

УДК 621.383:621.372

ФИЗИКА

Академик АН УзССР Э. И. АДІРОВИЧ

К ТЕОРИИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЕЙ

1. Принципиальную особенность оптоэлектронных цепей составляет то, что кроме электрических (токовых) ветвей, они содержат также оптические ветви (световоды), по которым сигналы передаются в виде потока фотонов. Объединение электрической и оптической подсистемы в единую цепь достигается с помощью светоизлучателей и фотоприемников. Реализация этих элементов возможна сейчас на базе различных физических явлений, однако их функциональные принципы едины. Светоизлучатель представляет собой устройство, преобразующее электрический сигнал в световой (рис. 1); фотоприемник (рис. 2) осуществляет обратное преобразование.

Как светоизлучатель, так и фотоприемник — трехполюсники, но это трехполюсники особого типа, обладающие двумя электрическими и одним оптическим полюсом. Поскольку для света не существует закона сохранения, подобного закону сохранения заряда, простейший элемент оптической части оптоэлектронной цепи представляет собой однополюсник. Передача сигналов в оптоэлектронных цепях происходит как по электрическим, так и по оптическим каналам (световодам). Поэтому электрические двухполюсники — светоизлучатель и фотоприемник — представляют собой каждый устройство с отдельным входом и выходом. Светоизлучатель имеет электрический вход и оптический выход; у фотоприемника — оптический вход и электрический выход.

Оптические связи с оптоэлектронных цепях можно создавать между электрически не связанными контурами, между ветвями, принадлежащими одному и тому же разветвленному контуру, но не имеющими общих узлов, между ветвями с общими узлами и, наконец, между элементами одной и той же ветви. Тем самым создается многообразие функций и богатство возможностей синтеза оптоэлектронных цепей.

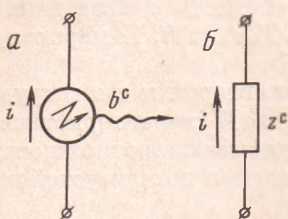


Рис. 1. Светоизлучатель (а) и его электрический эквивалент (б)

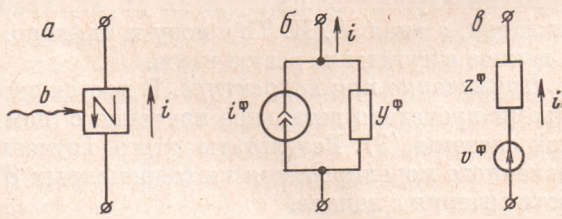


Рис. 2. Фотоприемник (а) и его электрические эквиваленты (б, в)

Основой анализа и синтеза оптоэлектронных устройств и систем должна служить теория оптоэлектронных цепей. Такой теории в форме, аналогичной теории электронных цепей по общности принципов, строгости и разработанности расчетных методик, не существует. Имеются лишь общие наброски ее построения, высказанные в связи с частной задачей регенеративного оптрона⁽¹⁻³⁾. По-видимому, основная неопределенность связана с тем, что в оптоэлектронных цепях содержатся такие элементы, как светоизлучатели, фотоприемники и световоды, не имеющие аналогов и средств эквивалентного описания в обычной электронике.

Покажем, что все задачи анализа и синтеза оптоэлектронных цепей могут быть решены с помощью теории электронных цепей, дополненной теоремой преобразования оптоэлектронной цепи в электронную с помощью введения системы эквивалентных источников, моделирующих как внутренние оптические связи, так и оптические входы системы. Мы проведем доказательство сформулированной выше теоремы для линейного случая из-за простоты и наглядности. Идея метода эквивалентной замены оптоэлектронных цепей электронными в общем нелинейном случае кратко излагается в конце заметки. Ее детальное развитие и некоторые приложения к нелинейным задачам анализа и синтеза оптоэлектронных цепей будут даны отдельно.

2. Пусть k и n — индексы двух ветвей оптоэлектронной цепи, в первой из которых находится светозлучатель, а во второй — фотоприемник (рис. 3). Такой оптроп с прямой оптической связью характеризуется h -матрицей ⁽²⁻⁴⁾

$$((h)) = \begin{pmatrix} z_k^c & 0 \\ \beta_{nk}\theta_{nk}\alpha_k & 1/z_n^\Phi \end{pmatrix}, \quad (1)$$

и, следовательно,

$$v_k = z_k^c i_k, \quad (2)$$

$$i_n^\Phi = \beta_{nk}\theta_{nk}\alpha_k i_k, \quad v_n^\Phi = z_n^\Phi \beta_{nk}\theta_{nk}\alpha_k i_k; \quad (3)$$

здесь

$$\alpha_k = \partial B_k^c / \partial I_k, \quad \theta_{nk} = \partial B_{nk} / \partial B_k^c, \quad \beta_{nk} = \partial I_k^\Phi / \partial B_{nk} \quad (4)$$

— соответственно дифференциальные коэффициенты светоотдачи излучателя, светопередачи оптического тракта (световода) и фотоэффективности фотоприемника; b_k^c , b_{nk} — дифференциальные световые потоки (ΔB_k^c и ΔB_{nk}), испускаемый излучателем и падающий на фотоприемник; z_k^c и z_n^Φ — импедансы светозлучателя и фотоприемника; i_k — ток в ветви, где находится излучатель, v_k — падение напряжения на излучателе; i_n^Φ — фототок, создаваемый фотоприемником при его замене в цепи эквивалентом в виде генератора тока, шунтированного адмитансом фотоприемника y_n^Φ ; v_n^Φ — фото-э.д.с., создаваемая фотоприемником при его замене в цепи эквивалентом в виде генератора напряжения, последовательно нагруженного импедансом фотоприемника z_n^Φ .

При разветвленных оптических связях, когда данный светозлучатель соединен с несколькими фотоприемниками или данный фотоприемник — с несколькими излучателями, принципиальная структура системы уравнений (2) и (3) не изменяется, только в первой ситуации они записываются как

$$v_k = z_k^c i_k, \quad (2')$$

$$i_n^\Phi = \beta_{nk}\theta_{nk}\alpha_{nk} i_k, \quad v_n^\Phi = z_n^\Phi \beta_{nk}\theta_{nk}\alpha_{nk} i_k, \quad n = n_1, n_2, \dots, \quad (3')$$

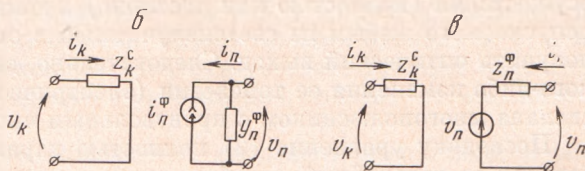
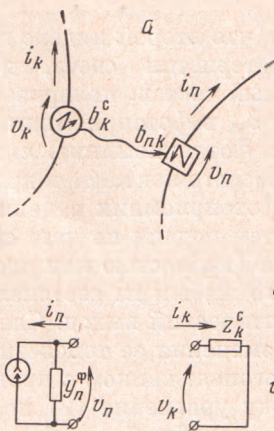


Рис. 3. Оптическая связь в оптоэлектронной цепи (а) и ее выражения в электронном эквиваленте цепи (б, в) (см. формулы (1))

а во второй как

$$v_k = z_k^c i_k, \quad k = k_1, k_2, \dots, \quad (2'')$$

$$i_n^\Phi = \sum_k \beta_{nk} \theta_{nk} \alpha_{nk} i_k, \quad v_n^\Phi = z_n^\Phi \sum_k \beta_{nk} \theta_{nk} \alpha_{nk} i_k. \quad (3'')$$

Заметим, что второй индекс коэффициента β отражает возможные различия характеристик света, испускаемого различными излучателями (спектральный состав, поляризация и др.), а также условий ввода светового потока b_{nk} в фотоприемник (показателей преломления материалов световода и фотоприемника, скорости поверхностной рекомбинации на грани оптического контакта и др.).

Любой фотоприемник в цепи может быть сделан оптическим входом системы путем подачи на него света от внешнего источника. Аналогично, осуществляя (полностью или частично) внешний вывод светового потока, испускаемого любым из светоизлучателей в оптоэлектронной цепи, можно получить оптический выход. Следовательно, оптоэлектронная цепь без какого-либо изменения ее топологии (электрической структуры) может быть сделана многополюсником с произвольным числом входов и выходов.

Поскольку уравнение (2) полностью характеризует излучатель и не зависит от дальнейшей судьбы испускаемого излучения, оно остается неизменным и для выходных светоизлучателей. Для входного фотоприемника, на который подается световой сигнал b_n' или $b_n^{c'}$ (в зависимости от того, служит ли оптическим входом непосредственно фотоприемник или же соединенный с ним световод), формулы (3) видоизменяются так:

$$i_n^\Phi = \beta_n' b_n', \quad v_n^\Phi = z_n^\Phi \beta_n' b_n', \quad (5)$$

или

$$i_n^\Phi = \beta_n' \theta_n' b_n^{c'}, \quad v_n^\Phi = z_n^\Phi \beta_n' \theta_n' b_n^{c'}. \quad (6)$$

Таким образом доказана основная теорема теории линейных оптоэлектронных цепей:

Оптоэлектронная цепь эквивалентна изоморфной (т. е. имеющей ту же электрическую структуру) электронной цепи, в которой соответственно приведенным выше формулам каждый светоизлучатель заменен его импедансом, а каждый фотоприемник — либо системой параллельно расположенных генераторов тока, зашунтированной адмитансом фотоприемника, либо системой последовательно расположенных генераторов напряжения, нагруженных импедансом фотоприемника.

Общий метод анализа оптоэлектронной цепи состоит из трех этапов. Сначала описанным выше способом строится ее электрический эквивалент. Затем методами теории электронных цепей проводится анализ этого электрического эквивалента, что определяет распределение узловых напряжений и токов в ветвях и контурах рассматриваемой оптоэлектронной цепи. После этого по формулам

$$b_k^c = \alpha_{nk} i_k, \quad b_s'' = \alpha_s'' i_s, \quad b_{nk} = \theta_{nk} b_{nk}^c, \quad b_i' = i_i^\Phi / \beta_i' \quad (7)$$

находятся оптические характеристики цепи — световые потоки на истоках (светоизлучателях) и стоках (фотоприемниках), в том числе выходные b'' и входные b' *.

Синтез оптоэлектронной цепи (оптронной системы ОИ) проводится в два этапа. Сначала по заданной аппаратной функции производится синтез эквивалентной электронной цепи. При этом диапазон возможностей

* В некоторых случаях световые характеристики удобнее представлять не в потоках, а в интенсивностях или освещенностях, что необходимо учитывать в размерностях и численных значениях α , θ и β .

синтеза и выбор оптимального варианта значительно расширяются и облегчаются, так как путем введения в моделирующую цепь эквивалентных источников и импедансов можно обеспечить электрическую развязку контуров и каскадов, одностороннюю передачу сигналов, создание входов и выходов в любых звеньях системы, осуществление положительных и отрицательных оптических обратных связей, а в нелинейных цепях — оптические решения задач переключения, генерации, параметрического управления и др., связанные со специфическими особенностями оптоэлектроники (³, ⁵). Завершающая фаза синтеза оптоэлектронной цепи состоит в замене эквивалентных элементов их оптоэлектронными прообразами — фотоприемниками, светоизлучателями и световодами, при этом передаточные функции β , θ и α определяются с помощью приведенных выше формул (4).

Все линейное рассмотрение проведено в малосигнальном приближении; буквы b , i , v обозначают изменения (сигналы) соответственно света, тока и напряжения, а B , I — смещения. Также малыми буквами z , y , α и т. д. обозначены дифференциальные значения соответствующих величин. Динамический диапазон линейного приближения зависит от элементов базы и от структуры цепи.

Построение электрического эквивалента оптоэлектронной цепи в общем нелинейном случае осуществляется путем исключения оптических характеристик B_{nk} , B_{nk}^0 , B'_i , B''_i из полной системы ее уравнений. Результирующая система уравнений описывает эквивалентную цепь, имеющую ту же структуру и те же значения токов ветвей и напряжений узлов, что и оптоэлектронная цепь. Задачи нахождения аппаратной функции системы по данным характеристикам ее элементов (анализ) или нахождения передаточных функций элементов и связей (состава и конфигурации цепи) по данной аппаратной функции (синтез) решаются методами теории нелинейных электрических цепей. Переход от электрического эквивалента к его оптоэлектронному прообразу производится с помощью подсистемы уравнений, связывающих электрические и оптические характеристики. Одним из примеров применений этого метода в его первоначальном варианте служит теория регенеративного оптрона (¹⁻³, ⁶). На основе линейной теории проведен синтез оптоэлектронных низкочастотных τ -фильтров (⁷, ⁸), а также рассмотрены оптроны с положительной оптической обратной связью в устойчивом и сверхрегенеративном режимах (³).

Физико-технический институт им. С. В. Стародубцева
Академии наук УзССР
Ташкент

Поступило
29 I 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Э. И. Адирович, Д. А. Аронов, Н. Юнусов, Физика и техника полупроводников, **3**, № 9, 1395 (1969).
- ² Э. И. Адирович, Тез. Всесоюз. межвузовск. конф. по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, **2**, 1971, стр. 225.
- ³ Э. И. Адирович, Д. А. Аронов и др., сборн. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника, Ташкент, 1972, стр. 3.
- ⁴ Э. И. Адирович, Д. А. Аронов, Н. Юнусов, ДАН, **192**, 1011 (1970).
- ⁵ Э. И. Адирович, Изв. высш. учебн. завед., Радиоэлектроника, **11**, 679 (1968).
- ⁶ Э. И. Адирович, А. Г. Вишневский, П. М. Карагеоргий-Алкалаев, ДАН, **186**, 1281 (1969).
- ⁷ Э. И. Адирович, А. Г. Вишневский, П. М. Карагеоргий-Алкалаев, Тез. IV Всесоюз. межвузовск. конф. по теории и методам расчета нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, **2**, 1971, стр. 227; Тез. докл. Всесоюз. научн. конф. Основные задачи микроэлектроники и области ее применения, М., 1972, стр. 86.
- ⁸ Э. И. Адирович и др., в сборн. Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника, 1972, стр. 104; Микроэлектроника, **2**, № 1 (1973).