

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ» (МГТУ ГА)

Кафедра электротехники
и авиационного электрооборудования

А.А. Савелов, Е.А. Пунт

АВИАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРОСИСТЕМЫ И ПРИБОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ

*для студентов
специальности 25.05.05
всех форм обучения*

Москва
ИД Академии Жуковского
2024

УДК 629.7.064.5
ББК 0562
С12

Рецензент:

Лисодид С.Ю. – канд. техн. наук

Савелов А.А.

С12

Авиационные электросистемы и приборное оборудование
[Текст] : учебно-методическое пособие по выполнению лаборатор-
ных работ / А.А. Савелов, Е.А. Пунт. – М.: ИД Академии Жуковского,
2024. – 36 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с ра-
бочей программой учебной дисциплины «Авиационные электросистемы и
приборное оборудование» по учебному плану для студентов специаль-
ности 25.05.05 «Эксплуатация воздушных судов и организация воздушного
движения».

В учебно-методическом пособии представлены лабораторные ра-
боты, в которых рассматриваются принципы построения и особенности
работы импульсных устройств авиационной энергетики, которые весьма
широко применяются на современных воздушных судах и имеют перспек-
тиву для самолетов будущего. В практикуме рассматривается работа гене-
ратора постоянного тока, различные типы регуляторов напряжения.

Выполнение данных работ будет способствовать глубокому освое-
нию теоретических разделов курса «Авиационные электросистемы и при-
борное оборудование», а также изучению конструкции конкретного авиа-
ционного оборудования и режимов его работы.

Рассмотрено и одобрено на заседаниях кафедры 28.10.2024 г. и мето-
дического совета 13.11.2024 г.

УДК 629.7.064.5
ББК 0562

В авторской редакции

Подписано в печать 26.11.2024 г.

Формат 60х84/16 Печ. л. 2,25 Усл. печ. л. 2,09

Заказ № 1060/1112-УМП03 Тираж 30 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20

Издательский дом Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., д. 6А

Тел.: (499) 755-55-43

E-mail: zakaz@itsbook.ru

© Московский государственный технический
университет гражданской авиации, 2024

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы

1. Ознакомление с устройством генератора постоянного тока.
2. Экспериментальное исследование основных характеристик генератора параллельного возбуждения.

Краткие теоретические сведения

Принцип действия генератора постоянного тока основан на явлении электромагнитной индукции. Сущность этого явления в применении к генератору постоянного тока состоит в том, что в обмотке, расположенной на стальном сердечнике, находящемся в магнитном поле и приведенным во вращение внешней силой двигателя, наводится ЭДС.

В каждом проводнике обмотки якоря в процессе работы генератора постоянного тока наводится ЭДС:

$$e = Blv,$$

где: B – индукция в воздушном зазоре машины;

l – длина проводника;

v – линейная скорость проводника.

Магнитная индукция в разных точках воздушного зазора неодинакова и отличается по величине и по знаку. Среднее значение ЭДС в проводниках обмотки:

$$E_{cp} = B_{cp}lv.$$

ЭДС обмотки якоря $E_{я}$ определяется произведением среднего значения ЭДС одного проводника на число последовательно соединенных проводников одной параллельной ветви обмотки якоря:

$$E_{я} = E_{cp} \frac{N}{2a},$$

где N – число проводников обмотки якоря;

$2a$ – число параллельных ветвей, т.е. групп последовательно соединенных витков (секций), ток в которых имеет одинаковое направление.

Воспользовавшись выражением линейной скорости $v = \frac{\pi Dn}{60}$, получим:

$$E_{я} = B_{cp} l \frac{\pi Dn}{60} \frac{N}{2a}.$$

Здесь D – диаметр якоря, n – частота вращения якоря, об/мин. Расстояние, измеренное по окружности якоря, между соседними полюсами машины называют полюсным делением – τ , а число пар полюсов машины обозначают –

p . Учитывая, что полюсное деление $\tau = \frac{\pi D}{2p}$, то $\pi D = \tau 2p$ и для ЭДС получим:

$$E_{\text{я}} = B_{\text{ср}} l \tau \frac{2pn}{2a} = B_{\text{ср}} l \tau n \frac{pN}{60a}.$$

Произведение $l \cdot \tau$ представляет площадь, через которую проходит магнитный поток полюса Φ , поэтому

$$B_{\text{ср}} l \tau = \Phi.$$

Обозначив постоянную величину $\frac{pN}{60a}$ через C_e , тогда:

$$E_{\text{я}} = C_e \Phi n.$$

Уравнение электрического равновесия генератора постоянного тока (независимо от способа возбуждения) записывается:

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{ям}} - 2\Delta U_{\text{щ}},$$

где: E ЭДС генератора; U - напряжение на зажимах генератора; $I_{\text{я}}$ - ток якоря; $R_{\text{ям}}$ - сопротивление последовательно соединенных обмоток якоря и дополнительных полюсов; $2\Delta U_{\text{щ}}$ - падение напряжения на сопротивлении $R_{\text{щ}}$ щеточных контактов.

Обозначив через $R_{\text{я}}$ сопротивление цепи якоря $R_{\text{я}} = R_{\text{ям}} + R_{\text{щ}}$, получим уравнение в более простом виде:

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (1.1)$$

умножив обе части равенства (1.1) на ток якоря, получим уравнение баланса мощностей:

$$EI_{\text{я}} = UI_{\text{я}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}. \quad (1.2)$$

Для генератора с параллельным возбуждением:

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{в}}, \quad (1.3)$$

где: I - ток нагрузки, $I_{\text{в}}$ - ток возбуждения, и уравнение баланса мощностей принимает вид:

$$EI_{\text{я}} = UI + UI_{\text{в}} + I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}, \quad (1.4)$$

где: $E I_{\text{я}} = P_{\text{эм}}$ - электромагнитная мощность генератора; $UI = P_2$ - полезная мощность; $UI_{\text{в}}$ - потери в цепи возбуждения; $I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ - потери в цепи якоря.

При подключении нагрузки ток якоря $I_{\text{я}}$ создает в генераторе электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, соответствующий его электромагнитной мощности, $P_{\text{эм}}$ который выражается формулой: $M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega} = \frac{E I_{\text{я}}}{\omega}$ или

$$M_{\text{эм}} = C_e \Phi n \frac{I_{\text{я}} 60}{2\pi n} = C_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (1.5)$$

где: $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$ - конструктивная постоянная машины; ω - угловая скорость вала генератора.

Этот момент является тормозным по отношению к моменту M_1 , приложенному к валу генератора со стороны первичного двигателя. M_1 больше $M_{эм}$ на величину момента холостого хода генератора M_0 , соответствующего механическим потерям $\Delta P_{мех}$ и потерям в стали ΔP_c ,

$$M_1 = M_{эм} + M_0. \quad (1.6)$$

Мощность, подведенная к генератору, равна:

$$P_1 = P_{эм} + \Delta P_{мех} + \Delta P_c = P_{эм} + P_0.$$

Коэффициент полезного действия (КПД) генератора определяется соотношением:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + \sum \Delta P},$$

где: $\sum \Delta P = UI_B + I_{я}^2 R_{я} + P_0$ – сумма потерь;

P_1 – мощность подводимая к генератору;

P_2 – полезная мощность, отдаваемая генератором.

Максимум КПД наступает при равенстве суммы $\Delta P_{мех} + \Delta P_c$ электрическим потерям в обмотках ΔP_3 .

Кроме перечисленных потерь в машинах постоянного тока возникают также добавочные потери, вызываемые пульсациями магнитного потока, магнитными полями коммутлируемых секций якоря, искажением основного потока, действием реакции якоря. Они составляют примерно 1% от полезной мощности генератора.

1. Характеристики генератора параллельного возбуждения

Магнитные и электрические свойства генераторов оцениваются по их основным характеристикам.

1. *Характеристика холостого хода* (рис. 1.1 а) представляет зависимость ЭДС E генератора от тока возбуждения при постоянных значениях частоты вращения и токе нагрузки I , равном нулю, т.е.

$$E = f(I_B) \text{ при } n = \text{const и } I = 0.$$

Особенностью характеристики холостого хода является наличие остаточной ЭДС и относительно широкой петли гистерезиса. За практическую характеристику холостого хода принимается средняя (пунктирная) линия между восходящей и нисходящей ветвями.

2. *Внешняя характеристика* (рис. 1.1 б) генератора представляет зависимость напряжения U от тока нагрузки I (тока якоря) при постоянных значениях частоты вращения n и сопротивления цепи возбуждения R_B , т.е.

$$U = f(I_B) \text{ при } n = \text{const и } R_B = R_{вном}.$$

3. *Регулировочная характеристика* (рис. 1.1 в) представляет зависимость тока возбуждения I_B от тока нагрузки I при постоянной частоте n и напряжении U .

$$I_B = f(I), \text{ при } n = \text{const и } U = \text{const}.$$

Регулировочные характеристики показывают, как надо изменять ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение оставалось постоянным.

4. *Характеристика короткого замыкания* (рис. 1.1 г) представляет зависимость тока якоря I_a от тока возбуждения I_b при постоянных значениях частоты вращения и напряжении, равном нулю,

$$I_a = f(I_b), \text{ при } n = \text{const и } U = 0.$$

Снятие характеристики приводится при пониженном токе возбуждения. Магнитная система машины при этом не насыщена. Поэтому характеристика выражается прямой, отсекающей на оси ординат отрезок, пропорциональный току, протекающему по обмотке якоря под влиянием ЭДС, индуцированной потоком остаточного магнетизма.

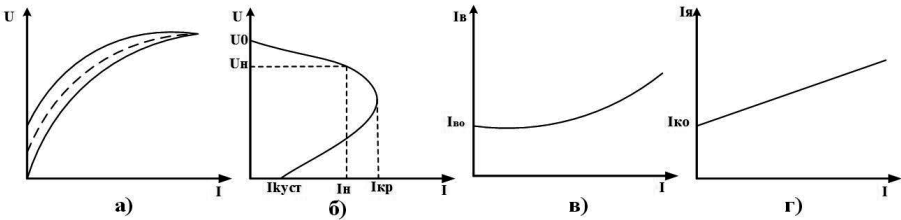


Рис. 1.1 Характеристики генератора: а – холостого хода; б- внешняя; в – регулировочная; г – короткого замыкания

2. Самовозбуждение генератора

В генераторе параллельного возбуждения обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря, для питания ее не требуется постороннего источника питания. Напряжение на обмотку возбуждения подается с зажимов якоря генератора. Ток в обмотке возбуждения:

$$I_b = \frac{U}{R_b}.$$

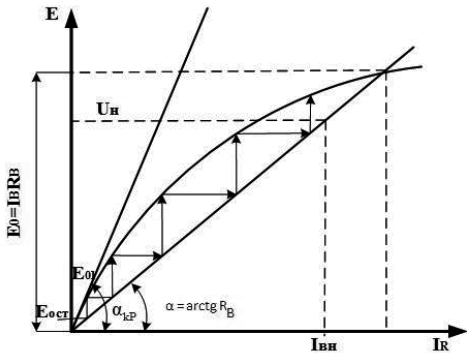


Рис. 1.2. К пояснению самовозбуждения генератора

Вольт-амперная характеристика цепи возбуждения $I_b R_b = f(I_b)$ при $R_b = \text{const}$ представляет собой прямую, проходящую через начало координат (рис. 1.2).

Самовозбуждение генератора происходит вследствие того, что магнитная система машины, будучи однажды намагниченной, сохраняет небольшой магнитный поток за счет остаточного магнетизма $\Phi_{\text{ост}}$. При вращении якоря этот поток наводит в

обмотке якоря небольшую ЭДС $E_{ост}$, под действием которой в цепи возбуждения возникает небольшой ток I_b .

Если н.с. возбуждения $I_b W_b$ создает поток, направленный согласно с потоком $\Phi_{ост}$, то произойдет увеличение магнитного потока машины. Это приведет к дополнительному увеличению ЭДС E_{01} генератора. Увеличение ЭДС генератора приведет к увеличению тока возбуждения I_b и т.д. Процесс постоянного нарастания ЭДС продолжается, пока напряжение генератора не достигнет определенной величины, зависящей от параметров генератора. Величина ЭДС E_o , до которой самовозбудится генератор, зависит от угла наклона вольт-амперной характеристики, т.е. от сопротивления цепи возбуждения R_b . Следовательно, чем больше R_b , тем меньше ЭДС E_o , до которой самовозбудится генератор. При $R_b > R_{кр}$ генератор вообще не самовозбуждается.

Поэтому самовозбуждение генератора с параллельным возбуждением возможно лишь при соблюдении следующих условий:

1. магнитная цепь машины должна иметь поток остаточного магнетизма;
2. магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, должен быть направлен согласно с потоком остаточного магнетизма;
3. сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше критического.

3. Программа работы

1. Снять основные характеристики генератора: холостого хода, внешнюю, регулировочную, короткого замыкания.
2. Построить перечисленные характеристики по снятым экспериментальным данным.

4. Электрическая схема установки и порядок работы

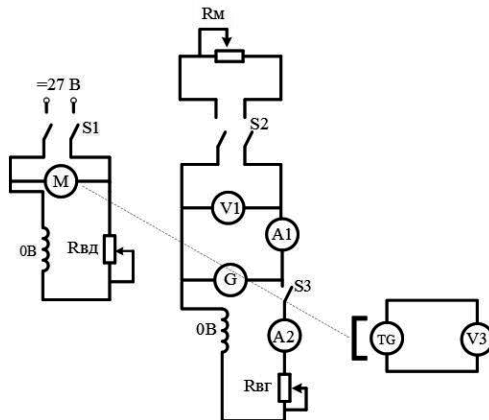


Рис 1.3 Схема лабораторной установки

1. Ознакомьтесь с устройством генератора постоянного тока.

2. Запишите номинальные данные исследуемого агрегата.
3. Подготовьте таблицы для записи результатов измерений.

4.1. Снятие характеристики холостого хода $E = f(I_a)$ при $n = \text{const}$, $I = 0$.

1. Исходное положение: реостаты $R_{вг}$ - максимальное сопротивление, реостат $R_{вд}$ - минимальное сопротивление. После чего включите электродвигатель выключателем S_1 , затем, увеличивая сопротивление реостата $R_{вд}$, установите заданную частоту вращения генератора $n = n_{ном}$, которая контролируется по показанию вольтметра (индикатора) U_3 . Снимите и запишите в табл. 1.1 значения U_r и I_b по показаниям приборов (U_1, A_2).

2. Включите обмотку возбуждения генератора (выключатель S_3). Запишите значения U_r и I_b . Плавное увеличение тока возбуждения, от минимального до максимального значения, фиксируйте при этом значение напряжения. Снимите на этом диапазоне изменения напряжения до 6-7 значений U_r и I_b и запишите в табл. 1.1. После чего постройте нисходящую ветвь характеристики холостого хода, для чего плавно уменьшайте ток возбуждения до минимального значения, снимите и запишите в табл. 1.1 6-7 значений U_r и I_b при снижении напряжения.

3. По измеренным данным постройте восходящую и нисходящую ветви характеристики намагничивания $U_r = f(I_b)$, падением напряжения в цепи якоря при холостом ходе и реакцией якоря можно пренебречь, приняв $E_0 \approx U_0$. Проведите среднюю линию между этими ветвями. Эта линия и принимается за практическую характеристику холостого хода генератора.

Таблица 1.1

№ отсчета	Восходящая ветвь		Нисходящая ветвь		Среднее значение	
	U_r	I_b	U_r	I_b	U_r	I_b
	В	А	В	А	В	А
1						
...						

4.2. Снятие внешней характеристики генератора $U_e = f(I)$, при

$R_b = \text{const}$, $n = n_{ном} = \text{const}$

1. Установите частоту вращения генератора $n = n_{ном}$ и поддерживайте ее неизменной в процессе опыта.

2. Установите номинальный режим работы генератора. Для чего с помощью реостатов $R_{вг}$ и R_n установите номинальное напряжение (28В) при номинальном токе 12А.

3. Построение верхней части внешней характеристики. Плавно увеличивайте сопротивление нагрузки до максимального значения. Запишите значения I , U_r , I_b . Отключите нагрузку (выключатель S_2), запишите значения U_r , I_b и снова включите нагрузку.

4. Построение нижней части внешней характеристики. Установите номинальный режим работы генератора (пункт 4.2.2). После чего, плавно уменьшая сопротивление нагрузки R_n вплоть до короткого замыкания, снимите и запишите в табл. 1.2 8-10 значений показаний приборов I , U_r на этом диапазоне нагрузки.

5. Установите максимальное значение сопротивления (реостат введен полностью) и отключите нагрузку и выключите электродвигатель.

Таблица 1.2

№ отсчета	I	U_r
	A	B
1		
...		

4.3. Снятие регулировочной характеристики $I_B = f(I)$ при $U_r = U_{ном} = \text{const}$, $n = n_{ном} = \text{const}$.

1. Отключите выключателем S2 нагрузку генератора. Включите электродвигатель и установите номинальные значения частоты вращения (реостатом $R_{вд}$) и напряжения генератора (реостатом $R_{вр}$).

2. Установите реостат R_n в положение максимального сопротивления и подключите его к генератору. Снимите и запишите в табл. 1.3 значения I , U_r , I_B , n .

3. Поддерживая постоянными частоту вращения и напряжения генератора, плавно увеличивайте ток нагрузки до номинального. Через равные значения приращения тока нагрузки (6-7 точек) снимите и запишите в табл. 1.3 значения I , U_r , I_B , n .

4. Уменьшите реостатом R_n ток нагрузки до минимального значения и отключите нагрузку и выключите электродвигатель.

5. По полученным данным постройте регулировочную характеристику генератора.

Таблица. 1.3

№ отсчета	I	I_B	$U_r = U_{ном}$	$n = n_{ном}$
	A	A	B	об/мин
1				

4.4. Снятие характеристики короткого замыкания $I_a = f(I_B)$ при $n = n_{ном} = \text{const}$, $U_c = 0$.

1. Соберите электрическую схему генератора в соответствии с рис. 1.4, но не изменяя схемы включения электродвигателя.

2. Включите приводной электродвигатель и при включенном питании цепи обмотки возбуждения генератора (S3 включен) установите и поддерживайте в течении опыта частоту вращения генератора $n = n_n$. Снимите показания амперметра A_1 и A_2 (I_a , I_B) и запишите в табл. 1.4.

3. Установите ползунок потенциометра $R_{вг}$ в исходное положение, обеспечивающее минимальный ток возбуждения генератора ($I_{в \min}$). Включите питание цепи возбуждения. Запишите значения $I_{я}$ и $I_{в}$.

4. Плавно увеличьте ток возбуждения до значения $I_{к} = I_{ном}$ снимите 2-3 показания амперметра A_1 и A_2 ($I_{я}$, $I_{в}$).

5. Отключите режим КЗ, возвратите ползунок потенциометра $R_{вг}$ в исходное положение, отключите питание цепи возбуждения генератора, выключите приводной электродвигатель.

Таблица 1.4

№ отсчета	I	$I_{в}$	$n = n_{ном}$
	A	A	об/мин

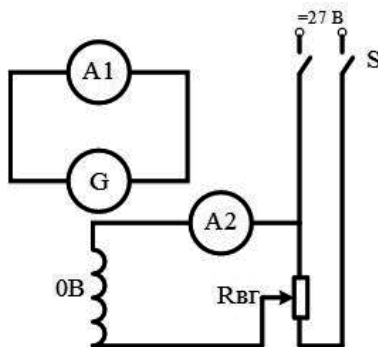


Рис. 1.4. Схема установки для опыта короткого замыкания

5. Содержание отчета

1. Номинальные данные генератора.
2. Электрическая схема установки.
3. Таблицы измерений и вычислений.
4. Расчетные формулы и примеры расчета.
5. Построенные характеристики генератора: (холостого хода, внешняя, регулировочная, нагрузочная, короткого замыкания).
6. Выводы по работе. Ответы на контрольные вопросы.

6. Контрольные вопросы

1. Поясните устройства и принцип работы машин постоянного тока.
2. На какие группы делятся генераторы по способу их возбуждения и в чем состоит их отличие?
3. Напишите и поясните уравнение электрического равновесия генератора.
4. Напишите и поясните уравнение баланса мощностей генератора.

5. Почему с увеличением тока нагрузки напряжение на выходе генератора уменьшается?
6. В чем заключается принцип самовозбуждения и каковы условия самовозбуждения для генератора с параллельным возбуждением?
7. Почему восходящая и нисходящая ветви характеристики холостого хода генератора не совпадают?
8. Каково назначение добавочных полюсов и компенсационной обмотки?
9. Чем объясняется нелинейный характер регулировочной характеристики генератора с параллельным возбуждением?
10. Каково назначение коллектора в генераторе постоянного тока?
11. Что такое размагничивающее действие реакции якоря?
12. В чем сущность явления реакции якоря машин постоянного тока?
13. Чем обусловлено падение напряжения генератора с ростом нагрузки?
14. Когда заканчивается процесс самовозбуждения генератора?
15. Чем обусловлен ток короткого замыкания $I_{ко}$ при токе возбуждения равным нулю?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Цель работы

1. Ознакомление с устройством и принципом действия источников бесперебойного электропитания на базе статических преобразователей.
2. Экспериментальное исследование основных элементов статического преобразователя: конвертора, однофазного инвертора.

1. Краткие теоретические сведения

Источники бесперебойного электропитания широко применяются при организации электроснабжения электрических приемников особой группы первой категории. Они обеспечивают электропитание при отказах основных источников за счет энергии, накопленной в аккумуляторной батарее.

Структурная схема однофазного статического преобразователя приведена на рис.2.1. Основными элементами однофазного преобразователя являются: конвертор (К), инвертор (И), входной (Ф1) и выходной (Ф2) фильтры, а также измерительный орган (ИО) и модулятор ширины управляющих импульсов (МШИ).

Конвертор предназначен для преобразования постоянного напряжения аккумуляторной батареи в регулируемое постоянное напряжение. Изменяя выходное напряжение конвертора, можно поддерживать неизменным выходное

напряжение преобразователя при изменении его тока нагрузки или входного напряжения.

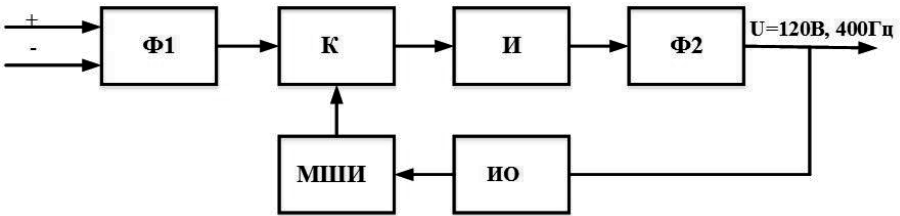


Рис.2.1. Структурная схема однофазного статического преобразователя

Эту функцию автоматически выполняет регулятор напряжения преобразователя, который включает в свой состав конвертор, МШИ и ИО.

Инвертор служит для преобразования постоянного напряжения в переменное частотой выходного напряжения преобразователя. Инвертор чаще всего выполняется по мостовой схеме (рис.2.2).

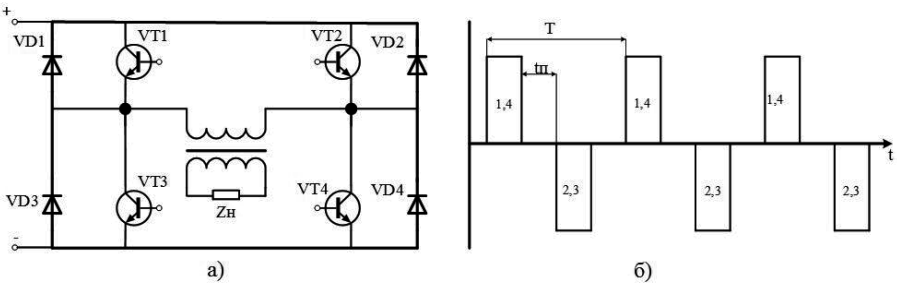


Рис.2.2. Мостовой инвертор: а) схема; б) диаграмма работы транзисторов

Транзисторы работают в ключевом режиме и включаются попарно, как показано на диаграмме (рис.2.2 б): в начале VT1, VT4 затем VT2, VT3. В результате ток первичной обмотки трансформатора меняет свое направление каждые полупериода, и в выходной обмотке трансформатора будут наводиться двухполярные импульсы, форма которых будет повторять диаграмму на (рис.2.2 б). Последовательность включения пар транзисторов, а также длительность их включенного состояния определяются импульсами управления, которые подаются на базы транзисторов от независимой схемы управления. Инверторы с таким способом управления силовыми транзисторами принято называть инверторами с независимым возбуждением.

Из диаграммы (рис.2.2 б) видно, что после закрытия пары транзисторов и перед открытием очередной пары выдерживается пауза (t_n). Если установить $t_n = 0$, то вследствие инерционности процесса закрытия транзисторов в коммутационный период все четыре транзистора будут открыты, а источник питания замкнут накоротко через транзисторы, которые перегружаются,

поэтому схему управления транзисторами проектируют таким образом, чтобы $t_{\pi} > 0$.

Транзисторы инверторов шунтируются диодами VD1-VD4, которые обеспечивают протекание тока при подключении активно-индуктивной нагрузки.

Для получения синусоидального напряжения на выходе преобразователя после инвертора устанавливаются LC фильтры – Ф2. С целью улучшения кривой напряжения и уменьшения массы фильтров преобразователя оптимизируют величину t_{π} инвертора.

Степень приближения формы кривой к синусоидальной характеризуется коэффициентом нелинейных искажений K_H :

$$K_H = \sqrt{\left(\frac{U_H}{U_1}\right)^2 - 1},$$

где: U_H — действующее значение несинусоидальной кривой напряжения на выходе инвертора; U_1 — действующее значение ее первой гармоники. Для чисто синусоидального сигнала $K_H=0$, чем меньше K_H , тем меньше масса фильтра Ф2.

Действующее значение выходного напряжения инвертора:

$$U_H = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} u_H^2 dt},$$

Для прямоугольной формы напряжения ($t_{\pi}=0$) $K_H=0.484$.

В общем случае $t_{\pi} \neq 0$ и для таких сигналов (Рис.2.3) вводится понятие *коэффициент заполнения импульса выходного напряжения* (q) $q=(T-2t_{\pi})/T$, где T — период изменения напряжения.

При введении паузы t_{π}

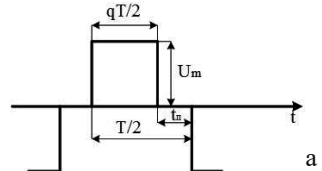
$$U_H = U_m \sqrt{q}; \dots U_1 = \frac{4 \cos \left[\frac{(1-q)\pi}{2} \right]}{\pi \sqrt{2}} U_m,$$

и, следовательно

$$K_H = \sqrt{\frac{\pi^2 q}{8 \cos^2 \left[\frac{(1-q)\pi}{2} \right]} - 1}.$$

Анализ зависимости K_H от q показывает, что минимальное значение $K_H=0,27$ получается при ширине импульса $q=0,74$ (пауза $43,4^\circ$). Учитывая, что при ширине импульса $q=0,66$ (пауза 60°) $K_H=0,312$ и мало отличается от минимального значения, используют инверторы с $q=0,66$, так как при этом полностью исключается третья гармоника, а пятая и седьмая ослабляются, что значительно облегчает фильтрацию.

Приближение формы кривой выходного напряжения инвертора к синусоидальной в мостовой схеме может быть достигнуто и при многократной



коммутации транзисторов во время полупериода основной частоты. Если при этом интервалы проводимости транзисторов VT1 и VT4 (VT2 и VT3) мостовой схемы в течение полупериода изменять по синусоидальному закону (рис.2.4), то при числе импульсов, равном девяти, кривая выходного напряжения будет содержать высшие гармоники, начиная с восемнадцатой. При таком техническом решении масса фильтра снижается, но усложняется схема системы управления. Так как потери при коммутации транзисторов пропорциональны числу коммутаций, то КПД инверторов по мере возрастания повторяемости импульсов снижается

При изменении нагрузки инверторов и напряжения питающей сети выходное напряжение инвертора будет изменяться в широких пределах. Поэтому для стабилизации напряжения инверторов применяют регуляторы напряжения, которые в соответствии с характером воздействия на инвертор можно разделить на два класса: регуляторы, осуществляющие амплитудное регулирование напряжения без изменения формы кривой выходного напряжения, т. е. стабилизирующие его одновременно по действующему, среднему и амплитудному значениям; и регуляторы, осуществляющие широтное регулирование, стабилизирующие одно из значений выходного напряжения (среднее, действующее или амплитудное) при изменении формы кривой.

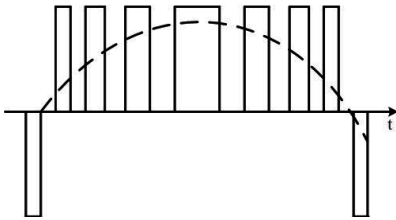


Рис.2.4. Многократная широтно-импульсная модуляция

Напряжение инвертора без изменения формы кривой в большинстве случаев стабилизируется путем включения на вход инвертора (И) (рис.2.1) конвертора

(К). Силовая часть регулируемого конвертора (рис.2.5) состоит из транзисторов VT1 и VT2, диаграмма управления которыми похожа на рис.2.2 б.

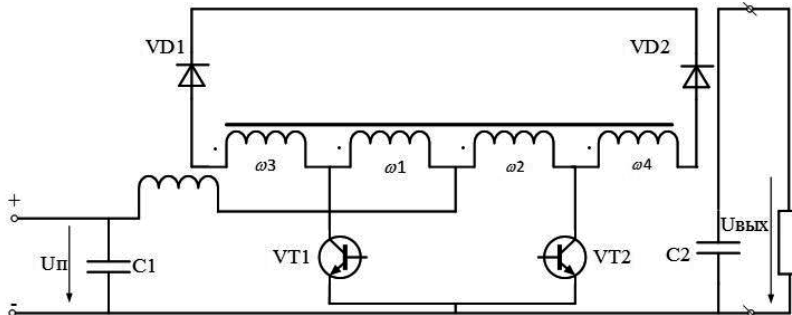


Рис.2.5. Конвертор

Силовые транзисторы управляются таким образом, что оказываются поочередно открытыми в течение части полупериода $qT/2$ (T - период

управляющих импульсов). Когда открыт один из транзисторов, например VT1, ток протекает через обмотку ω_1 трансформатора. При этом напряжение на выходе инвертора

$$U_{\text{вых}} = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \omega_4}{\omega_1} U_{\text{п}},$$

если $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$, то $U_{\text{вых}} = 3U_{\text{п}}$. К напряжению $U_{\text{п}}$ добавляется ЭДС, наводимая в обмотках ω_2 и ω_4 . В оставшуюся часть полупериода $(1-q)T/2$ оба транзистора закрыты и напряжение на выходе будет равно напряжению на входе $U_{\text{п}}$. Среднее значение напряжения за период

$$U_{\text{вых ср}} = \frac{2}{T} \left(3U_{\text{п}} q \frac{T}{2} \right) + U_{\text{п}} (1-q) \frac{T}{2} = (1+2q) U_{\text{п}}.$$

Изменяя коэффициент заполнения q , можно регулировать выходное напряжение конвертора от $U_{\text{п}}$ до $3U_{\text{п}}$. Конденсаторы на выходе и входе сглаживают пульсации напряжения, а дроссель сглаживает пульсации тока, потребляемого конвертором.

Регулирует величину управляющих импульсов q конвертора МШИ по сигналу от измерительного органа ИО. Схема стабилизации напряжения преобразователя работает следующим образом. Допустим, что к преобразователю подключили дополнительную нагрузку, тогда из-за дополнительного падения напряжения на фильтре Ф2 и транзисторах инвертора напряжение на выходе преобразователя уменьшится. Это снижение напряжения зафиксирует ИО и выдаст сигнал в МШИ, вследствие чего МШИ увеличит q . Напряжение на выходе конвертора повысится, а, следовательно, повысится напряжение на выходе инвертора и преобразователя, т.е. восстановится до исходного значения.

2. Описание схем моделирования

В работе исследуются две схемы: модель инвертора (рис.2.6) и модель конвертора (рис.2.7), обе схемы набраны в программной среде Multisim 10.

Схема на рис.2.6 состоит из инвертора на транзисторах U1-U4, формирователя управляющих импульсов (МШИ) и контрольно-измерительных приборов. МШИ включает в свой состав: источник опорного напряжения V2, программируемый потенциометр R2, генератор пилообразного напряжения XFG2, два компаратора U5, U6 и два трансформатора T5, T (для переворота фазы на 180°). Потенциометр R2 является интерактивным элементом и позволяет изменять в процессе моделирования опорное напряжение, подаваемое на вход компаратора, и как следствие, изменять q управляющих импульсов инвертора. Для изменения величины сопротивления необходимо установить указатель мыши в область R2 и, нажав левую кнопку мыши, переместить ползунок потенциометра. Положение ползунка 100% соответствует $q=1$. На вход Y компаратора подается постоянное напряжение, на вход X пилообразное напряжение с амплитудой 12В, частотой 400Гц, причем

пилообразные напряжения на компараторы U5, U6 подаются в противофазе.

Когда сигнал на входе X больше, чем сигнал на входе Y, на выходе формируется постоянный потенциал, при увеличении напряжения на входе Y продолжительность выходных импульсов будет возрастать. Нагрузка к инвертору R1 подключается через трансформатор Т6. Осциллограф XSC3 позволяет наблюдать форму сигналов на входе компаратора U5, а XSC2 – сигналы на выходах компараторов. Осциллограф XSC1 контролирует напряжение на выходе инвертора. К выходу также подключен измеритель нелинейных искажений XDA1.

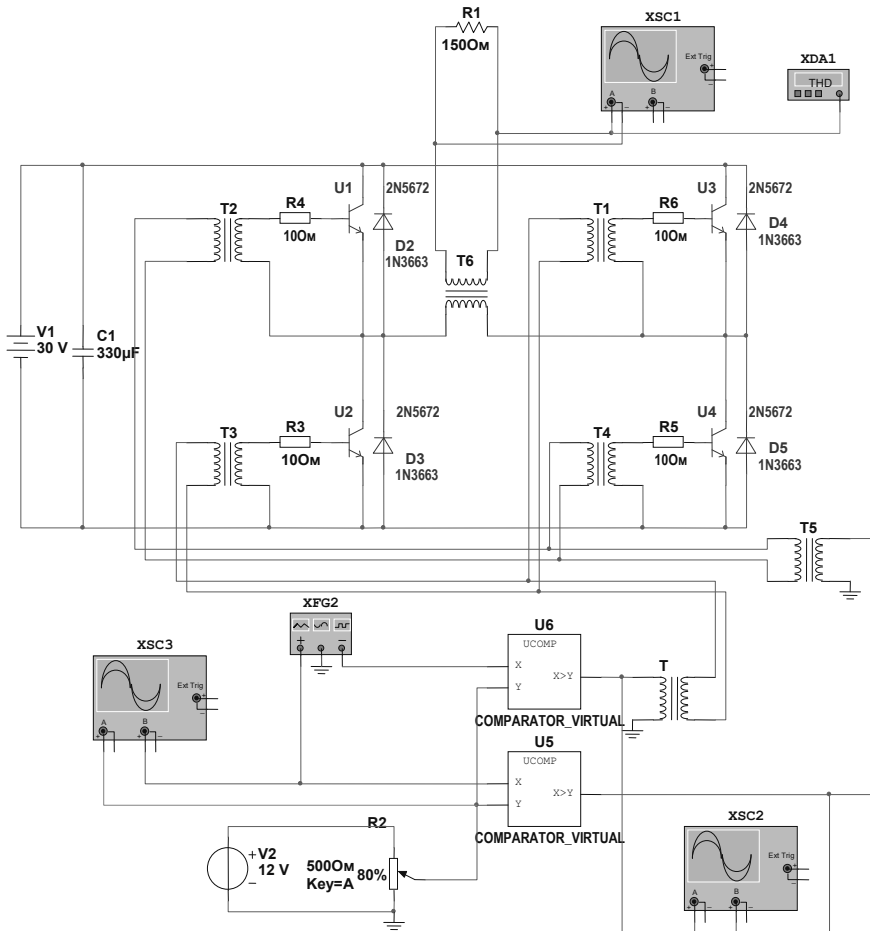


Рис.2.6. Модель инвертора

Схема конвертора включает модулятор ширины импульсов МШИ, собранный на элементах: V2-источник постоянного напряжения; R4-интерактивный элемент; XFG1-генератор пилообразного напряжения; U4, U5-компараторы.

Схема МШИ конвертора работает аналогично схеме МШИ инвертора. Многообмоточный трансформатор U3 имеет 4 одинаковые обмотки, соединенные последовательно. Осциллограф XSC2 контролирует сигналы управления силовыми транзисторами U1, U2. Осциллограф XSC1 подключен к выходу конвертора, нагруженному на сопротивление 300 Ом. Выходное напряжение конвертора контролируется вольтметром XMM1.

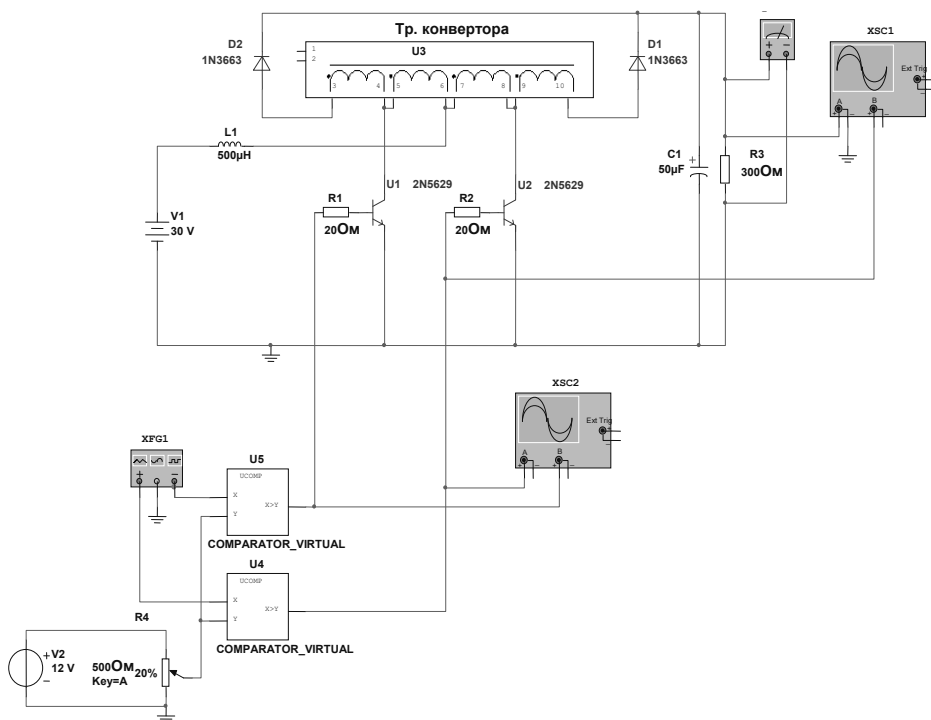


Рис 2.7 Конвертор напряжения

3. Программа работы

1. Провести моделирование режимов работы инвертора с помощью программного эмулятора электронных схем Multisim 10. Снять и построить зависимости:

- коэффициента нелинейных искажений от величины q ;
- напряжения на выходе инвертора от сопротивления нагрузки 70-1000 Ом;

- зарисовать форму выходного напряжения для $q=0.9$ и $q=0.2$.

2. Провести моделирование режимов работы конвертора. Снять и построить зависимость напряжения на выходе конвертора от величины q .

4. Порядок работы

1. Ознакомьтесь с программой моделирования Multisim.

2. Запустите среду моделирования Multisim и откройте файл «Инвертор» из директории указанной преподавателем.

3. Проверьте соответствие схемы моделирования схеме, приведенной на рис.2.6, при необходимости внесите соответствующие коррективы. Номинальное сопротивление нагрузки инвертора 150 Ом.

4. Для номинального значения сопротивления нагрузки измерьте значения коэффициента нелинейных искажений выходного напряжения инвертора для значений q равных 0-1 с шагом 5%. Величину q задавать с помощью резистора R2.

Примечание. Для изменения какого-либо параметра элемента необходимо установить указатель «мыши» на элемент и нажать правую кнопку мыши, в открывшемся меню выбрать подменю «свойства» и установить требуемые параметры. Установку параметров проводить при отключенном положении выключателя моделирования.

Для изменения параметра виртуального потенциометра R2 (R4) необходимо подвести указатель «мыши» к потенциометру, откроется ползунок потенциометра, установить указатель «мыши» на ползунок и, нажав левую кнопку мыши, перемещать ползунок.

5. Установите $q=0.7$, изменяя сопротивление нагрузки инвертора от 70 Ом до 1000 Ом, построить зависимость выходного напряжения инвертора от сопротивления нагрузки.

6. Для номинального значения сопротивления нагрузки зарисовать форму выходного напряжения для $q=0.9$ и $q=0.2$.

7. Запустите среду моделирования Multisim и откройте файл «Конвертор» из директории, указанной преподавателем.

8. Проверьте соответствие схемы моделирования схеме, приведенной на рис.2.7, при необходимости внесите соответствующие коррективы.

9. Снимите зависимость выходного напряжения конвертора для значений q равных 0-1 с шагом 5%. Величину q задавать с помощью резистора R4.

5. Содержание отчета

1. Цель работы
2. Электрические схемы моделирования инвертора, конвертора.
3. Таблицы измерений.
4. Построенные зависимости.
5. Выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

- 1). Опишите способ стабилизации выходного напряжения статического преобразователя.
- 2). Как влияет величина t_n инвертора на коэффициент нелинейных искажений?
- 3). Каково назначение диодов инвертора?
- 4). Как изменится максимальное напряжение конвертора, если число витков обмоток W_3 и W_4 будет в 2 раза больше, чем число витков обмоток W_1 и W_2 ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы

1. Ознакомление с принципом действия и основными соотношениями систем регулирования напряжения авиационных генераторов.
2. Изучение структурных и принципиальных схем авиационных регуляторов напряжения.
3. Изучение влияния режимов работы генератора и параметров системы регулирования на качество электрической энергии.
4. Исследование режимов работы импульсных регуляторов напряжения.
5. Изучение моделирования регуляторов в среде Simulink пакета MatLab.

1. Краткие теоретические сведения

Требования к качеству электрической энергии на борту воздушного судна задаются стандартом: *ГОСТ 54073-2017 - Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.*

Этот стандарт определяет показатели качества электроэнергии (ПКЭ), в том числе по напряжению, на клеммах приемников электрической энергии.

Требования ПКЭ по напряжению различных систем СЭС для нормального установившегося режима работы приведены в таблицах 3.1, 3.2.

Таблица 3.1

ПКЭ СЭС переменного тока для нормального установившегося режима

Характеристики качества для установившегося режима	СЭС напряжением 115/200В постоянной частоты 400Гц	СЭС напряжением 115/200В переменной частоты 360+800Гц	СЭС напряжением 230/400В переменной частоты 360+800Гц
Среднее по трем фазам действующее значение напряжения в точке регулирования, В	От 114 до 118	От 114 до 119	От 228 до 236
Фазное напряжение на входных выводах приемников, В	От 108 до 119	От 104 до 122	От 208 до 244
Небаланс напряжений, В, не более	3	6,7	6
Модуляция напряжения, В, не более	2,5	2,5	5
Сдвиг фазных напряжений	От 116° до 124°	От 116° до 124°	От 116° до 124°

Эти напряжения даны с учетом падения напряжения в проводах системы распределения электрической энергии. Точка регулирования - это точка к которой подключается измерительный орган регулятора напряжения.

Таблица 3.2

ПКЭ СЭС постоянного тока для нормального установившегося режима

Напряжение в точке регулирования, В	СЭС 27 В (первичная)	СЭС 27 В (вторичная)	СЭС 270 В
	От 27 до 29	От 25,4 до 29,4	От 260 до 280
Напряжение на входных клеммах приемников, В	От 24 до 29,4		От 250 до 280
Амплитуда пульсаций, В, не более	2		6

Для точки подключения разъема аэродромного источника питания (РАП) напряжения должны находиться в пределах:

- переменного тока 115/200 В постоянной частоты 400Гц – от 113 до 119 В;
- переменного тока 115/200 В переменной частоты 360...800Гц – от 113 до 120 В;
- постоянного тока 27 В –от 27 до 29,4 В;
- постоянного тока 270 В–от 260 до 280 В.

Основными источниками электроэнергии на борту воздушного судна (ВС) являются генераторы переменного или постоянного тока, которые работают совместно с регуляторами напряжения (РН). Регуляторы напряжения поддерживают напряжение в заданных пределах в статических и динамических режимах работы СЭС, а также, при параллельной работе генераторов, РН обеспечивают также равномерное распределение токов между генераторами постоянного тока, или реактивных составляющих тока между генераторами переменного тока при их параллельной работе.

Напряжение генератора постоянного тока (U) определяется выражением

$$U = c_n \Phi - I_r r_a, \quad (3.1)$$

где Φ - магнитный поток генератора;

n - частота вращения ротора генератора;

I - ток нагрузки;

r_a - сопротивление якоря.

Из выражения (3.1) следует, что возмущающими факторами, влияющими на напряжение генератора, являются его частота вращения и ток нагрузки.

Для генератора переменного тока его напряжение будет определяться аналогичным (3.1) выражением, с тем отличием, что в зависимости от характера нагрузки, реакция якоря может как увеличивать, так и уменьшать результирующий магнитный поток машины. Наибольшее влияние возмущающих факторов на напряжение проявляется для генераторов постоянного напряжения и генераторов переменного тока переменной частоты, поскольку частота их вращения может меняться в значительных пределах. Для обоих типов генераторов стабилизировать напряжение можно, управляя их магнитным потоком, путем изменения величины тока в обмотке возбуждения или сопротивления магнитной цепи машины.

По способу формирования сигнала управления они подразделяются на регуляторы непрерывного и импульсного действия.

В регуляторах напряжения непрерывного действия сигнал управления (ток возбуждения) генератора всегда является непрерывной функцией времени. Такое изменение регулируемой величины имеет место, например, при включении в цепь обмотки возбуждения генератора регулируемого резистора с плавно изменяющимся сопротивлением.

По способу реализации закона управления регуляторы подразделяют на аналоговые и цифровые, последние получают все большее распространение в виду ряда преимуществ, которыми обладают цифровые системы управления и регулирования.

В импульсных регуляторах управляющее воздействие представляет собой последовательность импульсов, параметры которых пропорциональны значениям сигнала ошибки в фиксированные дискретные моменты времени. Если таким параметром является амплитуда, то регулятор называется амплитудно-импульсным, если длительность сигнала, - то широтно-импульсным, рис.3.1 а, если фаза, - то фазоимпульсным, рис. 3.1 б.

Номинальное значение напряжения, которое должен поддерживать регулятор называют «уставкой» РН. Широтно-импульсные регуляторы напряжения обеспечивают изменение средней величины напряжения (тока) на обмотке возбуждения генератора (возбудителя) за счет изменения длительности импульсов при постоянной частоте их следования и постоянной амплитуде рис.3.1 а.

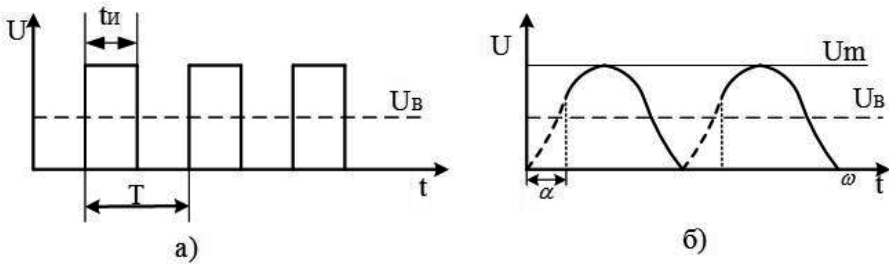


Рис. 3.1. Формы сигналов импульсного управления: а) широтно-импульсное; б) фазоимпульсное

Средняя величина напряжения на обмотке возбуждения U_B при постоянной величине напряжения питания в этом случае будет равна:

$$U_B = \frac{1}{T} \int_0^{t_n} U dt = \frac{t_n}{T} U,$$

где U – напряжение питания;
 t_n – длительность импульса;
 T – период следования импульсов.

Фазоимпульсный регулятор осуществляет изменение средней величины напряжения на обмотке возбуждения при питании от источника синусоидального напряжения путем изменения угла (фазы) открытия коммутационного аппарата (КА) (транзистора, тиристора и др.), включенного последовательно с обмоткой возбуждения, рис.3.1 б. Средняя величина напряжения на обмотке возбуждения генератора при фазоимпульсном регулировании равна:

$$U_B = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \alpha),$$

где U_m – амплитуда напряжения источника питания;

α – угол открытия коммутационного аппарата.

В цифровых регуляторах управляющее воздействие представляет собой последовательность импульсов или ступенчатую функцию.

Для уменьшения величины переходных отклонений в нормальных режимах работы требуется введение в регулятор напряжения реверса напряжения на обмотке возбуждения возбудителя. Наличие реверса напряжения на обмотке возбуждения обеспечивает быстрый спад тока возбуждения при переходных процессах, связанных с отключениями нагрузок. Время переходного процесса при этом сокращается в несколько раз.

Для уменьшения переходных отклонений в ненормальных режимах работы СЭС наличие только реверса недостаточно, поскольку рост напряжения подвозбудителя на высоких частотах вращения приводит к резкому увеличению максимального тока выхода регулятора и, как следствие этого, к значительному увеличению напряжения на генераторе при ликвидации коротких замыканий. Поэтому, на РН возлагается так же задача ограничения токов КЗ на минимально допустимом уровне, например, на уровне 3-х кратного тока КЗ или другой величины, достаточной для обеспечения селективной работы сетевой защиты.

2. Схемы авиационных регуляторов напряжения

Тиристорный регулятор напряжения. Тиристорные регуляторы напряжения относятся к классу фазоимпульсных регуляторов и предназначены для регулирования напряжения синхронного генератора.

Функциональная схема регулятора показана на рис. 3.2, принципиальная – на рис. 3.3.

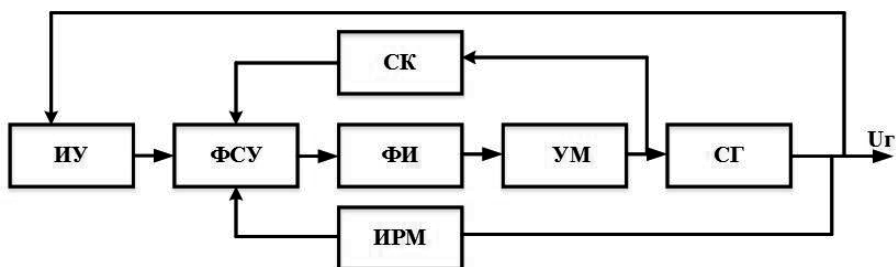


Рис. 3.2. Функциональная схема тиристорного регулятора напряжения

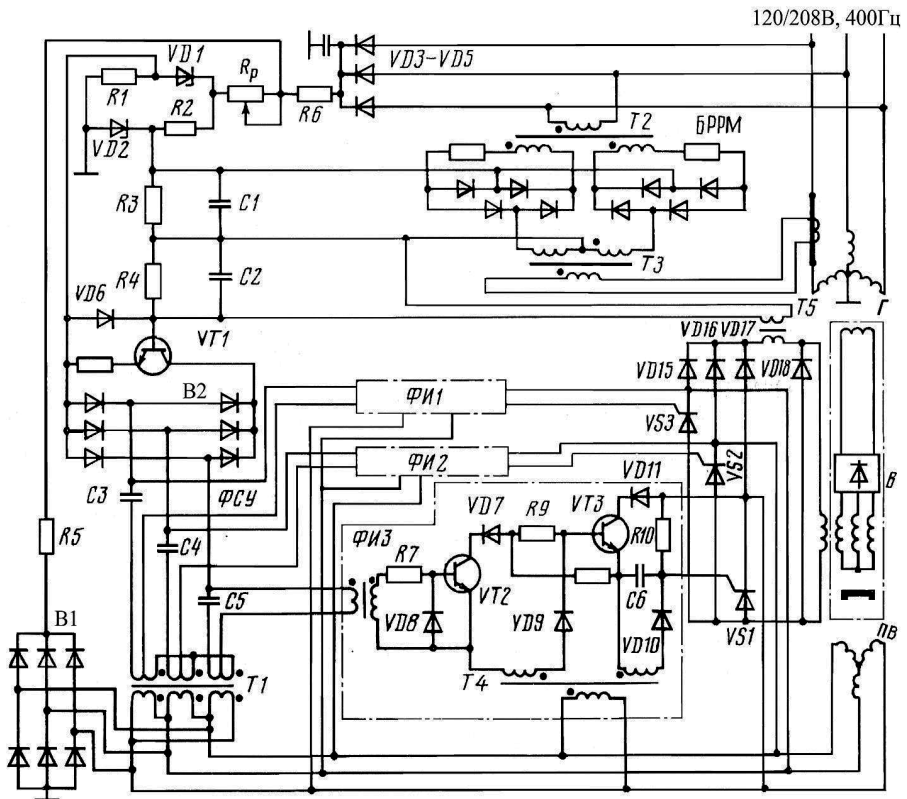


Рис. 3.3. Принципиальная электрическая схема тиристорного регулятора напряжения

Регулятор состоит из: измерительного устройства ИУ, фазосдвигающего устройства ФСУ, формирователей импульсов ФИ, усилителя мощности УМ, стабилизирующего контура СК, измерителя реактивной мощности ИРМ.

Регулятор работает совместно с бесконтактным синхронным генератором (СГ), ИРМ включается при параллельной работе генераторов.

Среднее фазное напряжение генератора через трехфазный однополупериодный выпрямитель на диодах VD3, VD5, следовательно, регулятор поддерживает среднее фазное напряжение СГ.

Рабочая точка, соответствующая номинальному напряжению генератора, соответствует точке U_n на характеристике измерительного органа, рис. 3.4. Настраивают регулятор на заданное значение напряжения с помощью резистора R_p .

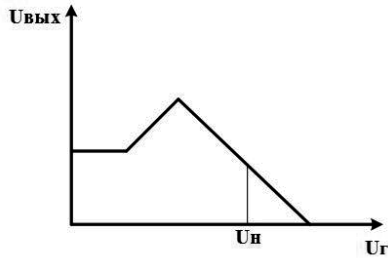


Рис. 3.4. Выходная характеристика измерительного органа

Сигнал с измерительного устройства поступает на ФСУ через резисторы R3, R4. В регуляторе применено трехфазное ФСУ, в состав которого входят: транзистор VT1, трехфазный выпрямитель B2; конденсаторы C3-C5; трехфазный трансформатор T1. Функция ФСУ - формирование сигнала переменного тока, фаза которого пропорциональна напряжению генератора. Опорным сигналом переменного тока, относительно которого меняется фаза, является напряжение подвозбудителя. Рассмотрим работу ФСУ на примере эквивалентной однофазной схемы, рис. 3.5 а).

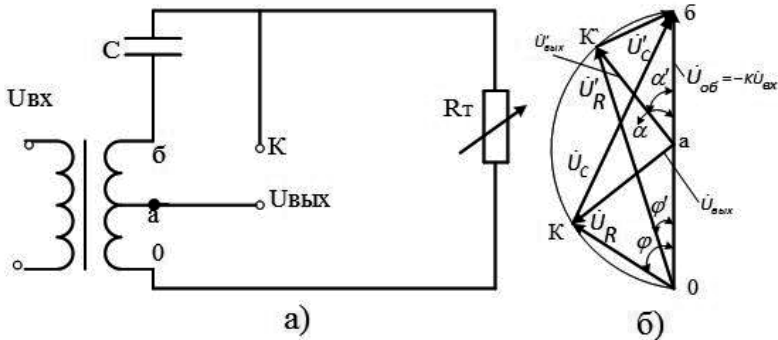


Рис. 3.5. Фазосдвигающее устройство: а) - принципиальная схема в однофазном исполнении; б) - векторная диаграмма ФСУ.

На первичную обмотку трансформатора подается опорная синусоида от подвозбудителя ($U_{вх}$). Вторичная обмотка имеет две симметричные полуобмотки oa и $аб$, которые нагружены на RC цепь. Выходное напряжение снимается между точками a и $к$.

Сумма падений напряжений на конденсаторе ($\vec{U}_c$) и сопротивлении ($\vec{U}_R$) равна напряжению $\vec{U}_{об}$, см. рис. 3.5,б. При этом вектор падения напряжения $\vec{U}_R$ на активном сопротивлении R_t , будет совпадать с вектором тока в цепи, а вектор падения напряжения $\vec{U}_c$ на реактивном (емкостном) сопротивлении X_c будет отставать от него на 90° . Геометрическим местом точек конца вектора $\vec{U}_{вых}$ является окружность с диаметром $\vec{U}_{об}$.

Если диагональ фазосдвигающего моста не нагружена, то очевидно, что при изменении сопротивления R_T сумма падений напряжений в плечах будет равна напряжению питания моста. Следовательно, с изменением сопротивления R_T , угол α (угол между опорным напряжением $\dot{U}_{об}$ и выходным напряжением ФСУ) будет изменяться от 0 до 180° . Модуль $|\dot{U}_{вых}|$ во всем диапазоне изменения угла α остается постоянным.

В рассматриваемом ФСУ в качестве R_T используется сопротивление эмиттер-коллекторного перехода транзистора VT1.

Из векторной диаграммы следует, что при изменении напряжения на базе транзистора VT1 от минимального до максимального значения, т. е. при переходе от режима работы транзистора, соответствующего режиму отсечки, к режиму, соответствующему режиму насыщения, рабочая точка **к** перемещается от точки **б** к точке **о**. При этом фаза выходного напряжения изменяется на 180° . Так как

$$\dot{U}_{об} = -k \dot{U}_{вх}, \text{ то } \dot{U}_{вых} = -(k \dot{U}_{вх} / 2) \exp j\alpha,$$

где k - коэффициент пропорциональности; α - угол сдвига фаз между выходным и входным напряжениями.

Таким образом, угол α связан с напряжением генератора. В трехфазном ФСУ используется трехфазный трансформатор, поэтому на его выходе будут три выходных сигнала, сдвинутые друг относительно друга на 120° . Выходные сигналы ФСУ поступают на три формирователя импульсов.

Сигналы на управляющие электроды тиристорov подаются с формирователя импульсов ФИ, состоящего из модулятора и формирующего устройства. Модулятор собран на составном транзисторе VT2 (см. рис.3.3).

На вход модулятора (на базу транзистора) подается напряжение с одного из выходов фазосдвигающего устройства, а питание цепи коллектор-эмиттер осуществляется от трансформатора T4, к которому подводится то же линейное напряжение $U_{об}$, что и к входу фазосдвигающего устройства. Следовательно, напряжение на базе транзистора VT2 сдвинуто на некоторый угол α относительно напряжения на транзисторе (рис. 3.6).

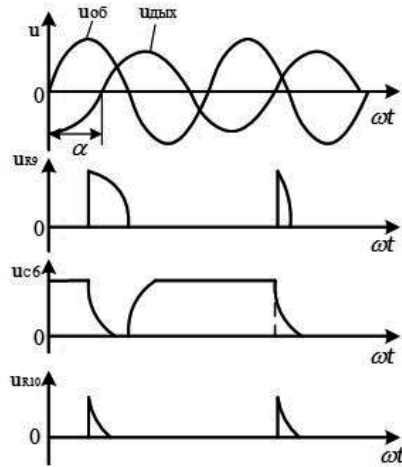


Рис. 3.6. Изменения напряжения в модуляторе и формирующем устройстве

Напряжение на сопротивлении нагрузки R9 представляет собой отсеченную синусоиду, угол отсечки которой α соответствует сдвигу фаз между входным и питающим напряжениями модулятора. Этот сигнал управляет формирующим устройством, которое питается от того же трансформатора Т4, что и модулятор но напряжением, сдвинутым по фазе на 180° . В нерабочий период конденсатор С6 заряжается. В следующий полупериод в момент времени, определяемый углом α , на вход транзистора VT3 подается сигнал от модулятора. Транзистор VT3 открывается и конденсатор С6 разряжается через резистор R10 и параллельно ему включенный управляющий переход тиристора VS1, диод VD11 и транзистор VT3.

Разрядный ток конденсатора С6 открывает тиристор VS1. Диоды VD10 и VD9 обеспечивают однополупериодный режим работы схемы. Транзисторы VT2 и VT3 работают в ключевом режиме, этому способствует включение в их коллекторные цепи нелинейных сопротивлений в виде диодов VD7 и VD11.

Для упрощения схемы управления и экономии тириستоров питание цепи обмотки возбуждения возбудителя осуществляется от несимметричной трехфазной мостовой схемы - усилителя мощности, (рис.3.3). В катодной группе приборов используют обычные вентили VD15, VD16 и VD17, а в анодной - тиристоры VS1, VS2 и VS3.

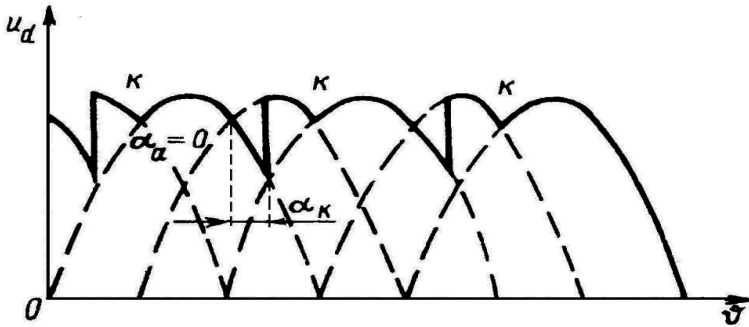


Рис. 3.7. Коммутация вентилей при фазовом управлении тиристорами

Коммутация вентилей происходит в моменты их естественного отпирания, которые соответствуют точкам **K** (рис. 3.7), с углом отпирания $\alpha_a=0$ (отсчет углов ведется от точки естественного отпирания вентиля). Тиристоры коммутируются импульсами управления. При изменении угла отпирания тиристоров α_k изменяется среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_0 = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{\max} \frac{1 + \cos \alpha_k}{2}$$

где $U_{\max}$ - амплитудное значение фазного напряжения (напряжение подвозбудителя).

При угле отпирания $\alpha_k = 180^\circ$ напряжение на выходе мостовой схемы $U_0=0$. Диод VD18 (см. рис. 3.3), включенный параллельно цепи возбуждения, которая представляет для выпрямителя активно-индуктивную нагрузку, предназначен для защиты тиристоров и диодов от перенапряжений и образования цепи для тока, обусловленного ЭДС самоиндукции. Гибкая обратная связь по току возбуждения возбудителя вводится стабилизирующим контуром, состоящим из трансформатора T5, резистора R4 и конденсатора C2.

Принцип действия регулятора напряжения состоит в следующем: при напряжении генератора, равном номинальному, на выходе измерительного устройства и на базе транзистора VT1 имеется некоторое напряжение, и, следовательно, транзистор имеет некоторое конечное сопротивление R_T . Напряжение на выходе фазосдвигающего устройства сдвинуто на некоторый угол α относительно опорного напряжения. Угол отпирания тиристоров $\alpha_k = \alpha$, и на обмотке возбуждения возбудителя будет некоторое напряжение.

Если напряжение генератора превысит номинальное значение, то напряжение на выходе измерительного устройства уменьшится, сопротивление R_T уменьшится, угол сдвига фаз α возрастет, увеличится угол отпирания тиристоров α_k , что приведет к снижению напряжения, приложенного к цепи возбуждения возбудителя, а, следовательно, и к уменьшению напряжения

генератора. При понижении напряжения процессы происходят в обратном порядке. Если напряжение генератора значительно меньше номинального, напряжение на выходе измерительного устройства полностью открывает транзистор VT1.

При этом напряжение на выходе фазосдвигающего устройства находится в фазе с анодным напряжением соответствующего тиристора, благодаря чему тиристоры VSI - VS3 открыты в течение всей проводящей части периода. Ток возбуждения достигает максимального значения.

Тиристорные регуляторы напряжения, как и транзисторные, учитывая их высокое быстродействие, по своим динамическим свойствам относят к усилительным звеньям.

Транзисторные регуляторы напряжения (ТРН). К преимуществам ТРН следует отнести: высокое быстродействие, малые габариты, вследствие низких потерь на регулирующем элементе, хорошая совместимость с цифровыми системами управления. Принципиальная упрощенная схема ТРН для генератора постоянного тока приведена на рис. 3.8.

Измерительный орган (ИО) выполняется по схеме с одним или двумя стабилитронами, МШИ – модулятор ширины импульсов, управляет работой исполнительного устройства – транзистора VT. Транзистор в ТРН работает в ключевом режиме.

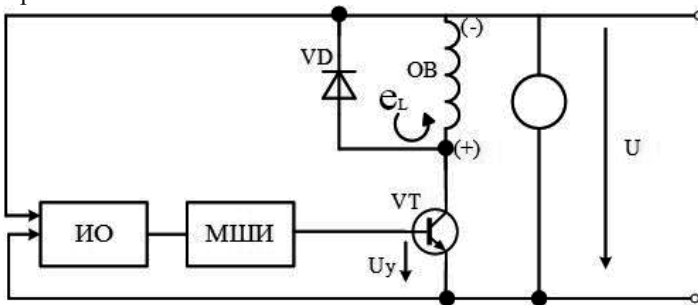


Рис. 3.8. Принципиальная схема транзисторного регулятора

При работе в ключевом режиме на транзистор подаются сигналы управления U_y в виде прямоугольных импульсов, рис. 3.9. В течение импульса транзистор открыт и напряжение генератора U прикладывается к обмотке возбуждения (ОВ), поскольку ОВ имеет значительную индуктивность, ток в ней (i_B) начинает плавно возрастать. После закрытия транзистора ток в ОВ начинает плавно падать. В итоге ток i_B будет пульсировать около среднего значения, величина которого зависит от соотношения времени открытого (t_o) и закрытого (t_z) состояния транзистора – коэффициента заполнения импульсов k_3 .

$$k_3 = \frac{t_o}{t_o + t_z} = \frac{t_o}{T},$$

где T – период следования импульсов.

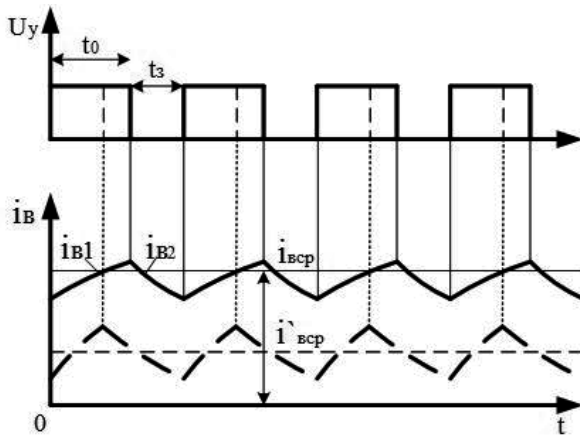


Рис. 3.9. Сигналы транзисторного регулятора

Величиной k_3 управляет МШИ по сигналу от измерительного органа. Период следования импульсов $T=t_0+t_3$, величина постоянная, МШИ меняет только ширину импульса, т.е. t_0 . Если напряжение генератора уменьшилось, то МШИ увеличивает k_3 , если напряжение увеличилось, то k_3 уменьшается.

На рис. 3.9 пунктиром показан вариант сигналов транзисторного регулятора, когда регулятор уменьшает ток возбуждения генератора.

В момент запираания транзистора в ОВ возникает ЭДС самоиндукции e_L , полярность, которой показана на рис.3.8 в скобках. Под действием этой ЭДС открывается диод VD, и ток обмотки возбуждения будет протекать через диод, плавно спадая, ограничивая величину ЭДС самоиндукции величиной падения напряжения на диоде в прямом направлении $\approx 1 \div 2В$. При отсутствии диода, вследствие быстрого запираания транзистора, ЭДС самоиндукции достигнет очень больших значений, в результате будет пробит транзистор и изоляция обмотки возбуждения. Поэтому во всех схемах, где транзистор коммутирует ток в цепи, содержащей индуктивность, последняя шунтируется диодом.

Как видно из рис. 3.9, ток возбуждения колеблется около среднего значения. Как пульсирует ток возбуждения, так будет пульсировать магнитный поток машины, а, следовательно, и её напряжение. Амплитуда пульсаций зависит от индуктивности обмотки возбуждения и частоты следования импульсов ШИМ, чем больше частота ШИМ, тем меньше амплитуда пульсаций тока возбуждения. Частоту переключений ШИМ выбирают порядка $5 \div 10 кГц$, частота переключений ограничивается ростом коммутационных потерь в транзисторе.

На рис. 3.10 приведена функциональная схема транзисторного широтно-импульсного РН, управляющего током обмотки возбуждения возбудителя (ОВВ) синхронного генератора. Данный регулятор входит в состав блока

БРЗУ115 (блок регулирования защиты и управления), основного блока управления каналом генерирования переменного тока.

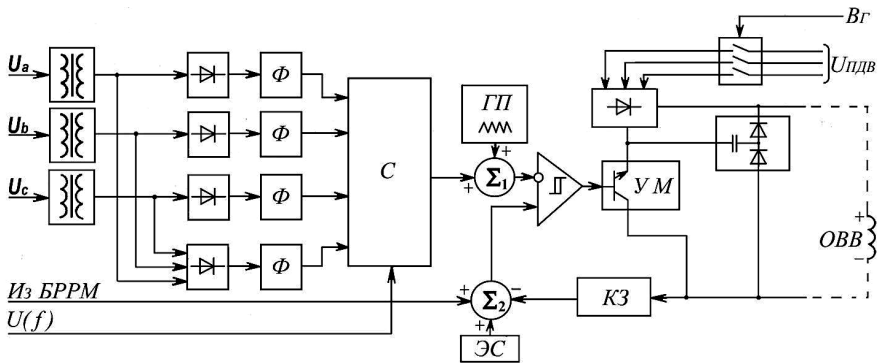


Рис. 3.10. Транзисторный регулятор напряжения: Ф - Фильтр; С - схема выделения наибольшего напряжения; ГП - генератор пилообразного напряжения; ЭС - эталонный сигнал; УМ - усилитель мощности; КЗ - корректирующее звено.

Регулятор поддерживает в симметричных режимах среднее фазное напряжение в соответствии с ГОСТом 54073-2017 и ограничивает наибольшее из фазных напряжений в несимметричных режимах работы трехфазного генератора, а также ограничивает мощность в системе с гидролопаточным приводом, при понижении частоты.

Измерительное устройство регулятора построено по сложной схеме и включает: генератор пилообразного напряжения (ГП), два сумматора, эталонный сигнал (ЭС), триггер Шмидта.

Фазные напряжения генератора с помощью трансформаторов понижаются до уровня 30 В, выпрямляются, фильтруются и поступают на схему выделения наибольшего напряжения С. Сюда же поступает сигнал, пропорциональный среднему значению напряжения трех фаз, а также сигнал, пропорциональный снижению частоты $U(1/f)$.

Схема выделяет наибольший из перечисленных сигналов и выдает его на сумматор, где он суммируется с пилообразным напряжением:

- в полнофазном режиме при нормальной частоте наибольший сигнал - напряжение, среднее по трем фазам;
- в неполнофазном режиме наибольший сигнал - напряжение в одной из фаз;
- при снижении частоты наибольший сигнал - напряжение, пропорциональное снижению частоты.

В несимметричных режимах, когда хотя бы один из сигналов, пропорциональный фазному напряжению становится больше сигнала, среднего напряжения по трем фазам, регулятор работает в режиме ограничения фазного напряжения.

В режиме снижения частоты, когда сигнал, пропорциональный снижению частоты, становится больше сигнала, пропорционального, среднему напряжению по трем фазам, регулятор работает при напряжении, пропорциональном частоте, что обеспечивает ограничение мощности при работе с гидролопаточными приводами в режимах КЗ в сети.

Сигнал на выходе первого сумматора представляет собой пилообразное напряжение, среднее значение которого изменяется с изменением напряжения генератора (U_G), позиция (1) на рис. 3.11. Это сигнал сравнивается на триггере Шмидта с опорным напряжением (2) собственно эталонного сигнала, сигнала с БРРМ (блока регулирования реактивной мощности, данный сигнал подается при параллельной работе генераторов) и сигнала гибкой обратной связи КЗ (КЗ – корректирующее звено), обеспечивающей необходимое качество переходных процессов. Опорное напряжение формируется на выходе второго сумматора. Опорное напряжение представляет собой сумму трех сигналов. Когда опорное напряжение больше напряжения с выхода первого сумматора, на выходе триггера формируются прямоугольные импульсы (3), ширина которых пропорциональна отклонению напряжения генератора от опорного сигнала.

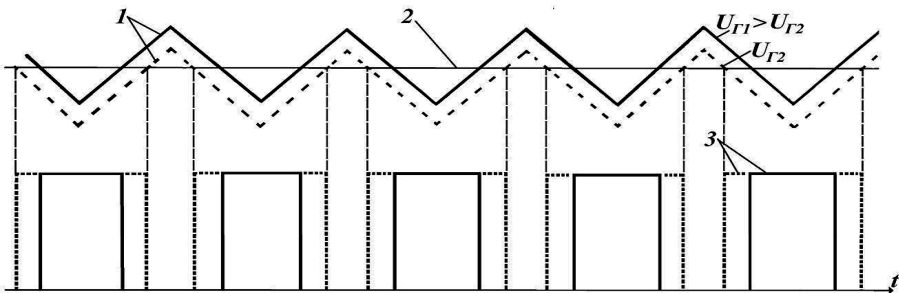


Рис. 3.11. Диаграмма работы регулятора напряжения: 1 - сумма U_G и «пилы»; 2-опорное напряжение, 3-выход триггера Шмидта.

Сигналы с триггера Шмидта поступают на транзисторный усилитель мощности, работающий в ключевом режиме. Транзисторный ключ управляет током в обмотке ОВВ. Усилитель мощности получает питание от трехфазного подвозбудителя генератора ($U_{ПДВ}$), через трехфазный выпрямитель. Напряжение подвозбудителя подается на РН через трехфазный контактор, который замыкается после подачи БРЗУ сигнала V_G («включить возбуждение генератора»). Транзисторный регулятор практически не вносит запаздывания в систему регулирования напряжения и обладает малыми габаритами, что позволило включить его в состав блока БРЗУ.

3. Задание к работе

1. Изучить теорию процессов регулирования напряжения генераторов.

2. Изучить схемы и принципы действия авиационных регуляторов.
3. Изучить модели регуляторов в MatLab.
4. Провести исследования широтно-импульсного регулятора напряжения и снять осциллограммы.
5. Определить статическую ошибку для различных режимов.

4. Описание модели

Широтно-импульсный регулятор. Схема модели регулятора приведена на рис.3.12. Модель рис. 3.12 включает в свой состав: двухкаскадный генератор (генератор, возбудитель), задатчик угловой скорости генератора (ω), нагрузку генератора (Signal Builder), широтно-импульсный ПН, осциллографы (Scope, Scope2), преобразователь напряжения (Voltage Measurement).

Генератор аналогичен генератору непрерывной модели. В модели используется масштаб времени 100:1. Соответственно частота сигнал генератора (Signal Generator) уменьшена в 100 раз.

Широтно-импульсный модулятор РН выполнен по схеме регулятора БРЗУ115, рис. 3.10, 3.11. Сигнал стандартного генератора «пилы» (USG, блок Signal Generator) двухполярный и для формирования однополярного сигнала (Up) используется сумматор Sum2 и константа 3, равная амплитуде USG. Сумматор Sum4 суммирует «пилу» и напряжение генератора, подобно сумматору 1 на рис. 3.10, а функцию сумматора 2 регулятора БРЗУ выполняет сумматор Sum3.

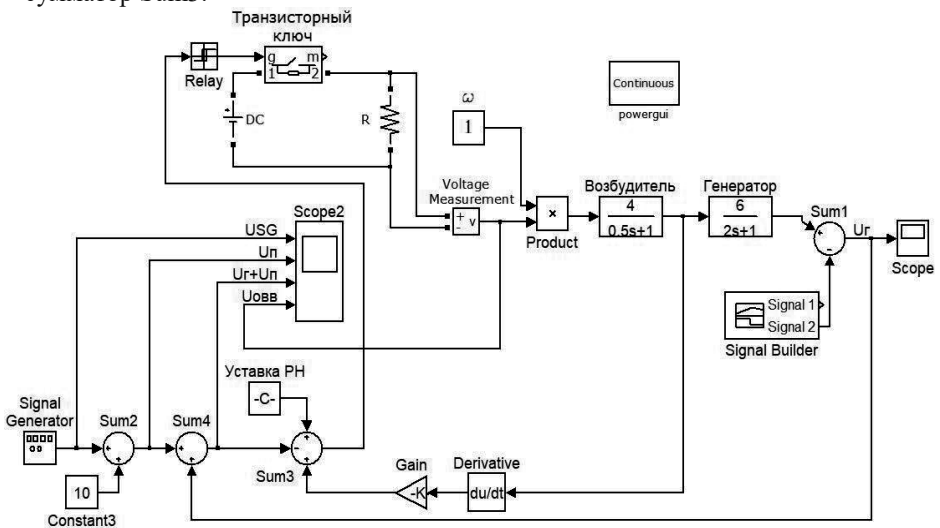


Рис. 3.12. Схема моделирования широтно-импульсного регулятора.

Уставка регулятора настроена на 118 В, при этом значение константы уставки в модели имеет несколько большее значение (121.24), чтобы обеспечить необходимый коэффициент заполнения ШИМ сигнала для режима холостого хода. Осциллограммы формирования широтно-импульсного сигнала показаны на рис. 3.13.

В качестве триггера Шмидта используется элемент Relay с зоной нечувствительности 0.01 В. Триггер Шмидта управляет транзисторным ключом, включенным последовательно между источником постоянного напряжения (DC) и ОВВ. Источник DC моделирует подвозбудитель генератора и имеет напряжение 30В. Для правильной работы модели источника DC его цепь должна быть замкнута, с этой целью установлен вспомогательный резистор R.

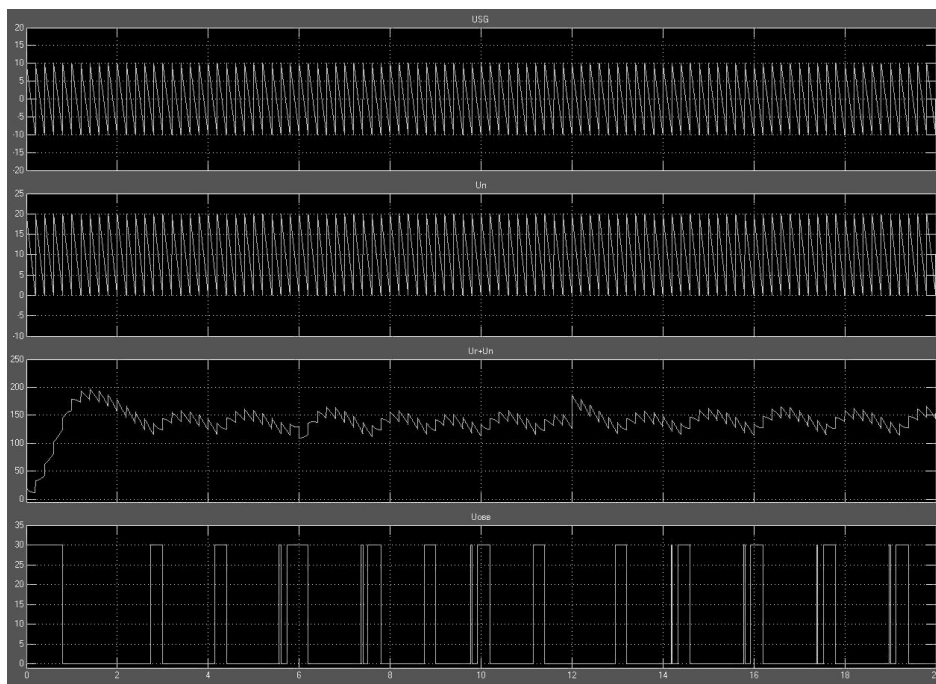


Рис. 3.13. Осциллограммы формирования широтно-импульсного сигнала

Напряжение на резисторе R моделируется элементами из библиотеки SimPower Systems (SPS модель), которые оперируют с электрическими сигналами (напряжение передается двумя проводами). Моделирование генератора и других элементов выполнено в среде Simulink (S модель), (напряжение, токи отображаются однолинейно, в виде сигнала). Преобразование напряжения из SPS модели в S модель осуществляется с помощью блока Voltage Measurement из библиотеки SimPowerSystems/Measurements.

При необходимости, для преобразования тока используется блок Current Measurement, обратный переход производится с помощью блоков Controlled Current Source и Controlled Voltage Source из библиотеки SimPowerSystems/Electrical Sources.

Напряжение генератора (U_g) можно наблюдать на осциллографе Scope, процесс формирования ШИМ сигнала (напряжение $U_{овв}$) – на Scope2.

5. Порядок проведения работы

Время моделирования для всех опытов постоянно и равно 20с. Для работы необходимо запустить MatLab, нажав на соответствующую иконку на Рабочем столе. После запуска MatLab через кнопки File/Open найти и запустить файл модели ***RU_SHIM.mdl***.

5.1. *Переходные процессы при наличии сигнала гибкой обратной связи.* Установить: напряжение включения реле 0.01 В, напряжение отключения 0 В, $\omega=1$, частота генератора 50Гц, коэффициент передачи производной 0.0645, уставка регулятора 123.7. Запустить моделирование и снять осциллограмму U_g . Определить статическую ошибку для моментов времени 12с, 20с.

5.2. *Переходные процессы при отсутствии сигнала гибкой обратной связи.* Установить: напряжение включения реле 0.01 В, напряжение отключения 0 В, $\omega=1$, частота генератора 50Гц (5кГц для реальной системы), коэффициент передачи производной 0 (Gain), уставка регулятора 121.24. Запустить моделирование и снять осциллограммы U_g , U_{SG} , $U_{п}$, $U_g+U_{п}$, $U_{овв}$. По осциллограмме определить статическую ошибку для моментов времени 12с, 20с.

5.3. *Переходные процессы при наличии сигнала гибкой обратной связи и повышенной частоте вращения.* Установить: напряжение включения реле 0.01 В, напряжение отключения 0 В, $\omega=2$, частота генератора 50Гц, коэффициент передачи производной 0.0645, уставка регулятора 123.7. Запустить моделирование и снять осциллограммы U_g .

5.4. *Влияние частоты генератора ШИМ на модуляцию напряжения.* Установить: напряжение включения реле 0.01 В, напряжение отключения 0 В, $\omega=1$, частота генератора 50Гц, коэффициент передачи производной 0, уставка регулятора 121.24. Запустить моделирование и снять осциллограмму U_g . Определить размах пульсации установившегося напряжения.

Повторить опыт для частоты генератора 5Гц и снять осциллограммы U_g , U_{SG} , $U_{п}$, $U_g+U_{п}$, $U_{овв}$ и определить размах пульсации установившегося напряжения

Дать заключение о влиянии частоты ШИМ на модуляцию напряжения генератора.

6. Содержание отчета

1. Цель работы, краткие теоретические сведения. Схема моделирования регулятора напряжения.

2. Осциллограммы напряжений $U_{г}$, U_{SG} , $U_{п}$, $U_{г+U_{п}}$, $U_{овв}$ для опыта 5.1 и 5.4 для частоты 5Гц.
3. Осциллограммы напряжения $U_{г}$ для опыта 5.2, 5.3.
4. Заключение о влиянии ОС на качество переходных процессов.
5. Заключение о влиянии частоты вращения на запас устойчивости системы регулирования напряжения.
6. Заключение о влиянии частоты ШИМ генератора на модуляцию выходного напряжения.
10. Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы.

1. Почему в транзисторных РН используется ключевой режим работы транзистора?
2. Как можно подстраивать напряжение в тиристорном регуляторе?
3. Объясните метод фазоимпульсного регулирования.
4. Какой режим работы генератора обеспечивает наибольший запас устойчивости системы регулирования напряжения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы электроснабжения воздушных судов/ под ред. Халютин С.П.-М.: ИД Академии Жуковского, 2022.-575 с.
2. Кацман М.М. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1990.
3. Синдеев И.М. Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов.: М. Транспорт, 1990.
4. Сергей Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Корона –Принт.: СПб.: Питер , 2010.

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Исследование генератора постоянного тока параллельного возбуждения.....	3
Лабораторная работа № 2. Исследование статических преобразователей электроэнергии.....	11
Лабораторная работа № 3. Изучение и исследование схем регуляторов напряжения авиационных генераторов. Импульсные регуляторы напряжения	19