**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4**

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА, ПРИЕМНИКА И ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.**

**Цель работы:**

1. Экспериментально исследовать режимы работы основных элементов электрической цепи: источника, приёмника (нагрузки) и линии электропередачи на примере цепи постоянного тока.
2. Изучить влияние тока в цепи или сопротивления нагрузки на параметры режимов работы указанных элементов цепи.

**ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Производство (генерирование), передача (распространение), и потребление (прием) электроэнергии являются основными признаками работы электрической цепи, независимо от конкретного ее назначения. Это может быть цепь, образованная электростанцией, линией электропередачи и районным потреблением с передаваемой активной мощностью в несколько десятков мегаватт (мВт), напряжением в несколько сотен киловольт (кВ). Также электрической цепью является соединение цеховой подстанции с нагрузкой. В этом случае источником питания служит понижающий трансформатор, линией передачи – электрическая сеть низкого напряжения, нагрузкой – двигатели, сварочные трансформаторы, электрические печи, осветительные приборы, электролизные ванны и т.д. Передаваемая активная мощность может достигать нескольких тысяч киловатт (кВт), ток в цепи - несколько тысяч ампер (А). Наконец, электрической цепью, в у казанном смысле, можно считать соединение двух транзисторов или микросхем, произвольно выбранных из схемы какого-либо электронного блока, если электрический сигнал от одного (одной) передается к другому (другой). Мощность, ток и направление сигнала могут быть весьма невелики и составлять, соответственно, мкВ, мкА, мкВ.

Несмотря на существенные отличия в особенностях создания и работы таких цепей, их анализ может быть обобщен с позиции, принятой в электротехнике. А именно, путем анализа режимов основных элементов цепи: генератора, приемника и линии передачи. Рассмотрим режимы применительно к каждому элементу.

**Источники питания (генератор)**

Имеем электрическую цепь с источником ЭДС постоянного тока (рис.1). К нему посредством ключа  подсоединена нагрузка, сопротивление , который может изменяться. Будем считать ключ идеальным, т.е. его сопротивление в замкнутом состоянии считаем незначительным (), а в разомкнутом состоянии – бесконечно большим (). Сопротивлением соединительных проводов пренебрегаем (). Тогда для замкнутого ключа  (рис.1) эквивалентная схема замещения данной цепи будет иметь вид (рис.2). Основными параметрами режима работы источника питания будут:

 – напряжение, вырабатываемое генератором;

– потеря напряжения на внутреннем сопротивлении;

 - напряжение на внешних зажимах генератора;

 – ток, вырабатываемый генератором;

 – мощность, развиваемая генератором;

 – мощность потерь на внутреннем сопротивлении;

 – мощность генератора, отдаваемая во внешнюю цепь.

Если сопротивление нагрузки  изменятся, то изменяется ток в цепи и режим работы генератора. Поэтому совокупность зависимостей  полностью характеризует генератор при любом режиме работы со стороны внешней цепи. Определим эти зависимости для заданной схемы (рис.2). По второму закону Кирхгофа (с учетом обхода по часовой стрелке) будем иметь:

 **(1)**

** (2)**

напряжение на потребителе:

 **(3)**

Поэтому из соотношения (1) с учетом (2) и (3) получим:

 **(4)**

Ток в цепи можно определить из (1):

 **(5)**

Подставив (5) в (4), получим:

 **(6)**

Соотношения (4) в (6) определяют зависимости  и .

Потери напряжения  определятся:

 **(7)**

Из соотношения (1) будем также иметь:

  **(8)**

Подставим в (8) соотношения (5), получим:

** (9)**

Соотношения (7) и (9) являются выражением зависимостей  и . Напряжение собственно генератора есть величина постоянная, поскольку (рис.2):



 **(10)**

 **(11)**

Далее определим мощностные характеристики генератора:

 **(12)**

Или с учётом (5):

 **(13)**

**(14)**

**(15)**

 **(16)**

 **(17)**

Важным энергетическим показателем является коэффициент полезного действия генератора, который характеризует отношение:

 **(18)**

с учётом (12), (15) и (5) получим:

 **(19)**

 **(20)**

Т.е. η есть доля общей мощности генератора, отдаваемая во внешнюю цепь. Определим значение полученных параметров для основных режимов работы источника питания.

1. **Режим холостого хода** – это режим работающего источника питания при разомкнутой внешней цепи (на рис.1 ключ  разомкнут). В этом случае , и согласно (5) ток от источника питания к нагрузке отсутствует . Из соотношений (4) или (6) получим: 



В этом режиме напряжение на внешних зажимах источника равно его ЭДС, а согласно (7) или (9) потери напряжения отсутствуют: .

Согласно (10) и (11) напряжение вырабатываемое собственно генератором:  Далее, в этом режиме работы генератора:







Согласно соотношениям (12) – (17) .

Наконец, к.п.д. генератора из (19):





Эти значения η нужно понимать только в том смысле, что при холостом ходе генератора отсутствуют потери мощности и он как бы способен передать всю мощность во внешнюю цепь (на самом же деле = 0).

1. **Режим короткого замыкания (к.з.)** для источника питания возникает в случае, если сопротивление нагрузки .

Ток источника резко возрастает и достигает своей максимальной величины по (5):



т.е. он ограничивается только внутренним сопротивлением источника. Для этого режима согласно выше приведённым соотношениям остальные параметры принимают следующие значения:

 (максимальны)



 (максимальна) **(21)**

 (максимальна) **(22)**

 

Режим короткого замыкания совместно с режимом холостого хода являются, если можно так выразиться, предельными режимами, ограничивающими область возможных режимов работы источника питания (генератора). Для мощных источников питания режим холостого хода не является “рабочим” поскольку отсутствует полезная мощность . В то же время и режим короткого замыкания генератора совершенно неприемлем для энергетических систем, поскольку возникающие точки значительно превышают допустимые. Как правило, он является в таких целях аварийным. В маломощных же радиотехнических цепях режимы источников питания, близкие к холостому ходу или короткому замыканию, широко используются на практике. Например, они являются естественным для работы транзисторов и электронных ламп в каскадах предварительного усиления.

1. **Согласовательный режим работы источника питания** (генератора) соответствует условиям его работы, при которых мощность, передаваемая во внешнюю цепь, достигает максимального значения. Определим эти условия из соотношения (17) на основании известных из курса высшей математики приёмов определения максимумов функции. Имеем:



поскольку в (17) все остальные параметры постоянны. Для существования максимума функции в этой точке должна удовлетворять условиям:







Знаменатель для такого режима при ограниченном значении внутреннего сопротивления  не равен бесконечности (поскольку при , это будет режим холостого хода). Поэтому:



откуда следует, что  максимальна при:

 **(23)**

Подставим (23) в (17), получим:

 **(24)**

(самостоятельно убедиться в правомерности второго необходимого условия существования максимума в точке ). Остальные параметры для такого режима будут иметь значения:

 **(25)**

 **(26)**



 **(27)**

 или  **(28)**

В таком случае мощность источника, отдаваемая во внешнюю цепь хотя и максимальна, но равна мощности потерь на внутреннем сопротивлении, поэтому к.п.д. составляет всего 50%.

Это режим с таким низким к.п.д. также неприемлем для работы энергетических систем, в которых потери генератора, как правило, не должны превышать 5%

В то же время согласованный режим работы источника сигнала и нагрузки широко используется в технике связи, автоматике, вычислительной технике и т.п. В этих областях электротехники, с малыми абсолютными значениями мощности сигнала, важно, чтобы как можно большая доля этой мощности была использована в нагрузке (например, в телефонной трубке или громкоговорителе).

1. **Номинальный режим работы** источника питания соответствует его работе с такими параметрами, на которые он рассчитан заводом-изготовителем. Параметры номинального режима указаны в паспорте источника питания (генератора). Соблюдение номинального режима гарантирует эффективное и экономичное производство электрической энергии.

Для мощных (силовых) электротехнических устройств номинальный режим соответствует случаю, когда . При этом к.п.д. генератора равна единице, т.е. потери внутри генератора незначительны. Для некоторых радиотехнических цепей (ламповые цепи или цепи на полевых транзисторах) такой режим также является нормативным. В этом случае говорят, что генератор работает в условиях, близких к холостому ходу.

Нормальная работа устройств, как отмечалось выше, в условиях передачи максимальной мощности является для них также номинальным режимом. В этом случае говорят, что согласованный режим является для такого источника нормальным. При этом .

Наконец, встречаются устройства, например, в контрольно измерительной технике, когда в приёмнике стремятся получить максимально возможный ток, значение которого не должно практически зависеть от сопротивления приёмника. Источник энергии (сигнала), в этом случае, работает в режиме, близком к режиму короткого замыкания, который обеспечивается условием . Для таких устройств номинальным режимом является режимом короткого замыкания.

Рассмотрим и проанализируем совокупность зависимостей источника питания (генератора) при изменении его режима от холостого хода до короткого замыкания. Зависимость (4) называется внешней характеристикой генератора (источника питания). Её график (в случае пассивной резистивной нагрузки) изображен на рис.3. С изменением тока от нуля ( – ток холостого хода) до максимального (*вн*– ток короткого замыкания) напряжение на концах генератора  уменьшается от  до . Это происходит из-за того, что с уменьшением  и ростом тока увеличиваются потери напряжения на . Поэтому напряжение на зажимах источника  меньше  на величину . Чем больше  источника, тем больше потери напряжения при одном и том же токе (рис.4). При  (рис.4) внешняя характеристика параллельна оси токов и отвечает собственно источнику питания (идеальному источнику ЭДС). В нашем случае внешняя характеристика при , если зависимость . Графики указанных зависимостей приведены на рис.5. Рассмотрим остальные зависимости, характеризующие режимы работы источника.  - зависимость потерь напряжения от тока. В соответствии с (7) при  – const, эта зависимость есть прямая линия, проходящая через точки  при  и  при .  - зависимость мощности собственно источника от тока, согласно соотношению (12), есть прямая линия, проходящая через точки  при  и



 .

 - зависимость потерь мощности источника на сопротивление . Согласно соотношению (14), при – const, график этой зависимости имеет вид параболы, поскольку потери мощности пропорциональны .

 - зависимость мощности генератора, отдаваемой во внешнюю цепь. Определим вид этой зависимости. Для этого проведём преобразование соотношения (16):

 **(29)**

Зависимость (29), как функция  есть уравнение параболы, повёрнутой ветвями вниз. Вершина параболы имеет координаты  по оси токов и  по оси мощностей и является точкой максимума этой функции (рис.5).

Обоснуем данную зависимость энергетическими соображениями:

 **(30)**

 **(31)**

 **(32)**

 **(33)**

Элементы  и  соединены последовательно. Поэтому, согласно балансу мощности в цепи:

 **(34)**

мощность источника  распределяется на этих элементах пропорционально их сопротивлениям.

С увеличением , начиная от режима холостого хода и до согласованного режима . Поэтому большая доля мощности, развиваемой источником, поставляется в нагрузку. Т.е. на участке от  до  кривая  расположена выше кривой  и обе они лежат под кривой  согласно (34). Рассмотрим, далее, как изменяются на этом же участке приращения мощности , и  при изменении тока :

 **(35)**

Согласно (16), (33) и (1):

 **(36)**

 **(37)**

Из (34) имеем:

 **(38)**

 **(39)**

Приращение мощности источника  есть величина постоянная на интервале изменения  от 0 до 1/2 (35). В то же время, хотя  линейно растёт с ростом (37), оно не превышает , поскольку на указанном интервале . Поэтому согласно (36) и (39):



и, по мере роста ,  уменьшается, т.е. кривая  возрастает, но её рост замедляется (рис.5).

В точке :







Поэтому в указанной точке рост мощности  прекращается, она достигает своего максимума. С дальнейшим ростом  от до . Кроме того:



Поэтому из (35), (36) и (37):





Это значит, что мощность  на этом участке уменьшается и при становится равной нулю. Рассмотренные зависимости в функции тока  принято строить для мощных электрических цепей. В тоже время в большинстве случаев проектирование электронных схем ток  не имеет решающего значения для анализа режимов работы устройств. Поэтому в этих случаях принято строить рассмотренные зависимости в функции от - сопротивление нагрузки (потребителя). Такие зависимости приведены на рис.6, где они построены согласно соотношений (5), (6), (9), (11), (13), (15), (17), (20).

**Линия электропередачи**

Этот элемент электрической цепи расположен между генератором и приёмником, поэтому имеет два входных и два выходных зажима (рис.7). Поскольку режим работы линии в целом зависит от параметров режима на её входе, для полного анализа работы этого элемента необходимо рассмотреть все девять возможных комбинаций основных режимов: холостой ход, согласованный и короткое замыкание, по входу и по выходу.

Упростим анализ. Для чего будем рассматривать линию передачи как пассивный элемент цепи, служащий исключительно для передачи электрической энергии от генератора к приемнику.

В самом простейшем случае линия передачи представляет собой два проводника, сопротивлением , соединённые между источником и приёмником (рис.8).

Согласно II закону Кирхгофа для такой схемы можно составить уравнение:

 **(40)**

 **(41)**

Соотношению (41) отвечает более простая схема (рис.9), где проводники линии представлены одним резистивным элементом с сопротивлением:



Если рассматривать режимы работы линии по входу (со стороны генератора), то линию передачи и приёмник можно представить, как эквивалентную нагрузку с общим сопротивлением:



При изменении  от ∞ до 0 эквивалентна нагрузка также будет изменяться в пределах от ∞ до . Зависимости режимов работы на такой нагрузке:

,  , ; , , , 

уже рассмотрены выше (рис.5 и рис.6). Если же рассматривать режимы работы линии по выходу (со стороны нагрузки), то в таком случае потери в линии передачи и потери внутри источника можно объединить, рассматривая эти потери происходящими на эквивалентном внутреннем сопротивлении генератора:



При этом  от ∞ до 0 режим работы линии электропередачи по её выходу можно определить как режим работы генератора, имеющего внутреннее сопротивление .

Основные зависимости изменения параметров режимов:





уже известны и могут быть предоставлены соответственно зависимостям (на рис.5)



или зависимостями (на рис.6):



построенными для генератора с внутренним сопротивлением: 

Отметим важные особенности работы линии передачи. Напряжение на входе линии при  меньше ЭДС на величину потерь напряжения на внутреннем сопротивлении источника , а напряжение  на приёмнике меньше напряжения на входе линии на величину потерь напряжения в линии:

 **(42)**

Кроме этого, мощность на входе линии  меньше мощности, вырабатываемой генератором, на величину потерь мощности  на внутреннем сопротивлении генератора, а мощность приёмника  меньше мощности на входе линии на величину потерь мощности в линии:

 **(43)**

Поэтому потери напряжения и мощности в линии влияют на к.п.д. электрической цепи в целом и с ростом потерь к.п.д. уменьшаются:



Анализ соотношений (4), (7), (14), (16), (42), (43) показывает, что потери можно уменьшить, уменьшая ток в цепи и сохранить передаваемую мощность, увеличивая напряжение. Поэтому линии электропередачи, связывающие электростанцию с потребителями, выполняют высоковольтными.

В сетях низкого напряжения для того, чтобы уменьшить потери и  в проводах линии электропередачи и избежать тем самым значительных колебаний напряжения на нагрузке при изменении её режимов работы и повреждение изоляции линии от перегрева, выбирают оптимальную площадь поперечного сечения проводов или шинопроводов линии. Условием нормальной работы такой линии считается, если не превышает (2+5)%, а предельная температура не превышает 55-70оС.

**Потребитель (приёмник, нагрузка)**

Основными зависимостями, описывающими, режим работы приемника, являются:  или  - зависимость напряжения приёмника от режима работы.

 или  - зависимость мощности приёмника от режима работы.

 - зависимость тока приёмника от его режима работы.

Для схемы рис.9 сопротивление линии  и внутреннее сопротивление генератора  по отношению к приемнику можно объединить в одно эквивалентное:



В этом случае схема будет иметь вид рис.2. Поэтому указанные зависимости качественно совпадают с рассмотренными на рис.5.





**УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ**

1. В данной лабораторной работе электрическая цепь генератор – линия электропередачи – приёмник моделируется цепью постоянного тока.
2. В качестве моделей для линии передачи и приёмника используются реостаты, источник питания моделируется лабораторным регулятором напряжения.
3. При выборе реостатов руководствоваться правилом:



1. Ток при  не должен превышать условия:



**ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Собрать электрическую схему по указанию преподавателя (рис.10 или рис.11).
2. Исследования начинать при полностью введенном реостате .
3. Ключ  разомкнуть и исследовать режим холостого хода.
4. Замкнуть ключ  и, плавно уменьшая сопротивление , установит 3 – 4 промежуточных режима, затем - согласованный режим (при этом ), после чего опять 3 промежуточных режима и, наконец, режим короткого замыкания.
5. Данные измерений занести в таблицу 1.
6. По результатам эксперимента построить графики зависимостей (по указанию преподавателя):

  

  



  

    .

Зависимости построить в одной системе координат (но в разных масштабах).

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Касаткин С.А., Перекалин М.А., Электротехника: Учебник для неэлектротехн. специальн. ВУЗов.-м.-л.: Госэнергоиздат, 1959 (подразделы 1-6, 1-7, 1-8, 1-9).
2. Касаткин С.А., Немцов М.В. Электротехника: Учебн.пособие для ВУЗов, М.: Энергоатомиздат, 1983 (подразделы 1.6, 1.9, 1.18).
3. Общая электротехника: Учебн. пособие для ВУЗов/Под ред. А.Т.Блажкина. – М.: Энергоатомиздат, 1986 (подразделы 1-3, 1-4).
4. Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н. Электротехника: Учебник для ВУЗов, М.: Энергоатомиздат, 1985 (подразделы 1.5, 1.6, 1.8, 1.9, 1.10).
5. Электротехника: Учебник для неэлектротехн. специальн. ВУЗов/Под ред. В.Г.Герасимова.- М.: Высшая школа, 1985 (подразделы 1.4, 1.14).

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Перечислите основные режимы работы элементов электрической цепи и дайте характеристику каждому режиму.
2. Какие факторы влияют на к.п.д. линии передачи.
3. Какие причины вызывают изменение напряжения на зажимах потребителей.
4. Проанализируйте зависимости, приведённые на рис.5 или рис.6 (по указанию преподавателя).

















\_



**Рис.1**

























**Рис. 2**













**Рис. 3**























**Рис. 4**

 ;

 

 .

Источник

питания

Линия

Электропередачи

Приёмник









**Рис. 7**

































Режим холостого хода

Согласованный режим

Режим короткого замыкания





**Рис. 5**











































Согласованный режим

Режим К.З.





















Режим холостого хода 

**Рис. 6**











**Рис. 9**























**Рис. 8**









































\_

**Рис. 10**























\_

**Рис. 11**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА.**  **Таблица 1.**  Примечание | | | Холостой ход |  |  |  |  | Согласованный  режим |  |  |  | Режим к. з. мыкания |
| Результаты вычислений | η | % |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pпр. | Вт |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Pвнеш. | Вт |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ∆P | Вт |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Rпр/Rл | -- |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Rпр | Ом |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Rл | Ом |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Данные измерений | I | А |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| U2 | В |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ∆U | В |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| U1 | В |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| № | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |