

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ (МГТУ ГА)»**

Кафедра электротехники и авиационного электрооборудования
А.А. Савелов

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ ч.Ш

*для студентов III-IV курсов
направления 25.03.02
всех форм обучения*

Москва
2019

ББК 05.62
С-12

Рецензент:
Халютин С.П. – д-р техн. наук

Савелов А.А.
С-12 Системы электроснабжения воздушных судов: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ ч. III./ А.А. Савелов. – Воронеж: ООО «МИР», 2019. – 36 с.

Данное учебно-методическое пособие издается в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины «Системы электроснабжения воздушных судов» по учебному плану для студентов III-IV курсов направления 25.03.02 всех форм обучения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры 05.03.2019 г. и методического совета 05.03.2019 г.

В авторской редакции

Подписано в печать 12.03.2019 г.
Формат 60x84/16 Печ.л. 3 Усл. печ. л.
3,49 Заказ 434/090427 Тираж 50 экз.

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

Отпечатано ООО «МИР»
394033, г. Воронеж, Ленинский пр-т 119А, лит. Я, оф. 215

© Московский государственный
технический университет ГА, 2019

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. НЕПРЕРЫВНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Цель работы

1. Ознакомление с принципом действия и основными соотношениями систем регулирования напряжения авиационных генераторов.
2. Изучение влияния режимов работы генератора и параметров системы регулирования на качество электрической энергии.
3. Исследование режимов работы непрерывного регулятора напряжения.
4. 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 1, 2.

Таблица 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 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
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

$$U = cn\Phi - Ir_{я}, \quad (1.1)$$

где Φ - магнитный поток генератора;

n - частота вращения ротора генератора;

I - ток нагрузки;

$r_{я}$ - сопротивление якоря.

Из выражения (1.1) следует, что возмущающими факторами, влияющими на напряжение генератора, являются его частота вращения и ток нагрузки.

Для генератора переменного тока его напряжение будет определяться аналогичным (1.1) 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.

Изменение регулируемого параметра (тока возбуждения или тока в подмагничивающей обмотке генератора), в свою очередь, может осуществляться по известным принципам регулирования: по отклонению, по возмущению и по принципу комбинированного регулирования. Системы регулирования напряжения ВС в основном построены по принципу регулирования по отклонению.

Система регулирования напряжения (рис. 1.1) состоит из объекта регулирования – генератора (Γ) и регулятора напряжения, включающего устройства: блок измерения напряжения (БИН), усилительное (УС), исполнительное (ИУ) и корректирующее (КУ). В БИН входит нормализатор напряжения, преобразующий измеряемое напряжение к пониженному уровню и измерительный орган, фиксирующий величину отклонения напряжения генератора от заданного значения (сигнал ошибки).

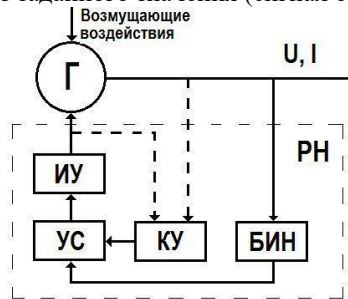


Рис. 1.1. Функциональная схема системы регулирования напряжения

Сигнал ошибки усиливается усилителем УС и подается на исполнительное устройство. Усилительное устройство предназначено для усиления мощности сигналов ошибки, оно управляет энергией, поступающей от постороннего источника питания или подвозбудителя генератора.

В регуляторах напряжения используются магнитные и электронные усилители. Исполнительное устройство осуществляет воздействие на управляющий орган генератора: обмотку возбуждения или обмотку подмагничивания в магнитоэлектрическом генераторе.

Корректирующие устройства предназначены для повышения устойчивости и точности процесса регулирования, а также для формирования управляющих воздействий, зависящих от возмущений, на объект, что позволяет существенно улучшить динамические свойства системы

регулирования. В ряде регуляторов некоторые из этих элементов отсутствуют, а некоторые объединены.

Применяемые в системах регулирования РН принято классифицировать по трем основным признакам: по типу исполнительного органа (силовой части), по способу формирования сигнала управления и по способу реализации закона управления.

По типу исполнительного органа, включенного последовательно с обмоткой возбуждения (управления) генератора или его возбудителя, РН делят на: транзисторные, тиристорные, на магнитных усилителях.

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, если фаза, - то фазоимпульсным, рис. 1.2.

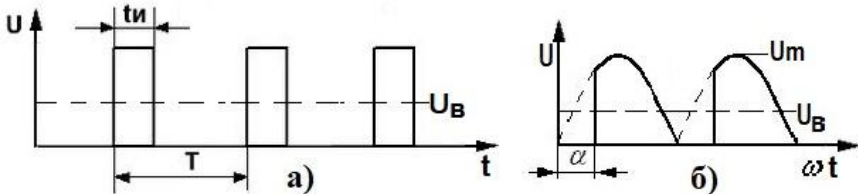


Рис. 1.2. Формы сигналов импульсного управления: а) широтно-импульсное; б) фазоимпульсное

Существует также импульсные регуляторы релейного типа, в которых обмотка возбуждения подключается или отключается от источника напряжения в зависимости от того меньше или больше напряжение генератора заданной величины. 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. 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.1.2,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.

Статическая ошибка и быстродействие системы регулирования.

Система автоматического регулирования может иметь астатическую (независимую от нагрузки) или статическую (зависимую от нагрузки) характеристики регулирования. Пример таких характеристик показан на рис. 1.3.

Статизм (s) системы регулирования напряжения, определяется как $s = -\frac{\partial U}{\partial I}$, он характеризует точность поддержания напряжения в установившемся режиме при изменении тока нагрузки. Для астатической системы $s = \infty$.

Обычно система настраивается на небольшой положительный статизм, чтобы обеспечить устойчивую работу системы при различных внешних воздействиях.

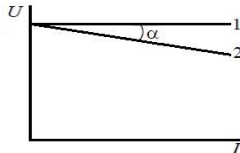


Рис. 1.3. Внешние характеристики системы регулирования напряжения: 1-астатическое регулирование; 2-регулирование с положительным статизмом

Для снижения статизма системы регулирования напряжения и повышения её быстродействия коэффициент усиления регулятора желательно увеличивать. Рассмотрим простейшую схему регулирования,

состоящую из генератора и пропорционального регулятора напряжения ($W_{PH}(p)$), рис. 1.4.

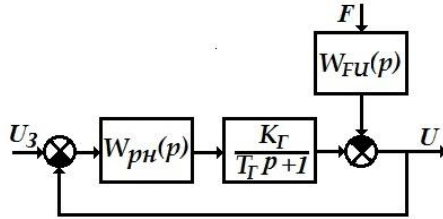


Рис. 1.4. Структурная схема регулирования напряжения

На выходное напряжение действует возмущение F с передаточной функцией $W_{FU}(p)$, обычно

$$W_{FU}(p) = \frac{k_{FU}}{1+T_{FU}p}.$$

В качестве F можно рассматривать изменение частоты вращения генератора, и, или, ток его нагрузки.

Упрощенная передаточная функция генератора имеет вид аperiodического звена:

$$W_G(p) = \frac{k_G}{T_G p + 1}, \quad \text{где } k_G - \text{коэффициент усиления генератора; } T_G - \text{постоянная времени генератора.}$$

Передаточная функция пропорционального РН: $W_{PH}(p) = k_{PH}$,
 k_{PH} -коэффициент усиления регулятора.

U_3 - заданное напряжение генератора («уставка» регулятора).

Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(p)$:

$$W_p(p) = W_{PH}(p) \cdot W_G(p) = \frac{k_{PH} k_G}{T_G p + 1}.$$

Тогда в соответствии со структурной схемой можно записать:

$$U = U_3 \frac{W_p(p)}{1+W_p(p)} - F \frac{W_{FU}(p)}{1+W_p(p)}. \quad (1.2)$$

Первое слагаемое определяет заданное значение напряжения генератора, а второе величину ошибки (ΔU), обусловленной действиями возмущений:

$$\Delta U = -F \frac{W_{FU}(p)}{1+W_p(p)}. \quad (1.3)$$

Установившаяся ошибка от возмущений определяется для $t \rightarrow \infty$, или $p \rightarrow 0$, тогда

$$\Delta U_{t \rightarrow \infty} = -F \frac{W_{FU}(0)}{1+W_p(0)} = -F \frac{k_{FU}}{1+k_{PH} k_G}. \quad (1.4)$$

Из приведенного выражения следует, что статическая ошибка от возмущающих факторов будет тем меньше, чем больше коэффициент усиления регулятора k_{PH} .

Если в качестве возмущения взять изменение тока нагрузки (ΔI) генератора, то статизм системы регулирования (s) определится следующим образом:

$$s = -\frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{k_{FU}}{1+k_{pH}k_r}, \quad (1.5)$$

т.е. статизм так же будет уменьшаться с ростом коэффициента усиления регулятора напряжения.

Для оценки влияния k_{pH} на быстродействие системы регулирования воспользуемся первым слагаемым уравнения (1.2)

$$U = U_3 \frac{W_p(p)}{1+W_p(p)} = U_3 \frac{\frac{k_{pH}k_r}{T_r p + 1}}{1 + \frac{k_{pH}k_r}{T_r p + 1}} = U_3 \frac{k_{pH}k_r}{1+T_r p + k_{pH}k_r} \approx U_3 \frac{1}{1 + \frac{T_r}{k_{pH}k_r} p} = U_3 \frac{1}{1+T' p}. \quad (1.6)$$

Так как $k_{pH}k_r \gg 1$, то $\frac{1}{k_{pH}k_r} \approx 0$. Выражение (1.6) представляет собой аperiodическое звено с постоянной времени $T' = \frac{T_r}{k_{pH}k_r}$. Если подать на вход аperiodического звена единичную функцию, то сигнал на выходе будет нарастать с постоянной времени T' звена. Чем больше усиление регулятора, тем меньше эквивалентная постоянная T' и тем быстрее будет обрабатываться входное воздействие.

Однако увеличение усиления регулятора приводит, как правило, к нарушению устойчивости системы регулирования. С целью устранения этого противоречия в закон регулирования вводятся сигналы пропорциональные производным тока генератора или возбудителя. Кроме того, поскольку источник, питающий регулятор напряжения, имеет ограничения по мощности и величине напряжения, сигнал, который выдает ИУ на обмотку возбуждения, будет иметь ограничения по напряжению. Поэтому реальная схема регулирования включает нелинейность, рис.1.5. Все эти факторы усложняют процесс регулирования напряжения.

Как следует из выражения (1.3) ошибка регулирования зависит не только от знаменателя, но и от числителя. Величину $FW_{FU}(p)$ изменить невозможно – она определяется характеристиками генератора, но если числитель представить в виде: $FW_{FU}(p) \pm FW_{FPH}(p)$, то его величина может меняться в необходимых пределах за счет второго слагаемого. Здесь $FW_{FPH}(p)$ компенсирующий возмущение сигнал, $W_{FPH}(p)$ - передаточная функция по возмущению для компенсирующего сигнала. Схема формирования компенсационного сигнала показана на рис. 1.5 пунктиром.

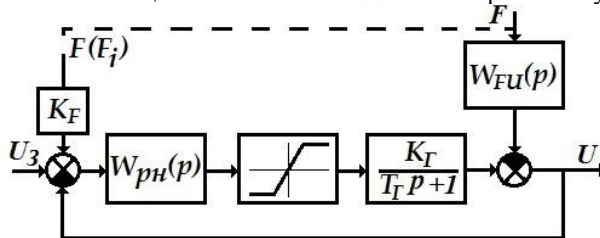


Рис. 1.5. Структурная схема регулирования напряжения с учетом ограничений ИУ

На рисунке K_F – элемент, преобразующий сигнал возмущения по величине и, при необходимости, по форме (сигнал тока преобразуется в пропорциональный ему сигнал напряжения, чтобы обеспечить работу сравнивающего устройства).

Такой способ регулирования называют компенсационным, или регулированием по возмущению. В соответствии с выражением (1.5) статизм системы с компенсационным регулированием

$$s = -\frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{k_{FU} \pm k_{FRH}}{1 + k_{PH} k_{\Gamma}}, \quad (1.7)$$

где k_{FRH} – результирующий коэффициент передачи компенсационного сигнала. Если обеспечить условие $k_{FU} - k_{FRH} = 0$, то регулятор обеспечивает астатическое регулирование. Регуляторы, использующие только сигналы по возмущающему воздействию, не обладают высокой точностью, поэтому для регулирования напряжения используется регулирование по отклонению (рис. 1.4) или регуляторы комбинированного типа, рис. 1.5.

Влияние частоты вращения и нагрузки генератора на устойчивость системы регулирования. Систему регулирования напряжения можно представить в виде замкнутой системы автоматического регулирования, рис. 1.6,а). Здесь $W_{\Gamma}(p)$ передаточная функция генератора, $W_{PH}(p)$ – передаточная функция регулятора напряжения, U_{Γ} – напряжение генератора, $I_{\text{в}}$ – ток возбуждения. Регулятор измеряет напряжение генератора и управляет его током возбуждения.

Передаточная функция РН, в отличие от генератора, не зависит от частоты вращения. На рис.16,б) показаны две нагрузочные характеристики генератора, построенные для двух частот вращения $n1$ и $n2$, причем $n2 > n1$.

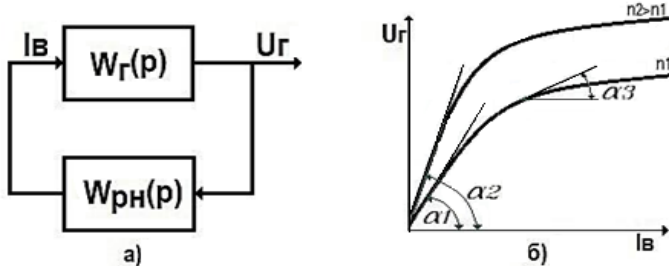


Рис. 1.6. Структурная схема регулирования напряжения (а), нагрузочная характеристика генератора (б).

Из характеристики генератора следует, что передаточная функция генератора равна $\tan \alpha$:

$$\frac{dU_{\Gamma}}{dI_{\text{в}}} = \tan \alpha.$$

Из рис. 16,б) видно, что с ростом частоты вращения генератора растет его коэффициент передачи. Из теории автоматического регулирования известно, что в замкнутой системе с ростом коэффициентов усиления её

передаточных звеньев устойчивость системы снижается. Таким образом, повышение частоты вращения генератора ухудшает устойчивость системы регулирования напряжения.

При больших нагрузках генератора растет ток возбуждения и происходит насыщение его магнитной цепи. Это, в свою очередь, снижает коэффициент усиления генератора (α_3 , рис. 1.6, б)) и увеличивает устойчивость системы регулирования. Таким образом, наилучшим режимом работы системы регулирования напряжения с позиции запаса устойчивости, является работа генератора с максимальной частотой вращения и нагрузкой близкой к холостому ходу.

В современных системах переменной частоты с ростом частоты растет не только ЭДС генератора, но и его внутренние сопротивления, а, следовательно, параметры качества электроэнергии, заданные на номинальной частоте 400Гц, оказываются значительно худшими при работе на высокой частоте. К таким параметрам качества, критичным к частоте, являются:

- переходные отклонения напряжения при коммутациях нагрузки и при срабатывании сетевой защиты при к.з. за автоматами защиты. Переходные отклонения увеличиваются не только вследствие роста э.д.с. генератора и внутреннего сопротивления генератора, но и вследствие роста максимального тока возбуждения возбудителя из-за роста напряжения на подвозбудителе генератора, поскольку тот представляет собой магнитоэлектрический генератор;

- небаланс напряжения в системе, являющийся следствием несимметрии нагрузок по фазам – величина небаланса пропорциональна росту частоты напряжения генератора;

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 введения 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 к.з. на минимально допустимом уровне, например, на уровне 3-х кратного тока к.з. или другой величины, достаточной для обеспечения селективной работы сетевой защиты.

2. Задание к работе

- 1) Изучить теорию процессов регулирования напряжения генераторов.
- 2) Изучить моделирование в MatLab системы регулирования напряжения.
- 3) Провести исследования непрерывного РН и снять осциллограммы.
- 4) Определить статическую ошибку для различных режимов.
- 5) Оценить влияние частоты вращения на запас устойчивости системы регулирования напряжения.

3. Описание модели

Схема модели регулятора приведена на рис.1.7. Моделирование ведется в среде Simulink, являющейся дополнением пакета MatLab.

Модель рис.1.7 включает в свой состав: двухкаскадный генератор (генератор, возбудитель), задатчик угловой скорости генератора (ω), модуль ограничения напряжения на обмотке подвозбудителя (saturation), элементы РН (Gain1, Gain, уставка регулятора, derivative (дифференциатор), сумматор), нагрузку генератора (Signal Builder), осциллограф (Scope).

Генератор и возбудитель моделируются аperiodическими звеньями с постоянными времени, соответственно, 0.02с и 0.005с. С целью обеспечения устойчивости решения дифференциальных уравнений модели, вводится замедленный масштаб времени 10:1, для чего все постоянные времени увеличены в 10 раз.

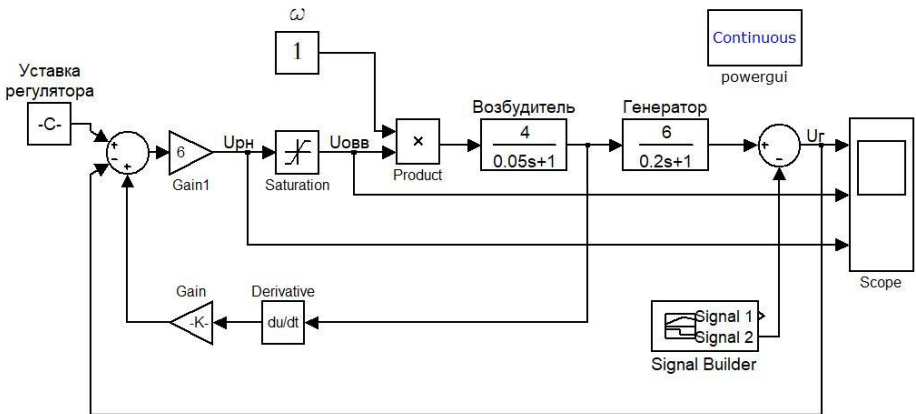


Рис. 1. 7. Модель непрерывного регулятора.

Частота вращения генератора ω задается константой в относительных единицах, единице соответствует номинальная угловая скорость.

РН представляет собой пропорционально-дифференцирующее звено. Модуль Gain1 задает коэффициент усиления регулятора, а Gain - глубину обратной связи по первой производной тока возбуждения (напряжения) возбудителя. Уставка регулятора установлена на напряжение 118В.

Нагрузка генератора управляется блоком Signal Builder: возбуждение генератора проводится в режиме холостого хода, нагрузка включается на 0,6 секунде и отключается на 1,2 секунде. Время моделирования 2 секунды.

Для формирования оптимального регулирования вводится производная по выходному сигналу (на рисунке 1.7 она не показана), что обеспечивает минимальное время переходных процессов. Следует сказать, что в реальной системе сформировать производную по выходному напряжению генератора затруднительно, так как в системе постоянно присутствует коммутация нагрузок.

Сигнал U_{PH} представляет собой, умноженную на коэффициент усиления регулятора, алгебраическую сумму сигналов уставки, напряжения генератора U_r и производной. Поскольку мощность выходного каскада РН всегда ограничена, то напряжение на обмотке возбуждения возбудителя (ОВВ) также ограничено. Напряжение на обмотке возбуждения возбудителя ($U_{ВВ}$) ограничено в пределах:

$$U_{ВВ} = \begin{cases} 30В, & \text{если } U_{PH} > 30В \\ 0В, & \text{если } U_{PH} \leq 0В \end{cases} .$$

В регуляторе РНТ115 (блок БРЗУ115) конструктивно обеспечена возможность реверсирования полярности выходного сигнала РН, что повышает быстродействие и уменьшает перерегулирование. Напряжение на ОВВ в этом случае

$$U_{ВВ} = \begin{cases} 30В, & \text{если } U_{PH} > 30В \\ U_{PH} & \\ -30В, & \text{если } U_{PH} \leq -30В \end{cases} .$$

Для того чтобы изменить параметры любого блока необходимо дважды нажать на него левой кнопкой мыши (ЛКМ), в открывшемся окне сделать необходимые изменения и запомнить их кнопками Apply или ОК.

Верхнее и нижнее значения ограничений на обмотке ОВВ задаются в блоке Saturation, соответственно, в строках Upper limit и lower limit, рис. 1.8.

Статическая ошибка регулирования определяется как разница между уставкой регулятора и установившимся значением напряжения генератора, определяется по осциллограммам.

На рис. 1.9 приведены осциллограммы переходных процессов U_r , $U_{овв}$, U_{PH} при номинальной частоте вращения генератора, включенном сигнале гибкой обратной связи и ограничениях напряжения на обмотке возбуждения возбудителя $0 \div 30В$.

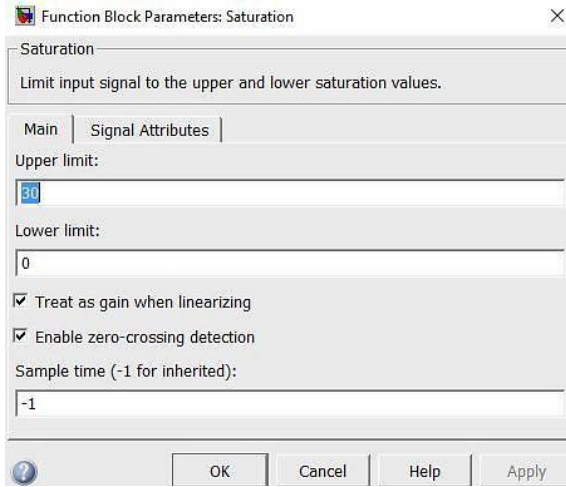
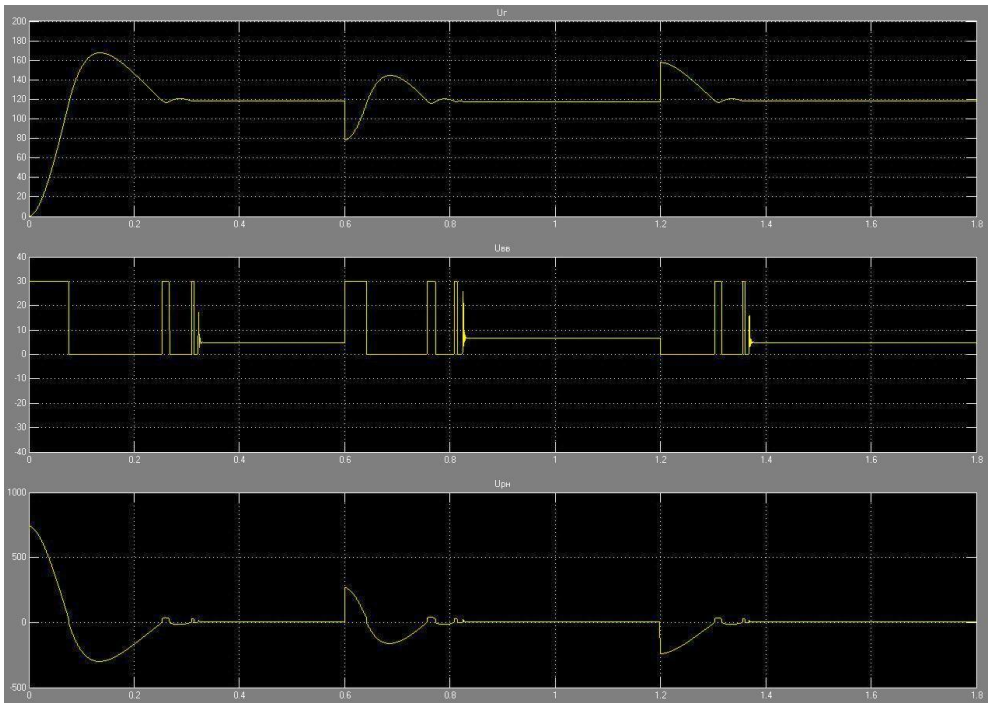


Рис. 1.8. Окно блока Saturation

Рис. 1.9. Осциллограммы переходных процессов U_{ϕ} , $U_{овв}$, $U_{рн}$ при ограничениях напряжения на обмотке возбуждения возбудителя 0-30В.

4. Порядок проведения работы

Время моделирования для всех опытов постоянно и равно 2с. 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_A.mdl**.

4.1. *Переходные процессы при отсутствии сигнала гибкой обратной связи.* Установить: ограничения $U_{овв}=0\div 30В$, $\omega=1$, коэффициент усиления регулятора 6, коэффициент передачи производной 0. Запустить моделирование и снять осциллограммы $U_{г}$, $U_{овв}$, $U_{рн}$. Определить статическую ошибку для моментов времени 1,2с, 2,0с.

4.2. *Переходные процессы при наличии сигнала гибкой обратной связи.* Установить: ограничения $U_{овв}=0\div 30В$, $\omega=1$, коэффициент усиления регулятора 6, коэффициент передачи производной 0.00207. Запустить моделирование и снять осциллограммы $U_{г}$, $U_{овв}$, $U_{рн}$. Определить статическую ошибку для моментов времени 1,2с, 2,0с.

4.3. *Переходные процессы при наличии сигнала гибкой обратной связи и повышенной частоте вращения.* Установить: ограничения $U_{овв}=0\div 30В$, $\omega=2$, коэффициент усиления регулятора 6, коэффициент передачи производной 0.00207. Запустить моделирование и снять осциллограммы $U_{г}$, $U_{овв}$, $U_{рн}$. Оценить изменение запаса устойчивости системы регулирования.

4.4. *Определение статической ошибки регулирования при повышенной частоте вращения генератора.* Установить: ограничения $U_{овв}=0\div 30В$, $\omega=2$, коэффициент усиления регулятора 6, коэффициент передачи производной 0. Запустить моделирование и снять осциллограмму $U_{г}$ и определить статическую ошибку для моментов времени 1,2с, 2,0с.

Повторить опыт для коэффициента усиления регулятора 3 и двух значений ω : $\omega = 2, \omega = 1$. По результатам п. 4.1, 4.2, 4.4 сделать заключение о влиянии на статическую ошибку частоты вращения генератора, коэффициента усиления регулятора, наличия или отсутствия сигнала гибкой обратной связи.

4.5. *Переходные процессы при наличии сигнала гибкой обратной связи и наличии реверса РН.* Установить: ограничения $U_{овв}=-30\div 30В$, $\omega=1$, коэффициент усиления регулятора 6, коэффициент передачи производной 0.00207. Запустить моделирование и снять осциллограммы $U_{г}$, $U_{овв}$, $U_{рн}$. Сделать заключение о качестве переходного процесса.

4.6. *Переходные процессы при наличии сигнала гибкой обратной связи по напряжению генератора.* Отключить вход дифференциатора от напряжения возбудителя и подключить его на напряжение генератора.

Установить: ограничения $U_{овв}=0\div 30В$, $\omega=1$, коэффициент усиления регулятора 6, коэффициент передачи производной -0.018 . Запустить моделирование и снять осциллограммы $U_{г}$, $U_{овв}$, $U_{рн}$. Определить статическую ошибку для моментов времени 1,2с, 2,0с. Дать заключение о качестве переходных процессов.

5. Содержание отчета

- 1) Цель работы, краткие теоретические сведения. Схема моделирования непрерывного регулятора напряжения.
- 2) Осциллограммы напряжений $U_{г}$, $U_{овв}$, $U_{рн}$ для опытов 4.1÷ 4.3, 4.5, 4.6. Значения величины статической ошибки для опытов 4.1, 4.2, 4.4, 4.6 и заключение о влиянии на статическую ошибку частоты вращения генератора, коэффициента усиления регулятора, наличия или отсутствия сигнала гибкой обратной связи.
- 3) Заключение о влиянии ОС на качество переходных процессов.
- 4) Заключение о влиянии частоты вращения на запас устойчивости системы регулирования напряжения.
- 5) Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы.

1. От каких факторов зависит статическая ошибка регулирования?
2. Что такое уставка регулятора?
3. Как классифицируются регуляторы напряжения?
4. Объясните метод фазоимпульсного регулирования.
5. Какой режим работы генератора обеспечивает наибольший запас устойчивости системы регулирования напряжения?
6. Что такое реверс в РН и в чем его достоинства?
- 7) Как зависит устойчивость системы регулирования напряжения от постоянных времени возбудителя, генератора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ. ИМПУЛЬСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Цель работы

1. Изучение структурных и принципиальных схем авиационных регуляторов напряжения.
2. Исследование режимов работы импульсных регуляторов напряжения.
3. Изучение моделирования регуляторов в среде Simulink пакета MatLab.

1. Схемы авиационных регуляторов напряжения

Угольные регуляторы напряжения. Длительное время в авиации применялись угольные РН. Они имеют относительно простую электромеханическую конструкцию, основными элементами которой являются: угольный столб, пружина и электромагнит. Принцип действия угольного РН заключается в изменении сопротивления угольного столба, включенного последовательно с обмоткой возбуждения, рис. 2.1, а). Регулятор состоит из следующих элементов: 1 – регулировочный винт; 2 – угольный столб; 3 – якорь электромагнита; 4 – пружина; 5 – электромагнит.

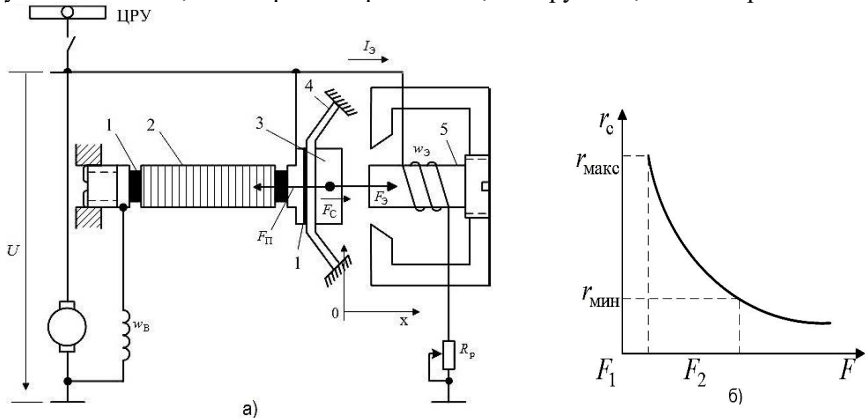


Рис. 2.1. Угольный регулятор (а) и зависимость сопротивления столба (б) от давления (F).

Угольный столб набирается из нескольких десятков тонких угольных шайб и сжат пружиной. Сопротивление столба складывается из сопротивления самих шайб, которое очень мало, и переходных сопротивлений между шайбами, которые зависят от площади их соприкосновения. При сжатии

столба, в пределах упругих деформаций, площадь соприкосновения шайб возрастает, а сопротивление столба падает, рис. 2.1, б). Кратность изменения сопротивлений столба ($r_{\max}/r_{\min} \approx 100$) может достигать очень больших значений.

Пружина сжимает угольный столб, а электромагнит, притягивая якорь 3, ослабляет силу давления на столб. Сила сжатия угольного столба обусловлена взаимодействием трех сил: силы сжатия пружины $F_{\text{п}}$, силы электромагнита $F_{\text{э}}$ и силы $F_{\text{с}}$ - реакции угольного столба. Схема спроектирована так, что при номинальном напряжении генератора сила тяги электромагнита $F_{\text{э}}$ уравнивается суммой механических сил ($F_{\text{м}} = F_{\text{п}} - F_{\text{с}}$). Настройка такого состояния обеспечивается регулировочным винтом (1) и установкой зазора между электромагнитом и якорем с помощью регулировки положения сердечника электромагнита.

Регулирование напряжения угольным регулятором осуществляется следующим образом. При отсутствии напряжения генератора угольный столб сжат пружинной (сжатие уравнивается только реакцией столба) и сопротивление его минимально. Следовательно, генератор возбуждается при минимальном сопротивлении цепи возбуждения. По мере увеличения напряжения генератора увеличивается ток в обмотке электромагнита ($I_{\text{э}}$). Электромагнитная сила также возрастает и, оказываясь больше противодействующей механической силы, вызывает перемещение якоря в направлении к сердечнику электромагнита. Электромагнитная сила при этом еще больше увеличивается. Давление якоря на угольный столб уменьшается, сопротивление его растет, ток возбуждения снижается и напряжение стремится к заданному значению, которое соответствует равновесию сил, действующих на якорь. Механическая сила $F_{\text{м}}$ при перемещении якоря к сердечнику также увеличивается, так как увеличивается упругая сила сжатия пружины $F_{\text{п}}$, а сила реакции угольного столба $F_{\text{с}}$ уменьшается.

Перемещение якоря закончится тогда, когда установится равновесие сил, действующих на якорь, т. е. $F_{\text{э}} = F_{\text{м}}$. Это произойдет при номинальном напряжении генератора.

Если, по каким либо причинам, напряжение генератора возросло (например, отключили нагрузку), то увеличится ток электромагнита, увеличится сила $F_{\text{э}}$ и якорь начнет перемещаться вправо, уменьшая зазор и увеличивая противодействующую силу пружины. При этом ослабевает давление на угольный столб, его сопротивление растет, ток возбуждения падает и напряжение генератора снижается, что в свою очередь уменьшает силу электромагнита. Процесс закончится когда вновь установится равновесие сил $F_{\text{э}} = F_{\text{м}}$. При включении нагрузки процессы будут протекать в обратном порядке.

С помощью выносного сопротивления $R_{\text{р}}$ можно в небольших пределах менять ток электромагнита, а, следовательно, подстраивать напряжение генератора.

На катушке электромагнита обычно размещаются дополнительные обмотки, на которые подают корректирующие сигналы, что позволяет формировать многофункциональный сигнал управления возбуждением. Например, вводится уравнивательная обмотка для выравнивания нагрузки генераторов при параллельной работе.

Недостатками угольных РН являются нарушение их настройки вследствие износа шайб угольного столба, изменение тяговой характеристики пружины. В этом случае угольные регуляторы могут перейти в неустойчивый режим работы – режим «хлопков», который может привести к разрушению угольных шайб. Кроме того, они имеют неоднозначность механических характеристик при перемещении якоря, обусловленных наличием гистерезиса пружины и угольного столба, а также изменением сил пружины и электромагнита при изменениях температуры окружающей среды.

На угольном сопротивлении может рассеиваться до четверти от максимальной мощности цепи возбуждения, что вызывает значительный нагрев РН. Угольный РН вносит запаздывания в процессы регулирования напряжения, так как обладает большой механической и электрической постоянными времени.

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

Функциональная схема регулятора показана на рис. 2.2, принципиальная – на рис. 2.3. Регулятор состоит из: измерительного устройства ИУ, фазосдвигающего устройства ФСУ, формирователей импульсов ФИ, усилителя мощности УМ, стабилизирующего контура СК, измерителя реактивной мощности ИРМ.

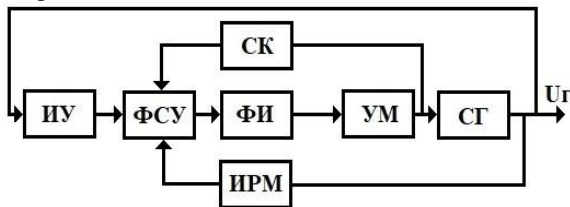


Рис. 2.2. Функциональная схема тиристорного регулятора напряжения

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

Регулирование напряжения СГ осуществляется воздействием на ток возбуждения возбудителя, путем фазового управления тиристорами в УМ.

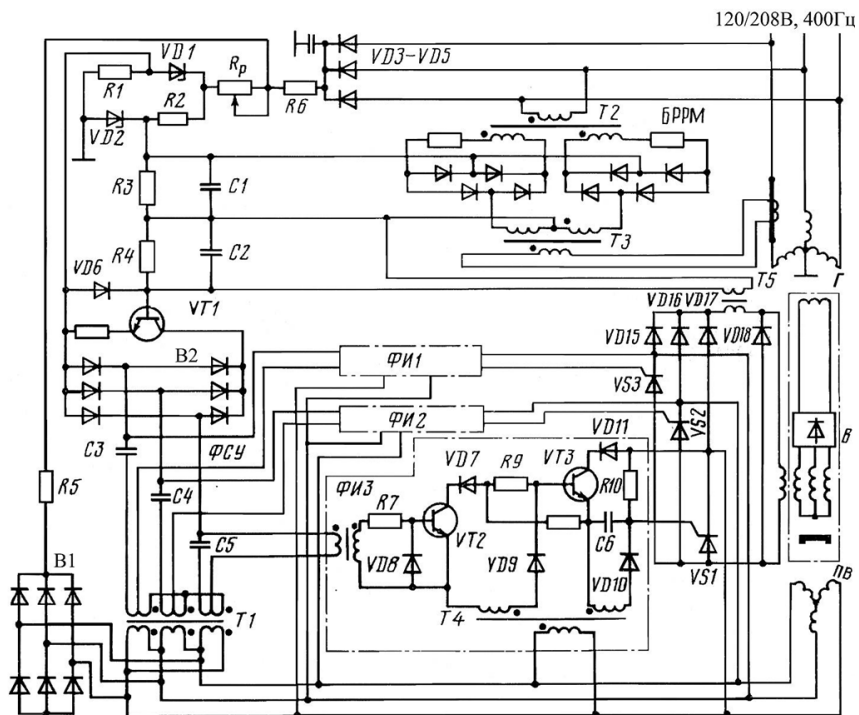


Рис. 2.3. Принципиальная электрическая схема тиристорного регулятора напряжения

Измерительное устройство регулятора выполнено по мостовой схеме с электрическим эталоном на стабилитронах VD1, VD2 и резисторах R1, R2. Выходная характеристика измерительного органа приведена на рис. 2.4.

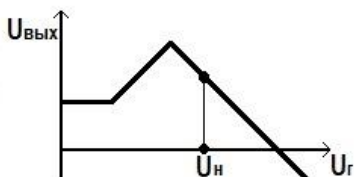


Рис. 2.4. выходная характеристика измерительного органа

Для обеспечения логики работы регулятора измерительное устройство имеет подпитку от подвозбудителя (ПВ) через резистор R5 и трехфазный выпрямитель B1. Наличие подпитки обеспечивает на выходе ИУ напряжение необходимое для первоначального возбуждения генератора. ИУ включено на 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. 2.4. Настраивают регулятор на заданное значение напряжения с помощью резистора R_p .

Сигнал с измерительного устройства поступает на ФСУ через резисторы R_3, R_4 . В регуляторе применено трехфазное ФСУ в состав которого входят: транзистор VT_1 , трехфазный выпрямитель B_2 ; конденсаторы C_3-C_5 ; трехфазный трансформатор T_1 . 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. 2.5, а).

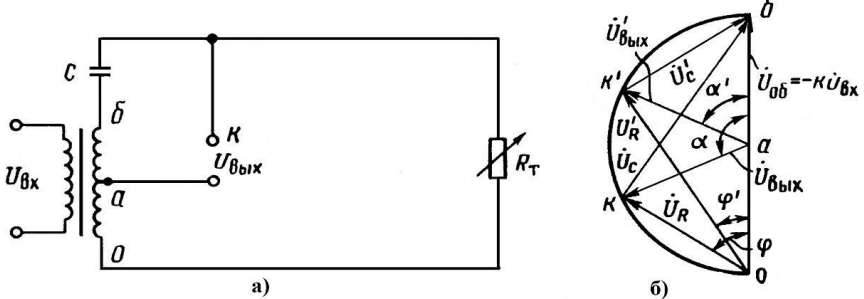


Рис. 2.5. Фазосдвигающее устройство: а) - принципиальная схема в однофазном исполнении; б) - векторная диаграмма ФСУ.

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 (\dot{U}_c) и сопротивлении (\dot{U}_R) равна напряжению $\dot{U}_{об}$, см. рис. 2.5,б. При этом вектор падения напряжения \dot{U}_R на активном сопротивлении R_T , будет совпадать с вектором тока в цепи, а вектор падения напряжения \dot{U}_c на реактивном (емкостном) сопротивлении X_c будет отставать от него на 90° . Геометрическим местом точек конца вектора $\dot{U}_{вых}$ является окружность с диаметром $\dot{U}_{об}$.

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 VT_1 .

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 тиристоров подаются с формирователя импульсов ФИ, состоящего из модулятора и формирующего устройства. Модулятор собран на составном транзисторе VT2 (см. рис. 2. 3). На вход модулятора (на базу транзистора) подается напряжение с одного из выходов фазосдвигающего устройства, а питание цепи коллектор-эмиттер осуществляется от трансформатора Т4, 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. 2.6).

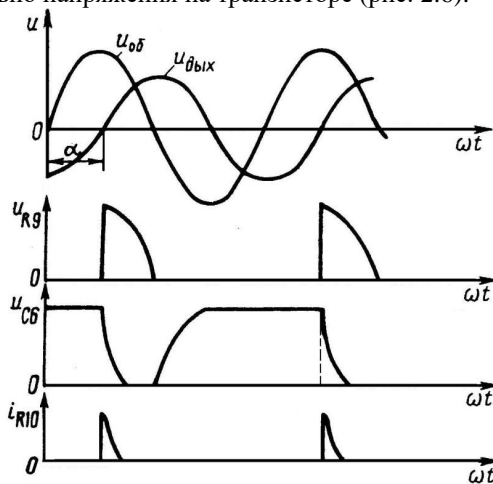


Рис. 2.6. Изменения напряжения в модуляторе и формирующем устройстве.

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.2.3). В катодной группе приборов используют обычные вентили VD15, VD16 и VD17, а в анодной - тиристоры VS1, VS2 и VS3.

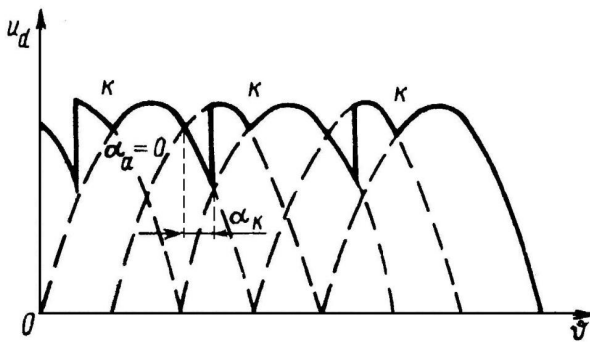


Рис. 2.7. Коммутация вентилях при фазовом управлении тиристорами

Коммутация вентилях происходит в моменты их естественного отпирания, которые соответствуют точкам **К** (рис. 2.7) с углом отпирания $\alpha_a=0$ (отсчет углов ведется от точки естественного отпирания вентиля). Тиристоры коммутуются 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 $\alpha_k = 180^0$ напряжение на выходе мостовой схемы $U_0 = 0$.

Диод VD18 (см. рис. 2.3), 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 VS1 - 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. 2.8.

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.

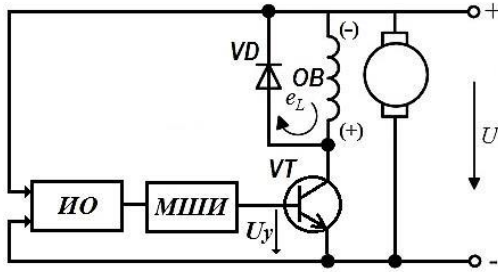


Рис. 2. 8. Принципиальная схема транзисторного регулятора

При работе в ключевом режиме на транзистор подаются сигналы управления U_y в виде прямоугольных импульсов, рис. 2.9. 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 спадать. В итоге ток i_B будет пульсировать около среднего значения, величина которого зависит от соотношения времени открытого (t_o) и закрытого (t_3) состояния транзистора – коэффициента заполнения импульсов k_3 .

$$k_3 = \frac{t_o}{t_o + t_3} = \frac{t_o}{T},$$

где T – период следования импульсов.

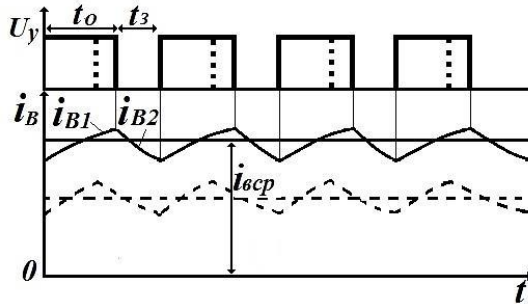


Рис. 2.9. Сигналы транзисторного регулятора

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

На рис. 2.9 пунктиром показан вариант сигналов транзисторного регулятора, когда регулятор уменьшает ток возбуждения генератора.

Оценим энергетические характеристики ключевого регулирования для генератора с максимальным током возбуждения $i_{B\max} = 20\text{A}$. Максимальная рассеиваемая мощность на транзисторе, без учета потерь на коммутацию,

которые при низкой частоте следования импульсов малы, составит: $P_T = \Delta U * i_{B\text{макс}}$, где ΔU - падение напряжения на транзисторе в открытом состоянии. Обычно $\Delta U \approx 1\text{В}$, тогда для ранее приведенных характеристик генератора, $P_T = 1 * 20 = 20\text{Вт}$. В реальном режиме работы ТРН $k_3 < 1$ и рассеиваемая мощность будет еще меньше.

Для выявления основных свойств импульсного метода управления рассмотрим квазистационарные процессы, при условии, что транзистор эквивалентен идеальному ключу. Для интервала t_0 (рис. 2.9), в течение которого обмотка возбуждения подключена к источнику питания, баланс напряжений и ЭДС определяется уравнением

$$U = r_B i_{B1} + L_B \frac{di_{B1}}{dt}, \quad (2.1)$$

где r_B - сопротивление обмотки возбуждения; L_B - индуктивность обмотки возбуждения.

Для интервала t_3 , в течение которого транзистор закрыт, и при условии, что $i_{B2} > 0$, справедливо уравнение

$$r_B i_{B2} + L_B \frac{di_{B2}}{dt} = 0. \quad (2.2)$$

Среднее значение тока возбуждения за период $T = t_0 + t_3$ можно получить, интегрируя уравнения (2.1) и (2.2):

$$i_{\text{вср}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_0} i_{B1} dt + \int_{t_0}^{t_0+t_3} i_{B2} dt \right] = \frac{U t_0}{T r_B} = \frac{U}{r_B} k_3, \quad (2.3)$$

так как $i_{B1}(0) = i_{B2}(t_0 + t_3)$.

Таким образом, регулировать напряжение можно, изменяя среднее значение тока возбуждения, воздействуя на коэффициент заполнения k_3 .

В момент запираания транзистора в ОБ возникает ЭДС самоиндукции e_L , полярность, которой показана на рис.2.8 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 $\approx 1 \div 2\text{В}$. 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. 2.9, 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 $5 \div 10\text{кГц}$, частота переключений ограничивается ростом коммутационных потерь в транзисторе.

На рис. 2.10 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.

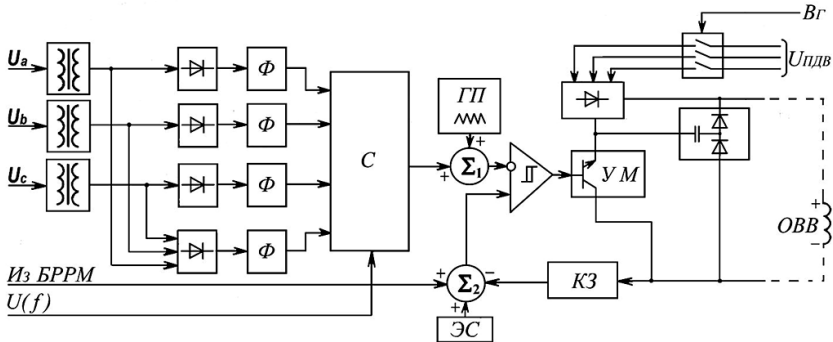


Рис. 2.10. Транзисторный регулятор напряжения: Ф - Фильтр; С - схема выделения наибольшего напряжения; ГП - генератор пилообразного напряжения; ЭС - эталонный сигнал; УМ - усилитель мощности; КЗ - корректирующее звено.

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. 2.11. Это сигнал сравнивается на триггере Шмидта с опорным напряжением (2).

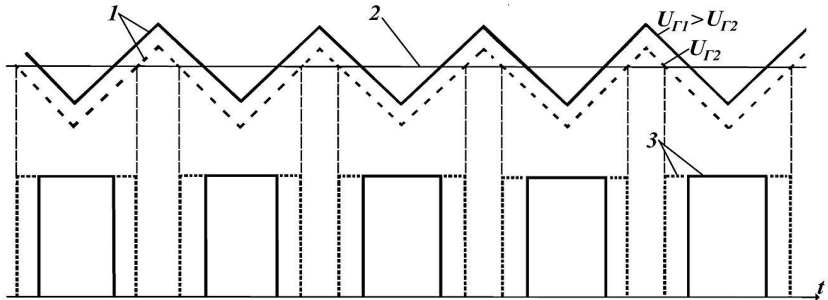


Рис. 2.11. Диаграмма работы регулятора напряжения: 1 - сумма U_G и «пилы»; 2-опорное напряжение, 3-выход триггера Шмидта.

Опорное напряжение представляет собой сумму трех сигналов: собственно эталонного сигнала, сигнала с БРПМ (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.

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. 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.

Дальнейшее совершенствование транзисторных РН направлено на повышение их надежности, использованию цифровых систем управления, расширение функциональных возможностей.

Релейный регулятор. В релейном регуляторе напряжение на обмотке возбуждения ($U_{ов}$) меняется скачкообразно в зависимости от величины напряжения генератора по следующему алгоритму:

$$U_{ов} = \begin{cases} U_{п}, & U_{Г} < U_{пор1} \\ 0, & U_{Г} \geq U_{пор2} \end{cases}.$$

Здесь $U_{п}$ - напряжение питания обмотки возбуждения, это может быть напряжение подвозбудителя, или напряжение самого генератора ($U_{Г}$). $U_{пор1}$, $U_{пор2}$ - напряжения переключения измерительного органа регулятора. В системе с релейным регулятором возникают автоколебания напряжения генератора, частота которых обратно пропорциональна результирующей постоянной времени генератора напряжения, а амплитуда автоколебаний зависит от величины зоны нечувствительности измерительного органа $\Delta U_{нио}$, $\Delta U_{нио} = U_{пор2} - U_{пор1}$. Для улучшения качества переходных процессов в релейном РН могут вводиться сигналы гибкой обратной связи.

2. 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.
- 6) Провести исследования релейного регулятора напряжения и снять осциллограммы.

3. Описание моделей

Широтно-импульсный регулятор. Схема модели регулятора приведена на рис.2.12. Модель рис. 2.12 включает в свой состав: двухкаскадный генератор (генератор, возбудитель), задатчик угловой скорости генератора (ω), нагрузку генератора (Signal Builder), широтно-импульсный РН, 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. 2.10, 2.11. Сигнал стандартного генератора «пилю» (USG, блок Signal Generator) двухполярный и для формирования однополярного сигнала ($U_{п}$) используется сумматор Sum2 и константа 3, равная амплитуде USG. Сумматор Sum4 суммирует «пилю» и напряжение генератора, подобно сумматору 1 на рис. 2.10, а функцию сумматора 2 регулятора БРЗУ выполняет сумматор Sum3.

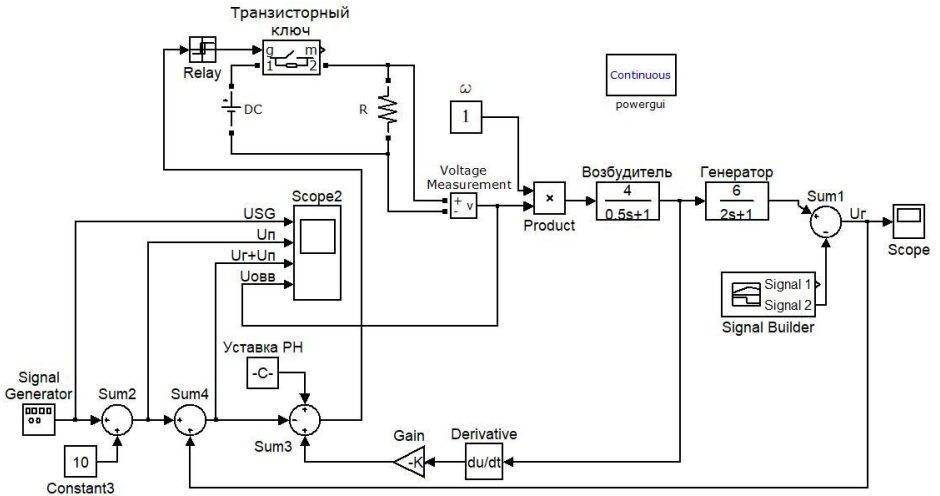


Рис. 2.12. Схема моделирования широтно-импульсного регулятора.

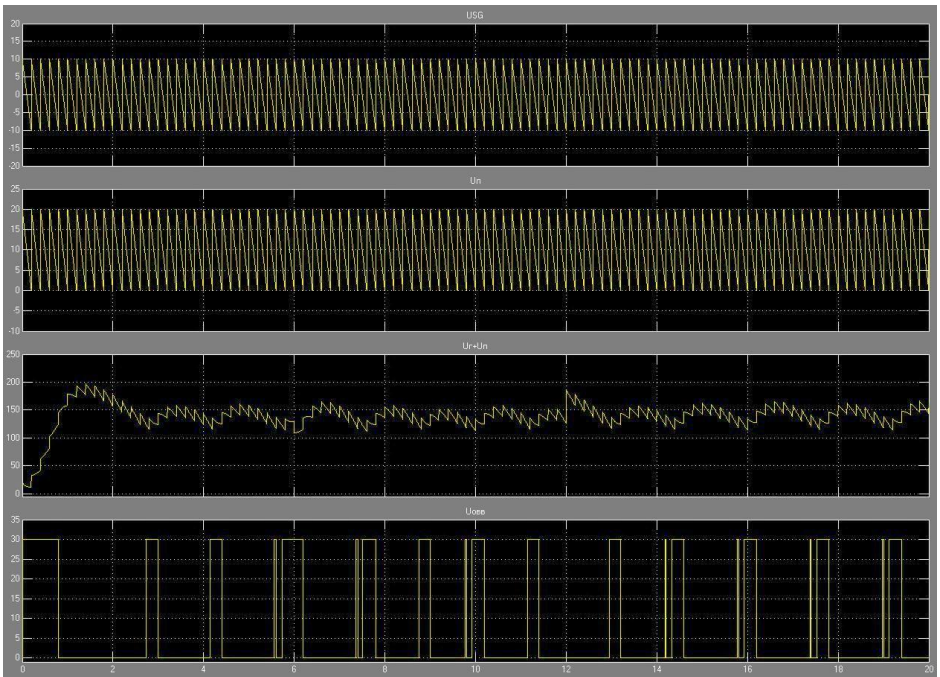


Рис. 2.13. Осциллограммы формирования широтно-импульсного сигнала

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. 2.13

В качестве триггера Шмидта используется элемент Relay с зоной нечувствительности 0.01В. 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.

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

Релейный регулятор. Схема модели релейного регулятора приведена на рис.2.14.

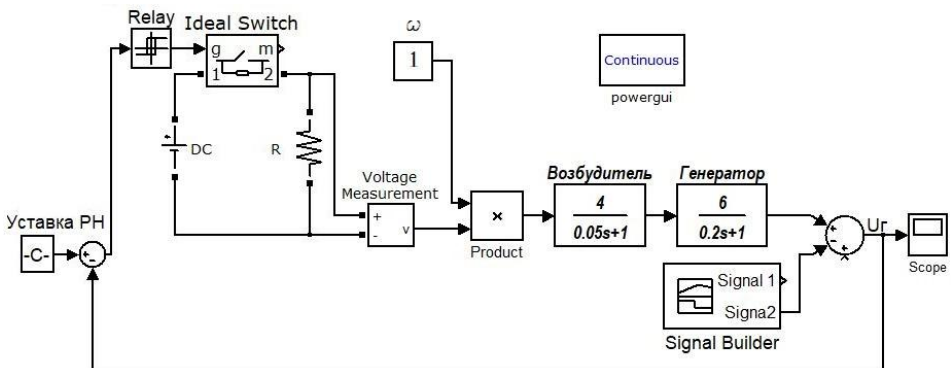


Рис. 2. 14. Схема модели релейного регулятора напряжения

Модель рис. 2.14 включает в свой состав: двухкаскадный генератор (генератор, возбудитель), задатчик угловой скорости генератора (ω), нагрузку генератора (Signal Builder), релейный регулятор РН (уставка регулятора, сумматор, релейный элемент –Relay, транзисторный ключ), осциллограф (Scope), преобразователь напряжения (Voltage Measurement). С помощью элемента Relay задается зона нечувствительности измерительного органа регулятора.

Для питания обмотки возбуждения возбудителя используется источник постоянного тока с напряжением 30В. Данный источник моделирует подвозбудитель авиационного бесконтактного генератора.

Генератор аналогичен генератору модели широтно-импульсного регулятора РН. В модели используется масштаб времени 10:1.

Блок Voltage Measurement осуществляет преобразование сигналов из SPS модели в S модель. Внешний вид переходных процессов показан на рис.2. 15.



Рис. 2.15. Переходные процессы в релейном регуляторе при включении возбуждения, набросе и сбросе нагрузки

Характеристики релейного регулятора зависят от результирующей постоянной объекта регулирования – генератора. Для авиационного

трехкаскадного генератора результирующая постоянная времени ($T_{вр}$) возбуждения приближенно равна

$$T_{вр} \approx T_{в} + T_{г},$$

Где: $T_{в}$ - постоянная времени возбудителя;

$T_{г}$ – постоянная времени генератора.

Амплитуда пульсаций напряжения генератора определяется как разность между наибольшим и наименьшим мгновенными значениями напряжений генератора в установившемся режиме холостого хода. Мгновенные значения напряжения измеряются по осциллограмме.

Для определения частоты пульсации напряжения генератора измеряют период пульсаций в установившемся режиме холостого хода по осциллограмме напряжения.

4. Порядок проведения работы

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

4.1. *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 $U_{г}$, USG , $U_{п}$, $U_{г+U_{п}}$, $U_{овв}$. По осциллограмме определить статическую ошибку для моментов времени 12с, 20с.

4.2. *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 $U_{г}$. Определить статическую ошибку для моментов времени 12с, 20с.

4.3. *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 $U_{г}$.

4.4. *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 $U_{г}$. Определить размах пульсации установившегося напряжения.

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

Дать заключение о влиянии частоты ШИМ на модуляцию напряжения генератора.

Релейный регулятор. Время моделирования для всех опытов постоянно и равно 2с. 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_RELAY.mdl**.

4.5. *Исследование влияния зоны нечувствительности измерительного органа релейного регулятора на амплитуду пульсаций напряжения генератора.* Установить: $T_b=0.05с$, $T_r=0.2с$, $\omega=1$, напряжение источника DC 30 В, $R=300\Omega$. Задавая $\Delta U_{\text{нио}}$ от 0.01 В до 0.25 В с шагом 0.05 В, снять осциллограммы переходных процессов и определить амплитуды пульсаций. Построить зависимость амплитуды пульсаций напряжения генератора (ΔU_r) от зоны нечувствительности $\Delta U_{\text{нио}}$.

Примечание. Для задания $\Delta U_{\text{нио}}$ открыть блок Relay, рис. 2.16.

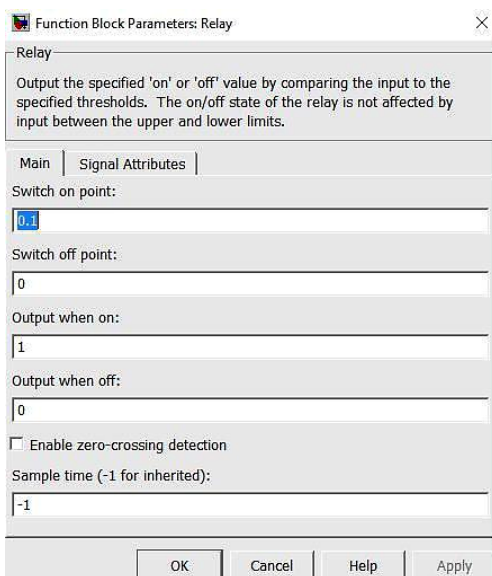


Рис.2.16. Окно блока Relay.

Установить параметры блока как показано на рис. 2. 16. Значения $\Delta U_{\text{нио}}$ задавать в строке «Switch on point».

4.6. *Исследование влияния результирующей постоянной времени возбуждения генератора на частоту пульсаций напряжения генератора.* Установить: $T_b=0.05с$, $\omega=1$, напряжение источника DC 30 В, $R=300\Omega$. Задавая T_r от 0.05с до 0.45с с шагом 0.1с, снять осциллограммы переходных процессов и определить частоты пульсаций. Построить зависимость частоты пульсаций

напряжения генератора от величины результирующей постоянной времени $T_{вр}$.

4.7. Снять переходные процессы при номинальных параметрах системы.

Установить: $T_{в}=0.05с$, $T_{г}=0.2с.$, $\omega=1$, напряжение источника DC 30 В, $R=300\text{Ом}$, $\Delta U_{нио} = 0.1$. Снять осциллограмму переходных процессов.

5. Содержание отчета

- 1) Цель работы, краткие теоретические сведения. Схемы моделирования регуляторов напряжения.
- 2) Осциллограммы напряжений $U_{г}$, U_{SG} , $U_{п}$, $U_{г+U_{п}}$, $U_{овв}$ для опыта 4.1 и 4.4 для частоты 5Гц.
- 3) Осциллограммы напряжения $U_{г}$ для опыта 4.2, 4.3.
- 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.
- 7) График зависимости $\Delta U_{г}=f(\Delta U_{нио})$.
- 8) График зависимости частоты колебаний от результирующей постоянной времени генератора (п. 4.6).
- 9) Осциллограмма переходных процессов (п.4.7)
- 10) Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы.

1. Назовите недостатки угольных регуляторов напряжения.
2. Как изменится напряжение генератора при обрыве обмотки угольного регулятора напряжения?
3. Как можно подстраивать напряжение в тиристорном регуляторе?
4. Объясните метод фазоимпульсного регулирования.
5. Какой режим работы генератора обеспечивает наибольший запас устойчивости системы регулирования напряжения?
- 6) Почему в транзисторных РН используется ключевой режим работы транзистора?
- 7) Как зависит устойчивость системы регулирования напряжения от постоянных времени возбудителя, генератора?

Литература

1. Системы электроснабжения воздушных судов/ под ред. Халютин С.П.-М.: ВУНЦ ВВС, 2010.
2. Синдеев И.М. Савелов А.А. Системы электроснабжения воздушных судов. - М.: Транспорт, 1990.

3. ГОСТ Р54073-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.
4. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink.- М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008, 288с.
5. Сергей Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. Корона –Принт.: СПб.: Питер , 2010.
6. Сергей Герман-Галкин Георгий Кордонов. Электрические машины. Лабораторные работы на ПК. Корона –Принт; СПб.: Питер , 2010.

Содержание

1. Лабораторная работа №1. Изучение и исследование систем регулирования напряжения авиационных генераторов. Непрерывные регуляторы.....3
2. Лабораторная работа №2. Изучение и исследование схем регуляторов напряжения авиационных генераторов. Импульсные регуляторы.....17