

ПРОТЕКАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ЦЕПЯХ С ЖЕЛЕЗОМ.

Все ферромагнитные материалы имеют нелинейные магнитные свойства – зависимость магнитной индукции B от напряженности H в этих материалах не является прямо пропорциональной. Это вносит существенные усложнения в описание процессов, происходящих в цепях переменного тока, включающих катушки с ферромагнитными сердечниками. Однако в технике с такими цепями приходится сталкиваться очень часто.

Пусть в катушке с ферромагнитными сердечниками приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$. При этом в катушке возникает переменный ток, форма которого, вследствие нелинейности магнитных свойств железа, уже не будет синусоидальной. Для исследования происходящих в катушке и сердечнике процессов мы предположим, что величина тока i в каждый момент времени нам известна, и попытаемся найти связь между током и напряжением.

Когда по катушке течет ток i , в ней возникает магнитное поле напряженности $H = 4\pi ni/l$, где n – число витков в катушке, l – длина соленоида или, при наличии замкнутого ферромагнитного сердечника, длина магнитопровода. Магнитная индукция B , возникающая в сердечнике, является

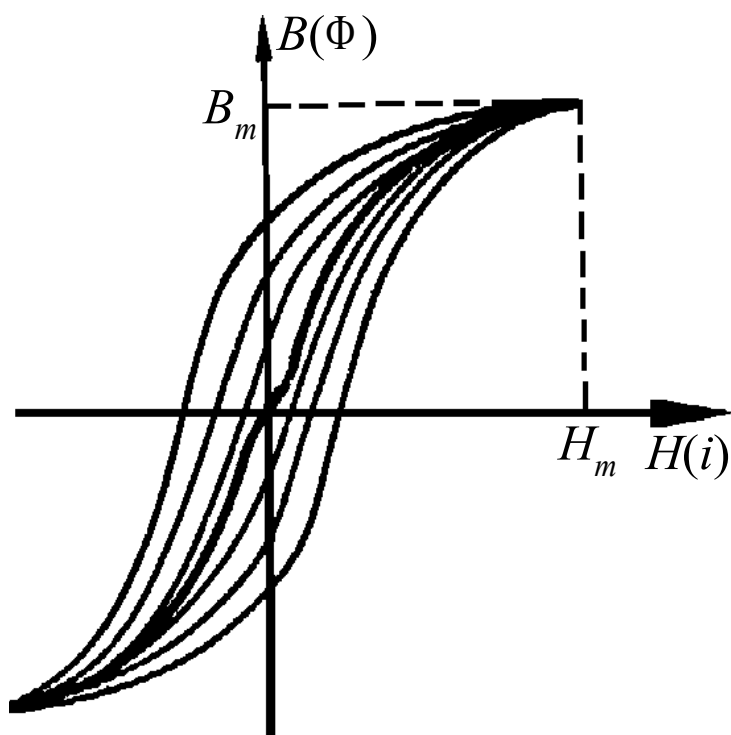


Рис. 1

очень сложной, нелинейной и неоднозначной функцией напряженности H . Мы ограничимся рассмотрением стационарного установившегося режима, когда после включения напряжения прошло длительное время. Тогда можно

считать, что изменение магнитного состояния железа описывается стационарной, т. е. замкнутой и симметричной петлей гистерезиса (рис. 1). При этом максимальное значение напряженности поля H_m определит, по какой из петель гистерезиса будет происходить перемагничивание, а значение B в каждый момент времени t определится величиной H в тот же момент t , в соответствии с данной петлей.

Для дальнейшего анализа удобно откладывать по оси абсцисс не напряженность поля H , а намагничивающий ток i . По оси ординат также можно откладывать не индукцию B , а пропорциональную ей величину магнитного потока через поперечное сечение сердечника $\Phi = BS$ (S – площадь се

чения). Таким образом, петля гистерезиса представляет собой также и график зависимости потока магнитной индукции Φ от намагничивающего тока i . Зная зависимость тока от времени, мы можем, пользуясь петлей гистерезиса, найти временную зависимость потока.

Если бы катушка не имела железного сердечника, то между Φ и i существовала линейная зависимость: поток $n\Phi$, сцепленный со всеми витками обмотки, был бы равен Li , где L – коэффициент самоиндукции. Для катушки с железом ввести коэффициент самоиндукции, очевидно, невозможно, так как зависимость потока от тока является нелинейной и неоднозначной. Во многих случаях все же вводят коэффициент самоиндукции и для таких катушек, но тогда необходимо в каждом отдельном случае указывать, что именно следует понимать под величиной L . Очень часто имеют в виду дифференциальный коэффициент самоиндукции.

$$L = n \frac{d\Phi}{di} .$$

При работе на переменном токе определяют L как отношение максимальных значений потока и тока ($L = n\Phi_m / I_m$) или чаще как отношение эффективных (средних квадратичных) значений.

Изменение магнитного потока во времени вызывает появление электродвижущей силы индукции (в данном случае – самоиндукции)

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} .$$

Если пренебречь падением напряжения на сопротивлении обмотки, то можно считать, что внешнее напряжение, приложенное к катушке, целиком идет на преодоление э.д.с. самоиндукции e :

$$u = -e = n \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Таким образом, зная ток, текущий в катушке, можно вычислить приложенное к ней напряжение.

Фактически нам задано напряжение и нужно вычислить ток. Поэтому мы должны повторить все рассуждения в обратном порядке. Подставляя в (1) синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$ и интегрируя, мы получим, что поток тоже должен быть синусоидальной функцией времени:

$$\Phi = -\frac{U_m}{n\omega} \cos \omega t = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

Амплитуда потока однозначно связана с амплитудой подводимого напряжения. Переходя от амплитудного значения напряжения к эффективному $U = U_m / \sqrt{2}$ и от круговой частоты ω к циклической $\nu = \omega / 2\pi$, имеем

$$\Phi_m = \frac{U_m}{n\omega} = \frac{U}{\sqrt{2}\pi n\nu} = \frac{U}{4.44n\nu}. \quad (3)$$

По фазе ток отстает от напряжения на $\pi/2$. Если бы катушка не имела железного сердечника, то поток был бы пропорционален току и изменялся в фазе с ним, т. е. мы получили бы, что ток отстает от напряжения на четверть периода, как это и должно быть для катушки самоиндукции.

Ток, протекающей в катушке, должен быть таким, чтобы обеспечить изменение потока в соответствии с формулой (2). С помощью петли гистерезиса нетрудно графическим методом построить кривую тока. Построение показано на рис. 2. Цифрами обозначены последовательные моменты времени. На рис. 3 на общей оси вычерчены кривые зависимости потока (штриховая линия), напряжения и тока (сплошные линии) от времени. Цифрами обозначены те же

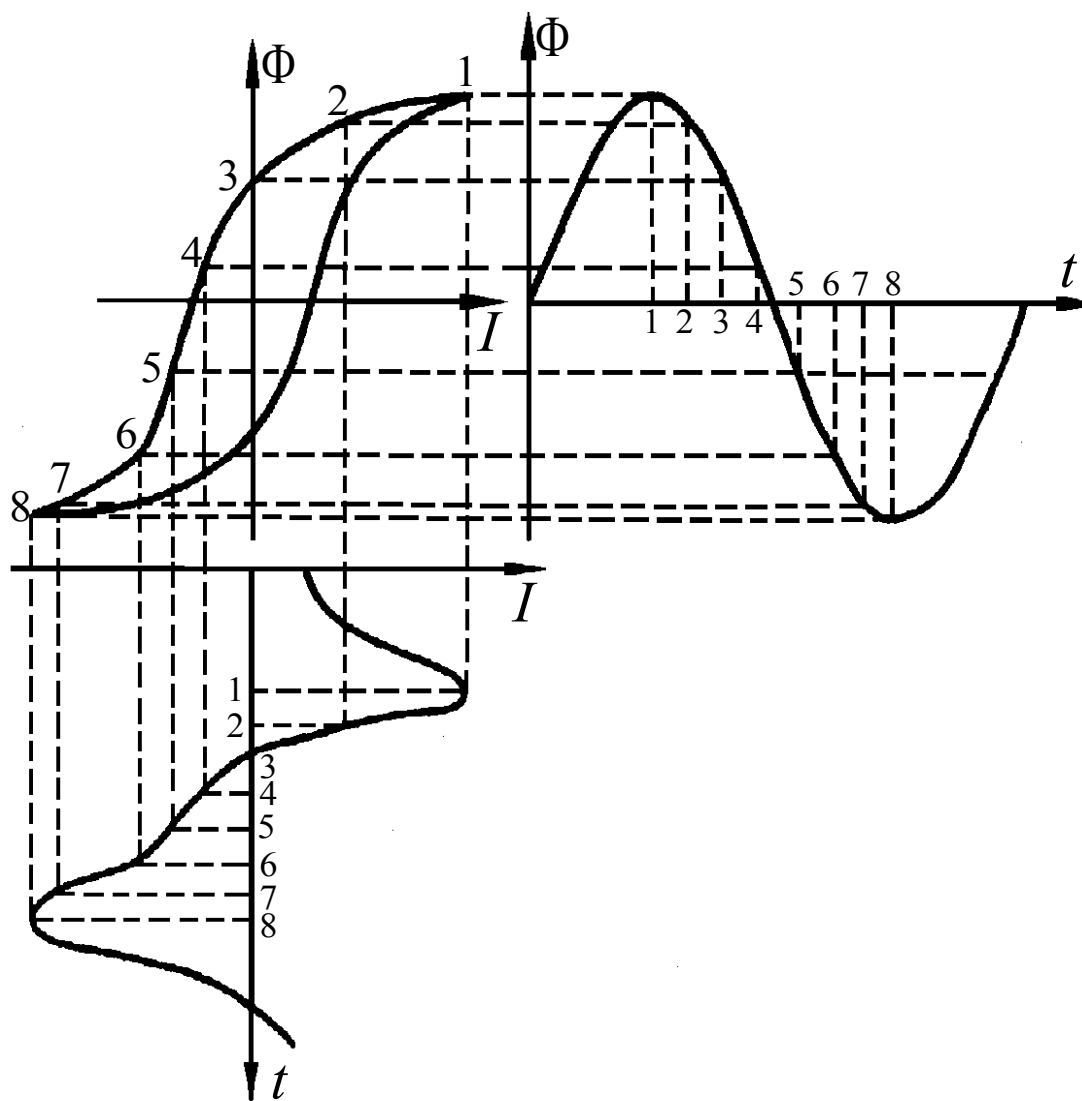


Рис. 2

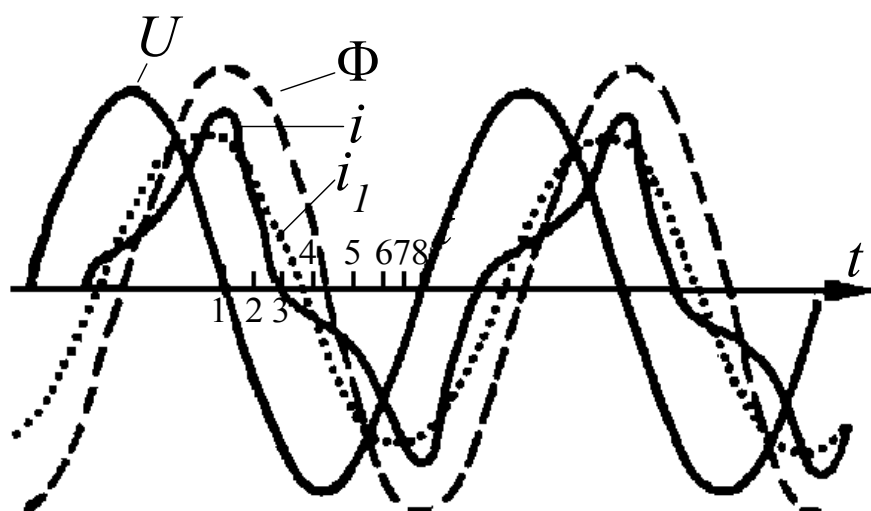


Рис. 3

моменты времени, что и на рис. 2.

Из рис. 2 и 3 видно, что форма кривой тока оказывается резко несинусоидальной. Пик тока совпадает с максимумом потока и отстает на четверть периода от максимума напряжения,¹ т. е. совпадает с моментом, когда напряжение проходит через нуль. Далее уменьшение потока происходит вдоль пологого участка петли гистерезиса (отрезок 1 – 3), и ток должен уменьшиться очень резко, чтобы обеспечить синусоидальное спадание потока. Когда направление тока меняется на обратное, точка, изображающая магнитное состояние железа, движется по очень крутому участку петли гистерезиса, так что нужное изменение потока обеспечивается незначительным нарастанием тока: на кривой тока наблюдается пологий участок (4 – 6). Наконец, в области на

¹ Здесь нельзя говорить об отставании по фазе, так как для несинусоидальной кривой тока понятие фазы не имеет смысла.

сыщения (участок 7 – 8) ток должен резко возрасти, чтобы поток мог достичь своего максимального значения: на кривой тока наблюдается резкий пик.

Этот пик может оказаться очень высоким, если сердечник имеет небольшое сечение, или катушка имеет недостаточное число витков, или подаваемое на нее напряжение слишком велико. Действительно, при этом может оказаться, что для создания необходимой э.д.с. индукции $e = -u$ амплитуда магнитной индукции $B_m = \Phi_m / S$ должна быть больше, чем индукция насыщения, и для создания такой индукции необходим очень большой ток. Конечно, в этом случае уже нельзя будет пренебрегать падением напряжения на сопротивлении обмотки.

Мы ограничимся рассмотрением катушек с не очень перегруженным сердечником, в которых пик тока не очень высок. Применяемые в технике трансформаторы и дроссели обычно рассчитывают так, чтобы при рабочем напряжении индукция в сердечнике не достигала насыщения. При этом условия искажение кривой тока оказываются не очень значительным.

Для многих вопросов практической электротехники не синусоидальную форму кривой тока можно приближенно заменить синусоидальной. Для этого нужно разложить функцию $i(t)$ в ряд Фурье:

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin n\omega t + b_n \cos n\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4)$$

(член a_0 в разложении отсутствует, так как среднее значение тока равно нулю). Отбрасывая высшие гармоники, имеем

$$i(t) \approx a_1 \sin \omega t + b_1 \cos \omega t = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (5)$$

Величина $I_{m1} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ представляет собой амплитуду первой гармоники тока, а $\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{b_1}{a_1}$ - сдвиг фаз между током (первой гармоникой) и напряжением (начало отсчета времени мы с самого начала выбрали так, чтобы начальная фаза напряжения была равна нулю). На рис. 3 первая гармоника изображена пунктирной линией.

Если сердечник трансформатора не слишком перегружен, то приближение оказывается довольно хорошим. Оно оправдывается в особенности тем, что только первая гармоника потребляет мощность.² Действительно, мощность, потребляемая катушкой, равна

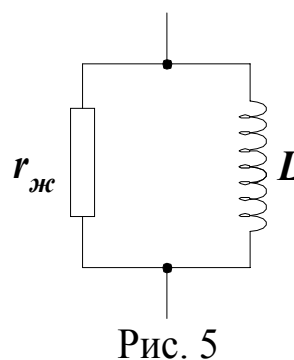
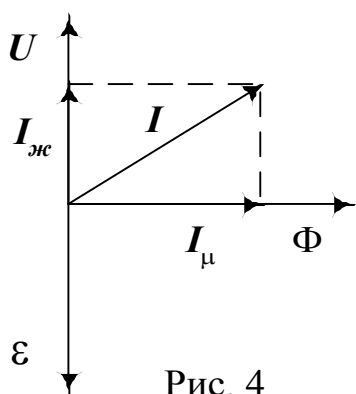
$$W = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t)u(t)dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} i(t)U_m \sin \omega t dt$$

($T = 1/\nu$ - период). Подставляя (4) и пользуясь свойством ортогональности тригонометрических функций, получим

² Подумайте, почему катушка с железом не представляет собой чистой индуктивности, а потребляет мощность.

$$W = \frac{U_m a_1}{2} = \frac{U_m I_{m1}}{2} \cos \varphi_1 \quad (6)$$

Таким образом, составляющую тока a_1 , совпадающую по фазе с напряжением и ответственную за потери энергии в железе сердечника, можно назвать *активной* составляющей тока. Соответственно, составляющую b_1 , отличающуюся по фазе от напряжения на $\pi/2$, можно назвать *реактивной* составляющей тока. Эта составляющая совпадает по фазе с магнитным потоком, и поэтому ее называют также, *намагничивающим током*. При более строгом рассмотрении к намагничивающему току следует отнести также и высшие гармоники.



Если ограничиваться рассмотрением только первой гармоники тока, то для анализа процессов, происходящих в катушке с железом (дросселе или трансформаторе), можно пользоваться векторными диаграммами. На рис. 4 приведена такая диаграмма. На этом рисунке векторы изображают эффективные значения, и вместо обозначений $a_1/\sqrt{2}$ и $b_1/\sqrt{2}$

использованы более употребительные обозначения $I_{жс}$ (ток потерь в железе) и I_{μ} (намагничивающий ток). Угол сдвига фаз между током и магнитным потоком называется *углом магнитного запаздывания*

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_1.$$

Векторной диаграмме рис. 4. Соответствует параллельная эквивалентная схема рис. 5, где проводимость активной ветви учитывает потери энергии в сердечнике.

РЕГУЛИРОВКА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Так же как и постоянный ток, переменный ток можно регулировать с помощью реостатов и потенциометров. Однако для переменного тока имеются и другие регуляторы, почти не потребляющие мощности. Вместо реостатов можно использовать дроссели (катушки самоиндукции). Если сердечник дросселя сделать незамкнутым – оставить небольшой зазор, - то, изменяя ширину зазора, можно плавно менять коэффициент самоиндукции дросселя; благодаря отсутствию подвижных контактов, таким способом можно регулировать очень большие токи.

Наиболее удобными регуляторами переменного тока являются трансформаторы. Принцип действия трансформатора общеизвестен, и здесь мы опишем только автотранс

форматор со скользящим контактом, позволяющий плавно регулировать напряжение в широких пределах.

Автотрансформаторы

– это такие трансформаторы, у которых одна и та же обмотка используется и как первичная, (см. рис. 6).

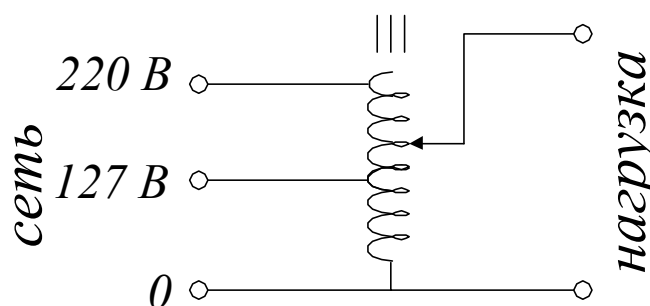


Рис. 6

Скользящий контакт позволяет менять число витков вторичной обмотки и, таким образом, плавно регулировать снимаемое напряжение в пределах от нуля до двух- трехкратного напряжения сети (большого повышения напряжения добиться трудно, так как пришлось бы намотать в один ряд много витков). Такой трансформатор как регулятор напряжения имеет все преимущества потенциометра, но в отличие от него потребляет небольшую мощность (правда большую, чем обычные трансформаторы) и позволяет получать также напряжения, более высокие, чем напряжение сети.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОССЕЛЯ. ФЕРРОРЕЗОНАНС.

Дросселями называют катушки с большим коэффициентом самоиндукции L и малым омическим сопротивлением r , применяемые в цепях переменного тока в качестве индуктивных сопротивлений.

Такая катушка представляет собой большое сопротивление для переменного тока и малое — для постоянного. На этом основаны главные применения дросселей — в качестве фильтров, задерживающих токи высокой частоты, в различных радиосхемах и для сглаживания пульсации выпрямленного тока в выпрямителях.

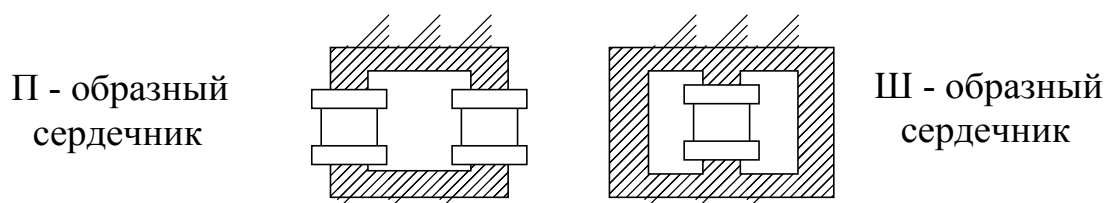


Рис. 7

Для достижения высокого коэффициента самоиндукции дроссель наматывают обычно на замкнутом сердечнике, (исключение составляют только высокочастотные дроссели, применяемые в радиотехнике). Сердечники изготавливаются из тонких, электрически изолированных друг от друга листов, чтобы уменьшить влияние токов Фуко (токи Фуко, как и вообще потери в железе сердечника, эквивалентны активной проводимости, шунтирующей дроссель). Обычная форма сердечников и катушек показана на рис. 7.

КОЭФФИЦИЕНТ САМОИНДУКЦИИ ДРОССЕЛЯ.

Коэффициент самоиндукции катушки с n витками, намотанной на замкнутом сердечнике с магнитной проницаемостью μ , площадью сечения S и длиной l (длина измеряется по средней линии), должен выражаться формулой:

$$L = \frac{4\pi\mu n^2 S}{l} \quad (7)$$

(в ед. CGSM). Для дросселя с железным сердечником ввиду нелинейности магнитных свойств железа постоянные μ и L теряют смысл. Однако на практике часто оказывается возможным приближенно применять для цепей с железом результаты общей теории, разработанной для линейных цепей.

В этих случаях удобно вводить коэффициенты (μ и L , причем их физический смысл может меняться в зависимости от условий задачи).

Мы определим коэффициент самоиндукции так, чтобы при отсутствии активного сопротивления выполнялась обычная формула

$$U = \omega LI, \quad (8)$$

где U и I — эффективные значения приложенного к катушке напряжения и текущего через нее тока. Конечно, такое определение не предполагает, что величина L будет постоянной. Чтобы найти, как она изменяется при изменении силы тока I , нужно вернуться к детальному рассмотре

нию протекания переменного тока через катушку с железом.

Найти теоретическую зависимость между эффективными значениями тока и напряжения очень трудно; значительно легче выяснить связь между их пиковыми значениями. Как известно, вершины стационарных петель гистерезиса лежат на кривой первоначального намагничивания (рис. 1).

Следовательно, эта кривая изображает зависимость между пиковыми значениями напряженности H_m и индукции B_m или тока I_m , и потока Φ_m . С другой стороны, при синусоидальном напряжении (и, следовательно, потоке) амплитуда потока Φ_m пропорциональна амплитуде напряжения U_m . Значит, та же кривая начального намагничивания в измененном масштабе связывает пиковые значения напряжения U_m и тока I_m (рис.8).

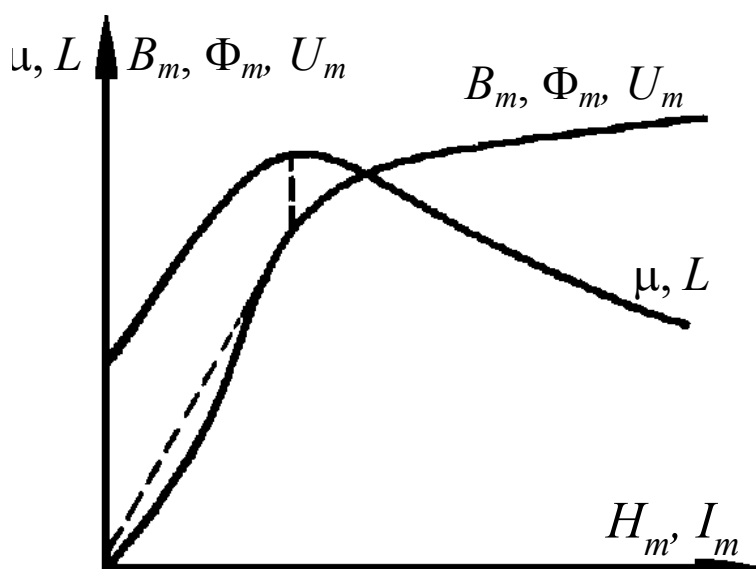


Рис. 8

Из этой кривой нетрудно найти для каждого значения I_m величины магнитной проницаемости μ и коэффициента самоиндукции L , определенных как от

ношения пиковых значений ($\mu = B_m / H_m$, $L = \Phi_m / I_m$). Эти величины, естественно, оказываются функциями I_m . При увеличении тока от нуля, когда крутизна кривой начального намагничивания растет, возрастают и коэффициенты μ и L . В области насыщения, где B почти не зависит от H , они убывают как $1/I_m$. Максимум μ и L достигается в точке, положение которой ясно из рис. 8.

Для перехода к эффективному значению напряжения U достаточно разделить U_m на $\sqrt{2}$. Эффективное значение тока таким методом вычислить нельзя, так как ток не синусоидален. Более того, форма кривой тока при изменении I_m также меняется, так что отношение I/I_m зависит от I_m . Очевидно, однако, что I растет вместе с I_m , хотя и не пропорционально I_m , и связь между эффективными значениями I и U будет изображаться той же кривой (рис. 8), только несколько деформированной. (Кривая будет сжата по оси токов, так как I растет медленнее, чем I_m).

Подчеркнем, что если бы и напряжение было несинусоидальным, то все рассуждения существенно усложнились бы. В частности, тогда не было бы справедливым соотношение $\Phi_m \sim U_m$ и коэффициент самоиндукции, найденный из закона Ома (8), не совпадал бы с вычисленным по формуле (7).

Общий вид кривой $L(I)$ остается и в этом случае таким же, как на рис 8, но ее детальный ход может существенно меняться в зависимости от формы напряжения; а также от того, изменяется ли эта форма с изменением I .

ФЕРРОРЕЗОНАНС.

Выше было показано, что коэффициент самоиндукции дросселя с железным сердечником зависит от силы протекающего через него тока. Поэтому если соединить дроссель последовательно с конденсатором подходящей емкости C (рис.9), то, регулируя силу тока в такой цепи, можно до-

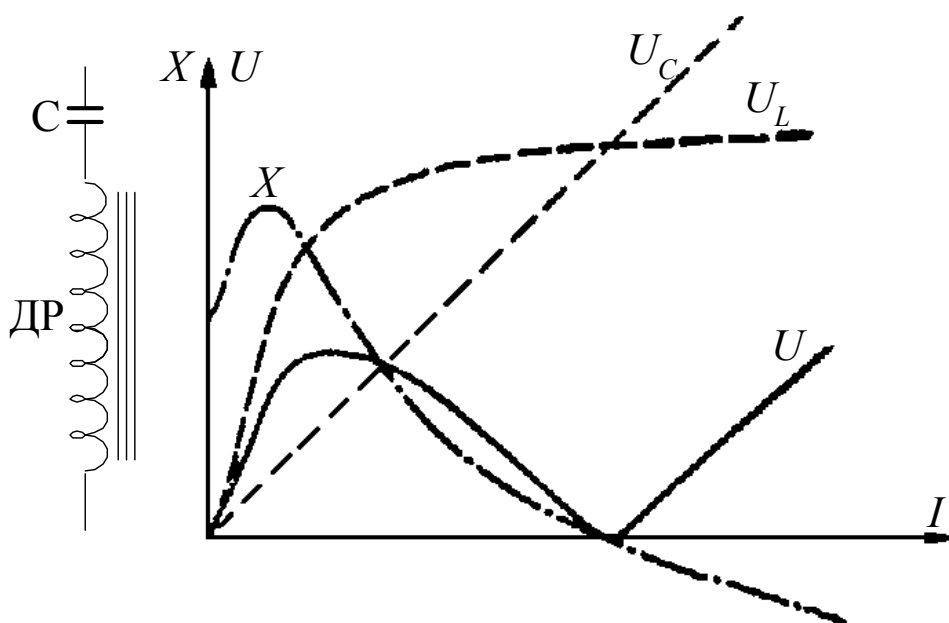


Рис. 9

биться резонанса напряжений. Он наступит при силе тока, которой соответствует коэффициент самоиндукции

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (9)$$

где ω — круговая частота. Резонанс, достигнутый таким способом, носит название «феррорезонанса».

Рассмотрим связь между током и напряжением в такой цепи. Для простоты пренебрежем наличием высших гармоник тока, обусловленных его несинусоидальностью, и будем пока считать активное сопротивление цепи равным нулю. При малых токах коэффициент самоиндукции дросселя велик, и реактивное сопротивление цепи $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ будет носить индуктивный характер. С увеличением тока индуктивность уменьшается, и соответственно будет убывать общее реактивное сопротивление цепи. При значении тока, обеспечивающем выполнение уравнения Томсона (9), реактивное сопротивление обратится в нуль. При дальнейшем увеличении тока оно начнет снова возрастать, имея уже емкостный характер и стремясь в конечном счете к величине $-\frac{1}{\omega C}$. Ход кривой X в зависимости от силы тока I показан на рис.9. Там же приведена кривая зависимости падения напряжения U от силы тока I . Пунктиром показаны кривые напряжения на дросселе U_L и на конденсаторе U_C .

Если активное сопротивление цепи не равно нулю, то ее полное сопротивление (импеданс) Z будет меняться сходным образом, но в точке резонанса Z не обратится, в нуль, а

останется конечным. Подобным же образом влияет на кривые рис. 9 наличие высших гармоник. Точный анализ всех процессов затруднителен, но примерный ход кривых зависимости импеданса Z и напряжения U от силы тока начертить нетрудно (рис. 10). Качественно эти кривые отличаются от кривых рис. 9 только тем, что при резонансе Z и U не обращаются в нуль (наблюдаются лишь минимумы этих величин).

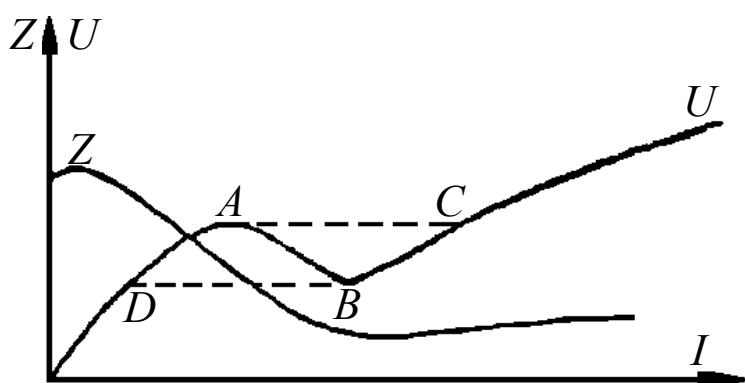


Рис. 10

Характерной чертой вольтамперной характеристики такой цепи является наличие на ней участка АВ, на котором дифференциальное сопротивление $r_d = \frac{dU}{dI}$ отрицательно.

Другими словами, возрастание тока на этом участке приводит к уменьшению падения напряжения.

Такое своеобразное поведение наблюдается не только в феррорезонансной цепи, но и в некоторых других случаях. Отрицательное дифференциальное сопротивление имеет, например, дуговой газовый разряд, в частности вольтова дуга. В этом случае возрастание тока вызывает увеличение числа ионов в газе, так что при большем токе разряд требует меньшего напряжения. Аналогичное явление имеет место в некоторых полупроводниках: разогрев, связанный с увеличе

нием тока, приводит к повышению концентрации свободных носителей заряда и к понижению сопротивления; если сопротивление падает достаточно быстро, быстрее, чем растет ток, то на вольтамперной характеристике появляется падающий участок. С наличием такого участка связано явление электрического пробоя газов и диэлектриков.

Выясним, каким образом можно экспериментально исследовать вольтамперную характеристику, подобную изображенной на рис. 10. Мы можем задавать либо напряжение на феррорезонансной схеме U , либо ток I в ней.

Для того чтобы задавать напряжение, нужно использовать источник с регулируемой э.д.с. и с малым внутренним сопротивлением (так называемый *генератор напряжения*). На практике можно использовать в качестве такого генератора достаточно мощный потенциометр или автотрансформатор со скользящим контактом, напряжение на выходе которого почти не будет зависеть от тока нагрузки (разумеется, в известных пределах). Задавая напряжение на феррорезонансной схеме с помощью такого источника, мы не сможем исследовать спадающий участок характеристики АВ. Действительно, пусть напряжение постепенно возрастает от нуля. Когда будет достигнута точка А на графике (рис. 10), ток начнет возрастать, а возрастанию тока соответствует уменьшение напряжения. Но напряжение задано и не может уменьшаться. Поэтому ток *внезапно, скачком, возрастет* до значения, соответствующего точке С. Это возрастание тока будет сопровождаться изменением знака разности фаз меж

ду током и напряжением: в точке А неактивное сопротивление цепи имеет индуктивный характер, а в точке С — емкостный. Фаза тока по отношению к напряжению изменится от значения, почти равного $-\pi/2$, до значения, близкого к $+\pi/2$. Это явление называется *опрокидыванием фазы*.

Аналогично при постепенном понижении напряжения от больших значений происходит скачкообразное *уменьшение* тока (переход от точки В к точке D), также сопровождаемое опрокидыванием фазы.

Для того чтобы можно было исследовать падающий участок характеристик, нужно задавать *ток* как независимую переменную. Для этого следует воспользоваться так называемым *генератором тока*, т. е. источником с таким высоким внутренним сопротивлением, чтобы даваемый им ток почти не менялся с изменением сопротивления нагрузки в интересующих нас пределах. Регулируемый генератор тока можно осуществить, например, пользуясь генератором очень высокой э.д.с. и регулируя ток очень высокоомным реостатом. На практике нет необходимости в использовании идеального генератора тока, достаточно включить в схему сопротивление, существенно превышающее величину отрицательного сопротивления феррорезонансной цепи на падающем участке вольтамперной характеристики. При этом условии общая вольтамперная характеристика феррорезо

нансной цепи и балластного сопротивления не будет иметь падающего участка, так что можно будет однозначно задавать величину тока.

ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ.

Стабилизаторами напряжения называются такие устройства (четыреполюсники), напряжение на выходе которых $U_{\text{ВЫХ}}$ почти не зависит от напряжения на входе $U_{\text{ВХ}}$ ³ (рис. 11).

Внутреннее устройство таких четырехполюсников бывает различным. Наилучших ре-

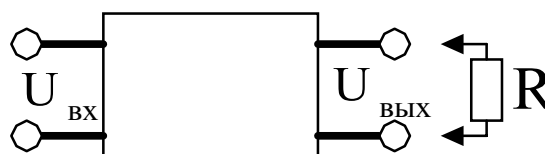


Рис. 11

зультатов можно достигнуть, применяя следящие системы (чаще всего электронные схемы), которые отмечают малейшее отклонение выходного напряжения от заданного значения и автоматически включают регуляторы, уничтожающие это отклонение. Однако такие устройства обычно довольно сложны. Если не требуется очень высокой степени и очень широких пределов стабилизации, то удобнее пользоваться более простыми стабилизаторами, использующими нелинейные сопротивления, т. е. сопротивления с нелинейной вольтамперной характеристикой. Одним из широко приме

³ Обычно требуется также, чтобы $U_{\text{ВЫХ}}$ не зависело от сопротивления нагрузки R .

няемых классов стабилизаторов переменного напряжения являются феррорезонансные стабилизаторы. Их важнейшие преимущества — простота устройства, дешевизна и возможность получения довольно больших мощностей.

Проще всего воспользоваться для стабилизации напряжения нелинейностью вольтамперной характеристики самого дросселя (рис. 8). Если включить дроссель последовательно с балластным сопротивлением R , как показано на рис. 12, и обеспечить работу сердечника дросселя в режиме насыще-

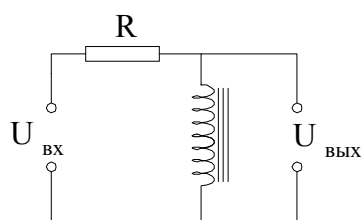


Рис. 12

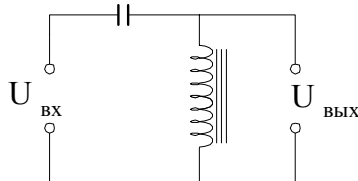


Рис. 13

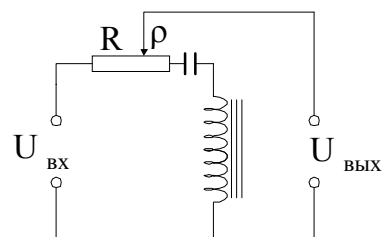


Рис. 14

ния, то при изменении напряжения в сети $U_{вх}$ будет сильно меняться ток через дроссель, но почти не будет изменяться падение напряжения на нем, т. е. выходное напряжение $U_{вых}$. Изменяется только падение напряжения на балластном сопротивлении R .

Более удобна схема рис. 13, в которой вместо сопротивления R включен конденсатор. Это — простейший феррорезонансный стабилизатор. Он стабилизирует напряжения $U_{вх}$, лежащие выше точки резонанса. В отличие от схемы рис. 12 в схеме рис. 13 мало потребление активной мощности, и выходное напряжение обычно даже выше входного.

Такие схемы, как на рис. 12 и 13, дают не очень хорошую стабилизацию напряжения. Значительно лучше результаты можно получить, используя падающий участок характеристик феррорезонансной цепи LC . Мы здесь опишем только один из возможных принципов устройства феррорезонансных стабилизаторов; на практике они обычно конструируются несколько иначе.

Если последовательно с дросселем и конденсатором, образующими феррорезонансную цепь, включить достаточно большое сопротивление R (рис. 14), то вольт-амперная характеристика всей схемы не будет иметь падающего участка. Таким образом, ток в этой цепи будет однозначной и монотонной функцией входного напряжения U_{ex} . Выходное же напряжение, снимаемое, как показано на рис. 14, будет зависеть от тока и, следовательно, от U_{ex} по-разному, в зависимости от соотношения между величинами сопротивления ρ и отрицательного дифференциального сопротивления феррорезонансной цепи $r_D = dU / dI$. Если $\rho < |r_D|$, то график зависимости $U_{вых}$ от U_{ex} (характеристика стабилизатора) будет иметь падающий участок (рис. 15), если $\rho \geq |r_D|$, то $U_{вых}$ будет монотонно возрастать с ростом U_{ex} . Наконец, при каком-то значении ρ , сравнимом с $|r_D|$, на графике будет на

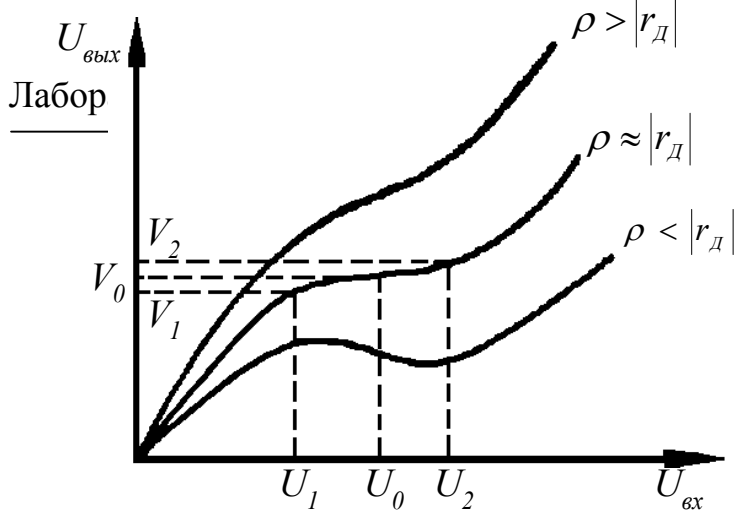


Рис. 15

блюдаться горизонтальная площадка.⁴ В этом случае имеет место стабилизация напряжения. Стабилизатор можно характеризовать следующими параметрами:

1. *Номинальное входное напряжение U_0* , определяемое как абсцисса точки перегиба кривой на графике рис. 13.
2. *Номинальное выходное напряжение V_0* , определяемое как ордината точки перегиба.
3. *Пределы стабилизации U_1 и U_2* , указывающие допустимые величины отклонений входного напряжения в обе стороны от номинального. Для определения пределов стабилизации нужно знать допустимые пределы колебаний выходного напряжения V_1 и V_2 эти пределы определяются теми приборами, которые питаются от стабилизатора.
4. *Степень или коэффициент стабилизации*

⁴ Если бы сопротивление феррорезонансной схемы было чисто активным, то площадка наблюдалась бы при значении ρ , точно равном $|r_d|$. Поскольку между током и напряжением существует сдвиг фаз, стабилизирующее сопротивление должно быть несколько больше $|r_d|$.

$$k = \frac{U_2 - U_1}{U_0} / \frac{V_2 - V_1}{V_0}$$

Эта величина показывает, во сколько раз стабилизатор уменьшает колебания напряжения сети.

5. *Номинальная величина сопротивления нагрузки R_n и допустимые отклонения от этой величины.* Включение нагрузки вообще ухудшает качество стабилизации, а величина выходного напряжения обычно довольно чувствительна к изменениям сопротивления нагрузки. Мы здесь ограничиваемся рассмотрением работы стабилизатора в режиме холостого хода (без нагрузки). Очевидно, во всяком случае, что когда ток нагрузки мал по сравнению с током холостого хода стабилизатора, условие независимости $U_{вых}$ от R_n будет выполнено.

Описанная выше схема феррорезонансного стабилизатора, как уже говорилось, на практике не применяется, так как на переменном токе выгоднее пользоваться не активным, а реактивным балластным сопротивлением, не потребляющим мощности.

Схемы с активным балластным сопротивлением, подобные схемам рис. 12 и 14, применяют тогда, когда в качестве стабилизирующего элемента используется активное нелинейное сопротивление, в частности при работе на постоянном токе.

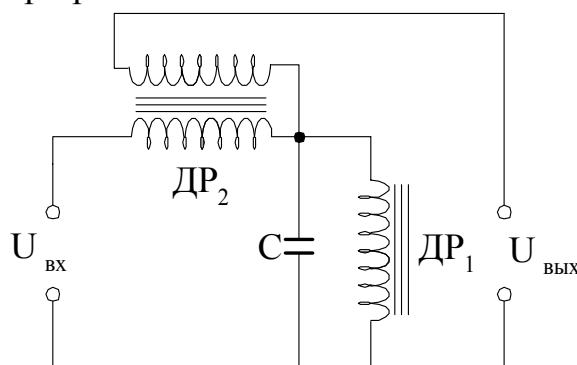


Рис. 16

Если стабилизирующий элемент имеет характеристику с плоским участком (например, газоразрядная лампа с тлеющим разрядом), используют схему рис. 12, если с падающим участком (например, дуговой разряд) — схему рис. 14.

На рис. 16 приведена одна из наиболее широко применяемых на практике схем феррорезонансных стабилизаторов. Для стабилизации, как и в схемах рис. 12 и 14, используется область насыщения сердечника дросселя ДР₁. В качестве балластного сопротивления используется дроссель с ненасыщенным сердечником ДР₂.

Для уменьшения общего тока параллельно дросселю ДР₁ подключен конденсатор С (используется, таким образом, параллельный резонанс или резонанс токов). Наконец, чтобы сделать характеристику стабилизатора более плоской, на сердечник дросселя ДР₂ наматывают вторую обмотку, э.д.с. которой, пропорциональная падению напряжения на основной обмотке ДР₂ и, следовательно, сильно зависящая от $U_{вх}$, вычитается из входного напряжения и компенсирует его изменения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ И ПОРЯДОК ЕЕ

ВЫПОЛНЕНИЯ.

Цель данной работы — экспериментально исследовать поведение катушки с железом в качестве дросселя, изучить явление феррорезонанса и работу простейших феррорезонансных стабилизаторов напряжения.

Для питания схемы используется автотрансформатор со скользящим контактом типа РНО-250-2⁵, позволяющий плавно регулировать напряжение в пределах от 0 до 250 В. Автотрансформатор питается от сети с напряжением 127 В (его можно переключить на питание от 220 В, переставив предохранитель в соответствующие зажимы; к предохрани

⁵ Смысл обозначения: регулятор напряжения однофазный — 250 В, 2 кВт.

телю имеется доступ через отверстие в дне кожуха автотрансформатора).

В работе применяются **высокие напряжения** — до 250 В. При резонансе напряжения на конденсаторе и на дросселе могут быть еще выше — до 300 — 400 В. Поэтому необходимо **работать очень осторожно и строго соблюдать правила техники безопасности**: не касаться оголенных проводов, клемм и металлических частей приборов, ни в коем случае не производить каких-либо переключений или изменений в схеме под напряжением. Кроме того, надо иметь в виду, что конденсатор в феррорезонансной цепи заряжается до высоких напряжений, так что при любых переключениях его необходимо разряжать. Для того чтобы обеспечить автоматическое разряжение конденсатора, в приведенных ниже схемах не предусмотрены выключатели.

Для выключения напряжения нужно полностью вывести питающую схему автотрансформатора и отключать его от сети. Конденсатор разряжается тогда через дроссель и автотрансформатор. При случайном обрыве в цепи необходимо, прежде чем исправлять повреждение, разрядить конденсатор, закратив его клеммы.

Автотрансформатор снабжен вольтметром, позволяющим измерять как напряжение сети, так и выходное напряжение (переключатель «сеть—нагрузка»). Однако для точных из

мерений следует пользоваться отдельным вольтметром более высокого класса. В нашей установке применен вольтметр электростатической системы, что позволяет включать его, как показано, например, на рис. 17, и не учитывать при

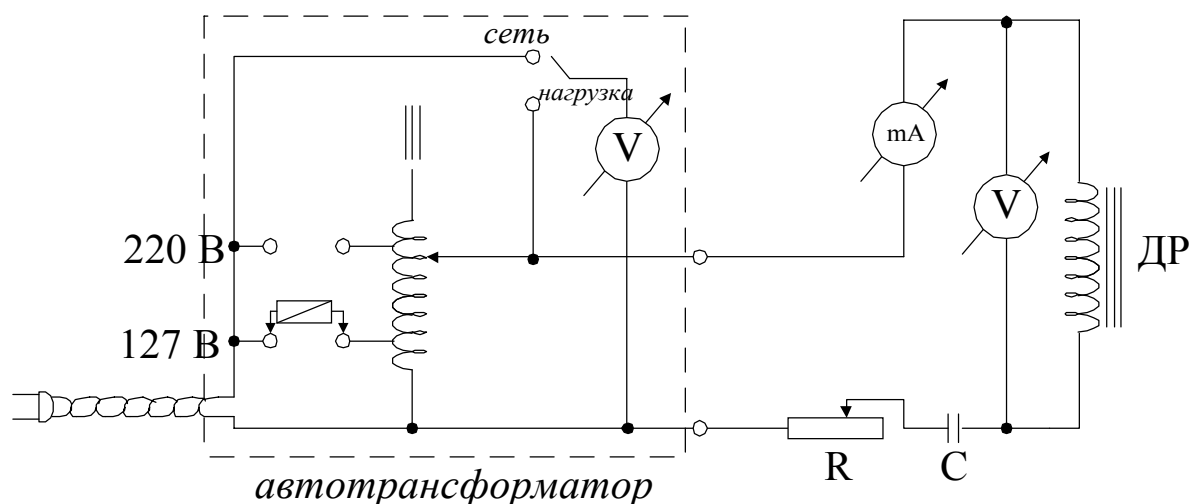


Рис. 17

вычислениях ни его проводимости, ни сопротивления миллиамперметра (если используется вольтметр, потребляющий ток, то его нужно включить так, чтобы он учитывал падение напряжения на миллиамперметре и при вычислениях прибавлять сопротивление миллиамперметра к активному сопротивлению дросселя). Вольтметр имеет теньную стрелку, для освещения которой нужно подключить осветитель к сети. Переключатель напряжения питания осветителя должен стоять в положении «220 В», но включать осветитель нужно в сеть с напряжением 127 В, чтобы продлить срок жизни лампы.

Для измерения тока служит многошкальный миллиампер

метр.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОССЕЛЯ. Собрать схему рис. 17. В этой схеме конденсатор C служит для того, чтобы, используя явление феррорезонанса, расширить пределы регулировки напряжения на дросселе (автотрансформатор дает не более 250 В, тогда как вольтметр позволяет измерять напряжение до 300 В). Сопротивление R (порядка 2 кОм) включено для защиты схемы от скачка тока при резонансе.

В этой схеме нужно, изменяя напряжение, снимаемое с автотрансформатора, исследовать зависимость напряжения на дросселе U_D от силы тока I . Построить графики — вольтамперную характеристику дросселя и кривую зависимости коэффициента самоиндукции L от силы тока. Для вычисления L следует воспользоваться формулой:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - r^2},$$

где активное сопротивление дросселя r измеряется с помощью омметра.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА. Сначала нужно исследовать феррорезонанс в условиях, когда *задан ток*. Измерения проводятся в той же схеме рис. 17, но вольтметр следует включить так, чтобы измерять напряжение не только на дросселе, а на всей цепочке (LC). Емкость конденсатора C выбирается по указа

нию преподавателя.

Благодаря наличию в схеме достаточно большого сопротивления R , мы можем, регулируя снимаемое с автотрансформатора напряжение U_{ex} ,⁶ произвольно изменять силу тока в цепи I . Для каждого значения I следует измерить напряжение на цепочке (LC) U и общее напряжение на схеме U_{ex} (по вольтметру автотрансформатора), построить графики зависимости величин U , U_{ex} и $Z=U/I$ от I . Из графика $U(I)$ определяют величину отрицательного сопротивления r_D .

Точка резонанса — это точка минимума Z . В этой точке следует проверить выполнение формулы Томсона (значение L берется из графика $L(I)$, значения C и ω известны). Выполняется ли в точке резонанса равенство $Z = r$. Почему?

Для исследования феррорезонанса при заданном напряжении нужно вывести реостат R . Измерения следует проводить **с величайшей осторожностью, так как скачок тока может легко испортить миллиамперметр**. Предварительно нужно по результатам измерений в режиме с заданным током определить точку максимума U и величину тока, который соответствует тому же значению U на восходящей ветви вольтамперной характеристики. Приблизительно такой ток должен установиться в цепи после скачка тока при исследовании в режиме с заданным напряжением. При изме

⁶ Обозначение оправдывается тем, что это напряжение является входным напряжением - для исследуемой схемы.

рениях нужно, не доходя до точки максимума U на 3—5 В, переключить миллиамперметр на ту шкалу, которая допускает безопасное измерение, тока после скачка (при этом, вероятно, не удастся исследовать область вблизи максимума U , но в этой области ход кривой мало отличается от полученной при наличии в цепи сопротивления). Исследование кривой $U(I)$ при уменьшении U можно вести без особых предосторожностей.

В этом случае также измеряются значения U , I и $U_{\text{вх}}$ и строятся кривые зависимости U , $U_{\text{вх}}$ и Z от I . Их удобно построить на том же графике, что и кривые, полученные при задании тока. Почему эти кривые не совпадают?

ИЗУЧЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ.

А. Собрать стабилизатор по схеме рис. 13. Регулируемое напряжение $U_{\text{вх}}$ подается от автотрансформатора, вольтметр которого используется для измерения величины $U_{\text{вх}}$. Второй вольтметр следует включить на выход стабилизатора. На входе стабилизатора включить также миллиамперметр и следить, чтобы ток через дроссель не превысил 0,5 А.

Изучить зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{вх}}$. Построить график (характеристику стабилизатора). Из этого графика определить:

- номинальные значения $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ (U_0 и V_0)⁷;
- пределы стабилизации при допустимых изменениях $U_{\text{вых}}$ на $\pm 1\%$;
- коэффициент стабилизации для этих пределов;
- коэффициент стабилизации для изменения $U_{\text{вх}}$ в пределах ± 10 В.

Б. Собрать стабилизатор по схеме рис. 14. В качестве сопротивления R использовать полностью включенный реостат (2 кОм). Регулируя $U_{\text{вх}}$ и следя за изменением $U_{\text{вых}}$ подобрать сопротивление ρ так, чтобы падающий участок на графике $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ исчез и осталась только горизонтальная площадка. При таком значении ρ подробно исследовать стабилизатор, как описано выше.

Сравнить форму характеристики и параметры для обоих стабилизаторов. Измерить омметром сопротивления R и ρ . Сравнить значение ρ с величиной отрицательного сопротивления $r_{\text{д}}$.

При выполнении работы полезно следить за формой кривых тока и напряжения с помощью осциллографа. Описание осциллографа выдается в лаборатории.

⁷ В этом случае перегиб на характеристике отсутствует, и номинальные значения будут соответствовать середине плоского участка.