



Е. Филиппов

**Нелинейная
электротехника**



6П2.1

Ф53

УДК 621.3.018.783

EUGEN PHILIPPOW

Nichtlineare Elektrotechnik

Leipzig, 1971, Akademische Verlagsgesellschaft Gest und Portig
K—G.

Е. ФИЛИППОВ

Нелинейная электротехника

Редактор издательства М. И. Николаева
Переплет художника Е. В. Никитина
Технический редактор М. П. Осипова
Корректор М. Г. Гулина

Сдано в набор 19/XI 1975 г. Подписано к печати 8/IV 1976 г.
Формат 84×108^{1/32} Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 26,04
Уч.-изд. л. 27,19 Тираж 12 000 экз. Зак. 447 Цена 1 р. 95 к.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Филиппов Е.

Ф53 Нелинейная электротехника. Пер. с нем. Под ред.
А. Б. Тимофеева. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.,
«Энергия», 1976.

496 с. с ил.

В книге описаны современные методы расчета установившихся и переходных процессов в нелинейных цепях. Изложены аналитические и численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений. Даны рекомендации по методике использования ЭВМ. Изложена общая теория параметрических цепей. Приведено исследование большого количества применяемых на практике преобразовательных схем, а также рассмотрены вопросы синтеза нелинейных устройств. Первое издание книги вышло в 1968 г.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия аспирантами и студентами вузов, а также справочного пособия научными и инженерно-техническими работниками.

Ф 30306-273
051(01)-76 74-76

6П2.1

© Перевод на русский язык, издательство «Энергия», 1976 г.

Предисловие ко второму изданию

Автор данной книги, профессор Е. Филиппов, много лет преподает в электротехническом институте в Ильменау и является одним из организаторов и активным участником интернациональных коллоквиумов, периодически проводимых в Ильменау. Название книги «Нелинейная электротехника» отражает широту рассмотренных в ней вопросов.

По сравнению с первым изданием, вышедшим на русском языке в 1968 г., во втором издании значительно подробнее освещены особенности использования нелинейных элементов и устройств в современных вычислительных машинах. Включены некоторые вопросы машинного анализа и проектирования нелинейных устройств. Более подробно изложены методы исследования дифференциальных уравнений второго порядка. Рассмотрены энергетические соотношения в нелинейных цепях. Введена новая глава «Параметрические системы», заменившая «Дополнение», написанное А. З. Кулебякиным для первого издания. Объем второго издания возрос на одну треть. Текст разбит на пять глав и распределен иначе, чем в восьми главах первого издания.

Книга рассчитана на широкий круг читателей с различным уровнем подготовки. Часть материала дает возможность получить общее представление о назначении различных устройств и принципе их действия. Наряду с этим имеется материал, требующий глубокого осмысления, и рассчитан на подготовленного читателя.

В русском издании набран петитом текст, содержащий пояснения и некоторые сложные математические выкладки. Компактность, обеспечиваемая петитом при чтении материала, имеющего преимущество, облегчает восприятие некоторых математических выкладок. Значительно сокращено количество нумерованных математических выражений за счет исключения тех, на

Е. ФИЛИППОВ

Нелинейная электротехника

*Издание второе, переработанное
и дополненное*

Перевод с немецкого канд. техн. наук
А. З. КУЛЕБЯКИНА

Под редакцией канд. техн. наук
А. Б. ТИМОФЕЕВА



«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1976

6П2.1

Ф53

УДК 621.3.018.783

EUGEN PHILIPPOW

Nichtlineare Elektrotechnik

Leipzig, 1971, Akademische Verlagsgesellschaft Gest und Portig
K—G.

Е. Ф И Л И П П О В

Нелинейная электротехника

Редактор издательства М. И. Николаева
Переплет художника Е. В. Никитина
Технический редактор М. П. Осипова
Корректор М. Г. Гулина

Сдано в набор 19/XI 1975 г. Подписано к печати 8/IV 1976 г.
Формат 84×108^{1/32} Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 26,04
Уч.-изд. л. 27,19 Тираж 12 000 экз. Зак. 447 Цена 1 р. 95 к.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Филиппов Е.

Ф53 Нелинейная электротехника. Пер. с нем. Под ред.
А. Б. Тимофеева. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.,
«Энергия», 1976.

496 с. с ил.

В книге описаны современные методы расчета установившихся и переходных процессов в нелинейных цепях. Изложены аналитические и численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений. Даны рекомендации по методике использования ЭВМ. Изложена общая теория параметрических цепей. Приведено исследование большого количества применяемых на практике преобразовательных схем, а также рассмотрены вопросы синтеза нелинейных устройств. Первое издание книги вышло в 1968 г.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия аспирантами и студентами вузов, а также справочного пособия научными и инженерно-техническими работниками.

Ф 30306-273
051(01)-76 74-76

6П2.1

© Перевод на русский язык, издательство «Энергия», 1976 г.

Предисловие ко второму изданию

Автор данной книги, профессор Е. Филиппов, много лет преподает в электротехническом институте в Ильменау и является одним из организаторов и активным участником интернациональных коллоквиумов, периодически проводимых в Ильменау. Название книги «Нелинейная электротехника» отражает широту рассмотренных в ней вопросов.

По сравнению с первым изданием, вышедшим на русском языке в 1968 г., во втором издании значительно подробнее освещены особенности использования нелинейных элементов и устройств в современных вычислительных машинах. Включены некоторые вопросы машинного анализа и проектирования нелинейных устройств. Более подробно изложены методы исследования дифференциальных уравнений второго порядка. Рассмотрены энергетические соотношения в нелинейных цепях. Введена новая глава «Параметрические системы», заменившая «Дополнение», написанное А. З. Кулебякиным для первого издания. Объем второго издания возрос на одну треть. Текст разбит на пять глав и распределен иначе, чем в восьми главах первого издания.

Книга рассчитана на широкий круг читателей с различным уровнем подготовки. Часть материала дает возможность получить общее представление о назначении различных устройств и принципе их действия. Наряду с этим имеется материал, требующий глубокого осмысливания, и рассчитан на подготовленного читателя.

В русском издании набран петитом текст, содержащий пояснения и некоторые сложные математические выкладки. Компактность, обеспечиваемая петитом при чтении материала, имеющего преимущество, облегчает восприятие некоторых математических выкладок. Значительно сокращено количество нумерованных математических выражений за счет исключения тех, на

которые отсутствуют ссылки в тексте, а также за счёт устранения некоторых простых промежуточных выражений. Буквенные и условные графические обозначения, а также термины и определения приведены в соответствие с действующими ГОСТ и традициями отечественной литературы. Указатель литературы изменен так, чтобы читатель смог воспользоваться новейшей литературой на русском языке, дополняющей текст данной книги.

Возможно, некоторым читателям покажется, что автор слишком много места уделил исследованию нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, в частности уравнениям Дуффинга. По-видимому, здесь сказались научные интересы автора, и это, вероятно, будет положительно оценено многими читателями. Можно было бы упрекнуть автора в том, что ряд вопросов он изложил весьма сжато, а кое-что и вовсе не включил в текст. Но это объясняется тем, что заголовок «Нелинейная электротехника» соответствует чрезвычайно широкому кругу понятий и идей, которым посвящена весьма обширная литература. Осветить все это, даже в сжатой форме, в одной книге просто невозможно.

В целом книга профессора Е. Филиппова отражает материал по нелинейной электротехнике, опубликованный в последние годы во многих странах. Она является результатом многолетней работы опытного педагога и ученого, написана обстоятельно и методично и, существенно отличаясь от других аналогичных книг, несомненно принесет пользу не только как справочное издание, но и как учебное пособие для аспирантов и студентов вузов.

Переводчик и редактор выражают признательность кандидату технических наук Ю. Е. Нитусову и инженеру В. В. Писклову за ценную помощь при подготовке русского перевода к печати.

А. Б. Тимофеев

Из предисловия автора к первому изданию

Как видно из названия, книга посвящена проблемам нелинейной электротехники. Для решения различного рода задач линейной электротехники существуют многочисленные методы, которые частично разработаны специально для электротехники, а частично заимствованы из других областей техники. К таким методам относятся операторное и матричное исчисления, векторное и тензорное исчисления, корреляционное исчисление и т. п. Они представляют собой весьма ценные средства, значительно расширяющие возможности специалиста при решении многих практических задач. Преимущества перечисленных методов достаточно хорошо известны. Им посвящены многочисленные монографии и публикации, которые следует рассматривать как необходимую составную часть совершенствования образования современного инженера-электрика.

Однако применение указанных выше методов ограничено областью решения линейных задач, поскольку линеаризация некоторых практических задач не всегда возможна. Многочисленные электротехнические задачи, такие как выпрямление, модуляция и демодуляция, умножение и деление частоты, генерирование колебаний, функциональные преобразования, стабилизация напряжения и тока и т. п., основаны на нелинейных зависимостях между определенными величинами и учет этих зависимостей имеет решающее значение.

К настоящему времени разработано много методов для решения нелинейных задач электротехники, с которыми специалист встречается на каждом шагу. К сожалению, систематическое изложение этих методов отсутствует и в большинстве случаев они описаны в отдельных публикациях, которые известны весьма небольшому кругу специалистов. Однако при современном развитии электротехники знакомство с ними необходимо для успешной работы инженера-электрика. Цель данной работы — ликвидировать пробел в существующей литературе, и я очень буду счастлив, если это удалось.

Ильменау, лето 1962 г.

Е. Филиппов

Из предисловия автора ко второму изданию

Во второе издание книги внесены изменения. Так, нелинейные элементы и их характеристики, которые в первом издании были распределены в первых трех главах, в новом издании объединены в одной (первой) главе и значительно дополнены сведениями о новых элементах и их характеристиках (туннельные диоды, тиристоры, триносторы и т. п.). Также значительно претерпел изменения и материал о гармоническом анализе при синусоидальной форме управления нелинейным элементом, введен материал, затрагивающий вопросы энергетических соотношений в нелинейной цепи. Рассмотрен ряд новых современных методов расчета нелинейных цепей.

Вторая глава посвящена рассмотрению методов расчета нелинейных цепей в установившемся режиме.

Изложение решения нелинейных дифференциальных уравнений (переходные режимы) также объединено в отдельную (третью) главу, в которой дополнительно введено рассмотрение ряда новых аналитических и численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений и прежде всего среди них следует отметить методы, основанные на малом параметре. В этой же главе введено рассмотрение основных положений теории устойчивости.

Учитывая интенсивное использование при решении нелинейных задач вычислительной техники, в книге введены разделы об использовании вычислительных машин как для решения нелинейных дифференциальных уравнений, так и выполнения гармонического анализа.

Написана новая, четвертая глава о параметрических цепях, в которой рассмотрена внутренняя взаимосвязь между нелинейными и параметрическими явлениями.

В пятой главе введен новый раздел об усилительных устройствах. Одновременно значительно шире рассмотрены вопросы о стабилизации, возникновении колебаний и регенерации, а также о магнитных усилителях. В заключение главы рассмотрены вопросы синтеза.

Ильменау, лето 1969 г.

Е. Филиппов

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1-1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

А. Классификация нелинейных характеристик

Предметом нелинейной электротехники является исследование явлений, у которых существует нелинейная связь между электрическими, магнитными или электрическими и магнитными величинами.

В общем случае нелинейная электрическая цепь может содержать резистор с нелинейным активным сопротивлением (элемент с потреблением энергии) и элемент с нелинейной индуктивностью или емкостью (элемент с накоплением энергии — индуктивную катушку или конденсатор).

На рис. 1-1,а показаны известные графические изображения линейных элементов — резистора R , конденсатора C и индуктивной катушки L , а на рис. 1-1,б — соответствующие изображения нелинейных элементов.

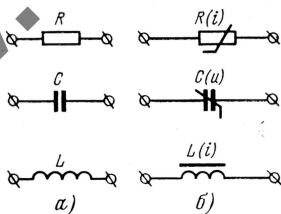


Рис. 1-1.

В отличие от линейной электротехники, где существует пропорциональная связь между электрическими и магнитными величинами

$$U = RI; \quad (1-1)$$

$$Q = CU; \quad (1-2)$$

$$\Psi = LI, \quad (1-3)$$

в нелинейной электротехнике эти зависимости достаточно сложны и в общем случае могут быть представлены в виде функциональных связей:

$$U = f_1(I); \quad (1-4)$$

$$\Psi = f_3(I); \quad (1-5)$$

$$Q = f_2(U). \quad (1-6)$$

Эти зависимости представляют собой характеристики соответствующих элементов. Так, принято говорить о вольт-амперной характеристике резистора (1-4), о вольберо-амперной характеристике катушки (1-5) и о кулон-вольтной характеристике конденсатора (1-6). В соответствии с физическими явлениями, лежащими в основе

нелинейных элементов, их характеристики имеют тот или иной вид и могут быть представлены в различных формах. В общем случае характеристики нелинейных элементов могут быть заданы в форме таблиц или кривых, а также в виде приближенных аналитических выражений.

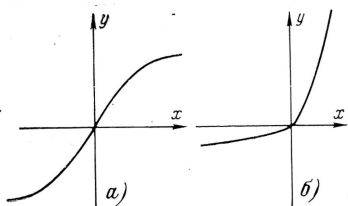


Рис. 1-2.

Классификацию характеристик нелинейных элементов $y=f(x)$ можно провести по различным признакам в зависимости от условий исследования.

Так, в некоторых случаях нелинейные характеристики подразделяют на симметричные (приводимое условие может быть достигнуто соответствующим выбором начала отсчета абсцисс), если $f(x) = -f(-x)$, и несимметричные, если $f(x) \neq -f(-x)$.

На рис. 1-2,а показана симметричная характеристика и на рис. 1-2,б — несимметричная характеристика. Симметрия или несимметрия характеристик имеет большое значение при решении многих технических задач, например при выпрямлении.

Возможно также подразделение характеристик на однозначные и многозначные. Характеристики, показан-

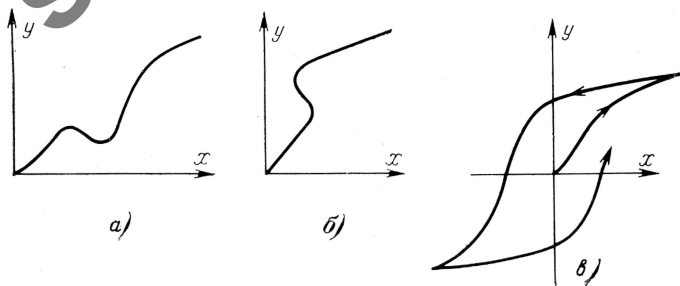


Рис. 1-3.

ные на рис. 1-2, а, б, являются однозначными. Примеры многозначных характеристик показаны на рис. 1-3 (а — для диатронного эффекта, б — для феррорезонансной цепи, в — для петли гистерезиса). Многозначность характеристик играет существенную роль при стабилизации, в релейных схемах и в схемах с запоминающими и логическими устройствами. В отдельных случаях характеристики могут быть подразделены на монотонноизменяющиеся и немонотонноизменяющиеся. На рис. 1-4

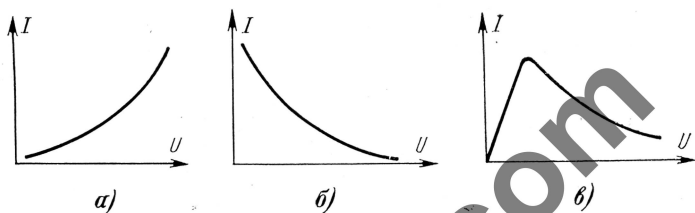


Рис. 1-4.

показаны: монотонно возрастающая вольт-амперная характеристика (а), у которой на всем протяжении $dI/dU > 0$; монотонно падающая вольт-амперная характеристика (б), у которой на всем протяжении $dI/dU < 0$; немонотонноизменяющаяся вольт-амперная характеристика (в), у которой $dI/dU \cong 0$. Данное подразделение имеет большое значение при исследовании вопросов колебаний.

Б. Временные характеристики физических величин

Статическая характеристика. Характеристика, у которой изменяющаяся физическая величина (ток или напряжение) с течением времени остается постоянной или ее изменение незначительно, называется характеристикой постоянного тока или в общем случае статической характеристикой. Подобная вольт-амперная характеристика вида $U = f(I)$ показана на рис. 1-5.

Характеристика мгновенных значений. Если к нелинейному элементу приложено переменное напряжение, то связь между мгновенными значениями тока и напряжения $u = f(i)$ называется характеристикой мгновенных значений или динамической характеристикой. Она также может быть представлена в виде характеристики, изображенной на рис. 1-5.

В тех случаях, когда статическая и динамическая характеристики нелинейного элемента не совпадают, последняя зависит от изменения величин во времени. Поэтому, наряду с динамической характеристикой, должны быть оговорены условия, при которых она получена.

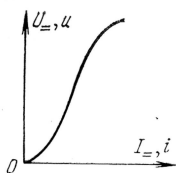


Рис. 1-5.

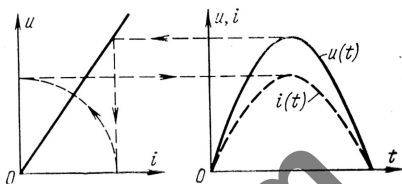


Рис. 1-6.

Так как максимальные (амплитудные) значения являются сами по себе мгновенными значениями, то зависимость $U_m = f(I_m)$ может быть представлена той же характеристикой.

Характеристика действующих значений. Если характеристика $u = f(i)$ линейна, как показано на рис. 1-6, то при синусоидальном напряжении ток также синусоидален и действующие значения напряжения и тока соответственно равны: $U = U_m / \sqrt{2}$; $I = I_m / \sqrt{2}$. В этом случае линейная характеристика мгновенных значений также выражает связь между действующими значениями тока и напряжения, причем характеристика действующих значений получается из характеристики мгновенных значений с помощью простого масштабного преобразования.

Если к нелинейному безынерционному¹ элементу (резистору) приложить синусоидальное напряжение, то ток не будет синусоидальным (§ 1-2). Он содержит наряду с основной частотой ряд высокочастотных гармоник. В связи с тем, что действующее значение напряжения равно $U = U_m / \sqrt{2}$, действующее значение тока составляет:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \neq I_{\text{макс}} / \sqrt{2}.$$

¹ Определение безынерционного сопротивления см. § 1-2.

Поэтому если значение ординат характеристики разделить на $\sqrt{2}$, чтобы таким образом перейти к действующим значениям напряжения, то для действующих значений тока это будет несправедливо. Ввиду отмеченного обстоятельства характеристика действующих значений $U=f(I)$ не может быть получена из характеристики мгновенных значений простым масштабным преобразованием.

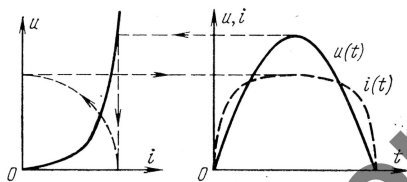


Рис. 1-7.

Рассмотрим два типичных случая:

1. Характеристика мгновенных значений имеет вид показанной на рис. 1-7.

При синусоидальном напряжении с действующим значением $U = U_m/\sqrt{2}$ действующее значение тока будет равно $I > I_m/\sqrt{2}$.

Характеристика действующих значений $U=f(I)$ проходит ниже характеристики мгновенных значений.

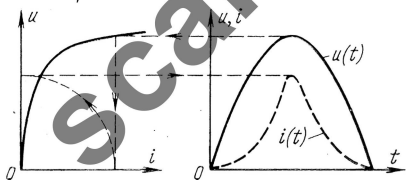


Рис. 1-8.

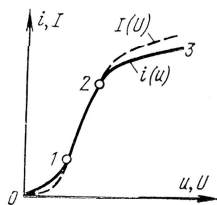


Рис. 1-9.

2. Характеристика мгновенных значений имеет вид показанной на рис. 1-8.

В этом случае при синусоидальном напряжении с действующим значением $U = U_m/\sqrt{2}$ действующее значение тока равно $I < I_m/\sqrt{2}$.

Характеристика $U=f(I)$ проходит выше характеристики мгновенных значений.

На рис. 1-9 представлена характеристика мгновенных значений, которая имеет три характерные области. Первая область 0—1 вогнутая, вторая область 1—2 практически линейная, третья область 2—3 выпуклая.

Для вышеприведенных случаев вольт-амперная характеристика действующих значений $U=f(I)$ в области 0—1 проходит ниже кривой $u=f(i)$. В области 1—2 обе кривые практически совпадают и в области 2—3 характеристика действующих значений проходит выше кривой $u=f(i)$.

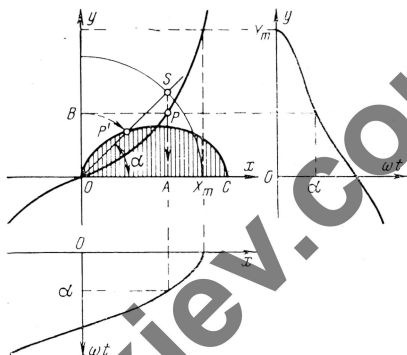


Рис. 1-10.

Разница между кривыми практически незначительна, так как при определении действующего значения несинусоидального тока

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2 + \dots}$$

высокочастотные гармоники складываются с основной частотой в квадрате. А так как амплитуды высших гармоник значительно меньше амплитуды основной частоты, то влияние их на действующее значение тока настолько мало, что в обоих случаях можно пользоваться одними и теми же кривыми.

Аналогичные рассуждения можно провести и в случае воздействия синусоидального тока.

Определение характеристики действующих значений. На рис. 1-10 показана динамическая характеристика нелинейного элемента $y(x)$ (это может быть вольт-амперная, веберо-амперная или кулон-вольтная характе-

ристика), которая связывает воздействующую величину x (напряжение, поток или заряд) и реакцию y (токи или напряжение). При воздействии на нелинейный элемент синусоидальной величины x в виде $x = X_m \cos \omega t$ реакция цепи y несинусоидальная.

Для определения действующего значения y выполняют следующее графическое построение: проводят окружность с центром в начале координат радиусом, равным амплитуде X_m .

Мгновенное значение x может быть получено с помощью проекции вектора $X_m = m_x \overline{OS}$, вращающегося относительно начала координат с угловой скоростью ω , на ось x . Мгновенное значение y определяется по характеристике $y(x)$ и соответствует точке P .

В связи с этим для мгновенных значений можно записать:

$$x = m_x \overline{OA}; \quad y = m_y \overline{OB},$$

где m_x и m_y — масштабные коэффициенты величин x и y .

Затем переносят \overline{OB} на вращающийся вектор \overline{OS} и получают точку P' :

$$\overline{OP'} = \overline{OB} \frac{1}{m_y} y.$$

Эту операцию повторяют для других значений времени t или углов $\alpha = \omega t$, а затем соединяют все получившиеся точки кривой $OP'C$, охватывающей заштрихованную область

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} \frac{y^2}{m_y^2} d\alpha = \frac{1}{2m_y^2} \int_0^{\pi/2} y^2 d\alpha,$$

ограниченную снизу осью абсцисс.

Так как

$$d\alpha = \omega dt = \frac{2\pi}{T} dt;$$

$$A = \frac{\pi}{m_y^2 T} \int_0^{T/4} y^2 dt$$

или

$$4A = \frac{\pi}{m_y^2 T} \int_0^T y^2 dt.$$