

УДК 621.316.72

Г. Н. УТЛЯКОВ, А. Р. ВАЛЕЕВ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОМПАУНДИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Приведены результаты расчетов и экспериментальных исследований систем регулирования электромашинных преобразователей. *Электромашинные преобразователи; магнитоэлектрические генераторы; математическая модель; регулирование напряжения; регулирование частоты*

Системы электроснабжения переменного трехфазного тока постоянной частоты являются основными системами электроснабжения современных летательных аппаратов.

В качестве источников электропитания первичных систем электроснабжения широко применение получили бесконтактные генераторы с электромагнитным возбуждением. В последнее время разрабатываются системы автоматического регулирования напряжения генераторов с использованием энергии высших гармоник электромагнитного поля — системы гармонического компаундирования (СГК). Такие системы описаны в [1, 2]. Генератор с СГК имеет меньшую массу и габариты, чем генератор со штатной аппаратурой регулирования, обладает высоким быстродействием и обеспечивает достаточную точность.

Представляется перспективным применение СГК при построении систем регулирования выходных параметров электромашинных преобразователей (ЭМП). Регулирование ЭМП необходимо производить по двум каналам — по частоте и напряжению.

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

В отечественной литературе довольно подробно рассмотрены системы регулирования частоты электромашинных преобразователей постоянного тока в переменный. Регулирование частоты преобразователя осуществляется посредством изменения частоты вращения двигателя путем изменения тока в управляющей обмотке двигателя.

Однако в ЭМП при включении и отключении нагрузки изменяется напряжение генератора, при этом изменяется входное напряжение на измерительном и усилительном ор-

ганах. Уменьшение сигнала управления измерительным органом приводит к увеличению длительности восстановления частоты преобразователя. Измерительный орган частоты получает сигнал от обмотки генератора переменного тока. При этом коэффициент передачи измерительного органа регулятора низкий, что не позволяет обеспечить высокую точность и качество регулирования частоты ЭМП.

В режимах работы, близких к режиму короткого замыкания, напряжение генератора значительно снижается. Измерительный орган частоты на время короткого замыкания остается без сигнала управления и время восстановления выходных характеристик преобразователя после отключения короткого замыкания большое, так как определяется постоянными времени измерительного органа, усилительного органа и постоянной времени обмотки управления двигателя постоянного тока. В последних разработках для устранения этого явления применяют отдельный тахогенератор, что увеличивает массу системы.

С целью повышения точности поддержания частоты и быстродействия системы регулирования частоты при всех режимах работы ЭМП было предложено снабдить генератор переменного тока гармонической обмоткой, которая имеет утроенное число пар полюсов по отношению к основной обмотке генератора и подключена к входу измерительного органа регулятора частоты (рис. 1) [3]. Выполнение генератора с гармонической обмоткой позволяет обеспечить работу измерительного органа частоты при различных режимах работы преобразователя, вплоть до режима короткого замыкания.

При питании регулятора частоты от гармонической обмотки 3 увеличивается коэффициент усиления системы, так как приращению частоты в основной обмотке генератора 2 соответствует утроенное приращение частоты в гармонической обмотке 3, что эквивалентно увеличению коэффициента усиления системы, а точность регулирования пропорциональна коэффициенту усиления системы.

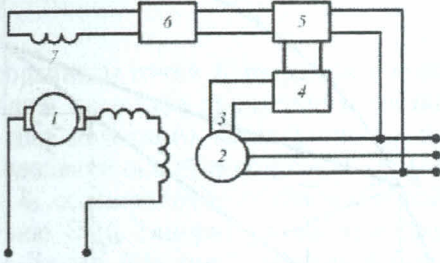


Рис. 1. Электромашинный преобразователь с СГК: 1 — двигатель, 2 — генератор, 3 — гармоническая обмотка, 4 — измерительный орган частоты, 5 — усилитель, 6 — выпрямитель, 7 — управляющая обмотка двигателя

Экспериментальные исследования электромашинного преобразователя с гармонической обмоткой показали, что в режимах пуска и включения нагрузок предлагаемая система позволяет сократить время восстановления выходных параметров более чем в 1,5 раза. После короткого замыкания указанное время сокращается в 3 ÷ 3,8 раза [1].

Увеличение быстродействия системы при пуске и внезапном включении нагрузки также объясняется увеличением коэффициента усиления всей системы регулирования частоты электромашинного преобразователя.

Уменьшение времени восстановления выходной частоты после короткого замыкания объясняется тем, что при коротком замыкании генератора в известной системе на измерительный орган 4 сигнал не подается, а в предложенной системе питание системы регулирования осуществляется во всех режимах.

Увеличение тока генератора вплоть до короткого замыкания вызывает увеличение напряжения гармонической обмотки, т.е. на управляющую обмотку магнитного усилителя подается сигнал рассогласования по частоте. После отключения короткого замыкания время переходного процесса определяется только постоянными времени рабочей обмотки магнитного усилителя и инерционностью двигателя.

Для оценки характеристик системы регулирования частоты была разработана ма-

тематическая модель и построена структурная схема канала регулирования частоты ЭМП [4]. Структурная схема представлена на рис. 2.

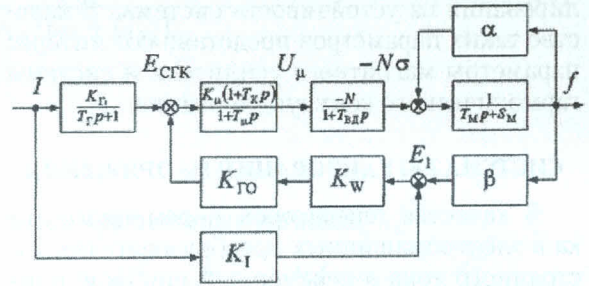


Рис. 2. Структурная схема канала регулирования частоты ЭМП с СГК

Для звеньев и системы в целом были выведены передаточные функции и проведен анализ системы регулирования частоты в статических и динамических режимах работы.

Характеристическое уравнение структурной схемы имеет вид:

$$p^4 T_{вд} T_{Г} T_{М} T_{μ} + p^3 [(\alpha + S_{М}) T_{вд} T_{Г} T_{μ} + T_{М} (T_{Г} T_{μ} + T_{вд} T_{μ} + T_{вд} T_{Г})] + p^2 [(\alpha + S_{М}) (T_{Г} T_{μ} + T_{вд} T_{μ} + T_{вд} T_{Г}) + T_{М} (T_{вд} + T_{Г} + T_{μ}) + T_{Г} T_{к} N K_{μ} \beta K_{Г} K_{У}] + p [(\alpha + S_{М}) (T_{вд} + T_{Г} + T_{μ}) + T_{М} + N K_{μ} \beta K_{Г} K_{У} (T_{к} + T_{Г})] + N K_{μ} \beta K_{Г} K_{У} + \alpha + S_{М} = 0. \quad (1)$$

Структурная схема позволяет определить область устойчивости процессов регулирования частоты в зависимости от параметров нагрузки, системы гармонического компаундирования и электромашинного преобразователя. Для устойчивости системы по критерию Гурвица коэффициенты характеристического уравнения должны удовлетворять следующим условиям [5]:

$$\begin{aligned} a_0 &= T_{вд} T_{Г} T_{М} T_{μ} > 0; \\ a_1 &= (\alpha + S_{М}) T_{вд} T_{Г} T_{μ} + T_{М} (T_{Г} T_{μ} + T_{вд} T_{μ} + T_{вд} T_{Г}) > 0; \\ a_2 &= (\alpha + S_{М}) \times (T_{Г} T_{μ} + T_{вд} T_{μ} + T_{вд} T_{Г}) + T_{М} (T_{вд} + T_{Г} + T_{μ}) + T_{Г} T_{к} N K_{μ} \beta K_{Г} K_{У} > 0; \\ a_3 &= (\alpha + S_{М}) (T_{вд} + T_{Г} + T_{μ}) + T_{М} + N K_{μ} \beta K_{Г} K_{У} (T_{к} + T_{Г}) > 0; \\ a_4 &= N K_{μ} \beta K_{Г} K_{У} + \alpha + S_{М} > 0; \\ a_1 (a_3 a_2 - a_4 a_1) - a_3^2 a_0 &> 0. \end{aligned} \quad (2)$$

По системе (2) возможно определить пределы изменения одного или нескольких параметров в области, в которой система сохраняет устойчивость, определить закономерность влияния параметров ЭМП и системы регулирования на устойчивость системы. В качестве таких параметров представляют интерес параметры магнитного усилителя и системы гармонического компаундирования.

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В качестве генераторов переменного тока в электромашинных преобразователях постоянного тока в переменный широкое применение получили магнитоэлектрические генераторы (МЭГ). Регулирование напряжения МЭГ производится изменением магнитного сопротивления сердечника якоря.

С целью снижения массы и габаритов систем регулирования ЭМП, повышения качества регулирования было предложено использование одной гармонической обмотки в качестве датчика обоих каналов регулирования ЭМП – напряжения и частоты [6].

Для исследования и разработки систем автоматического регулирования напряжения МЭГ с SGK необходимо разработать математические модели и провести исследования процессов регулирования напряжения в штатных и аварийных ситуациях при статических и динамических режимах работы ЭМП с системами гармонического компаундирования. Также необходимо определить закон изменения тока подмагничивания от тока нагрузки для построения регулятора напряжения в системе автоматического регулирования генератора.

Наличие постоянных магнитов в магнитной цепи определяет особенности электромагнитных процессов в генераторе. В основе электромагнитных расчетов и расчетов магнитных цепей лежит кривая размагничивания магнита, устанавливающая связь между основными параметрами магнита и параметрами внешней магнитной цепи, а также продольной составляющей поля реакции якоря. Построение рабочей диаграммы в относительных единицах позволяет производить расчеты для различных материалов магнитов. На рис. 3 представлена приведенная рабочая диаграмма стабилизированного магнита [7].

По рабочей диаграмме магнита состояние магнита при коротком замыкании (точка K) определяется как точка пересечения кривой A и прямой короткого замыкания $b = h x'_S, x'_S = x_S + \frac{R_a^2}{x_q}$. Здесь x_S – реактивное сопротив-

ление рассеяния, x_q – поперечное индуктивное синхронное сопротивление, R_a – активное сопротивление обмотки якоря.

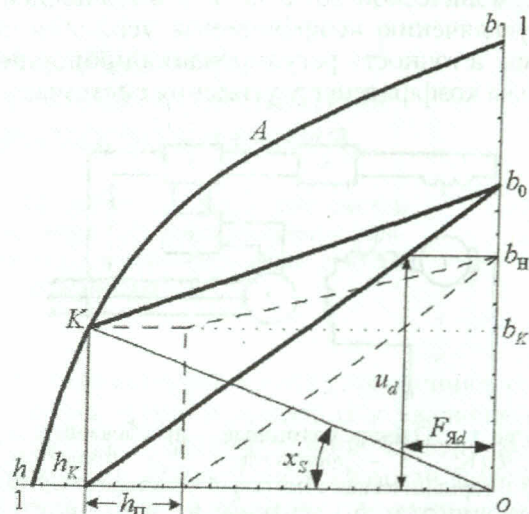


Рис. 3. Рабочая диаграмма магнита

В литературе для нахождения кривой A используется графоаналитический метод. Но данный метод не пригоден для построения математической модели. Поэтому ставится задача определения аналитического выражения, описывающего кривую A . В результате решения задачи получено следующее уравнение, которое может быть использовано при построении математической модели:

$$b = -\frac{hG_\delta(G_\delta + 2G_\sigma)}{2(G_\delta + G_\sigma)} + \frac{G_\delta^2 + G_\delta(1 + G_\sigma)}{2a(G_\delta + G_\sigma)} - \frac{G_\delta^2}{2a(G_\delta + G_\sigma)} \times \left\{ \left(h \left(a + \frac{2aG_\sigma}{G_\delta} \right) - 1 - \frac{1 + G_\sigma}{G_\delta} \right)^2 - 4(1 - h(1 + G_\sigma) + h^2 a G_\sigma) \times \left(\frac{a}{G_\delta} - \frac{aG_\sigma}{G_\delta^2} \right) \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

где a – остаточный коэффициент материала магнита, G_σ – магнитная проводимость рассеяния, G_δ – магнитная проводимость воздушного зазора машины. Значения h_K и b_0 находятся по выражениям:

$$h_K = \frac{G_\delta (x'_S (1 + G_\sigma) + G_\delta (1 + x'_S + G_\sigma))}{2a (x'_S + G_\delta) (G_\delta G_\sigma + x'_S (G_\delta + G_\sigma))} - \frac{G_\delta \sqrt{(G_\delta x'_S + (1 + G_\sigma) (x'_S + G_\delta))^2 - 4a (x'_S + G_\delta) (G_\delta G_\sigma + x'_S (G_\delta + G_\sigma))}}{2a (x'_S + G_\delta) (G_\delta G_\sigma + x'_S (G_\delta + G_\sigma))}, \quad (4)$$

$$b_0 = \left(x'_S + \frac{G_\delta (G_\sigma + \rho)}{G_\sigma + \rho + G_\delta} \right) h_K.$$

Координаты точки K выражают в соответствующем масштабе продольную составляющую тока короткого замыкания I_K и ЭДС по продольной оси при коротком замыкании. Точка b_0 соответствует стабилизированному значению ЭДС генератора на холостом ходу E_0 . Линия Kb_0 представляет собой ЭДС машины от тока нагрузки, а линия $h_K b_0$ — внешнюю характеристику генератора при чисто индуктивной нагрузке.

На рис. 3 пунктиром показана внешняя характеристика генератора при таком токе подмагничивания, что на холостом ходу ЭДС генератора равно номинальному напряжению. При регулировании напряжения генератора подмагничиванием спинки статора действие обмотки подмагничивания аналогично действию реакции якоря. При увеличении тока в обмотке подмагничивания ЭДС генератора на холостом ходу уменьшается и определяется действующим значением индукции в сердечнике машины b_{Π} . Зависимость индукции b_{Π} от тока подмагничивания $b_{\Pi} = f(h_{\Pi})$ в координатах рабочей диаграммы показана на рис. 4.

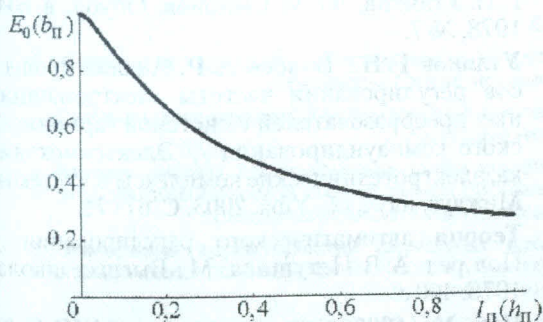


Рис. 4. Зависимость ЭДС от тока подмагничивания

Зная внешнюю характеристику при $\cos \varphi = 0$, можно рассчитать внешнюю характеристику генератора при различных значениях коэффициента мощности нагрузки [8]. Внешние характеристики хорошо описыва-

ются уравнениями эллипса

$$1 = \frac{U^2}{E_0^2} + \frac{I^2}{I_K^2} + 2 \frac{UI}{E_0 I_K} \cos(\varphi - \beta), \quad (5)$$

где $\beta = \arctan \left(\frac{x_d}{R_a} \right)$, x_d — продольное индуктивное синхронное сопротивление.

В масштабе рабочей диаграммы с учетом влияния тока подмагничивания $b_{\Pi} = f(h_{\Pi})$ выражение (5) приобретает вид

$$1 = \frac{b^2}{b_{\Pi}^2} + \frac{h^2}{(h_K - h_{\Pi})^2} + 2 \frac{bh}{b_{\Pi} (h_K - h_{\Pi})} \cos(\varphi - \beta). \quad (6)$$

Семейство внешних характеристик представлено на рис. 5.

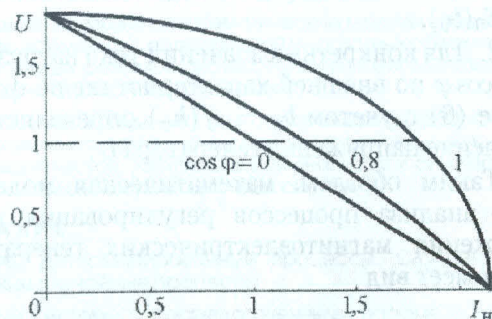


Рис. 5. Внешние характеристики генератора при различных значениях $\cos \varphi$

Используя уравнение (6), можно определить превышение выходного напряжения над номинальным значением, а также определить значение тока подмагничивания, необходимое для поддержания выходного напряжения на требуемом уровне. Алгоритм расчета требуемых регулировочных характеристик следующий:

1. По формулам (4) из рабочей диаграммы магнита определяются значения тока короткого замыкания $I_K (h_K)$ и ЭДС холостого хода $E_0 (b_0)$.

2. Для конкретных значений тока нагрузки I и $\cos \varphi$ с учетом зависимости $b_{\Pi} = f(h_{\Pi})$, решая уравнение относительно тока подмагничивания h_{Π} , получаем требуемый закон регулирования, необходимый для поддержания номинального напряжения на выходе генератора при изменении тока нагрузки.

На рис. 6 представлены требуемые регулировочные характеристики генераторов для обеспечения автоматического регулирования напряжения.

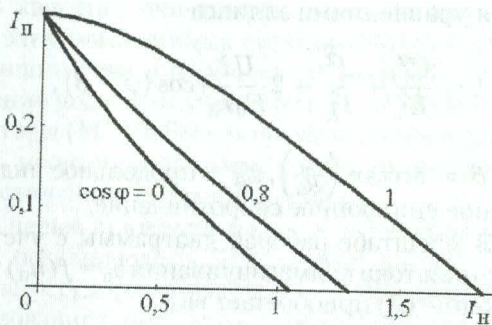


Рис. 6. Требуемые регулировочные характеристики

Для расчета внешней характеристики генератора при известном законе регулирования $b_{\Pi} = f(h_{\Pi})$ алгоритм следующий.

1. По формулам (4) из рабочей диаграммы магнита определяются значения тока короткого замыкания $I_K(h_K)$ и ЭДС холостого хода $E_0(b_0)$.

2. Для конкретных значений тока нагрузки I и $\cos \varphi$ по внешней характеристике по формуле (6) с учетом $b_{\Pi} = f(h_{\Pi})$ определяется значение напряжения генератора U .

Таким образом, математическая модель для анализа процессов регулирования напряжения магнитоэлектрических генераторов имеет вид

$$h_K = \frac{G_{\delta}(x'_S(1+G_{\sigma})+G_{\delta}(1+x'_S+G_{\sigma}))}{2a(x'_S+G_{\delta})(G_{\delta}G_{\sigma}+x'_S(G_{\delta}+G_{\sigma}))} - \frac{G_{\delta}\sqrt{(G_{\delta}x'_S+(1+G_{\sigma})(x'_S+G_{\delta}))^2-4a(x'_S+G_{\delta})(G_{\delta}G_{\sigma}+x'_S(G_{\delta}+G_{\sigma}))}}{2a(x'_S+G_{\delta})(G_{\delta}G_{\sigma}+x'_S(G_{\delta}+G_{\sigma}))},$$

$$b_0 = \left(x'_S + \frac{G_{\delta}(G_{\sigma}+\rho)}{G_{\sigma}+\rho+G_{\delta}}\right) h_K,$$

$$b_{\Pi} = f(h_{\Pi}),$$

$$1 = \frac{b^2}{b_{\Pi}^2} + \frac{h^2}{(h_K - h_{\Pi})^2} + 2 \frac{bh}{b_{\Pi}(h_K - h_{\Pi})} \cos(\varphi - \beta). \quad (7)$$

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель канала регулирования частоты позволяет проводить анализ устойчивости процессов регулирования частоты в статических и динамических режимах работы в зависимости от параметров нагрузки, системы гармонического компаундирования и электромашинного преобразователя.

Разработана математическая модель канала регулирования напряжения электромашинного преобразователя, позволяющая проводить исследование процессов регулирования напряжения ЭМП с СГК.

Результаты исследований позволят выработать требования к системам регулирования напряжения и частоты с использованием систем гармонического компаундирования.

Использование систем гармонического компаундирования в системах регулирования электромашинных преобразователей позволяет снизить массу и габариты систем регулирования, уменьшить постоянную времени каналов регулирования, что позволяет повысить качество регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Утляков Г. Н., Куляпин В. М., Бовтрикова Е. В. Комбинированные системы регулирования напряжения синхронных генераторов. М.: Изд-во МАИ, 1998. 224 с.
2. Утляков Г. Н. Системы регулирования и защиты автономных источников электропитания с использованием высших гармоник магнитного поля // Вестник УГАТУ. 2000. № 2. С. 183–188.
3. А. с. № 594571 (СССР). МКИ H02P 11/16. Электромашинный преобразователь постоянного тока в переменный / В. М. Куляпин, Г. Н. Утляков, Ю. М. Смирнов. Оpubл. в БИ. 1978. № 7.
4. Утляков Г. Н., Валеев А. Р. Анализ процессов регулирования частоты электромашинных преобразователей с системой гармонического компаундирования // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвуз. науч. сб. Уфа, 2003. С. 67–71.
5. Теория автоматического регулирования / Под ред. А. В. Нетушила. М.: Высшая школа, 1976. 400 с.
6. Пат. № 41206 на полезн. модель. МПК H 02 K 47/02, H 02 P 11/06. Электромашинный преобразователь постоянного тока в переменный / Г. Н. Утляков, А. Р. Валеев. Оpubл. 10.10.2004. Бюл. № 28.
7. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина. М.: Энергия, 1980. 488 с.
8. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.

ОБ АВТОРАХ

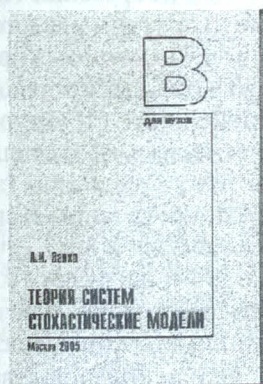


Утляков Геннадий Николаевич, проф., каф. электрооборуд. ЛА и наземн. трансп. Дипл. инж. по электр. машинам и аппаратам (УГАТУ, 1971). Д-р техн. наук по элтам и устр. выч. техники и сист. упр-я (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем электрооборудования ЛА.



Валеев Азат Рустамович, аспирант той же каф. Дипл. инж. по электрооборуд. ЛА (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. систем регулирования электрооборудования ЛА.

Сигнальная информация



А. И. Заико
ТЕОРИЯ СИСТЕМ
СТОХАСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Учебное пособие

Москва: Изд-во МАИ, 2005

196 с. Табл. 6. Ил. 46. Библиогр.: 26 назв. ISBN 5-7035-2352-4

Рассмотрена теория случайных и детерминированных сигналов, приведены математические модели стационарных и нестационарных линейных стохастических систем во временной, операторной и частотных областях, сравнены различные методы анализа переходных и установленных режимов систем, изложены методы измерения случайных сигналов и идентификации стохастических систем.

Предназначено для магистрантов, обучающихся в высших учебных заведениях по направлениям 553000 «Системный анализ и управление» и 552900 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств». Пособие полезно для студентов, аспирантов и специалистов, занимающихся анализом и синтезом информационно-измерительных, управляющих и телекоммуникационных систем.

СОДЕРЖАНИЕ

- 1. Сигналы и процессы.** Определения и классификация. Детерминированные процессы. Случайные процессы. Стационарные гауссовские случайные процессы.
- 2. Системы и их модели.** Классификация систем. Линейные системы с сосредоточенными параметрами. Линейные нестационарные системы.
- 3. Режимы систем.** Классификация режимов. Взаимодействие системы с источником сигнала и нагрузкой. Трансформация режимов стационарной системы при детерминированном сигнале. Стационарная система при случайном сигнале. Нестационарные системы при случайном сигнале.
- 4. Измерение характеристик случайных процессов.** Источники погрешностей. Комплексный подход к определению погрешностей. Распределения вероятностей. Характеристические функции. Моментные характеристики. Спектральные плотности.
- 5. Повышение точности измерений.** Задачи и методы повышения точности. Выбор погрешности измерения реализации. Выбор длительности реализации. Выбор максимума аргумента ковариационной функции при измерении спектральной плотности. Выбор метода измерения спектральной плотности.
- 6. Идентификация систем.** Проверка систем на адекватность модели. Измерение параметров стационарных систем. Измерение параметров нестационарных систем.