

ДИСКРЕТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОНДЕНСАТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ МОЩНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В работе рассмотрен компенсатор реактивной мощности в пусковых режимах мощных асинхронных двигателей судовых электроэнергетических систем.

Пример компенсирующего устройства с четырьмя трехфазными секциями конденсаторов C1a, C1b, C1c, C2 - C4 в судовой электроустановке приведен на рис. 1. Во время пуска асинхронного двигателя (АД) производится измерение реактивной проводимости нагрузочной сети синхронного генератора (СГ), приводимого во вращение дизелем (Д). Коммутация конденсаторных секций осуществляется тиристорными ключами К1-К4 в зависимости от величины реактивной проводимости сети.

Приведенная конденсаторная установка компенсации реактивной мощности, состоящая из нескольких секций, коммутируемых к сети тиристорами, может рассматриваться как дискретная с квантованием по уровню и по времени, т.е. как цифровая автоматическая система регулирования реактивной мощности [1, 2].

В этой схеме квантование по уровню соответствует изменению емкости конденсаторов только на фиксированную величину ΔC , которая является интервалом квантования по уровню. Количество дискретных значений подключенной емкости N_c зависит от выбора емкостей отдельных секций конденсаторов и определяется весами разрядов двоичной системы счисления.

Интервал квантования по уровню ΔC определяет точность регулирования (компенсации) реактивной проводимости $\Delta b_c = 1/\omega \Delta C$ при постоянной частоте тока ω .

Квантование сигнала управления по времени обусловлено физическими свойствами конденсаторов и техническими характеристиками полупроводниковых тиристорных ключей.

Рассмотрены коммутационные процессы в трехфазной секции конденсаторов, подключаемой к сети тиристорами с периодом коммутации, равным периоду сети T_0 , рис. 2. Тактовый сигнал управления тиристорами согласован с моментами перехода через ноль напряжения фазы А.

Как видно из рис. 2 моменты подключения и отключения конденсаторов от сети в схеме на рис. 1 смещены по фазам на угол $\pi/6$, а сам процесс коммутации занимает $\pi/3$ радиан. Строго говоря, квантование управления емкостью осуществляется по фазам со сдвигом на угол $\pi/6$. Период квантования по времени синхронизирован с сетью переменного тока и составляет один или более периодов переменного тока сети T_0 . Если период коммутации выбрать меньшим, чем период сети, то напряжения на отключенных конденсаторах и напряжения в фазах за это время могут не стать одинаковыми и безударная коммутация станет невозможной.

Как показали исследования конденсаторных систем возбуждения асинхронных дизель-генераторов [3], учет неодновременности коммутации конденсаторов по фазам практически не влияет на такие интегральные параметры, как электромагнитный момент, частота вращения, модуль вектора напряжения. При разработке и исследовании дискретных систем управления несинхронной коммутацией конденсаторов можно пренебречь, т.е. считать, что изменения емкости происходит одновременно и один раз за период коммутации.

Количество дискретных значений емкости N_c зависит от количества разрядов или секций конденсаторов N : $N_c = 2^N$.

Как было сказано выше емкость младшего разряда ΔC задает точность компенсации реактивной проводимости. Очевидно, что точность зависит от количества разрядов и необходимой емкости для полной компенсации C_{\max} . Величина ΔC определяется из соотношения:

$$\Delta C = \frac{C_{\max}}{N_c - 1} = \frac{C_{\max}}{2^N - 1}.$$

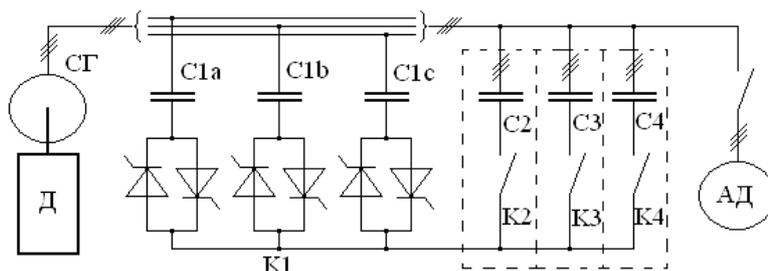


Рис. 1. Электроустановка с дискретной конденсаторной компенсацией реактивной мощности пускаемого асинхронного двигателя

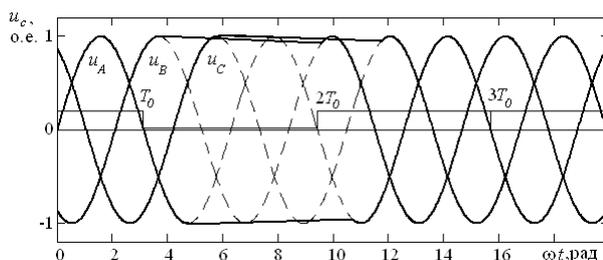


Рис. 2. Согласованное управление коммутацией трехфазной секцией конденсаторов с шагом дискретизации по времени, равным периоду тока T_0

Для определения значимости дискретизации по уровню и выбора необходимого количества разрядов цифрового устройства компенсации N выполнены исследования влияния величины компенсирующей емкости C_{max} на параметры системы пуска асинхронного двигателя от дизель-генератора с синхронным генератором.

С помощью расчетов на разработанной компьютерной модели определена максимальная величина пускового тока I_{max} и коэффициент мощности $\cos\varphi$ в начале пуска при ограничениях на величину компенсирующей емкости $C \leq C_{max}$. Выбран электродвигатель мощностью 20 % от номинальной мощности дизель - генератора с начальной загрузкой электроагрегата в 25%.

Емкость компенсатора C_{max} изменялась от нуля до величины, необходимой для полной компенсации. Для рассматриваемого случая $0 \leq C_{max} \leq 1.1$ о.е. Результаты расчетов приведены на рис.3.

Увеличение максимальной емкости C_{max} приводит к снижению пика пускового тока I_{max} и увеличению коэффициента мощности $\cos\varphi$ сети. Характер зависимостей $I_{max}(C_{max})$ и $\cos\varphi(C_{max})$ позволяет определить влияние точности компенсации реактивной проводимости Δb_c на эти параметры при различном количестве разрядов N цифрового компенсатора.

Дискретность регулятора реактивной проводимости приводит к недокомпенсации на величину проводимости младшего разряда.

Технико-экономической критерий предполагает минимизацию разрядности цифрового конденсаторного компенсатора мощности, поэтому выбор количества разрядов является компромиссом между точностью и стоимостью устройства.

Анализ зависимостей на рис.3 показывает, что дискретность цифрового регулятора при количестве разрядов три и более практически не влияет на пусковой ток и скомпенсированный коэффициент мощности.

Если квантованием емкостной проводимости по уровню пренебречь, считая, что количество разрядов цифрового регулятора достаточно велико и точность стабилизации нас пока не интересует, тогда цифровую существенно нелинейную систему можно свести к линейной амплитудно-импульсной системе регулирования, [4, 5].

Такое упрощенное представление дискретного компенсатора используем для оценки динамических свойств импульсной системы с пропорциональным и интегральным законами управления емкостью.

Вначале рассмотрим упрощенную модель импульсного компенсатора реактивной проводимости в режиме пуска электродвигателя, сделав максимальное количество допущений:

- будем считать изменение реактивной проводимости пускаемого электродвигателя ступенчатой функцией $b_d(t) = b_{d0} \cdot 1(t)$;

- напряжение U_m и частота тока сети генератора ω во время пуска электродвигателя остаются постоянными.

Импульсная система компенсации реактивной проводимости может быть представлена последовательным соединением импульсного элемента (ИЭ), формирующего элемента (Ф) и непрерывной части (НЧ) системы, рис. 4. На непрерывную часть действует последовательность импульсов, амплитуда которых пропорциональна значению ошибки компенсации проводимости $b(t)$ в дискретные моменты времени $t = nT_0$:

$$b^*(nT_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b(t) \cdot \delta(nT_0).$$

Импульсная система реагирует на дискретные значения ошибки $b(nT_0) = b_d(nT_0) - b_c(nT_0)$. Между моментами коммутации конденсаторов ошибка компенсации остается неизменной.

Если принять уравнения непрерывной части системы линейными, то можно пользоваться аппаратом передаточных функций и импульсных передаточных функций, а также непрерывным и дискретным преобразованием Лапласа для анализа процессов в компенсаторе реактивной мощности, [5].

На рис.4 значком \perp обозначен амплитудно-импульсный элемент, который модулирует равноотстоящие δ -функции, смещенные на шаг квантования по времени: $b^*(nT_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b(t) \cdot \delta(nT_0)$.

Вместе с формирующим элементом, имеющим передаточную функцию $S(p)$, импульсный элемент составляет формирующую цепь, которая под действием δ -функций генерирует сигналы $s(t)$ определенной формы, рис. 5.

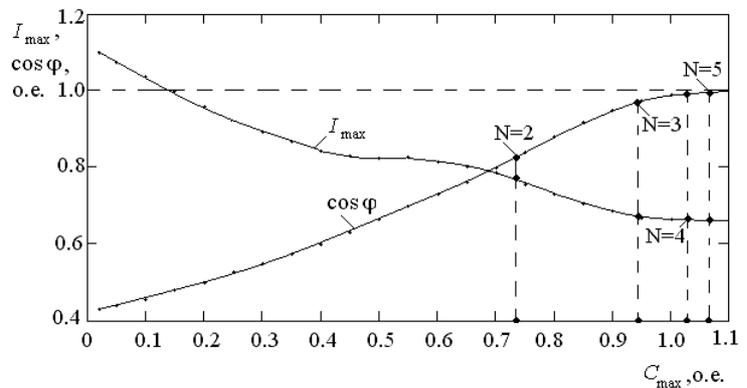


Рис.3. Зависимость максимальной величины пускового тока и коэффициента мощности в начале пуска при ограничениях на величину компенсирующей емкости

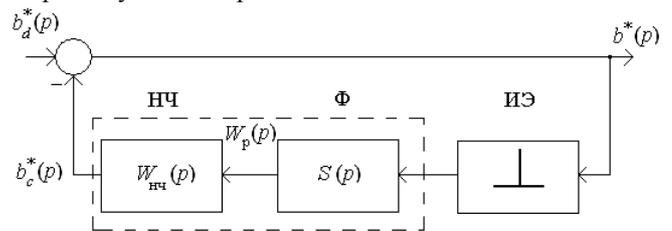


Рис. 4. Структурная схема импульсного компенсатора реактивной мощности

Для формирования прямоугольного импульса длительностью T_0 и амплитудой b на выходе формирующей цепи должен генерироваться сигнал, который может быть получен как разность ступенчатых сигналов, сдвинутых на один такт T_0 : $s(t) = b \cdot 1(t) - b \cdot 1(t+T_0)$.

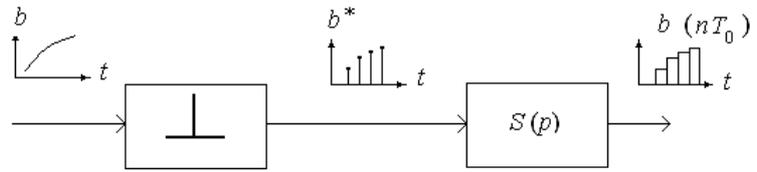


Рис.5. Импульсная формирующая цепь дискретного компенсатора

Передаточные функции такого формирователя и непрерывной части системы будут равны соответственно $S(p) = b \cdot \left[\frac{1}{p} - \frac{e^{-pT_0}}{p} \right] = b \cdot \frac{1 - e^{-pT_0}}{p}$;

$W_p(p) = S(p) \cdot W_{нч}(p)$. Импульсная передаточная функция разомкнутой системы определяется как дискретное \mathcal{D} - преобразование непрерывной передаточной функции [5]:

$$W_p^*(p) = \mathcal{D} \{ W_p(p) \} = \mathcal{D} \{ S(p) \cdot W_{нч}(p) \}.$$

Структурные схемы компенсатора реактивной проводимости нагрузки с импульсными пропорциональным (а) и интегральным (б) регуляторами представлены на рис. 6.

Проведенные исследования на полной компьютерной модели процесса пуска асинхронного двигателя от дизельной установки с синхронным генератором и компенсатором реактивной проводимости показали, что использование интегрального закона регулирования в компенсаторе существенно повышает устойчивость импульсной системы компенсации по сравнению с использованием пропорционального закона.

Во время пуска асинхронного двигателя в начальный момент времени проводимость нагрузки электрической сети резко изменяется и остается практически неизменной до критического скольжения двигателя, [6].

Если не учитывать влияния пускового тока на напряжение и частоту сети, то изменение проводимости пускаемого двигателя в начале пуска можно считать ступенчатым.

Рассмотрим переходные процессы в импульсной системе компенсации реактивной проводимости как реакцию на единичное ступенчатое воздействие $b_d = -1(t)$ при типовых законах регулирования.

Переходный процесс в импульсной системе может быть построен по Z – изображению переменной в дискретные моменты времени, кратные периоду квантования $t = nT_0$:

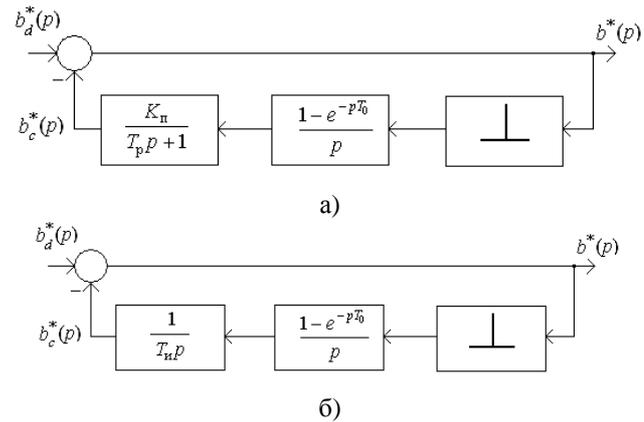


Рис. 6. Структурные схемы компенсатора реактивной проводимости с импульсным пропорциональным (а) и интегральным (б) регуляторами

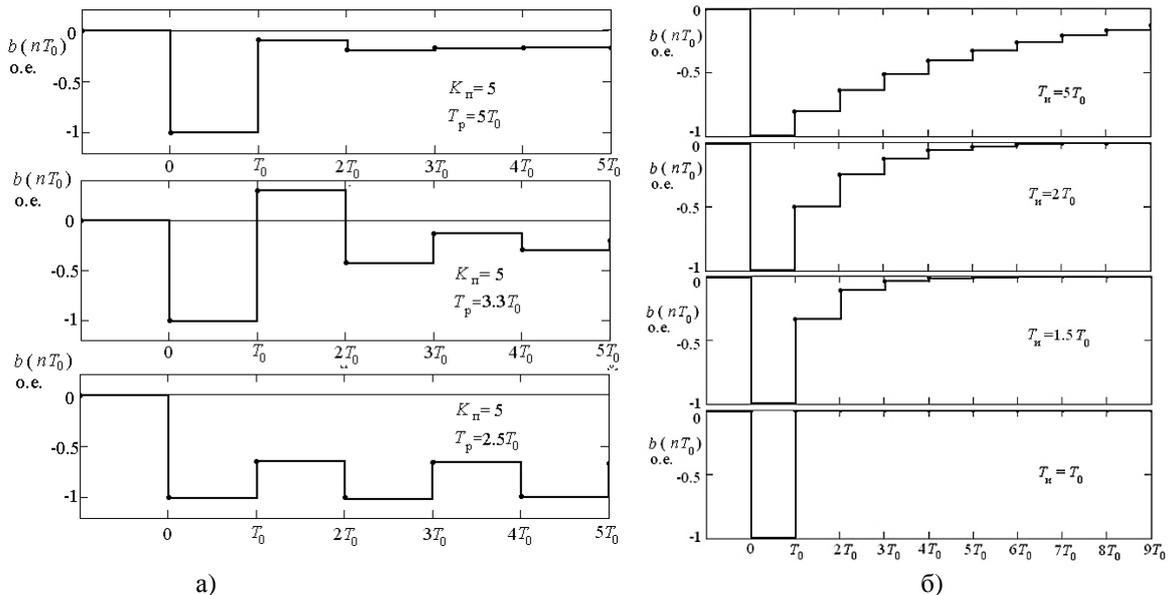


Рис. 7. Переходные процессы в импульсном пропорциональном регуляторе реактивной проводимости при разгоне асинхронного двигателя: при использовании пропорционального (а) и интегрального (б) законов регулирования

Как видно из этих процессов, увеличение постоянной времени T_p снижает колебательность системы. Для увеличения точности компенсации реактивной мощности необходимо повышать коэффициент усиления $K_{п}$, что также приближает систему к границе устойчивости. Так, при необходимом коэффициенте усиления $K_{п} = 10$, постоянная времени регулятора должна быть больше пятидесяти периодов квантования: $T_p > 50T_0$.

Как и при использовании пропорционального закона управления, первый провал проводимости в интегральном компенсаторе всегда равен единице. Интенсивность процесса компенсации существенно зависит от соотношения постоянной времени $T_{и}$ и периода коммутации T_0 . При их равенстве $T_{и} = T_0$ процесс компенсации происходит за один период переменного тока.

Физически постоянная времени T_p может быть реализована как фильтр первого порядка на выходе датчика реактивной проводимости нагрузки.

Квантование процессов управления реактивной проводимости синхронизированы с переменным напряжением сети, а моменты включения электродвигателя в общем случае являются случайными. Поэтому момент включения двигателя может быть смещен относительно моментов коммутации конденсаторов на величину $\Delta t = mT_0 \leq T_0$, где m - параметр задержки возмущения относительно момента включения управляющего воздействия.

Для анализа процессов изменения проводимости $b_d(nT_0)$ может быть применимо дискретное модифицированное Z_m - преобразование [5].

Проведенный анализ переходных процессов в системе компенсации реактивной проводимости показывает, что смещение момента включения двигателя относительно момента коммутации конденсаторов существенно влияет на показатели переходного процесса, см. рис.8.

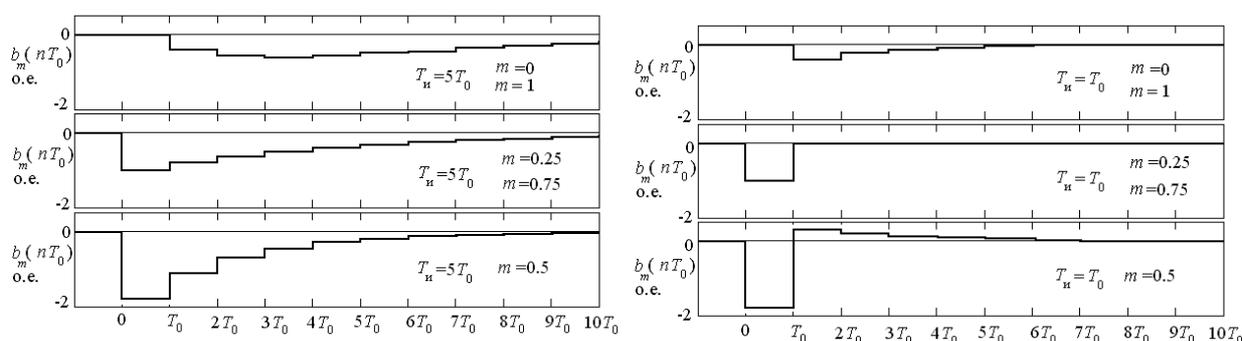


Рис.8. Процессы компенсации реактивной проводимости импульсным интегральным компенсатором при различных моментах начала пуска двигателя и разных постоянных времени регулятора

Характер процессов при различных смещениях моментов возмущения и управления различный. Если момент управления приходится на максимум гармонически изменяющейся проводимости, то процесс управления происходит более интенсивно и заканчивается раньше.

Выше были рассмотрены процессы в импульсной системе компенсации на ступенчатое изменение реактивной проводимости в начальный момент пуска асинхронного двигателя. Однако учет динамических свойств системы «синхронный дизель-генератор – асинхронный двигатель» на разработанной компьютерной модели показывает, что изменение проводимости кроме ступенчатой составляющей имеет гармоническую составляющую. Колебания проводимости имеют частоту, равную частоте переменного тока, и затухают по экспоненциальному закону за 7...10 периодов, рис. 9.

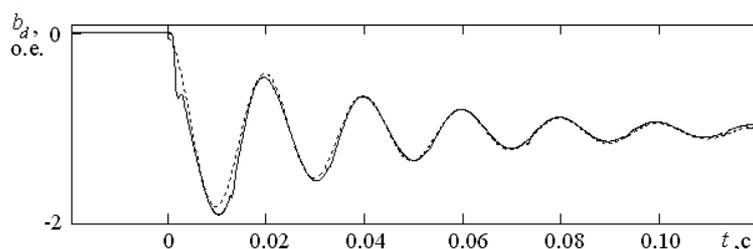


Рис. 9. Изменение реактивной проводимости асинхронного двигателя в начале пуска от синхронного дизель-генератора

На рис. 9 сплошной линией приведена проводимость асинхронного двигателя, полученная на модели, которая достаточно точно описывается гармонической затухающей функцией (пунктир на рис. 9):

$$b_d(t) = -1(t) + e^{-\frac{t}{T_\sigma}} \cos(\omega_s t),$$

где T_σ - постоянная времени затухания колебательного процесса, $\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$ - частота и T_s - период переменного тока, $T_s = 0.02$ с.

Колебания связаны с затуханием полей рассеяния в асинхронной машине, период колебаний равен периоду вращения поля.

Выводы.

Конденсаторная установка компенсации реактивной мощности, состоящая из нескольких секций, коммутируемых к сети тиристорами, может рассматриваться как дискретная с квантованием по уровню и по времени, т.е. как цифровая автоматическая система регулирования реактивной мощности. Интервал квантования по уровню соответствует величине наименьшей емкости конденсаторных секций, которая будет управляться младшим разрядом управляющего числа. Период квантования по времени синхронизирован с сетью переменного тока и составляет один или более периодов переменного тока сети.

Использование импульсного интегрального закона регулирования в компенсаторе существенно повышает устойчивость импульсной системы компенсации по сравнению с использованием пропорционального закона. Этот факт подтвержден исследованиями на полной компьютерной модели процесса пуска асинхронного двигателя от дизельной установки с синхронным генератором и компенсаторов реактивной проводимости.

Как и при использовании импульсного пропорционального закона управления, первый провал проводимости в интегральном компенсаторе всегда равен единице. Интенсивность процесса компенсации существенно зависит от соотношения постоянной времени и периода коммутации. При их равенстве процесс компенсации происходит за один период переменного тока.

Сравнение типовых линейно-импульсных законов регулирования реактивной проводимости пускаемого электродвигателя от дизель-генератора соизмеримой мощности показывает, что наилучшие процессы компенсации достигаются при использовании интегрального закона регулирования.

Характер динамических процессов в импульсной системе компенсации существенно зависит от смещения момента пуска двигателя от момента коммутации конденсаторов. Наибольшее динамическое отклонение и минимальное время регулирования возникает при смещении момента пуска относительно момента коммутации на полпериода переменного тока.

При выборе постоянной интегрирования интегрального компенсатора равной периоду коммутации и периоду сети процессы регулирования заканчиваются за 1...4 периода сети.

Полученное аналитическое описание дискретных процессов компенсации реактивной мощности позволяет проводить расчеты систем с различными типовыми законами, выбирать оптимальные настроечные параметры импульсных регуляторов реактивной мощности.

Сравнение переходных процессов компенсации реактивной проводимости при пуске электродвигателя, полученных на полной модели и рассчитанных аналитически практически совпадают.

Для уменьшения сложности и стоимости цифрового компенсатора реактивной мощности при пуске электродвигателя соизмеримой мощности достаточно иметь три двоичных разряда конденсаторного устройства компенсации реактивной проводимости.

Литература

1. Naganathan G., Sharaf A.M.: Microprocessor control of wild driven squirrel cage induction generator. Europ. Conf. on Power Electronics and Appl., v.1, Brussels, 1985, p.2.7-2.12.
2. EQUALIZER ST. Динамическая система компенсации реактивной мощности.- http://elspec.su/equalizer_st.
3. Вишнеvский Л.В. Теория, методы расчета систем управления и рабочие режимы судовых электростановок с асинхронными генераторами: Дис. докт. техн. наук. - Санкт-Петербург, 1991. - 400 с.
4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. - М.: Машиностроение, 1980. - 448 с.
5. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем. - М.: Наука, 1977. - 560 с.
6. Вишнеvский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами. - Киев - Одесса: Лыбидь, 1990. - 68 с.