

3.9 Однофазный трансформатор

Трансформатором (в самом общем значении этого слова) называется специальное электротехническое устройство, предназначенное для изменения величины напряжения в сети переменного тока без изменения частоты системы (напряжения) переменного тока (ГОСТ 16110–82).

Принцип действия трансформаторов основан на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в обмотках генерируется магнитное поле, которое вызывает ЭДС во вторичных обмотках. Данная ЭДС пропорциональна числу витков в первичных и вторичных обмотках. Отношение электродвижущей силы в первичной обмотке ко вторичной называется коэффициентом трансформации.

Основными элементами конструкции трансформатора являются первичные и вторичные обмотки и ферромагнитный магнитопровод (обычно замкнутого типа). Обмотки расположены на магнитопроводе и индуктивно связаны друг с другом. Магнитопровод обычно состоит из набора металлических пластин, покрытых изоляцией, для предотвращения возникновения «вихревых» токов внутри магнитопровода.

Пластины сердечников штампуют из листов низкоуглеродистых сталей с добавками до 5 % Si, получивших название кремнистых электротехнических сталей. Кремний увеличивает удельное сопротивление, что снижает вихревые токи, однако делает сталь хрупкой.

Свойства электротехнической стали значительно улучшаются при текстурировании – холодной прокатке и последующем отжиге. Для эффективного использования текстурированных сталей применяют ленточные конструкции сердечников, когда магнитный поток целиком проходит вдоль направления легкого намагничивания, что позволяет уменьшить массу и габариты силовых трансформаторов на 25 %, а радиотрансформаторов – на 40 %.

Зачастую часть вторичной обмотки служит частью первичной и наоборот. Данный тип трансформаторов называют автотрансформаторами.

В зависимости от конструктивных особенностей однофазные трансформаторы могут иметь следующее исполнение (рисунок 31):

- однофазный трансформатор стержневого типа;
- трансформатор с броневым сердечником;
- трансформатор с тороидальнообразным сердечником.

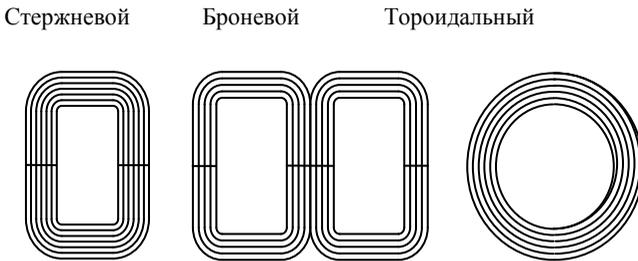


Рисунок 31 – Ленточные сердечники современных трансформаторов

В *трансформаторе стержневого типа* по половине первичной и вторичной обмоток располагаются на отдельных железных стержнях, концы которых объединены в замкнутую конструкцию при помощи специальных накладок, называемых ярмами. Два стержня и два ярма образуют при этом сплошное кольцо (сердечник), в котором и формируется при работе изделия замкнутый магнитный поток, объединяющий обе обмотки трансформатора.

В *трансформаторах броневомго типа* первичные и вторичные обмотки, состоящие каждая из ряда плоских катушек, расположены на сердечнике, образуемом двумя стержнями двух железных колец. Кольца, окружая обмотки, покрывают их почти целиком как бы броней, поэтому описываемый однофазный трансформатор называется броневым.

Известные модели однофазных трансформаторов по своему назначению делятся на следующие классы: *сварочные* (рисунок 32), *измерительные, испытательные, специального назначения, бытовые*.



Рисунок 32 – Сварочные трансформаторы

Измерительные трансформаторы тока и напряжения используются обычно для подключения различных регистрирующих приборов к высоковольтным цепям с целью измерения электрических характеристик действующего в них сигнала (силы тока, напряжения, мощности и т.п.).

Испытательные трансформаторы необходимы для получения высоких напряжений, применяемых в ходе испытаний изоляции электротехнического оборудования и изделий.

Трансформаторы специального назначения используются в электронных устройствах связи, а также в системах автоматики и телемеханики.

Бытовые трансформаторы служат для подключения устройств, эксплуатируемых в домашних условиях (осветительного и сигнального оборудования, специальной аппаратуры и т.п.), а также для работы в качестве стабилизаторов.

Трансформатор способен работать в одном из следующих режимов: *холостой, работа под нагрузкой, режим короткого замыкания*.

Режим холостого хода – это такое состояние трансформатора, когда его вторичная обмотка не подключена к нагрузке, т.е. когда её нагрузочная цепь разомкнута. При этом потребляемый трансформатором ток минимален и представляет собой ток холостого хода. В этом режиме энергия от сети практически не потребляется и в нем работает измерительный трансформатор напряжения.

Режим работы с нагрузкой является основным для любого однофазного трансформатора и реализуется путём подключения к его вторичной обмотке нагрузочных цепей.

В режиме короткого замыкания (КЗ) сопротивление вторичной цепи устройства близко к нулю. В таком режиме работают измерительный трансформатор тока и сварочный трансформатор в момент зажигания дуги.

Для того чтобы защитить преобразующее устройство от перегрузок, возникающих из-за КЗ, необходимо использовать специальные предохранители, устанавливаемые в его первичной или вторичной цепи. Коэффициент полезного действия (КПД) трансформаторов свидетельствует об эффективности преобразования напряжения и учитывает величину потерь, которые неизбежны из-за расхода мощности на нагрев сердечника вихревыми токами.

Возможность трансформации – одна из главных причин повсеместного распространения переменного тока в современной технике. Термин «трансформатор» дословно переводится как «преобразователь». Преобразование происходит за счёт разного числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2}. \quad (49)$$

Через повышающие трансформаторы электрическая энергия от генераторов подается в высоковольтную линию электропередачи.

У *повышающего трансформатора* во вторичной обмотке витков больше, чем в первичной, $k < 1$. На месте потребления устанавливаются понижающие трансформаторы, обеспечивающие безопасное и удобное использование электроэнергии.

У *понижающего трансформатора* во вторичной обмотке витков меньше, чем в первичной, $k > 1$.

Электрическая энергия передаётся через трансформатор посредством пульсаций магнитного поля, изменяющегося по синусоидальному закону; применение ферромагнитного сердечника позволяет усилить индукцию поля в сотни и тысячи раз.

Рассмотрим электромагнитные процессы преобразования и передачи энергии в двухобмоточном понижающем трансформаторе (рисунок 33). При подключении первичной обмотки w_1 сопротивлением r_1 к питающей сети переменного тока промышленной частоты напряжением u_1 по ней протекает ток холостого хода i_0 . Магнитодвижущая сила $w_1 i_0$, положительное направление которой

на рисунке 33, по правилу буравчика, вверх, создаёт переменное магнитное поле.

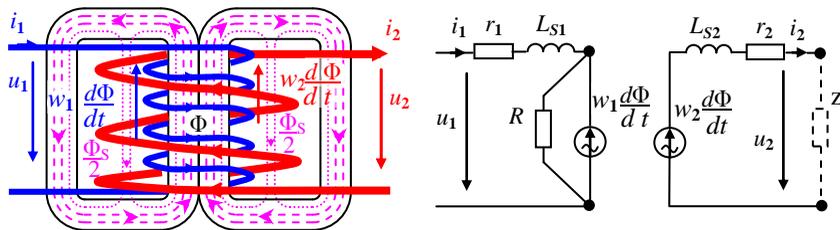


Рисунок 33 – Однофазный трансформатор и схемы замещения его обмоток

Основная часть силовых линий магнитного поля проходит по магнитопроводу, охватывая витки как первичной, так и вторичной обмоток и образуя магнитный поток связи Φ . Небольшая часть силовых линий магнитного поля частично или полностью проходит по воздуху и немагнитным материалам проводов, образуя магнитный поток рассеяния Φ_s , который в сотни раз меньше потока связи (его силовые линии показаны пунктиром). Для учёта магнитного потока рассеяния первичной обмотки в схеме замещения предусматривают индуктивность рассеяния L_{S1} .

Пульсации магнитного потока связи Φ индуцируют в витках первичной обмотки электродвижущую силу самоиндукции $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$. Знак « \rightarrow » показывает, что когда магнитный поток нарастает ($d\Phi/dt > 0$), ЭДС самоиндукции направлена навстречу создающему его току и препятствует этому нарастанию, запасая энергию в магнитном поле сердечника. Это учтено в направлении стрелки на схеме замещения. Во вторичной обмотке индуцируется ЭДС $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$

такого же направления, как и в первичной. Знак « \rightarrow » показывает, что в рассматриваемый момент она направлена от конца обмотки к началу. У вторичной обмотки также есть индуктивность рассеяния L_{S2} и активное сопротивление r_2 . В материале сердечника также индуцируются электродвижущие силы, под действием которых протекают вихревые токи, нагревающие сердечник. Потери энергии от вихревых токов вместе с потерями из-за гистерезиса учтены на схеме замещения в виде эквивалентного сопротивления R . Таким

образом, ток холостого хода i_0 может быть представлен как сумма тока перемагничивания сердечника i_M (индуктивного) и тока потерь i_A (активного). Ток перемагничивания существенно несинусоиден, однако при упрощённом расчёте его заменяют эквивалентной синусоидой.

При подключении потребителя Z к вторичной обмотке w_2 по ней протекает ток i_2 , создающий магнитодвижущую силу $w_2 i_2$ (положительное направление на рисунке 33, по правилу буравчика, вниз), которая стремится ослабить магнитный поток связи Φ . Однако снижение Φ приводит к уменьшению ЭДС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$, препятствующей току первичной обмотки. Увеличение первичного тока i_1 вызывает подмагничивание сердечника, и, в результате, магнитный поток Φ уменьшается незначительно (при упрощённых расчётах магнитный поток связи Φ и потери в магнитопроводе считают не зависящими от нагрузки). Отбор энергии от трансформатора по вторичной обмотке автоматически увеличивает её поступление из сети по первичной, а пульсирующий магнитный поток Φ обеспечивает передачу этой энергии с мощностью $S = U_1 I_1 \approx U_2 I_2$ и преобразование с коэффициентом трансформации $k = w_1/w_2$ (уменьшение напряжения с одновременным увеличением тока).

При протекании тока во вторичной цепи часть магнитного потока также рассеивается, что на схеме замещения учитывается в виде индуктивности рассеяния вторичной обмотки L_{S2} .

3.7 Трёхфазные электрические цепи

Трёхфазная система питающих напряжений представляет собой три источника одинаковой частоты с одинаковым значением электродвижущих сил, сдвинутых по фазе на треть периода или 120° (рисунок 25):

$$e_A = E_M \sin \omega t; \quad e_B = E_M \sin(\omega t - 120^\circ); \quad e_C = E_M \sin(\omega t + 120^\circ).$$

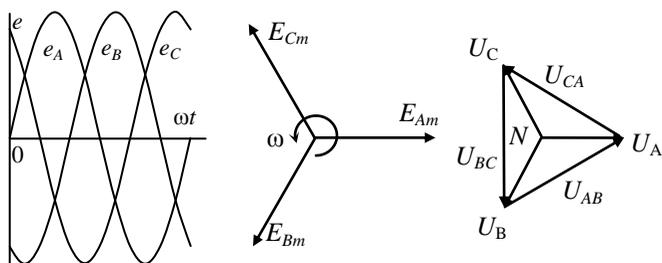


Рисунок 25 – Система из трёх ЭДС и создаваемые ими напряжения

Один из выводов каждого из источников подключён к линейному проводу соответствующей фазы $A(L1)$, $B(L2)$ и $C(L3)$, вторые выводы всех трёх источников объединены в нейтраль, соединённую с нейтральным проводом $N(PEN)$ (рисунок 26).

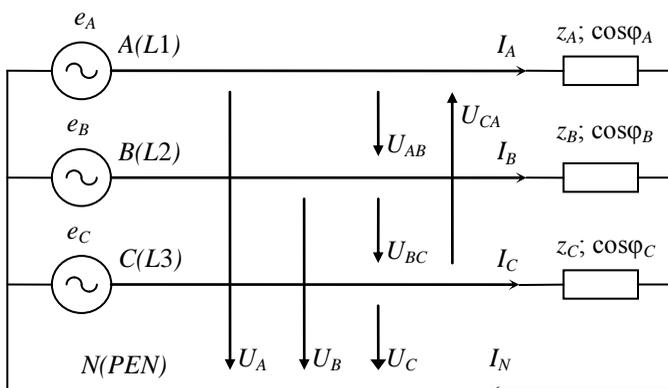


Рисунок 26 – Трёхфазная цепь с подключением нагрузки звездой

Напряжения линейных проводов относительно нейтрали U_A , U_B и U_C называются фазными, а напряжения между линейными проводами питающей линии U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} называются линейными. Линейные напряжения больше фазных: $U = \sqrt{3}U_{\phi}$. В обычной распределительной сети линейное напряжение $U = 380$ В, а фазное $U_{\phi} = 220$ В. При обозначении применяется запись 380/220 В. Иногда с целью уменьшения опасности поражения электрическим током применяют трёхфазную сеть пониженного напряжения 220/127 В (линейное напряжение равно 220 В, а фазное – 127 В).

В схеме подключения нагрузки звездой один из выводов каждой фазы потребителя подключается к фазному проводу питающей линии, а вторые выводы соединяются вместе в нейтраль. В трёхпроводной схеме нейтраль потребителя изолирована, такая схема применяется только при симметричной нагрузке, когда в каждую фазу включены одинаковые потребители. В четырёх-проводной схеме нейтраль потребителя подключается к нулевому проводу *PEN* (*protect electric and neutral*). Этот провод одновременно служит для защитного зануления (защитный) и для выравнивания напряжений на фазах при несимметричной нагрузке (рабочий). В последнее время происходит переход на пятипроводную распределительную сеть, в которой применяют отдельные нулевой рабочий проводник *N* (нейтральный) и нулевой защитный проводник *PE*.

Ток нейтрального провода является суммой фазных токов. На векторной диаграмме (рисунок 27, а) видно, что при симметричной нагрузке (б) к сумма фазных токов равняется нулю.

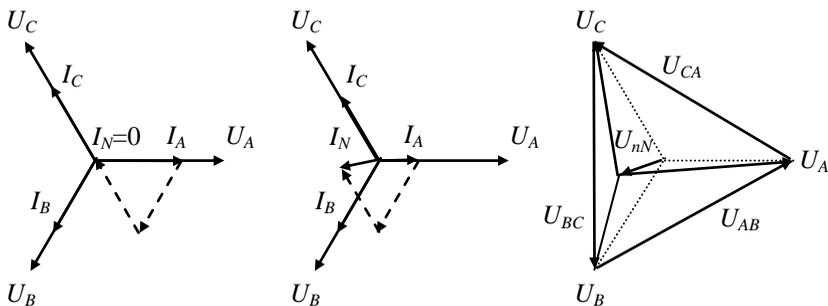


Рисунок 27 – Векторная диаграмма токов при симметричной (а) и несимметричной (б) нагрузке; в – перекося фаз

Таким образом, при симметричной нагрузке отсутствуют потери в нейтральном проводе и из формул потерь напряжения и мощности, выведенных для однофазной линии переменного тока, исчезает двойка:

$$\Delta u_{\%} \approx l \frac{r_0 P + x_0 Q}{U^2} \cdot 100 \% ; \quad \Delta p_{\%} \approx l \frac{r_0 P}{U^2 \cos^2 \varphi} \cdot 100 \%$$

Кроме того, в формулах используется линейное напряжение, которое больше фазного: $U = \sqrt{3}U_{\phi}$. Поэтому потери напряжения и мощности в линии при трёхфазном подключении в шесть раз меньше, чем при однофазном подключении потребителей такой же мощности.

При несимметричной нагрузке нейтральный провод необходим, по нему должен проходить выравнивающий ток. На векторной диаграмме (см. рисунок 27, б) видно, что при несимметрии фазных токов появляется ток в нейтральном проводе. Если попытаться включить несимметричную нагрузку без нейтрального провода, получится перекося фаз, при котором на нагруженных фазах напряжение понизится, а на разгруженных

появляется перенапряжение (см. рисунок 27, в). Снижение напряжения нарушает работу потребителей, а перенапряжение может вывести их из строя.

Потери энергии в нейтральном проводе снижают коэффициент полезного действия линии и ухудшается качество электроснабжения. Поэтому с целью получения симметричной нагрузки однофазные потребители стараются равномерно распределять по фазам.

Мощность трёхфазного потребителя равна сумме мощностей отдельных фаз. При симметричной нагрузке

$$S = 3U_{\phi}I = \sqrt{3} \cdot UI; P = \sqrt{3} \cdot UI \cos \varphi; Q = \sqrt{3} \cdot UI \sin \varphi.$$

Ток в проводах линии электропередачи при подключении симметричного трёхфазного потребителя

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cos \varphi}.$$

3.8 Трёхфазный трансформатор

Сердечник трёхфазного трансформатора состоит из трёх стержней, с двух сторон соединённых ярмом. На каждом стержне уложена секция первичной и вторичной обмоток. Секции первичных обмоток обозначаются $A-X$, $B-Y$, $C-Z$, секции вторичных – соответственно $a-x$, $b-y$, $c-z$. Первичные обмотки соединяются звездой либо треугольником и подключаются к симметричной цепи питающих напряжений. По ним протекают первичные токи I_{1A} , I_{1B} и I_{1C} , создающие магнитные потоки в стержнях Φ_A , Φ_B и Φ_C , изменяющиеся по синусоидальному закону. Магнитные потоки сдвинуты по фазе на 120° и образуют симметричную систему, сумма мгновенных значений магнитных потоков равна нулю. Во вторичных обмотках наводятся ЭДС, одинаковые по величине, но сдвинутые по фазе на 120° . Вторичные обмотки соединяются звездой либо треугольником, к ним подключаются потребители.

Мощность трёхфазного трансформатора $S = \sqrt{3} \cdot U_1 I_1 \approx \sqrt{3} \cdot U_2 I_2$.

Из-за того, что возможны различные схемы соединения обмоток, различают фазный и линейный коэффициенты трансформации.

Фазный коэффициент трансформации равен отношению числа витков первичной и вторичной обмоток $k_{\Phi} = W_1/W_2$.

Линейный коэффициент трансформации равен отношению значений первичного и вторичного линейных напряжений $k = U_1/U_{20}$.

Всего возможны 4 варианта соединения обмоток: Y/Y, Δ/Δ, Y/Δ, Δ/Y.

1-й вариант. При соединении обмоток Y/Y коэффициент $k = k_{\Phi}$ (рисунок 28).

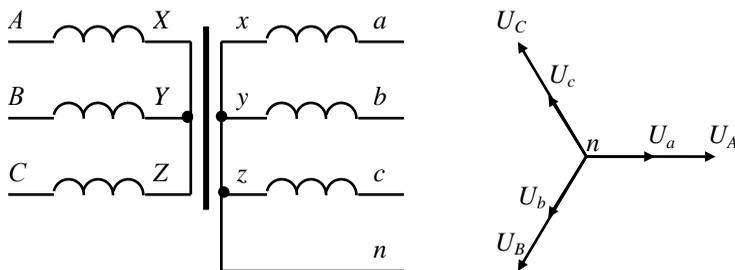


Рисунок 28 – Схема соединения Y/Y и векторная диаграмма напряжений

Линейный первичный ток равен фазному: $I_1 = I_{1\Phi}$.

Линейное первичное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:
 $U_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1\Phi}$.

Линейный вторичный ток равен фазному: $I_2 = I_{2\Phi}$.

Линейное вторичное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:
 $U_2 = \sqrt{3} \cdot U_{2\Phi}$.

Вторичное напряжение U_a совпадает по фазе с первичным U_A , их векторы направлены в одну сторону, как будто часовая и минутная стрелки часов показывают 0 часов, поэтому схема соединения обозначается Y/Y-0.

2-й вариант. Соединение обмоток Δ/Δ из-за ряда недостатков не применяется, и мы его рассматривать не будем.

3-й вариант. При соединении обмоток Y/Δ коэффициент $k = \sqrt{3} \cdot k_{\Phi}$ (рисунок 29).

Линейный первичный ток равен фазному: $I_1 = I_{1\Phi}$.

Линейное первичное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:
 $U_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1\Phi}$.

Линейный вторичный ток равен больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:
 $I_2 = \sqrt{3} \cdot I_{2\Phi}$.

Линейное вторичное напряжение равно фазному: $U_2 = U_{2\Phi}$.

При пересоединении вторичной обмотки с Y на Δ вторичное напряжение уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, при этом допустимое значение

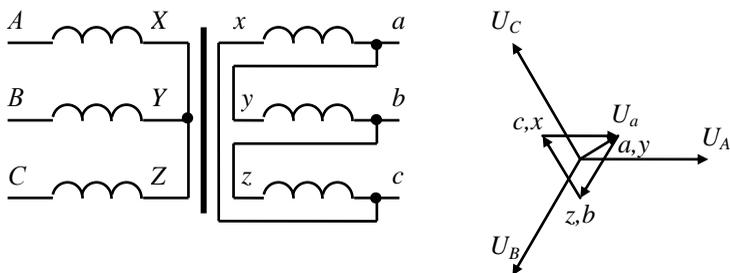


Рисунок 29 – Схема соединения Y/Δ и векторная диаграмма напряжений

вторичного тока увеличивается в $\sqrt{3}$ раз.

Вторичное напряжение U_a опережает по фазе первичное U_A на 30° , их векторы сдвинуты на 1/12 часть окружности, как будто часовая и минутная стрелки часов показывают 11 часов, поэтому схема соединения обозначается Y/Δ -11.

4-й вариант. При соединении обмоток Δ/Y коэффициент $k = k_{\Phi} / \sqrt{3}$ (рисунок 30).

Линейный первичный ток больше фазного в $\sqrt{3}$ раз: $I_1 = \sqrt{3} I_{1\Phi}$.

Линейное первичное напряжение равно фазному: $U_1 = U_{1\Phi}$.

Линейный вторичный ток равен фазному: $I_2 = I_{2\Phi}$.

Линейное вторичное напряжение больше фазного в $\sqrt{3}$ раз:
 $U_2 = \sqrt{3} U_{2\Phi}$.

При пересоединении первичной обмотки с Y на Δ первичное напряжение следует уменьшить в $\sqrt{3}$ раз, при этом допустимое значение первичного тока увеличивается в $\sqrt{3}$ раз.

Вторичное напряжение U_a опережает по фазе первичное U_A на 30° , их векторы сдвинуты на $1/12$ часть окружности, как будто часовая и минутная стрелки часов показывают 11 часов, поэтому схема соединения обозначается $\Delta/Y-11$.

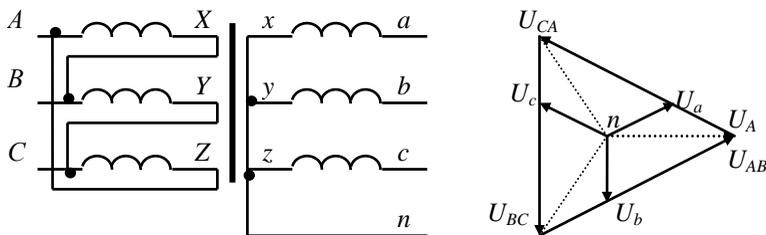


Рисунок 30 – Схема соединения Δ/Y и векторная диаграмма напряжений

Достоинства (преимущества) трехфазной системы:

1) Передача энергии от генератора к потребителям трехфазным током наиболее выгодна экономически, чем при любом другом числе фаз. Например, по сравнению с двухпроводной системой достигается экономия проводов в два раза (3 провода вместо 6), соответственно уменьшаются потери энергии в проводах линии.

2) Трехфазная система позволяет технически просто получить круговое вращающееся поле, которое лежит в основе работы всех трехфазных машин (генераторов и двигателей).

3) Элементы трехфазной системы (генераторы, трансформаторы, двигатели) просты по конструкции, надежны в работе, имеют хорошие массогабаритные показатели, сравнительно дешевы, долговечны.

4) На выходе трехфазных генераторов имеется два уровня выходного напряжения – линейное и фазное, отличающиеся в $\sqrt{3}$ раз ($U_L / U_\phi = \sqrt{3}$), что позволяет подключать к такому генератору приемники с различным номинальным напряжением.