

Б.Т. Кононов, Ю.А. Кусакин, А.Н. Малыш

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОТРАБОТКИ ПОСТОЯННОГО ВРЕМЕНИ ОПЕРЕЖЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Обосновываются пути повышения точности работы устройств автоматической точной синхронизации с постоянным временем опережения, основанные на использовании активных фильтров для определения скорости и ускорения скольжения. Показано, что в предлагаемом варианте формирования команды на включение более точно воспроизводится изменение угла между синхронизируемыми напряжениями в процессе синхронизации. Тем самым достигается повышение точности работы синхронизатора, уменьшаются возмущения, вносимые в процессе синхронизации в систему электроснабжения.

Ключевые слова: синхронизация синхронных генераторов, синхронизируемые напряжения, провал напряжения, броски тока, угловая частота скольжений, постоянная времени опережения, ускорение скольжения.

Введение

Постановка проблемы. Включение синхронного генератора на параллельную работу может сопровождаться бросками уравнивающего тока, провалом напряжения на шинах электростанции и длительными качаниями вплоть до возникновения явления асинхронного хода. Указанные нежелательные явления возникают при ошибочном выборе момента включения выключателя генератора при синхронизации.

Операция синхронизации является очень ответственной и требует от обслуживающего персонала соответствующей квалификации и опыта работы. В связи с этим автоматизация процесса синхронизации является актуальной задачей. Для того чтобы включение генератора, фиксируемое моментом замыкания контактов генераторного автомата, происходило при совпадении фаз синхронизируемых напряжений, подача команды на включение автоматического выключателя генератора должна подаваться с упреждением, а время опережения подачи команды $t_{оп}$ должно быть равно собственному времени срабатывания выключателя $t_{вкл}$. От того, с какой точностью выбран угол опережения подачи команды $\delta_{оп}$, т.е. фактически от того, с какой точностью выполняется условие $t_{оп} = t_{вкл}$, зависит величина угловой ошибки синхронизатора, с увеличением которой возрастают возмущения, вносимые процессом синхронизации в работу системы электроснабжения.

Анализ литературы. Для получения постоянного времени опережения в [1] предлагается команду на включение подавать в момент времени, когда величина огибающей напряжения биений U_s совпадает по величине с напряжением, пропорциональным производной от огибающей напряжения бие-

ний. Однако точность обработки постоянного времени опережения при этом оставляет желать лучшего. Покажем это. Напряжение биений в соответствии с [1, 2] представляется соотношением

$$U_s = 2U_{max} \cdot \sin \frac{\omega_s t}{2}, \quad (1)$$

где принято, что амплитуды синхронизируемых напряжений одинаковы, т.е. $U_{max1} = U_{max2} = U_{max}$;

$\omega_s = \omega_1 - \omega_2$ – угловая частота скольжений, равная разности угловых частот синхронизируемых напряжений;

t – текущее время.

В соответствии с (1) представим напряжение U_s' , пропорциональное производной от огибающей напряжения биений, следующим образом

$$U_s' = kU_{max} \cdot \omega_s \cos \frac{\omega_s t}{2}, \quad (2)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Приравняв U_s и U_s' , получим

$$2U_{max} \sin \frac{\omega_s t}{2} = kU_{max} \omega_s \cos \frac{\omega_s t}{2}. \quad (3)$$

Преобразуем (3) к виду

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_s t}{2} = \frac{k\omega_s}{2}. \quad (4)$$

Авторы [1] исходили из того факта, что при малых углах величина тангенса угла равна аргументу, т.е. что

$$\frac{\omega_s t}{2} \approx \frac{k\omega_s}{2}. \quad (5)$$

Из (5) следует, что если выбрать величину коэффициента пропорциональности k равной времени включения выключателя $t_{вкл}$, то тем самым будет обеспечено получение постоянного времени опережения.

Однако соотношение (5) справедливо лишь в зоне малых углов опережения $\delta_{оп}$, равных $\omega_s t_{вкл}$. В связи с этим соотношение (5) не выполняется даже в случаях, когда допустимая угловая частота скольжения ω_{sgon} больше одного радиана за секунду, а время включения $t_{вкл}$ больше 0,1 с. Кроме того, если $U_{max1} \neq U_{max2}$, то огибающая напряжения биений не проходит через ноль, что существенно затрудняет процедуру вычисления периода биений, а значит и определения угловой частоты биений.

Таким образом, основным недостатком решения, изложенного в [1, 2], является низкая точность работы синхронизатора.

В [3] для получения постоянного времени опережения предлагается подавать команду на включение выключателя генератора в момент времени, когда текущий угол между синхронизируемыми напряжениями будет равен расчетному $\delta_{расч}$, определяемому из соотношения

$$\delta_{расч} = \delta + \omega_{спрасч} t_{вкл} + \frac{\varepsilon_s t_{вкл}^2}{2}, \quad (6)$$

где δ – начальный угол между синхронизируемыми напряжениями;

$\omega_{спрасч} = \omega_s + \varepsilon_s t_{вкл}$ – расчетная угловая скорость скольжения;

ω_s – текущая угловая скорость скольжения;

ε_s – ускорение скольжения.

Для реализации соотношения (6) предлагается осуществлять двойное дифференцирование с целью определения частоты ω_s и ускорения ε_s скольжения. Основным недостатком устройства, реализующего зависимость (6), является низкая точность его работы, обусловленная последовательным включением фильтра и двух дифференцирующих операционных усилителей. Такая цепь имеет на своем входе большой уровень помех, поскольку первое дифференцирование отменяет операцию сглаживания, выполненную фильтром. В результате второе дифференцирование применяется фактически к исходной импульсной последовательности, что приводит к образованию больших сигналов помехи и снижает точность работы синхронизатора.

Цель статьи. Обоснование путей повышения точности обработки постоянного времени опережения в устройствах автоматической точной синхронизации.

Основная часть

Для обеспечения требуемой точности при реализации зависимости (6) желательно исключить операции дифференцирования. Предлагается [3] определять скорость и ускорение скольжения с использованием активного фильтра и преобразователя угла сдвига фаз между синхронизируемыми напряжениями в импульсную последовательность.

Рис. 1 иллюстрирует работу преобразователя угла. На временных диаграммах рис. 1 синусоиды синхронизируемых напряжений не показаны.

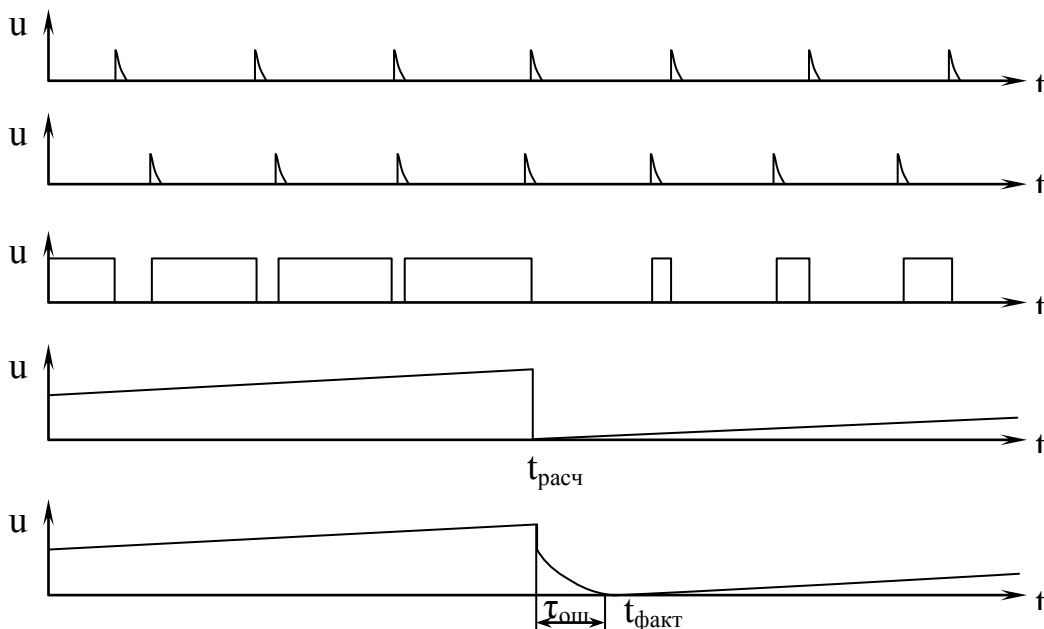


Рис. 1. Временные диаграммы работы преобразователя угла

Им соответствуют импульсные последовательности u_1 и u_2 , импульсы которых жестко привязаны по фазе к соответствующим синусоидам, а имен-

но: импульсы формируются в момент времени, когда аргументы синусоид принимают значения, кратные 2π .

Импульсная последовательность i_3 соответствует сигналу на одном из выходов триггера, являющегося выходным элементом блока преобразования угла сдвига фаз синхронизируемых напряжений в импульсную последовательность.

Импульсная последовательность подается на вход цепи (рис. 2), состоящей из трех последовательно включенных интегрирующих усилителей 2, 3, 4, охваченных обратными связями так, что их

результующая передаточная функция соответствует звену третьего порядка вида

$$W_P = \frac{K}{aP^3 + bP^2 + cP + 1}, \quad (7)$$

где K – коэффициент усиления;

a, b, c – коэффициенты при производных;

$P = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования.

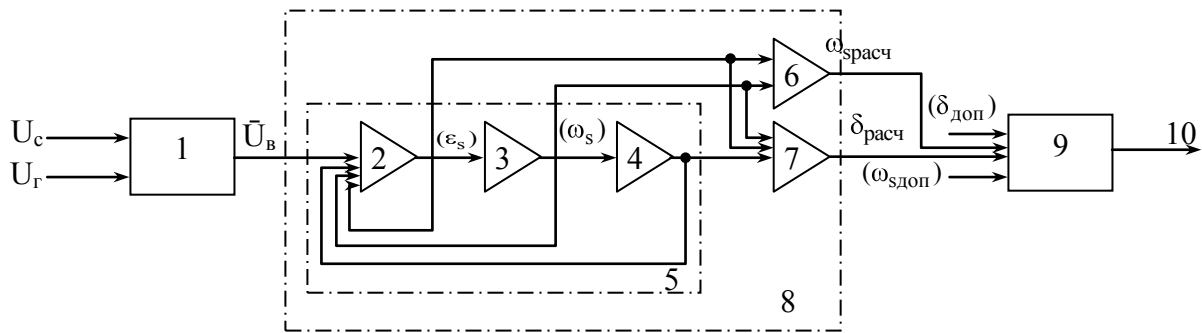


Рис. 2. Схема активного фильтра

Поскольку звено, описываемое передаточной функцией (7), имеет вполне определенную полосу пропускания, зависящую от выбора коэффициентов a, b, c , его можно рассматривать как активный фильтр. Напряжение на выходе фильтра пропорционально текущему углу сдвига фаз между синхронизируемыми напряжениями. Поскольку это напряжение является выходным напряжением третьего интегрирующего операционного усилителя, поскольку это означает, что на вход данного усилителя с выхода второго интегрирующего операционного усилителя поступает напряжение, пропорциональное угловой частоте скольжения ω_s . Рассуждая аналогично, получаем, что на вход второго интегрирующего операционного усилителя поступает напряжение, пропорциональное ускорению скольжения ϵ_s . В суммирующих операционных усилителях 6, 7 производится вычисление расчетных значений частоты скольжения и угла сдвига фаз ($\omega_{срасч}, \delta_{расч}$) для известного времени срабатывания выключателя генератора в соответствии с соотношением (6). Выходные напряжения суммирующих операционных усилителей 6, 7 вместе с напряжениями, пропорциональными $\delta_{доп}$ и $\omega_{сдоп}$, подаются на логический блок 9, который проверяет выполнение следующих условий:

$$\delta_{расч} = \delta_{доп}; \quad \omega_{срасч} \leq \omega_{сдоп}. \quad (8)$$

Если условия (8) выполняются, то логический блок подает команду на включение выключателя генератора.

Однако и в рассматриваемом варианте получе-

ния постоянного времени опережения не исключена возможность ошибки. Действительно, рабочая формула синхронизатора (6) справедлива в предположении, что напряжение на выходе третьего интегрирующего операционного усилителя изменяется по пилообразному закону в соответствии с диаграммой, показанной на рис. 1 (напряжение i_4).

При этом скачок напряжения в момент времени $t_{расч}$ соответствует совпадению входных напряжений по фазе, т. е. переходу текущего угла сдвига фаз δ от 2π до 0. Фактически же сигнал на выходе третьего интегрирующего операционного усилителя изменяется во времени так, как это показано на временной диаграмме (напряжение i_5 на рис. 1). Поскольку фильтр реагирует только на появление или исчезновение сигнала на его входе, постольку установление напряжения в ноль на его входе произойдет в момент $t_{факт}$, когда во входной импульсной последовательности скачком уменьшится длительность импульса. В результате этого фиксация момента перехода угла δ от 2π до 0 произойдет с ошибкой $\tau_{осн}$. При больших частотах скольжения ω_s , когда период скольжения T_s мал, величины $\tau_{осн}$ и T_s оказываются соизмеримыми, а построение расчетного угла $\delta_{расч}$ происходит в зоне $\tau_{осн}$. Это приводит к появлению ошибки в подаче команды на включение выключателя генератора, а тем самым снижает точность работы синхронизатора. Для исключения этой ошибки предлагается использовать дифференциальную схему, в соответствии с

которой необходимо применять не один активный фильтр, а два, в каждом из которых определять соответственно, угловую частоту и угловое ускорение каждого из синхронизируемых напряжений. Определение же угла сдвига фаз синхронизируемых напряжений, угловой частоты и ускорения скольжения следует выполнять путем вычисления рассчитанных значений ω_s и ε_s исключая при этом систематическую ошибку, связанную с запаздыванием.

Реализация изложенного решения описана в

[4]. Соответствующая схема синхронизатора приведена на рис. 3, а временные диаграммы, иллюстрирующие его работу, приведены на рис. 4. Временные диаграммы построены для варианта, когда $\varepsilon = 0$, что принято для простоты. В моменты времени, соответствующие переходу синхронизируемых напряжений через ноль при фазовых углах, кратных 2π , на выходах формирователей импульсов 3, 3' (рис. 3) появляются прямоугольные импульсы эталонной амплитуды U_{m3} и эталонной длительности τ_3 .

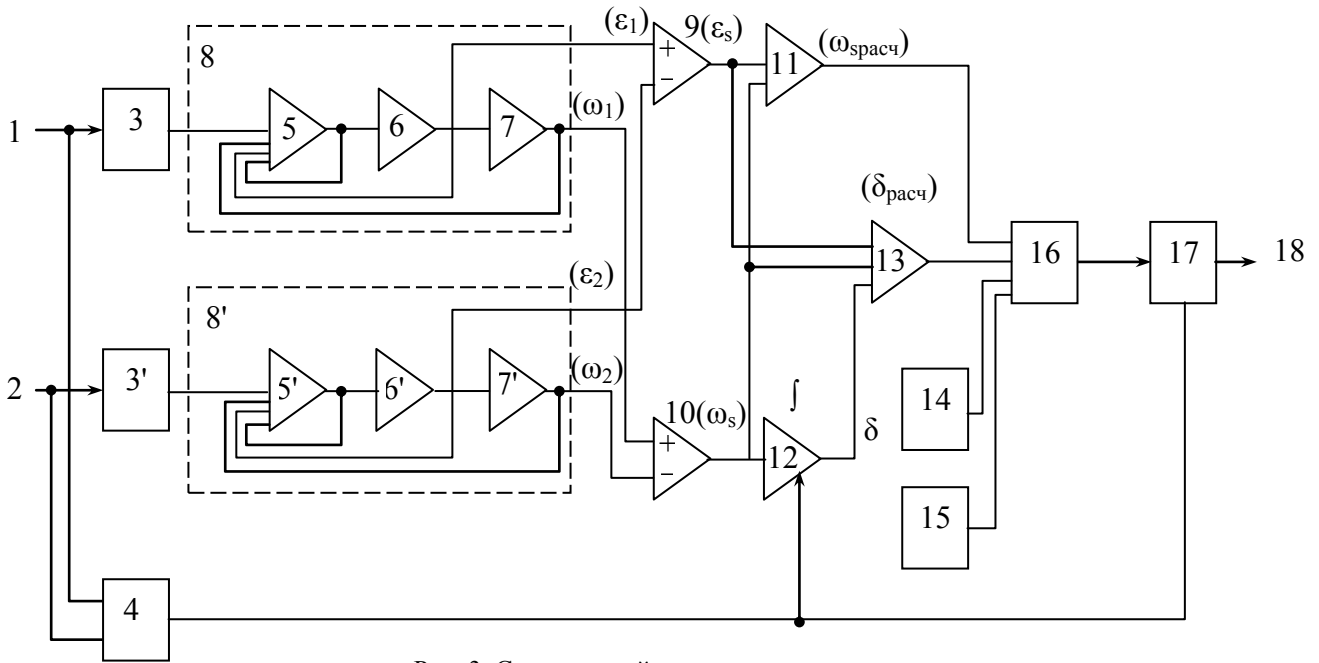


Рис. 3. Схема устройства синхронизации

В активных фильтрах 8, 8' последовательно этих импульсов преобразуются в напряжения U_7 и U_7' , средние значения которых U_{f1} и U_{f2} пропорциональны частотам f_1, f_2 синхронизируемых напряжений u_1 и u_2 :

$$U_{f1} = K_1 U_{m3} \frac{t_3}{T_1} = K_1 U_{m3} \tau_3 f_1 = K' \cdot f_1;$$

$$U_{f2} = K_1 U_{m3} \frac{\tau_3}{T_2} = K_1 U_{m3} \tau_3 f_2 = K' f_2, \quad (10)$$

где K_1 – коэффициент усиления фильтра 8, 8';
 T_1, T_2 – периоды синхронизируемых напряжений;

K' – коэффициент пропорциональности.

Из напряжений U_{f1} и U_{f2} во втором суммирующем операционном усилителе (10) формируется сигнал, пропорциональный угловой частоте скольжения

$$U_{\omega_s} = K_{10} U_{f1} - U_{f2} = K_{\omega} \cdot \omega_s, \quad (11)$$

где K_{10} – коэффициент усиления суммирующего операционного усилителя 10;

K_{ω} – коэффициент пропорциональности.

Аналогичным образом на выходе суммирующего операционного усилителя 9 получается напряжение U_{ε_s} , пропорциональное ускорению скольжения ε_s , с той лишь разницей, что входы этого операционного усилителя подключены к предоконечным выходам фильтров 8 и 8', где существуют сигналы U_6, U_6' пропорциональные ускорениям ε_1 и ε_2 :

$$U_{\varepsilon_s} = K_9 U_6 - U_6' = K_{\varepsilon} \varepsilon_s, \quad (12)$$

где K_9, K_{ε} – соответствующие коэффициенты усиления.

В результате интегрирования сигнала U_{ω_s} в интегрирующем операционном усилителе 12 на его выходе получается напряжение U_{δ} , пропорциональное текущему углу сдвига фаз

$$U_{\delta} = K_{\delta} \cdot \delta. \quad (13)$$

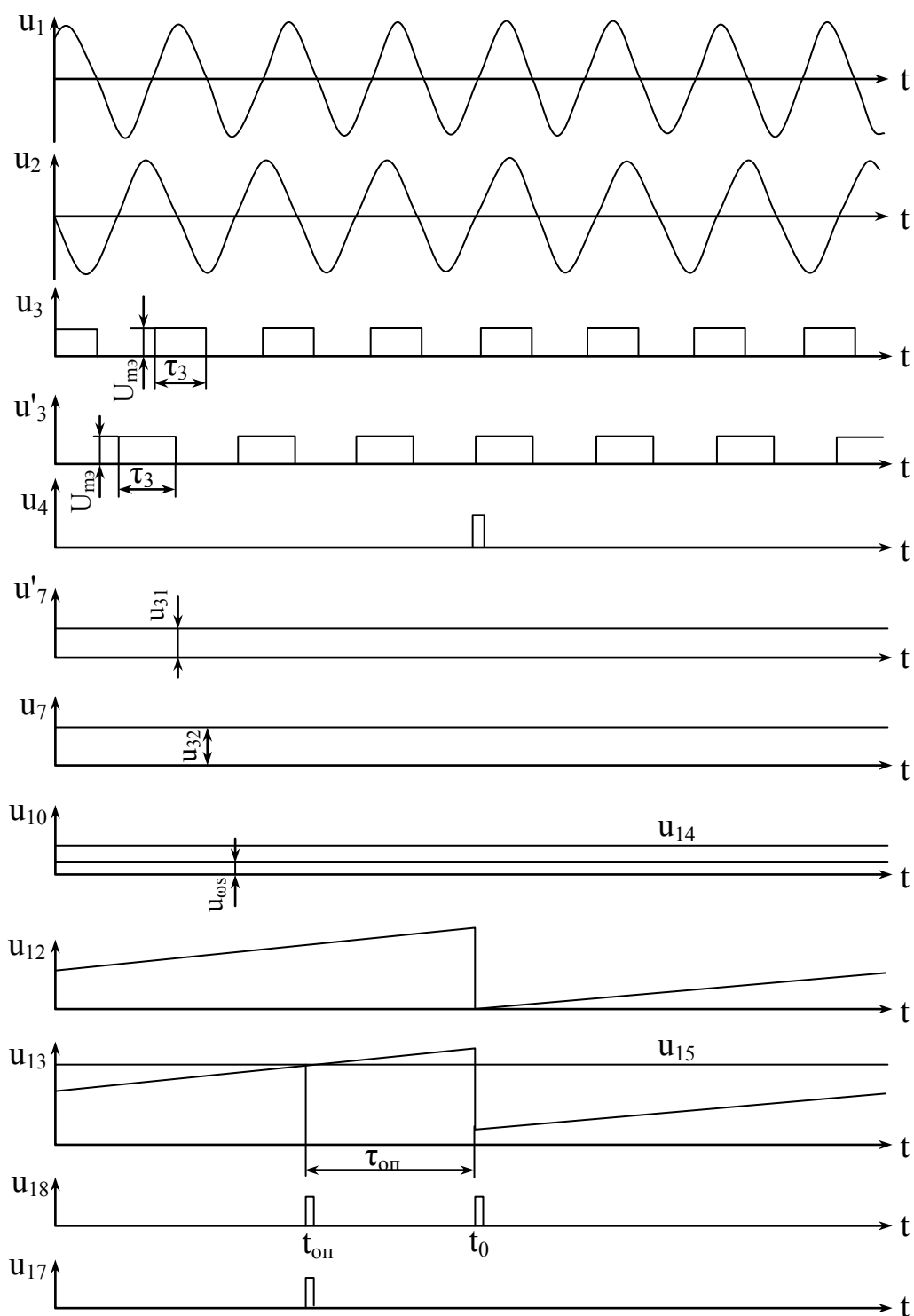


Рис. 4. Временные диаграммы работы синхронизатора

Для уменьшения ошибки, обусловленной дрейфом нулей интегрирующих операционных усилителей 5, 5', 6, 6', 7, 7', 12, а также для уменьшения ошибки, вызываемой погрешностями в настройке коэффициентов усиления K_1 и K_2 , периодически, в моменты совпадения напряжений u_1 и u_2 по фазе, импульсом с блока контроля 4 совпадения напряжений по фазе производится обнуление

интегрирующего операционного усилителя 12. В суммирующих операционных усилителях 11 и 13 производится вычисление $\omega_{расч}$ и $\delta_{расч}$ в соответствии с зависимостью 6. Логический блок (6) контролирует выполнение условий (8) и, если они выполняются, в момент совпадения $\delta_{расч}$ с $\delta_{доп}$ (этому моменту соответствует пересечение пилообразной прямой u_{13} с горизонтальной прямой u_{15}

рис. 4) формирует импульсы u_{18} на включение выключателя 18. В течение одного периода биений таких импульсов формируется два. Один из них соответствует моменту времени $t_{он}$, когда $\delta = \delta_{он}$, и должен рассматриваться как истинный. Другой, формируемый в момент времени t_0 , когда угол δ проходит от 2π к 0, является помехой. Для выделения истинного импульса используется элемент запрета 17, в котором прохождение импульса – помехи блокируется подачей на запрещающий вход элемента запрета импульса с выхода блока 4 контроля совпадения напряжений по фазе.

Таким образом, в предлагаемом синхронизаторе обеспечивается такой вариант формирования напряжения, пропорционального углу δ , который более точно воспроизводит изменение угла между синхронизируемыми напряжениями в процессе синхронизации. Тем самым достигается повышение точности работы синхронизатора и, значит, уменьшение возмущений, вносимых в процессе синхронизации в систему электроснабжения.

Выводы

1. Известные способы формирования постоянного времени опережения, основанные на использовании огибающей напряжения биений, не позволяют обеспечить требуемую точность при определении момента подачи команды на включение выключателя генератора.

2. Для избегания ошибок в определении расчетного угла опережения при синхронизации синхронных генераторов, связанных с необходимостью

двукратного дифференцирования для вычисления скорости и ускорения скольжения, целесообразно применять активные фильтры, состоящие из соответствующих образом включенных интегрирующих операционных усилителей.

3. Для исключения систематической ошибки, связанной с запаздыванием момента фиксации перехода угла между синхронизируемыми напряжениями от 2π до 0, необходимо в логических блоках синхронизаторов использовать дифференциальную схему включения активных фильтров.

Список литературы

1. Беркович М.А. Автоматика энергосистем / М.А. Беркович, В.А. Гладышев, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
2. Константинов В.Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов / В.Н. Константинов. – Л.: Судостроение, 1978. – 378 с.
3. АС СССР №940269 СССР от 16.12.1980 по классу Н 02 j 3/42. Синхронизатор с постоянным временем опережения / Н.И. Григоров, Б.Т. Кононов, С.А. Павлов, А.Е. Церковный; опубликовано 30.06.1982 г. БН №24, 1982.
4. АС СССР № 1771034 от 30.05.1990 по классу Н 02 j 3/42 Синхронизатор с постоянным временем опережения / П.А. Гамов, Н.И. Григоров, Б.Т. Кононов, А.Е. Церковный; опубликовано 23.10.1992 г., БН № 39, 1992.

Поступила в редколлегию 10.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Чинков, Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПОСТІЙНОГО ЧАСУ ВИПЕРЕДЖЕННЯ В ПРИСТРОЯХ АВТОМАТИЧНОЇ ТОЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ

Б.Т. Кононов, Ю.А. Кусакін, О.М. Малиш

Обґрунтовуються шляхи підвищення точності роботи пристроїв автоматичної точної синхронізації з постійним часом випередження, засновані на використанні активних фільтрів для визначення швидкості і прискорення ковзання. В синхронізаторі, який пропонується до уваги, забезпечується формування керуючої напруги, яка найбільш точніше відтворює зміну кута між напругами, які синхронізуються. Тим самим досягається підвищення точності роботи синхронізатора, зменшую збурення, що вносяться в процесі синхронізації в систему електропостачання.

Ключові слова: синхронізація синхронних генераторів, синхронізуємі напруги, провал напруги, кидки струму, кутова частота ковзання, постійна часу випередження, прискорення ковзання.

INCREASE OF EXACTNESS OF WORKING OFF PERMANENT TIME OF PASSING IN DEVICES OF AUTOMATIC EXACT SYNCHRONIZATION

B.T. Kononov, Yu.A. Kusakin, A.N. Malysh

The ways of increase of exactness of work of devices of automatic exact synchronization are grounded with permanent time passing, based on the use of active filters for determination of speed and acceleration of sliding. The variant of forming of managing tension is provided in the offered synchronizer, which more exactly reproduces the change of corner between the synchronized tensions in the process of synchronization. The increase of exactness of work of synchronizer is the same arrived at, diminishing indignations, brought in in the process of synchronization in the system of power supply.

Keywords: synchronization of synchronous generators, synchronized tensions, failure of tension, throws of current, angular frequency of sliding, permanent time of passing, acceleration of sliding.