



## АННОТАЦИЯ

Темой выпускной квалификационной работы является «Автоматизация процедуры включения синхронного генератора на параллельную работу с системой электроснабжения».

В работе рассмотрены методы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

Предложен метод определения момента подачи команды на включение магнитного пускателя, обеспечивающего точную синхронизацию синхронного генератора, с учетом времени включения магнитного пускателя. Определение момента включения осуществляется на основании обработки мгновенных значений напряжений генератора и сети.

Предложенный метод позволяет определить момент подачи команды на включение магнитного пускателя с учетом времени его включения.

Проверка работоспособности метода проведена путем моделирования процесса включения синхронного генератора в программе Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystems. Разработана система управления на основании предложенного метода и подтверждена эффективность работы предложенного метода, обеспечивающего сокращение времени ввода синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

Выпускная квалификационная работа включает в себя пояснительную записку, содержащую 61 страницу, 31 рисунок и 2 таблицы. Графическая часть работы состоит из 6 чертежей формата А1.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1 Анализ существующих процедур включения синхронных генераторов	6
1.1 Автоматическая самосинхронизация	7
1.2 Точная синхронизация	9
1.3 Существующие системы автоматической синхронизации	10
1.4 Определение задачи исследования	21
2 Исследование процесса точной синхронизации	24
3 Модель включения синхронного генератора на параллельную работу с системой электроснабжения	33
4 Модель системы управления	39
5 Моделирование процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью	49
6 Практическая реализация	54
Заключение	56
Список использованных источников	58
Приложения	62

## ВВЕДЕНИЕ

Обычно на электростанциях устанавливают несколько синхронных генераторов для параллельной работы на общую нагрузку. Это позволяет увеличить общую мощность электростанции (при ограниченной мощности каждого из установленных на ней генераторов), значительно повышает надежность энергоснабжения потребителей и позволяет лучше организовать обслуживание агрегатов. Электрические станции, в свою очередь, объединяют для параллельной работы в мощные энергосистемы, что позволяет наилучшим образом решать задачу производства и распределения электрической энергии с обеспечением ее качества.

В любой системе электроснабжения нагрузка не является постоянной, а изменяется во времени, причем в некоторый период времени нагрузка имеет пиковое значение. Поэтому при эксплуатации любой энергосистемы необходимо обеспечивать регулирование мощности вырабатываемой электроэнергии для обеспечения баланса энергии в рамках энергосистемы. При недостаточном регулировании частота в системе будет отклоняться от номинальной, а напряжение в узлах энергосистемы может выйти за допустимые для безопасной эксплуатации пределы, что может привести к выходу из строя элементов электрооборудования.

Регулирование генерируемой в энергосистему мощности осуществляется не только изменением уровня отдаваемой генератором в систему мощности, но и включением и выключением генераторов. Особенно это характерно для небольших энергосистем, и для отдельных зон энергосистемы, которые соединены с основной энергосистемой линиями электропередачи недостаточной мощности. В связи с этим актуальной является задача обеспечения надежного и безопасного запуска генераторов и подключения их действующей энергосистеме. Большая часть действующих генераторов выполнена в виде синхронных машин, что требует выполнения определенных технологических процедур при запуске, а именно процедур

синхронизации, а эти операции для своего выполнения требуют определенного времени.

Если генератор вводится в систему по причине недостатка активной мощности в энергосистеме, то желательно сократить время включения и синхронизации генератора, это уменьшает риск перехода режима работы системы в неустойчивый режим. Кроме этого сокращается время энергосистемы с напряжением и частотой ниже номинальных. Сокращение времени запуска также обеспечивает экономию энергоресурсов, затрачиваемых на работу генератора по сути на холостом ходу.

# 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОЦЕДУР ВКЛЮЧЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

У синхронных генераторов наряду с преимуществом, которое состоит в том, что благодаря электромагнитному возбуждению он может работать с коэффициентом мощности  $\cos\varphi=1$  и при этом не потреблять реактивной мощности из сети, но и при работе с перевозбуждением даже может отдавать реактивную мощность в сеть; синхронный генератор имеет очень серьезный недостаток – это сложность включения его на параллельную работу с функционирующей энергосистемой. Причем чем более мощный генератор, тем более сложно обеспечить его подключение.

Идеальным условием включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой является равенство напряжений и частот машины и системы, а также совпадение фаз напряжений в момент замыкания контактов выключателя [1]. Однако обеспечить такие условия является не простой технологической операцией.

При включении генератора на параллельную работу с энергосистемой необходимо избегать большого броска тока и возникновения ударных электромагнитных моментов и сил, способных вызвать повреждения генератора и систем привода генератора, а также аппаратуры защиты и управления. Поскольку режимы работы энергосистем подразумевают периодические включения и выключения генераторов, то эти броски токов и моментов могут сказаться на надежности работы генераторов и могут повлечь за собой необходимость дополнительных технических обслуживаний генераторов или их ремонта.

Существует два основных способа подключения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой, это способы самосинхронизации и точной синхронизации.

В первом случае, при самосинхронизации, генератор включается в сеть невозбужденным, а затем, за счет подаваемого нормального возбуждения,

втягивается в синхронизм с нарастающим синхронным моментом. Во втором случае синхронная машина включается в сеть с нормальным возбуждением.

### 1.1 Автоматическая самосинхронизация

При подключении генератора к энергосистеме по способу автоматической самосинхронизации перед включением его обмотка ротора должна быть подключена не шунтирующее сопротивление для исключения опасного воздействия ЭДС частоты скольжения, которая наводится в обмотке ротора.

Сразу после включения генератор работает в режиме асинхронной машины, при этом на ротор генератора действует асинхронный вращающий момент, при этом он способствует втягиванию генератора в синхронизм. Кроме асинхронного момента на ротор действует момент от магнитной не симметрии ротора в продольной и поперечной осях, этот момент меняет направление с двойной частотой скольжения. При малом скольжении и небольшом моменте на валу привода момент явнополюсности может привести к втягиванию генератора в синхронизм. Однако при этом возможно противофазное положение ротора, что при включении возбуждения будет приводить к большому броску тока. Для исключения данной ситуации возбуждение на обмотку ротора до приближения скорости вращения ротора к синхронной. При этом на ротор начинает действовать синхронный вращающий момент, приводящий к втягиванию генератора в синхронизм.

Включение генератора в сеть сопровождается броском тока в генераторе, величину которого можно определить из выражения:

$$I_{\text{вкл}} = \frac{U_c}{x_d'' + x_c}, \text{ где} \quad (1.1)$$

$U_c$  - напряжение сети;

$x_d''$  - сопротивление генератора по продольной оси;

$x_c$  - сопротивление энергосистемы в точке подключения.

Самосинхронизация обеспечивает быстрое включение генераторов и ускоряет ликвидацию предаварийной ситуации (например, изменение частоты и напряжения при росте суммарной нагрузки), позволяя в короткий срок использовать мощность генераторов. Автоматическая самосинхронизация может быть в нормальном режиме нежелательной, так как она может приводить к посадке напряжения в связи со значительным потреблением невозбужденным генератором реактивной мощности. Таким случаем может быть, например, самосинхронизация очень мощного генератора при включении его на шины с нагрузкой, если поблизости нет других генераторов соответствующей мощности.

Основным достоинством подключения генераторов способом самосинхронизации является возможность достаточно быстрого по сравнению со способом точной синхронизации включения генератора в сеть. Это особенно важно при включении генератора в аварийных условиях, когда возникает необходимость в быстром включении резервных генераторов. Поэтому включение генераторов в аварийных условиях рекомендуется производить способом самосинхронизации независимо от значения уравнивающего тока.

Однако большие броски тока и высокие динамические нагрузки на генератор являются очень существенным недостатком этого способа включения генератора на синхронную работу с сетью, поэтому и рекомендуют использовать его только в специальных случаях.

Существует некоторая модификация этого способа, когда в первый момент включения генератор подключается к сети не напрямую, а через реакторы, что уменьшает величину броска тока, но и увеличивает время включения и кроме того требует установки дополнительного оборудования: магнитного пускателя и реакторов, что увеличивает стоимость установленного оборудования.

## 1.2 Точная синхронизация

Способ точной синхронизации синхронного генератора на параллельную работу с сетью реализуется следующим образом. Ротор генератора разгоняется приводом и на него подается ток возбуждения. Перед подключением генератора к сети обеспечивают выполнение следующих условий:

$U_r = U_c$  – величина напряжения генератора с помощью системы управления током возбуждения генератора выравняется с напряжением сети;

$f_r = f_c$  – частота генератора выравняется с текущей частотой сети;

$\delta = 0$  – выбирается наиболее благоприятный момент включения, когда фазы напряжений генератора и сети совпадают.

Установка перечисленных условий выполняется или вручную специалистами электростанции (ручная синхронизация), или выполняется с помощью систем автоматизации (автоматическая синхронизация).

Включение возбужденного синхронного генератора в сеть сопровождается появлением уравнивающего тока и уравнивающего электромагнитного момента. Величина уравнивающего тока и момента и характер их изменения во многом зависят от того, насколько точно были выполнены условия синхронизации. Уравнивающие токи в статорных обмотках генератора вызывают толчки мощности. Толчок активной мощности через генератор передается на привод генератора, а толчок реактивной мощности воспринимается только генератором.

При реализации способа точной синхронизации удается обеспечить меньшие броски тока и момента, чем в способе автосинхронизации. Это обеспечивает меньшее ударное воздействие на генератор и приводит к большей надежности его работы и меньшей потребности в ремонтных и обслуживающих работах.

Однако одной из основных сложностей реализации способа точной синхронизации является то, что время включения выключателя не равно

нулю, и следовательно команду на включение выключателя надо подавать с некоторым опережением, то есть до момента выполнения необходимых условий синхронизации.

Кроме этого способ точной синхронизации требует большего периода времени на выполнение подключения синхронного генератора к сети. Основные затраты времени уходят на выравнивание частот генератора и сети, а затем ожидания, при малом скольжении генератора, наступления момента совпадения фаз напряжений генератора и сети.

### **1.3 Существующие системы автоматической синхронизации**

Так как нас больше интересует способ точной автоматической синхронизации (ТАС), который обеспечивает процесс включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью при меньших ударных токах, то рассматривать будем только устройства, реализующие способ точной автоматической синхронизации.

Точная синхронизация разрешается при выполнении трех основных условий:  $\delta=0$ ,  $f_g=f_s$  и  $U_g=U_s$ . При практической реализации не требуется абсолютно точное выравнивание частот. Синхронизация допускается при разности частот  $f_s = 0,2 - 0,3$  Гц или при скорости скольжения  $\omega_s = 1,2 - 1,9$  рад/с.

Если синхронизация происходит с расчетным скольжением  $\omega=\text{const}$ , то угол опережения  $\delta_{\text{оп}}$  пропорционален времени опережения  $t_{\text{оп}}$ .

Следовательно, для того чтобы контакты выключателя замыкались в момент, когда угол  $\delta = 0$ , автоматический синхронизатор должен создавать сигнал управления или с опережением по времени  $t_{\text{оп}}$ , или с опережением по углу  $\delta_{\text{оп}}$ .

В зависимости от того, как создается опережение (по времени  $t$  или углу  $\delta$ ), существующие синхронизаторы разделяют на два типа: синхронизаторы с постоянным временем опережения, момент срабатывания

которых определяется непосредственно заданным временем опережения (по сути временем срабатывания выключателя), и синхронизаторы с постоянным углом опережения, момент срабатывания которых определяется заданным углом опережения.

Если процесс синхронизации происходит при переменной частоте  $\omega \neq \text{const}$  опережение по углу не равнозначно опережению по времени, поэтому синхронизатор с постоянным опережением по углу  $\delta$  не всегда правильно улавливает момент подачи сигнала на включение выключателя. В этом отношении синхронизаторы с постоянным временем опережения  $t_{\text{оп}}$  выгодно отличаются от синхронизаторов с постоянным углом опережения, в силу чего этот тип синхронизаторов получил наибольшее распространение.

Все устройства, реализующие ТАС должны выполнять следующие функции:

- 1 устанавливать и поддерживать напряжение на зажимах генератора близким к напряжению системы;
- 2 вводить скольжение генератора в область допустимых величин скольжений;
- 3 выбирать момент подачи команды на включение с заданным углом или временем опережения;
- 4 контролировать значение скольжения генератора в момент подачи команды на включение и соответственно разрешать или запрещать включение.

По пункту 1 приведение напряжения генератора к значению напряжения системы возлагается на автоматический регулятор возбуждения генератора. По пункту 2 приведение частоты генератора к частоте сети выполняет уравниватель частоты, осуществляющий соответствующие изменения уставки автоматического регулятора привода генератора. Функции по пунктам 3 и 4 осуществляют органы опережения и контроля скольжения, являющиеся основной частью устройства.

В таблице 1.1 приведены основные параметры распространенных в эксплуатации на сегодняшний день устройств автоматической синхронизации [3].

Таблица 1.1 – Технические параметры синхронизаторов

Параметр	Тип синхронизатора			
	АСТ-4	СА-1	Спринт	ABB Synchrotact 5
Входные напряжения, В	100	100	100	100..230
Частота, Гц	50±5	50±5	50±5	50±5
Предельная разность частот при синхронизации, Гц	0,25	1,0	0,8	1
Предельный угол опережения, с		120	120	100
Время опережения, с		0,1...1,0 с		
Предельная разность входных напряжений, %	15	20	20	40
Диапазон рабочих температур, °С	-10..+45	0..40	-10..+45	+5..+55
Максимальная угловая ошибка в рабочем диапазоне температур, эл.град.	3	3	3	
Потребление по измерительным цепям, ВА		2,5	0,5	4
Масса, не более, кг		15	6	8
Учет ускорения при выборе угла опережения	-	+	+	+
Потребляемая мощность по цепи питания, ВА не более	20	20	20	35
Время синхронизации, мин	1..35	1..35	1..30	0,5..15

Автоматический синхронизатор АСТ-4 используется для включения генератора по методу точной синхронизации и является синхронизатором с постоянным временем опережения. Модуль подгонки частоты вращения реагирует не на абсолютную частоту синхронизируемого генератора, а на его скольжение относительно сетевой частоты. В этом случае синхронизатор правильно подгоняет частоту вращения генератора не только при нормальном режиме энергосистемы, когда частота равна 50 Гц, но и в

аварийном режиме, в котором возможны отклонения частоты от номинального значения. Испытания показывают, что синхронизатор работает правильно при снижении частоты до 45 Гц.

На работу синхронизатора не оказывает существенного влияния не номинальные величины напряжения генератора и сети. При отклонении напряжения в пределах  $\Delta U = \pm 15\%$  от номинального значения все элементы синхронизатора функционируют нормально.

Время опережения синхронизатора может быть настроено с учетом времени срабатывания выключателя и практически остается постоянным независимо от скольжения. В диапазоне разности частот  $f_s = 0,04 - 0,25$  Гц разброс времени опережения включения не превышает 3-х электрических градусов.

По своим техническим и эксплуатационным характеристикам синхронизатор АСТ-4 является одним из лучших автоматических синхронизаторов, поэтому он получил большое распространение на электрических станциях.

Синхронизатор АСТ-4 (рис.1.1) состоит из следующих основных узлов:

узла опережения, определяющего момент подачи импульса на включение магнитного пускателя;

узла контроля разности частот, определяющего допустимость величины скольжения генератора;

узла контроля разности напряжения, сравнивающего напряжения сети и генератора;

узла выравнивания частоты вращения синхронизируемого генератора и сети;

узла блокировок, обеспечивающего необходимое взаимодействие элементов в схеме синхронизатора.

Учитывая, что практически все генераторы снабжаются автоматическими регуляторами напряжения, которые обеспечивают

подгонку напряжения генератора к напряжению сети с расхождением не более  $\pm 10\%$ , синхронизатор выполняется без устройства подгонки напряжения. На синхронизатор в качестве измеряемых сигналов подается напряжение со стороны генератора и сети.

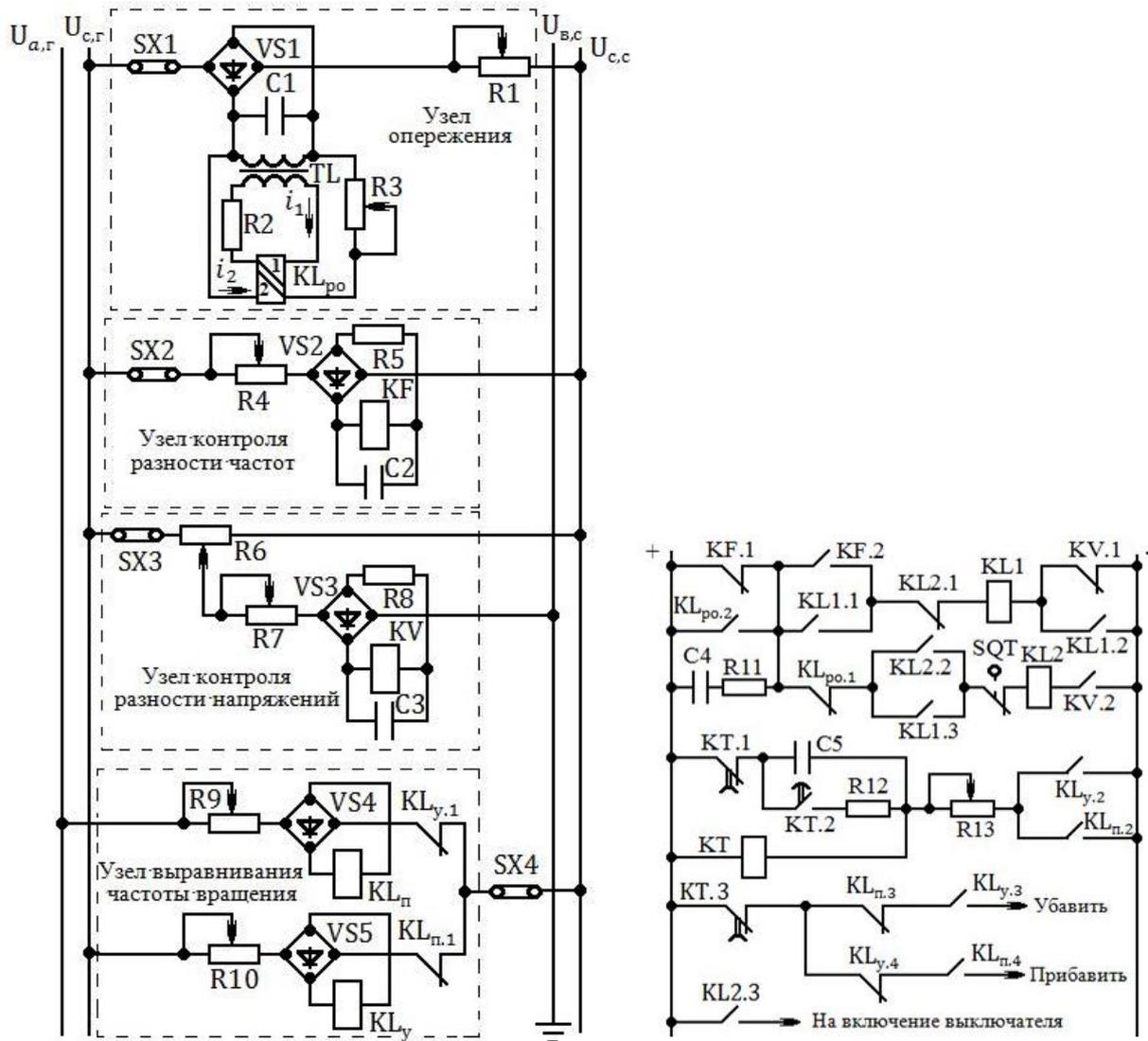


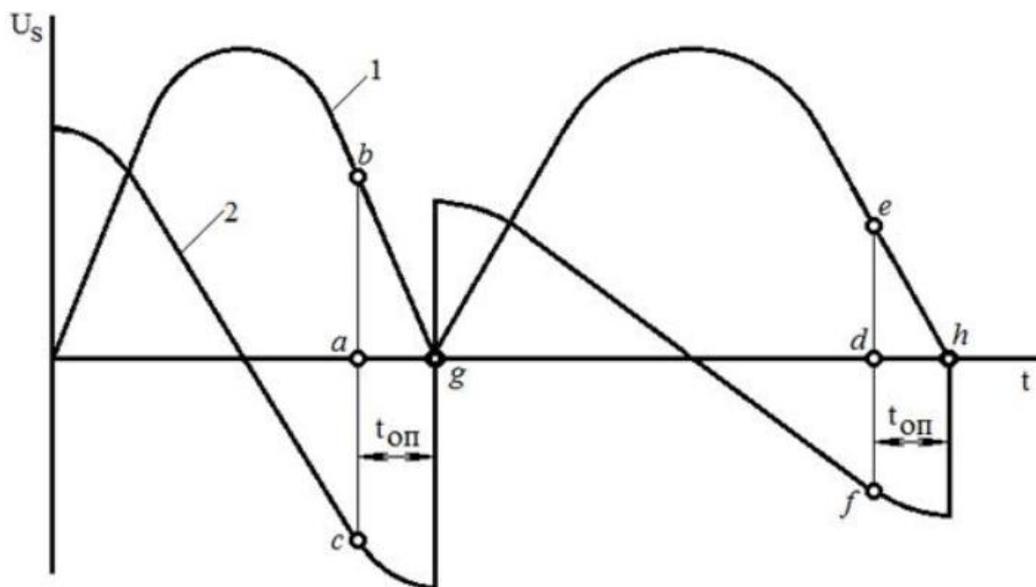
Рис. 1.1 Схема синхронизатора АСТ-4

Узел опережения синхронизатора состоит из трансреактора (дифференцирующего трансформатора) TL и двухобмоточного поляризованного реле  $KL_{po}$ . К первичной обмотке трансреактора TL подводится выпрямленное напряжение скольжения генератора (напряжение биения).

В каждый период биений выпрямленное напряжение скольжения, отфильтрованное конденсатором С1, непрерывно меняет свое значение, поэтому во вторичной обмотке трансреактора индуцируется ЭДС. Вторичное напряжение трансреактора меняет знак в момент максимума (точнее очень близко к нему) первичного напряжения, а при совпадении фаз векторов ЭДС генератора и энергосистемы достигает наибольшего амплитудного значения, смотри диаграмму рис.1.2.

Ток, протекающий по второй обмотке реле  $KL_{po}$ , пропорционален напряжению биения:

$$i_2 = K_2 \cdot U_s = K_2 \cdot 2 \cdot U \cdot \sin\left(\frac{\omega_s \cdot t}{2}\right) \quad (1.2)$$



1 – входное напряжение; 2 – напряжение на вторичной обмотке дифференцирующего трансформатора (трансреактора)

Рис. 1.2 Диаграмма, поясняющая работу узла опережения

По первой обмотке реле  $KL_{po}$  протекает вторичный ток трансреактора, пропорциональный производной выпрямленного напряжения биения:

$$i_1 = K_1 \cdot 2 \cdot U \cdot \frac{\omega_s}{2} \cdot \cos\left(\frac{\omega_s \cdot t}{2}\right) \quad (1.3)$$

В выражениях (1.2) и (1.3)  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты пропорциональности, значения которых можно изменить регулировкой построечных сопротивлений  $R_1$  и  $R_3$ .

Реле опережения включено таким образом, что когда токи обеих обмоток имеют положительный знак, то на подвижную систему реле действует тормозной момент. Реле  $KL_{po}$  сработает и переключит свои контакты лишь после того, как ток в обмотке 1 изменит знак и станет равным току в обмотке 2, рис.1.2.

Интервал времени, на который происходит опережение срабатывания реле  $KL_{po}$  до момента совпадения фаз, является величиной постоянной и не зависит от величины скольжения  $\omega_s$ . Это и есть время опережения, которое задает узел опережения синхронизатора.

Разброс времени опережения, создаваемый узлом опережения, не превышает трех электрических градусов при разности частот  $\Delta f=0,04 - 0,25$  Гц.

Значение времени опережения синхронизатора регулируется с помощью резистора  $R_3$ . Чем больше значение сопротивления резистора  $R_3$  установлено, тем меньше ток во второй обмотке реле и тем больше время опережения.

Контроль разности частот напряжений генератора и сети осуществляется при помощи реле  $KF$ , включенного через выпрямитель  $VS_2$  и резистор  $R_4$  на напряжение биения  $U_s$ . Реле  $KF$  сработает, если напряжение на его зажимах уменьшится до напряжения срабатывания.

Скольжение генератора, при котором реле  $KF$  отпускает свой якорь, определяется изменением сопротивления резистора  $R_4$ .

Для предотвращения аварийной работы синхронизатора при большом скольжении параллельно обмотке реле  $KF$  включен конденсатор  $C_2$ . Емкость его выбирается такой, чтобы при разности частот, большей  $0,5 \div 1,0$  Гц, реле  $KF$  удерживало свой якорь и блокировало работу синхронизатора. Наличие конденсатора не дает напряжению на обмотке реле  $KF$  при большой разности

частот не снижается до нуля, и так как вследствие разряда конденсатора поддерживается напряжение на обмотке реле. При малой разности частот наличие конденсатора не влияет на работу реле КФ, так как напряжение на его обмотке в этом случае снижается по кривой напряжения биения.

Напряжение срабатывания UKF, выбирается из условия совместимой работы реле контроля частоты и реле опережения. Если частота скольжения  $\omega_s > \omega_{s,доп}$ , то, первым срабатывает реле опережения, а затем реле контроля частоты и включения выключателя не произойдет. Если частота скольжения  $\omega_s < \omega_{s,доп}$ , первым срабатывает реле контроля частоты, вторым – реле опережения и тогда в этом случае подается импульс на включение выключателя.

Для контроля скольжения генератора и выбора момента включения при угле фаз  $\delta = 0$  используется напряжение скольжения  $u_s(\delta)$ , которое получается в результате обработки напряжений генератора  $u_g = U_g \cdot \sin(\omega_g \cdot t)$  и сети  $u_c = U_c \cdot \sin(\omega_c \cdot t)$ . При равенстве амплитуд напряжений  $U_g = U_c$ , получим:

$$u_g - u_c = 2 \cdot U_c \cdot \sin\left(\frac{\omega_g - \omega_c}{2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_g + \omega_c}{2} \cdot t\right) \quad (1.4)$$

После выпрямления напряжение скольжения равно  $u_s(\delta) = 2 \cdot U_c \cdot \sin(\delta/2)$ .

Если напряжение генератора выразит как  $U_g = U_c \pm \Delta U$ , где  $\Delta U$  расхождение напряжений сети и генератора по величине, то после некоторых преобразований получим:

$$u_g - u_c = 2 \cdot U_c \cdot \sin\left(\frac{\omega_g - \omega_c}{2} \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega_g + \omega_c}{2} \cdot t\right) \pm \Delta U \cdot \sin(\omega_g \cdot t) \quad (1.5)$$

Рассмотрим влияние величины  $\Delta U \cdot \sin(\omega_g \cdot t)$  на напряжение скольжения. При равной нулю разности напряжений  $\Delta U = 0$  напряжение скольжения  $u_s(\delta) = 2 \cdot U_c \cdot \sin(\delta/2)$  и при угле  $\delta = 0$  также равно нулю. Это обстоятельство и используется в элементах синхронизатора для фиксации факта прохождения нулевого значения угла рассогласования фаз.

При отличной от нуля разности напряжений генератора и сети  $\Delta U \neq 0$  выражение  $\Delta U \cdot \sin(\omega_g \cdot t)$  оказывает влияние на работу измерительных элементов. Особый интерес представляет это влияние этого напряжения на

величину выпрямленного напряжения при малых значениях угла  $\delta$ : при разности напряжений  $\Delta U \neq 0$  и угле  $\delta = 0$  напряжение скольжения  $u_s(\delta) \approx \Delta U$ . График напряжения скольжения  $u_s(\delta)$  при разности напряжений  $\Delta U \neq 0$  показан на рис.1.3 (кривая 1).

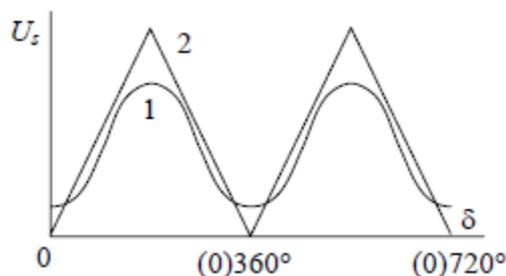


Рис.1.3 Напряжение скольжения  $u_s(\delta)$

Из графика рис.1.3 видно, что в области углов  $\delta \approx 0$ , напряжение скольжения нечетко определяет момент равенства нулю угла  $\delta$ , и это является существенным недостатком синхронизатора АСТ—4.

Для устранения этого недостатка в МЭИ был разработан бесконтактный синхронизатор СА-1, содержащий измерительный преобразователь (фазометр), выходное напряжение которого линейно зависит от угла (рис.1.3 кривая 2).

Сигнал на включение определяется по следующему условию:

$$k_1 \cdot u_s + k_2 \cdot \frac{dU_s}{dt} \cdot t_{on} + \frac{d^2U_s}{dt^2} \cdot \frac{t_{on}^2}{2} = 0 \quad (1.6)$$

То есть контролируется не только значение  $k_1 u_s = 0$ , но и введены сигналы по первой и второй производным от напряжения скольжения.

Синхронизатор СА-1 (рис.1.4) состоит из: время-импульсного преобразователя (ВИП); фильтра низких частот (ФНЧ), выделяющего постоянную составляющую напряжения, пропорциональную углу; двух дифференциаторов  $AD1$ ,  $AD2$  и элемента сравнения - компаратора  $EA1$ . Указанные элементы образуют измерительный орган угла опережения ИОУО, вычисляющий угол опережения и формирующий дискретный сигнал  $U_B$  на включение выключателя синхронного генератора. Также в автоматический синхронизатор входят измерительные органы измерения

скольжения (разности частот) (ИОС) и разности амплитуд (ИОА) напряжений.

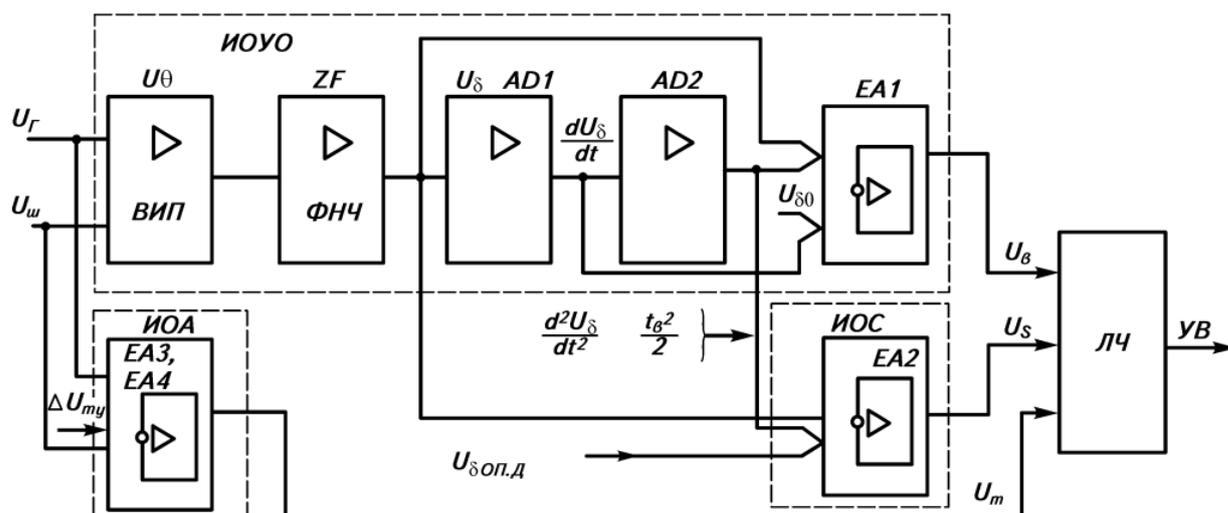


Рис.1.4 Функциональная схема аналогового автоматического синхронизатора СА-1

Особенностью синхронизатора является ограничение максимально допустимой угловой скорости скольжения генератора в момент включения выключателя. Для этого контролируется максимально допустимый угол опережения, вычисляемый по угловой скорости скольжения в момент срабатывания синхронизатора и ускорению. Измерительный орган ИОС содержит элемент сравнения угла компаратор - EA2 напряжения с установленным напряжением  $U_{\delta\text{оп.д}}$ , скорректированным по скорости скольжения и выдающего разрешающий сигнал  $U_s$ . В измерительном органе ИОА по абсолютной разности амплитуд напряжений, формируется сигнал  $\Delta U_m$  на выходе диодного элемента сравнения с выпрямителем на выходе. Компараторы EA3 и EA4 сравнивают  $\Delta U_m$  с установленным  $\Delta U_{my}$ . Дискретные сигналы поступают в логическую часть (ЛЧ) синхронизатора, которая выдает управляющие воздействия (УВ) на включение выключателя, если имеются разрешающие сигналы  $U_m$  и  $U_s$ .

Автоматический синхронизатор «Спринт» представляет собой микропроцессорное устройство для точной автоматической синхронизации, и является цифровым аналогом аналогового автоматического синхронизатора

СА-1. Автоматический синхронизатор размещен в плоском металлическом корпусе, имеет переднее подключение внешних цепей, выполненных в виде сборки винтовых зажимов (клемм) и контрольный разъем, которые закрываются отдельными прозрачными крышками. На передней панели расположены жидкокристаллический алфавитно-цифровой индикатор и клавиатура режима управления. На правой части передней панели расположены движки резисторов переменного сопротивления для настройки синхронизатора, рядом с которыми расположены обозначения их назначения.

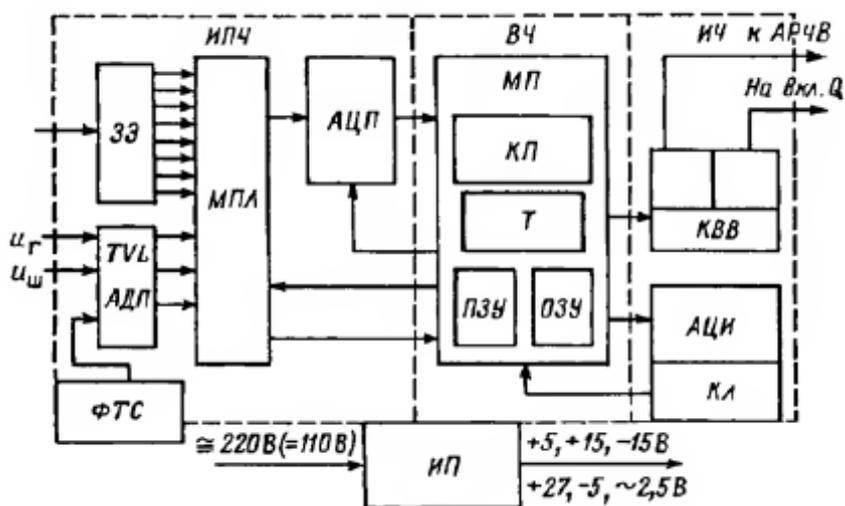


Рис.1.5 Принципиальная схема синхронизатора «СПРИНТ»

Основной вычислительной частью ВЧ (рис.1.5) автоматического синхронизатора «Спринт» является микропроцессор МП типа К1810ВМ88 с ОЗУ и ПЗУ, контроллером прерываний КП и таймерами Т.

Измерительно-преобразовательная часть ИПЧ содержит измерительные трансформаторы  $TFL$  напряжений  $u_r$  и  $u_{ш}$ , аналого-дискретные преобразователи АДП синусоидальных напряжений в прямоугольные импульсы с длительностями, равными полупериодам напряжений  $u_r$  и  $u_{ш}$ ; аналоговый переключатель — мультиплексор МПЛ, подключающий к аналого-цифровому преобразователю АЦП цепи аналоговых сигналов; задающий (установочный) элемент ЗЭ и формирователь тестовых сигналов ФТС.

Принцип действия синхронизатора Synchronact 5 аналогичен синхронизатору «СПРИНТ». Функциональная схема представлена на рис.1.6.

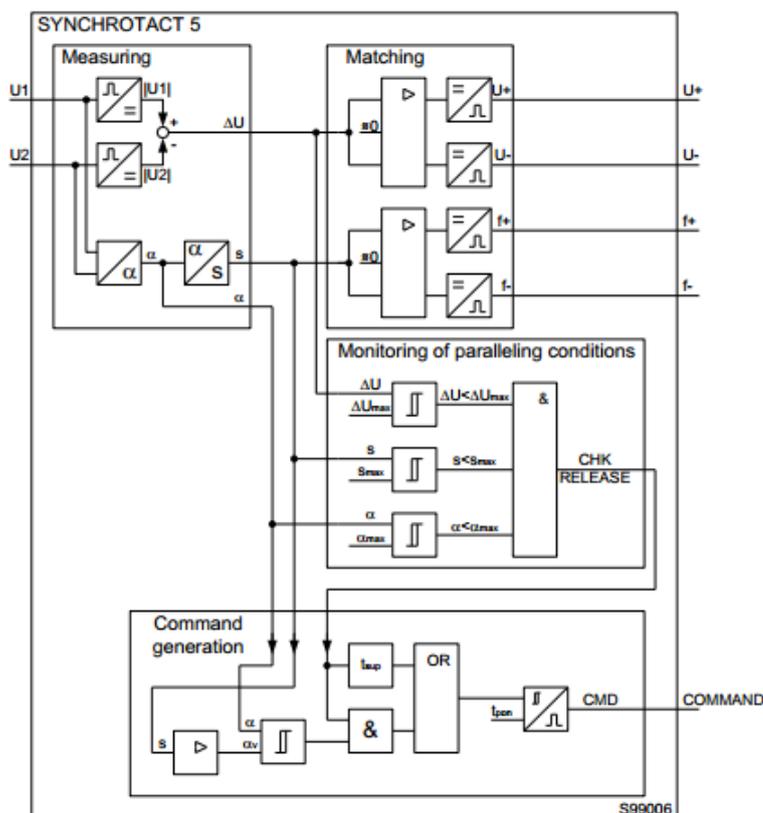


Рис.1.6 Функциональная схема автоматического синхронизатора Synchronact 5

#### 1.4 Определение задачи исследования

Способ точной автоматической синхронизации является наиболее используемым при подключении синхронных генераторов на параллельную работу с сетью. Он обеспечивает наименьшие ударные воздействия на генератор и сетевую аппаратуру.

Недостатками способа точной синхронизации являются сложность схемы и аппаратуры включения, сравнительно большое время необходимое для включения генератора в сеть, невозможность использования в системах, не имеющих быстродействующего и точного регулирования частоты вращения привода генератора.

В Российском патенте на изобретение №2494513 [5], авторами которого являются Котеленец Н.Ф. и Богачев А.В. описан способ синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью. Согласно формуле изобретения предлагается следующее:

«Способ синхронизации возбужденной синхронной машины, состоящий в ожидании момента сближения фаз и включении возбужденной синхронной машины в сеть в момент сближения фаз, отличающийся тем, что момент включения генератора в сеть определяется в процессе его разгона и происходит при подходе к номинальной частоте вращения тогда, когда минимум напряжения биения становится меньше или равным 10% от номинального напряжения генератора» [5].

В патенте приведена функциональная схема устройства автоматической синхронизации, представленная на рис.1.7.

Данный способ осуществляется с помощью устройства автоматической синхронизации, содержащего блок преобразования напряжения сети и генератора 1 (БП), блок сравнения разности напряжений синхронного генератора и сети с заданной величиной 2 (БС) и логический блок 3 (ЛБ). Блок преобразования служит для получения разности напряжений генератора ( $u_r$ ) и сети ( $u_c$ ) (напряжения биения  $u_s$ ). Блок сравнения сравнивает напряжение биения ( $u_s$ ) с опорной величиной ( $u_{оп}$ ) и формирует сигнал, при получении которого логический блок создает сигнал на включение генератора на параллельную работу с сетью [5].

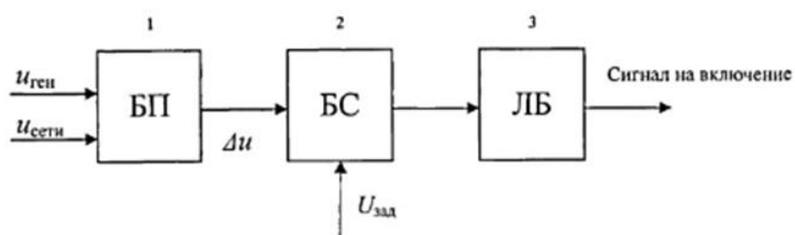


Рис. 1.7 Функциональная схема устройства автоматической синхронизации

Достоинством данного способа является использование в качестве управляющих только двух сигналов: мгновенных значений напряжения одной из фаз генератора и сети.

Задачей настоящего исследования является разработка и анализ способа получения сигнала на включение магнитного пускателя, обеспечивающего быстрое включение синхронного генератора на параллельную работу с сетью. При этом ударные токи должны не превышать допустимых значений и данный способ должен осуществляться без точного регулирования мощности (скорости) привода генератора в процессе разгона. Обеспечение этого условия с одной стороны уменьшит сложность и стоимость аппаратуры управления приводом генератора, с другой стороны обеспечит уменьшение времени запуска генератора.

Техническим результатом должно быть повышение быстродействия включения синхронного генератора в сеть с малым ударным током и электромагнитным моментом.

## 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

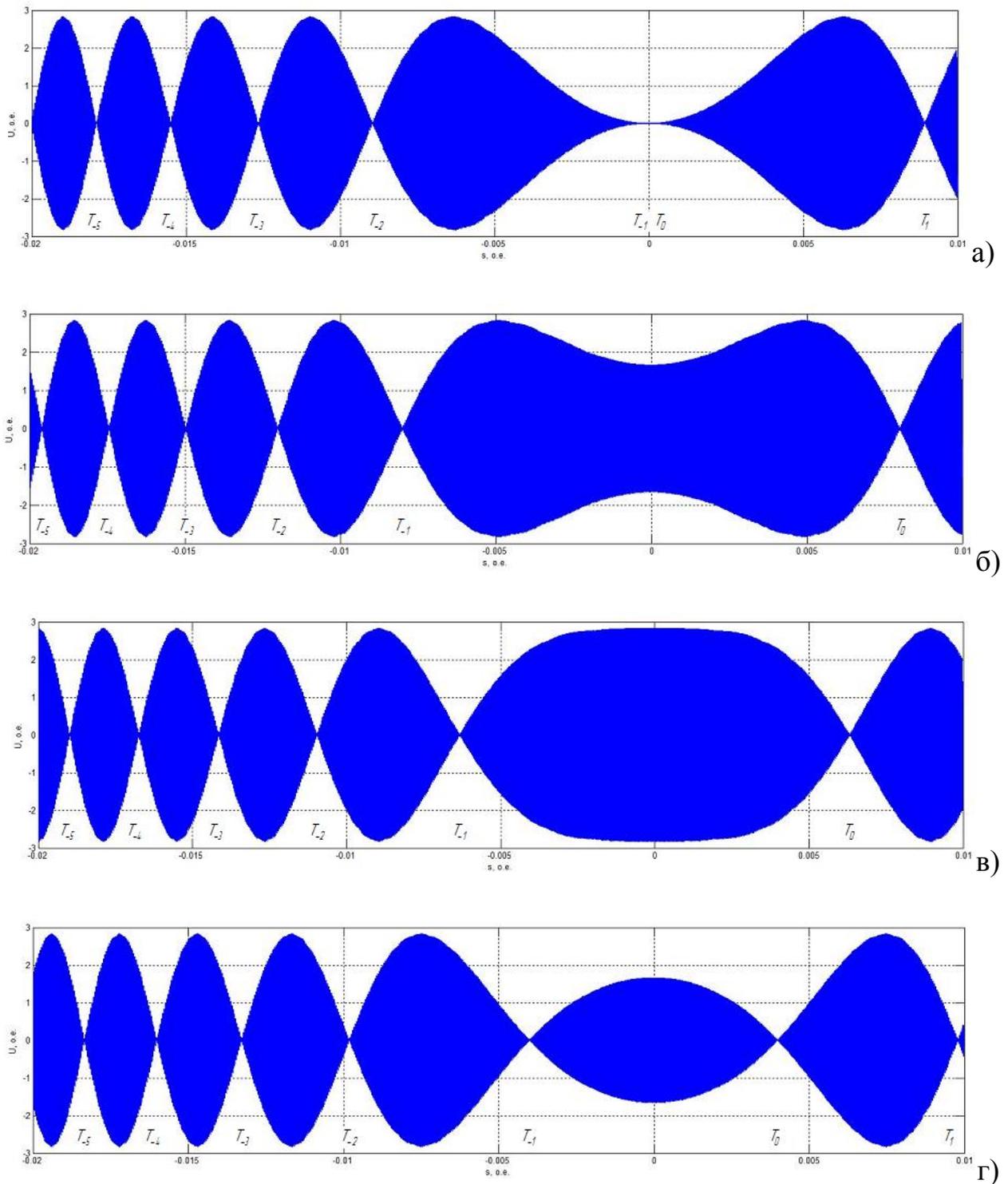
Наибольший интерес при рассмотрении процесса точной синхронизации при включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью представляют процессы, происходящие в области величин относительного скольжения генератора близких к нулю. Рассмотрим процесс генератора и сети при условии, что интенсивность разгона генератора остается постоянной.

На рис.2.1 представлены диаграммы разности напряжений генератора и сети (так называемое напряжение скольжения), при различном угле фаз  $\varphi$  в момент прохождения точки, когда скольжение генератора равно нулю. Графики построены при скорости изменения скольжения ( $df$ ) равной 0,1 Гц/с. Из-за такой небольшой величины  $df$ , на графиках не просматриваются пульсации напряжения скольжения, близкие к частоте сети, а хорошо видно огибающую напряжения скольжения. На рисунке представлены четыре диаграммы, на которых угол фаз  $\varphi$  напряжений при скольжении генератора равном нулю составляет 0, 70, 180, 270 электрических градусов соответственно.

Диаграмма а) является идеальной для проведения включения синхронного генератора, на ней в момент совпадения частот генератора и сети ( $s=0$ ) фазы напряжений тоже совпадают, однако на других диаграммах такого идеального совпадения нет. При этом следует отметить, что при реальном пуске генератора заранее предсказать какой угол фаз  $\varphi$  будет при скольжении равном нулю невозможно.

Проанализируем, какие точки являются наиболее выгодными для реализации в них подключения генератора к сети. Одним из условий реализации точного метода подключения является совпадение фаз напряжений генератора и сети.

Совпадение фаз происходит в точках Т (с нумерацией -5 до 1), представленных на диаграмме рис.2.1Рис.2.1.



а)  $\varphi = 0$  эл.град. б)  $\varphi = 70$  эл.град. в)  $\varphi = 180$  эл.град. г)  $\varphi = 290$  эл.град.

Рис.2.1 Диаграммы разности напряжений генератора и сети, при различном угле фаз  $\varphi$  в момент прохождения точки  $s=0$

Нумерация точек выполнена следующим образом, за обозначение ноль принята точка, в которой положение фазы напряжения генератора не отстало и не опередило на  $2\pi$  напряжение сети. Эта точка наблюдается сразу после

прохождения генератором скольжения равного нулю (или в частном случае в момент прохождения нуля). Отрицательная нумерация проставлена для точек, где фаза напряжения генератора опережала на угол кратный  $2\pi$  напряжение сети, а положительная нумерация для случая отставания.

Так как еще одним условием успешной синхронизации является как можно меньшая величина скольжения генератора в момент включения, то наиболее хорошими для соблюдения перечисленных условий являются точки  $T_0$  и  $T_{-1}$ . Их привлекательность является равнозначной, так как они симметрично размещаются относительно нуля скольжения генератора. Здесь же надо обратить внимание, что имеется случай, когда они совпадают.

При реализации метода предполагается, что найдя очередную точку совпадения фаз, мы определяем не является ли следующая точка точкой включения выключателя, определяем период времени до следующей точки, и формируем импульс включения подав его раньше на время включения выключателя. Таким образом появляется еще одно ограничение, период перед последней точкой должен быть больше чем, время включения выключателя. Это сразу исключает из рассмотрения точку  $T_0$ , т.к. она вообще может совпадать с точкой  $T_{-1}$ . Поэтому за точку включения принимаем точку  $T_{-1}$ .

В связи с выше указанным, принимаем следующий, в общем, алгоритм определения момента подачи импульса на включение. Находим точку совпадения фаз (по минимуму огибающей), определяем период до следующей точки, определяем, не является ли следующая точка точкой  $T_{-1}$  (ниже приведен алгоритм для такого анализа), и если следующая точка  $T_{-1}$ , то формируем импульс включения с опережением прихода в точку  $T_{-1}$  на время включения выключателя.

Рассмотрим алгоритм для определения периода между точками совпадения фаз. Так как в текущий момент времени нам не известно в какой точке, согласно обозначений рис.2.1 мы находимся, поэтому введем другую систему обозначения точек совпадения фаз, приведенную на рис.2.2, отсчет в

которой начинается от некоторой произвольной точки  $T_0$ , до точки  $T_3$ . А периоды времени между точками обозначим  $t_{01}$ ,  $t_{12}$  и  $t_{23}$ .

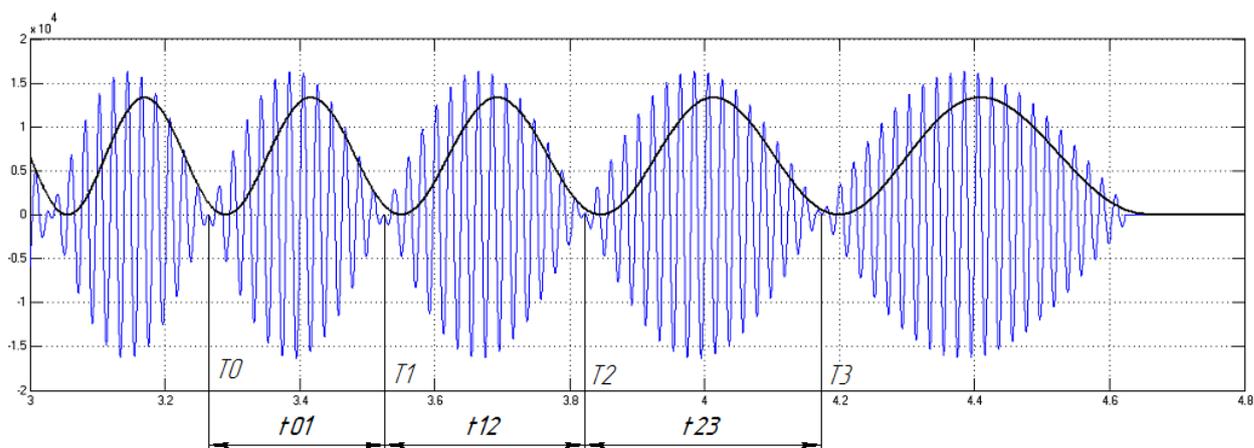


Рис.2.2 Расчетная диаграмма обозначений точек совпадения фаз напряжений

Зададимся ограничением, что скорость увеличения частоты напряжения генератора в некоторый небольшой промежуток времени, например, при прохождении трех последовательных совпадений фаз напряжений генератора и сети, остается постоянной, или изменяется незначительно, а также что в этот период частота сети также меняется незначительно, то можно провести следующие выкладки.

За точку отсчета времени  $t=0$  принимаем положение, в котором фазы напряжений генератора и сети совпадают.

Выражение для определения угла положения фазного напряжения генератора, при условии линейного увеличения скорости вращения генератора, представляется выражением:

$$\varphi_g = 2 \cdot \pi \cdot f_g \cdot t + \frac{2 \cdot \pi \cdot df \cdot t^2}{2}, \quad (2.1)$$

где  $f_g$  – частота генератора в нулевой отсчет времени, Гц;

$t$  – время, с;

$df$  – скорость изменения частоты генератора, Гц/с.

Выражение для определения угла положения фазного напряжения сети представляется выражением:

$$\varphi_c = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t, \quad (2.2)$$

$f_c$  – частота сети, Гц;

$t$  – время, с.

Зависимость изменения частоты напряжения генератора определяется выражением:

$$f_z = f_{z0} + df \cdot t, \text{ где} \quad (2.3)$$

$f_{z0}$  – частота напряжения генератора при  $t=0$ .

Скольжение генератора определяется выражением:

$$s = \frac{f_z - f_c}{f_c} \quad (2.4)$$

Допустим, процесс синхронизации находится в точке  $T_0$ , смотри рис.2.2, и частота напряжения генератора в этой точке равна  $f_0$ . Тогда используя выражение 2.3, можно определить частота напряжения генератора в точке  $T_1$ :

$$f_1 = f_0 + df \cdot t_{01}, \text{ где} \quad (2.5)$$

$t_{01}$  – время, которое пройдет до достижения следующей точки совпадения фаз напряжений ( $T_1$ ).

Так как мы рассматриваем процесс синхронизации в зоне где скорость вращения генератора пока ниже синхронной, то есть частота напряжения генератора меньше частоты напряжения сети, то совпадение фаз напряжений после точки  $T_0$  в точке  $T_1$  происходит тогда, когда разность улов поворота фаз напряжений генератора и сети составит  $2\pi$ . Таким образом, используя выражения 2.1 и 2.2 можно записать:

$$2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t_{01} + \frac{2 \cdot \pi \cdot df \cdot t_{01}^2}{2} + 2 \cdot \pi = 2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t_{01} \quad (2.6)$$

Сократим выражение 2.6 на  $2\pi$  и перенеся все значения влево, получим:

$$\frac{df \cdot t_{01}^2}{2} + (f_0 - f_c) \cdot t_{01} + 1 = 0 \quad (2.7)$$

В точке  $T_1$  мы также можем определить частоту в точке  $T_2$ , используя выражение 2.5:

$$f_2 = f_1 + df \cdot t_{12}, \text{ где} \quad (2.8)$$

$t_{12}$  – время, которое пройдет до достижения следующей точки совпадения фаз напряжений (Т2).

Для интервала времени  $t_{12}$ , по аналогии с выражением 2.7, получаем выражение:

$$\frac{df \cdot t_{12}^2}{2} + (f_1 - f_c) \cdot t_{12} + 1 = 0 \quad (2.9)$$

Подставив в выражение 2.7 определение величины  $f_1$  из 2.5, получим:

$$\frac{df \cdot t_{12}^2}{2} + (f_0 + df \cdot t_{01} - f_c) \cdot t_{12} + 1 = 0 \quad (2.10)$$

В итоге получили два уравнения 2.7 и 2.10, в которых если считать известными (или измеренными) величины  $f_s$ ,  $t_{01}$  и  $t_{12}$ , то остаются неизвестными  $df$  и  $f_0$ . Умножив выражение 2.7 на  $t_{12}$ , в выражение 2.10 на  $t_{01}$ , а затем, вычтя одно из другого исключить переменную  $f_0$ . Из полученного выражения получаем выражение для определения скорость изменения частоты генератора:

$$df = \frac{2 \cdot (t_{12} - t_{01})}{t_{12} \cdot t_{01} \cdot (t_{12} - t_{01})} \quad (2.11)$$

Зная  $df$  из выражения 2.7 можно получить выражение для определения частоты генератора в точке Т0:

$$f_0 = f_c - \frac{df \cdot t_{01}}{2} - \frac{1}{t_{01}} \quad (2.12)$$

Используя выражение 2.4 определим скольжение:

$$s_0 = -\frac{1}{f_c \cdot t_{01}} - \frac{df \cdot t_{01}}{2 \cdot f_c} \quad (2.13)$$

Используя выражение (2.5) определим скольжение генератора в точке Т1:

$$s_1 = -\frac{1}{f_c \cdot t_{01}} + \frac{df \cdot t_{01}}{2 \cdot f_c} \quad (2.14)$$

Аналогично определим скольжение генератора в точке Т2:

$$s_2 = s_1 + \frac{df \cdot t_{01}}{f_c} \quad (2.15)$$

Для интервала времени  $t_{23}$ , по аналогии с выражением 2.7, получаем выражение:

$$\frac{df \cdot t_{23}^2}{2} + (f_2 - f_c) \cdot t_{23} + 1 = 0 \quad (2.16)$$

Подставив в него выражение для скольжения, получим:

$$\frac{df \cdot t_{23}^2}{2} + s_2 \cdot f_c \cdot t_{23} + 1 = 0 \quad (2.17)$$

Решая квадратное уравнение 2.17 получаем выражение для определения интервала времени между точками Т2 и Т3:

$$t_{23} = \frac{-s_2 \cdot f_c \pm \sqrt{(s_2 \cdot f_c)^2 - 2 \cdot df}}{df} \quad (2.18)$$

Уравнение 2.17 имеет два корня, нас интересует только меньшее значение корня, так как большее значение корня определяет момент времени на участке, когда частота напряжения генератора уже больше частоты напряжения сети. Следует обратить внимание, что корни могут быть и комплексные (в случае отрицательной величины подкоренного выражения), это происходит в тот момент, когда точка Т2 находится уже в области положительных значений скольжения. Эта особенность может быть использована для определения состояния, когда мы уже пропустили точку возможного подключения генератора.

Окончательно выражение для определения интервала времени между точками Т2 и Т3 имеет следующий вид:

$$t_{23} = \frac{-s_2 \cdot f_c - \sqrt{(s_2 \cdot f_c)^2 - 2 \cdot df}}{df} \quad (2.19)$$

Таким образом, находясь в точке Т2 и зная периоды времени  $t_{01}$  и  $t_{12}$  можно, используя выражение 2.11 определить  $df$  (скорость изменения частоты напряжения генератора), а затем с помощью выражений 2.14 и 2.15 определить скольжения генератора  $s_1$  и  $s_2$ . Зная скольжение  $s_2$  и  $df$  можно по выражению 2.19 определить период времени до следующей точки совпадения фаз. Это позволяет реализовать алгоритм формирования сигнала управления на выключатель с учетом времени на включение выключателя.

На рис.2.3 представлены диаграммы изменения угла фазы между напряжениями генератора и сети угле при различных углах фаз  $\varphi$  в момент прохождения точки  $s=0$ . Данные диаграммы построены с помощью скрипта MATLAB, приведенного в приложении А. Как видно из диаграмм есть только одна идеальная диаграмма, когда в момент прохождения через ноль скольжения генератора фазы генератора и сети совпадают. Рассмотрим эту диаграмму более подробно.

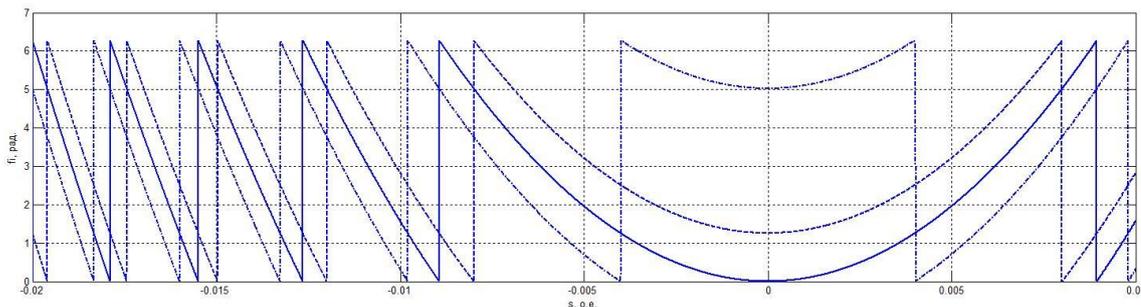


Рис. 2.3 Диаграммы изменения фазы между напряжениями генератора и сети при различных углах фаз  $\varphi$  в момент прохождения точки  $s=0$

На рис.2.4 представлена только одна интересующая нас диаграмма. Для нее можно определить длительности периодов между совпадениями фаз. Отсчет периодов начнем с 1, обозначив так период, прилегающий к точке нулевого скольжения. Нумерация возрастает к направлению начала разгона генератора.

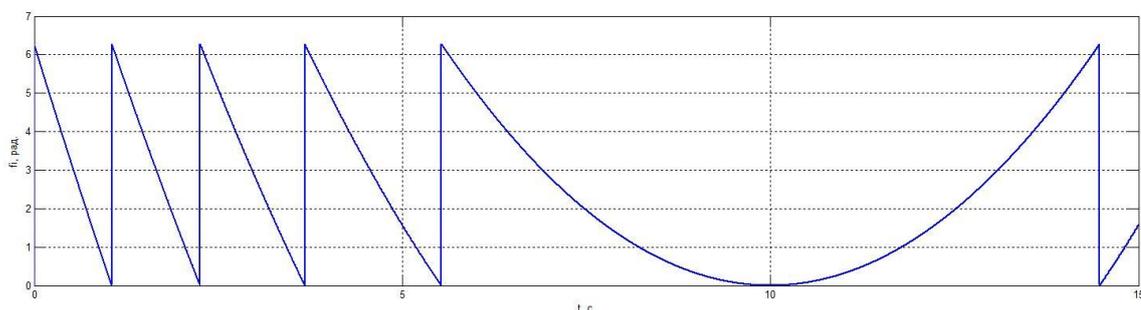


Рис. 2.4 Диаграммы изменения фазы между напряжениями генератора и сети угле фаз  $\varphi=0$  в момент прохождения точки  $s=0$

В общем виде длительность периода определяется следующим выражением:

$$t_i = \sqrt{\frac{2}{df}} \cdot (\sqrt{i} - \sqrt{i-1}), \text{ где} \quad (2.20)$$

$i$  – номер периода.

Нас интересует длительность второго периода ( $i=2$ ), длительность которого равна:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2}{df}} \cdot (\sqrt{2} - 1) \quad (2.21)$$

Длительность этого периода определяет максимальную длительность периода, при которой еще существует точка совпадения фаз напряжений в зоне отрицательных значений скольжения генератора.

Именно по этой длительности можно организовать выбор того периода, на котором производится включение выключателя, присоединяющего генератор к сети.

### **3 МОДЕЛЬ ВКЛЮЧЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ С СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Для решения поставленной задачи проведем исследование проблемы путем анализа поведения математической модели, описывающей процесс включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

Математическую модель можно построить путем составления системы дифференциальных уравнений, описывающих с необходимой точностью процесс разгона синхронного генератора и его включения, а затем решения численными методами полученной системы в некотором программном математическом пакете. В данном случае могут быть использованы программные системы MATLAB, MathCad, Mathematica или другие пакеты. Однако данный метод решения достаточно сложен, особенно при составлении системы дифференциальных уравнений, и может таить в себе трудность нахождения возможных ошибок.

Существует другой путь создания математической модели объекта и его исследования. Данный путь заключается в использовании программных систем, в которых уже созданы и собраны в библиотеки матмодели отдельных элементов системы, и исследователю необходимо из существующих библиотечных элементов собрать свою систему. В качестве таких программных систем можно привести системы Simulink из пакета MATLAB, а также AmeSim. Остановим свой выбор на системе Simulink компании MathWorks, так как в составе этого пакета есть библиотека SimPowerSystems [2], содержащая элементы трехфазных сетей и в том числе модель синхронной машины, которая может работать как в режиме двигателя, так и генератора. Так же имеется набор элементов достаточный для построения системы управления.

На рис.3.1 представлена модель включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью разработанная в программе Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystems.

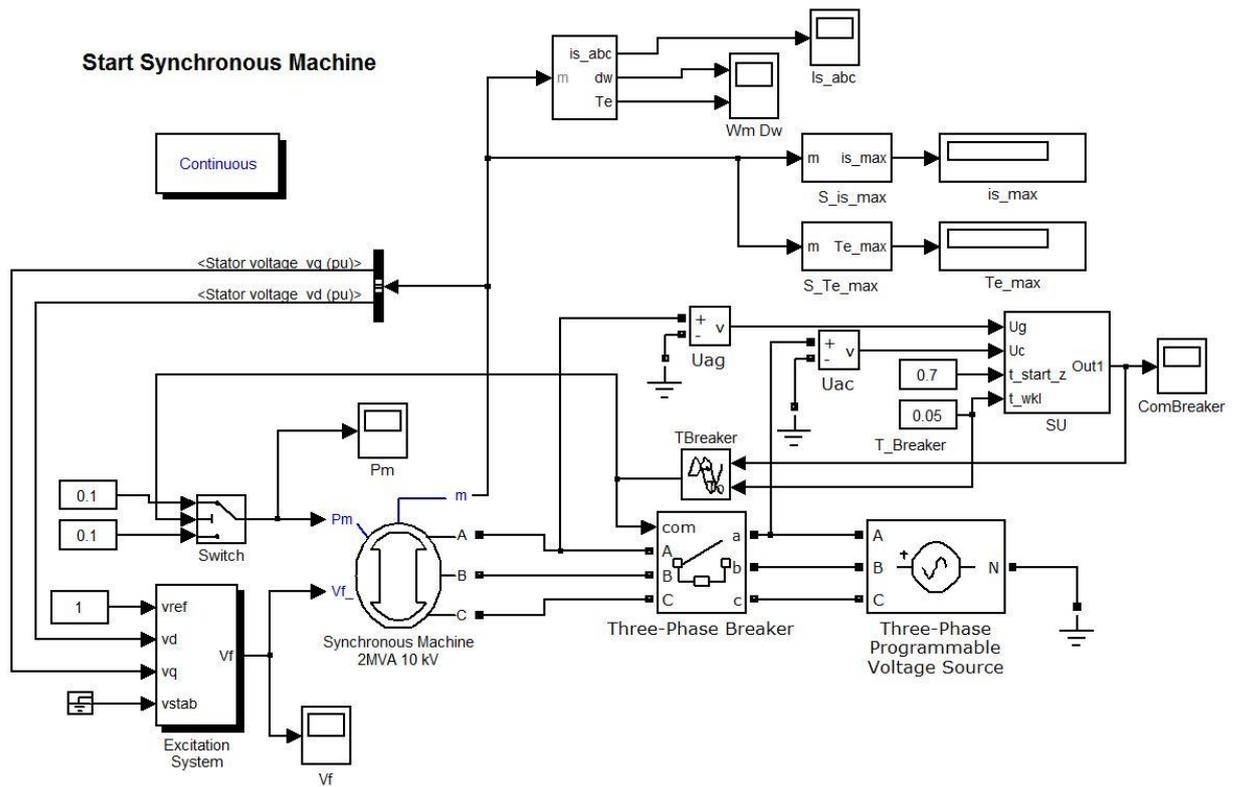


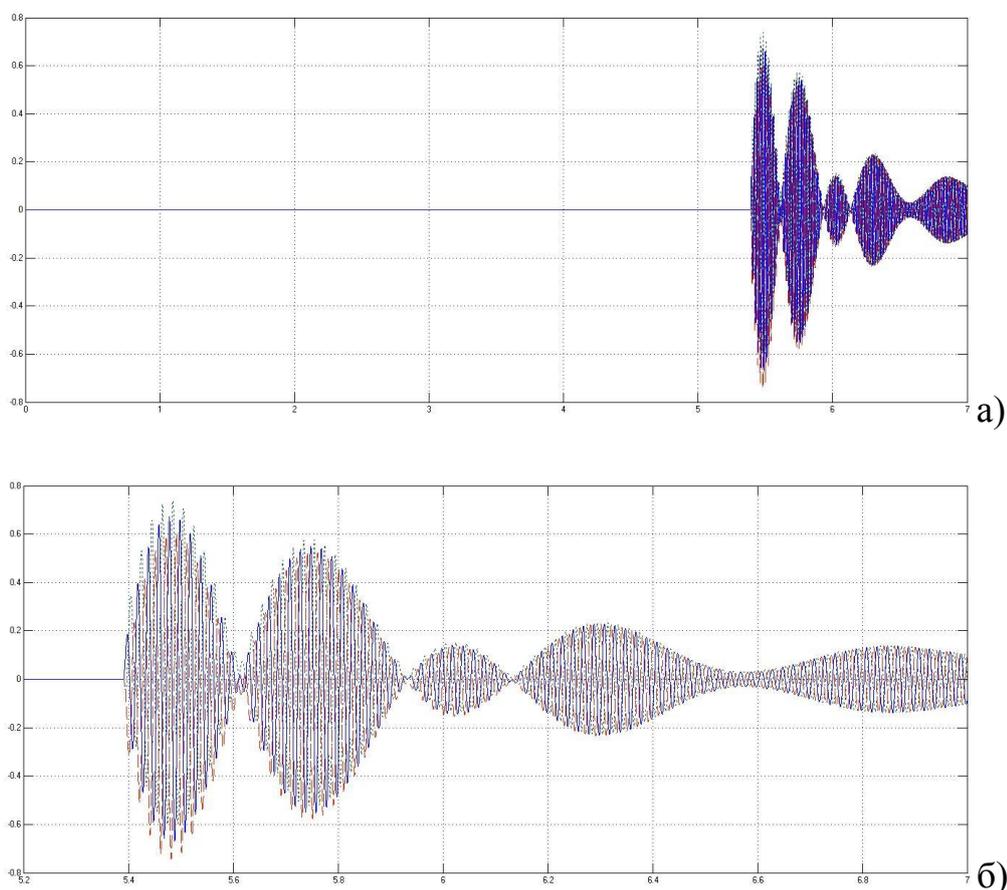
Рис. 3.1 Модель включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой

Основным элементом модели является библиотечный элемент синхронной машины, параметры которой установлены соответственно заданию на проектирование 2 MVA мощности и 10kV напряжения. Сеть моделируется трех фазной ЭДС в виде элемента Voltage Source. В качестве параметров этого элемента устанавливается напряжение, частота и начальная фаза. С помощью изменения начальной фазы можно промоделировать ситуацию, когда в момент прохождения скольжением генератора нуля наблюдаются различные фазные несовпадения напряжений генератора и сети.

Синхронный генератор и трехфазная ЭДС соединены между собой через трехфазный выключатель. Включение этого выключателя и моделирует подключение синхронного генератора на параллельную работу с сетью. Время задержки включения выключателя моделируется с помощью блока

задержки TBreaker. Длительность этой задержки устанавливается константой T\_Breaker, установленной в качестве примера в величину 0,05 с.

С модели синхронной машины выдается комбинированный информационный сигнал m, который входит показатели токов стартера, оборотов ротора, скольжения и других параметров. Эти параметры подаются на элементы Scope, с помощью которых можно проконтролировать диаграммы изменения этих параметров, на рис.3.2 и 3.3 представлена диаграмма скольжения генератора. Для определения максимального ударного тока включения используется субмодель S\_is\_max, которая описывается ниже. Результат отображается на элементе дисплея is\_max, пример представлен на рис.3.1.



а) весь период синхронизации,

б) диапазон ударных токов в момент включения выключателя

Рис. 3.2 Диаграммы токов стартера

На рисунках 3.3 и 3.4 представлены диаграммы изменения скольжения генератора и величины электромагнитного момента.

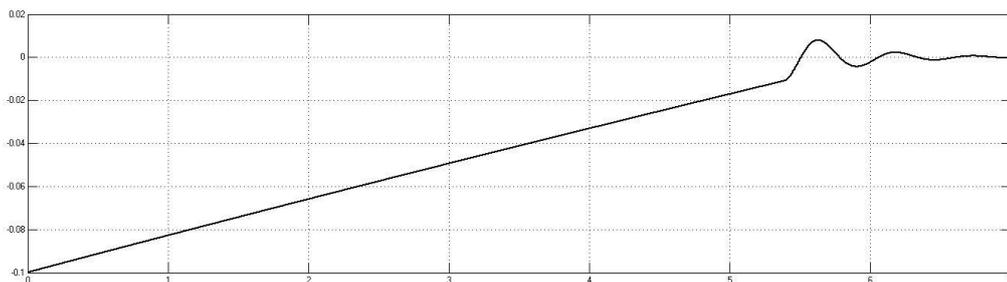


Рис. 3.3 Диаграмма изменения скольжения генератора

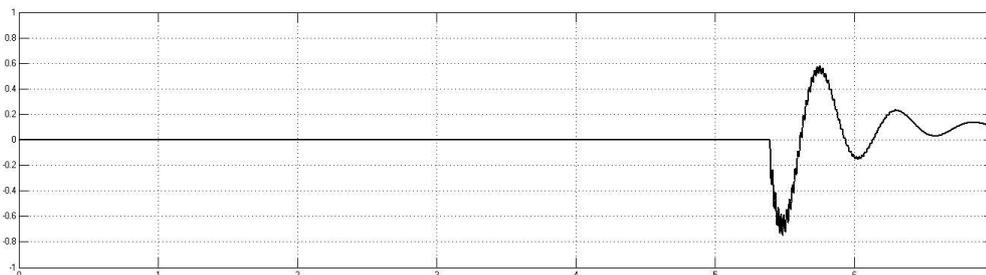


Рис. 3.4 Диаграмма электромагнитного момента генератора

Проекции напряжений статора на оси d и q ( $v_d$  и  $v_q$ ) подаются на блок управления возбуждением синхронного генератора, который определяет величину вырабатываемого напряжения. Величина уставки подается на вход  $v_{ref}$  и установлена в модели равной 1, что соответствует номинальному напряжению генератора. Четвертый вход для управления мощностью генератора в модели не используем. Диаграмма сигнала управления возбуждением генератора представлена на рис.3.5

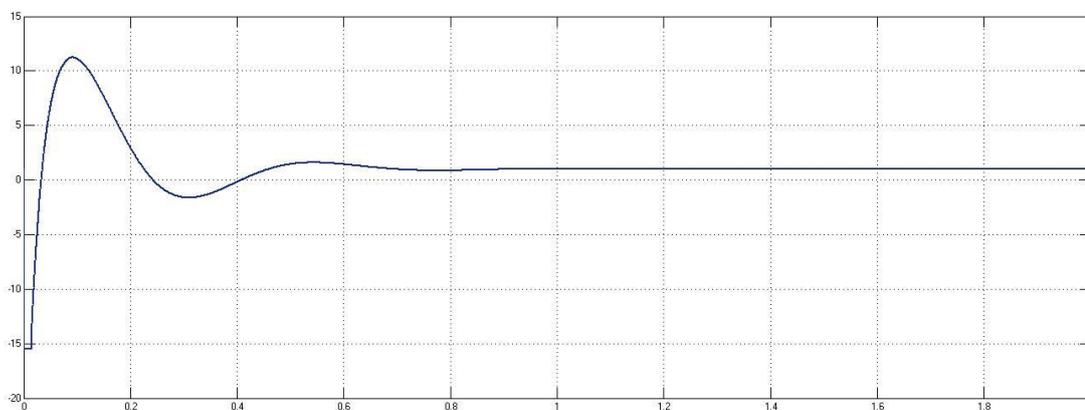


Рис. 3.5 Диаграмма изменения тока возбуждения генератора

На вход  $P_m$  модели синхронной машины подается сигнал пропорциональный моменту от системы привода синхронного генератора. В модели установлен переключатель, с помощью которого можно устанавливать разную величину момента приводов для периода разгона генератора и периода после включения выключателя.

Изменяя величину момента привода можно обеспечить различную скорость разгона генератора, причем, чем больше момент, тем больше скорость разгона.

Управление процессом включения выключателя осуществляется в субмодели системы управления SU. На вход системы управления подаются величины мгновенных напряжений фазы А генератора и сети, полученные с измерителей напряжения  $U_{ag}$  и  $U_{ac}$ . Так же на вход системы управления подается величина времени задержки включения выключателя для формирования времени опережения. Четвертым параметром указывается время стартовой задержки, которое необходимо для перехода модели системы управления возбуждением синхронного генератора в установившийся режим, а также для обеспечения стартовой прогонки системы управления. Величина стартовой задержки установлена в 0,7 с, что обосновывается диаграммой, представленной на рис.3.5.

В качестве выхода из системы формируется импульс на включение выключателя, который подается на блок задержки. Данный импульс можно проконтролировать с помощью элемента Scope ComBreak, пример представлен на рис.3.6.

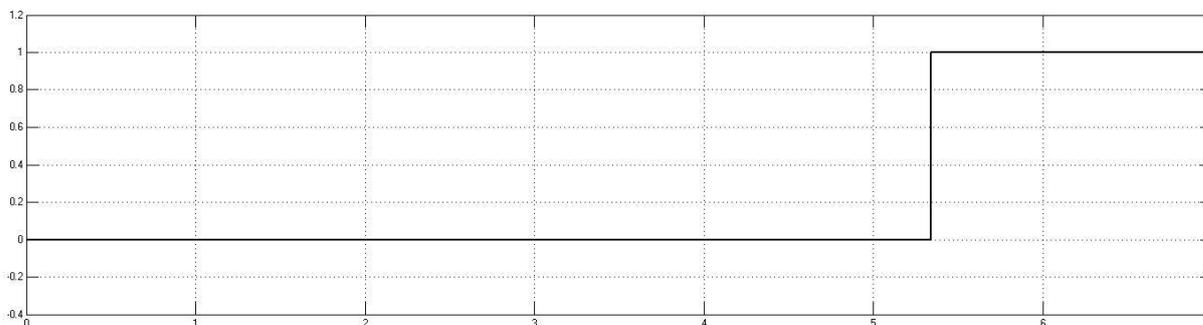


Рис. 3.6 Диаграмма импульса на включение выключателя

На диаграмме видно, что сигнал включения со схемы управления приходит раньше на 0,05 с чем происходит момент включения выключателя и начало процесса втягивания генератора в синхронизм, смотри на рис.3.2 момент начала ударных токов синхронизации.

В модели происходит модельный расчет не всего времени разгона генератора от нулевой скорости, а моделируется процесс разгона от некоторой скорости до момента наступления момента синхронизма с некоторым запасом на переходные процессы после подключения генератора к сети. Начальная скорость генератора устанавливается в виде параметра в модели синхронной модели. В частности, расчеты проводились для стартовой величины скольжения генератора равной -0,1. Управление начальной фазой старта в библиотечном элементе синхронной машины отсутствует.



напряжение скольжения (в некоторых источниках напряжение биений). Далее берется абсолютное значение сигнала, что аналогично операции выпрямления в существующих синхронизаторах. Этот блок необходим для перевода сигнала из близкого к симметричному относительно нуля в сигнал всегда больший или равный нулю, чтобы по нему можно было оценивать, хотя бы качественно, уровень рассогласования фаз генератора и сети. Данный сигнал носит импульсный характер, и для его сглаживания устанавливаем блок «Analog Filter NN» - фильтр высоких частот. Это аналогично установке конденсатора после выпрямительного моста. Данный фильтр обеспечивает достаточное сглаживание сигнала, позволяющее однозначно определить минимум сигнала, который показывает положение точки совпадения фаз напряжений. Пример входного сигнала и сигнала после фильтра приведен на рис.4.2. Для отображения на одной числовой оси для сигнала после фильтра проведено масштабирование. Из диаграммы видно, что сигнал после фильтра достаточно характерно отмечает точки совпадения фаз напряжения генератора и сети. В начальной части диаграммы можно отметить, что сигнал после фильтра имеет меньшую амплитуду и для надежной работы системы управления требуется начальная пауза в обработке.

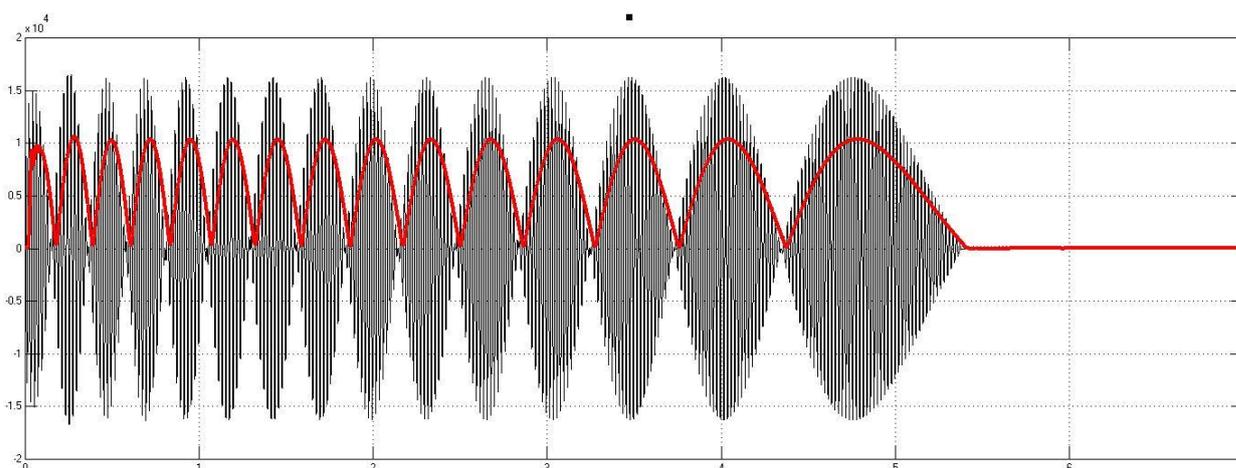


Рис. 4.2 Диаграммы разности фазных напряжений и выходного сигнала после фильтра

Форма последней волны биений, перед включением выключателя, приобретает вытянутый характер, что характерно для скольжения генератора близкого к нулю.

На рис.4.3 приведена часть предыдущей диаграммы с большим масштабом по времени. На данной диаграмме видно, что сигнал после фильтра несколько отстает по фазе на величину  $dT_{int}$ . Данное отставание сигнала характерно для фильтров высокой частоты.

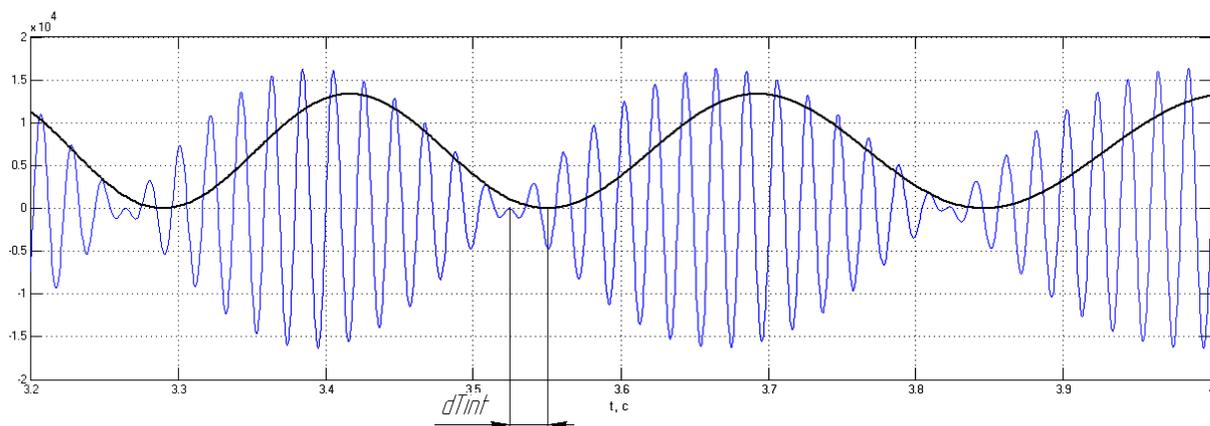


Рис.4.3 Диаграммы разности фазных напряжений и выходного сигнала после фильтра, и обозначения временной задержки сигнала

Данное отставание сигнала огибающей характерно и для существующих синхронизаторов, однако в описаниях это отставание в большинстве случаев не упоминается, и ему не уделяется должного внимания. Причина того что на это отставание не уделяют внимания в том, что это отставание закладывают в область определения (регулирования или установки) времени опережения, устанавливая время опережения больше времени срабатывания выключателя. И так как работа известных синхронизаторов происходит при малой величине скольжения генератора, и незначительной скорости изменения скольжения, то эта величина отставания остается практически одинаковой, и не сильно влияет на определение времени опережения.

В нашем же случае это смещение играет отрицательную роль, особенно его неодинаковость при проходе очередной точки совпадения фаз. Хотя

средняя его величина может быть компенсирована вычитанием из интервала задержки на включение выключателя, по сути также как в реализованных синхронизаторах.

Далее следует модуль сравнения Relational Operator, который сравнивает отфильтрованный сигнал с тем же сигналом, но с небольшим отставанием, что позволяет определить момент времени, когда отфильтрованный сигнал начинает возрастать, причем мелкие колебания сигнала не будут обнаружены. Таким образом после элемента «Relational Operator» формируется единичный импульсный сигнал, причем единица появляется в момент прохождения минимума огибающей напряжения скольжения (конечно с учетом запаздывания), и сбрасывается в ноль в момент прохождения максимума.

Далее по схеме размещается элемент Integrator, отсчет которого сбрасывается в ноль нарастающим фронтом сигнала с выхода Relational Operator. После интегратора мы получаем пилообразный сигнал, амплитуды импульсов которого соответствуют периоду, прошедшему с момента предыдущего совпадения фаз напряжений.

На элементе Subsystem3 реализовано хранение длительности двух периодов  $t_{01}$  и  $t_{12}$ , которые элемент выдает в виде сигналов  $t_{01}$  и  $t_{12}$ . Значения величин периодов подаются с интегратора с задержкой на один расчетный шаг, и переключение осуществляется нарастающим фронтом сигнала с выхода «Relational Operator».

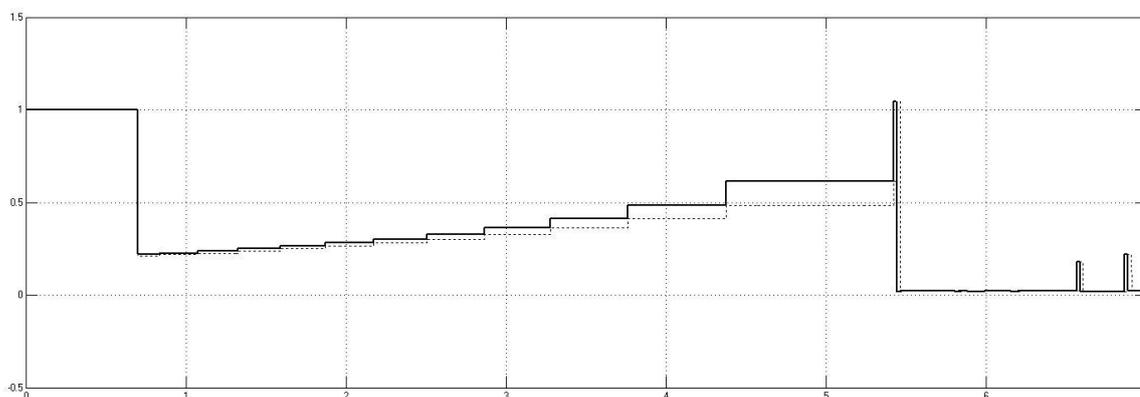


Рис. 4.4 Диаграмма определенных значений периодов времени между моментами совпадениями фаз

На рис.4.4 Рис. 4.4представлена диаграмма определенных значений периодов  $t_{01}$  и  $t_{12}$ , где период  $t_{01}$  обозначен точечной линией, а период  $t_{12}$  сплошной линией.

Далее в схеме реализованы два ключа Switch и Switch1, с помощью которых реализовано присвоение периодам  $t_{01}$  и  $t_{12}$  на начальном участке расчета значений равных 1, что необходимо для исключения операции деления на ноль, пока величины периодов не приобрели некоторых начальных значений.

Сигналы  $t_{01}$  и  $t_{12}$  подаются на субмодель Fun\_df, в которой производится расчет скорости изменения скольжения df. Диаграмма сигнала df представлена на рис.4.5.

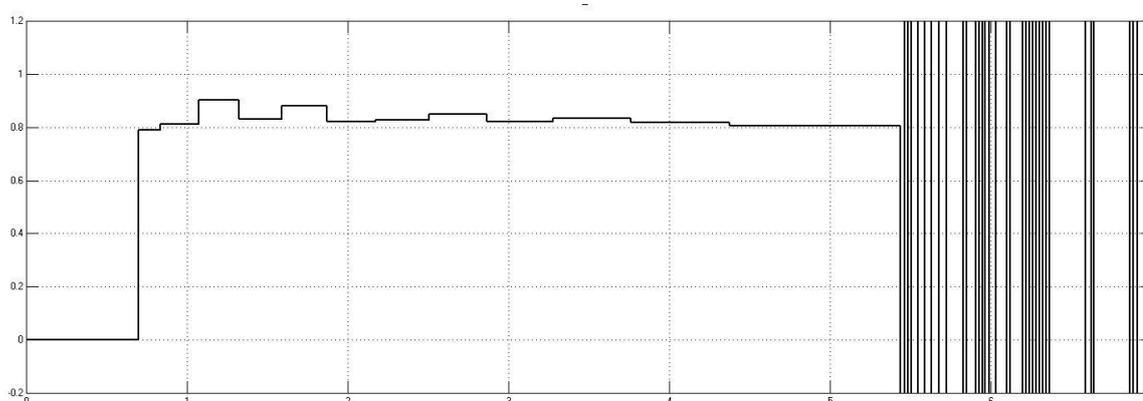


Рис. 4.5 Диаграмма рассчитанной скорости изменения скольжения генератора df

На шум в конце диаграммы можно не обращать внимания, так как он происходит после подачи импульса на включение выключателя (шум возникает из-за начавшихся переходных процессов), а в это время сигнал уже не используется для анализа.

Сигнал  $df$  носит ступенчатый характер, что вызывается неточностями определения точек совпадения фаз из-за нестабильного смещения сигнала, получаемого после фильтрации. Однако при приближении к моменту синхронизации длительность периодов увеличивается, и влияние ошибок снижается.

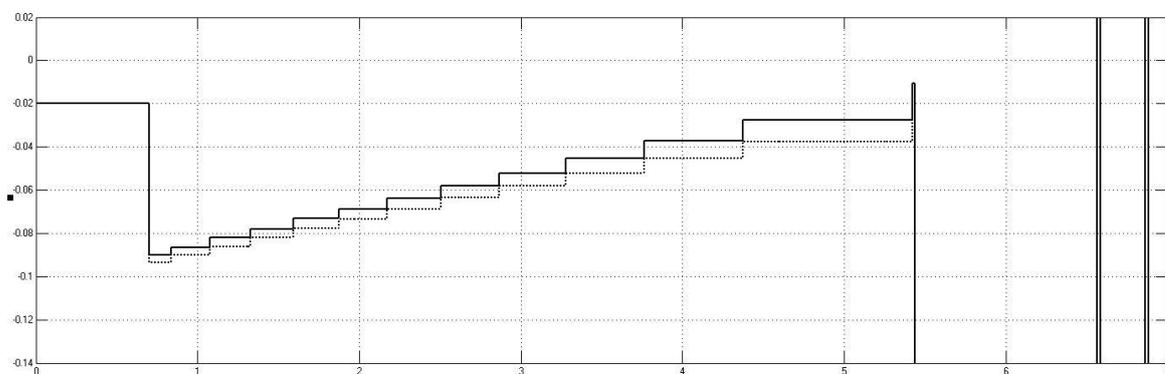


Рис. 4.6 Диаграмма рассчитанных величин скольжения  $s_1$  и  $s_2$

Далее сигналы  $t_{01}$ ,  $t_{12}$ ,  $fd$  и значение частоты сети  $F_s$  подаются на субмодели  $Fun_{s1}$ ,  $Fun_{s2}$  и  $Fun_{t23}$ , в которых производится расчет скольжений генератора  $s_1$ ,  $s_2$ , и величины периода  $t_{23}$  до следующего совпадения фаз напряжений.

На рис.4.6 представлены диаграммы рассчитанных величин скольжения  $s_1$  и  $s_2$ . По диаграммам видно, что скольжение генератора постепенно приближается к нулю, по слабо выраженной экспоненциальной зависимости. Поэтому общее снижение  $df$  на приведенном выше рисунке является обоснованным.

На рис.4.7 приведена диаграмма рассчитанного периода до следующего совпадения фаз  $t_{23}$ .

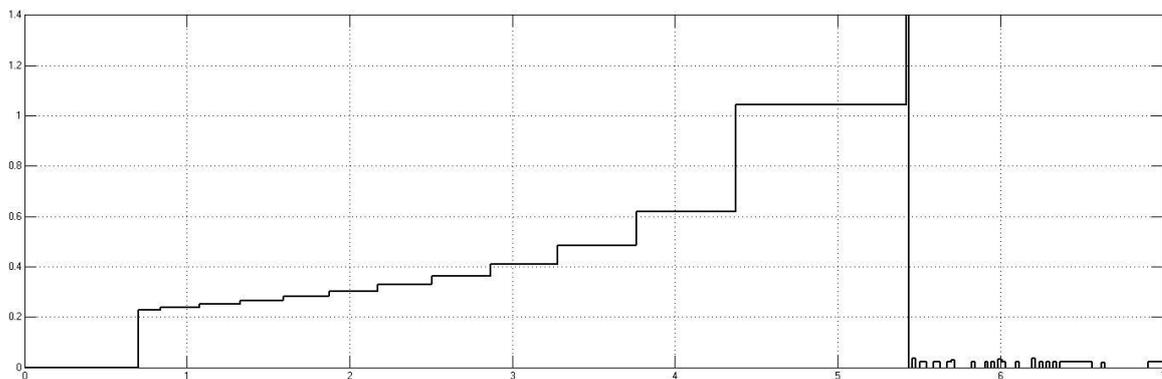


Рис. 4.7 Диаграмма рассчитанного следующего периода совпадения фаз  $t_{23}$

В субмодели Fun\_t23max производится расчет величины максимально допустимой длительности периода на данной скорости изменения скольжения, после которого уже не будет точек совпадения фаз до точки с нулевым скольжением генератора. Полученная величина сравнивается с длительностью периода  $t_{23}$  в элементе Relational Operator1, и в случае если  $t_{23} > t_{23max}$ , то формируется единичный импульс, о необходимости формирования импульса на включение выключателя.

С помощью элементов Switch2 и Integer Delay2 формируется устойчивый единичный импульс, который не сбросится при переходе к нулю сигнала с Relational Operator1, что собственно и необходимо для устойчивого включения выключателя. Фронт нарастания импульса формируется в момент времени совпадения фаз напряжений ( $T_2$  по классификации рис.2.1), когда произошло определение, что следующая точка совпадения фаз последняя перед проходом скольжения генератора через нулевое значение. Остается только сформировать задержку фронта этого импульса, чтобы он был подан на выключатель в необходимый момент времени.

Задержка импульса включения выполняется элементом Variable Time Delay1. Длительность задержки определяем путем вычитания из величины  $t_{23}$ , времени задержки сигнала фильтром (смотри рис.4.3), на схеме это константа  $t_{int}$ , и длительности включения выключателя, берется во входа  $t_{wkl}$  субмодели схемы управления.

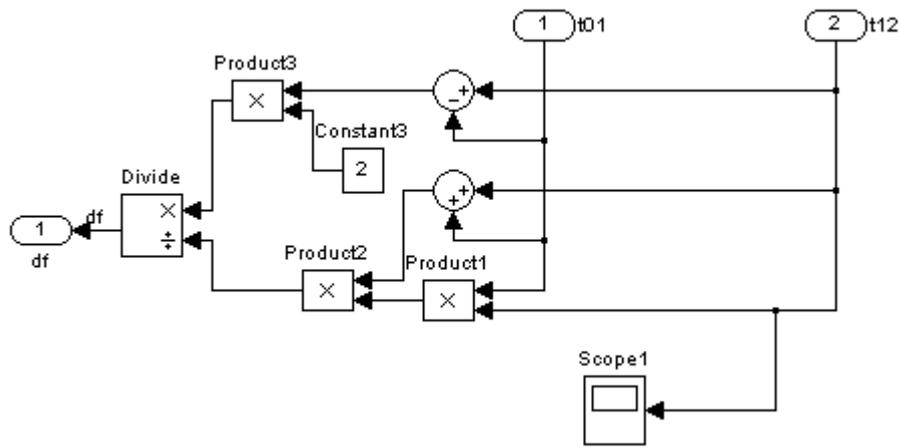


Рис.4.8 Модель Fun\_df расчета скорости изменения частоты генератора (df)

На рис.4.8 представлена субмодель Fun\_df расчета величины скорости изменения частоты генератора df. Субмодель принимает на входы величины параметров: интервала времени между точками 0 и 1  $t_{01}$ , и интервала времени между точками 1 и 2  $t_{12}$ . Используя стандартные операторы Simulink проводятся вычисления по формуле 2.11, определяя величину скорости изменения частоты генератора df. Полученная величина подается на выход df субмодели.

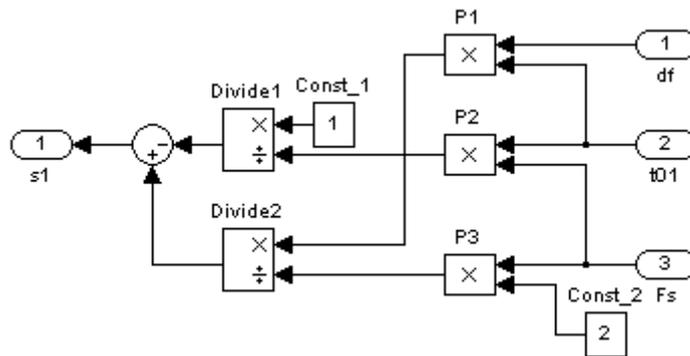


Рис.4.9 Модель Fun\_s1 расчета величины скольжения ( $s_1$ )

На рис.4.9 представлена субмодель Fun\_s1 расчета величины скольжения  $s_1$  в токе 1. Субмодель принимает на входы величины параметров: скорость изменения частоты напряжения генератора df, интервала времени между точками 0 и 1  $t_{01}$ , и частоты сети  $F_s$ . Используя стандартные операторы Simulink проводятся вычисления по формуле 2.14,

определяя величину скольжения  $s_1$  в токе 1. Полученная величина подается на выход  $s_1$  субмодели.

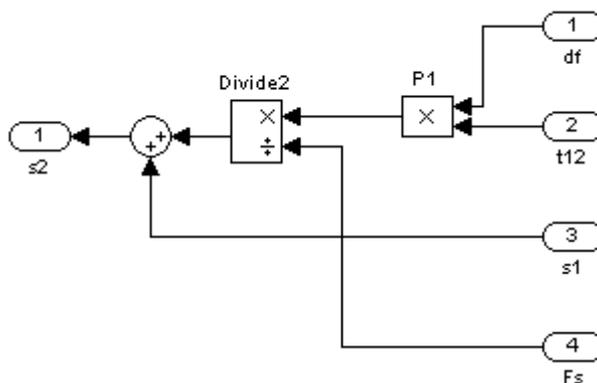


Рис.4.10 Модель Fun\_s2 расчета величины скольжения ( $s_2$ )

На рис.4.10 представлена субмодель Fun\_s2 расчета величины скольжения  $s_2$  в токе 2. Субмодель принимает на входы величины: скорость изменения частоты напряжения генератора  $df$ , интервала времени между точками 1 и 2  $t_{12}$ , скольжения в точке 1  $s_1$ , и частоты сети  $F_s$ . Используя стандартные операторы Simulink, проводятся вычисления по формуле 2.15, определяя величину скольжения  $s_2$  в токе 2. Полученная величина подается на выход  $s_2$  субмодели.

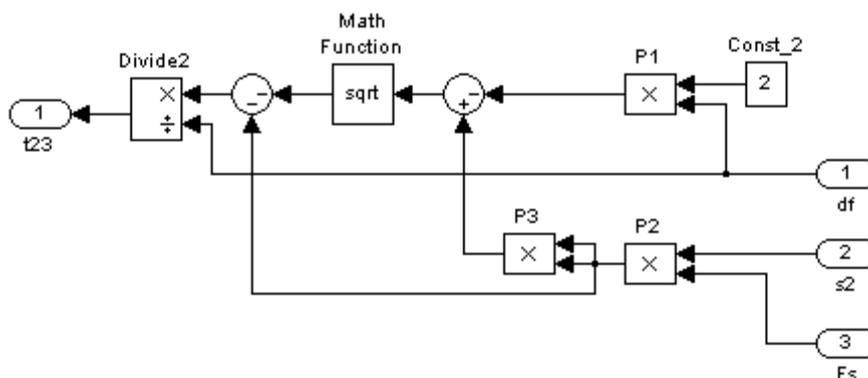


Рис.4.11 Субмодель Fun\_t23 расчета интервала времени до следующего совпадения фаз ( $t_{23}$ )

На рис.4.11 представлена субмодель Fun\_t23 расчета интервала времени  $t_{23}$  до следующего совпадения фаз. Субмодель принимает на входы величины параметров: скорость изменения частоты напряжения генератора

df, скольжения в точке 2  $s_2$ , и частоты сети  $F_s$ . Используя стандартные операторы Simulink проводятся вычисления по формуле 2.18, определяя величину интервала времени до следующего совпадения фаз напряжений генератора и сети  $t_{23}$ . Полученная величина подается на выход  $t_{23}$  субмодели Fun\_t23.

Субмодель S\_is\_max, представленная на рис.4.12, определяет величину максимального значения броска тока генератора и выводит это значение на выход is\_max. Это выполняется путем получения сигналов мгновенных токов из комбинированного сигнала m в элементе разложения комбинированного сигнала, затем берется абсолютное значение сигналов токов, чтобы учесть максимумы на отрицательной полуволне тока.

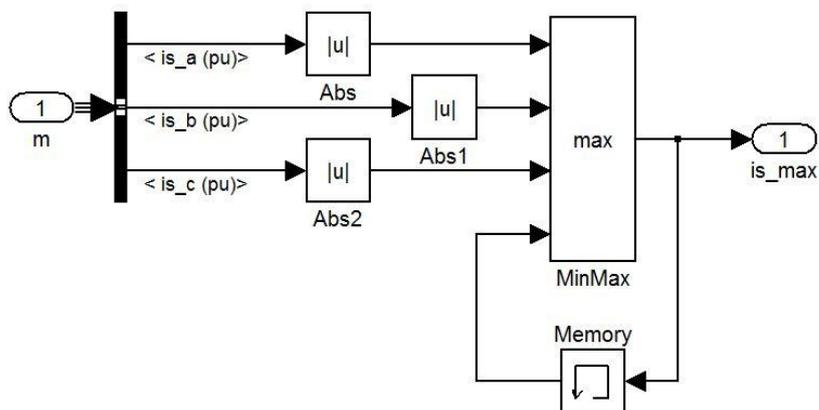


Рис. 4.12 Субмодель определения максимального ударного тока генератора

Абсолютные значения сигналов токов, вместе с ранее полученным, и сохраненным в элементе Memory, подаются на элемент определения максимального сигнала, что обеспечивает постоянное размещение в элементе Memory, максимального на текущий момент времени сигнала.

## 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВКЛЮЧЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ С СЕТЬЮ

В системе Simulink версии R2009a проведем моделирование процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью, используя разработанную выше модель и систему управления.

Моделирование проведем для различных величин тягового момента привода, при этом для каждого значения тягового момента будем проводить серию расчетов для различного стартового положения фазы напряжения сети, в частности будем проводить расчеты от 0 до 360 эл. градусов с шагом 15 эл. градусов. Это позволит оценить диапазон изменения величин максимальных ударных токов и моментов при различных углах прохождения точки совпадения частот генератора и сети. Конечно возможно, что некоторое отклонение попадет внутрь шага по углу, но более мелкий шаг еще больше увеличит число модельных расчетов.

Исходные параметры для конкретного генератора, который задан в задании, были взяты из библиотеки элементов SimPowerSystems для генератора мощностью 2 МВА и напряжения 10 кВ.

Было проведено три цикла расчетов, при различных значениях тягового усилия, подаваемого на синхронный генератор ( $P_m$  равные 0,10, 0,06 и 0,04 о.е), было выполнено моделирование при различных стартовых значениях угла фазы напряжения сети. В конце каждого запуска моделирования снимались показания по максимальному ударному току и моменту, какие удалось получить при отработке системой управления подключения синхронного генератора.

Результаты моделирования сведены в таблицу 5.1. Для того чтобы как-то систематизировать полученные результаты, результаты моделирования подверглись небольшой обработке. Так как стартовый угол фазы напряжения сети не является связанным показателем для различных циклов расчета, то результаты моделирования были обработаны следующим образом, находился

минимум величины ударного тока в цикле и этот результат принимался за ноль для отсчета угла фазы напряжения сети.

Величины максимального ударного момента в относительных единицах практически соответствуют величине максимального ударного тока, поэтому дополнительно его можно не рассматривать.

Таблица 5.1 – Результаты моделирования процесса подключения синхронного генератора на параллельную работу с сетью

Тяговый момент, о.е.	0,1		0,06		0,04	
Скорость изменения скольжения, Гц/с	0,81		0,48		0,28	
Фаза напряжения сети, эл. град.	$I_{\max}$ , о.е.	$M_{\max}$ , о.е.	$I_{\max}$ , о.е.	$M_{\max}$ , о.е.	$I_{\max}$ , о.е.	$M_{\max}$ , о.е.
0	0,68	0,69	0,59	0,59	0,61	0,61
15	0,74	0,75	0,65	0,66	0,66	0,66
30	0,90	0,91	0,69	0,70	0,71	0,71
45	1,00	1,02	0,72	0,73	0,75	0,75
60	1,08	1,10	0,75	0,76	0,78	0,78
75	1,20	1,20	0,79	0,79	0,79	0,79
90	1,34	1,34	0,85	0,86	0,79	0,80
105	1,28	1,30	0,88	0,88	0,83	0,84
120	1,31	1,31	0,90	0,90	0,86	0,87
135	1,35	1,35	0,92	0,93	0,88	0,89
150	1,45	1,45	1,07	1,07	0,90	0,91
165	1,46	1,45	0,98	0,98	0,93	0,93
180	1,60	1,58	0,98	0,98	0,95	0,95
195	1,50	1,50	1,14	1,14	0,97	0,97
210	1,56	1,55	1,12	1,12	0,98	0,98
225	1,52	1,51	1,18	1,18	0,98	0,98
240	1,56	1,54	1,15	1,16	0,98	0,98
255	1,64	1,63	1,26	1,26	0,85	0,85
270	1,64	1,62	1,22	1,23	0,71	0,71
285	1,74	1,73	1,33	1,33	0,70	0,70
300	1,86	1,84	1,31	1,31	0,68	0,68
315	1,76	1,74	1,31	1,31	0,67	0,67
330	1,19	1,24	1,33	1,33	0,66	0,66
345	0,74	0,74	1,36	1,36	0,64	0,64
360	0,68	0,68	0,59	0,39	0,61	0,61
Максимальное	1,86	1,84	1,36	1,36	0,98	0,98
Минимальное	0,68	0,69	0,39	0,39	0,61	0,61

По полученным результатам построим график зависимости максимального ударного тока от начального угла фазы для различных величин тягового момента, прикладываемого к генератору в конце процедуры синхронизации. Для автоматизации построения графика используем скрипт MATLABa `grafic_Rez`, представленный в приложении Б. В скрипте проведено сглаживание результирующих графиков. Результат представлен на рис.5.1.

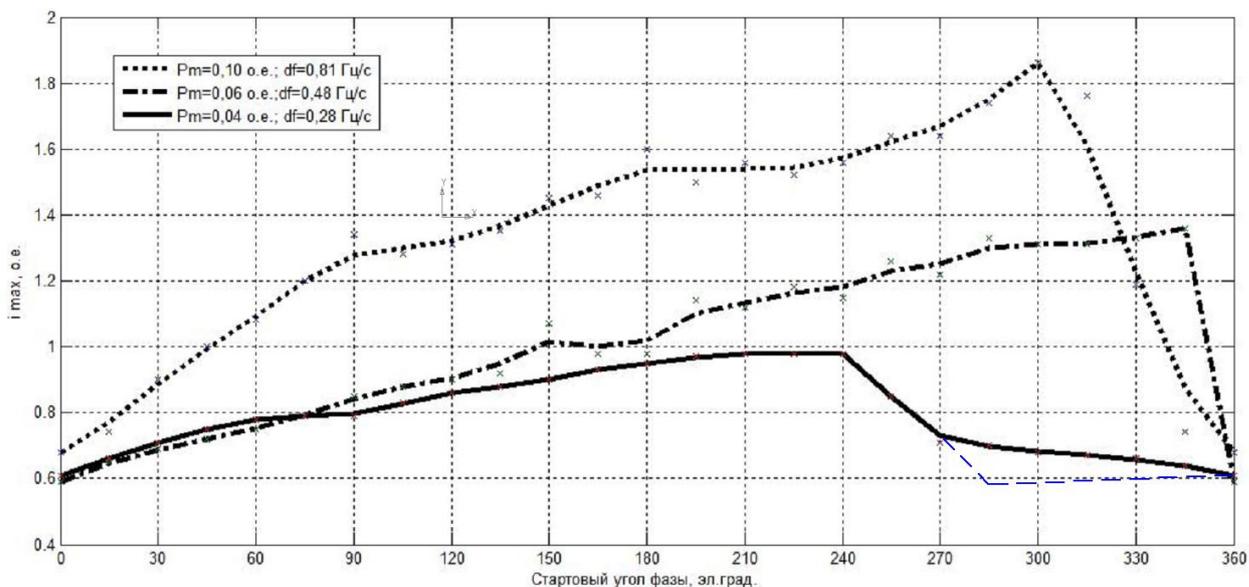


Рис. 5.1 Зависимости максимального ударного тока от начального угла фазы напряжения для различных величин тягового момента

Анализируя полученный результат, видим, что графики имеют характерно выраженный максимум, что объясняется тем, что при некотором соотношении углов фаз напряжения генератора и сети приходится выполнять включение выключателя при достаточно большом скольжении, т.к. при меньшем скольжении нет точки совпадения фаз.

На графиках в районе углов от 0 до 70 градусов наблюдается наложение, что несколько странно. Причина скорее всего в том, что при моделировании цикла с  $P_m=0,04$  не идеально выбирался момент включения, что скорее всего связано с увеличением времени запаздывания сигнала после фильтра и для исправления ситуации требовалась подстройка системы управления, и можно было бы получить график для  $P_m=0,04$  в районе углов

от 270 до 360 такой, как показано штриховой линией. И тогда график для  $P_m=0,04$  имел бы минимум в другой точке и циклично сместился бы вправо, и наложение графиков исключилось бы. Однако реализованная схема не имеет автоматической подстройки, и ее ручная реализация привела бы к тому, что графики максимумов ударных токов были бы получены, по сути для различных систем. Для сохранения единства системы не включаем искусственные исправления.

В итоге моделирования были получены возможные диапазоны величин ударных токов при включении синхронного генератора на параллельную работу сетью при различных скоростях изменения скольжения генератора при подходе к точке равенства частот генератора и сети.

Так как зависимость величины ударного тока от начального угла фазы практически линейна, а получить при синхронизации любой начальный угол равновероятно, то вероятность получения максимальных и минимальных ударных токов примерно равна друг другу.

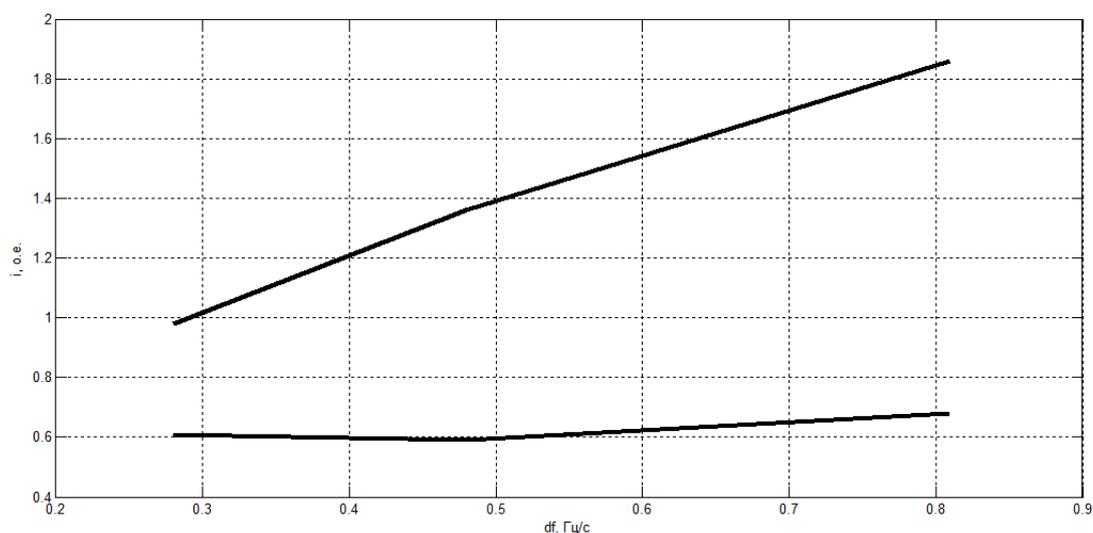


Рис. 5.2 Зависимости максимальных и минимальных уровней ударного тока от скорости изменения скольжения генератора

На рисунке 5.2 приведены зависимости возможных максимальных и минимальных уровней ударного тока от скорости изменения скольжения генератора ( $df$ ) при подходе к точке равенства частот генератора и сети. Из графиков можно сделать вывод, что выполняя синхронизацию при

$df=0,28$  Гц/с ударные токи никогда не превысят номинальных значений, а если выполнять синхронизацию при  $df=0,40$  Гц/с ударные токи примерно в 30% случаев включения будут составлять от номинального значения до величины 1,2 от номинального.

## 6 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

На текущем этапе исследования метода определения момента подачи команды на включение магнитного пускателя, принимать шаги по практической реализации метода на программируемом контроллере еще рано. Следует провести моделирование реализации метода способом, приближенным к реальному макету. Это может быть выполнено с помощью так называемых машин реального времени, предлагаемых компанией MathWorks. Машина реального времени представляет собой компьютер, выполненный в промышленном исполнении, работающий под операционной системой (ОС) реального времени. Среда MS Windows не является ОС реального времени, только управление медленно протекающими процессами допустимо из среды Windows.

Входящая в MATLAB библиотеки MATLAB Coder и Simulink Coder, позволяют автоматически генерировать из моделей MATLAB и Simulink код, готовый к работе на машине реального времени.

Таким образом, используя поставляемые MathWorks аналого-цифровые преобразователи, можно собрать установку, которая будет принимать с трансформаторов напряжения реальные изменения напряжений фаз генератора во время разгона и сети, обрабатывать их в режиме реального времени с помощью алгоритмов реализованных в моделях MATLAB и Simulink и формировать исполнительный импульс на магнитный пускатель.

При этом при реализации будут учтены, проверены и протестированы, особенности, которые влечет за собой переход из режима моделирования с плавающей точкой, который был реализован в моделях, к режиму моделирования с фиксированной точкой, что используется в реальных промышленных контроллерах.

Такой подход обеспечит более надежную проверку работоспособности метода с конкретной реализацией процесса формирования управляющего сигнала, причем в условиях близких к промышленной эксплуатации, но реализованной не как единичное тестовое изделие, а на универсальном

оборудовании, которое легче программируется и тестируется, причем в дальнейшем может быть использовано для моделирования других автоматизированных устройств.

Такой подход макетирования является более экономически выгодным, при условии не единичного случая макетирования, и к тому же более быстро реализуемым по времени, за счет удобства процессов переноса программного кода с моделей MATLAB/Simulink под Windows в код промышленного контроллера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены методы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью.

Предложен метод определения момента подачи команды на включение магнитного пускателя, обеспечивающего точную синхронизацию синхронного генератора, с учетом времени включения магнитного пускателя. Определение момента включения осуществляется на основании обработки мгновенных значений напряжений генератора и сети. Анализируя огибающую напряжения скольжения генератора, определяем длительность периодов между совпадениями фаз напряжений, по полученным периодам определяется скорость изменения скольжения генератора, текущее скольжение и ожидаемый период времени, до совпадения фаз напряжений. На основании величины ожидаемого периода формируется импульс на включение выключателя.

В программе Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystems была разработана модель включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью и система управления, реализующая предложенный метод. Путем проведения цикла моделирования была доказана работоспособность предложенного метода управления и получены характеристики, показывающие ожидаемые величины ударных токов синхронизации при различных скоростях изменения скольжения генератора.

Предложенный метод позволяет значительно сократить набор измерительного оборудования для проведения процесса синхронизации, оставив только трансформаторы напряжений для напряжения генератора и сети, что уменьшает стоимость установленного оборудования.

Также предложенный метод позволяет сократить время выполнения операции синхронизации. Правда строго объективно трудно оценить, на сколько уменьшается время пуска. Однако очевидно, что используя предлагаемый метод можно не подгонять частоту генератора к частоте сети, а просто пройти с некоторым ограниченным по величине ускорением точку

нулевого скольжения генератора и синхронизация (включение выключателя) произойдет до нулевого скольжения генератора.

Следует отметить, что модельные испытания показали некоторую неустойчивость реализованного метода, связанные с точностью определения точки совпадения фаз генератора и сети. Эти неточности могут быть снижены путем улучшения характеристик высокочастотного фильтра, например перейдя на цифровой фильтр, или путем реализации других методов определения точки минимума биений напряжения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электротехнический справочник: В 3 т. Т. 3. 2 кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии (Под общ. Ред. Профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др.) 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.
2. Черных И.В., Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008.
3. Богачев А.В., Применение синхронного генератора в системе по использованию избыточного магистрального давления жидкости. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2014.
4. Виштибеев А.В., Автоматика электрических станций в задачах и упражнениях. Методические указания - Новосибирский государственный технический университет, 2004
5. Патент на изобретение RU 2494513. Способ синхронизации возбужденного синхронного генератора с сетью. Котеленец Николай Федорович (RU), Богачев Александр Викторович (RU), публикация патента: 27.09.2013
6. Elias Kyriakides, Innovative concepts for on-line synchronous generator parameter estimation., A Dissertation Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy.- Arizona State University, December 2003
7. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей – М.: Омега-Л, 2015
8. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы 6 и 7 изд., изм. И доп. По состоянию на 1 февраля 2015 г.-7-е изд., Литтерра, 2015.
9. Кудрин, Б.И. Электроснабжение: Учебник / Б.И. Кудрин – М.: Academia, 2015.

10. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования: РД 153-34,0-20,527-98 / [науч. Ред. Б.Н. Неклепаев]. – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2014. – 143 с.
11. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах/ С.А. Ульянов - М.: Энергоатомиздат, 1981.
12. Виштибеев А.В.. Автоматика электрических станций. Методические указания. - Новосибирский государственный технический университет, 2004
13. Манусов В.З. Ядагаев Э.Г. Особенности параллельной работы ветроэлектростанций и электроэнергетических систем. - ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», 2013
14. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов.- 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1985.
15. Гольдштейн М.Е. Тиристорное устройство гашения поля синхронного генератора с системой самовозбуждения / М.Е. Гольдштейн, А.В. Прокудин // Электротехника. – 2013. – № 10. –С. 21–27.
16. Гаврилов А.И. Особенности присоединения малой генерации к электрическим сетям на основе элементов силовой электроники / А.И. Гаврилов, М.Е. Гольдштейн // Научные труды 5-й международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – Томск, 2014. – Т. 2. – С. 514–517
17. Котеленец Н.Ф., Богачев А.В., Ежов Е.В., Способ и устройство синхронизации с сетью возбужденного синхронного генератора.: МЭИ "Электричество", 2014, №5 стр.50-53
18. Климова Г. Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение : учеб. пособие для приклад. бакалавриата / Г. Н. Климова; Томский политехн. ун-т. - 2-е изд. ; гриф УМО. - Москва : Юрайт, 2016. - 179 с.
19. Шаповалов В. А. Организация эксплуатации и ремонта электрооборудования [Электронный ресурс]: практикум / В. А. Шаповалов;

ТГУ; Ин-т энергетики и электротехники; каф. "Электроснабжение и электротехника". - Тольятти : ТГУ, 2016. - 32 с.

20. Реле разности частот типов РГР-11 УХЛ4, РГР-11 О4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. ИАЕЖ.648 246.001 ТО ОБК.469.581. Издание 02. 2013

21. «КЕДР» — Дизельные электростанции, газо-поршневые электростанции. Производство контейнеров для ДГУ, ГПУ и технологического оборудования //ИНСЭТ:сайт. URL: <http://www.kedar.ru/services/sinxronizacziya-elektrostaniczij> (дата обращения 16.04.17).

22. Р.Г. Вильданов, Исследование процесса синхронизации синхронного генератора с сетью и регулирования его активной и реактивной мощностей. Методические указания к лабораторной работе.: Филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ в г.Салавате, 2013

23. Савенко А.Е., Разработка и исследование методов и средств устранения обменных колебаний мощности в судовых электротехнических комплексах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Иваново, 2015.

24. KR101699958 (B1), System and method for determining the power of a plurality of electrical producers and loads, which are operated in a network as a virtual power plant. - 2017-01-25

25. CN205753452 (U), JIANG YINGWEI, HOU KAI., Virtual topological structure of synchrodyne system of high pressure large capacity energy storage, - 2016-11-30

26. DE102015207051 (A1), WEISS HENDRIK [DE], WAGGERSHAUSER ANDRÉ [DE], Verfahren zum Synchronisieren einer Synchronmaschine mit einem Stromnetz Steuereinrichtung und Antriebseinrichtung, - 2016-10-20

27. DK2632012 (T3), VOR DEM ESCHE RAINER [DE], TREPPMANN CHRISTOPH [DE], Method for synchronising a feed-in voltage with a mains voltage, - 2016-04-25

28. WO2017062381 (A1), KEISTER LYLE THOMAS [US], KEISTER JOSHUA DAVID [US], POWER MANAGEMENT UTILIZING SYNCHRONOUS COMMON COUPLING, - 2017-04-13

## Приложение А

Программа MATLAB для построения графиков напряжения скольжения и графиков изменения угла между фазами напряжений.

```
clc, clear all, close all
f0=49;
fk=50.5;
df=0.1;
fs=50; fis00=0; fis01=0.4*pi; fis02=1.6*pi; fis03=1.*pi;
tk=(fk-f0)/df;
t=0:0.001:tk;
f_t=f0+df.*t;
s=(f_t-fs)/fs;

fis0=2*pi*fs*t+fis00;
fig0=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fis00;
fig1=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fis01;
fig2=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fis02;
fig3=2*pi*f0*t+2*pi*df*t.^2/2+fis03;

fi0=2*pi*(f0-fs)*t+2*pi*df*t.^2/2+fis00;
fi1=2*pi*(f0-fs)*t+2*pi*df*t.^2/2+fis01;
fi2=2*pi*(f0-fs)*t+2*pi*df*t.^2/2+fis02;
fl=true;
while fl
    k=find(fi0>=2*pi);
    k1=find(fi1>=2*pi);
    k2=find(fi2>=2*pi);
    if length(k)>0 | length(k1)>0 | length(k2)>0
        fi0(k)=fi0(k)-2*pi;
        fi1(k1)=fi1(k1)-2*pi;
        fi2(k2)=fi2(k2)-2*pi;
    else
        fl=false;
    end
end
fl=true;
while fl
    k=find(fi0<0);
    k1=find(fi1<0);
    k2=find(fi2<0);
    if length(k)>0 | length(k1)>0 | length(k2)>0
        fi0(k)=fi0(k)+2*pi;
        fi1(k1)=fi1(k1)+2*pi;
        fi2(k2)=fi2(k2)+2*pi;
    else
        fl=false;
    end
end
U=sqrt(2)*sin(fis0)-sqrt(2)*sin(fig0);
U1=sqrt(2)*sin(fis0)-sqrt(2)*sin(fig1);
U2=sqrt(2)*sin(fis0)-sqrt(2)*sin(fig2);
```

```

U3=sqrt(2)*sin(fi0)-sqrt(2)*sin(fi3);

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1 1]);
h=plot(t, fi0, 'b');
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
grid on;

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1 1]);
h=plot(s, fi0, 'r', s, fi1, 'g--', s, fi2, 'b-.');
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
set(h(2), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
set(h(3), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('s, o.e. ');
ylabel('fi, рад. ');

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1 1]);
h=plot(s, U);
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('s, o.e. ');
ylabel('U, o.e. ');

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1 1]);
h=plot(s, U1);
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('s, o.e. ');
ylabel('U, o.e. ');

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1 1]);
h=plot(s, U2);
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('s, o.e. ');
ylabel('U, o.e. ');

hf=figure;
set(hf, 'Color', [1 1 1]);
h=plot(s, U3);
set(h(1), 'Color', [0 0 1], 'LineWidth', 2);
grid on;
xlabel('s, o.e. ');
ylabel('U, o.e. ');

```

## Приложение Б

### Программа MATLAB `grafic_Rez` для построения графиков результатов

#### моделирования

```
function graphic_Rez
clc, clear all, close all
Fi=[0;15;30;45;60;75;90;105;120;135;150;165;180;195;...
    210;225;240;255;270;285;300;315;330;345;360];
i_max1=[0.68;0.74;0.90;1.00;1.08;1.20;1.34;1.28;1.31;...
    1.35;1.45;1.46;1.60;1.50;1.56;1.52;1.56;1.64;1.64;...
    1.74;1.86;1.76;1.19;0.74;0.68];
Te_max1=[0.69;0.75;0.91;1.02;1.10;1.20;1.34;1.30;1.31;...
    1.35;1.45;1.45;1.58;1.50;1.55;1.51;1.54;1.63;1.62;...
    1.73;1.84;1.74;1.24;0.74;0.69];
i_max2=[0.59;0.65;0.69;0.72;0.75;0.79;0.85;0.88;0.9;...
    0.92;1.07;0.98;0.98;1.14;1.12;1.18;1.15;1.26;1.22;...
    1.33;1.31;1.31;1.33;1.36;0.59];
Te_max2=[0.59;0.66;0.7;0.73;0.76;0.79;0.86;0.88;0.9;...
    0.925;1.07;0.98;0.98;1.14;1.12;1.18;1.16;1.26;...
    1.23;1.33;1.31;1.31;1.33;1.36;0.59];
i_max3=[0.61;0.66;0.71;0.75;0.78;0.79;0.79;0.83;0.86;...
    0.88;0.90;0.93;0.95;0.97;0.98;0.98;0.98;0.85;...
    0.71;0.70;0.68;0.67;0.66;0.64;0.61];
Te_max3=[0.61;0.66;0.71;0.75;0.78;0.79;0.80;0.84;...
    0.87;0.89;0.91;0.93;0.95;0.97;0.98;0.98;0.98;...
    0.85;0.71;0.70;0.68;0.67;0.66;0.64;0.61];
df=[0.81 0.48 0.28];
imax=[max(i_max1) max(i_max2) max(i_max3)];
imin=[min(i_max1) min(i_max2) min(i_max3)];

i_max1s=FunSS(i_max1,0.3);
i_max1s=FunSS(i_max1s,0.3);
i_max1s=FunSS(i_max1s,0.3);
i_max2s=FunSS(i_max2,0.3);
i_max2s=FunSS(i_max2,0.3);
i_max2s=FunSS(i_max2s,0.3);
i_max3s=FunSS(i_max3,0.3);

hgs=plot(Fi,i_max1s,':',Fi,i_max2s,'-.',Fi,i_max3s,'-');
hold on;
hg=plot(Fi,i_max1,'x',Fi,i_max2,'x',Fi,i_max3,'x');
set(hgs(1),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);
set(hgs(2),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);
set(hgs(3),'LineWidth',3,'Color',[0 0.0 0.0]);

grid on;
ylabel('i max, о.е. ');
xlabel('Стартовый угол фазы, эл.град. ');
hl=legend('Pm=0,10 о.е.; df=0,81 Гц/с',...
    'Pm=0,06 о.е.;df=0,48 Гц/с',...
    'Pm=0,04 о.е.; df=0,28 Гц/с');
```

```

figure
hg=plot(df,imax, df,imin);
set(hg(1), 'LineWidth',3, 'Color',[0 0.0 0.0]);
set(hg(2), 'LineWidth',3, 'Color',[0 0.0 0.0]);
ylabel('i, o.e. ');
xlabel('df,  $T_{\mu}/c$  ');
grid on;

end

function YR=FunSS(Y,k)
n=length(Y);
imax=find(Y==max(Y));
imin=find(Y==min(Y));
for i=1:n-1
    if i==1
        dY(1,1)=(Y(n-1)+Y(2))/2-Y(i))*k;
        dY(n,1)=dY(1,1);
    else
        dY(i,1)=(Y(i-1)+Y(i+1))/2-Y(i))*k;
    end
end
YR=Y+dY;
YR(imax)=Y(imax);
YR(imin)=Y(imin);
end

```