

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

С. В. МРЫКИН

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САМОЛЁТОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по специальности 24.05.07 Самолётостроение

САМАРА
Издательство Самарского университета
2023

УДК 629.7.064.5:621.3(075)

ББК О53я7+32я7

М889

Рецензенты: канд. техн. наук, доцент А. Ю. Л а в р о в;

директор СФ ПАО «Туполев» - КБ,

заместитель главного конструктора А. А. М а р к о в

Мрыкин, Сергей Викторович

М 889 Системы электроснабжения самолётов: учебное пособие /
С.В. Мрыкин. - Самара: Издательство Самарского универ-
ситета, 2023. - 64 с. : ил.

ISBN 978-5-7883-1908-7

В учебном пособии изложены состав, структура и основные признаки классификации систем электроснабжения самолётов, основные требования к качеству электрической энергии. Приведены рекомендации по компоновке систем электроснабжения на самолёте, основные сведения о принципах действия и областях применения генераторов и электроприводов, их условные обозначения на принципиальных электрических схемах.

Пособие рекомендуется изучающим дисциплину «Системы приборного оборудования самолётов». Может быть полезно обучающимся по программам бакалавриата и магистратуры.

Подготовлено на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов.

УДК 629.7.064.5:621.3(075)

ББК О53я7+32я7

ISBN 978-5-7883-1908-7

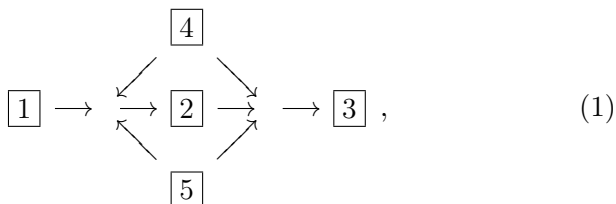
© Самарский университет, 2023

Содержание

1 Состав, структура и классификация систем электроснабжения	4
Вопросы для самоконтроля	6
2 Авиационные электрические генераторы	7
2.1 Генераторы переменного тока	7
2.2 Характеристики генераторов переменного тока . .	11
2.3 Генераторы постоянного тока	16
2.4 Характеристики генераторов постоянного тока . .	18
2.5 Параллельная работа генераторов	22
Вопросы для самоконтроля	24
3 Самолётные электрические сети	25
3.1 Классификация сетей	25
3.2 Компоновка сетей и электрооборудования на самолёте	28
4 Электроприводы самолётных агрегатов	30
4.1 Назначение, состав и структура электроприводов	30
4.2 Основы динамики электропривода	31
4.3 Авиационные электрические двигатели переменного тока	35
4.4 Авиационные электрические двигатели постоянного тока	41
Вопросы для самоконтроля	44
Библиографический список	45
Приложение 1. Приводы постоянных оборотов	46
Приложение 2. Характеристики переменного тока	61

1 Состав, структура и классификация систем электроснабжения

Структура системы электроснабжения самолёта показана на схеме (1).



где 1 означает источники питания, 2 — сеть передачи электроэнергии, 3 — потребителей, 4 — преобразователи электроэнергии, 5 — регуляторы и управляющие устройства.

В состав источников питания систем электроснабжения самолёта входят электрические генераторы постоянного и переменного тока, химические источники тока (аккумуляторы, топливные элементы), фотоэлектрические преобразователи.

В состав сети передачи входят: провода и электрожгуты; аппаратура коммутации, управления и защиты; распределительная аппаратура; контрольно-измерительные приборы; монтажное и установочное оборудование (кронштейны, разъёмы, коробки, шкафы, пульты и т.п.)

В состав потребителей входят: электродвигатели исполнительных механизмов, агрегатов и органов летательного аппарата (уборка и выпуск предкрылков, электромеханизмы триммерного эффекта, управления стабилизатором, электроприводы топливных насосов и т.п.); светотехническое оборудование; противообледенительная система; стартеры запуска двигателей и система зажигания; радиосвязное, радиолокационное и пилотажно-навигационное оборудование; бортовые вычислительные машины; электрические термометры, тахометры, топливомеры, радиокомпасы, авиагоризонты и т.п.

В состав преобразователей входят трансформаторы, выпрямители, электромашинные и статические преобразователи.

В состав регуляторов и управляющих устройств входят: регуляторы напряжения и частоты; устройства защиты генераторов; устройства автоматического переключения потребителей на резервные и аварийные источники питания при отказе основных.

Будем классифицировать системы электроснабжения по следующим признакам:

1. По роду тока системы электроснабжения подразделяются на две группы: постоянного и переменного тока.

2. По величине напряжения U системы электроснабжения подразделяются на три группы: низкого 27 В и 36 В, среднего 115 В и высокого 200 В.

3. По частоте f системы электроснабжения подразделяются на две группы: системы переменной частоты и системы постоянной частоты. В авиации наиболее широко применяются системы электроснабжения с $f = 400$ Гц.

4. По источнику энергии системы электроснабжения подразделяются на две группы:

4.1. Первичная система электроснабжения преобразует одну из неэлектрических разновидностей энергии в электрическую. Например, генератор преобразует механическую энергию, аккумулятор преобразует химическую энергию, термopара преобразует тепло и т.д.

4.2. Вторичная система электроснабжения преобразует электрическую энергию первичной системы в электрическую энергию другого рода тока, напряжения и частоты. Например, на самолёте Ту-154 первичная система электроснабжения вырабатывает переменный трёхфазный ток с напряжением 200 В и частотой 400 Гц, а вторичная — постоянный ток с напряжением 27 В и переменный трёхфазный ток с напряжением 36 В.

5. По питанию потребителей системы электроснабжения подразделяются на четыре группы:

5.1. Основная система обеспечивает питание потребителей в нормальных условиях полёта.

5.2. Резервная система обеспечивает питание потребителей в полёте при отказе основного агрегата. Различают облегченный резерв и резервирование замещением. Облегченный резерв

представляет собой один из работоспособных агрегатов основной системы, имеющий резерв мощности для подключения потребителей, которые питались от отказавшего агрегата основной системы, например генераторы первичной системы электроснабжения самолёта Ту-154. Резервирование замещением представляет собой дублирующий агрегат, который включается в работу только при отказе основного, например выпрямительные и трансформаторные устройства вторичной системы электроснабжения самолёта Ту-154.

5.3. Вспомогательная система обеспечивает питание потребителей в нормальных условиях на Земле при неработающих двигателях.

5.4. Аварийная система обеспечивает питание потребителей в полёте при отказе основной и резервной систем.

Вопросы для самоконтроля

1. Нарисуйте структуру системы электроснабжения.
2. Какие устройства являются источниками питания?
3. Какое оборудование входит в состав сети передачи электроэнергии?
4. Приведите примеры устройств из состава потребителей электроэнергии.
5. Какие устройства считаются преобразователями электроэнергии?
6. Какие устройства используются для регулирования и управления?
7. Перечислите признаки классификации систем электроснабжения.
8. Какие системы электроснабжения называют: первичными, вторичными, основными, резервными, аварийными, вспомогательными?

2 Авиационные электрические генераторы

2.1 Генераторы переменного тока

Наиболее широкое применение в авиационных системах переменного тока получили синхронные генераторы с мощностью от 7,5 кВА до 120 кВА и напряжением 200 В. Например: ГТ40, ГТ60, ГТ120, ТГС и др. Авиационные синхронные генераторы отличаются от генераторов общего применения повышенной частотой вращения, интенсивной системой охлаждения, большими электрическими и тепловыми нагрузками, меньшим сроком службы, меньшей массой, повышенным коэффициентом полезного действия. Основные требования к авиационным генераторам переменного тока формулируются в терминах точности стабилизации напряжения. Например, постоянная амплитуда и частота.

Принцип действия генератора основан на принудительном вращении рамки в магнитном поле. Источником механической энергии вращения ротора генератора является коробка приводов, расположенная на авиадвигателе или планере самолёта. Угловая скорость вращения выходного звена коробки приводов зависит от режима работы авиадвигателя. Частота переменного тока f вырабатываемого генератором:

$$f = \frac{p}{2\pi}\omega,$$

где ω — угловая скорость вращения ротора генератора; p — число пар полюсов. Следовательно, при изменении угловой скорости вращения ω изменится и частота переменного тока f .

Для обеспечения постоянной частоты переменного тока применяют приводы постоянных оборотов [2, 5, 6]. Наиболее широкое применение получили воздушно-турбинные и гидравлические приводы постоянной частоты вращения (см. прил. 1).

Напряжение на зажимах генератора:

$$U = E - I_{\text{H}}R,$$

где E — электродвижущая сила генератора; I_{H} — ток нагрузки; R — полное сопротивление внутренней цепи генератора.

ЭДС генератора переменного тока:

$$E = c\omega\Phi,$$

где c — постоянная, зависящая от конструкции генератора; ω — угловая скорость вращения ротора генератора; Φ — магнитный поток возбуждения.

Процесс создания магнитного потока Φ называется возбуждением генератора. По способу возбуждения различают синхронные генераторы переменного тока с самовозбуждением и с независимым возбуждением.

На рис. 1 показано условное обозначение синхронного трёхфазного генератора с самовозбуждением от постоянного магнита.

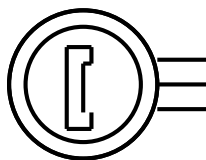


Рис. 1

Приняты следующие условные обозначения: внешняя окружность — статор, внутренняя окружность — ротор, П-образный многоугольник — магнит, отрезки прямых — выводы на контакты (зажимы) генератора.

Размещение условных обозначений отражает некоторые особенности конструкции генератора, позволяющие понять его работу. Так, на рис. 1 показано, что магнит находится внутри ротора, следовательно магнитное поле возбуждения генератора вращается вместе с ротором и индуцирует ток в обмотке статора, от которой показаны выводы на зажимы генератора.

Недостаток схемы возбуждения от постоянного магнита заключается в том, что индукция магнитного поля ограничена размерами и массой магнита, а значит ограничена и мощность генератора.

На рис. 2 показано условное обозначение генератора с самовозбуждением от собственной сети переменного тока через выпрямительное устройство.

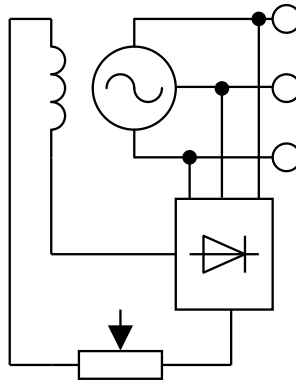


Рис. 2

Символ « \sim » внутри окружности — это общее обозначение переменного тока на электрической схеме. Катушка слева от генератора означает обмотку возбуждения. Диод внутри прямоугольника означает выпрямительное устройство¹. Ниже выпрямителя показан прямоугольник со стрелкой — переменное сопротивление, регулирующее ток возбуждения.

Недостаток схемы возбуждения на рис. 2 заключается в том, что регулятор напряжения необходимо оснащать механизмом возврата в исходное состояние с минимальным активным сопротивлением. В противном случае, в начале процесса самовозбуждения при малом напряжении генератора, когда регулятор напряжения ещё не начал работать, сопротивление в цепи возбуждения может оказаться больше критического и самовозбуждения не произойдёт.

¹В дальнейшем под выпрямительным устройством (выпрямителем) будем понимать устройство построенное именно на диодах, поскольку процесс преобразования переменного тока в постоянный может быть построен и на основе щётчного коллектора.

На рис. 3 показано условное обозначение синхронного генератора с независимым возбуждением от сети постоянного тока.

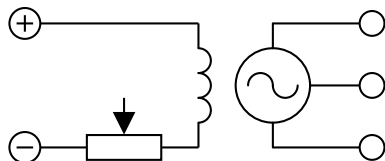


Рис. 3

Недостаток схемы, показанной на рис. 3 заключается в том, что регулирование напряжения генератора осуществляется изменением сопротивления в цепи возбуждения, которая питается от бортовой сети постоянного тока. Так как мощность сети постоянного тока велика, то и мощность регулятора должна быть большой, что приводит к увеличению массы регулятора.

На рис. 4 показано условное обозначение синхронного генератора с независимым возбуждением от возбудителя.

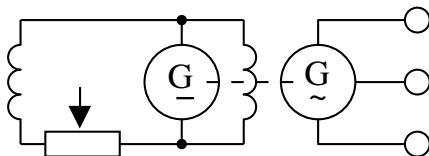


Рис. 4

Символ «-» внутри окружности — это общее обозначение постоянного тока на электрической схеме, G — буквенный код генератора. Возбудителем является генератор постоянного тока, размещённый на роторе синхронного генератора (вал ротора показан пунктирной линией).

В настоящее время предпочтительно, с точки зрения надёжности, использовать в качестве генератора постоянного тока связку из генератора переменного тока и выпрямителя. Наличие выпрямителя значительно улучшает характеристики надёжности

генератора вследствие бесконтактного возбуждения. Щёточный контакт в электрических генераторах всегда снижает их надёжность, особенно на больших высотах при низком атмосферном давлении и низкой температуре.

Чаще всего синхронный генератор показанный на рис. 1 дополняют выпрямителем и используют в качестве подвозбудителя генератора, показанного на рис. 2, который, в свою очередь, используют как возбудитель бесконтактного синхронного генератора большой мощности (от 40 кВА и более) с двумя каскадами возбуждения.

2.2 Характеристики генераторов переменного тока

Характеристика холостого хода. Зависимость ЭДС генератора E (или фазного напряжения U_{ϕ}) от тока возбуждения i_b при отсутствии нагрузки $I_H = 0$ и постоянной частоте вращения ротора $n = const$ показана на рис. 5.

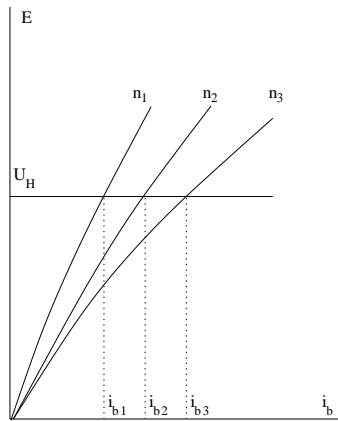


Рис. 5

U_H — номинальное напряжение на зажимах генератора; $n_1 > n_2 > n_3$ — частоты вращения ротора в диапазоне допустимого изменения частоты вращения, обусловленного настройкой привода постоянных оборотов.

Нерационально использовать синхронный генератор переменного тока без нагрузки. Если привод постоянных оборотов настроен на частоту n_1 , то, как показано на рис. 5, эта настройка будет соответствовать наибольшей частоте вращения ротора, что приводит к ускоренному механическому износу опор ротора. Если привод постоянных оборотов настроен на частоту n_3 , то эта настройка будет соответствовать наибольшему значению тока возбуждения, что приводит к нагреву генератора.

Внешняя характеристика генератора. Зависимость напряжения U на зажимах генератора от тока нагрузки I_H при постоянном значении тока возбуждения i_B , постоянной частоте вращения ротора генератора n и постоянном значении коэффициента мощности $\cos \varphi$ показана на рис. 6.

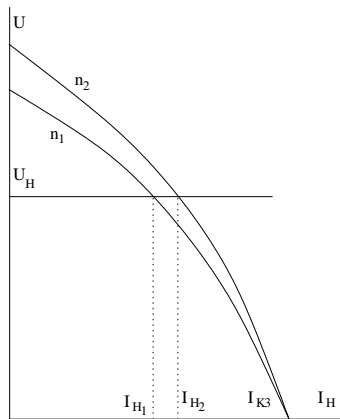


Рис. 6

$n_1 < n_2$ — частоты вращения ротора синхронного генератора переменного тока в диапазоне допустимого изменения частоты вращения, обусловленного настройкой привода постоянных оборотов; I_{K3} — ток короткого замыкания; φ — сдвиг фазы между мгновенными значениями напряжения и силы тока. Угол сдвига фазы зависит от соотношения активного и реактивного сопротивлений в цепи переменного тока. Если в цепи присутствует только активное сопротивление, то $\varphi = 0^\circ$ и, следовательно

$\cos \varphi = 1$. Если в цепи присутствует только реактивное сопротивление, то $\varphi = 90^\circ$ и, следовательно $\cos \varphi = 0$. На практике $0,6 \leq \cos \varphi \leq 0,8$ и существенно влияет на мощность генератора.

Среднюю мощность² генератора переменного тока за один период колебаний можно вычислить как:

$$P = mUI \cos \varphi,$$

где m — число фаз генератора; U — среднеквадратичное значение напряжения по показаниям вольтметра; I — среднеквадратичное значение силы тока по показаниям амперметра.

Как видно из рис. 6 при увеличении n увеличивается скорость падения U и уменьшается разница между током нагрузки I_H и током короткого замыкания $I_{КЗ}$. В этом случае резкое падение нагрузки, вызванное, например, внезапным отключением энергоёмкого потребителя, приведёт к возрастанию частоты вращения ротора n и может быть опасным для генератора, поэтому генератору необходима защита от короткого замыкания.

Для генераторов переменного тока реализуются следующие виды защиты: от перегрева за счёт воздушного или жидкостного охлаждения; от повышения или понижения напряжения; от неравномерного распределения нагрузки по фазам; от повышения или понижения частоты тока; от короткого замыкания внутри генератора; от обратных токов и обратной мощности; от чрезмерного увеличения момента на роторе; от обрыва фаз или несимметрии фазных напряжений. Защита отключает генератор от сети и переключает сеть на другой источник питания.

Регуляторы напряжения генераторов переменного тока. Привод постоянных оборотов стабилизирует частоту вращения ротора n , но не может гарантировать стабильность напряжения U . Напряжение в цепи переменного тока регулируется за счёт изменения тока возбуждения. Однако, прежде чем регулировать синхронный генератор, необходимо измерить какую-либо величину, по которой можно судить о стабильности напряжения. В качестве такой величины используется эффективное напряже-

²Более подробно о характеристиках мощности в прил. 2.

ние, которое можно измерить через эффективную силу переменного тока. Эффективной силой переменного тока называется величина силы постоянного тока, выделяющего в проводнике то же количество тепла, что и переменный ток. Эффективное напряжение и сила переменного тока вычисляются по следующим формулам [3, § 155]:

$$I_{\text{эфф}} = \frac{I_M}{\sqrt{2}}, U_{\text{эфф}} = \frac{U_M}{\sqrt{2}},$$

где I_M и U_M — амплитуды мгновенных значений силы и напряжения переменного тока, то есть эффективное напряжение и сила тока тождественно равны среднеквадратичным значениям по показаниям амперметра и вольтметра.

Наличие примесей в полупроводниковых приборах (диодах) приводит к искажению формы полуволны синусоиды и погрешностям в измерении среднеквадратичных значений. В этом случае используется понятие среднего значения выпрямленного напряжения, отличающегося от среднеквадратичного значения на величину коэффициента искажения. Среднее значение выпрямленного напряжения можно получить при помощи мостовой выпрямительной схемы А. Н. Ларионова [2, § 7.3], показанной на рис. 7.

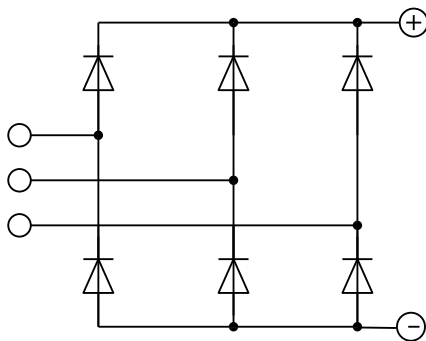


Рис. 7

К контактам, показанным на рис. 7 слева, подводится трёхфазный переменный ток, а с контактов, показанных на рис. 7

справа снимается среднее значение выпрямленного напряжения, которое подаётся на вход измерительного устройства. Измерительное устройство предназначено для получения сигнала рас- согласования между регулируемым напряжением и эталонным напряжением.

Наиболее распространены схемы измерительных устройств с электрическим эталоном, в качестве которого используется напряжение стабилитрона, работающего в режиме пробоя [2, § 7.3]. Стабилитрон – это электронное устройство, предназначенное для стабилизации постоянного напряжения и ограничения выбросов напряжения, за счёт использования явления лавинного пробоя p - n -перехода.

На рис. 8 показана схема измерительного устройства регулятора напряжения со стабилитроном в одном плече моста.

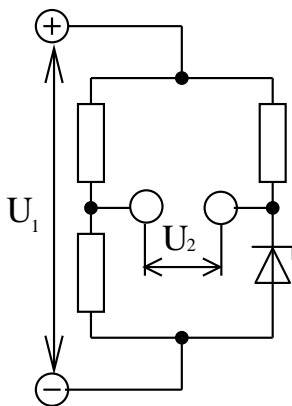


Рис. 8

Здесь U_1 — входное напряжение, U_2 — выходное напряжение. Величины сопротивлений подбираются таким образом, чтобы повысить чувствительность измерительного устройства ³.

Выходное напряжение U_2 стабилитрона изменяется прямопропорционально входному U_1 до величины напряжения, при

³На графике $U_2(U_1)$ большая чувствительность соответствует большему углу наклона к оси абсцисс, измеренному по часовой стрелке.

котором происходит пробой. После пробоя выходное напряжение остаётся постоянным. Это постоянное напряжение используется в качестве эталона. Стабилитроны надёжно реализуют такой закон изменения эталонного напряжения в диапазоне входных напряжений от 3 В до 180 В, поэтому в цепях высокого напряжения (200 В и больше) входное напряжение подаётся через понижающий трансформатор.

Существует множество схем регуляторов напряжения выполненных на магнитных усилителях [2, §7.5], транзисторах [2, §7.6] и тиристорах [2, §7.7]. Эти регуляторы значительно отличаются друг от друга составом элементов и структурой, однако реализуют один и тот же принцип регулирования: воздействие на выходное напряжение генератора путём изменения тока возбуждения пропорционально сигналу рассогласования полученному измерительным устройством.

2.3 Генераторы постоянного тока

В авиации применяют генераторы постоянного тока с параллельным возбуждением, например серии ГСР (генератор самолётный регулируемый), стартёр-генераторы серии ГСР-СТ и СТГ мощностью 3, 6, 9, 12, 18 и 24 кВт. Особенности авиационных генераторов постоянного тока аналогичны особенностям авиационных генераторов переменного тока (см. разд. 2.1).

Условное обозначение генератора постоянного тока показано на рис. 9.

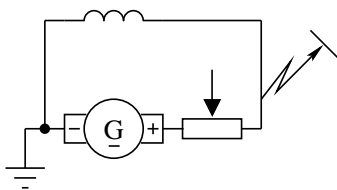


Рис. 9

Приняты следующие условные обозначения: заземление — соединение на корпус самолёта; стрелка-«молния» — замыкание

на корпус самолёта; прямоугольники со знаками плюс и минус — коллектор и щётки. Другие условные обозначения аналогичны рассмотренным ранее для генераторов переменного тока.

В авиации принята схема электрических соединений в сетях постоянного тока с общим минусом, т.е. отрицательные контакты соединяются с корпусом (массой) самолёта. Схема соединений с общим минусом предотвращает повышение напряжения генератора при случайном замыкании обмотки возбуждения на массу. Это происходит потому, что обмотка возбуждения обоими концами оказывается подключенной к одному и тому же полюсу «минус», т.е. замыкается на себя. Другими словами, символ короткого замыкания на рис. 9 можно заменить добавочным сопротивлением (сопротивлением массы в месте короткого замыкания), которое уменьшает ток возбуждения, а следовательно понижает напряжение генератора.

На рис. 9 показано условное обозначение коллектора и щёток. В разделе 2.1 было отмечено, что коллектор и щётки отрицательно влияют на надёжность генератора и предпочтительно использовать бесконтактные генераторы. Это верно в том случае, если речь идёт об использовании электрической машины *исключительно* в качестве источника электрической энергии. Однако очень часто электрическая машина применяется не только как источник электрической энергии (режим генератора), но и как источник механической энергии (режим электропривода). Именно эта идея легла в основу при разработке стартёр-генераторов.

Особенность работы стартёр-генератора заключается в том, что при запуске авиадвигателя он работает в режиме электропривода, а после запуска переключается в генераторный режим. В начальный момент запуска авиадвигателя необходимо создать большой пусковой момент, поэтому стартёр-генератор работает при смешанном возбуждении. Затем, чтобы обеспечить быструю раскрутку ротора авиадвигателя, параллельное возбуждение отключается, т. е. уменьшается поток возбуждения и раскрутка осуществляется от последовательной обмотки возбуждения.

2.4 Характеристики генераторов постоянного тока

Внешняя характеристика возбуждения. Зависимость напряжения генератора U от тока возбуждения i_B при постоянной частоте вращения ротора n и постоянном сопротивлении нагрузки R_H . По внешним характеристикам возбуждения можно проанализировать процесс создания магнитного потока Φ при разной нагрузке. На рис. 10 показаны крайние режимы: холостого хода $I_H = 0$ при максимальной частоте вращения ротора n_{max} ; максимальной нагрузки $I_H = I_{max}$ при минимальной частоте вращения ротора n_{min} .

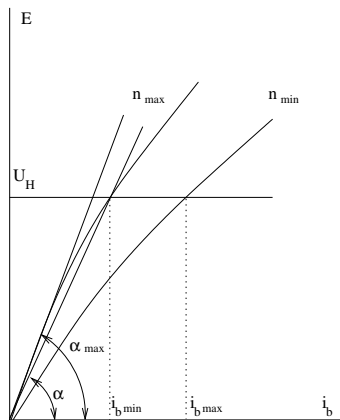


Рис. 10

Отношение i_{Bmax}/i_{Bmin} называется кратностью регулирования тока возбуждения и задаёт требования к регулятору напряжения. По графику:

$$r_B = \frac{U_H}{i_B} = \operatorname{tg} \alpha,$$

где r_B — сопротивление обмотки возбуждения генератора; α — угол наклона секущей характеристики холостого хода; α_{max} — угол наклона касательной к характеристике холостого хода. Если $\alpha_{max} > \alpha$, то самовозбуждение генератора возможно, иначе необходимо независимое возбуждение.

Внешняя характеристика. Зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки $U = U(I_H)$ при постоянной частоте вращения ротора n . Для генераторов с параллельным возбуждением добавляется условие $r_B = const$, а при независимом возбуждении добавляется условие $i_B = const$. На рис. 11 показаны внешние характеристики генератора: $n_1 < n_2 < n_3$ —

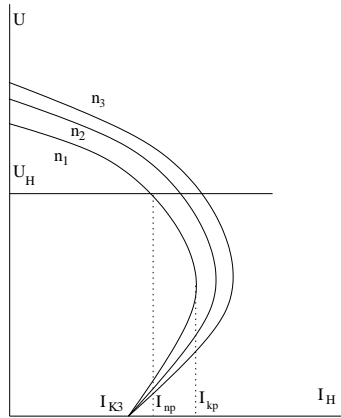


Рис. 11

частоты вращения ротора генератора в диапазоне допустимого изменения частоты вращения; $I_{нр}$ — предельный (максимальный) ток при номинальном напряжении на зажимах генератора; $I_{кр}$ — критический (максимальный) ток при данной частоте вращения ротора; $I_{КЗ}$ — ток короткого замыкания; I_H — ток нагрузки. Уменьшение напряжения при увеличении нагрузки в генераторе с параллельным возбуждением происходит по следующим причинам: реакция якоря, уменьшающая поток возбуждения; падение напряжения в якорной обмотке и щёточных контактах, вследствие увеличения их электрического сопротивления⁴; снижение тока возбуждения, вследствие уменьшения напряжения на зажимах генератора.

⁴Электрическое сопротивление якорной обмотки увеличивается при нагреве, в щёточных контактах — при увеличении скорости вращения, снижении давления и температуры атмосферы.

Установившийся ток короткого замыкания не больше величины номинального тока: $I_{кз} < I_{ном} < I_{пр}$, однако возможно возникновение ударного тока короткого замыкания, который в несколько раз больше номинального. Например, в случае питания электродвигателя, перемещающего агрегат, который встаёт на упор крайнего положения.

Величина предельного и критического токов генератора характеризуют его перегрузочную способность. Для современных авиационных генераторов:

$$I_{пр} \approx (1,7..2,7)I_{ном}, I_{кр} \approx (1,8..2,8)I_{ном}.$$

В приведённых соотношениях меньшее значение числового коэффициента соответствует меньшей частоте вращения ротора генератора.

Применение регулятора напряжения изменяет внешние характеристики генератора таким образом, чтобы напряжение на зажимах генератора отличалось в большую сторону от номинального не более, чем на заданную величину. На рис. 11 внешние характеристики при наличии регулятора будут обрезаны сверху по линии номинального напряжения U_n .

Угольный регулятор напряжения. Для регулирования напряжения генераторов постоянного тока на летательных аппаратах применяют угольные регуляторы.

Принцип действия регулятора основан на изменении электрического сопротивления столба, собранного из угольных шайб. Электрическое сопротивление столба складывается из сопротивления самих шайб и сопротивления на поверхностях соприкосновения шайб. Сопротивление шайб постоянно, а сопротивление на поверхностях соприкосновения зависит от силы сжатия шайб пружиной.

Угольный регулятор напряжения представляет собой измерительное устройство с электромеханическим эталоном. Электрическая часть эталона определяется настройкой регулируемого сопротивления и свойствами электромагнита, а механическая часть — упругостью пружины и угольного столба. Угольный регулятор напряжения показан на рис. 12.

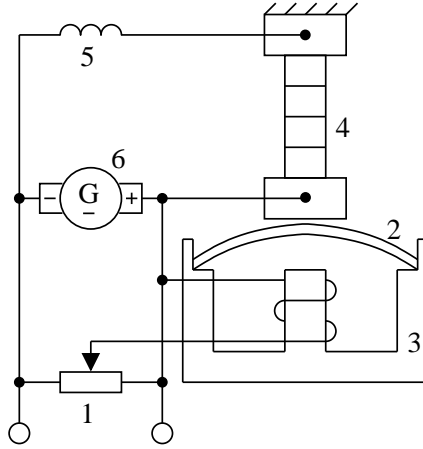


Рис. 12

Регулируемое сопротивление 1 (реостат) предназначено для настройки угольного регулятора на заданное эталонное напряжение $U_Э$. Пружина 2 предназначена для сжатия угольного столба 4. Электромагнит 3 создаёт силу действия на пружину 2, ослабляющую сжатие угольного столба 4.

Сразу после включения генератора угольный столб 4 сжат пружиной 2, т.е. угольный столб 4 имеет минимальное электрическое сопротивление. Если $\Delta U = U_Э - U < 0$, то электромагнит 3 ослабляет действие пружины 2. Электрическое сопротивление угольного столба 4 увеличивается, а ток i_B в обмотке возбуждения 5 уменьшается, следовательно уменьшается напряжение U на зажимах генератора.

Угольный регулятор представляет собой осциллятор, динамика работы которого описывается дифференциальным уравнением второго порядка [2, § 7.4]. Свойства электромагнита и пружины подбирают таким образом, чтобы реализовать процесс $\Delta U \rightarrow 0$.

2.5 Параллельная работа генераторов

Теоретически при параллельной работе нескольких генераторов легче обеспечить требуемое количество и качество электрической энергии [2, §10.1]. Системы электроснабжения летательных аппаратов состоят из двух однотипных электрически независимых подсистем (каналов) правого и левого бортов. В каналах систем электроснабжения обычно устанавливают одинаковые генераторы и поэтому необходимо, чтобы нагрузка между генераторами распределялась поровну.

Проблема заключается в том, что одинаково отрегулировать генераторы практически невозможно. Вследствие разницы в настройках генераторы работают либо с недогрузкой, либо с перегрузкой. Включение в работу регуляторов напряжения генераторов приведёт к ещё большему дисбалансу в распределении нагрузки. Для генераторов переменного тока проблема усугубляется тем, что поровну должны быть распределены активная и реактивная составляющие нагрузки.

Рассмотрим схему регулирования параллельной работы генераторов постоянного тока с угольными регуляторами напряжения (рис. 13): 1 — шина питания; 2 — уравнивательная шина; R_C —

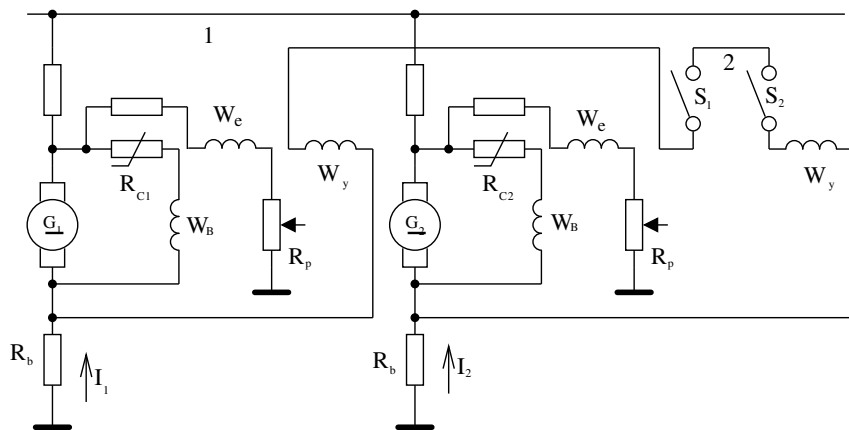


Рис. 13

сопротивление столба угольного регулятора; R_G — балластное сопротивление (это калиброванные резисторы или сопротивления обмоток дополнительных полюсов); W_B — обмотки возбуждения генераторов; W_Y — уравнивательные обмотки; W_E — обмотка электромагнита угольного регулятора; R_P — регулируемый резистор для настройки эталонного напряжения; S_i — контакты замыкания уравнивательных обмоток (по умолчанию замкнуты, на рис. 13 разомкнуты).

Если $R_G = const$, $R_{C_1} = R_{C_2}$, $W_i = const$, то $I_1 = I_2$. Однако на практике возникают ошибки регулирования токов возбуждения генераторов. Например, $R_{C_1} \neq R_{C_2}$ вследствие неодинаковой жёсткости пружин угольных регуляторов, изменения сопротивлений контактных соединений из-за окисления, загрязнений, обгорания, температурных деформаций, тогда $I_1 \neq I_2$, т.е. генераторы работают с разной нагрузкой.

Предположим, что $I_1 > I_2$, тогда необходимо снизить возбуждение генератора G_1 и повысить возбуждение генератора G_2 . Уравнивательная обмотка и обмотка электромагнита угольного регулятора соединены таким образом, что их магнитодвижущие силы для более нагруженного генератора складываются, а для менее нагруженного вычитаются.

При сложении магнитодвижущих сил притяжение электромагнита возрастает, угольный столб удлиняется, а его сопротивление возрастает. Следовательно возрастает сопротивление цепи возбуждения генератора, что приведёт к уменьшению тока возбуждения и, как следствие, снижению напряжения на зажимах генератора.

При вычитании магнитодвижущих сил притяжение электромагнита уменьшается, угольный столб сжимается и его сопротивление снижается. Следовательно снижается сопротивление в цепи возбуждения генератора, что приведёт к увеличению тока возбуждения и, как следствие, повышению напряжения на зажимах генератора. Из приведённого описания следует, что, при параллельной работе генераторов постоянного тока, выравнивание нагрузок выполняется только регуляторами напряжения за счёт воздействия на токи возбуждения.

Выравнивание нагрузок синхронных генераторов переменного тока представляет собой более сложный процесс, так как необходимо выравнивание активных и реактивных нагрузок. Реактивная нагрузка распределяется воздействием на регуляторы напряжения, аналогичным воздействию, рассмотренному на схеме рис. 13. Активная нагрузка распределяется воздействием на приводы постоянных оборотов. Так из внешней характеристики синхронного генератора переменного тока, показанной на рис. 6 видно, что при уменьшении частоты вращения ротора с n_2 до n_1 нагрузка на генератор снижается $I_{H1} < I_{H2}$.

На практике может оказаться, что надёжность системы электроснабжения при параллельной работе генераторов будет ниже, чем при раздельной. Дело в том, что аппаратура регулирования и управления параллельной работой генераторов сложнее, а её отказы приводят к возникновению больших токов за короткие промежутки времени. Это, в свою очередь, требует увеличения мощности и быстродействия аппаратуры защиты. В этом случае все потребители делят на группы и эти группы закрепляют за разными генераторами. При отключении генератора его потребители в зависимости от категории⁵ либо переключаются на другой генератор, либо отключаются.

Вопросы для самоконтроля

1. Принцип действия генератора переменного тока?
2. Физический смысл процесса возбуждения генератора?
3. Характеристика холостого хода генератора переменного тока? График?
4. Внешняя характеристика генератора переменного тока? График?
5. Как вычислить мощность генератора переменного тока?
6. Физический смысл коэффициента мощности?
7. Физический смысл среднего значения выпрямленного напряжения?

⁵Категория потребителя зависит от того какая особая ситуация возникает при его отказе или отключении.

8. Физический смысл эффективного напряжения? Эффективной силы тока?
9. Виды защиты в генераторах переменного тока?
10. Внешняя характеристика возбуждения генератора постоянного тока? График?
11. Внешняя характеристика генератора постоянного тока? График?
12. В чём заключается проблема обеспечения параллельной работы генераторов постоянного тока? Переменного тока?

3 Самолётные электрические сети

3.1 Классификация сетей

В авиации электрическая энергия от источников тока сначала подводится к центральным распределительным устройствам. Затем, в зависимости от назначения и размеров летательного аппарата, электрическая энергия передаётся или через промежуточные распределительные устройства, или непосредственно потребителям [2, §14.1].

Распределительное устройство представляет собой коробку с отверстиями для подвода и отвода проводов, с одной или двумя шинами питания, электрически изолированными от корпуса и друг от друга. Шина питания представляет собой металлическую планку и имеет отверстия с резьбой для винтов, к которым присоединяются провода.

Рассмотрим классификацию самолётных электрических сетей по следующим признакам.

1. По назначению самолётные электрические сети разделяются на две группы:

Магистральные (питательные) сети предназначены для передачи электрической энергии от источников питания к центральным распределительным устройствам.

Распределительные сети предназначены для передачи электрической энергии от центральных распределительных устройств

к потребителям или промежуточным распределительным устройствам.

2. По способу распределения электрической энергии самолётные сети подразделяются на четыре группы:

Централизованные, т.е. вся электрическая энергия распределяется через одно центральное распределительное устройство.

Децентрализованные, т.е. в сети есть несколько центральных распределительных устройств, подключенных к независимым источникам питания. Эти центральные распределительные устройства связаны между собой контактными соединениями, которые разомкнуты в нормальных условиях работы. При отказе источника энергии контактное соединение замыкается так, чтобы подключить обесточенное центральное распределительное устройство к другому, находящемуся под током.

Смешанные, т.е. в системе присутствует центральное распределительное устройство и промежуточные распределительные устройства.

Раздельные, т.е. каждый источник тока питает собственную группу потребителей, что позволяет избежать проблем обеспечения параллельной работы генераторов.

3. По конфигурации самолётные электрические сети подразделяются на три группы:

Разомкнутые, т.е. при нормальной работе системы электропитания каждое промежуточное распределительное устройство получает питание только от одного центрального распределительного устройства. Все промежуточные распределительные устройства подключаются к центральному последовательно.

Замкнутые, то есть каждое промежуточное распределительное устройство подключено к двум и более центральным распределительным устройствам и, соответственно, получает питание от двух и более независимых источников. Все промежуточные распределительные устройства подключаются к центральным параллельно.

Комбинированные, т.е. при нормальной работе системы электропитания одна её часть работает как разомкнутая, а другая как замкнутая.

4. По числу каналов самолётные электрические сети подразделяются на две группы:

Одноканальные. Основной недостаток таких систем распределения заключается в том, что при отказе канала распределения прекращается питание всех потребителей. Устанавливается на самолётах малой авиации, имеющих возможность продолжить полёт при отказе системы электроснабжения и/или совершить вынужденную посадку на грунтовую площадку небольших размеров (порядка 100 метров).

Многоканальные. На современных самолётах сеть распределения, как правило, состоит не менее чем из двух электрически независимых каналов правого и левого борта.

5. По способу передачи энергии электрические сети подразделяются на четыре группы: однопроводные, двухпроводные, трёхпроводные и четырёхпроводные.

6. По защите электрические сети подразделяются на две группы: защищённые и незащищённые. Предусматриваются основные виды защиты от электрических, механических, химических и тепловых воздействий. Например, простейшая защита от тока короткого замыкания представляет собой плавкий предохранитель. Примером механического воздействия могут быть пыль, грязь, камешки вылетающие из-под колёс при перемещении самолёта по Земле, упругие деформации или перемещение агрегатов, температурные деформации конструкции планера. Примером химического воздействия могут быть атмосферный конденсат, осадки, обледенение, топливо, рабочая жидкость гидросистемы, масло. Тепловое воздействие вызывает окисление и обгорание контактов, оплавление изоляции.

Наиболее рациональным способом защиты сразу от нескольких видов воздействий является размещение электрической проводки внутри трубопровода.

3.2 Компоновка сетей и электрооборудования на самолёте

Компоновка системы электроснабжения зависит от назначения, аэродинамической схемы и состава систем оборудования на самолёте. Общие требования к составу, размещению и работе электрооборудования приведены в нормативных документах, например [1].

Рассмотрим некоторые общие правила выбора и компоновки систем электроснабжения на самолётах.

1. Электрожгуты прокладываются по бортам самолёта *над* трубопроводами гидросистемы и топливной системы. Резервные каналы передачи электроэнергии прокладываются по разным бортам (левому и правому).

2. Необходимо спрямлять трассы прокладки электрожгутов, для чего в конструкции стенок шпангоутов, лонжеронов и нервюр должны быть предусмотрены соответствующие отверстия. Крепление электрожгутов выполняется хомутами к кронштейнам, которые должны устанавливаться на разгруженных полках, специально предусмотренных в силовой конструкции, во избежание появления концентраторов напряжений.

3. Выбор способа передачи электроэнергии по числу проводов и материалу, из которого они изготовлены, должен быть обоснован, а сечения проводов тщательно рассчитаны с целью минимизации массы электросети. Например, на самолёте Ил-86 общая длина электропроводки 300 километров, а масса 2,6 тонны. На рис. 14 показаны схемы однопроводной (справа) и двухпроводной (слева) передачи постоянного тока: 1 и 2 — потребители; 3 — плавкий предохранитель; 4 — провода.

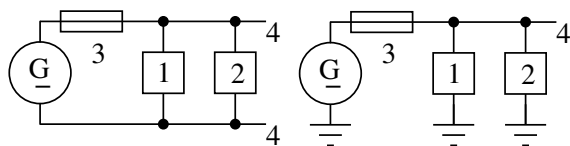


Рис. 14

Замена двухпроводной системы на однопроводную позволяет снизить массу проводов примерно на 40 % и уменьшить габариты и массу распределительных устройств. В настоящее время однопроводные системы являются основным способом передачи постоянного и переменного однофазного тока.

На рис. 15 показаны схемы двухпроводной (слева) и трёхпроводной (справа) передачи переменного тока.

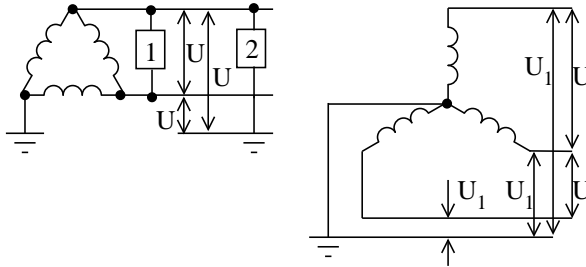


Рис. 15

На рис. 15 цифры в прямоугольниках означают потребители, U и U_1 — линейное и фазное напряжения.

На схеме соединения катушек индуктивности треугольником $U = U_1$, а на схеме соединения катушек индуктивности в звезду $U = \sqrt{3}U_1$. Если сопротивление нагрузки всех трёх фаз в схеме соединения звездой одинаково, то ток в проводе, соединяющем центр звезды с корпусом, равен нулю. Именно поэтому этот провод называют нулевым. Однако на практике сбалансировать нагрузку по фазам не удаётся, поэтому в нулевом проводе ток отличен от нуля, хотя название сохраняется.

Основным недостатком обеих схем является несимметрия линейных напряжений, вследствие разного сопротивления проводов, нагрузки и корпуса самолёта. Устройства защиты от несимметрии напряжений срабатывают при разнице фазных напряжений примерно 10 % от номинала, т.е. при фазном напряжении 115 В разница может достигать 11,5 В. Более подробные сведения о требованиях к точности поддержания напряжения можно найти в [2, §7.1].

4. Конструкция самолёта должна быть единым токопроводящим контуром. Для этого используются: гибкие соединители на подвижных узлах (ленты металлизации); токопроводящие подвижные детали (шинки, перемычки); крепёжные детали без защитного покрытия (один крепёжный элемент на шов); токопроводящие установочные детали (колодки, хомуты); токопроводящие шины в силовых агрегатах, изготовленных из диэлектрических композиционных материалов.

5. Необходимо использовать малогабаритные распределительные устройства и размещать их в непосредственной близости от потребителей.

6. Блоки оборудования чувствительные к вибрациям должны устанавливаться на виброизоляторы.

7. Корпус самолёта должен заземляться в момент касания стойками шасси поверхности взлётно-посадочной полосы.

4 Электроприводы самолётных агрегатов

4.1 Назначение, состав и структура электроприводов

Электроприводы предназначены для преобразования электрической энергии в механическое перемещение агрегатов с целью облегчения работы экипажа по управлению самолётом.

В состав электропривода входят: электродвигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую; устройства передачи механической энергии (кинематическая связь) от электродвигателя к агрегату; аппаратура управления, регулирования и защиты.

Структура электропривода подобна структуре любой другой системы энергообеспечения, например системы электроснабжения, показанной на схеме (1). Подобие заключается в том, что число и связи элементов схемы (1) сохраняются, но изменяются наименования. Так позиция 1 будет именоваться электродвигатель, позиция 2 — кинематическая связь, позиция 3 — агрегат.

По перемещению выходного элемента (звена) различают:

электродвигательный привод, у которого выходной элемент совершает вращательное движение (возможно реверсивное) и электромагнитный привод, у которого выходной элемент совершает возвратно-поступательное линейное перемещение.

По роду тока электродвигатели разделяются на двигатели постоянного и переменного тока.

По способу возбуждения электродвигатели постоянного тока разделяются на: двигатели с последовательным возбуждением или серийные; с параллельным возбуждением или шунтовые; со смешанным возбуждением или компаунд-машины; с независимым возбуждением; с возбуждением от постоянных магнитов.

Электродвигатели переменного тока разделяются на: асинхронные трёхфазные двигатели, асинхронные двухфазные, асинхронные конденсаторные и синхронные.

В настоящее время в авиации применяют следующие устройства передачи механической энергии: механические кинематические связи (валы, муфты и зубчатые передачи), гидравлические машины (насосы и моторы), пневматические (турбомашины).

Аппаратура управления, регулирования и защиты электроприводов включает: командную аппаратуру (кнопки включения и выключения, переключатели двух и многопозиционные), электромагнитные контакторы, концевые выключатели и программные шайбы, реостаты, электромагнитные тормозные устройства и муфты, регуляторы скорости перемещения выходного звена, сигнальные устройства (лампы, световые табло и транспаранты), реле, следящие устройства и усилители.

4.2 Основы динамики электропривода

Динамика электропривода характеризует переходные режимы, т.е. электрические и механические процессы, возникающие при переходе привода из состояния покоя к движению и наоборот, при изменении скорости движения выходного звена и при изменении нагрузки на выходное звено.

Для повышения надёжности электропривода ограничиваются его механические и электрические нагрузки. Под механиче-

ской нагрузкой понимают M_{max} максимальный момент, развиваемый выходным звеном. Под электрической нагрузкой понимают I_{max} максимальную величину потребляемого тока. Эти ограничения являются исходными данными для расчёта пусковых токов, регулировочных сопротивлений и выбора передаточного числа кинематической связи.

Рассмотрим уравнение движения электропривода в дифференциальной форме:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{J_{\text{пр}} \omega^2}{2} \right) = \frac{d}{dt} (M_{\text{пр}} \varphi), \quad (2)$$

где $J_{\text{пр}}$ — приведённый момент инерции электропривода; ω — угловая скорость звена приведения, например вала электродвигателя; $M_{\text{пр}}$ — приведённый момент электропривода; φ — угол поворота звена приведения.

Приведённым моментом инерции $J_{\text{пр}}$ называется момент инерции звена приведения, которое обладает кинетической энергией, равной сумме величин кинетической энергии приводимых звеньев. В общем случае кинетическая энергия K электропривода:

$$K = \sum_k \left(\frac{m_k V_k^2}{2} + \frac{J_k \omega_k^2}{2} \right) = \frac{J_{\text{пр}} \omega^2}{2},$$

где k — элемент электропривода, обладающий кинетической энергией ($k = 1$ — электродвигатель, $k = 2$ — кинематическая связь и $k = 3$ — агрегат); m_k — масса элемента электропривода, совершающего линейное перемещение; V_k — скорость линейного перемещения; J_k — момент инерции элемента привода, совершающего вращательное движение; ω_k — угловая скорость вращения элемента привода. Тогда:

$$J_{\text{пр}} = \frac{2K}{\omega^2} = \sum_k \left(\frac{m_k V_k^2}{\omega^2} + \frac{J_k \omega_k^2}{\omega^2} \right).$$

Рассмотрим электродвигательный привод. В этом случае отсутствует линейное перемещение, т.е. $V_k = 0$ и приведённый момент

инерции будет равен:

$$J_{\text{пр}} = \sum_k J_k \left(\frac{\omega_k}{\omega} \right)^2 = \sum_k J_k i_k^2,$$

где i_k — передаточное отношение от k -элемента электропривода на звено приведения. Например i_2 — передаточное число кинематической связи.

Приведённым моментом $M_{\text{пр}}$ электропривода называется момент, который по своему действию эквивалентен действию всех других моментов.

Преобразуем уравнение (2) к виду:

$$\frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_{\text{пр}}}{dt} + J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{пр}} + \varphi \frac{dM_{\text{пр}}}{dt} \quad (3)$$

Предположим, что $M_{\text{пр}}$ и $J_{\text{пр}}$ не зависят от угла поворота φ , т.е. $M_{\text{пр}} = \text{const}$ и $J_{\text{пр}} = \text{const}$, тогда уравнение (3) примет наиболее простой вид:

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{пр}}. \quad (4)$$

Предположение о том, что $M_{\text{пр}} = \text{const}$ и $J_{\text{пр}} = \text{const}$ требует тщательной проверки и, если $M_{\text{пр}} = \text{var}$ и $J_{\text{пр}} = \text{var}$, и изменения существенны, то необходимо использовать уравнение (3).

Если звеном приведения является вал электродвигателя, то:

$$M_{\text{пр}} = M_1 - M_2 - M_3,$$

где M_1 — момент, развиваемый электродвигателем; M_2 — момент сопротивления в кинематической связи (трение); M_3 — момент сопротивления со стороны агрегата.

Приведённый момент инерции:

$$J_{\text{пр}} = \sum_{k=1}^3 J_k i_k^2,$$

где J_k — момент инерции k -элемента электропривода; i_k — передаточное число от k -элемента на звено приведения; $k = 1 - \text{вал}$

электродвигателя; $k = 2$ — кинематическая связь электродвигателя с агрегатом; $k = 3$ — агрегат.

Если используется прямая передача вращения вала электродвигателя на агрегат, например через вал трансмиссии или муфту, то $i_1 = i_2 = i_3 = 1$ и

$$J_{\text{пр}} = \sum_{k=1}^3 J_k.$$

Если звеном приведения является вал электродвигателя и угловые скорости перемещения кинематической связи и агрегата равны, то $i_1 = 1, i_2 = i_3 = i$ и:

$$J_{\text{пр}} = J_1 + i^2(J_2 + J_3).$$

Если вращение вала электродвигателя передаётся на агрегат через редуктор, то $i < 1$ и $i^2 \approx 0$, тогда $J_{\text{пр}} \approx J_1$.

Подставляя выражение для приведённого момента в уравнение (4), имеем:

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = M_1 - M_2 - M_3. \quad (5)$$

Уравнение (5) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение, т.к.

$$M_1 = f(\omega(M_1), I_1(M_2, M_3)),$$

где I_1 — ток, потребляемый электродвигателем для преодоления моментов сопротивления M_2, M_3 и перемещения агрегата со скоростью, пропорциональной угловой скорости ω вращения вала электродвигателя.

Для решения уравнения (5), необходимо знать характеристики электродвигателя. Под характеристикой электродвигателя понимается физическая величина, описывающая его работу. В зависимости от физической величины различают следующие характеристики.

Скоростная: $\omega = \omega(P)$, где ω — угловая скорость вращения вала электродвигателя; P — мощность электродвигателя.

Механическая: $M = M(P)$, где M — момент вала электродвигателя.

Электрическая: $I = I(P)$, где I — ток, потребляемый электродвигателем.

Каждая из этих характеристик может быть построена при различных условиях питания и нагрузки. Условия питания электродвигателя определяются характеристиками источника питания и сети подвода электрической энергии от источника питания к электродвигателю. Нагрузка на вал электродвигателя определяется сопротивлением кинематической связи и агрегата. В зависимости от питания и нагрузки различают:

Естественные характеристики, т.е. при постоянном напряжении в сети $U = const$ и постоянном электрическом сопротивлении сети $R = const$. Естественные характеристики описывают установившиеся процессы работы электродвигателя.

Искусственные или регулировочные характеристики, т.е. при переменном сопротивлении сети $R = var$, например при изменении добавочного сопротивления с целью регулировки скорости перемещения агрегата. Искусственные характеристики описывают переходные процессы электродвигателя, вызванные регулировкой.

Эксплуатационные характеристики, т.е. при переменном напряжении в сети $U = var$. Эксплуатационные характеристики описывают переходные процессы электродвигателя, вызванные изменением нагрузки на вал электродвигателя и/или изменением напряжения в сети питания электродвигателя.

4.3 Авиационные электрические двигатели переменного тока

Принцип действия электрического двигателя обратен принципу действия генератора, представленному в разд. 2.1, и основан на эффекте появления силы, действующей на проводник с током, помещённый в магнитное поле. Если проводник имеет форму рамки, то силы действующие на плечи рамки, создадут поворачивающий момент. Роль рамки с током в электродвигате-

ле выполняет обмотка ротора, магнитное поле создаётся статором. Иначе говоря, момент вращения ротора является следствием взаимодействия магнитных полей статора и ротора, поскольку любое движение электрических зарядов (ток) порождает магнитное поле. Непрерывность вращения ротора в одном направлении обеспечивается соответствующим вращением магнитного поля. Если частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля, то такой двигатель называется синхронным. Если частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля, то такой двигатель называется асинхронным.

Разность частот вращения ротора и магнитного поля принято оценивать относительной величиной, называемой скольжением:

$$S = 1 - \frac{n_{\text{р}}}{n_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где $n_{\text{р}}$ — частота вращения ротора; $n_{\text{п}}$ — частота вращения магнитного поля. Для синхронного двигателя $n_{\text{р}} = n_{\text{п}}$ и, следовательно, $S = 0$, т.е. скольжение отсутствует. Если $n_{\text{р}} < n_{\text{п}}$, то $0 < S < 1$.

Трёхфазный асинхронный электродвигатель возбуждает вращающееся магнитное поле за счёт использования свойств переменного трёхфазного тока. В простейшем случае электродвигатель состоит из статора с обмоткой и короткозамкнутого ротора как показано на рис. 16, где использованы следующие

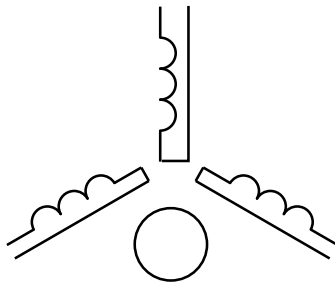


Рис. 16

условные обозначения: окружность — это короткозамкнутый ро-

тор; статор условно не показан; шесть выведенных концов фаз с катушками индуктивности — это обмотка статора.

Размещение обмотки на полюсах статора показано на рис. 17.

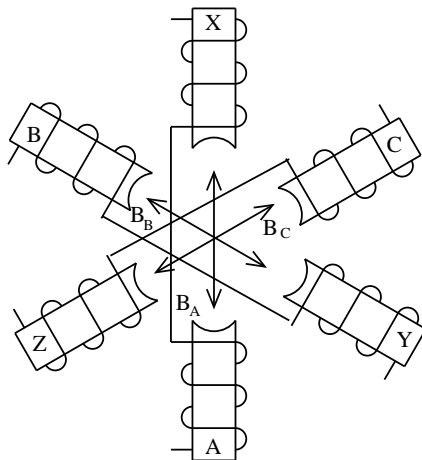


Рис. 17

Символьные обозначения А-Х, В-У и С-З показывают распределение фаз обмотки по полюсам статора. Каждая фаза обмотки состоит из одной катушки, размещённой на двух полюсах статора. Точка пересечения двунаправленных стрелок показывает ось вращения ротора электродвигателя. Каждая стрелка, выходящая из точки пересечения, показывает возможное положение вектора магнитной индукции \vec{B}_i внутри витков соответствующей катушки. Напомним, что магнитная индукция \vec{B} является мерой величины магнитного поля и оценивается по величине момента, действующего на рамку с током.

Вектор магнитной индукции внутри статора \vec{B} можно представить в виде суммы векторов магнитной индукции внутри каждой катушки \vec{B}_i :

$$\vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_C,$$

где \vec{B}_i меняются по синусоидальному закону, как показано на рис. 18.

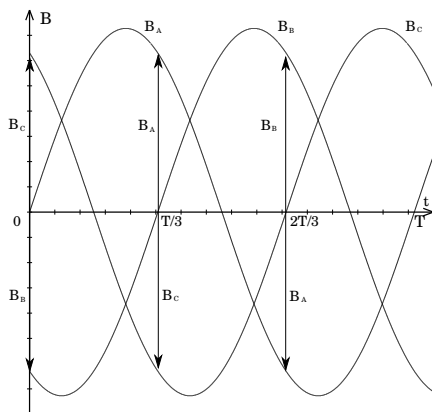


Рис. 18

Рассмотрим изменение вектора магнитной индукции \vec{B} в статоре в зависимости от времени.

$$\text{Если } t = 0, \quad \text{то } \vec{B} = \vec{B}_B + \vec{B}_C.$$

$$\text{Если } t = T/3, \quad \text{то } \vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_C.$$

$$\text{Если } t = 2T/3, \quad \text{то } \vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_B.$$

В последующие моменты времени t процесс изменения магнитной индукции \vec{B} в статоре повторяется.

На рис. 19 показано положение вектора магнитной индукции \vec{B} в статоре относительно фазных обмоток на полюсах электродвигателя в те же моменты времени $t = 0, T/3, 2T/3$.

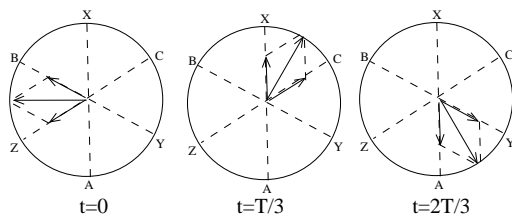


Рис. 19

Как видно из рис. 19, вектор магнитной индукции \vec{B} в статоре

ре поворачивается, а следовательно поворачивается суммарное магнитное поле. Другими словами, синусоидальный переменный трёхфазный ток со смещением фаз на треть периода, при прохождении по обмоткам катушек, направленных под углом 120° друг относительно друга, создаёт равномерно вращающееся магнитное поле.

Рассмотрим процесс образования магнитного поля в короткозамкнутом роторе. По конструкции короткозамкнутый ротор представляет собой ряд металлических стержней, размещённых с одинаковым шагом так, чтобы образовать цилиндрическую поверхность. Стержни присоединены к двум металлическим кольцам, размещённым на торцах цилиндра. Таким образом конструкция ротора является токопроводящей и замкнутой на себя.

Линии индукции вращающегося магнитного поля пересекают стержни и порождают в них токи. Эти токи, в свою очередь, порождают магнитное поле ротора, которое взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора. Результатом этого взаимодействия является момент вращения ротора. Скорость вращения ротора близка к скорости вращения магнитного поля, но меньше её ровно настолько, сколько необходимо для того, чтобы линии индукции магнитного поля статора пересекали стержни короткозамкнутого ротора и порождали в них токи. Отставание скорости вращения ротора от скорости вращения магнитного поля статора оценивается скольжением S и вычисляется по формуле (6).

Двухфазный асинхронный электродвигатель возбуждает вращающееся магнитное поле за счёт использования свойств переменного тока. В отличие от трёхфазного асинхронного электродвигателя, используются только две фазы, что ограничивает мощность, но, за счёт включения конденсатора и управляемого сопротивления, позволяет плавно регулировать частоту и направление вращения ротора.

Двухфазный электродвигатель состоит из статора с обмоткой и короткозамкнутого ротора, как показано на рис. 20, где использованы следующие условные обозначения: окружность — это короткозамкнутый ротор; статор условно не показан; W_c и

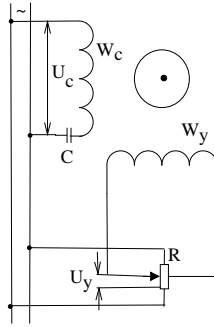


Рис. 20

W_y — сетевая и управляющая обмотки, размещённые на статоре под углом 90° ; C — конденсатор, сдвигающий фазы сетевого напряжения U_c и управляющего напряжения U_y также под углом 90° ; R — управляемое сопротивление (реостат).

Частота вращения ротора меняется за счёт изменения амплитуды и фазы управляющего напряжения U_y . Амплитуда и фаза управляющего напряжения U_y меняется за счёт изменения сопротивления реостата R . Середина реостата R является нейтральным положением, при котором амплитуда и сдвиг фазы управляющего напряжения U_y относительно сетевого U_c равны нулю. Если движок реостата находится в нейтральном положении, то ротор останавливается. Если перевести движок реостата через нейтральное положение, то фаза сдвига U_y относительно U_c изменит знак, а значит изменится направление вращения ротора. Дальнейшее перемещение движка реостата будет увеличивать амплитуду и сдвиг фазы управляющего напряжения U_y , а значит и частоту вращения ротора.

Синхронный электродвигатель переменного тока отличается от асинхронного тем, что ток в обмотке ротора появляется не при вращении в магнитном поле статора, а подводится от источника постоянного тока через контактные кольца и щётки, показанные на рис. 21 наклонными линиями.

Частота вращения ротора равна частоте вращения магнит-

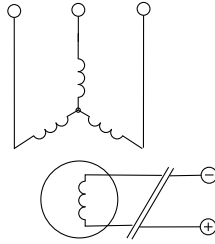


Рис. 21

ного поля в статоре, следовательно скольжение отсутствует.

Конструкция синхронного электродвигателя реализует свойство обратимости электрических машин, т.е. позволяет использовать эту машину не только как двигатель, но и как генератор. Если ротор электрической машины принудительно вращать в магнитном поле статора, например присоединив к коробке приводов вспомогательной силовой установки или маршевого двигателя, то в цепи ротора будет генерироваться постоянный ток.

4.4 Авиационные электрические двигатели постоянного тока

Как было отмечено в разд.4.3 принцип действия электрического двигателя основан на эффекте появления силы, действующей на проводник с током. Электрические двигатели постоянного тока различают по способу возбуждения: с последовательным возбуждением, с параллельным возбуждением, со смешанным возбуждением и с независимым возбуждением.

Вне зависимости от способа возбуждения для электродвигателя постоянного тока можно записать уравнение:

$$U = E_{\text{Я}} + I_{\text{Я}}R_{\text{Я}}, \quad (7)$$

где U — напряжение питания электродвигателя; $E_{\text{Я}}$ — ЭДС якоря; $I_{\text{Я}}$ — ток якоря; $R_{\text{Я}}$ — сопротивление якорной обмотки.

Уравнение индуцируемой в обмотке якоря ЭДС:

$$E_{\text{Я}} = c_{\text{Д}}\omega\Phi, \quad (8)$$

где c_D — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции электродвигателя; ω — угловая скорость вращения ротора; Φ — магнитный поток возбуждения, который можно вычислить как:

$$\Phi = k i_B, \quad (9)$$

где i_B — ток возбуждения электродвигателя; $k = k(i_B)$ — коэффициент, зависящий от тока возбуждения.

Уравнение электромагнитного момента двигателя:

$$M = c_D I_A \Phi. \quad (10)$$

Уравнение электромагнитной мощности двигателя:

$$P = E_A I_A = \omega M.$$

Электродвигатель с последовательным возбуждением (серийный) показан на рис. 22а.

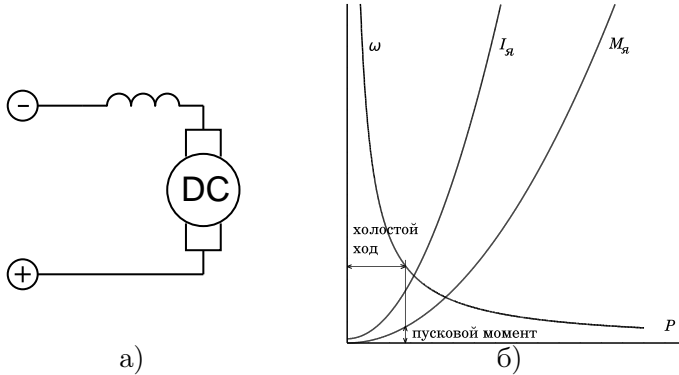


Рис. 22

Обмотка возбуждения включена последовательно обмотке якоря, поэтому ток возбуждения равен току якоря, т.е. $i_B = I_A$. Подставим уравнение (8) в уравнение (7) и получим угловую скорость вращения ротора:

$$\omega = \frac{U - I_A R_A}{c_D \Phi}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что электродвигатель с последовательным возбуждением опасно включать без нагрузки при $M = 0$, т.к. в этом случае $i_B = I_A \rightarrow 0$ и $\Phi \rightarrow 0$, следовательно $\omega \rightarrow \infty$, т.е. двигатель идёт в «разнос».

На рис. 22б показаны скоростная $\omega(P)$, электрическая $I(P)$ и механическая $M(P)$ характеристики электродвигателя с последовательным возбуждением.

Подставим (9) в (10) и найдём ток якоря: $I_A = \sqrt{c_D k M}$. Из полученного выражения следует, что при увеличении нагрузки на электродвигатель вдвое потребляемый ток возрастает в $\sqrt{2}$ раз, т.е. примерно на 40 %, что является существенным достоинством этого электродвигателя. В сочетании с возможностью (и даже необходимостью!) пуска под нагрузкой, эти свойства электродвигателя с последовательным возбуждением определяют области его применения в авиации — перемещение силовых агрегатов. Например: уборка и выпуск взлётно-посадочных устройств, изменение угла установки стабилизатора.

Электродвигатель с параллельным возбуждением (шунтовый) показан на рис. 23а.

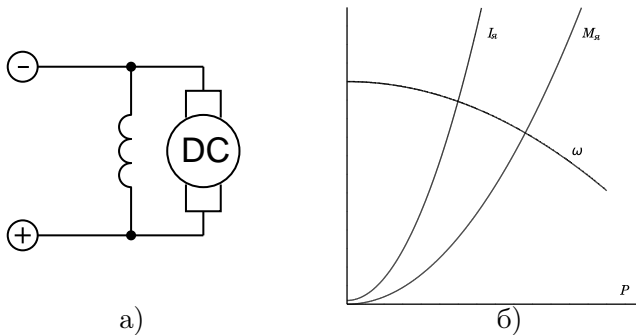


Рис. 23

Обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря, поэтому ток возбуждения равен:

$$i_B = \frac{U}{r_B},$$

где r_B — электрическое сопротивление обмотки возбуждения. Это означает, что возбуждение шунтового электродвигателя теоретически не зависит от нагрузки.

Подставим уравнение (9) в уравнение (11), тогда:

$$\omega = \frac{U - I_{\text{Я}}R_{\text{Я}}}{c_{\text{д}}k\dot{i}_{\text{В}}},$$

т. е. на холостом ходу (при $I_{\text{Я}} \rightarrow 0$) угловая скорость вращения ротора ограничена. При увеличении нагрузки на ротор угловая скорость его вращения немного снижается (в пределах 8–10 %).

На рис. 236 показаны скоростная $\omega(P)$, электрическая $I(P)$ и механическая $M(P)$ характеристики электродвигателя с параллельным возбуждением.

Основным недостатком шунтового электродвигателя является его реакция на остановку под нагрузкой. В этом случае увеличивается ток якоря $I_{\text{Я}}$, что приводит к перегреву электродвигателя. Область применения шунтового электродвигателя выбирается с учётом этого недостатка, например: привод топливного насоса.

Вопросы для самоконтроля

1. Признаки классификации и разновидности электроприводов?
2. Устройства передачи механической энергии?
3. Аппаратура управления, регулирования и защиты электроприводов?
4. Физический смысл приведённого момента инерции электропривода?
5. Принцип действия трёхфазного асинхронного электродвигателя переменного тока?
6. Чем отличаются синхронные электродвигатели переменного тока от асинхронных?
7. Принципиальная схема и графики характеристик серийного электродвигателя постоянного тока? Применение на самолёте?
8. Принципиальная схема и графики характеристик шунтового электродвигателя постоянного тока? Применение на самолёте?

Список литературы

- [1] Авиационные правила. Часть 25. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории/ *Межгосударственный авиационный комитет, Авиационный регистр* — СПб: ООО «СЗ РЦАИ», 6-е изд., 2020. — 314 с.
- [2] *Брускин Д. Э., Синдеев И. М.* Электроснабжение летательных аппаратов: Учеб. для энергет. и авиац. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1988. — 264 с.
- [3] Элементарный учебник физики. Т. 2. Электричество и магнетизм./ Под ред. Г. С. Ландсберга. — М.: Наука. Гл. ред физ.-мат. лит. Изд. 6-е испр., 1969. — 528 с.
- [4] Системы оборудования летательных аппаратов: Учебник для студентов высших технических учебных заведений/ М. Г. Акопов, В. И. Бекасов, В. Г. Долгушев и др.; Под ред. *А. М. Матвеевко, В. И. Бекасова.* — М.: Машиностроение, 2005. — 558 с.
- [5] *Синдеев И.М., Савелов А.А.* Системы электроснабжения воздушных судов: Учеб. для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1990. — 296 с.
- [6] Гидропривод постоянной частоты вращения электрического генератора самолёта: Метод. указания к лабораторной работе/ Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. *К. А. Нападов.* Самара, 1996. — 16 с.

Приложение 1. Приводы постоянных оборотов

Воздушно-турбинный привод

Устройство воздушно-турбинного привода постоянных оборотов (ППО) с мультипликатором на основе планетарной зубчатой передачи ⁶ показано на рис. 24 [2], где

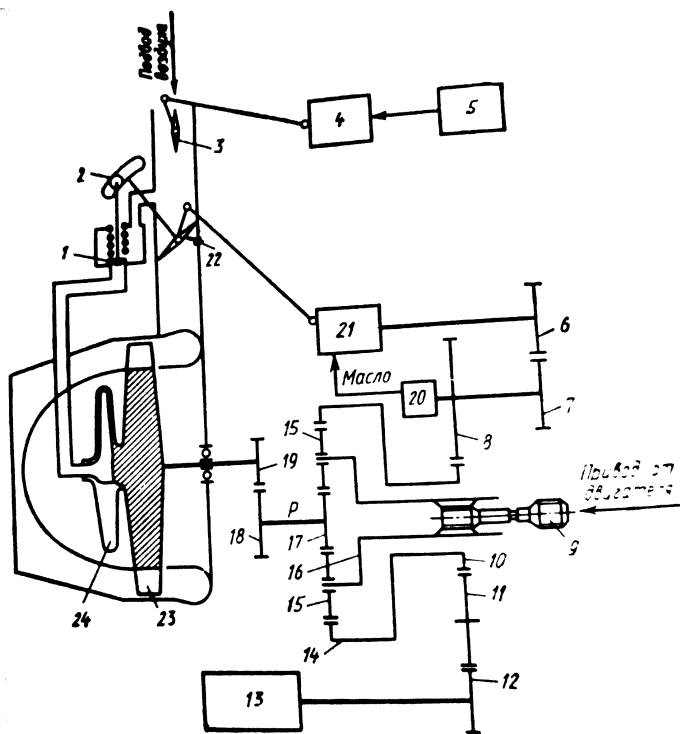


Рис. 24

1 — клапан перепуска сжатого воздуха; 2 — кулачковый механизм; 3 — пусковая заслонка; 4 — сервопоршень; 5 — блок управления пусковой заслонкой; 6, 7, 8 — зубчатые колёса жёсткой об-

⁶В источнике [5] это устройство называется пневматическим дифференциальным приводом с реверсом турбины.

ратной связи от ротора генератора; 9 — гибкий валик от коробки приводов самолётных агрегатов к первому входному звену мультипликатора; 10, 11, 12 — зубчатые колёса выходного звена ППО к ротору генератора; 13 — генератор; 14 — колокольное зубчатое колесо; 15 — сателлитные зубчатые колёса; 16 — водило, первое входное звено мультипликатора; 17 — солнечное зубчатое колесо; 18 — зубчатое колесо второго входа мультипликатора; 19 — зубчатое колесо соосное воздушной турбине ППО; 20 — маслонасос; 21 — центробежный регулятор; 22 — заслонка, регулирующая подачу воздуха в турбину; 23 — воздушная турбина; 24 — сегнерово колесо.

Планетарная зубчатая передача реализует закон изменения угловой скорости выходного звена, показанный на рис. 25, где

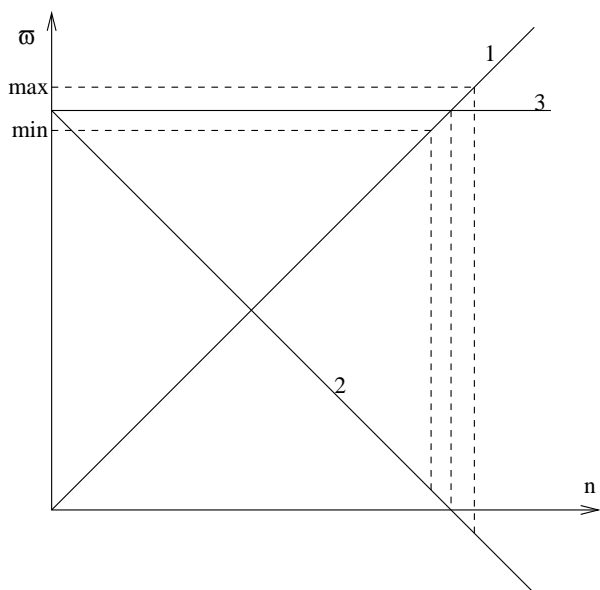


Рис. 25

n — частота вращения ротора авиадвигателя, с которого отбирается механическая мощность для привода самолётных агрегатов, зависит от положения рукоятки управления авиадвигателем;

ω_1 — угловая скорость первого входного звена мультипликатора, присоединённого к коробке приводов самолётных агрегатов через валик 9, зависит от n ;

ω_2 — угловая скорость второго входного звена мультипликатора, присоединённого к воздушной турбине 23, зависит от давления сжатого воздуха, отбираемого от компрессора авиадвигателя и положения заслонки 22;

ω_3 — угловая скорость выходного звена мультипликатора, присоединённого к ротору электрического генератора, зависит от нагрузки на генератор 13;

\min и \max — границы изменения угловой скорости ротора генератора, соответствующие допустимому диапазону изменения частоты переменного тока, вырабатываемого генератором.

Закон изменения угловой скорости ротора генератора 13 можно записать в следующей форме:

$$|\omega_3| = |\omega_1| \pm |\omega_2| = \text{const},$$

т. е., учитывая устройство ППО, регулятор 21 должен таким образом поворачивать заслонку 22, чтобы угловая скорость ротора генератора 13 оставалась постоянной.

Если:

$$|\omega_3| = |\omega_1| + |\omega_2| = \text{const},$$

то ППО работает в режиме докрутки, т. е. суммируется механическая энергия воздушной турбины 23 и коробки приводов самолётных агрегатов. Докрутка используется при положении рукоятки управления авиадвигателем «МАЛЫЙ ГАЗ» и далее до положения «НОМИНАЛЬНЫЙ». Положение заслонки 22 зависит от нагрузки на генератор 13 и частоты вращения ротора авиадвигателя, клапан 1 закрыт.

Если:

$$|\omega_3| = |\omega_1| = \text{const},$$

то ППО работает в режиме прямой передачи механической энергии от коробки приводов самолётных агрегатов через валик 9. Режим прямой передачи используется при положении рукоятки управления авиадвигателем «НОМИНАЛЬНЫЙ» крейсерского

полёта. Клапан 1 открывается кулачковым механизмом 2 при закрытии заслонки 22 таким образом, чтобы $\omega_2 = 0$, т. е. пусковой момент сегнерова колеса 24 суммируется с моментом от нагрузки на генератор 13 и уравнивает остаточный момент воздушной турбины 23.

Если:

$$|\omega_3| = |\omega_1| - |\omega_2| = \text{const},$$

то ППО работает в режиме скрутки, т. е. нагрузка на генератор 13, воздушная турбина 23 и сегнерово колесо 24 тормозят обороты от коробки приводов самолётных агрегатов. Скрутка используется при положении рукоятки управления авиадвигателем «МАКСИМАЛЬНЫЙ ГАЗ» и ниже до положения «НОМИНАЛЬНЫЙ». Заслонка 22 закрыта, клапан 1 открыт, скорость вращения сегнерова колеса 24 зависит от давления сжатого воздуха, давление — от положения рукоятки управления авиадвигателем.

Заслонка 22 поворачивается при перемещении штока сервопоршня регулятора 21. Давление масла для перемещения штока сервопоршня обеспечивает маслонасос 20, отбирающий механическую энергию с вала зубчатого колёса 8. Подача масла в сервопоршень регулируется золотниковым распределителем, смонтированным в корпусе центробежного регулятора 21.

Схема центробежного регулятора 21 показана на рис. 26 [2], где 1 — пружина; 2 — грузики; 3 — муфта; 4 — рычаг обратной связи; 5 — поршень с калиброванным отверстием (демпфер); 6 — цилиндр демпфера; 7 — сервопоршень регулятора; 8 — поршни золотника; 9 — заслонка, регулирующая подачу воздуха в турбину.

Грузики 2 качалками присоединены к штоку «от вала генератора» и тягами к муфте 3. Шток «от вала генератора» вращается с угловой скоростью ω_3 внутри муфты 3. При изменении ω_3 , грузики 2 изменяют свое положение относительно оси вращения. Если ω_3 увеличится, то грузики 2 поднимут муфту 3. Если ω_3 уменьшится, то грузики 2 переместят муфту 3 вниз.

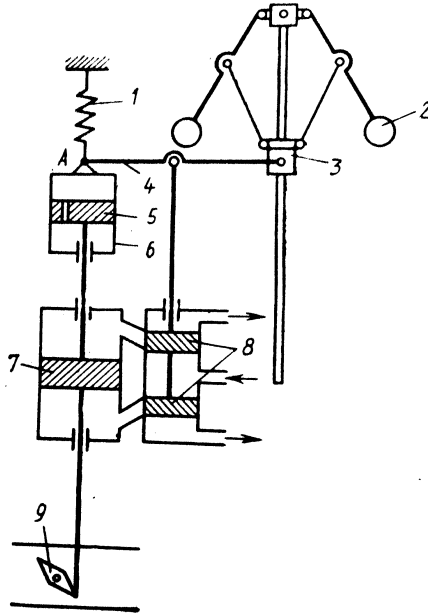


Рис. 26

Муфта 3 соединена рычагом 4 со штоком золотникового распределителя, поэтому перемещение грузиков 2 приведёт к перемещению поршней 8, открывающих подачу масла в полости над или под сервопоршнем 7. Шток сервопоршня 7 повернёт заслонку 9, регулирующую подачу воздуха в турбину, вследствие чего изменится подача воздуха, скорость вращения турбины ω_2 и ω_3 с небольшим запозданием вернётся к заданному значению. Запоздание обусловлено тем, что при перемещении штока сервопоршня 7 точка А цилиндра 6 демпфера также перемещается, деформируя пружину 1. Сила упругости пружины 1 начнёт восстанавливать прежнее положение точки А, но поршень 5 демпфера перемещается медленнее, вследствие перетекания жидкости через калиброванное отверстие. Демпфер 5 и пружина 1 предназначены для повышения устойчивости процесса регулирования.

Положение золотника определяется балансом действующих на него сил:

1. Сила пропорциональная равнодействующей центробежных сил, действующих на грузики регулятора 21⁷ при вращении с угловой скоростью вала зубчатого колеса 6. Зубчатые колёса 6, 7 и 8 обеспечивают жёсткую обратную связь от ротора генератора 13 по угловой скорости.
2. Сила упругости сжатой пружины, зависящая от жёсткости пружины и величины предварительной затяжки.
3. Сила гидравлического сопротивления перетеканию жидкости через калиброванное отверстие демпфера.

При изменении ω_3 баланс сил нарушается, золотник перемещается, масло поступает в сервопоршень и заслонка 22 меняет положение таким образом, чтобы восстановить баланс сил.

Стабилизация ω_3 только по угловой скорости называется грубым каналом регулирования [5]. Грубый канал регулирования обеспечивает стабилизацию ω_3 с погрешностью $\pm(1 \dots 5) \%$.

В источнике [5] представлена схема ППО, где предварительная затяжка пружины может изменяться в процессе работы по отклонению частоты переменного тока от заданного значения. Стабилизация ω_3 по отклонению частоты переменного тока называется точным каналом регулирования. Совместное применение грубого и точного каналов регулирования обеспечивает стабилизацию ω_3 с погрешностью до 0,25 %.

Гидромеханический привод

Устройство гидропривода постоянной частоты вращения с мультипликатором на основе планетарной зубчатой передачи показано на рис. 27 [6], где 1 — генератор; 2 — сервопоршень; 3 — гидромашин; 4 — фильтр тонкой очистки; 5 — обратный клапан системы наддува; 6 — маслбак с циклоном для обеспечения работы гидропривода при произвольном пространственном положении и отделения пузырьков воздуха от масла; 7 — насос подкачки масла для обеспечения бескавитационной работы

⁷Здесь и далее нумерация по рис. 24

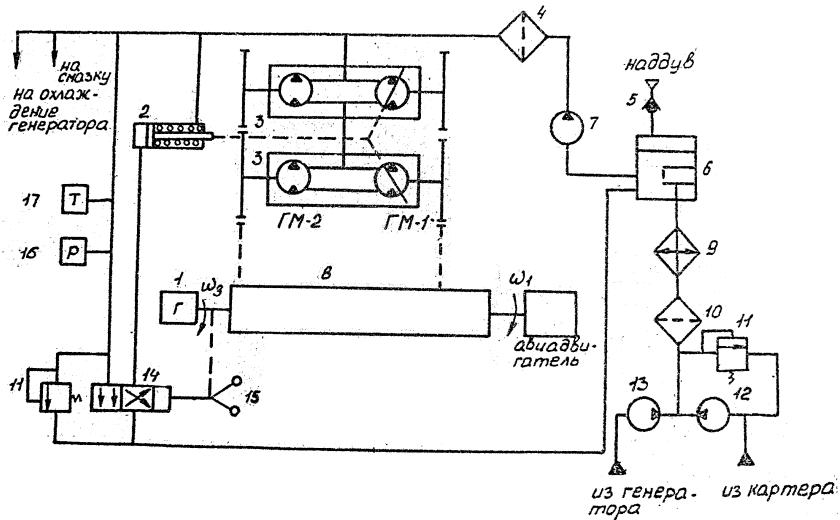


Рис. 27

гидромашин и компенсации утечек; 8 — мультипликатор; 9 — топливомасляный теплообменник; 10 — фильтр грубой очистки; 11 — предохранительные клапаны для сброса давления масла при неисправностях и низких температурах в момент запуска; 12 — насос откачки масла из картера привода; 13 — насос откачки масла из системы смазки и охлаждения генератора; 14 — золотниковый распределитель; 15 — центробежный регулятор; 16 — датчик давления масла; 17 — датчик температуры масла.

Все агрегаты гидропривода, кроме внешнего теплообменника 9, смонтированы в одном корпусе. Такая компоновка гидропривода называется интегральной⁸.

Ротор генератора 1 присоединён к выходу мультипликатора 8 и вращается с угловой скоростью:

$$|\omega_3| = |\omega_1| \pm k|\omega_2| = const,$$

⁸В источнике [5] это устройство называется интегральным гидромеханическим приводом с дифференциальным редуктором.

где ω_1 — угловая скорость вращения первого входа мультипликатора 8, присоединённого к коробке приводов самолётных агрегатов; ω_2 — угловая скорость вращения второго входа мультипликатора 8, присоединённого к гидромашинам 3; k — коэффициент, зависящий от конструкции мультипликатора.

На рис. 27 показаны две гидромашины 3. Каждая гидромашина 3 состоит из двух механически не связанных роторных аксиально-плунжерных гидромашин ГМ-1 и ГМ-2, конструктивная схема которых показана на рис. 28 [6].

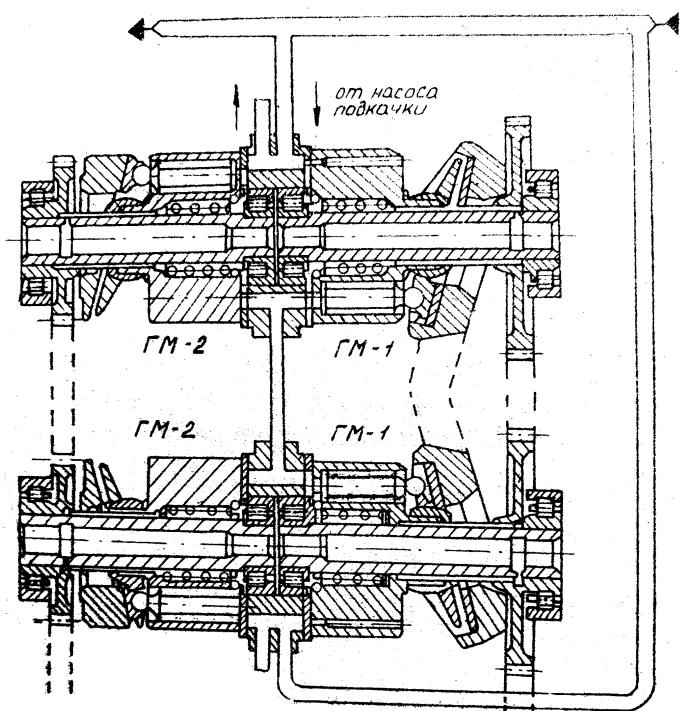


Рис. 28

Гидромашины 3 работают параллельно и соединяются с мультипликатором 8 зубчатыми колёсами. Это решение повысило серийность гидромашин и уменьшило габаритные размеры гидропривода.

Угол установки наклонной шайбы ГМ-2 $\gamma_2 = const$, следовательно его удельная подача $q_2 = const$.

Угол установки наклонной шайбы ГМ-1 $\gamma_1 = \pm var$, следовательно его удельная подача $q_1 = \pm var$.

Если $\gamma_1 > 0$, то ГМ-1 работает как насос, а ГМ-2 – как силовой привод вращательного действия (мотор). Если $\gamma_1 < 0$, то ГМ-1 работает как мотор, а ГМ-2 – как насос. Свойство обратимости гидромашин реализовано изменением только одного угла установки наклонной шайбы γ_1 , что существенно упрощает конструкцию гидропривода.

Между вращающимися блоками цилиндров ГМ-1 и ГМ-2 расположены неподвижные золотниковые распределители. Полости нагнетания и всасывания золотниковых распределителей общие для ГМ-1 и ГМ-2 в обеих гидромашинах 3. Полость всасывания золотникового распределителя соединена с насосом подкачки 7 для обеспечения бескавитационной работы и компенсации утечек масла. Давление в полости нагнетания определяется нагрузкой на генератор 1.

Если $\gamma_1 > 0$, то гидропривод работает в режиме докрутки, т. е. суммируется механическая энергия обеих гидромашин 3 и коробки приводов самолётных агрегатов. Докрутка используется при положении рукоятки управления авиадвигателем «МАЛЫЙ ГАЗ» и далее до положения «НОМИНАЛЬНЫЙ». Механическая энергия от коробки приводов самолётных агрегатов на мультипликаторе разделяется на два потока. Первый поток обеспечивает вращение с угловой скоростью ω_1 , второй – насосный режим работы ГМ-1, моторный – ГМ-2 и работу насосов 7, 12, 13. Механический момент на роторе генератора зависит от электрической нагрузки, следовательно давление в полости нагнетания золотникового распределителя обеспечивает механические моменты на выходах ГМ-2 такие, чтобы уравновесить момент на роторе генератора и зубчатые передачи «колесо от ГМ-2 – мультипликатор» вращались с угловой скоростью ω_2 . Тогда:

$$|\omega_3| = |\omega_1| + k|\omega_2| = const,$$

а блоки цилиндров ГМ-1 и ГМ-2 вращаются в противоположных направлениях.

Если $\gamma_1 = 0$, то гидропривод работает в режиме прямой передачи механической энергии от коробки приводов самолётных агрегатов. Режим прямой передачи используется при положении рукоятки управления авиадвигателем «НОМИНАЛЬНЫЙ» крейсерского полёта. Механическая энергия от коробки приводов самолётных агрегатов на мультипликаторе разделяется на два потока. Первый поток обеспечивает вращение с угловой скоростью ω_1 , второй — насосный режим работы ГМ-1 и работу насосов 7, 12, 13. Удельная подача $q_1 = 0$, поэтому $\omega_2 = 0$. Механический момент на роторе генератора зависит от электрической нагрузки, следовательно давление в полости нагнетания золотникового распределителя обеспечивает механические моменты на выходах ГМ-2 такие, чтобы уравновесить момент на роторе генератора и зубчатые передачи «колесо от ГМ-2 — мультипликатор» неподвижны. Тогда:

$$|\omega_3| = |\omega_1| = const,$$

а блоки цилиндров ГМ-2 не вращаются.

Если $\gamma_1 < 0$, то гидропривод работает в режиме скрутки, т. е. механическая энергия обеих гидромашин 3 вычитается из механической энергии от коробки приводов самолётных агрегатов. Скрутка используется при положении рукоятки управления авиадвигателем «МАКСИМАЛЬНЫЙ ГАЗ» и ниже до положения «НОМИНАЛЬНЫЙ». Механическая энергия от коробки приводов самолётных агрегатов на мультипликаторе разделяется на два потока. Первый поток обеспечивает вращение с угловой скоростью ω_1 , второй поток — моторный режим работы ГМ-1, насосный — ГМ-2 и работу насосов 7, 12, 13. Механический момент на роторе генератора зависит от электрической нагрузки, следовательно давление в полости нагнетания золотникового распределителя обеспечивает механические моменты на выходах ГМ-1 такие, чтобы уравновесить момент на роторе генератора и зубчатые передачи «колесо от ГМ-1 — мультипликатор» вращались с угловой скоростью ω_2 . Тогда:

$$|\omega_3| = |\omega_1| - k|\omega_2| = const,$$

а блоки цилиндров гидромашин ГМ-1 и ГМ-2 вращаются в одном направлении.

Давление в полостях нагнетания гидромашин 3 достигает 20 МПа, поэтому для управления γ_1 применён сервопоршень 2, шток которого присоединён к рычагам изменения углов установки наклонных шайб ГМ-1. На рис. 27 соединение показано условно пунктиром.

Конструктивная схема сервопоршня 2 показана на рис. 29 [6].

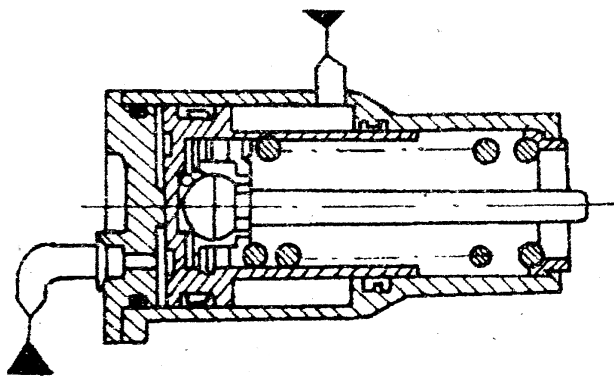


Рис. 29

Пружина в сервопоршне 2 устанавливает наклонные шайбы в исходное положение перед запуском гидропривода. После запуска гидропривода в правую полость сервопоршня 2 подаётся давление из насоса подкачки 7. Площади поршня в правой и левой полостях различны, поэтому при одинаковых давлениях в полостях, поршень перемещается в крайнее правое положение. Левая полость сервопоршня 2 соединена с золотниковым распределителем 14.

Распределитель 14 соединён с линиями нагнетания от насоса подкачки 7 и слива в маслобак 6, следовательно при изменении давления на выходе распределителя 14 от давления нагнетания до давления слива, шток сервопоршня 2 перемещается из крайнего правого в исходное положение.

Распределитель 14 работает совместно с центробежным регулятором 15 частоты вращения. Конструктивная схема распределителя 14 и регулятора 15 показана на рис. 30 [6], где

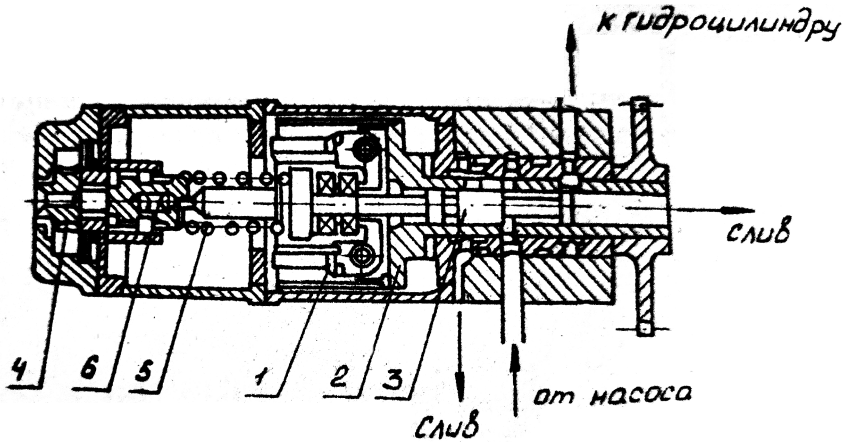


Рис. 30

1 — грузики центробежного регулятора; 2 — гильза; 3 — золотник; 4 — регулировочный винт; 5 — пружина; 6 — предохранительная пружина.

Грузики 1 центробежного регулятора имеют форму двулучей качалки на оси качания неподвижной относительно гильзы 2. Гильза 2 через зубчатую передачу соединена с ротором генератора и вращается с пропорциональной частотой. Под действием центробежных сил грузики 1 расходятся от оси вращения гильзы 2 и поворачиваются на оси качания. Другое плечо качалки перемещает золотник 3 влево, сжимая пружину 5 до тех пор, пока упругая сила сжатой пружины 5 не уравновесит силу другого плеча качалки-грузика 1. На установившемся режиме работы гидропривода пояски золотника 3 перекрывают окна гильзы 2 таким образом, чтобы обеспечить давление в левой полости сервопоршня, при котором угол установки наклонных шайб ГМ-1 обеспечит подачу жидкости достаточную для выполнения условия $\omega_3 = const$.

Настройка частоты вращения ротора генератора ω_3 выполняется регулировочным винтом 4 для предварительной затяжки пружины 5. При изменении ω_1 , вследствие изменения режима работы авиадвигателя, или ω_3 , вследствие изменения нагрузки на генератор, баланс сил на золотнике 3 нарушается и он перемещается в осевом направлении, что приведёт к перемещению штока сервопоршня и изменению угла γ_1 . Жёсткость пружины 5 и масса грузиков 1 подбирается таким образом, чтобы реализовать быстрозатухающий процесс пульсаций давления в полостях нагнетания и стабилизацию частоты вращения ротора генератора в установленных пределах.

Отказ гидропривода ведёт к снижению мощности источников питания системы электроснабжения, но не должен приводить к пожару или разрушению соседних агрегатов [1].

Разрушение соседних агрегатов возможно осколками ротора генератора при чрезмерном разгоне, вследствие заклинивания гильзы 2 или золотника 3.

При заклинивании гильзы 2 золотник 3 перемещается влево, вследствие разгона ротора генератора и расхождения грузиков 1. Золотник открывает замок предварительной затяжки предохранительной пружины 6, она разжимается и перемещает золотник вправо до положения, при котором левая полость сервопоршня соединена с линией слива в маслобак.

При заклинивании золотника 3 в положении, при котором левая полость сервопоршня соединена с линией нагнетания от насоса подкачки, срабатывает автоматическая система защиты. Механизм защиты представляет собой зубчатую муфту на входе мультипликатора и показан на рис. 31 [6].

На рис. 31а зубчатая муфта показана в сцеплении с валом коробки приводов самолётных агрегатов, на рис. 31б зубчатая муфта расцеплена. Расцепление муфты выполняется предохранительным стержнем, на конце которого нанесены несколько зубцов резьбы, ответные витки резьбы нанесены на муфту. При перемещении стержня в радиальном направлении зубцы стержня и муфты соединяются и вращение муфты выводит вал мультипликатора из соединения с валом коробки приводов.

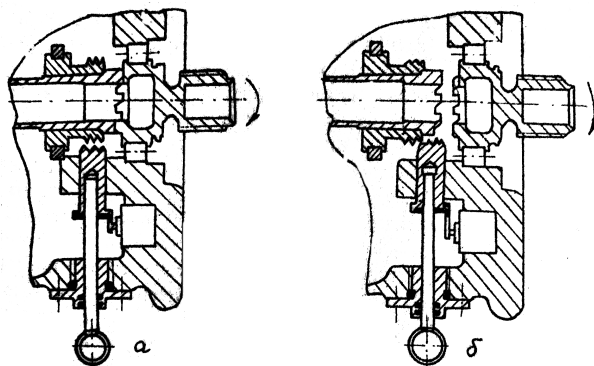


Рис. 31

Угрозу пожара контролирует датчик 17 температуры масла, разрушение корпуса — датчик 16 давления масла. По сигналам датчиков срабатывает автоматическая система защиты.

Выше было отмечено, что механическая энергия от коробки приводов самолётных агрегатов на мультипликаторе разделяется на два потока. Первый поток обеспечивает вращение с угловой скоростью ω_1 , второй — работу гидромашин 3 и насосов 7, 12, 13. Проанализируем распределение второго потока энергии с учётом того, что источником энергии моторного режима работы гидромашин 3 является насос подкачки 7.

По конструкции насос подкачки 7 выполнен шестерённым с внутренним зацеплением зубьев, имеющих циклоидальный профиль. Ведущее внутреннее зубчатое колесо имеет на один зуб меньше, чем ведомое внешнее и установлено с эксцентриситетом относительно оси вращения внешнего колеса. Аналогичную конструкцию имеют насосы откачки 12 и 13 из картера и генератора. Все насосы получают энергию для вращения от вала генератора 1, что обеспечивает постоянную подачу масла на любых режимах работы двигателя после запуска, выхода на режим «МАЛЫЙ ГАЗ» и достижения $\omega_3 = const$.

До выхода на режим «МАЛЫЙ ГАЗ» генератор 1 отключен от системы электроснабжения, его ротор вращается практически

свободно с угловой скоростью $\omega_3 \sim \omega_1(n)$. Второй поток механической энергии расходуется на прокрутку роторов гидромашин 3, генератора 1 и насосов 7, 12, 13. Вращение насоса 7 приведёт к подаче масла в золотниковый распределитель гидромашин 3 и постепенному замещению части механической энергии второго потока на гидравлическую энергию насоса подкачки 7. Изменение доли гидравлической энергии насоса подкачки 7 стабилизируется после выхода двигателя на режим «МАЛЫЙ ГАЗ» и достижения $\omega_3 = const$.

Приложение 2. Характеристики переменного тока

Напряжение

Мгновенное значение напряжения переменного тока в момент времени t :

$$u(t) = U_M \sin \omega t,$$

где U_M — амплитуда напряжения, ω — круговая частота переменного тока.

Амплитудой называется модуль максимума мгновенного напряжения (или силы тока) на промежутке времени $\Delta t = T$, где T — период синусоидной функции.

Среднеквадратичное значение напряжения по определению:

$$U \equiv \sqrt{U_{\text{cp}}^2},$$

где U_{cp} — среднее значение напряжения за выбранный промежуток времени Δt .

Если $\Delta t = T$, то:

$$U_{\text{cp}}^2 = U_M^2 (\sin^2 \omega t)_{\text{cp}}, \quad (\sin^2 \omega t)_{\text{cp}} = (\cos^2 \omega t)_{\text{cp}} = \frac{1}{2},$$

следовательно

$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}.$$

Сила тока

Мгновенное значение силы тока в момент времени t :

$$i(t) = I_M \sin \omega t,$$

где I_M — амплитуда силы тока.

Среднеквадратичное значение силы тока по определению:

$$I \equiv \sqrt{I_{\text{cp}}^2},$$

где I_{cp} — среднее значение силы тока за выбранный промежуток времени Δt .

Если $\Delta t = T$, то:

$$I_{\text{cp}}^2 = I_{\text{M}}^2 (\sin^2 \omega t)_{\text{cp}},$$

следовательно

$$I = \frac{I_{\text{M}}}{\sqrt{2}}.$$

Мощность

Мгновенная мощность $p(t)$, затрачиваемая в цепи однофазного переменного тока равна:

$$p(t) = u(t)i(t) = U_{\text{M}}I_{\text{M}} \sin \omega t \sin(\omega t + \varphi),$$

где φ — разность фаз напряжения и силы тока в момент времени t . Выражение $p(t)$ записано в предположении, что начало системы координат выбрано таким образом, что в момент времени $t = 0$:

$$u(t) = 0, \quad i(t) = I_{\text{M}} \sin \varphi.$$

В случае многофазного переменного тока в выражение $p(t)$ добавится сомножитель m , равный числу фаз.

Используя тригонометрические функции суммы углов и кратных углов, преобразуем мгновенную мощность к виду:

$$p(t) = U_{\text{M}}I_{\text{M}} (\sin^2 \omega t \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin 2\omega t \sin \varphi).$$

Средняя мощность P_{cp} , затрачиваемая в цепи переменного тока за промежуток времени $\Delta t = T$:

$$P_{\text{cp}} = \frac{U_{\text{M}}I_{\text{M}}}{2} \cos \varphi.$$

Активная мощность:

$$P_{\text{a}} = UI \cos \varphi,$$

т. е. мощность, затрачиваемая на преодоление омических сопротивлений. Заметим, что $P_a = P_{\text{ср}}$.

Реактивная мощность:

$$P_p = UI \sin \varphi,$$

т. е. мощность затрачиваемая на создание магнитных полей в конденсаторах и катушках индуктивности.

Полная мощность:

$$P_{\text{п}} = P_a + P_p = UI(\cos \varphi + \sin \varphi).$$

Кажущаяся мощность:

$$P_{\text{к}} = \sqrt{P_a^2 + P_p^2} = UI.$$

Учебное издание

Мрыкин Сергей Викторович

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ САМОЛЁТОВ

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета
Компьютерная вёрстка автора в L^AT_EX 2_ε

Подписано в печать 24.05. 2023. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 4,0 .

Тираж 27 экз. Заказ .

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»

(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.