

НОВЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ВРЕМЕНИ ОПЕРЕЖЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ ТОЧНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

д.т.н., проф. Б.Т. Кононов, А.Н. Малыш

В статье рассматриваются новые способы получения постоянного времени опережения, основанные на прямом способе измерения параметров синхронизации.

Постановка проблемы. Процесс включения генераторов на параллельную работу должен осуществляться таким образом, чтобы в системе электроснабжения не возникали возмущения, которые оказывают негативное влияние на работу, как источников, так и потребителей электроэнергии. При этом для обеспечения устойчивости генераторов их включение на параллельную работу должно производиться с соблюдением определенных требований, называемых начальными условиями синхронизации. Эти требования ограничивают значение угла включения, скорости скольжения и неодинаковости амплитуд синхронизируемых напряжений при синхронизации. Кроме начальных условий синхронизации необходимо учесть инерционность выключателя генератора, определяемую собственным временем его включения. Этот фактор обычно учитывают, подавая команду на включение выключателя генератора либо с постоянным углом опережения, либо с постоянным временем опережения. В первом варианте подачи команды величина угла опережения постоянна, во втором – переменна и определяется фактическим значением угловой частоты скольжения. При получении постоянного времени опережения необходимо стремиться к тому, чтобы угловая ошибка при синхронизации, т.е. точность отработки угла включения обеспечивала исключение случаев неправильного включения генераторов, а само значение угловой ошибки не превысило допустимого значения.

Точность отработки команды при синхронизации в условиях переменной угловой частоты скольжения во многом определяется способом измерения начальных параметров синхронизации.

Анализ литературы. В настоящее время, как правило, при синхронизации используется косвенный способ измерения [1], основанный на использовании информации, содержащейся в напряжении биения. Однако в случае неодинаковости амплитуд синхронизируемых напряжений ошибки при измерении угла включения и угловой частоты скольжения превышают допустимые значения. Для парирования последствий ошибок, вызываемых

неодинаковостью амплитуд синхронизируемых напряжений, в [2 – 4] предлагается определять первую и вторую производные по углу и вычислять расчетный угол включения с учетом результатов дифференцирования. Однако трудности, связанные с технической реализацией операции дифференцирования, сводят практически на нет возможности по обеспечению требуемой точности получения постоянного угла опережения.

В [5 – 11] описаны новые технические решения, связанные с получением необходимой точности при построении постоянного времени опережения. Детальному изложению новых технических решений и служит настоящая статья.

Цель статьи. Описание новых способов получения постоянного времени опережения, обеспечивающих требуемую точность формирования команды на включение выключателя генератора при синхронизации.

1. Конечно-разностный способ. По этому способу команду подают в момент времени, когда текущее значение угла сдвига фаз становится равным расчетному значению, т.е. тогда, когда выполняется следующее равенство

$$\delta + t_{\text{вкл}} \frac{d\delta}{dt} = 0 . \quad (1)$$

Перейдем от дифференциального уравнения (1) к конечно-разностному уравнению

$$\delta_1 + \frac{\delta_1 - \delta_2}{T_M} t_{\text{вкл}} = 0 , \quad (2)$$

где δ_1 и δ_2 – два последовательные значения угла, измеренные спустя время, равное периоду меньшей частоты T_M .

Введя обозначение, $K_1 = \frac{t_{\text{вкл}}}{T_M}$, запишем (2) в виде

$$\delta_1 (1 + K_1) - K_1 \delta_2 = 0 . \quad (3)$$

Из (3) следует, что если сформировать команду в момент времени, когда текущее значение угла δ_2 станет равным расчетному, определенному из равенства

$$\delta_2 = \delta_1 \frac{1 + K_1}{K_1} , \quad (4)$$

то тем самым будет получено постоянное время опережения.

2. Временной способ получения постоянного времени опережения. По этому способу сравнивают между собой длительности τ_1 и τ_2 двух последовательных отрезков времени между импульсами, сформированными

ми в начале периода синусоидальных напряжений сети и генератора.

В системе отсчета импульсов большой частоты T_B величины углов δ_1 и δ_2 , соответствующие отрезкам времени τ_1 и τ_2 , равны:

$$\delta_1 = 2\pi \frac{\tau_1}{T_B}; \quad \delta_2 = 2\pi \frac{\tau_2}{T_B}. \quad (5)$$

Угловая частота скольжения ω_s равна

$$\omega_s = \frac{\delta_1 - \delta_2}{T_B} = \frac{2\pi}{T_B} = (\tau_1 - \tau_2). \quad (6)$$

Время опережения определяется следующим образом:

$$t_{оп} = \frac{\delta_2}{\omega_s} = \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} T_B. \quad (7)$$

Для формирования команды со временем опережения $t_{оп}$, равным времени включения $t_{вкл}$, необходимо, чтобы величина τ_2 определялась из соотношения

$$\tau_2 = \frac{\Phi}{t_{вкл} + T_B} t_{вкл}. \quad (8)$$

В соответствии с условием (8) для получения постоянного времени опережения необходимо последовательно определять длительность отрезков τ_1 и τ_2 и сравнивать их друг с другом. В реверсивном счетчике необходимо записать число N_1 , пропорциональное τ_1 , и считывать число N_1 на протяжении отрезка времени τ_2 с частотой следования импульсов в $(t_{вкл} + T_B)/t_{вкл}$ раз большей, чем частота записи.

Если по истечении времени τ_2 считывание числа N_1 не закончено, то должна подаваться команда на включение выключателя генератора.

3. Импульсный способ получения постоянного времени опережения. Постоянное время опережения можно получить, формируя в момент перехода через нуль синусоидальных напряжений, управляющие основные и вспомогательные импульсы (рис. 1).

Управляющие импульсы $1, 1'$ привязаны по фазе к нулю синусоиды, основные импульсы $2, 2'$ своим передним фронтом привязаны к переднему фронту управляющих импульсов, а вспомогательные импульсы $3, 3'$ своим передним фронтом привязаны к заднему фронту основных импульсов $2, 2'$.

Основные и вспомогательные импульсы имеют одинаковую длительность $\Phi_0 = \Phi_0' = \Phi_B = \Phi_B' = \Phi$. Пакет импульсов большей частоты своим управляющим импульсом 1' надвигается на пакет импульсов меньшей частоты со стороны заднего фронта вспомогательного импульса 3.

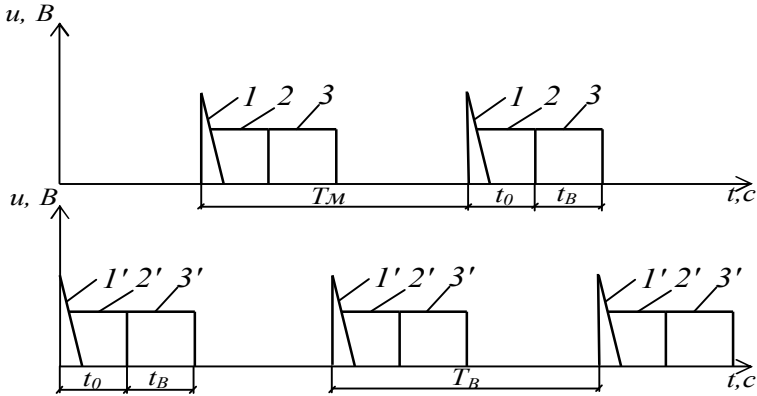


Рис. 1. Импульсный способ получения постоянного времени опережения

Основные и вспомогательные импульсы имеют одинаковую длительность $\Phi_0 = \Phi_0' = \Phi_B = \Phi_B' = \Phi$. Пакет импульсов большей частоты своим управляющим импульсом 1' надвигается на пакет импульсов меньшей частоты со стороны заднего фронта вспомогательного импульса 3. Совпадения импульсов 1' и 3 используются для оценки разности частот, а совпадения импульсов 1' и 2 – для получения постоянного времени опережения. Оценка скольжения, как и у синхронизатора с постоянным углом опережения, производится по числу совпадений N импульсов 1' и 3. Для N справедливо равенство

$$N = \frac{\tau}{\Delta T} = \frac{\tau}{T_M - T_B} = \tau \frac{f_M f_B}{f_s}. \quad (9)$$

В процессе синхронизации значения f_M и f_B изменяются не более чем на 5 % по сравнению с номинальным значением, в связи с чем произведение $\tau f_M f_B$ можно считать величиной постоянной и равной K . В связи с этим число совпадений N есть функция только частоты скольжения

$$N = \frac{K}{f_s}. \quad (10)$$

Условие на разрешение синхронизации $f_s \leq f_{s_{\text{доп}}}$ с учетом (10) формируется так

$$N \geq N_{\text{доп}} = \frac{K}{f_{s_{\text{доп}}}} . \quad (11)$$

Постоянное время опережения обрабатывается в момент очередного совпадения импульсов 1' и 2 при условии, что число предыдущих совпадений равно

$$\Delta N = N - N_{\text{доп}} . \quad (12)$$

Условие (12) означает, что от момента подачи команды до момента совпадения импульсов 1' и 1 осталось постоянное число совпадений $N_{\text{доп}}$. Время опережения будет равно произведению этого остатка на длительность периода меньшей частоты

$$t_{\text{оп}} = N_{\text{доп}} T_M = \frac{\tau f_M f_B}{f_{s_{\text{доп}}}} T_M = \frac{\tau f_B}{f_{s_{\text{доп}}}} \approx \text{const} . \quad (13)$$

В синхронизаторе при совпадении импульсов 1' и 3 определяют число совпадений $N_{\text{доп}}$, а затем определяют остаток совпадений ΔN импульсов 1' и 3 и записывают этот остаток в счетчик. Считывание числа, записанного в счетчик, начинается с момента совпадений импульсов 1' и 2. Постоянное время опережения обрабатывается в момент завершения считывания остатка ΔN в счетчике.

4. Дискретный способ получения постоянного времени опережения. По этому способу сравниваются текущие значения разности фаз, представленные в дискретной форме и измеренные в течение каждого периода синхронизируемых напряжений, с приращением этой разности. Для определения величины угла формируются импульсы, запускаемые в момент перехода через нуль напряжения меньшей частоты и сбрасываемые в момент перехода через нуль напряжения большей частоты. Длительности импульсов τ_i в соответствии с рис. 2 равны:

$$\tau_1 = t_{1r} - t_{1c}; \quad \tau_2 = t_{2r} - t_{2c}; \quad \tau_i = t_{ir} - t_{ic} . \quad (14)$$

Между моментами t_2 и t_1 существует очевидная связь:

$$t_{2c} = t_{1c} + \frac{T_c}{2}; \quad t_{2r} = t_{1r} + \frac{T_r}{2} . \quad (15)$$

Отрезки τ_i и τ_{i+1} эквивалентны величинам текущих углов сдвига фаз,

а разность между τ_i и τ_{i+1} пропорциональна частоте скольжения f_s :

$$\tau_i - \tau_{i+1} = t_{(i+1)c} - t_{ic} - (t_{(i+1)r} - t_{ir}) = \frac{T_c}{2} - \frac{T_r}{2} = \frac{f_s}{2f_r f_c}. \quad (16)$$

Постоянное время опережения обрабатывается, когда равны числа в двух счетчиках, один из которых заполняется с частотой f , а другой – спустя половину периода меньшей частоты с частотой $f + f/a$. Сравнивая число $N_i = \tau_i f$ с числом $N_{i+1} = \tau_{i+1} (f + f/a)$, получаем в момент их равенства

$$\tau_i - \tau_{i+1} = \frac{N_i}{f} - \frac{N_{i+1}}{f + \frac{f}{a}} = \frac{N_i}{f(1+a)}. \quad (17)$$

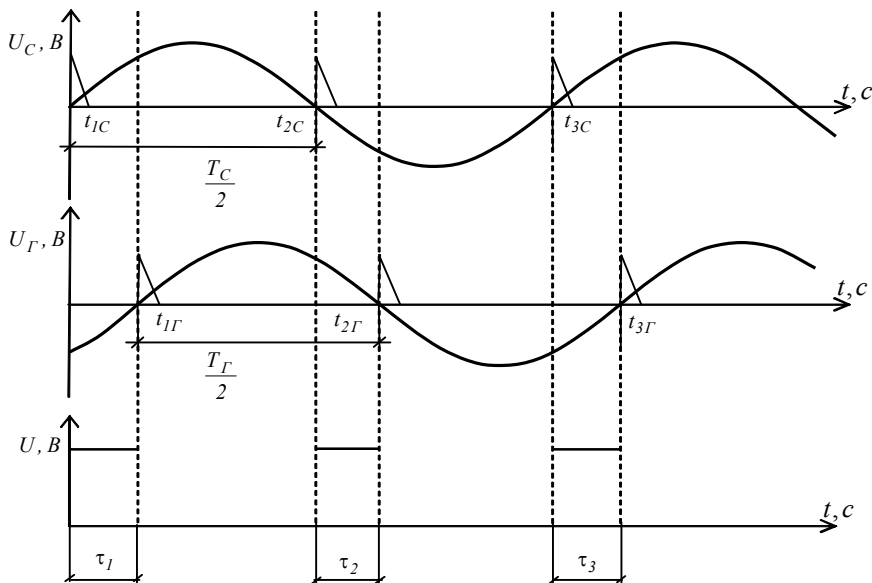


Рис. 2. Дискретный способ формирования постоянного времени опережения

Сопоставляя (16) и (17), найдем

$$N_i = \frac{f_s f(1+a)}{2f_r f_c} = k f_s, \quad (18)$$

где $K = \frac{f(1+a)}{2f_r f_c}$ – практически постоянный коэффициент, величина которого может быть выбрана равной времени опережения.

5. Задержка и сдвиг по фазе синхронизируемых напряжений. По этому способу необходимо задержать импульсы с меньшей частотой следования на два значения времени, одно из которых больше другого в два раза. В момент совпадения задержанных импульсов с импульсами большей частоты необходимо сформировать новые импульсные последовательности, первая из которых задерживается на время срабатывания выключателя генератора, а вторая – на время, определяемое измеренным временем между задержанным первым и вторым, сформированным импульсами меньшей частоты. Задержкой импульсов на два значения времени достигается их сдвиг по фазе в сторону отставания на углы α_1 и α_2 , равные:

$$\alpha_1 = 2\pi \frac{\tau_1}{T_M}; \quad \alpha_2 = 2\pi \frac{\tau_2}{T_M}. \quad (19)$$

Задержка импульса, получаемого в момент совпадения импульсных последовательностей напряжения большей частоты и напряжения меньшей частоты, сдвинутого по фазе на угол α_2 , эквивалентна сдвигу по фазе на угол β_1 , равный $\omega_s t_{\text{вкл}}$.

В синхронизаторе производится измерение отрезка времени между моментом формирования импульса, задержанного на время $t_{\text{вкл}}$, и моментом совпадения импульсов большей частоты U_B со сдвинутыми на угол α_1 импульсами меньшей частоты. Этому отрезку времени эквивалентен угол γ_1 , равный

$$\gamma_1 = \alpha_2 - \alpha_1 - \beta_1. \quad (20)$$

Команда на включение подается после момента совпадения импульсов большей частоты и сдвинутых на угол α импульсов меньшей частоты спустя отрезок времени, необходимый для отработки угла γ_1 . Величина угла сдвига фаз β_2 к моменту подачи команды равна

$$\beta_2 = \alpha_1 - \gamma_1 = \alpha_1 - (\alpha_2 - \alpha_1 - \beta_1) = 2\alpha_1 - \alpha_2 + \beta_1. \quad (21)$$

Из условия работы синхронизатора ясно, что $\alpha_1 > \beta_2 = \beta_1$, т.е.

$$\frac{2\pi\tau_1}{T_M} > 2\pi t_{\text{вкл}} f_s \quad \text{и} \quad \tau_1 > \frac{f_s}{f_M} t_{\text{вкл}}. \quad (22)$$

Выражение (22) определяет правило выбора временной задержки снизу. В связи с тем, что величина угла α_1 должна быть меньше 180° , величина τ_1 должна быть меньше $\frac{T_M}{2}$, т.е. $\alpha_1 < \frac{T_M}{2}$. Это неравенство определяет правило выбора временной задержки сверху. Граница сверху огра-

ничивает возможный диапазон углов включения, а значит и возможных значений $\omega_{\text{с доп}}$ и $t_{\text{вкл}}$ величинами, определяемыми из следующего неравенства

$$\omega_{\text{с}} t_{\text{вкл}} < \pi. \quad (23)$$

6. Сдвиг по фазе одного из синхронизируемых напряжений. По этому способу напряжение меньшей частоты сдвигают в сторону отставания на угол, пропорциональный скольжению синхронизируемых напряжений и времени включения.

Команду на включение подают в момент совпадения напряжения большей частоты со сдвинутым по фазе напряжением меньшей частоты. Поскольку напряжение меньшей частоты сдвинуто в сторону отставания на угол Θ , равный

$$\Theta = \omega_{\text{с}} t_{\text{вкл}}, \quad (24)$$

то от момента совпадения напряжений $U_{\text{Б}}$ и $U_{\text{М}}$ время постоянно и равно времени включения выключателя генератора.

Рассмотренный способ имеет недостатки, связанные с ограничением по выбору возможных значений $\omega_{\text{с доп}}$ и $t_{\text{вкл}}$, а также связанные с низкой точностью отработки угла опережения при малых угловых скоростях скольжения.

7. Сдвиг по фазе каждого из синхронизируемых напряжений. По этому способу каждое напряжение сдвигается в сторону отставания на угол, пропорциональный скольжению данного напряжения по отношению к фиксированной частоте, общей для обоих напряжений и заведомо большей любой из них, т.е.

$$\alpha_{\text{М}} = t_{\text{вкл}} (\omega_{\text{о}} - \omega_{\text{М}}); \quad \alpha_{\text{Б}} = t_{\text{вкл}} (\omega_{\text{о}} - \omega_{\text{Б}}). \quad (25)$$

Команда на включение подается в момент совпадения сдвинутых по фазе напряжений $U_{\text{Б}}'$ и $U_{\text{М}}'$, когда угол между ними будет равен

$$\alpha_{\text{М}} - \alpha_{\text{Б}} = t_{\text{вкл}} (\omega_{\text{Б}} - \omega_{\text{М}}) = t_{\text{вкл}} \omega_{\text{с}}. \quad (26)$$

Тем самым обеспечивается отработка постоянного времени опережения.

Выводы. 1. Рассмотренные способы получения постоянного времени опережения позволяют обеспечить практически безошибочное формирование команды на включение выключателя генератора при синхронизации таким образом, чтобы к моменту замыкания контактов выключателя синхронизируемые напряжения совпали по фазе. При этом процесс включения синхронных генераторов на параллельную работу происходит без поворота роторов включаемых агрегатов, а в системе электроснабжения

поддерживаются требуемые показатели качества электрической энергии.

2. При выборе того или иного способа получения постоянного времени опережения при синхронизации следует учитывать ограничения, накладываемые допустимыми значениями начальных параметров синхронизации $\omega_{s_{доп}}$ и $f_{s_{доп}}$, и исходить из требований по ускорению собственно процесса синхронизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самойленко Б.Ф., Кононов Б.Т., Григоров Н.И., Михайловский В.Г., Пушкин П.М., Грива Б.И., Коврига А.И. Системы управления электроснабжением и электроприводом. Учебник. – М.: МО СССР, 1990. – 414 с.
2. Панфилов Н.И., Сиротинский Е.Л. Повышение качества точной синхронизации генераторов // *Электричество*. – 1981. – № 1. – С. 17 – 21.
3. Сиротинский Е. Л., Вострокнутов Н.Н. Новый принцип получения постоянного времени опережения в автоматических синхронизаторах // *Электричество*. – 1961. – № 8.
4. Панфилов Н.И., Пицугин В.Г., Сиротинский Е.Л., Соковцев В.И. // *Энергетик*. – 1979. – № 12.
5. АС СССР № 454634, Б.Т. Кононов, А.Е. Церковный. Способ получения постоянного времени опережения. Опубликовано в БИ № 48 1974 г.
6. АС СССР № 705598, Б.Т. Кононов, А.С. Виксман, Н.И. Григоров. Синхронизатор с постоянным временем опережения. Опубликовано в БИ № 45 1979 г.
7. АС СССР № 736267, Б.Т. Кононов, И.Д. Бухтияров, В.З. Ройн. Цифровой синхронизатор. Опубликовано в БИ № 47 1979 г.
8. АС СССР № 739688, Б.Т. Кононов, Н.И. Григоров, А.Е. Церковный. Импульсный синхронизатор. Опубликовано в БИ № 21 1980 г.
9. АС СССР № 739688, Б.Т. Кононов, Н.И. Григоров, А.Е. Церковный. Синхронизатор с постоянным временем опережения. Опубликовано в БИ № 24 1982 г.
10. АС СССР № 1224900, Б.Т. Кононов, А.С. Виксман, Н.И. Григоров. Импульсный синхронизатор. Опубликовано в БИ № 14 1986 г.
11. АС СССР № 739688, Б.Т. Кононов, Н.И. Григоров, Б.Ф. Самойленко. Синхронизатор с постоянным временем опережения Опубликовано в БИ № 42 1992 г.

Поступила 21.02.2003

КОНОНОВ Борис Тимофеевич доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Харьковского военного университета. В 1962 году окончил Львовский политехнический институт. Область научных интересов – электроснабжение, моделирование, автоматизация, установки гарантированного питания.

МАЛЫШ Александр Николаевич, адъюнкт очной адъюнктуры при Харьковском военном университете. В 2001 году окончил командно-штабной факультет Харьковского военного университета. Область научных интересов – электроснабжение.