло примерно 70 секунд, а время релаксации – 130 сек. Отметим, что при проведении экспериментов путем варьирования интенсивности I , интенсивности красного лазерного пучка и сопротивления R4 нам удавалось наблюдать колебания с периодом от 65 до 240 секунд.

В данной работе нами предсказано и обнаружено возникновение автоколебаний в системах с фотохромными стеклами. Это имеет значительный научный интерес. Дело не только в том, что обнаружение новой автоколебательной системы само по себе достаточно важно. Главное состоит в следующем. Кроме твердых стекол фотохромизм может проявляться также в жидких и гелеобразных средах. При этом диффузия центров окраски будет весьма значительна. А это значит, что локальная область потемнения, вызванная падающим пучком ультрафиолетового излучения, будет расширяться и размываться. Это дает уникальную возможность экспериментального исследования нелинейного взаимодействия двух или нескольких автоколебательных элементов, связанных друг с другом через диффузию. Более того,

если связать ряд фотохромных элементов в цепочку или плоскую матрицу, станет возможным наблюдение концентрационных нелинейных волн, которые сейчас исследуют во многих лабораториях мира, в основном, в химических активных средах.

Список литературы

1. Mikhailov, A.S. Foundations of Synergetics: Distributed Active Systems / A.S. Mikhailov. – Germany, Berlin: Springer-Verlag, 1991
2. Хакен, Г. Синергетика / Г. Хакен. – Москва: Мир, 1980.
3. Winfree, A.T. When Time Breaks Down. / A.T. Winfree. – Princeton Univ. Press, 1987
4. Бутенин, Н.В. Введение в теорию нелинейных колебаний / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, Н.Л. Фуфаев. – Москва: Наука, 1976.
5. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин – Москва: ГИФМЛ, 1959.
6. Барачевский, В.А. Фотохромизм и его применение / В.А. Барачевский, Г.И. Лашков, В.А. Цехомский – Москва: Химия, 1977.